

การจัดสรรเส้นทางเชิงความยาวคลื่นและการป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
บนโครงข่าย WDM สำหรับโทรภาพิกชนิตมัลติคาสต์



นางสาววรางรัตน์ วัฒนวรากุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2863-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WAVELENGTH ROUTING AND NETWORK PROTECTION APPROACHES
AGAINST SINGLE LINK FAILURES FOR MULTICAST TRAFFIC ON WDM NETWORKS



Miss Warangrat Wathanawarakun

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 974-53-2863-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจัดสรรเส้นทางเชิงความยาวคลื่นและการป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงบนโครงข่าย WDM สำหรับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์

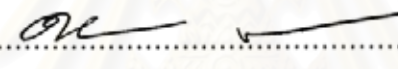
โดย นางสาววรางรัตน์ วัฒนวรากุล

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ

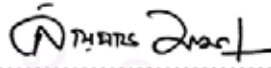
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศักดิ์ เสกขุนทด

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

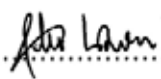
 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล)

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ)

 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.ศักดิ์ เสกขุนทด)

 กรรมการ
(อาจารย์ สุวิทย์ นาคพิระยุทธ)

 กรรมการ
(อาจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง)

วารสารรัตน์ วัฒนวรารกุล : การจัดสรรเส้นทางเชิงความยาวคลื่นและการป้องกันโครงข่าย จากความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงบนโครงข่าย WDM สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (WAVELENGTH ROUTING AND NETWORK PROTECTION APPROACHES AGAINST SINGLE LINK FAILURES FOR MULTICAST TRAFFIC ON WDM NETWORKS) อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ลัญจกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ, อ. ที่ปรึกษาร่วม: ดร.ศักดิ์ เสกขุนทด, 154 หน้า. ISBN 974-53-2863-4

วิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาสองปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งของโครงข่าย WDM ที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ ปัญหาแรกที่วิทยานิพนธ์ศึกษาคือ ปัญหาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ของโครงข่าย WDM และปัญหาที่สองที่วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาคือ ปัญหาการป้องกันโครงข่าย WDM จากความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยเป็นการศึกษาการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลบหลีกข่ายเชื่อมโยงที่ขัดข้อง ซึ่งวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ได้ศึกษามีด้วยกัน 3 วิธีได้แก่ วิธีต้นทุนต่ำสุด (MC) วิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียว (OLR) และวิธีใช้วงแหวนสองทิศทาง (TLR) โดยทั้งสองปัญหามีวัตถุประสงค์ในการศึกษาคือ เพื่อพิจารณาและเปรียบเทียบวิธีการออกแบบโครงข่าย WDM ในด้านของจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ ความซับซ้อนของแบบจำลอง รวมทั้งความยากง่ายในการจัดการควบคุมโครงข่าย ยิ่งไปกว่านั้น วิทยานิพนธ์นี้ยังวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสงหนึ่งเส้น รวมไปถึงลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายว่ามีผลอย่างไรต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของระบบ ดังนั้น เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ จะใช้ Integer linear programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลเฉลยที่ได้สามารถรับประกันได้ว่าเป็นผลเฉลยที่ดีที่สุด กล่าวคือ จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายจะมีค่าต่ำสุด

จากการวิเคราะห์ผลเฉลยสามารถสรุปได้ว่า การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี MC เป็นวิธีการที่ต้องการเส้นใยนำแสงต่ำสุด ถัดมาได้แก่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR และ OLR ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR และ OLR จะขึ้นอยู่กับลักษณะของทราฟฟิกในสภาวะปกติ และความสามารถของโครงข่ายในการรวมช่องสัญญาณทำงานและช่องสัญญาณสำรองไว้ในเส้นใยนำแสงเดียวกัน

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2548.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4670724921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: WDM / MULTICAST / MC-RWA / PROTECTION / RING

WARANGRAT WATHANAWARAKUN: WAVELENGTH ROUTING AND NETWORK PROTECTION APPROACHES AGAINST SINGLE LINK FAILURES FOR MULTICAST TRAFFIC ON WDM. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ, Ph.D., THESIS COADVISOR: SAK SEGKHOONTHOD, Ph.D., 154 pp. ISBN 974-53-2863-4

This thesis studies two significant problems of optical WDM networks on which multicast traffic is supported. Firstly, the multicast routing and wavelength assignment (MC-RWA) problem that refers to as the problem of routing multicast traffic and assigning wavelengths to it on WDM networks is analyzed. Secondly, the problem of multicast optical protection, which refers as the problem of provisioning protection systems to multicast traffic on WDM mesh networks, is investigated. In this thesis, three protection schemes are proposed: Minimal Cost approach (MC), One way Light Ring approach (OLR), and Two way Light Ring approach (TLR).

To consider and compare those two problems, the key aspects include fiber requirement, fiber utilization, and complexity of network operation and management are investigated. Moreover, the influences of the maximal wavelengths multiplexed per fiber and wavelength conversion on fiber requirements are also shown in this thesis. Integer linear programming, ILP are served as the baseline for evaluating the problem and used as a solution technique to obtain the fiber requirement of each studied approach. The objective is to minimize the total of resources used, like the number of fiber requirement.

Based on the numerical results, the MC is the most appropriate protection scheme that can accomplish the lowest total fiber requirement. Based on ring-based protection schemes, the total fiber requirement from TLR and OLR protection schemes depends on the the characteristics of routing pattern at normal operation.

Department.....Electrical..Engineering..... Student's Signature..... Warangrat
 Field of Study.....Electrical..Engineering..... Advisor's Signature..... N.M.S.
 Academic Year 20.05..... Coadvisor's Signature..... Sak

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รศ. ดร. วัลลภกร วุฒิสถิตติกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ศักดิ์ เสกขุนทด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยด้วยดีเสมอมา รวมทั้งการกระตุ้นเอาใจใส่ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ทั้งจากวิชาที่เปิดสอน และคำแนะนำต่าง ๆ

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย บรรณารักษ์ คุณกนกภรณ์ วิสเพ็ญ คุณอนุชิต มั่นจิรังกูร คุณกำพล วรดิษฐ์ คุณพลวัฒน์ ตันติวงษ์อำไพ คุณบุญชัย กฤตยานันต์ คุณพนิดา วรวิมลกุล คุณคำขวัญ พัฒนกุล คุณณัฐชัย วัชรากินชัย และคุณศราววุฒิ อีรนพไพบุลย์ สำหรับค่าปรึกษา กำลังใจ และความช่วยเหลือตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ชั้น 13 ติ๊กวิศวกรรมไฟฟ้า 4 ทุกท่าน โดยเฉพาะเพื่อน ๆ ในชั้นปีเดียวกันที่ให้คำแนะนำ ค่าปรึกษา และข้อคิดที่ดีมาโดยตลอด ทำให้การศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเต็มไปด้วยคุณค่าและความหมายดี ๆ สำหรับผู้วิจัย

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่ให้การสนับสนุนทางด้านเงินทุนแก่ผู้วิจัยตลอดมาจนสามารถสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณแม่นิตา คุณวราภรณ์ และทุก ๆ ท่านในครอบครัวของผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนทางการเงินและกำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมาจนสามารถสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
ดัชนีคำศัพท์.....	ต
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	6
1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	6
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์.....	9
2 แนวทางในการออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์.....	10
2.1 โครงข่าย WDM.....	10
2.2 ลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่าย.....	12
2.3 การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์บน โครงข่าย WDM.....	13
2.3.1 การจัดเส้นทาง (Routing).....	14
2.3.2 การกำหนดความยาวคลื่น (Wavelength Assignment).....	15
2.4 การป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง.....	16
2.4.1 วิธีต้นทุนต่ำสุด (Minimal Cost Approach, MC).....	19
2.4.2 วิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียว (One way Light Ring Approach, OLR).....	20
2.4.3 วิธีใช้วงแหวนสองทิศทาง (Two way Light Ring Approach, TLR).....	23

บทที่	หน้า
3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 25
3.1	แบบจำลองของโครงข่าย (Network Model) 25
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย ต้องการ..... 26
3.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง..... 30
3.4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายทำงานใน สภาวะปกติ 31
3.4.1	วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT) 31
3.4.2	วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือนบางส่วน (Partial Virtual Light-Tree method, PVLT)..... 32
3.4.3	วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT) 33
3.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายได้รับความ ขัดข้อง 34
3.5.1	วิธีต้นทุนต่ำสุด (Minimal Cost Approach, MC) 34
3.5.2	วิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียว (One way Light Ring Approach, OLR) 38
3.5.3	วิธีใช้วงแหวนสองทิศทาง (Two way Light Ring Approach, TLR) 41
3.6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายตามลักษณะการวาง เส้นใยนำแสง..... 44
3.7	ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่กำหนดในการหาผลเฉลย 44

บทที่	หน้า
4 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย.....	50
4.1 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	50
4.2 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	52
4.2.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง.....	52
4.2.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในโครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง.....	55
4.2.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่.....	62
4.2.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในเชิงขนาดของโครงข่าย.....	68
4.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบในเชิงจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย ต้องการ.....	89
4.3.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการเมื่อโครงข่าย สามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง.....	89
4.3.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย ประเภทต่าง ๆ ต้องการ.....	90
4.3.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่แต่ละวิธีการ จัดสรรเส้นทางใหม่ต้องการ.....	92
4.4 ผลของลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสง โดยรวมที่โครงข่ายต้องการ.....	99
4.5 ผลของจำนวนวงแหวนในวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และ TLR ที่มีต่อ จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ.....	102
4.6 ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ โครงข่ายต้องการ.....	105
4.7 การเปรียบเทียบในเชิงต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพของโครงข่าย.....	108
4.7.1 ผลของลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายที่มีต่อประสิทธิภาพของ โครงข่าย.....	113
4.7.2 ผลของลักษณะของทราฟฟิกที่มีต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย.....	116

บทที่	หน้า
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	120
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	120
5.2 ข้อเสนอแนะ	124
รายการอ้างอิง.....	126
ภาคผนวก.....	129
ภาคผนวก ก ผลเฉลยในเชิงความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	130
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	143
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	154



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1	45
ตารางที่ 3.2	46
ตารางที่ 3.3	47
ตารางที่ 3.4	48
ตารางที่ 3.5	49
ตารางที่ 4.1	69
ตารางที่ 4.2	71
ตารางที่ 4.3	73
ตารางที่ 4.4	75
ตารางที่ 4.5	99
ตารางที่ 4.6	103

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.7 จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ที่ใช้วงแหวนจำนวน 1 วง 2 วง 3 วง และไม่จำกัดวง ตามลำดับ.....	103
ตารางที่ ก.1 จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N-7L ทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโหนดต้นทางร่วม	131
ตารางที่ ก.2 จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N-7L ทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโหนดต้นทางแยก.....	134
ตารางที่ ก.3 จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N-10L ทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโหนดต้นทางร่วม	137
ตารางที่ ก.4 จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N-10L ทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโหนดต้นทางแยก.....	140

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น.....	11
รูปที่ 2.2 สวิตช์ SaD ขนาด $L \times Q$	11
รูปที่ 2.3 MC-OXC ขนาด 3×3 บนพื้นฐานของสวิตช์ SaD.....	12
รูปที่ 2.4 ลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่าย (ก) แบบสมมาตร (ข) แบบไม่สมมาตร....	13
รูปที่ 2.5 การจัดเส้นทางบนโครงข่าย WDM โดยอาศัยพื้นฐานโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง	14
รูปที่ 2.6 การกำหนดความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDM บนพื้นฐานโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง ...	16
รูปที่ 2.7 การจัดเส้นทางบนโครงข่าย WDM เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยใช้ วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ p-cycle	18
รูปที่ 2.8 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยใช้วิธี MC	20
รูปที่ 2.9 การจัดเส้นทางเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยใช้วิธี OLR.....	22
รูปที่ 2.10 การจัดเส้นทางเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยใช้วิธี TLR.....	24
รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 5N-7L (ข) โครงข่าย 7N-10L	50
รูปที่ 4.2 ทราฟฟิกที่ใช้ในสำหรับหาผลเฉลี่ย (ก) และ (ข) ชุดทราฟฟิกสำหรับโครงข่าย 5N- 7L (ค) และ (ง) ชุดทราฟฟิกสำหรับโครงข่าย 7N-10L.....	51
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่าย เชื่อมโยงได้รับความขัดข้องกับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ	53
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับ ความขัดข้องด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC กับจำนวนความยาวคลื่น สูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวน สมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟ จำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ.....	56

ภาพประกอบ

หน้า

- รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ..... 57
- รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ..... 58
- รูปที่ 4.7 จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกในสภาวะโครงข่ายปกติ (ก) กรณีโครงข่าย 5N-7L และ (ข) กรณีโครงข่าย 7N-10L 62
- รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท VLT กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ..... 63
- รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท PVLT กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ 64
- รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท LT กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ..... 65

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.20 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N-10L ประเภท VLT ต้องการทั้งใน สถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับ ความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโนดต้นทางแยก	86
รูปที่ 4.21 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N-10L ประเภท PVLT ต้องการทั้งใน สถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับ ความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโนดต้นทางแยก	87
รูปที่ 4.22 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N-10L ประเภท LT ต้องการทั้งใน สถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับ ความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโนดต้นทางแยก	88
รูปที่ 4.23 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็น ทราฟฟิกโนดต้นทางร่วม (ก) และ (ข) โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ไม่สามารถ แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง (ค) และ (ง) โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธี MC (จ) และ (ฉ) โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความ ขัดข้องด้วยวิธี OLR (ช) และ (ซ) โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L แก้ไขปัญหาหนึ่ง ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธี TLR	92
รูปที่ 4.24 ลักษณะการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายบน โครงข่าย 5N-7L ที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR	95
รูปที่ 4.25 ลักษณะการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายบน โครงข่าย 5N-7L ที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR	96
รูปที่ 4.26 ลักษณะการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ใช้วงแหวนแบบเดียวกัน	97
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่าย ประเภท PVLT ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท VLT (PVLT/VLT ratio) กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M)	106
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่าย ประเภท LT ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท VLT (LT/VLT ratio) กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M)	106

ภาพประกอบ

หน้า

- รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพของโครงข่าย เมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร (ก) จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ (ข) ต้นทุนของโครงข่าย และ (ค) ประสิทธิภาพของโครงข่าย..... 110
- รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพของโครงข่าย เมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร (ก) จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ (ข) ต้นทุนของโครงข่าย และ (ค) ประสิทธิภาพของโครงข่าย..... 111
- รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร และไม่สมมาตร (ก) และ (ข) โครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นแบบโนดต้นทางร่วม และโนดต้นทางแยก ตามลำดับ (ค) (จ) และ (ช) โครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกเป็นแบบโนดต้นทางร่วม และมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ตามลำดับ (ง) (ฉ) และ (ซ) โครงข่ายที่รองรับ ทราฟฟิกเป็นแบบโนดต้นทางแยก และมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ตามลำดับ..... 115
- รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบโนดต้นทางร่วม และโนดต้นทางแยก (ก) และ (ข) โครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร และไม่สมมาตร ตามลำดับ (ค) (จ) และ (ช) โครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร และมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ตามลำดับ (ง) (ฉ) และ (ซ) โครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร และมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ตามลำดับ 118

ดัชนีคำศัพท์

Active path	วิถีทำงาน
Algorithm	ขั้นตอนวิธี
Backup optical branch	กิ่งเชิงแสงสำรอง
Bandwidth	แบนด์วิดท์
Blocking probability	ความน่าจะเป็นในการถูกบล็อก
Carrier	คลื่นพาห์
Channel	ช่องสัญญาณ
Computational time	เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย
Cut-set	เซตตัด
Dedicated ring	วงแหวนเฉพาะงาน
Directed graph	กราฟแบบแสดงทิศทาง
Distance learning	การศึกษาทางไกล
Dynamic traffic	ทราฟฟิกแบบพลวัต
Failure	ความขัดข้อง
Flexibility	ความยืดหยุ่น
Heuristic algorithm	ขั้นตอนวิธีฮิวริสติก
Light-tree	โครงสร้างต้นไม้เชิงแสง
Light-Tree method	วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง
Link	ข่ายเชื่อมโยง
Logical arcs	เส้นเชื่อมเชิงตรรกะ
Loss	การสูญหาย
Mathematical model	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
Mesh-based restoration	วิธีการบูรณะบนพื้นฐานของร่างแห
Minimal cost approach	เทคนิคต้นทุนต่ำสุด
Multicast	มัลติคาสต์
Multicast protection system	ระบบป้องกันแบบมัลติคาสต์
Multicast Routing and Wavelength Assignment	การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์
Multicast traffic	ทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์

Multi-fiber system	ระบบหลายเส้นใยนำแสง
Multi-hop system	ระบบหลายช่วง
Network Cost	ต้นทุนของโครงข่าย
Number of Constraints	จำนวนสมการ
Number of Variables	จำนวนตัวแปร
On-cycle link	ข่ายเชื่อมโยงที่อยู่บนวงแหวน
One way Light Ring approach	เทคนิคใช้วงแหวนทิศทางเดียว
Optical amplifier	อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง
Optical branch	กิ่งเชิงแสง
Optical fiber	เส้นใยนำแสง
Optimal light-tree	โครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด
Partial Virtual Light-Tree method	วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือนบางส่วน
Path	วิถี
P-cycle protection	วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ p-cycle
Physical Links	ข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ
Physical route	เส้นทางทางกายภาพ
Point-to-multipoint	จุดต่อหลายจุด
Point-to-point	จุดต่อจุด
Point-to-point protection system	ระบบป้องกันแบบจุดต่อจุด
Reliability	ความเชื่อถือได้
Restoration path	วิถีบูรณะ
Ring-based protection	วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบวงแหวน
Routing	การจัดเส้นทาง
Routing and Wavelength Assignment	การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่น
Single-fiber system	ระบบหนึ่งเส้นใยนำแสง
Single-hop system	โครงข่ายระบบช่วงเดียว
Single-link failure	ความขัดข้องที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง
Spare capacity	ความจุสำรอง
Splitter	อุปกรณ์แยกสัญญาณ
Static traffic	ทราฟฟิกแบบคงที่

Straddling link	ข่ายเชื่อมโยงที่คร่อมวงแหวน
Subset	เซตย่อย
Survivability	ความอยู่รอดได้
Switch	สวิตช์
Teleconference	การประชุมทางไกล
Traffic	ทราฟฟิก
Two way Light Ring approach	เทคนิคใช้วงแหวนสองทิศทาง
Unicast	ยูนิคาสต์
Video on demand	การส่งข้อมูลวิดีโอไปยังผู้รับที่ร้องขอ
Virtual Light-Tree method	วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน
Wavelength Assignment	การกำหนดความยาวคลื่น
Wavelength converter	อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
Wavelength demultiplexer	ตัวดีมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่น
Wavelength Division Multiplexing	การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น
Wavelength multiplexer	ตัวมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่น
WDM transmitter	เครื่องส่งสัญญาณแบบ WDM
Working capacity	ความจุใช้งาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบัน อินเทอร์เน็ตเป็นเทคโนโลยีสารสนเทศที่มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการสื่อสารแบบไร้พรมแดน การคิดค้น และพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตรูปแบบต่าง ๆ จึงได้เกิดขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการในการบริโภคข้อมูลข่าวสารของผู้ใช้ ตัวอย่างการให้บริการที่มีในปัจจุบันได้แก่ การให้บริการ e-business การศึกษาทางไกล (distance learning) การประชุมทางไกล (teleconference) การถ่ายทอดสดทางอินเทอร์เน็ต การส่งข้อมูลวิดีโอไปยังผู้รับที่ร้องขอ (video on demand) และเกมส์ออนไลน์ เป็นต้น ซึ่งรูปแบบการให้บริการดังกล่าว ได้เริ่มทวีบทบาทความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากให้ความสะดวกรวดเร็วทั้งในเชิงธุรกิจ การศึกษา และการดำรงชีวิตประจำวัน และคาดว่าในอนาคตจะมีการตอบสนองจากผู้ให้บริการเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังนั้น เพื่อให้สามารถรองรับบริการดังกล่าวได้ โครงข่ายที่ใช้จะต้องมีช่องสัญญาณ (channel) และแบนด์วิดท์ (bandwidth) ที่มีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถรองรับข้อมูลที่มีปริมาณ และความเร็วในการส่งที่สูงขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการนำเทคโนโลยีการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM) [1-3] มาใช้ในการสื่อสาร หลักการทำงานของ WDM คือ การมัลติเพลกซ์ช่องสัญญาณหลาย ๆ ช่องรวมกันเพื่อส่งผ่านไปในตัวกลางตัวเดียวกัน ซึ่งตัวกลางที่ใช้ในโครงข่ายนี้คือ เส้นใยนำแสง (optical fiber) โดยจะต้องกำหนดให้ช่องสัญญาณที่ถูกมัลติเพลกซ์รวมกันอาศัยคลื่นพาห้ (carrier) ที่มีค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเพื่อป้องกันการรบกวนระหว่างช่องสัญญาณ ซึ่งปกติความเร็วของแต่ละช่องสัญญาณจะอยู่ในระดับกิกะบิตต่อวินาที ดังนั้นความเร็วของข้อมูลที่ส่งผ่านในโครงข่ายประเภทนี้ สามารถสูงได้ถึงระดับเทราบิตต่อวินาที ทำให้ WDM เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูง สามารถเข้าใช้ประโยชน์แบนด์วิดท์ของเส้นใยนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสำหรับใช้ในการออกแบบโครงข่ายความเร็วสูงในอนาคตเป็นอย่างมาก

จากการศึกษางานวิจัยเรื่องการออกแบบโครงข่าย WDM ในช่วงที่ผ่านมาพบว่า โดยมากเป็นงานวิจัยเพื่อรองรับการให้บริการแบบยูนิคาสต์ (unicast) [4-7] ซึ่งเป็นลักษณะการส่งทราฟฟิก (traffic) ที่มีลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างโหนดต้นทาง และโหนดปลายทางในการส่งข้อมูล

เป็นแบบจุดต่อจุด (point-to-point) แต่ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยี และพฤติกรรมของผู้ใช้บริการพบว่า ในอนาคตบริการแบบมัลติคาสต์ (multicast) มีแนวโน้มที่จะได้รับการตอบสนองจากผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น เพราะสามารถตอบสนองความต้องการบริการรูปแบบเดียวกันสำหรับผู้ใช้งานจำนวนมากได้ในช่วงเวลาเดียวกัน โดยอาศัยการเชื่อมต่อแบบจุดต่อหลายจุด (point-to-multipoint) ในการส่งข้อมูล ด้วยรูปแบบของบริการที่เปลี่ยนไป จึงต้องมีการประยุกต์ปรับเปลี่ยนโครงข่ายให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัย [8] Sahasrabuddhe และ Mukherjee เสนอลักษณะการส่งข้อมูลแบบโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (light-tree) เพื่อสนับสนุนบริการแบบมัลติคาสต์ โดยให้มีการติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณ (splitter) บนโนดในโครงข่าย WDM เพื่อทำหน้าที่แยกสัญญาณออกเป็นสัญญาณย่อยหลาย ๆ สัญญาณ ทำให้สามารถส่งข้อมูลเพียงชุดเดียวจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางหลาย ๆ โหนดในเวลาเดียวกันได้ ข้อดีของการนำโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงมาใช้เป็นรูปแบบในการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์คือ การส่งข้อมูลลักษณะนี้จะใช้จำนวนเครื่องส่งน้อยกว่าการส่งข้อมูลโดยตรงจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางแต่ละโนดแบบจุดต่อจุด อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณทราฟฟิกที่ออกจากโนดต้นทางอีกด้วย จากงานวิจัยดังกล่าว ได้มีงานวิจัยที่พิจารณาถึงการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (Multicast Routing and Wavelength Assignment, MC-RWA) บนโครงข่าย WDM เพื่อให้การรับส่งข้อมูลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพตามระดับคุณภาพบริการที่กำหนด ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ MC-RWA ส่วนใหญ่ [9-11] ถึงแม้จะมีแนวทางการวิจัยที่คล้ายกัน คือ มุ่งเน้นการลดต้นทุนของโครงข่าย ไม่ว่าจะเป็นจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโครงข่าย ความน่าจะเป็นในการถูกบล็อก (blocking probability) จากการเข้าใช้ช่องสัญญาณเนื่องจากช่องสัญญาณมีอยู่จำกัด หรือแม้แต่ต้นทุนของอุปกรณ์ในการติดตั้งโครงข่าย เช่น เส้นใยนำแสง อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (wavelength converter) อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (optical amplifier) เป็นต้น หากแต่ในงานวิจัยเหล่านั้น มีขอบเขตของปัญหา ลักษณะของโครงข่ายที่ศึกษา สมมติฐานของระบบ ต้นทุนของโครงข่ายที่พิจารณา และวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่แตกต่างกันออกไป ยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัย [9-10] เสนอการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นสำหรับโครงข่ายระบบช่วงเดียว (single-hop system) หรือ โครงข่ายที่ไม่อนุญาตให้มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นลงบนโนดในโครงข่าย ทำให้เส้นทางที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลชุดหนึ่ง ๆ จากโนดต้นทางไปยังสมาชิกโนดปลายทางทุกโนดในกลุ่มเดียวกัน จำเป็นที่จะต้องใช้เวลาความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง โดยจุดประสงค์ของงานวิจัย [9] คือ เพื่อหาจำนวนการเชื่อมต่อที่มากที่สุดที่สามารถจัดตั้งได้เมื่อโครงข่ายมีช่องสัญญาณจำกัด เรียกรการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นลักษณะนี้ว่า Max MC-RWA ส่วนในงานวิจัย [10] มีจุดประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อหาจำนวน

ความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับทราฟฟิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในโครงข่าย เรียกรากการจัดเส้นทาง และการกำหนดความยาวคลื่นลักษณะนี้ว่า Min MC-RWA โดยวิธีการออกแบบโครงข่ายของงานวิจัยทั้งสองจะใช้เทคนิค Integer Linear Programming, ILP ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากงานวิจัย [10] พบว่า โครงข่ายที่ไม่อนุญาตให้มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นลงบนโนดในโครงข่าย ตลอดทั้งเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างโนดต้นทางกับกลุ่มโนดปลายทางทุกโนดในกลุ่มเดียวกัน จะไม่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้เมื่อเส้นทางวิ่งผ่านโนดของโครงข่าย ดังนั้น โครงข่ายประเภทนี้จึงมีการใช้งานความยาวคลื่นที่มีอยู่ในระบบอย่างไม่มีประสิทธิภาพ จึงได้มีงานวิจัย [11] ที่พิจารณาในเชิงเดียวกัน แต่พิจารณาบนระบบหลายช่วง (multi-hop system) นั่นคือ มีการอนุญาตให้โนดในโครงข่ายสามารถติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ เพราะฉะนั้น ค่าความยาวคลื่นที่กำหนดให้กับเส้นทางที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลจากโนดต้นทางไปยังสมาชิกโนดปลายทางทุกโนดในกลุ่มเดียวกัน ไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นค่าเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง หากแต่สามารถเปลี่ยนไปใช้ค่าความยาวคลื่นค่าอื่น ๆ ที่เหลือว่างในโครงข่ายได้เมื่อเส้นทางนั้นผ่านโนดที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ ทำให้โครงข่ายประเภทนี้มีการใช้งานความยาวคลื่นที่มีอยู่ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ ในงานวิจัย [11] ยังพิจารณาในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณลงในโครงข่าย โดยกำหนดให้โครงข่ายที่พิจารณาประกอบไปด้วยโนดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณจำนวนจำกัด เรียกโครงข่ายที่มีข้อจำกัดนี้ว่า sparse light-splitting optical network เหตุที่ต้องมีการจำกัดจำนวนโนดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณคือ หากทุกโนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณเพื่อให้สามารถทำการมัลติคาสต์ได้ อาจส่งผลให้โนดปลายทางไม่ได้รับสัญญาณที่ส่งมา เนื่องจากค่ากำลังสัญญาณข้อมูลถูกลดทอนลงจากการแยกสัญญาณที่โนดกลางทางจนหมดก่อน ข้อสังเกตสำหรับงานวิจัย [11] คือ มีการใช้ขั้นตอนวิธีฮิวริสติก (heuristic algorithm) ในการออกแบบโครงข่าย ทำให้ต้นทุนที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าการออกแบบโครงข่ายโดยใช้เทคนิค ILP

ถึงแม้งานวิจัยข้างต้นจะเสนอการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนต่าง ๆ ของโครงข่าย แต่พบว่ายังจำกัดอยู่สำหรับโครงข่ายระบบหนึ่งเส้นใยนำแสง (single-fiber system) เท่านั้น ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงข่ายระบบหลายเส้นใยนำแสง (multi-fiber system) ซึ่งอนุญาตให้ข่ายเชื่อมโยง (link) แต่ละข่ายสามารถวางเส้นใยนำแสงได้มากกว่าหนึ่งเส้น งานวิจัย [12] จึงเสนอการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM ระบบหลายเส้นใยนำแสงเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์โดยใช้เทคนิค ILP ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับทราฟฟิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในโครงข่าย โดยพิจารณาแยก

3 กรณี คือ กรณีทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ กรณีบางโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ โดยให้มัลติคาสต์เซสชันที่พิจารณาแต่ละกลุ่มมีโหนดต้นทางแตกต่างกัน และลักษณะการติดต่อสื่อสารภายในกลุ่มสมาชิกมัลติคาสต์เป็นแบบโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง อีกทั้งกำหนดให้ข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายเป็นชนิดสองทิศทาง (bidirectional) อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนวิธี (algorithm) ที่นำเสนอในงานวิจัย [12] ไม่ได้พิจารณาถึงทิศทางการส่งข้อมูลภายในกลุ่มมัลติคาสต์ ซึ่งในความเป็นจริง ทิศทางการส่งทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึง โดยเมื่อพิจารณาในแง่ของผู้เข้าโครงข่ายจะพบว่า หากผู้เข้าทราฟฟิกมีลักษณะของทราฟฟิกที่ต้องการส่งในโครงข่ายว่ามีทิศทางและปริมาณเป็นอย่างไร ก็สามารถเข้าช่องสัญญาณในปริมาณที่สอดคล้องกับทราฟฟิกที่มีอยู่จริงได้ กล่าวคือ ปริมาณทราฟฟิกที่สวนทางกันในข่ายเชื่อมโยงเส้นเดียวกันอาจมีไม่เท่ากัน ส่งผลให้การเข้าเส้นใยนำแสงบนข่ายเชื่อมโยงในแต่ละทิศทางอาจมีจำนวนไม่เท่ากันได้ การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นจึงควรมีแนวคิดที่เปลี่ยนไป นั่นคือ ควรศึกษาทิศทางของทราฟฟิกที่เกิดขึ้นด้วย ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการออกแบบโครงข่าย WDM ระบบหลายเส้นใยนำแสงเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์โดยใช้เทคนิค ILP ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้ข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายเป็นชนิดมีทิศทาง และพิจารณาลักษณะการวางเส้นใยนำแสงบนข่ายเชื่อมโยงข่ายเดียวกันทั้งในกรณีให้ข่ายเชื่อมโยงในทิศสวนทางกันมีจำนวนเท่ากัน และกรณีให้ข่ายเชื่อมโยงในทิศสวนทางกันสามารถมีจำนวนที่ไม่เท่ากันได้ อีกทั้งยังพิจารณาลักษณะการกระจายตำแหน่งของโหนดต้นทางกรณีทุกมัลติคาสต์เซสชันมีโหนดต้นทางเป็นโหนดเดียวกัน และกรณีทุกมัลติคาสต์เซสชันมีโหนดต้นทางแตกต่างกัน พร้อมทั้งพิจารณากรณีทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ กรณีบางโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลเฉลยในเชิงจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

ในการออกแบบโครงข่าย WDM นั้น นอกจากจะต้องพิจารณาถึงปัญหาทางด้านการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายแล้ว การป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้อง (failure) ก็ยังเป็นประเด็นสำคัญที่ควรคำนึงถึง เนื่องจากโครงข่าย WDM เป็นโครงข่ายความเร็วสูง หากเกิดความขัดข้องขึ้นในโครงข่าย ย่อมทำให้ข้อมูลที่ส่งผ่านโครงข่ายเกิดการสูญหาย (loss) ขึ้น โดยผลเสียนี้จะรุนแรงกว่ากรณีส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายความเร็วต่ำ ดังนั้นในการออกแบบโครงข่าย WDM ควรออกแบบให้โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโครงข่ายได้รับความขัดข้องได้ ซึ่งวิธีการแก้ไขปัญหาเมื่อข่ายเชื่อมโยงได้รับความ

ขัดข้องคือ การจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับโครงข่าย กล่าวคือ เมื่อสายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องไม่สามารถใช้งานได้ เส้นทางที่ผ่านสายเชื่อมโยงที่ขัดข้องจะต้องถูกเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงสายเชื่อมโยงที่ขัดข้องนั้น เรียกเส้นทางที่โครงข่ายจัดสรรให้ใหม่นี้ว่าวิถีบูรณะ (restoration path) เพราะฉะนั้น การแก้ไขปัญหาโดยใช้วิธีการนี้จำเป็นที่จะต้องมีการเผื่อความจุให้กับโครงข่ายเพื่อใช้รองรับวิถีบูรณะ เรียกความจุที่เผื่อไว้เพื่อแก้ไขปัญหานี้ว่าความจุสำรอง (spare capacity) และเนื่องจากมีการเผื่อความจุสำรองเพิ่มให้กับโครงข่าย ดังนั้น ต้นทุนของโครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาเมื่อสายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องจึงสูงกว่าต้นทุนของโครงข่ายที่ไม่ได้แก้ไขปัญหานี้ ซึ่งจากการศึกษาทางวิจัยต่าง ๆ [12-19] ที่เกี่ยวข้องกับกรออกแบบโครงข่าย WDM ที่สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดจากความขัดข้องในโครงข่ายนั้นพบว่า ความขัดข้องที่พบได้มาก และมีความซับซ้อนในการป้องกันไม่สูงมากนักคือ ความขัดข้องที่หนึ่งสายเชื่อมโยง (single-link failure) โดยเมื่อพิจารณาถึงงานวิจัยที่ผ่านมา เป็นการศึกษาถึงผลกระทบ และการแก้ไขปัญหาเมื่อมีความขัดข้องเกิดขึ้นในโครงข่าย โดยในงานวิจัย [13] เป็นการออกแบบโครงข่ายเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดยูนิคาสต์ที่สามารถป้องกันความขัดข้องจากหนึ่งสายเชื่อมโยงได้ ส่วนงานวิจัย [14] เป็นการออกแบบโครงข่ายเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่สามารถป้องกันความขัดข้องจากหนึ่งสายเชื่อมโยงโดยใช้วิธีการบูรณะบนพื้นฐานของร่างแห (mesh-based restoration) สำหรับป้องกันทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่ใช้รูปแบบโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเป็นลักษณะการส่งข้อมูลในสภาวะปกติ โดยแบ่งวิธีการป้องกันออกเป็นสองระบบคือ ระบบป้องกันแบบมัลติคาสต์ (multicast protection system) และระบบป้องกันแบบจุดต่อจุด (point-to-point protection system) ส่วนในงานวิจัย [15] เป็นการออกแบบโครงข่ายที่สามารถป้องกันความขัดข้องจากหนึ่งสายเชื่อมโยงสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่ใช้รูปแบบโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเป็นลักษณะการส่งข้อมูลในสภาวะปกติเช่นกัน แต่ใช้วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบวงแหวน (ring-based protection) ในการป้องกันโครงข่าย ข้อแตกต่างระหว่างวิธีการบูรณะบนพื้นฐานของร่างแห และวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบวงแหวนคือ วิธีแรกต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงที่วางเพิ่มลงในโครงข่ายน้อยกว่าวิธีที่สอง แต่จะใช้เวลาในการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดจากสายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความขัดข้องมากกว่าวิธีที่สอง จากผลดังกล่าว จึงได้มีงานวิจัยที่รวมเอาข้อดีของวิธีการป้องกันโครงข่ายทั้งสองมารวมกันโดยเรียกวิธีนี้ว่าวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ p-cycle (p-cycle protection) [16-19] ซึ่งเป็นการเผื่อความจุสำรองในโครงข่ายโดยให้มีลักษณะเป็นวงแหวน โดยวงแหวนนั้นจะถูกกำหนดขึ้นล่วงหน้า ลักษณะการป้องกันโครงข่ายแบบ p-cycle นั้น นอกจากจะป้องกันสายเชื่อมโยงที่อยู่บนวงแหวน (on-cycle link) แล้วยังสามารถป้องกันสายเชื่อมโยงที่คร่อมวงแหวน (straddling link) ได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม การป้องกันโครงข่ายแบบ p-cycle ยังมีข้อจำกัดในแง่ของรูปแบบการใช้งานความจุสำรอง ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ นอกจากจะเสนอ

วิธีการจัดสรรเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์แล้ว ยังนำเสนอวิธีการป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงสำหรับโครงข่าย WDM ระบบหลายเส้นใยนำแสงที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นในโครงข่าย WDM สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (multicast traffic) และศึกษาวิธีการป้องกันโครงข่ายเมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงด้วยเทคนิคการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบต้นทุนต่ำสุด (minimal cost approach) เทคนิคใช้วงแหวนทิศทางเดียว (one way light ring approach) และเทคนิคใช้วงแหวนสองทิศทาง (two way light ring approach) โดยคำนึงถึงจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย ทั้งในกรณีทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ กรณีบางโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1 เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ที่ใช้ ILP เป็นเทคนิคในการจำลองปัญหาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นในโครงข่าย WDM สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ โดยคำนึงถึงต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเมื่อพิจารณาทิศทางของทราฟฟิกที่เกิดขึ้น ทั้งในกรณีทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ กรณีบางโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่
- 2 เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ ILP เป็นเทคนิคในการจำลองปัญหาการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องเพื่อหาต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย ด้วยเทคนิคการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบต้นทุนต่ำสุด เทคนิคใช้วงแหวนทิศทางเดียว และเทคนิคใช้วงแหวนสองทิศทาง ทั้งในกรณีทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่
- 3 ศึกษาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย WDM กรณีกำหนดให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้ส่งข้อมูลในทิศทางหนึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้ส่งข้อมูลในทิศตรงกันข้ามบนข่ายเชื่อมโยงเดียวกัน และกรณีอนุญาตให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่

ใช้ส่งข้อมูลในทิศทางทั้งสองมีค่าไม่เท่ากันได้ เมื่อลักษณะของทราฟฟิกเป็นแบบทุกมัลติคาสต์เซสชันมีโนดต้นทางเป็นโนดเดียวกัน และทุกมัลติคาสต์เซสชันมีโนดต้นทางแตกต่างกัน

- 4 ศึกษาข้อดี และข้อเสียในด้านจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย และความซับซ้อนในการบริหารโครงข่าย จากกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความขัดข้อง ทั้งในกรณีทุกโนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ กรณีบางโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1 ศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 1.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี WDM
 - 1.2 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
- 2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์โดยพิจารณาทิศทางของทราฟฟิกที่เกิดขึ้นในโครงข่าย
 - 2.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงทำงานในสภาวะปกติกรณีทุกโนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ กรณีบางโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่
 - 2.2 ทดสอบหาผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่ได้เสนอไว้ในข้อ 2.1 ว่าให้ผลเฉลยที่ถูกต้องหรือไม่ เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้สามารถหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการได้อย่างถูกต้อง
 - 2.3 ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโครงข่าย และทราฟฟิกหลาย ๆ รูปแบบ พร้อมทั้งวิเคราะห์ผล
- 3 เปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายในแง่จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายกรณีทุกโนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ กรณีบางโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ

- 4 ปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากข้อ 2 เพื่อใช้หาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายกรณีกำหนดให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้ส่งข้อมูลในทิศทางหนึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้ส่งข้อมูลในทิศตรงกันข้ามบนชายเชื่อมโยงเดียวกัน และกรณีอนุญาตให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้ส่งข้อมูลในทิศทั้งสองมีค่าไม่เท่ากันได้ เมื่อลักษณะของทราฟฟิกเป็นแบบทุกมัลติคาสต์เซสชันมีโนดต้นทางเป็นโนดเดียวกัน และทุกมัลติคาสต์เซสชันมีโนดต้นทางแตกต่างกัน
- 5 เปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายในแง่จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายกรณีกำหนดให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้ส่งข้อมูลในทิศทางหนึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้ส่งข้อมูลในทิศตรงกันข้ามบนชายเชื่อมโยงเดียวกัน และกรณีอนุญาตให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้ส่งข้อมูลในทิศทั้งสองมีค่าไม่เท่ากันได้ เมื่อลักษณะทราฟฟิกเป็นแบบทุกมัลติคาสต์เซสชันมีโนดต้นทางเป็นโนดเดียวกัน และทุกมัลติคาสต์เซสชันมีโนดต้นทางแตกต่างกัน
- 6 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย เพื่อป้องกันโครงข่ายจากกรณีหนึ่งชายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความขัดข้อง
 - 6.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความจุสำรองที่ใช้ในการป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้องกรณีทุกโนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่
 - 6.2 ทดสอบหาผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่ได้เสนอไว้ในข้อ 6.1 ว่าให้ผลเฉลยที่ถูกต้องหรือไม่ เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้สามารถหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการได้อย่างถูกต้อง
 - 6.3 ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโครงข่าย และทราฟฟิกหลาย ๆ รูปแบบพร้อมทั้งวิเคราะห์ผล
- 7 รวบรวม และสรุปผลการวิจัยเพื่อเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เป็นเทคนิคในการจำลองปัญหาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นในโครงข่าย WDM สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ โดยคำนึงถึงต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเมื่อพิจารณาทิศทางของทราฟฟิกที่เกิดขึ้น ทั้งในกรณีทุกโนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

- ติดตั้งอยู่ กรณีบางโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่
- 2 สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย WDM เมื่อมีความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ด้วยเทคนิคการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ ต้นทุนต่ำสุด เทคนิคใช้วงแหวนทิศทางเดียว และเทคนิคใช้วงแหวนสองทิศทาง ทั้งในกรณีทุกโนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่
 - 3 ทำให้ทราบถึงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประกอบการพิจารณาออกแบบวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายได้
 - 4 ทำให้ทราบถึงประโยชน์ของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ: เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 แนวทางในการออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์: เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM การพิจารณาค่าต้นทุนของโครงข่ายจากจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ต้องติดตั้งให้กับโครงข่าย และการป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้อง

บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์: เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองปัญหาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM ทั้งในกรณีที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง

บทที่ 4 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย: เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ ทั้งในกรณีที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ: เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะสำหรับใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัยขั้นต่อไป

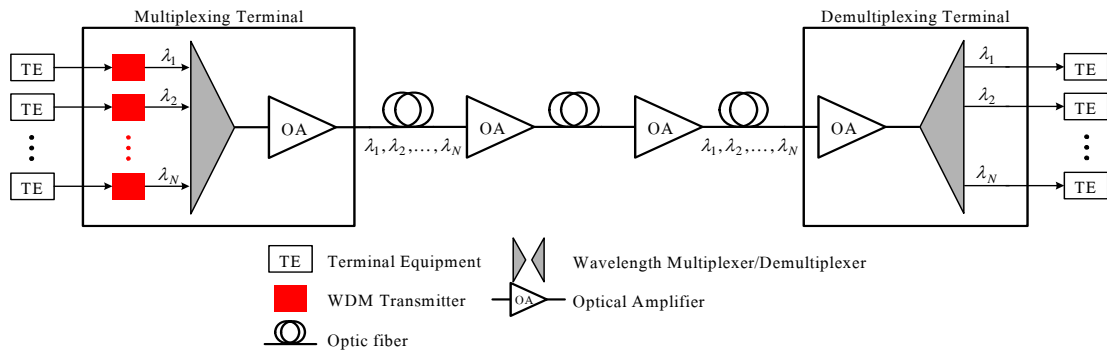
บทที่ 2

แนวทางในการออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับกราฟฟิคนิคมัลติคาสต์

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM การพิจารณาค่าต้นทุนของโครงข่ายจากจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ต้องติดตั้งให้กับโครงข่าย และการป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้อง โดยจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานโดยทั่วไปที่เป็นความรู้เบื้องต้นในการออกแบบโครงข่ายอันประกอบไปด้วย ลักษณะและโครงสร้างของโครงข่าย WDM รายละเอียดเกี่ยวกับคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ และการจัดสรรเส้นทางการรับส่งข้อมูลให้กับกราฟฟิกภายในโครงข่าย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงข่าย WDM เป็นโครงข่ายเชิงแสง ดังนั้นแต่ละเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรภายในโครงข่ายจะต้องได้รับการกำหนดค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางดังกล่าวด้วย นอกจากนี้ แต่ละเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรจะต้องสามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ได้เมื่อโครงข่ายได้รับความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย

2.1 โครงข่าย WDM

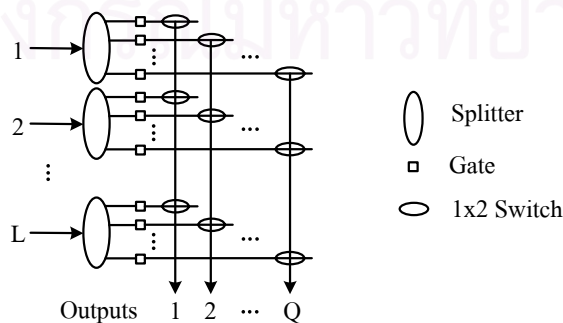
โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM ประกอบด้วยโหนดจำนวนหนึ่งที่ต่อเชื่อมโยงกันด้วยข่ายเชื่อมโยง โดยจัดและกำหนดให้มีลักษณะที่เหมาะสมกับสภาพภูมิศาสตร์และการกระจายของปริมาณกราฟฟิกในพื้นที่การให้บริการ โหนดมีหน้าที่ติดต่อกับแหล่งกำเนิดกราฟฟิก เพื่อรวบรวมข้อมูลของผู้ใช้ที่จะส่งออก และในทางกลับกันก็ส่งผ่านกราฟฟิกไปยังจุดหมายปลายทาง ข่ายเชื่อมโยงทำหน้าที่เชื่อมต่อโหนดและเป็นตัวกลางในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดภายในโครงข่าย อุปกรณ์ภายในโหนดของโครงข่ายประกอบด้วยตัวมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่น (wavelength multiplexer) ตัวดีมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่น (wavelength demultiplexer) และสวิตช์ (switch) ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกันเป็นตัวกำหนดเส้นทางในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางกับปลายทางของโครงข่าย อุปกรณ์ทั้งหมดภายในโหนดของโครงข่ายจะเรียกรวมกันว่า OXCs (Optical Cross Connect) นอกจากนี้ ในบางโครงข่ายอาจจะมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นให้กับ OXCs เพื่อทำหน้าที่แปลงผันค่าความยาวคลื่นให้กับช่องสัญญาณสื่อสารที่วิ่งผ่านโหนดของโครงข่าย โดยระบบการส่งข้อมูลด้วยการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

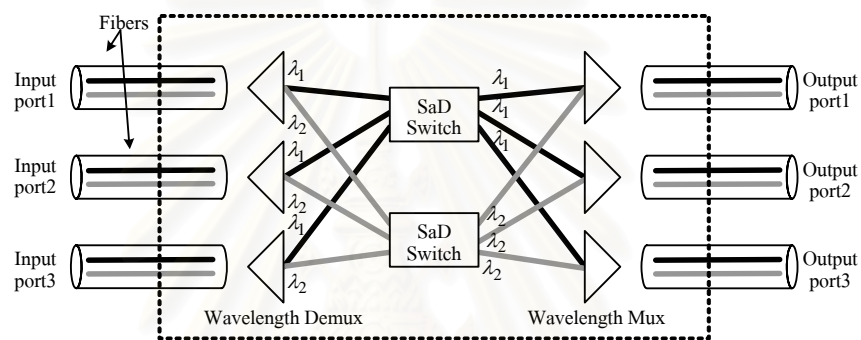
ในภาคส่งของระบบประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงและเครื่องส่งสัญญาณแบบ WDM (WDM transmitter) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ให้เป็นสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน จากนั้นสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นจะถูกมัลติเพล็กซ์ให้เป็นลำแสงเดียวกันโดยอาศัยตัวมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น ซึ่งสัญญาณที่ถูกมัลติเพล็กซ์นี้จะถูกส่งไปยังเส้นใยนำแสง โดยในระหว่างที่ส่งสัญญาณอาจจะต้องมีการขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการลดทอนพลังงานของสัญญาณ ส่วนที่ภาครับของระบบจะประกอบด้วยตัวดีมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น ซึ่งทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงที่รับได้ให้เป็นสัญญาณแต่ละความยาวคลื่นก่อนที่จะแปลงกลับเป็นสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ดั้งเดิม

ในการนำโครงข่าย WDM มาใช้รองรับการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์นั้น โครงข่ายจำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ได้ นั่นคือ โหนดที่ทำหน้าที่คัดลอกและแยกสัญญาณแสงจะต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถคัดลอกและแยกสัญญาณแสงเพื่อส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางจำนวนมากพร้อมกันได้ ซึ่งในโครงข่าย WDM ที่รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์จะใช้สวิตช์ SaD (Splitter-and-Delivery Switch) [20-21] ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 เข้ามาทำหน้าที่ดังกล่าว



รูปที่ 2.2 สวิตช์ SaD ขนาด $L \times Q$ [20]

รูปที่ 2.2 แสดงสวิตช์ SaD ขนาด $L \times Q$ โดยสวิตช์จะแยกสัญญาณที่เข้าเชื่อมโยงขาเข้าแต่ละขาเข้าเชื่อมโยงออกเป็นสัญญาณขนาดย่อยจำนวน Q สัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณจะมีค่ากำลังของสัญญาณเท่ากับ P/Q โดย P เป็นค่ากำลังของสัญญาณที่เข้าเชื่อมโยงขาเข้า หลังจากนั้นสัญญาณย่อยแต่ละสัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังขาเข้าเชื่อมโยงขาออกของสวิตช์จำนวน Q ขาเข้าเชื่อมโยงโดยผ่านสวิตช์ขนาด 1×2 เรียกอุปกรณ์ที่นำสวิตช์ SaD มาติดตั้งร่วมกับตัวมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่น และ ตัวดีมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่น เพื่อทำหน้าที่กำหนดเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ระหว่างโหนดต้นทางกับชุดโหนดปลายทางของโครงข่ายว่า MC-OXC (Multicast-capable OXC) [22] มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.3

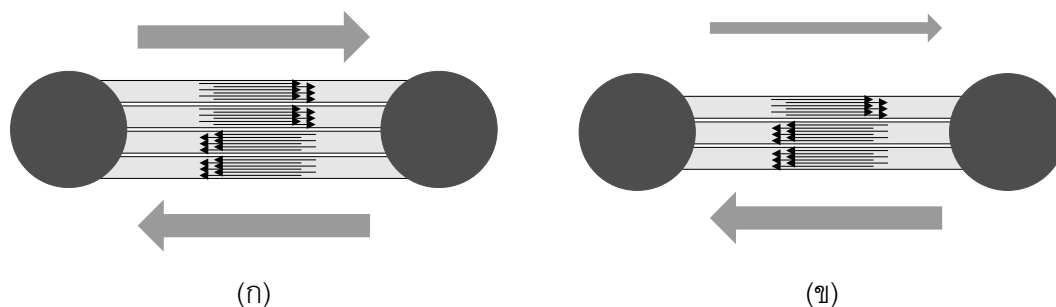


รูปที่ 2.3 MC-OXC ขนาด 3×3 บนพื้นฐานของสวิตช์ SaD [22]

2.2 ลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่าย

ในการออกแบบโครงข่าย WDM สามารถจำแนกลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายได้ดังนี้คือ

- 1 แบบสมมาตร โครงข่ายจะวางเส้นใยนำแสงบนขาเข้าเชื่อมโยงโดยให้ขาเข้าเชื่อมโยงในทิศทางตรงกันข้ามกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 (ก)
- 2 แบบไม่สมมาตร โครงข่ายจะวางเส้นใยนำแสงบนขาเข้าเชื่อมโยงโดยให้ขาเข้าเชื่อมโยงในทิศทางตรงกันข้ามกันสามารถมีจำนวนที่ไม่เท่ากันได้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 (ข)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่าย (ก) แบบสมมาตร (ข) แบบไม่สมมาตร

เนื่องจากลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายจะส่งผลต่อเส้นทางและความยาวคลื่นที่ถูกเลือกเพื่อรองรับมัลติคาสต์กราฟฟิก รวมไปถึงจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงศึกษาลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายว่าส่งผลอย่างไรต่อต้นทุนของโครงข่าย

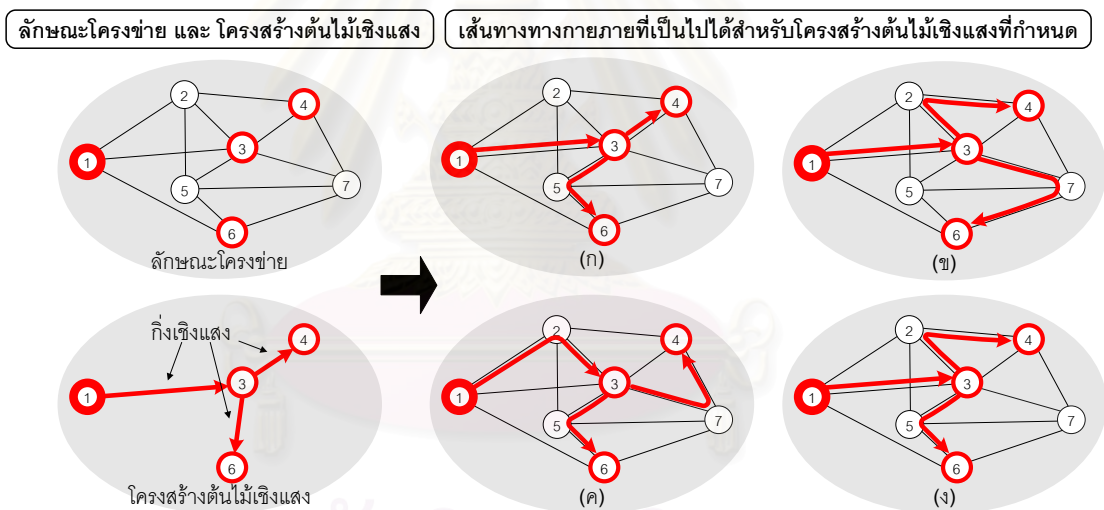
2.3 การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์บนโครงข่าย WDM

การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDM จะเป็นการสร้างวิถี (path) การเชื่อมต่อระหว่างโหนดต่าง ๆ ในโครงข่ายที่ต้องการติดต่อถึงกันในระบบที่ใช้ช่องสัญญาณ WDM เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณกราฟฟิกของผู้ใช้ในระบบได้ทั้งหมด ในการสร้างวิธิดังกล่าวจะต้องมีการกำหนดเส้นทาง และช่องสัญญาณให้กับกราฟฟิกแต่ละกราฟฟิกด้วย โดยในกรณีนี้แต่ละช่องสัญญาณในเส้นใยนำแสงจะถูกกำหนดเป็นค่าความยาวคลื่นในเส้นใยนำแสง ดังนั้น การกำหนดเส้นทาง และช่องสัญญาณให้กับกราฟฟิกในโครงข่ายจึงถูกเรียกเป็นการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่น (Routing and Wavelength Assignment, RWA) และหากกราฟฟิกที่พิจารณาเป็นชนิดมัลติคาสต์ จะเรียกรูปแบบการกำหนดเส้นทาง และช่องสัญญาณให้กับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ว่า การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (Multicast Routing and Wavelength Assignment, MC-RWA) ซึ่งข้อจำกัดในการกำหนดช่องสัญญาณคือ หากเส้นทางมากกว่าหนึ่งเส้นทางมีการใช้งานซ้ำเชื่อมโยงร่วมกัน เส้นทางนั้นจะต้องใช้ค่าความยาวคลื่นที่ไม่ซ้ำกัน ข้อจำกัดนี้ทำให้จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่ายมีความสำคัญ หากในโครงข่ายมีปริมาณกราฟฟิกมากก็จำเป็นที่จะต้องใช้งานความยาวคลื่นมากตามไปด้วย ซึ่งหากจำนวนความยาวคลื่นมีไม่เพียงพอ จะทำให้โครงข่ายไม่สามารถรองรับปริมาณกราฟฟิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ และเพื่อให้การทำ MC-RWA ให้กับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ของโครงข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การพิจารณาถึง

คุณลักษณะของทราฟฟิกที่เข้ามาในระบบจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ จากการศึกษางานวิจัยที่เผยแพร่อยู่ในปัจจุบันเกี่ยวกับลักษณะของทราฟฟิกในโครงข่ายพบว่า ทราฟฟิกจะถูกแบ่งออกเป็นสองแบบคือ ทราฟฟิกแบบคงที่ (static traffic) และ ทราฟฟิกแบบพลวัต (dynamic traffic) [4] หรือทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แต่ทราฟฟิกที่กำหนดในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นทราฟฟิกแบบคงที่ โดยแยกพิจารณาการจัดเส้นทาง และการจัดสรรความยาวคลื่นได้ดังนี้

2.3.1 การจัดเส้นทาง (Routing)

ในวิทยานิพนธ์นี้ การจัดเส้นทางจะอยู่บนพื้นฐานของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง นั่นคือ โหนดสมาชิกในมัลติคาสต์เซตชั้นเดียวกันทุกโหนดจะต้องเชื่อมต่อถึงกันในลักษณะที่ไม่ทำให้เกิดวงปิด และเส้นทางการเชื่อมต่อต้องมีทิศทางออกจากโหนดต้นทางไปสิ้นสุดยังกลุ่มโหนดปลายทาง โดยเรียกการเชื่อมต่อระหว่างคู่โหนดใด ๆ ในกลุ่มมัลติคาสต์เดียวกันว่า กิ่งเชิงแสง (optical branch) [12] ลักษณะโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับโครงข่ายตัวอย่างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การจัดเส้นทางบนโครงข่าย WDM โดยอาศัยพื้นฐานโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

รูปที่ 2.5 เป็นการจัดเส้นทางสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่มีโหนด 1 เป็นโหนดต้นทาง และมีโหนด 3 4 และ 6 เป็นโหนดปลายทาง โดยโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เลือกจะประกอบด้วยกิ่งเชิงแสง 3 กิ่งคือ กิ่งเชิงแสงจากโหนด 1 ไปโหนด 3 กิ่งเชิงแสงจากโหนด 3 ไปโหนด 4 และ กิ่งเชิงแสงจากโหนด 3 ไปโหนด 6 และเนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้โหนดที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณได้ต้องเป็นสมาชิกของกลุ่มมัลติคาสต์เท่านั้น ดังนั้น ในตัวอย่างนี้จึงอนุญาตให้โหนด 3

ติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณได้ และจากรูปที่ 2.5 จะพบว่า โครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เลือกสามารถมีเส้นทางทางกายภาพที่เป็นไปได้มากกว่าหนึ่งเส้นทางดังรูปที่ 2.5 (ก) ถึง (ง)

2.3.2 การกำหนดความยาวคลื่น (Wavelength Assignment)

การกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM ที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี [12] ดังนี้

1 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT)

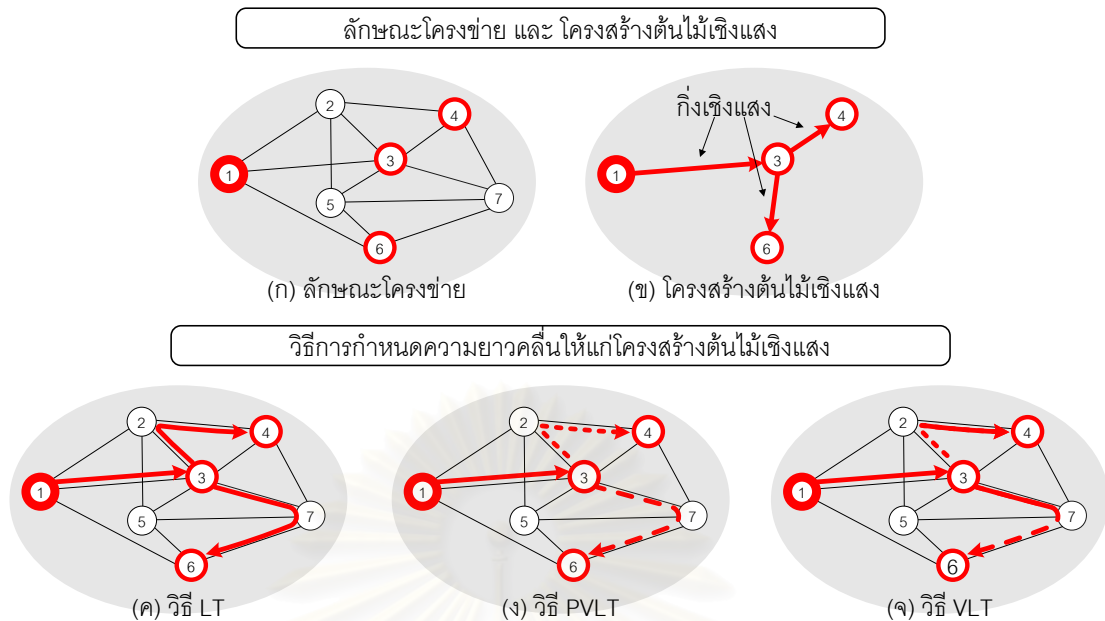
วิธีนี้ความยาวคลื่นที่ถูกกำหนดให้กับกิ่งเชิงแสงทุกกิ่งในโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะเป็นความยาวคลื่นค่าเดียวกัน นั่นคือ จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้จะเท่ากับจำนวนโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

2 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือนบางส่วน (Partial Virtual Light-Tree method, PVLT)

วิธีนี้การกำหนดความยาวคลื่นจะพิจารณาแยกแต่ละกิ่งเชิงแสง นั่นคือ ความยาวคลื่นที่ถูกกำหนดให้กับโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงในแต่ละกิ่งเชิงแสงนั้นสามารถมีค่าแตกต่างกันได้ แต่ความยาวคลื่นของโครงข่ายที่อยู่บนกิ่งเชิงแสงเดียวกันจะต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกัน ดังนั้นวิธีนี้จึงอนุญาตให้โหนดสมาชิกภายในกลุ่มมัลติคาสต์เท่านั้นที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้

3 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT)

วิธีนี้การกำหนดความยาวคลื่นจะพิจารณาแยกแต่ละข่ายเชื่อมโยง นั่นคือ ความยาวคลื่นที่ถูกกำหนดให้กับโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพนั้นสามารถมีค่าแตกต่างกันได้ ดังนั้นวิธีนี้จึงอนุญาตให้ทุกโหนดของโครงข่ายสามารถติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ ลักษณะการกำหนดความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



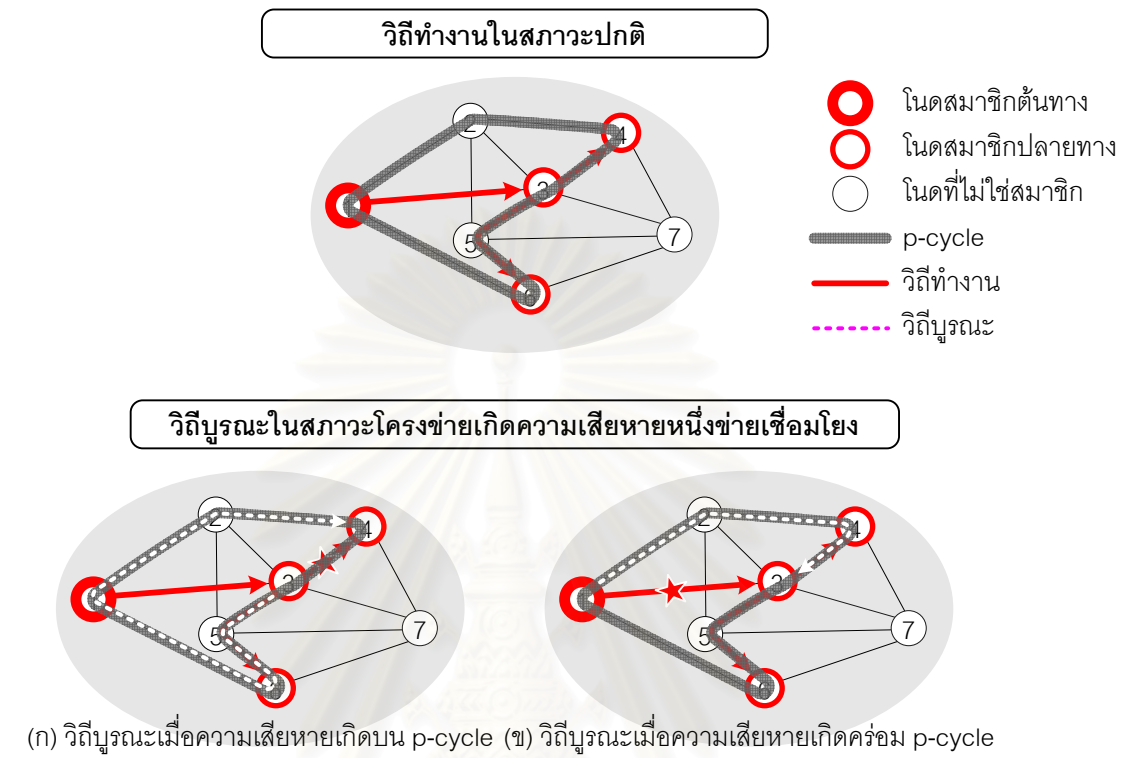
รูปที่ 2.6 การกำหนดความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDM บนพื้นฐานโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

2.4 การป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง

ในการออกแบบโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายที่ได้รับการออกแบบมีความเชื่อถือได้ (reliability) และมีความอยู่รอดได้ (survivability) ในสภาวะที่เกิดความขัดข้องขึ้น โครงข่ายที่ถูกออกแบบจะต้องมีความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากอุปกรณ์บางส่วนของโครงข่ายเช่น โหนดและเส้นใยนำแสงได้รับความขัดข้อง มาตรการที่ใช้ป้องกันความขัดข้องของโครงข่าย (protection) คือ การจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับทราฟฟิกในโครงข่าย กล่าวคือ เมื่อข่ายเชื่อมโยงมีความขัดข้องเกิดขึ้นไม่สามารถใช้งานได้ เส้นทางของทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ขัดข้องจะต้องเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงข่ายเชื่อมโยงที่ขัดข้อง เรียกเส้นทางที่โครงข่ายจัดสรรให้ใหม่นี้ว่า วิธีบูรณะ ดังนั้น การแก้ไขปัญหาเมื่อมีความขัดข้องเกิดขึ้นจำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มความจุเพิ่มให้กับโครงข่ายเพื่อใช้รองรับวิธีบูรณะ เรียกความจุนี้ว่า ความจุสำรอง และเนื่องจากมีการเพิ่มความจุสำรองเพิ่มให้กับโครงข่าย ดังนั้น ต้นทุนของโครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาเมื่อโครงข่ายได้รับความขัดข้องจึงสูงกว่าต้นทุนของโครงข่ายที่ไม่ได้แก้ปัญหานี้ ซึ่งจากการศึกษา งานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงข่าย WDM ที่สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดจากความขัดข้องในโครงข่ายนั้นพบว่า ความขัดข้องที่พบได้มาก และมีความซับซ้อนในการป้องกันไม่สูงมากนักคือ ความขัดข้องที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยสามารถแบ่งวิธีการป้องกันโครงข่ายออกได้เป็นสองวิธีใหญ่ ๆ [23] คือ วิธีการบูรณะบนพื้นฐานของร่างแห และวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบวงแหวน สำหรับวิธีการบูรณะบนพื้นฐานของร่างแห เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขึ้นในโครงข่าย

เส้นทางที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ขัดข้องจะถูกจัดสรรให้ใช้เส้นทางใหม่ที่เป็นวิถีบูรณะ ซึ่งเส้นทางที่สามารถเลือกใช้เป็นวิถีบูรณะนั้นมีจำนวนมาก อีกทั้งวิถีทำงาน (active path) ที่ไม่มีเส้นทางทับซ้อนกันยังสามารถใช้วิถีบูรณะร่วมกันได้ ด้วยเหตุนี้ ทำให้โครงข่ายที่ใช้วิธีการบูรณะบนพื้นฐานของร่างแหมีการเผื่อความจุสำรองไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อนำวิธีนี้มาพิจารณาประยุกต์ใช้กับการจัดสรรเส้นทางใหม่สำหรับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์พบว่า จะมีความซับซ้อนในการจัดสรรเส้นทางสูง และใช้เวลานาน เนื่องจากข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องนี้อาจจะส่งผลกระทบต่อมัลติคาสต์เซสชันมากกว่าหนึ่งกลุ่ม ทำให้ต้องมีการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้แก่มัลติคาสต์เซสชันที่ได้รับผลกระทบดังกล่าว ส่วนวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบวงแหวน เส้นทางในการรองรับกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความขัดข้องในโครงข่ายจะถูกเปลี่ยนให้ไปใช้เส้นทางซึ่งอยู่บนความจุสำรองที่เผื่อเอาไว้ซึ่งมีลักษณะเป็นวงแหวนเฉพาะงาน (dedicated ring) และที่โหนดบนวงแหวนจะติดตั้ง ADM (Add-Drop Multiplexer) ซึ่งอาศัยหลักการส่งข้อมูลขึ้นไปยังวงแหวน (add) และดึงข้อมูลลงมาจากวงแหวน (drop) ในการส่งต่อข้อมูล ทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในการประมวลผลที่ในระหว่างทาง วิธีนี้จึงสามารถแก้ไขความผิดพลาดในโครงข่ายจากความขัดข้องบนข่ายเชื่อมโยงได้อย่างรวดเร็ว และมีความซับซ้อนในการป้องกันความขัดข้องต่ำกว่าวิธีการบูรณะบนพื้นฐานของร่างแห แต่อย่างไรก็ตาม โครงสร้างแบบวงแหวนจะมีข้อเสียคือ เป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรต่ำ เนื่องจากความจุที่ไม่ถูกใช้งานในสถานะปกติไม่สามารถนำมาใช้เป็นความจุสำรองในสถานะโครงข่ายได้รับความขัดข้องได้ อีกทั้งความจุสำรองที่เผื่อในทุกข่ายเชื่อมโยงในวงแหวนจะต้องมีจำนวนเท่ากัน นั่นคือ เท่ากับจำนวนความจุสำรองบนข่ายเชื่อมโยงที่มีการเผื่อความจุสำรองมากที่สุด ทำให้ความจุบางส่วนในระบบอาจไม่ถูกใช้ประโยชน์ วิธีการป้องกันโครงข่ายอีกวิธีหนึ่งที่ได้มีการศึกษาคือ วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ p-cycle ซึ่งมีลักษณะผสมระหว่างวิธีการป้องกันโครงข่ายทั้งสองวิธีที่กล่าวไปแล้วข้างต้น นั่นคือ มีลักษณะการเผื่อความจุสำรองเป็นวงแหวนคล้ายกับวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบวงแหวน วิถีบูรณะที่จะถูกเปลี่ยนมาใช้เมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นจะอยู่บนวงแหวนที่ได้กำหนดเอาไว้ล่วงหน้า ทำให้วิธีนี้ใช้เวลาในการสับเปลี่ยนเส้นทางไม่มากนัก ข้อแตกต่างคือ วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ p-cycle นอกจากจะสามารถป้องกันความขัดข้องแก่ข่ายเชื่อมโยงที่อยู่บนวงแหวนแล้ว ยังสามารถป้องกันข่ายเชื่อมโยงที่คร่อมวงแหวนนั้นด้วย ซึ่งต่างจากวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบวงแหวนซึ่งป้องกันความขัดข้องได้เฉพาะข่ายเชื่อมโยงที่อยู่บนวงแหวนเท่านั้น ทำให้วิธีการป้องกันแบบ p-cycle นี้มีต้นทุนของโครงข่ายที่ต่ำกว่าวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบวงแหวน และเนื่องจากความจุที่ไม่ถูกใช้งานในสถานะปกติสำหรับวิธีการป้องกันแบบ p-cycle นั้นยังสามารถนำมาใช้เป็นความจุสำรองสำหรับใช้จัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบเมื่อโครงข่ายได้รับความขัดข้องได้ ทำให้วิธีนี้มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับวิธีการบูรณะบนพื้นฐาน

ของร่างแห แต่อย่างไรก็ตาม เส้นทางที่สามารถเลือกใช้เป็นวิธีบูรณะสำหรับวิธีนี้ถูกจำกัดอยู่บนวงแหวนที่กำหนดเท่านั้น ลักษณะการป้องกันโครงข่ายแบบ p-cycle สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การจัดเส้นทางบนโครงข่าย WDM เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยใช้วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ p-cycle

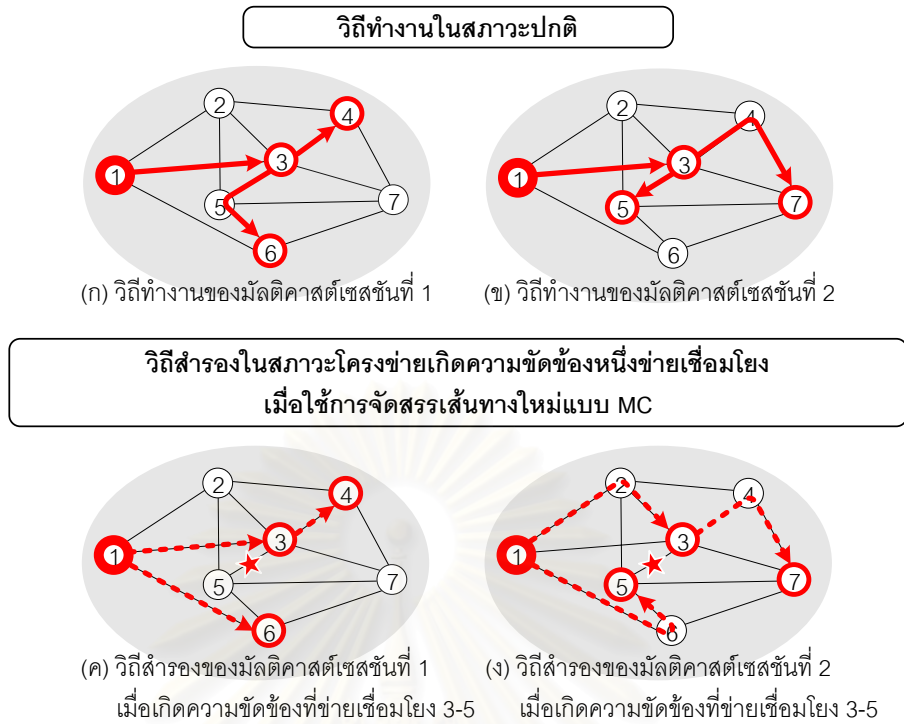
จากลักษณะการจัดเส้นทางเมื่อใช้วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ p-cycle รูปที่ 2.7 แสดงโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อความจุสำรองไว้ทั้งหมด 6 ช่วง (ช่วง 1-2 2-4 4-3 3-5 5-6 และ 6-1) โดยในรูปที่ 2.7 (ก) เมื่อเกิดความขัดข้องที่ข่ายเชื่อมโยง 3-4 ซึ่งเป็นข่ายเชื่อมโยงที่อยู่บน p-cycle ที่กำหนดไว้ ทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบคือทราฟฟิกที่ออกจากโนด 3 ไปยังโนด 4 วิธีบูรณะจะอยู่บน p-cycle ในทิศตามเข็มนาฬิกาตั้งเส้นประ แต่หากข่ายเชื่อมโยงที่ 1-3 ขัดข้อง จะพบว่าข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องจะอยู่คร่อม p-cycle วิธีบูรณะจะเป็นดังเส้นประในรูปที่ 2.7 (ข) คือจากข่ายเชื่อมโยง 1-2 2-4 และ 4-3 จะสังเกตว่าความจุสำรองที่ข่ายเชื่อมโยง 3-5 5-6 และ 6-1 ไม่ถูกใช้งาน

จากข้อดีและข้อเสียของวิธีการป้องกันโครงข่ายที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะเสนอวิธีการป้องกันโครงข่ายโดยสามารถจำแนกวิธีการป้องกันโครงข่ายได้ดังนี้

- 1 วิธีต้นทุนต่ำสุด (Minimal Cost Approach, MC)
- 2 วิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียว (One way Light Ring Approach, OLR)
- 3 วิธีใช้วงแหวนสองทิศทาง (Two way Light Ring Approach, TLR)

2.4.1 วิธีต้นทุนต่ำสุด (Minimal Cost Approach, MC)

โดยปกติ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ง่ายที่สุดสำหรับแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องคือ การจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางที่ถูกบกพรอนหรือวิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้อง ในขณะที่เส้นทางที่ไม่ถูกรบพรอนจากข่ายเชื่อมโยงที่ขัดข้องจะไม่มีการจัดสรรเส้นทางให้ใหม่ แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าโครงข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบต้นทุนต่ำสุด (MC) ในการแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง โครงข่ายจะอนุญาตให้มัลติคาสต์เซสชันทั้งหมดภายในโครงข่ายสามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่เมื่อเกิดเหตุการณ์หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยไม่พิจารณาว่ามัลติคาสต์เซสชันนั้นได้รับผลกระทบจากข่ายเชื่อมโยงที่ขัดข้องหรือไม่ โดยเส้นทางใหม่ยังคงมีลักษณะเป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเช่นเดิม แต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงลำดับในการติดต่อสื่อสารภายในกลุ่มมัลติคาสต์ วิธีนี้มีข้อดีคือ เป็นวิธีที่ให้ต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายต่ำกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบอื่น ๆ เนื่องจากเป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่อ้างอิงวิธีการจัดสรรเส้นทางเมื่อโครงข่ายอยู่ในสภาวะปกติ จึงสามารถกำหนดให้ต้นทุนของโครงข่ายที่ได้จากวิธีนี้เป็นต้นทุนต่ำสุดสำหรับสร้างโครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงข่ายสามารถเปลี่ยนแปลงเส้นทางได้ทั้งหมดเมื่อมีเหตุการณ์ที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง วิธีนี้จึงมีข้อเสียคือ การจัดสรรเส้นทางและการควบคุมโครงข่ายจะมีความซับซ้อนมากกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบอื่น ๆ ส่งผลให้ขนาดของฐานข้อมูลที่ต้องเก็บข้อมูลในการกำหนดเส้นทางเมื่อมีความขัดข้องเกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ รูปที่ 2.8 แสดงวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC โดยรูป (ก) และ (ข) แสดงวิถีทำงานของมัลติคาสต์เซสชันที่ 1 และ 2 ในสภาวะปกติตามลำดับ เมื่อเกิดความขัดข้องที่ข่ายเชื่อมโยง 3-5 วิธี MC จะกำหนดวิถีบูรณะให้มัลติคาสต์เซสชันทั้งสองดังรูป (ค) และ (ง) ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยใช้วิธี MC

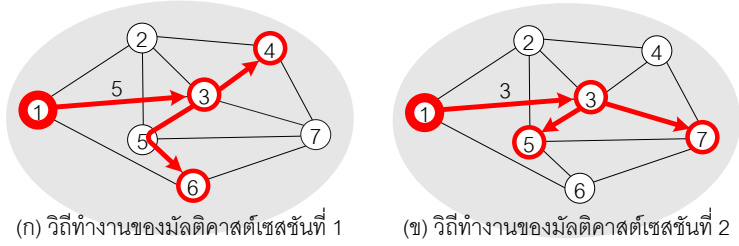
2.4.2 วิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียว (One way Light Ring Approach, OLR)

วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ OLR จัดเป็นการป้องกันโครงข่ายในระดับข่ายเชื่อมโยง เมื่อมีความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเกิดขึ้นในโครงข่าย วิธีทำงานทั้งหมดของทุกมัลติคาสต์เซสชันที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับผลกระทบจะถูกเปลี่ยนให้ไปใช้วิถีบูรณะวิถีเดียวกันที่อยู่บนวงแหวนที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยวงแหวนที่ใช้ป้องกันความขัดข้องจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับตำแหน่งของข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้อง อีกทั้งลักษณะการส่งข้อมูลภายในวงแหวนจะต้องเป็นไปในทิศทางเดียวกันตลอดทั้งวง ข้อสังเกตของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้คือ จำนวนวงแหวนที่กำหนดไว้สำหรับป้องกันโครงข่ายก็มีผลต่อปริมาณความจุสำรองที่ต้องการในโครงข่าย เนื่องจากหากกำหนดให้มีวงแหวนเพียงวงเดียวสำหรับป้องกันความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง นั้นหมายถึงมีวิถีบูรณะเพียงวิถีเดียวสำหรับรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องและจะถูกเปลี่ยนมาใช้วิถีบูรณะนี้ ความจุโดยรวมของวงแหวนก็ต้องเท่ากับผลคูณระหว่างจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ประกอบกันเป็นวงแหวนกับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องนั้น แต่หากกำหนดวงแหวนมากกว่าหนึ่งวงสำหรับป้องกันโครงข่ายเมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความผลกระทบก็สามารถเปลี่ยนไปใช้วิถี

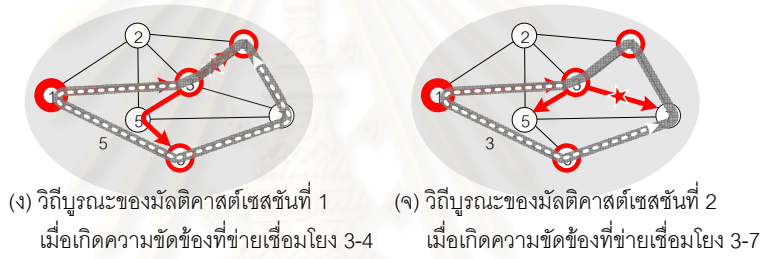
บรูณะบนวงแหวนได้มากกว่าหนึ่งวง ก็จะเป็นการกระจายกราฟฟีกไปบนวงแหวนหลาย ๆ วง ส่งผลให้โครงข่ายต้องการความจุสำรองโดยรวมน้อยลง รูปที่ 2.9 แสดงการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี OLR โดยรูป (ก) และ (ข) แสดงวิถีทำงานของมัลติคาสต์เซสชันที่ 1 และ 2 ตามลำดับ รูป (ค) ถึง (ข) แสดงวิถีบรูณะเมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยรูป (ค) ถึง (จ) จะกำหนดให้ใช้วงแหวนวงเดียวสำหรับป้องกันโครงข่าย ซึ่งจะเห็นว่า ปริมาณกราฟฟีกทั้งหมดที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยง 1-3 ในสภาวะโครงข่ายปกติจะมีค่าเท่ากับ 8 ดังนั้น เมื่อข่ายเชื่อมโยง 1-3 เกิดความขัดข้องขึ้น วิถีบรูณะจะอยู่บนวงแหวนดังที่แสดงในรูป (ค) จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ประกอบกันเป็นวงแหวนที่ใช้สำหรับป้องกันความขัดข้องข่ายเชื่อมโยง 1-3 มีค่าเท่ากับ 4 ดังนั้น ความจุรวมของวงแหวนจะมีค่าเท่ากับ $8 \times 4 = 32$ และเมื่อข่ายเชื่อมโยง 3-4 ที่รองรับปริมาณกราฟฟีกเท่ากับ 5 เกิดความขัดข้องขึ้น วิถีบรูณะจะอยู่บนวงแหวนดังที่แสดงในรูป (ง) จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ประกอบกันเป็นวงแหวนที่ใช้สำหรับป้องกันความขัดข้องข่ายเชื่อมโยง 3-4 มีค่าเท่ากับ 5 ซึ่งวงแหวนนี้ยังสามารถใช้แก้ไขปัญหาข่ายเชื่อมโยง 3-7 ที่รองรับปริมาณกราฟฟีกเท่ากับ 3 ได้รับความขัดข้องได้อีกด้วยดังรูป (จ) ดังนั้น ความจุรวมของวงแหวนจะมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างปริมาณกราฟฟีกที่มากที่สุดที่จะผ่านวงแหวนนี้เมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นกับจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ประกอบกันเป็นวงแหวน ซึ่งจะได้เท่ากับ $5 \times 5 = 25$ แต่อย่างไรก็ตาม วงแหวนสองวงนี้มีการใช้ความจุสำรองร่วมกันที่ข่ายเชื่อมโยง 3-1 และ 1-6 ทำให้เมื่อพิจารณาของสัญญาณสำรองที่โครงข่ายต้องเผื่อสำหรับกำหนดวงแหวน จะมีค่าเท่ากับ $32 + 25 - 10 = 47$ เมื่อ 10 คือจำนวนช่องสัญญาณสำรองที่ใช้ร่วมกัน

เมื่อพิจารณารูป (ฉ) และ (ช) จะกำหนดให้ใช้วงแหวนสองวงสำหรับป้องกันโครงข่าย โดยเมื่อข่ายเชื่อมโยง 1-3 เกิดความขัดข้องขึ้น ปริมาณกราฟฟีกทั้งหมดที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยง 1-3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8 จะถูกกระจายไปบนวงแหวนสองวง วงแรก (วงใหญ่) รองรับกราฟฟีกจากมัลติคาสต์เซสชันที่ 1 และ 2 รวมกันเท่ากับ 5 มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ประกอบกันเป็นวงแหวนที่ใช้สำหรับป้องกันความขัดข้องข่ายเชื่อมโยง 1-3 มีค่าเท่ากับ 6 ส่วนวงที่สอง (วงเล็ก) รองรับกราฟฟีกจากมัลติคาสต์เซสชันที่ 1 และ 2 รวมกันเท่ากับ 3 มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ประกอบกันเป็นวงแหวนที่ใช้สำหรับป้องกันความขัดข้องข่ายเชื่อมโยง 1-3 มีค่าเท่ากับ 4 ดังนั้น ความจุรวมของวงแหวนจะมีค่าเท่ากับ $(5 \times 6) + (3 \times 4) = 42$

วิธีทำงานในสภาวะปกติ



วิธีบูรณะในสภาวะโครงข่ายเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
เมื่อใช้การป้องกันโครงข่ายแบบ OLR แบบวงแหวนเดียว



วิธีบูรณะในสภาวะโครงข่ายเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
เมื่อใช้การป้องกันโครงข่ายแบบ OLR แบบหลายวงแหวน



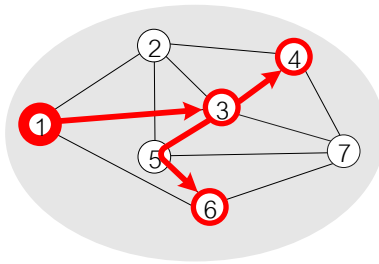
รูปที่ 2.9 การจัดเส้นทางเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยใช้วิธี OLR

จากหลักเกณฑ์ของวิธี OLR ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของวิธีนี้ได้ คือ เนื่องจากไม่มีการพิจารณาวิธีสำรองแยกแต่ละมัดติคาสต์เซสชัน อีกทั้งเฉพาะเส้นทางที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากสายเชื่อมโยงที่ได้รับความเสียหายเท่านั้น ที่สามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ได้ การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จึงมีความซับซ้อนในการควบคุมและจัดการโครงข่ายต่ำกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC อีกทั้งทำให้ใช้เวลาในการหาผลเฉลยที่น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวิธีการนี้มีความยืดหยุ่น (flexibility) ในการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับโครงข่ายน้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ดังนั้น ต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับวิธี OLR จึงมากกว่าวิธี MC

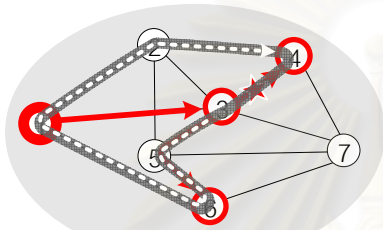
2.4.3 วิธีใช้วงแหวนสองทิศทาง (Two way Light Ring Approach, TLR)

วิธีการนี้มีความคล้ายคลึงกับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR คือ เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งสายเชื่อมโยงขึ้น โครงข่ายจะจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางที่วิ่งผ่านสายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องนั้น โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางอื่นที่ไม่ได้วิ่งผ่านสายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้อง ข้อแตกต่างระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR กับ TLR คือ วิธี OLR จะใช้วงแหวนแบบทิศทางเดียวตลอดทั้งวงในการป้องกันโครงข่าย ซึ่งอาจทำให้ความจุสำรองบางส่วนไม่ถูกใช้งาน สังเกตได้จากรูปที่ 2.9 (จ) จะเห็นว่าเมื่อความขัดข้องเกิดขึ้นที่สายเชื่อมโยง 3-7 ความจุสำรองบนวงแหวนที่สายเชื่อมโยง 3-1 1-6 และ 6-7 จะถูกนำมาใช้เป็นวิธินูรณ์เท่านั้น ความจุสำรองบนวงแหวนที่สายเชื่อมโยง 7-4 และ 4-3 จะไม่ถูกใช้งาน ส่วนวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR จะกำหนดให้ใช้วงแหวนสองทิศทางสำหรับป้องกันสายเชื่อมโยงในโครงข่าย โดยมีข้อกำหนดคือ หากวิธีทำงานอยู่บนวงแหวน จะได้วิธินูรณ์เพียงเส้นทางเดียว แต่หากวิธีทำงานอยู่คร่อมวงแหวน จะได้วิธินูรณ์สองเส้นทางดังรูปที่ 2.10 วิธีนี้มีข้อดีคือ เมื่อมีความขัดข้องหนึ่งสายเชื่อมโยงเกิดขึ้น ทรัพยากรของโครงข่ายที่สำรองไว้สำหรับป้องกันความขัดข้องที่เกิดขึ้นนั้นจะมีการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ก็มีความซับซ้อนในการจัดสรรเส้นทางและการควบคุมโครงข่ายที่สูงกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR อีกทั้งมีต้นทุนของโครงข่ายในแง่ของอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงเพิ่มเติมเข้ามาด้วย

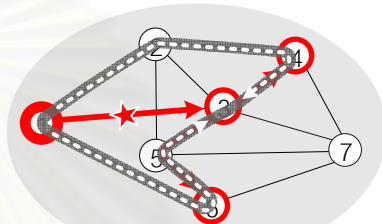
วิธีการทำงานในสภาวะปกติ



วิธีบูรณะในสภาวะโครงข่ายเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
เมื่อใช้การป้องกันโครงข่ายแบบ TLR



(ก) วิธีการทำงานอยู่บนวงแหวน



(ข) วิธีการทำงานอยู่क्रमวงแหวน

รูปที่ 2.10 การจัดเส้นทางเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยใช้วิธี TLR

จากที่ได้เสนอวิธีการจัดเส้นทางและความยาวคลื่นสำหรับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์บนโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้ และได้เสนอวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขึ้นจำนวน 3 วิธีนั้น ทั้งนี้ เพื่อประโยชน์ในการนำเอาวิธีที่ได้นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติได้ ดังนั้น ในบทต่อไปของวิทยานิพนธ์นี้จะเสนอวิธีการหาต้นทุนโครงข่ายทั้งในกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้ และในกรณีที่โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง โดยใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จำนวน 3 วิธี และพิจารณาทั้งกรณีโครงข่าย WDM ประเภท LT PVL T และ VLT โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาต้นทุนของโครงข่าย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองปัญหาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM ทั้งในกรณีที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องซึ่งได้เสนอไว้ในบทที่ 2 ได้ โดยวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองคือ เพื่อใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ ทั้งในกรณีทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ กรณีบางโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ โดยอาศัย Integer Linear Programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลอง

3.1 แบบจำลองของโครงข่าย (Network Model)

เพื่อให้เข้าใจถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงขอกล่าวถึงลักษณะ และสมมติฐานที่ใช้ในการจำลองโครงข่าย

กำหนดให้โครงข่าย WDM ที่พิจารณาถูกแทนด้วยกราฟแบบแสดงทิศทาง (directed graph) $G(V, E)$ ซึ่งประกอบไปด้วยเซตของโหนด (V) จำนวน N โหนด, $|V| = N$ และเซตของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ (physical Links) (E) แบบแสดงทิศทาง (directed links) จำนวน L ข่ายเชื่อมโยง, $|E| = L$ โดยในแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะประกอบด้วยกลุ่มของเส้นใยนำแสงที่ทำหน้าที่รองรับเส้นทางที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางกับปลายทาง รวมทั้งกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นมีจำนวนจำกัดเท่ากับ M ซึ่งในบทความทางวิชาการบางบทความเรียกว่า M นี้ว่า wavelength multiplicity [24] อีกทั้งยังกำหนดให้แต่ละโหนดมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการทำมัลติคาสต์เพื่อคัดลอกและแยกสัญญาณแสงออกเป็นสัญญาณย่อยจำนวนหนึ่ง ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่ร้องขอข้อมูลดังกล่าวเป็นจำนวนมากได้ นอกจากนี้ ยังกำหนดให้ปริมาณทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกชนิดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ โครงข่ายต้องการ

เส้นใยนำแสงที่ใช้งานในโครงข่าย WDM จะประกอบไปด้วยช่องสัญญาณหลาย ๆ ช่องสัญญาณซึ่งขึ้นอยู่กับค่า M ของเส้นใยนำแสง โดยสามารถแบ่งช่องสัญญาณเหล่านั้นออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการใช้งานช่องสัญญาณ ดังนี้

ความจุใช้งาน (working capacity) คือ ความจุที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นวิถีทำงาน (active path) ซึ่งเป็นเส้นทางใช้งานทั่วไปเมื่อโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ หรือสภาวะที่ไม่มีความขัดข้องเกิดขึ้นในโครงข่าย

ความจุสำรอง (spare capacity) คือ ความจุที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นวิถีสำรอง (protection path) ซึ่งเป็นเส้นทางที่จะถูกเปลี่ยนมาใช้งานเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความขัดข้อง

ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองปัญหาการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

- 1 Optimized Spare Capacity Assignment เป็นวิธีการหาจำนวนความจุสำรองทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง ในกรณีนี้จะต้องมีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นของวิถีทำงานมาให้ รวมทั้งกำหนดจำนวนความจุทำงานมาให้ด้วย เพื่อนำมาพิจารณาร่วมกับความจุสำรองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ
- 2 Jointly Optimized Working and Spare Capacity Assignment เป็นวิธีการหาความจุทำงานทั้งหมดที่ใช้รองรับทราฟฟิกเมื่อโครงข่ายอยู่ในสภาวะปกติ และจำนวนความจุสำรองทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง พร้อมกัน โดยไม่ต้องมีการกำหนดเส้นทาง ความยาวคลื่น และจำนวนความจุทำงานมาให้เหมือนกับวิธีแรก

เมื่อพิจารณาจะพบว่า การจำลองปัญหาในกรณีแรกจะเป็นการจำลองปัญหาสำหรับโครงข่ายที่มีการใช้งานจริงในทางปฏิบัติแล้ว แต่ที่โครงข่ายดังกล่าวยังไม่ได้มีการคำนึงถึงกรณี

หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง นั่นคือ ยังไม่มีการติดตั้งความจุสำรองเพิ่มเติมให้กับโครงข่าย ดังนั้น สามารถใช้วิธีการจำลองปัญหาแบบแรกมาออกแบบหาจำนวนความจุสำรองที่โครงข่ายต้องการได้ ส่วนในกรณีของการจำลองปัญหาในกรณีที่สองนั้น จะเหมาะสำหรับการออกแบบโครงข่ายที่ต้องการทราบถึงต้นทุนของโครงข่ายก่อนที่จะมีการพิจารณาวางโครงข่ายจริงในทางปฏิบัติ โดยค่าต้นทุนของโครงข่ายจะเป็นค่าจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ต้องทำการติดตั้งให้กับโครงข่ายซึ่งจะประกอบไปด้วยความจุทำงานและความจุสำรอง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีแรกเท่านั้น โดยกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ดังนี้

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
N	จำนวนโหนดทั้งหมดในโครงข่าย
L	จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาทั้งหมดในโครงข่าย
$K = R $	จำนวนมัลติคาสต์เซสชัน
$r_k (s_k, D_k)$	มัลติคาสต์เซสชันที่ r_k โดยมีโหนดต้นทางคือ s_k และมีชุดโหนดปลายทางคือ ชุด D_k
t_{r_k}	ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k
Δ	จำนวนสัญญาณที่มากที่สุดที่อนุญาตให้ออกจากตัวแยกสัญญาณได้ (fanout)
M	จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ลงบนเส้นใยนำแสงได้
$\xi_{sd,p}^{r_k}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อกึ่งเชิงแสง sd สามารถใช้เส้นทางที่ p ของชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k เป็นเส้นทางในการส่งข้อมูลได้ ถ้าไม่สามารถใช้ได้จะมีค่าเป็น 0
$\delta_{ij,p}^{r_k}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ p ของชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0
P_{r_k}	ชุดของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างคูโหนดที่เป็นสมาชิกของมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k
I_∞	ค่าคงที่จำนวนเต็มที่มีค่ามาก
ตัวแปร	คำอธิบาย
f_{ij}	จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมโยง ij
$x_{r_k}^i$	มีค่าเป็น 1 เมื่อกึ่งเชิงแสงที่ใช้ส่งข้อมูลจากโหนด i ไปยังโหนด j ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ถ้าไม่ถูกใช้จะมีค่าเป็น 0

ตัวแปร	คำอธิบาย
$a_{r_k,p}$	เส้นทางทางกายภาพ (physical route) ลำดับที่ p ของชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k (สำหรับวิธี VLT)
$a_{r_k,p,\lambda}$	เส้นทางทางกายภาพลำดับที่ p ของชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ (สำหรับวิธี LT และวิธี PVLT)
$W_{r_k,\lambda}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อค่าความยาวคลื่น λ ถูกเลือกเพื่อใช้ส่งข้อมูลสำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ถ้าไม่ถูกเลือกจะมีค่าเป็น 0 (สำหรับวิธี LT)

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรเพิ่มเติมสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายได้รับความขัดข้อง

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
$\phi_{sd,e}^{r_k,ij}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อกิ่งเชิงแสง sd สามารถใช้วิถีนูรณะที่ e ของชุดวิถีนูรณะจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k เป็นเส้นทางในการส่งข้อมูลได้เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง ถ้าไม่สามารถใช้ได้จะมีค่าเป็น 0
$\mu_{ij,e}^{r_k,ij}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อวิถีนูรณะที่ e ของชุดวิถีนูรณะจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0
$E_{r_k}^{ij}$	ชุดของวิถีนูรณะที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างคูโนดที่เป็นสมาชิกของมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง
Q	ชุดของวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่าย
F	ชุดของข่ายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกในโครงข่ายในสภาวะปกติ
g_{ij}^l	มีค่าเป็น 1 เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij คือข่ายเชื่อมโยงที่ l ของโครงข่าย ถ้าไม่ใช่จะมีค่าเป็น 0
CR	จำนวนวงแหวนที่มากที่สุดที่สามารถใช้เป็นวงแหวนในการป้องกันความขัดข้อง
w_{ij}	ความจุใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง ij (สำหรับวิธี VLT)
$w_{ij,\lambda}$	ความจุใช้งานซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ บนข่ายเชื่อมโยง ij (สำหรับวิธี LT และวิธี PVLT)
$\gamma_{q,d}^{ij}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ d (เส้นทางทวนเข็มนาฬิกา และเส้นทางตามเข็มนาฬิกา) บนวงแหวนวงที่ q สามารถใช้เป็นวิถีนูรณะเมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้องได้ ถ้าไม่สามารถใช้ได้จะมีค่าเป็น 0 (สำหรับวิธี VLT)

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
$\varphi_{q,d,\lambda}^{ij}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ d บนวงแหวนวงที่ q ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ สามารถใช้เป็นวิธินูรณ์เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij ได้รับความขัดข้องได้ ถ้าไม่สามารถใช้ได้จะมีค่าเป็น 0 (สำหรับวิธี LT และวิธี PVLT)
$\chi_{q,d}^{ij,ij'}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อวิธินูรณ์ที่ d บนวงแหวนวงที่ q ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0 (สำหรับวิธี VLT)
$\psi_{q,d,\lambda}^{ij,ij'}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อวิธินูรณ์ที่ d บนวงแหวนวงที่ q ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0 (สำหรับวิธี LT และวิธี PVLT)
$\sigma_{q,d}^{i,ij,ij'}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อวิธินูรณ์ที่ i บนวงแหวนวงที่ q ทิศทาง d ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0 (สำหรับวิธี VLT)
$\eta_{q,d,\lambda}^{i,ij,ij'}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อวิธินูรณ์ที่ i บนวงแหวนวงที่ q ทิศทาง d ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0 (สำหรับวิธี LT และวิธี PVLT)
$G_{q,d}^{ij'}$	ชุดของเส้นทางที่ใช้เป็นวิธินูรณ์บนวงแหวนวงที่ q เส้นทางที่ d เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง
ตัวแปร	คำอธิบาย
$x_{r_k,ij}^{ij}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อกิ่งเชิงแสงสำรอง (backup optical branch) ที่ใช้ส่งข้อมูลจากโหนด i ไปยังโหนด j ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง ถ้าไม่ถูกใช้จะมีค่าเป็น 0
$u_{r_k,e}^{ij}$	วิธินูรณ์ลำดับที่ e ของชุดวิธินูรณ์จากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง (สำหรับวิธี VLT)
$u_{r_k,e,\lambda}^{ij}$	วิธินูรณ์ลำดับที่ e ของชุดวิธินูรณ์จากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง (สำหรับวิธี LT และวิธี PVLT)
c_q^l	มีค่าเป็น 1 เมื่อวงแหวนวงที่ q ถูกเลือกเป็นวงแหวนสำหรับป้องกันข่ายเชื่อมโยงที่ l เกิดความขัดข้อง ถ้าไม่ถูกเลือกจะมีค่าเป็น 0
$n_{q,d}^l$	วิธินูรณ์ที่ d บนวงแหวนวงที่ q เมื่อข่ายเชื่อมโยง l ได้รับความขัดข้อง (สำหรับวิธี VLT)
$n_{q,d,\lambda}^l$	วิธินูรณ์ที่ d บนวงแหวนวงที่ q ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ เมื่อข่ายเชื่อมโยง l ได้รับความขัดข้อง (สำหรับวิธี LT และวิธี PVLT)

ตัวแปร	คำอธิบาย
$s_{ij,ij}$	ความจุสำรองบนข่ายเชื่อมโยง ij เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง (สำหรับวิธี VLT)
$s_{ij,ij',\lambda}$	ความจุสำรองซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ บนข่ายเชื่อมโยง ij เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง (สำหรับวิธี LT และวิธี PVLT)
$p_{q,d}^{i,ij'}$	เส้นทางลำดับที่ i บนวงแหวนวงที่ q ทิศทางที่ d ที่เป็นวิธินูรณะเมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง (สำหรับวิธี VLT)
$p_{q,d,\lambda}^{i,ij'}$	เส้นทางลำดับที่ i บนวงแหวนวงที่ q ทิศทางที่ d ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ ที่เป็นวิธินูรณะเมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความขัดข้อง (สำหรับวิธี LT และวิธี PVLT)

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

ในการหาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด (optimal light-tree) T_k เพื่อรองรับมัลติคาสต์เซตชั้นที่ $r_k(s_k, D_k)$ นั้น จะต้องแทนที่โครงข่าย WDM ที่พิจารณาด้วยกราฟแบบแสดงทิศทาง $G_k = (E_k, V_k)$ โดยชุดของโหนด E_k จะประกอบไปด้วยโหนดต้นทาง s_k และชุดของโหนดปลายทาง D_k ซึ่งสามารถแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $E_k = \{i \in E_k | i \in D_k \vee i = s_k\}$ รวมทั้งสิ้นจำนวน N_k โหนด, $|E_k| = N_k$ และชุดของเส้นเชื่อมเชิงตรรกะ (logical arcs) V_k ซึ่งแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $V_k = \{ij \in V_k | i, j \in E_k \wedge i \neq j\}$ แล้วเปลี่ยนกราฟแบบแสดงทิศทาง G_k ที่ได้ให้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด T_k โดยโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องประกอบด้วยกิ่งเชิงแสงจำนวน $N_k - 1$ กิ่ง ดังนั้น สามารถแสดงเงื่อนไขบังคับ 2 ข้อแรกได้ดังนี้

$$\sum_{ij \in V_k} x_{r_k}^{ij} = N_k - 1, \quad \forall r_k \in R \quad (3.1)$$

$$x_{r_k}^{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall ij \in V_k, \forall r_k \in R \quad (3.2)$$

เมื่อพิจารณาเส้นเชื่อมขาออกของแต่ละโหนด จะพบว่าจำนวนเส้นเชื่อมขาออกของแต่ละโหนดจะถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสงที่สามารถแยกสัญญาณแสงออกเป็นสัญญาณขนาดย่อยได้จำนวนเท่ากับ Δ ดังนั้น สามารถแสดงเงื่อนไขบังคับข้อที่ 3 ได้ดังนี้

$$\sum_{j:ij \in V_k} x_{r_k}^{ij} \leq \Delta, \quad \forall i \in E_k, \forall r_k \in R \quad (3.3)$$

และเพื่อเป็นการรับประกันว่าทุกโหนดที่เป็นสมาชิกของกลุ่มมัลติคาสต์สามารถเชื่อมต่อกันได้ และโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องไม่มีลักษณะเป็นวงปิด เงื่อนไขบังคับข้อที่ 4 สามารถแสดงได้ ดังนี้

$$\sum_{ij \in \mathcal{A}(S)} x_{r_k}^{ij} \geq 1, \quad \forall S \subset E_k, S \neq \emptyset, N, \forall r_k \in R \quad (3.4)$$

เมื่อ S คือเซตย่อย (subset) ของ E_k และ $\mathcal{A}(S)$ คือเซตตัด (cut-set) ของเซตย่อย S โดยสามารถแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $\mathcal{A}(S) = \{ij \in V_k \mid i \in S, j \notin S\}$ และเมื่อพิจารณาเส้นเชื่อมขาเข้าของแต่ละโหนดพบว่า ทุกโหนดที่เป็นโหนดปลายทางจะต้องมีเส้นเชื่อมขาเข้าเพียงเส้นเดียวเท่านั้น ยกเว้นโหนดต้นทางจะไม่มีเส้นเชื่อมขาเข้า จึงสามารถแสดงเงื่อนไขบังคับข้อที่ 4 ได้ดังนี้

$$\sum_{ij \in V_k} x_{r_k}^{ij} = \begin{cases} 0 & , j = \text{source} \\ 1 & , \text{otherwise} \end{cases}, \quad \forall j \in E_k, \forall r_k \in R \quad (3.5)$$

นอกจากนั้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเลือกเส้นทางแบบย้อนกลับทางเดิมบนเส้นเชื่อมเดียวกัน สามารถแสดงเงื่อนไขบังคับข้อที่ 6 ได้ดังนี้

$$x_{r_k}^{ij} + x_{r_k}^{ji} \leq 1, \quad \forall ij \in V_k, \forall r_k \in R \quad (3.6)$$

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายทำงานในสถานะปกติ

ในการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ในสถานะทำงานปกติ จะเป็นการจัดสรรความจุใช้งานเพื่อรองรับเส้นทางที่เป็นวิธีทำงานให้กับโครงข่าย โดยสามารถใช้เทคนิค ILP ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

3.4.1 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (3.7)$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.1) ถึง (3.6) และ

$$\sum_{p \in P_k} \sum_{\lambda=1}^M a_{r_k, p, \lambda} \xi_{sd, p}^{r_k} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in V_k, \forall r_k \in R \quad (3.8)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_k} a_{r_k, p, \lambda} \xi_{sd, p}^{r_k} \delta_{ij, p}^{r_k} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L \quad (3.9)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{r_k, \lambda} = 1, \quad \forall r_k \in R \quad (3.10)$$

$$a_{r_k, p, \lambda} \xi_{sd, p}^{r_k} \leq I_\infty \times W_{r_k, \lambda}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall sd \in V_k, \forall r_k \in R \quad (3.11)$$

$$W_{r_k, \lambda} \in \{0, 1\}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R \quad (3.12)$$

$$a_{r_k, p, \lambda} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall p \in P_k, \forall r_k \in R \quad (3.13)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (3.14)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นวิธี LT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.7) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.1) ถึง (3.14) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อ (3.1) ถึง (3.6) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้หาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.8) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.9) เป็นเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้บังคับให้ความจุของสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.10) จะกำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซสชันเลือกความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียว และความยาวคลื่นนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางทางกายภาพที่เลือกจากเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.8) ซึ่งแสดงได้ดังเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.11) ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.12) ถึง (3.14) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นตัวแปรแบบบูล (boolean variable) และจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.4.2 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือนบางส่วน (Partial Virtual Light-Tree method, PVLT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (3.15)$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.1) ถึง (3.6) และ

$$\sum_{p \in P_k} \sum_{\lambda=1}^M a_{r_k, p, \lambda} \xi_{sd, p}^{r_k} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in V_k, \forall r_k \in R \quad (3.16)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{r_k}} a_{r_k, p, \lambda} \xi_{sd, p}^{r_k} \delta_{ij, p}^{r_k} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L \quad (3.17)$$

$$a_{r_k, p, \lambda} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall p \in P_{r_k}, \forall r_k \in R \quad (3.18)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (3.19)$$

จะสังเกตเห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี PVLT จะมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี LT นั่นคือ วิธี PVLT จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.15) เงื่อนไขบังคับข้อ (3.1) ถึง (3.6) และ (3.16) ถึง (3.19) เหมือนกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.7) เงื่อนไขบังคับข้อ (3.1) ถึง (3.6) (3.8) ถึง (3.9) และ (3.13) ถึง (3.14) ในวิธี LT ตามลำดับ ข้อแตกต่างระหว่างแบบจำลองสองแบบนี้คือ วิธี PVLT จะไม่มีการกำหนดให้แต่ละกราฟฟิกภายในมัลติคาสต์เซตชั้นเดียวกันใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกัน แต่จะกำหนดให้กราฟฟิกที่ถูกส่งจากโนดหนึ่งไปยังโนดสมาชิกมัลติคาสต์เซตชั้นเดียวกันเท่านั้นที่ต้องใช้ค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกัน

3.4.3 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (3.20)$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.1) ถึง (3.6) และ

$$\sum_{p \in P_{r_k}} a_{r_k, p} \xi_{sd, p}^{r_k} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in V_k, \forall r_k \in R \quad (3.21)$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{r_k}} a_{r_k, p} \xi_{sd, p}^{r_k} \delta_{ij, p}^{r_k} \geq 0, \quad \forall ij \in L \quad (3.22)$$

$$a_{r_k, p} \in Z^+, \quad \forall p \in P_{r_k}, \forall r_k \in R \quad (3.23)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (3.24)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นวิธี VLT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.20) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.1) ถึง (3.6) และ (3.21) ถึง (3.24) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อ (3.1) ถึง (3.6) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้หาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.21) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.22) เป็นเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้บังคับให้ความจุของสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.23) และ (3.24) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายได้รับความขัดข้อง

เมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นในโครงข่าย ทราฟฟิกในโครงข่ายจะถูกจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น โดยสามารถแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่าง ๆ ดังนี้

3.5.1 วิธีต้นทุนต่ำสุด (Minimal Cost Approach, MC)

เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขึ้นในโครงข่าย การจัดสรรเส้นทางใหม่โดยใช้วิธีต้นทุนต่ำสุดจะกำหนดให้ทุกเส้นทางในโครงข่ายเปลี่ยนไปใช้วิถีบูรณะ โดยไม่คำนึงว่าเส้นทางเหล่านั้นจะผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องหรือไม่ ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงของแต่ละข่ายเชื่อมโยงในสภาวะที่เกิดความขัดข้องขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะปกติ ดังนั้น เพื่อให้โครงข่ายสามารถรองรับทราฟฟิกได้ทั้งในสภาวะปกติ และในสภาวะที่โครงข่ายเกิดความขัดข้องในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะต้องมีการกำหนดจำนวนเส้นใยนำแสงทำงานในสภาวะปกติมาให้ ซึ่งในที่นี้คือ $f_{w_{ij}}$ แล้วจึงสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ตามวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ดังนี้

3.5.1.1 กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (3.25)$$

และมีเงื่อนไขบังคับ

$$\sum_{ij \in V_k} x f_{r_k, ij}^{ij} = N_k - 1, \quad \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.26)$$

$$x f_{r_k, ij}^{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall ij \in V_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.27)$$

$$\sum_{j: ij \in V_k} x f_{r_k, ij}^{ij} \leq \Delta, \quad \forall i \in E_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.28)$$

$$\sum_{ij \in \partial(S)} x f_{r_k, ij}^{ij} \geq 1, \quad \forall S \subset E_k, S \neq \phi, N, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.29)$$

$$\sum_{ij \in V_k} x f_{r_k, ij}^{ij} = \begin{cases} 0 & , j = source \\ 1 & , otherwise \end{cases}, \quad \forall j \in E_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.30)$$

$$x f_{r_k, ij}^{ij} + x f_{r_k, ij'}^{ij'} \leq 1, \quad \forall ij \in V_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.31)$$

$$\sum_{e \in E_{r_k}^{ij'}} \sum_{\lambda=1}^M u_{r_k, e, \lambda}^{ij'} \phi_{sd, e}^{r_k, ij'} = t_{r_k} \times x f_{r_k, ij'}^{sd}, \quad \forall sd \in V_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.32)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{e \in E_{r_k}^{ij'}} u_{r_k, e, \lambda}^{ij'} \phi_{sd, e}^{r_k, ij'} \mu_{ij, e}^{r_k, ij'} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.33)$$

$$f_{ij} - f w_{ij} \geq 0, \quad \forall ij \in L \quad (3.34)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{r_k, \lambda} = 1, \quad \forall r_k \in R \quad (3.35)$$

$$u_{r_k, e, \lambda}^{ij'} \phi_{sd, e}^{r_k, ij'} \leq I_\infty \times W_{r_k, \lambda}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall sd \in V_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.36)$$

$$W_{r_k, \lambda} \in \{0, 1\}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R \quad (3.37)$$

$$u_{r_k, e, \lambda}^{ij'} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall e \in E_{r_k}^{ij'}, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.38)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (3.39)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี MC กรณี LT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.25) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้น และสามารถอยู่รอดได้จากความขัดข้องที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.26) ถึง (3.39) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.26) ถึง (3.31) เป็นเงื่อนไขในการหาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุดเมื่อข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความขัดข้อง โดยมีลักษณะคล้ายกับเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.1) ถึง (3.6) ในการหาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะปกติ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.32) บังคับให้เมื่อความขัดข้องเกิดขึ้น กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.33) เป็นเงื่อนไขที่แสดงว่า เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขึ้น ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงจะยังคงสามารถรองรับ

ปริมาณกราฟฟิกรทั้งหมดที่เปลี่ยนมาใช้งานข่ายเชื่อมโยงนั้น ๆ ได้ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.34) เป็นเงื่อนไขที่บังคับให้จำนวนเส้นโยงนำแสงของแต่ละข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับกราฟฟิกรได้ในสภาวะปกติ และในสภาวะที่โครงข่ายเกิดความขัดข้อง เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.35) จะกำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซสชันเลือกความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียว และความยาวคลื่นนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางทางกายภาพที่เลือกจากเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.32) ซึ่งแสดงได้ดังเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.36) ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.37) ถึง (3.39) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นตัวแปรแบบบูล และจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.1.2 กรณี PVLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (3.40)$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.26) ถึง (3.31) และ

$$\sum_{e \in E_{r_k}^{ij'}} \sum_{\lambda=1}^M u_{r_k, e, \lambda} \phi_{sd, e}^{r_k, ij'} = t_{r_k} \times x f_{r_k, ij'}^{sd}, \quad \forall sd \in V_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.41)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{e \in E_{r_k}^{ij'}} u_{r_k, e, \lambda}^{ij'} \phi_{sd, e}^{r_k, ij'} \mu_{ij, e}^{r_k, ij'} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.42)$$

$$f_{ij} - f w_{ij} \geq 0, \quad \forall ij \in L \quad (3.43)$$

$$u_{r_k, e, \lambda}^{ij'} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall e \in E_{r_k}^{ij'}, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.44)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (3.45)$$

จะสังเกตเห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี MC กรณี PVLT จะมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี MC กรณี LT นั่นคือ วิธี MC กรณี PVLT จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.40) เงื่อนไขบังคับข้อ (3.26) ถึง (3.31) และ (3.41) ถึง (3.45) เหมือนกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.25) เงื่อนไขบังคับข้อ (3.26) ถึง (3.31) (3.32) ถึง (3.34) และ (3.38) ถึง (3.39) ในวิธี MC กรณี LT ตามลำดับ ข้อแตกต่างระหว่างแบบจำลองสองแบบนี้คือ วิธี MC กรณี PVLT จะไม่มีการกำหนดให้แต่ละกราฟฟิกรภายในมัลติคาสต์เซสชันเดียวกันใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกัน แต่จะกำหนดให้กราฟฟิกรที่ถูกส่งจากโหนดหนึ่งไปยังโหนดสมาชิกมัลติคาสต์เซสชันเดียวกันเท่านั้นที่ต้องใช้ค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกัน

3.5.1.3 กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (3.46)$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.26) ถึง (3.31) และ

$$\sum_{e \in E_{r_k}^{ij'}} u_{r_k, e}^{ij'} \phi_{sd, e}^{r_k, ij'} = t_{r_k} \times x f_{r_k, ij'}^{sd}, \quad \forall sd \in V_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.47)$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{e \in E_{r_k}^{ij'}} u_{r_k, e, \lambda}^{ij'} \phi_{sd, e}^{r_k, ij'} \mu_{ij, e}^{r_k, ij'} \geq 0, \quad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.48)$$

$$f_{ij} - fw_{ij} \geq 0, \quad \forall ij \in L \quad (3.49)$$

$$u_{r_k, e}^{ij'} \in Z^+, \quad \forall e \in E_{r_k}^{ij'}, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (3.50)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (3.51)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี MC กรณี VLT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.46) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้น และสามารถอยู่รอดได้จากความขัดข้องที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.26) ถึง (3.31) และข้อ (3.47) ถึง (3.51) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.26) ถึง (3.31) เป็นเงื่อนไขในการหาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุดเมื่อข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความขัดข้อง เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.47) บังคับให้เมื่อความขัดข้องเกิดขึ้น กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.48) เป็นเงื่อนไขที่แสดงว่า เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขึ้น ความจุของสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงจะยังคงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เปลี่ยนมาใช้งานข่ายเชื่อมโยงนั้น ๆ ได้ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.49) เป็นเงื่อนไขที่บังคับให้จำนวนเส้นใยนำแสงของแต่ละข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับทราฟฟิกได้ในสภาวะปกติ และในสภาวะที่โครงข่ายเกิดความขัดข้อง ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.50) ถึง (3.51) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.2 วิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียว (One way Light Ring Approach, OLR)

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 วิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียวในการป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้องหนึ่งข้างเชื่อมโยงนั้นเป็นการป้องกันโครงข่ายในระดับข้างเชื่อมโยงเท่านั้น อีกทั้งการเปลี่ยนเส้นทางไปใช้วิธีบูรณะจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อข้างเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องมีทราฟฟิกวิ่งผ่าน ดังนั้น จะต้องมีกระบวนการระบุความจุทำงานในสภาวะปกติมาให้อด้วย ซึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ ต้องกำหนด $w_{r_k,ij}$ สำหรับกรณี VLT หรือ $w_{r_k,ij,\lambda}$ สำหรับกรณี PVLT และ LT แล้วจึงสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ตามวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ดังนี้

3.5.2.1 กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (3.52)$$

และมีเงื่อนไขบังคับ

$$\sum_{q \in Q} c_q^l \leq CR, \quad \forall l \in F \quad (3.53)$$

$$n_{q,d,\lambda}^l \leq I_\infty \times c_q^l, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.54)$$

$$\sum_{r_k=1}^K w_{r_k,ij,\lambda} - \sum_{q \in Q} \sum_{d=1}^2 \sum_{l \in F} n_{q,d,\lambda}^l \mathcal{G}_{ij}^l \varphi_{q,d,\lambda}^{ij} \leq 0, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall ij \in L \quad (3.55)$$

$$s_{ij,ij',\lambda} = \sum_{q \in Q} \sum_{d=1}^2 \sum_{l \in F} n_{q,d,\lambda}^l \mathcal{G}_{ij}^l \psi_{q,d,\lambda}^{ij,ij'}, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.56)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k=1}^K w_{r_k,ij,\lambda} - s_{ij,ij',\lambda} - s_{ij',ij,\lambda} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.57)$$

$$c_q^l \in \{0,1\}, \quad \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.58)$$

$$s_{ij,ij',\lambda} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.59)$$

$$n_{q,d,\lambda}^l \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.60)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (3.61)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี OLR กรณี LT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.52) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้น และสามารถอยู่รอดได้จากความขัดข้องที่หนึ่งข้างเชื่อมโยง โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.53) ถึง (3.61) ซึ่งเงื่อนไข

บังคับข้อที่ (3.53) เป็นเงื่อนไขในการเลือกวงแหวนสำหรับรองรับทุกมัลติคาสต์เซสชันเมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข้างเชื่อมโยงขึ้น โดยอนุญาตให้เลือกวงแหวนได้เป็นจำนวนจำกัด CR วงแหวนต่อความเสียหายหนึ่งข้างเชื่อมโยง เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.54) บังคับให้สามารถเพื่อความจุสำรองสำหรับความยาวคลื่นทุกค่าลงบนวงแหวนที่เลือกได้จากเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.53) เท่านั้น เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.55) เป็นเงื่อนไขที่บังคับให้ความจุสำรองสำหรับความยาวคลื่นแต่ละค่าของวงแหวนที่เลือกมีเพียงพอสำหรับรองรับช่องสัญญาณทำงานทุกช่องที่ใช้ค่าความยาวคลื่นนั้นเมื่อมีความขัดข้องเกิดขึ้น เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.56) แสดงจำนวนช่องสัญญาณสำรองที่เผื่อบนสายเชื่อมโยง ij ที่ค่าความยาวคลื่น λ ให้มีค่าเท่ากับผลรวมของช่องสัญญาณสำรองของวงแหวนทั้งหมดที่ใช้ค่าความยาวคลื่น λ ที่ถูกวางบนสายเชื่อมโยง ij เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.57) เป็นเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้บังคับให้ความจุช่องสัญญาณของสายเชื่อมโยงทุกสายสามารถรองรับช่องสัญญาณทำงานและช่องสัญญาณสำรองทุกช่องที่วิ่งผ่านสายเชื่อมโยงนั้นได้ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.58) ถึง (3.61) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นตัวแปรแบบบูลและจำนวนเต็มที่มีมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.2.2 กรณี PVLT

เนื่องจากการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายที่ทำงานอยู่ในสภาวะปกติสำหรับกรณี PVLT จะมีลักษณะคล้ายกับกรณี LT นั่นคือ เส้นทางที่ใช้รองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดสมาชิกในมัลติคาสต์เซสชันจะถูกกำหนดให้ใช้ค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกัน เพราะฉะนั้น เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข้างเชื่อมโยงขึ้น โครงข่ายจะต้องกำหนดค่าความยาวคลื่นให้แก่วิถีบูรณะของเส้นทางที่ผ่านสายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องนั้นด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณา จะพบว่า การกำหนดวิถีบูรณะให้กับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความขัดข้องหนึ่งข้างเชื่อมโยงกรณี PVLT จะมีลักษณะคล้ายกับกรณี LT ดังนั้น จึงสามารถนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธีการป้องกันโครงข่ายวิธี OLR กรณี LT มาประยุกต์ใช้กับกรณี PVLT ได้ นั่นคือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี OLR กรณี PVLT จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.52) และเงื่อนไขบังคับข้อ (3.53) ถึง (3.61)

3.5.2.3 กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (3.62)$$

และมีเงื่อนไขบังคับ

$$\sum_{q \in Q} c_q^l \leq CR, \quad \forall l \in F \quad (3.63)$$

$$n_{q,d}^l \leq I_\infty \times c_q^l, \quad \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.64)$$

$$\sum_{r_k=1}^K w_{r_k,ij} - \sum_{q \in Q} \sum_{d=1}^2 \sum_{l \in F} n_{q,d}^l g_{ij}^l \gamma_{q,d}^{ij} \leq 0, \quad \forall ij \in L \quad (3.65)$$

$$s_{ij,ij'} = \sum_{q \in Q} \sum_{d=1}^2 \sum_{l \in F} n_{q,d}^l g_{ij}^l \chi_{q,d}^{ij,ij'}, \quad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.66)$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k=1}^K w_{r_k,ij} - s_{ij,ij'} - s_{ij,ji'} \geq 0, \quad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.67)$$

$$c_q^l \in \{0,1\}, \quad \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.68)$$

$$s_{ij,ij'} \in Z^+, \quad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.69)$$

$$n_{q,d}^l \in Z^+, \quad \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.70)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (3.71)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี OLR กรณี VLT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.62) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้น และสามารถอยู่รอดได้จากความขัดข้องที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.63) ถึง (3.71) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.63) เป็นเงื่อนไขในการเลือกวงแหวนสำหรับรองรับทุกมัลติคาสต์เซสชันเมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขึ้น โดยอนุญาตให้เลือกวงแหวนได้เป็นจำนวนจำกัด CR วงแหวนต่อความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.64) บังคับให้สามารถเพื่อความจุสำรองลงบนวงแหวนที่เลือกได้จากเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.63) เท่านั้น เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.65) เป็นเงื่อนไขที่บังคับให้ความจุสำรองของวงแหวนที่เลือกมีเพียงพอสำหรับรองรับช่องสัญญาณทำงานทุกช่องที่จะใช้วงแหวนที่เลือกเมื่อมีความขัดข้องเกิดขึ้น เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.66) แสดงจำนวนช่องสัญญาณสำรองที่เผื่อบนข่ายเชื่อมโยง ij ให้มีค่าเท่ากับผลรวมของช่องสัญญาณสำรองของวงแหวนทั้งหมดที่ถูกรางบนข่ายเชื่อมโยง ij เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.67) เป็นเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้บังคับให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายสามารถรองรับช่องสัญญาณทำงานและช่องสัญญาณสำรองที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้นได้ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.68) ถึง (3.71) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นตัวแปรแบบบูลและจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.3 วิธีใช้วงแหวนสองทิศทาง (Two way Light Ring Approach, TLR)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธีใช้วงแหวนสองทิศทางในการป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้องหนึ่งข้างเชื่อมโยงนั้น จะมีลักษณะแตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียวในการป้องกันโครงข่ายคือ การเฝ้าระวังความจุสำรองบนวงแหวนที่ถูกเลือกสำหรับป้องกันความขัดข้องเมื่อใช้วิธีใช้วงแหวนสองทิศทางในการป้องกันโครงข่ายนั้นจะมีการพิจารณาทิศทางของวิถึบูรณะด้วย นั่นคือ หากข้างเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องเป็นข้างเชื่อมโยงที่คร่อมวงแหวนแล้ว ความจุสำรองที่เฝ้าบนวงแหวนจะต้องสามารถให้กราฟฟิกจากข้างเชื่อมโยงที่ได้รับผลกระทบวิ่งผ่านได้ทั้งสองทิศทาง ซึ่งต่างจากวิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียวในการป้องกันโครงข่าย แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะต้องมีการระบุความจุทำงานในสภาวะปกติมาให้เช่นเดียวกับวิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียวในการป้องกันโครงข่าย ดังนั้น สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ตามวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ดังนี้

3.5.3.1 กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (3.72)$$

และมีเงื่อนไขบังคับ

$$\sum_{q \in Q} c_q^l \leq CR, \quad \forall l \in F \quad (3.73)$$

$$n_{q,d,\lambda}^l \leq I_\infty \times c_q^l, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.74)$$

$$\sum_{r_k=1}^K w_{r_k,ij,\lambda} - \sum_{q \in Q} \sum_{d=1}^2 \sum_{l \in F} y_{q,d}^{ij} n_{q,d,\lambda}^l g_{ij}^l \varphi_{q,d,\lambda}^{ij} \leq 0, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall ij \in L \quad (3.75)$$

$$p_{q,d,\lambda}^{i,ij'} - \sum_{l \in F} n_{q,d,\lambda}^l g_{ij'}^l = 0, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \quad (3.76)$$

$$\forall ij' \in L, \forall i \in G_{q,d}^{ij'}$$

$$s_{ij,ij',\lambda} = \sum_{q \in Q} \sum_{d=1}^2 \sum_{i \in G_{q,d}^{ij'}} p_{q,d,\lambda}^{i,ij'} \eta_{q,d,\lambda}^{i,ij'}, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.77)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k=1}^K w_{r_k,ij,\lambda} - s_{ij,ij',\lambda} - s_{ij,jj',\lambda} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.78)$$

$$c_q^l \in \{0,1\}, \quad \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.79)$$

$$s_{ij,ij',\lambda} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.80)$$

$$p_{q,d,\lambda}^{i,ij'} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \quad (3.81)$$

$$\forall ij' \in L, \forall i \in G_{q,d}^{ij'}$$

$$n_{q,d,\lambda}^l \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1,2,\dots,M\}, \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.82)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (3.83)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี TLR กรณี LT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.72) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้น และสามารถอยู่รอดได้จากความขัดข้องที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.73) ถึง (3.83) จะสังเกตได้ว่าเงื่อนไขบังคับสำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี TLR กรณี LT จะคล้ายคลึงกับเงื่อนไขบังคับสำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี OLR กรณี LT แต่จะมีลักษณะแตกต่างกันที่เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.75) โดยเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.75) จะมีการกำหนดจำนวนวิธิบูรณะที่สามารถจัดตั้งได้เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij ได้รับความขัดข้อง นั่นคือ หากข่ายเชื่อมโยง ij เป็นข่ายเชื่อมโยงบนวงแหวนวงที่ q เส้นทางที่ d จำนวนวิธิบูรณะจะมีได้เพียง 1 เส้นทาง แต่หากข่ายเชื่อมโยง ij คร่อมวงแหวนวงที่ q เส้นทางที่ d จำนวนวิธิบูรณะจะมีได้ 2 เส้นทาง โดยวิธิบูรณะบนวงแหวนวงที่ q เส้นทางที่ d นั้น จะแสดงในเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.76)

3.5.3.2 กรณี PVLT

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5.2.2 การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายที่ทำงานอยู่ในสภาวะปกติสำหรับกรณี PVLT จะมีลักษณะคล้ายกับกรณี LT ดังนั้น สามารถนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธีการป้องกันโครงข่ายวิธี TLR กรณี LT มาประยุกต์ใช้กับกรณี PVLT ได้ นั่นคือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี TLR กรณี PVLT จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.72) และเงื่อนไขบังคับข้อ (3.73) ถึง (3.83)

3.5.3.3 กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (3.84)$$

และมีเงื่อนไขบังคับ

$$\sum_{q \in Q} c_q^l \leq CR, \quad \forall l \in F \quad (3.85)$$

$$n_{q,d}^l \leq I_\infty \times c_q^l, \quad \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.86)$$

$$\sum_{r_k=1}^K w_{r_k,ij} - \sum_{q \in Q} \sum_{d=1}^2 \sum_{l \in F} y_{q,d}^l n_{q,d}^l g_{ij}^l \gamma_{q,d}^{ij} \leq 0, \quad \forall ij \in L \quad (3.87)$$

$$p_{q,d}^{i,ij'} - \sum_{l \in F} n_{q,d}^l g_{ij'}^l = 0, \quad \forall i \in G_{q,d}^{ij'}, \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \forall ij' \in L \quad (3.88)$$

$$s_{ij,ij'} = \sum_{q \in Q} \sum_{d=1}^2 \sum_{i \in G_{q,d}^{ij'}} p_{q,d}^{i,ij'} \sigma_{q,d}^{i,ij,ij'}, \quad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.89)$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k=1}^K w_{r_k,ij} - s_{ij,ij'} - s_{ij',ij} \geq 0, \quad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.90)$$

$$c_q^l \in \{0,1\}, \quad \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.91)$$

$$s_{ij,ij'} \in Z^+, \quad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (3.92)$$

$$p_{q,d}^{i,ij'} \in Z^+, \quad \forall i \in G_{q,d}^{ij'}, \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \forall ij' \in L \quad (3.93)$$

$$n_{q,d}^l \in Z^+, \quad \forall d \in \{1,2\}, \forall q \in Q, \forall l \in F \quad (3.94)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (3.95)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี TLR กรณี VLT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (3.84) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้น และสามารถอยู่รอดได้จากความขัดข้องที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (3.85) ถึง (3.95) จะสังเกตได้ว่าเงื่อนไขบังคับสำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี TLR กรณี VLT จะคล้ายคลึงกับเงื่อนไขบังคับสำหรับการป้องกันโครงข่ายวิธี OLR กรณี VLT แต่จะมีลักษณะแตกต่างกันที่เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.87) โดยเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.87) จะมีการกำหนดจำนวนวิถีนูรณะที่สามารถจัดตั้งได้เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij ได้รับความขัดข้อง นั่นคือ หากข่ายเชื่อมโยง ij เป็นข่ายเชื่อมโยงบนวงแหวนวงที่ q เส้นทางที่ d จำนวนวิถีนูรณะจะมีได้เพียง 1 เส้นทาง แต่หากข่ายเชื่อมโยง ij ครอบคลุมวงแหวนวงที่ q เส้นทางที่ d จำนวนวิถีนูรณะจะมีได้ 2 เส้นทาง โดยวิถีนูรณะบนวงแหวนวงที่ q เส้นทางที่ d นั้น จะแสดงในเงื่อนไขบังคับข้อที่ (3.88)

3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายตามลักษณะการวางเส้นใยนำแสง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไปข้างต้นเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการจัดเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายทั้งในกรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง โดยกำหนดให้ลักษณะการวางเส้นใยนำแสงบนข่ายเชื่อมโยงข่ายหนึ่ง ๆ เป็นแบบไม่สมมาตร ดังนั้น หากต้องการออกแบบโครงข่ายให้จำนวนเส้นใยนำแสงบนข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง ๆ เป็นแบบสมมาตรแล้ว จะต้องเพิ่มเงื่อนไขบังคับข้อ (3.96) ดังนี้

$$f_{ij} - f_{ji} = 0 \quad \forall ij \in L \quad (3.96)$$

3.7 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่กำหนดในการหาผลเฉลย

เนื่องด้วยเนื้อหาในบทนี้ เป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันประกอบไปด้วยสมการและตัวแปรต่าง ๆ ในการหาผลเฉลยของแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ตามกรรมวิธีที่ใช้ในการจำลองปัญหา ดังนั้น เพื่อให้สะดวกต่อการทำความเข้าใจในเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ จึงได้สรุปตัวย่อของวิธีการเส้นทางและความยาวคลื่นให้แก่โครงข่าย WDM ทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องตามกรรมวิธีที่ใช้ในการจำลองปัญหาไว้ในตารางที่ 3.1 นอกจากนี้ยังได้สรุปพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้ และตัวแปรที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในวิธีต่าง ๆ ในตารางที่ 3.2 ตารางที่ 3.3 จะแสดงถึงจำนวนตัวแปร (Number of Variables, N_v) ของแต่ละแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 จะแสดงจำนวนสมการ (Number of Constraints, N_c) ของแต่ละแบบจำลองสำหรับโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร และแบบสมมาตรตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างของวิธีการจัดเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายประเภทต่าง ๆ

วิธีการจัดเส้นทางและความยาวคลื่น	โครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขัดข้อง	โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขัดข้อง		
		วิธีต้นทุนต่ำสุด	วิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียว	วิธีใช้วงแหวนสองทิศทาง
วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง	LT	MC-LT	OLR-LT	TLR-LT
วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือนบางส่วน	PVLT	MC-PVLT	OLR-PVLT	TLR-PVLT
วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน	VLT	MC-VLT	OLR-VLT	TLR-VLT

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้และตัวแปรที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

วิธีการจัดเส้นทางและความยาวคลื่น	พารามิเตอร์	ตัวแปร
LT	$N_k, V_k, E_k, L, K, r_k(s_k, D_k), t_{r_k}, \Delta, M, \xi_{sd,p}^{r_k}, \delta_{ij,p}^{r_k}, P_{r_k}, I_\infty$	$f_{ij}, x_{r_k}^{ij}, a_{r_k,p,\lambda}, W_{r_k,\lambda}$
PVLT	$N_k, V_k, E_k, L, K, r_k(s_k, D_k), t_{r_k}, \Delta, M, \xi_{sd,p}^{r_k}, \delta_{ij,p}^{r_k}, P_{r_k}, I_\infty$	$f_{ij}, x_{r_k}^{ij}, a_{r_k,p,\lambda}$
VLT	$N_k, V_k, E_k, L, K, r_k(s_k, D_k), t_{r_k}, \Delta, M, \xi_{sd,p}^{r_k}, \delta_{ij,p}^{r_k}, P_{r_k}, I_\infty$	$f_{ij}, x_{r_k}^{ij}, a_{r_k,p}$
MC-LT	$N_k, V_k, E_k, L, K, r_k(s_k, D_k), t_{r_k}, \Delta, M, \xi_{sd,p}^{r_k}, \delta_{ij,p}^{r_k}, P_{r_k}, I_\infty, \phi_{sd,e}^{r_k,ij'}, \mu_{ij,e}^{r_k,ij'}, E_{r_k}^{ij'}$	$f_{ij}, x_{r_k}^{ij}, u_{r_k,e,\lambda}^{ij'}, W_{r_k,\lambda}$
MC-PVLT	$N_k, V_k, E_k, L, K, r_k(s_k, D_k), t_{r_k}, \Delta, M, \xi_{sd,p}^{r_k}, \delta_{ij,p}^{r_k}, P_{r_k}, I_\infty, \phi_{sd,e}^{r_k,ij'}, \mu_{ij,e}^{r_k,ij'}, E_{r_k}^{ij'}$	$f_{ij}, x_{r_k}^{ij}, u_{r_k,e,\lambda}^{ij'}, W_{r_k,\lambda}$
MC-VLT	$N_k, V_k, E_k, L, K, r_k(s_k, D_k), t_{r_k}, \Delta, M, \xi_{sd,p}^{r_k}, \delta_{ij,p}^{r_k}, P_{r_k}, I_\infty, \phi_{sd,e}^{r_k,ij'}, \mu_{ij,e}^{r_k,ij'}, E_{r_k}^{ij'}$	$f_{ij}, x_{r_k}^{ij}, u_{r_k,e,\lambda}^{ij'}$
OLR-LT	$L, M, I_\infty, Q, CR, w_{r_k,ij,\lambda}, \varphi_{q,d,\lambda}^{ij'}, \psi_{q,d,\lambda}^{ij,ij'}, \vartheta_{ij}^l$	$f_{ij}, c_q^l, n_{q,d,\lambda}^l, s_{ij,ij',\lambda}$
OLR-PVLT	$L, M, I_\infty, Q, CR, w_{r_k,ij,\lambda}, \varphi_{q,d,\lambda}^{ij'}, \psi_{q,d,\lambda}^{ij,ij'}, \vartheta_{ij}^l$	$f_{ij}, c_q^l, n_{q,d,\lambda}^l, s_{ij,ij',\lambda}$
OLR-VLT	$L, M, I_\infty, Q, CR, w_{r_k,ij}, \gamma_{q,d}^{ij'}, \chi_{q,d}^{ij,ij'}, \vartheta_{ij}^l$	$f_{ij}, c_q^l, n_{q,d}^l, s_{ij,ij'}$
TLR-LT	$L, M, I_\infty, Q, CR, w_{r_k,ij,\lambda}, \varphi_{q,d,\lambda}^{ij'}, \psi_{q,d,\lambda}^{ij,ij'}, \vartheta_{ij}^l, y_{q,d}^{ij}$	$f_{ij}, c_q^l, n_{q,d,\lambda}^l, s_{ij,ij',\lambda}, p_{q,d,\lambda}^{i,ij'}$
TLR-PVLT	$L, M, I_\infty, Q, CR, w_{r_k,ij,\lambda}, \varphi_{q,d,\lambda}^{ij'}, \psi_{q,d,\lambda}^{ij,ij'}, \vartheta_{ij}^l, y_{q,d}^{ij}$	$f_{ij}, c_q^l, n_{q,d,\lambda}^l, s_{ij,ij',\lambda}, p_{q,d,\lambda}^{i,ij'}$
TLR-VLT	$L, M, I_\infty, Q, CR, w_{r_k,ij}, \gamma_{q,d}^{ij'}, \chi_{q,d}^{ij,ij'}, \vartheta_{ij}^l, y_{q,d}^{ij}$	$f_{ij}, c_q^l, n_{q,d}^l, s_{ij,ij'}, p_{q,d}^{i,ij'}$

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวแปร (N_v) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

วิธีการจัดเส้นทาง และความยาวคลื่น	จำนวนตัวแปร
LT	$M \sum_{k=1}^K P_{r_k} + \sum_{k=1}^K N_k (N_k - 1) + L + (K \times M)$
PVLT	$M \sum_{k=1}^K P_{r_k} + \sum_{k=1}^K N_k (N_k - 1) + L$
VLT	$\sum_{k=1}^K (P_{r_k} + N_k (N_k - 1)) + L$
MC-LT	$M \sum_{ij'=1}^L \sum_{k=1}^K E_{r_k}^{ij'} + L \sum_{k=1}^K N_k (N_k - 1) + L + (K \times M)$
MC-PVLT	$M \sum_{ij'=1}^L \sum_{k=1}^K E_{r_k}^{ij'} + L \sum_{k=1}^K N_k (N_k - 1) + L$
MC-VLT	$\sum_{ij'=1}^L \sum_{k=1}^K E_{r_k}^{ij'} + L \sum_{k=1}^K N_k (N_k - 1) + L$
OLR-LT	$ F Q (2M + 1) + ML(L - 1) + L$
OLR-PVLT	$ F Q (2M + 1) + ML(L - 1) + L$
OLR-VLT	$3 F Q + L(L - 1) + L$
TLR-LT	$ F Q (2M + 1) + M \sum_{ij' \in L, q \in Q} \sum_{d=1}^2 G_{q,d}^{ij'} + ML(L - 1) + L$
TLR-PVLT	$ F Q (2M + 1) + M \sum_{ij' \in L, q \in Q} \sum_{d=1}^2 G_{q,d}^{ij'} + ML(L - 1) + L$
TLR-VLT	$3 F Q + \sum_{ij' \in L, q \in Q} \sum_{d=1}^2 G_{q,d}^{ij'} + L(L - 1) + L$

ตารางที่ 3.4 จำนวนสมการ (N_c) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร

วิธีการจัดเส้นทางและความยาวคลื่น	จำนวนสมการ
LT	$\sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k - 1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + M \sum_{k=1}^K P_{r_k} N_k(N_k - 1)$ $+ \sum_{k=1}^K N_k(N_k - 1) + ML + K$
PVLT	$\sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k - 1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + \sum_{k=1}^K N_k(N_k - 1) + ML$
VLT	$\sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k - 1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + \sum_{k=1}^K N_k(N_k - 1) + L$
MC-LT	$L \sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k - 1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + M \sum_{ij'=1}^L \left(\sum_{k=1}^K E_{r_k}^{ij'} N_k(N_k - 1) \right)$ $+ L \sum_{k=1}^K N_k(N_k - 1) + ML(L-1) + K + L$
MC-PVLT	$L \sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k - 1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + L \sum_{k=1}^K N_k(N_k - 1) + ML(L-1) + L$
MC-VLT	$L \sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k - 1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + L \sum_{k=1}^K N_k(N_k - 1) + L^2$
OLR-LT	$ F + 2M F Q + ML + 2ML(L-1)$
OLR-PVLT	$ F + 2M F Q + ML + 2ML(L-1)$
OLR-VLT	$ F + 2 F Q + L + 2L(L-1)$
TLR-LT	$ F + 2M F Q + ML + M \sum_{ij' \in L, q \in Q} \sum_{d=1}^2 G_{q,d}^{ij'} + 2ML(L-1)$
TLR-PVLT	$ F + 2M F Q + ML + M \sum_{ij' \in L, q \in Q} \sum_{d=1}^2 G_{q,d}^{ij'} + 2ML(L-1)$
TLR-VLT	$ F + 2 F Q + L + \sum_{ij' \in L, q \in Q} \sum_{d=1}^2 G_{q,d}^{ij'} + 2L(L-1)$

ตารางที่ 3.5 จำนวนสมการ (N_c) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีลักษณะการวาง
เส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร

วิธีการจัดเส้นทาง และความยาวคลื่น	จำนวนสมการ
LT	$\sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k-1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + M \sum_{k=1}^K P_{r_k} N_k(N_k-1)$ $+ \sum_{k=1}^K N_k(N_k-1) + ML + K + L$
PVLT	$\sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k-1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + \sum_{k=1}^K N_k(N_k-1) + M(L+1)$
VLT	$\sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k-1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + \sum_{k=1}^K N_k(N_k-1) + 2L$
MC-LT	$L \sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k-1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + M \sum_{ij'=1}^L \left(\sum_{k=1}^K E_{r_k}^{ij'} N_k(N_k-1) \right)$ $+ L \sum_{k=1}^K N_k(N_k-1) + ML(L-1) + K + 2L$
MC-PVLT	$L \sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k-1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + L \sum_{k=1}^K N_k(N_k-1) + ML(L-1) + 2L$
MC-VLT	$L \sum_{k=1}^K \left(1 + 2N_k + \frac{N_k(N_k-1)}{2} + \sum_{n=1}^{\lfloor N_k/2 \rfloor} \binom{N_k}{n} \right) + L \sum_{k=1}^K N_k(N_k-1) + L(L+1)$
OLR-LT	$ F + 2M F Q + ML + 2ML(L-1) + L$
OLR-PVLT	$ F + 2M F Q + ML + 2ML(L-1) + L$
OLR-VLT	$ F + 2 F Q + 2L + 2L(L-1)$
TLR-LT	$ F + 2M F Q + ML + M \sum_{ij' \in Lq \in Q} \sum_{d=1}^2 G_{q,d}^{ij'} + 2ML(L-1) + L$
TLR-PVLT	$ F + 2M F Q + ML + M \sum_{ij' \in Lq \in Q} \sum_{d=1}^2 G_{q,d}^{ij'} + 2ML(L-1) + L$
TLR-VLT	$ F + 2 F Q + 2L + \sum_{ij' \in Lq \in Q} \sum_{d=1}^2 G_{q,d}^{ij'} + 2L(L-1)$

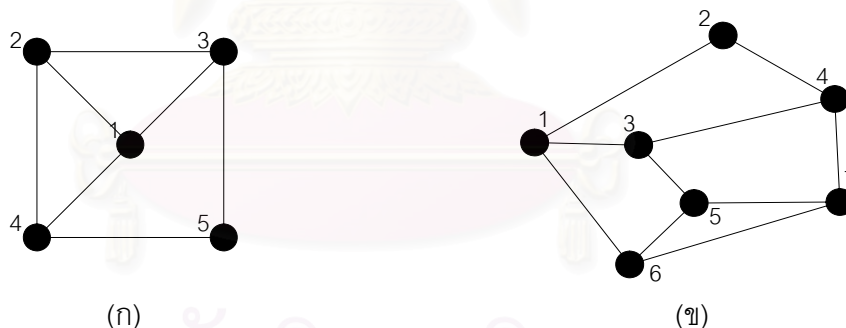
บทที่ 4

ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย

เนื้อหาในส่วนนี้ จะเป็นการกล่าวถึงผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ในเนื้อหาบทที่ 3 ทั้งในกรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้

4.1 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการวิเคราะห์ผลเฉลยที่หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ทั้งในกรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้ ซึ่งในการวิเคราะห์ จะใช้โครงข่ายขนาดเล็กจำนวนสองโครงข่าย โดยจะมีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข)



รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 5N-7L (ข) โครงข่าย 7N-10L

โครงข่ายรูปที่ 4.1 (ก) เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโนดทั้งหมด 5 โนด และมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมด 7 ข่ายเชื่อมโยง เพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกโครงข่ายนี้ว่าโครงข่าย 5N-7L โดยกำหนดปริมาณกราฟฟิกที่ใช้ในการทดลองจำนวนสองชุด แต่ละชุดมีจำนวนมัลติคาสต์เซสชันเท่ากับ 5 และมีลักษณะแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

โครงข่ายรูปที่ 4.1 (ข) เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโนดทั้งหมด 7 โนด และมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมด 10 ข่ายเชื่อมโยง เพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกโครงข่ายนี้ว่า

โครงข่าย 7N-10L โดยกำหนดปริมาณกราฟฟิกที่ใช้ในการทดลองจำนวนสองชุด แต่ละชุดมีจำนวนมัลติคาสต์เซสชันเท่ากับ 5 และมีลักษณะแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 (ค) และ (ง) ตามลำดับ

เซสชัน	ปริมาณกราฟฟิก	โนดต้นทาง	กลุ่มโนดปลายทาง
1	1	5	2 3
2	2	5	1 2 3
3	3	5	2 4
4	1	5	1 2 3 4
5	3	5	1 3

(ก)

เซสชัน	ปริมาณกราฟฟิก	โนดต้นทาง	กลุ่มโนดปลายทาง
1	1	2	3 5
2	2	1	2 3 5
3	3	4	2 5
4	1	5	1 2 3 4
5	3	3	1 5

(ข)

เซสชัน	ปริมาณกราฟฟิก	โนดต้นทาง	กลุ่มโนดปลายทาง
1	2	1	4 5
2	3	1	2 3 7
3	3	1	4 6
4	3	1	4 5 7
5	2	1	5 6 7

(ค)

เซสชัน	ปริมาณกราฟฟิก	โนดต้นทาง	กลุ่มโนดปลายทาง
1	2	4	1 5
2	3	2	1 3 7
3	3	6	1 4
4	3	5	1 4 7
5	2	7	1 5 6

(ง)

รูปที่ 4.2 กราฟฟิกที่ใช้ในสำหรับหาผลเฉลี่ย (ก) และ (ข) ชุดกราฟฟิกสำหรับโครงข่าย 5N-7L (ค) และ (ง) ชุดกราฟฟิกสำหรับโครงข่าย 7N-10L

รูปที่ 4.2 แสดงกราฟฟิกสำหรับใช้หาผลเฉลี่ยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 โดย

1. กราฟฟิกรูปที่ 4.2 (ก) และ (ค) เป็นกราฟฟิกที่กำหนดให้ทุกมัลติคาสต์เซสชันมีโนดต้นทางเป็นโนดเดียวกัน เพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกกราฟฟิกที่มีมีโนดต้นทางเป็นโนดเดียวกันนี้ว่า กราฟฟิกโนดต้นทางร่วม โดยกราฟฟิกของแต่ละมัลติคาสต์เซสชันมีค่าไม่เท่ากัน และให้ปริมาณกราฟฟิกทั้งหมดสำหรับโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L มีค่าเท่ากับ 10 และ 13 ตามลำดับ

2. ทราฟฟิกที่ 4.2 (ข) และ (ง) เป็นทราฟฟิกที่กำหนดให้ทุกมัลติคาสต์เซสชันมีโนดต้นทางไม่เป็นโนดเดียวกัน เพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกทราฟฟิกที่มีโนดต้นทางเป็นโนดเดียวกันนี้ว่า ทราฟฟิกโนดต้นทางแยก โดยทราฟฟิกของแต่ละมัลติคาสต์เซสชันมีค่าไม่เท่ากัน และให้ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดสำหรับโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L มีค่าเท่ากับ 10 และ 13 ตามลำดับ

อีกประการหนึ่ง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CPLEX6.6 [25] ซึ่งทำงานอยู่บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ XP ในการคำนวณหาค่าผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานคือ เครื่อง Pentium 4 ความเร็ว 3.0 กิกะเฮิรตซ์ และมีหน่วยความจำเท่ากับ 512 เมกะไบต์

ผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.7 ตารางที่ ก.1 ถึงตารางที่ ก.4 และรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.22 จะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ โดยแบ่งพิจารณาตามหัวข้อดังต่อไปนี้

การเปรียบเทียบในเชิงความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปรียบเทียบในเชิงจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ

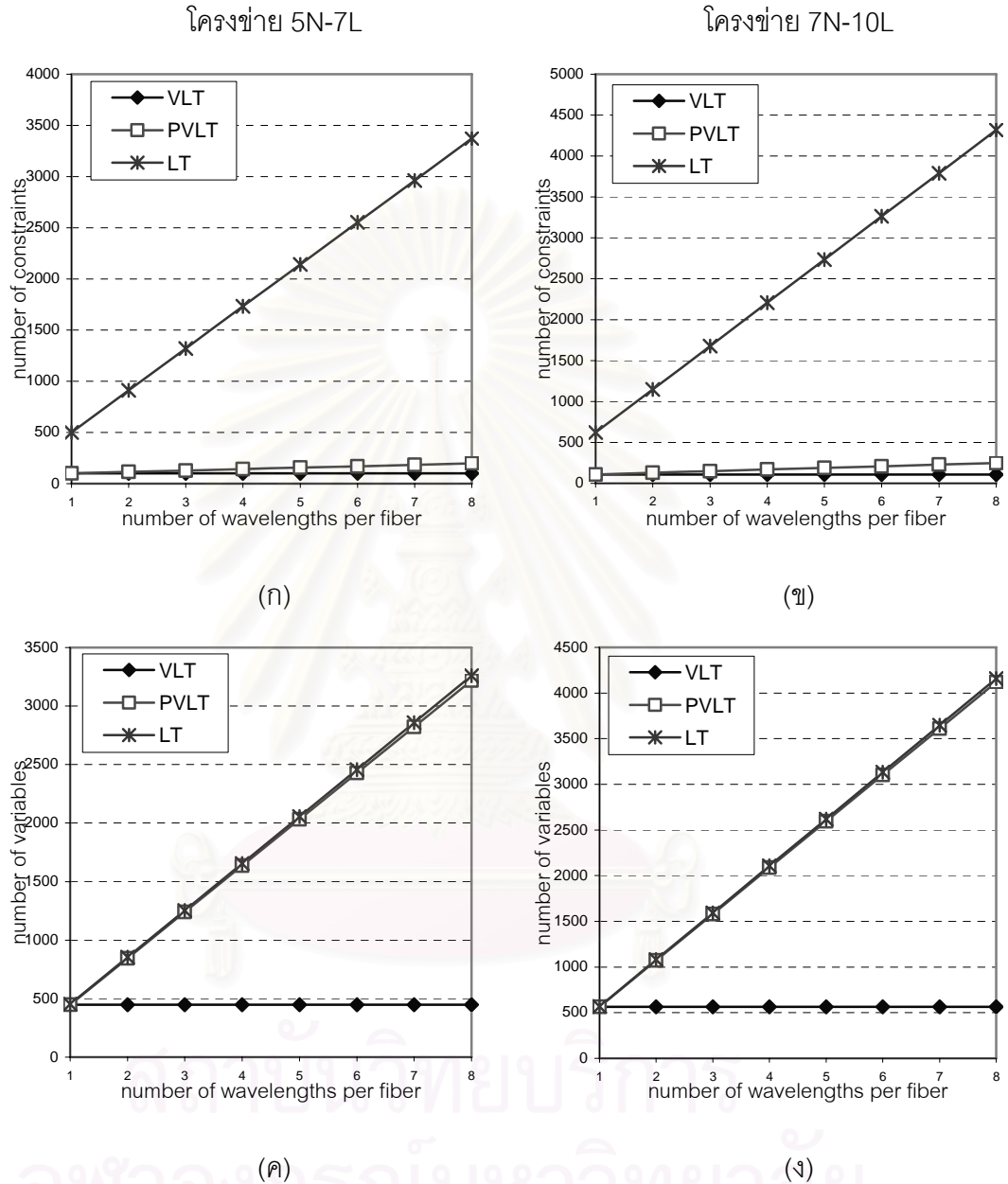
4.2 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการออกแบบเพื่อให้ได้โครงข่ายที่มีวิธีในการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นที่เหมาะสมนั้น ปัจจัยที่ใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของกรรมวิธีที่ใช้ นอกจากจะเป็นจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายแล้ว ความซับซ้อนของวิธีที่ใช้ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการพิจารณา เนื้อหาในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งความซับซ้อนดังกล่าวจะแสดงในรูปของจำนวนสมการและจำนวนของตัวแปรที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลย

4.2.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความซับซ้อน

เนื้อหาในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท VLT PVLТ และ LT ที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความซับซ้อน โดยรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่าย

เชื่อมโยงได้รับความขัดข้องกับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องกับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพบว่า สำหรับโครงข่ายประเภท VLT จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถผลิตเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.3 ยกตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 4.3 (ก) และ (ค) กรณีโครงข่าย 5N-7L จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 100 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 447 ในทุกค่าของ M (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) ส่วนกรณีโครงข่าย 7N-10L ในรูปที่ 4.3 (ข) และ (ง) จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 109 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 563 ในทุกค่าของ M ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาโครงข่ายประเภท PVLT และ LT พบว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีความสัมพันธ์กับค่า M กล่าวคือ จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น (ดังสมการในตารางที่ 3.3 ถึงตารางที่ 3.5) ยกตัวอย่างเช่น กรณีโครงข่าย 5N-7L ประเภท PVLT จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 114 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 843 ที่ $M = 2$ และเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นเป็น 8 จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรจะเพิ่มขึ้นเป็น 198 และ 3219 ตามลำดับ ส่วนกรณีโครงข่าย 5N-7L ประเภท LT จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 911 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 853 ที่ $M = 2$ และจำนวนสมการจะเท่ากับ 3371 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 3259 ที่ค่า $M = 8$

นอกจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบความซับซ้อนระหว่างโครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT จะพบว่า จำนวนสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท LT จะมีจำนวนมากที่สุด รองลงมาได้แก่โครงข่ายประเภท PVLT และโครงข่ายที่มีจำนวนสมการของแบบจำลองน้อยที่สุดได้แก่ โครงข่ายประเภท VLT แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบในเชิงจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพบว่า เส้นกราฟแสดงจำนวนตัวแปรของโครงข่ายประเภท PVLT และ LT มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณารายละเอียดซึ่งแสดงในภาคผนวก ก จะพบว่า จำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท LT จะมีจำนวนมากกว่าโครงข่ายประเภท PVLT ซึ่งเหตุผลที่จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท LT มีจำนวนมากกว่าแบบจำลองของโครงข่ายประเภท PVLT เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท LT จะต้องมีเงื่อนไขในการกำหนดค่าความยาวคลื่นสำหรับผลิตศาสตร์เซสชันแต่ละกลุ่มด้วย และจะสังเกตเห็นว่า ผลต่างระหว่างจำนวนตัวแปรของโครงข่ายประเภท PVLT และ LT จะมีค่าน้อยกว่าผลต่างระหว่างจำนวนสมการของโครงข่ายประเภท PVLT และ LT ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) และ (ค) สำหรับโครงข่าย 5N-7L และในรูปที่ 4.3 (ข) และ (ง) สำหรับโครงข่าย 7N-10L

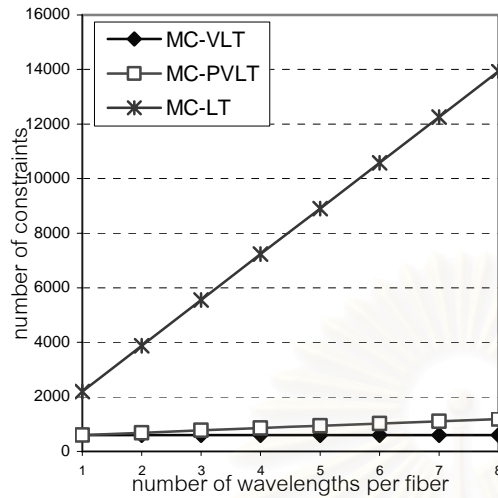
ดังนั้น จากการวิเคราะห์ในข้างต้นสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า สำหรับกรณีโครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ซึ่งเชื่อมโยงได้ด้วยความซับซ้อน แบบจำลองของโครงข่ายประเภท VLT มี

ความซับซ้อนน้อยที่สุด รองลงมาได้แก่แบบจำลองของโครงข่ายประเภท PVLT ส่วนแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากที่สุดได้แก่แบบจำลองของโครงข่ายประเภท LT ดังนั้น เมื่อพิจารณาในเชิงของเวลาที่ใช้คำนวณหาผลเฉลย สามารถกล่าวได้ว่า แบบจำลองของโครงข่ายประเภท LT จะใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยมากที่สุด รองลงมาเป็นแบบจำลองของโครงข่ายประเภท PVLT และแบบจำลองของโครงข่ายประเภท VLT จะใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยน้อยที่สุดดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ถึง ตารางที่ 4.4 ยกตัวอย่างเช่น ตารางที่ 4.1 กรณีโครงข่าย 5N-7L ที่มีการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร และกราฟฟิกในโครงข่ายเป็นกราฟฟิกโนดต้นทางร่วม ที่ $M = 8$ แบบจำลองของโครงข่ายประเภท LT จะใช้เวลาประมาณ 57 นาทีในการหาผลเฉลย ส่วนในโครงข่ายประเภท PVLT และ VLT จะใช้เวลา 74.75 วินาที และ 0.31 วินาที ตามลำดับ ในการหาผลเฉลย

4.2.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความซับซ้อน

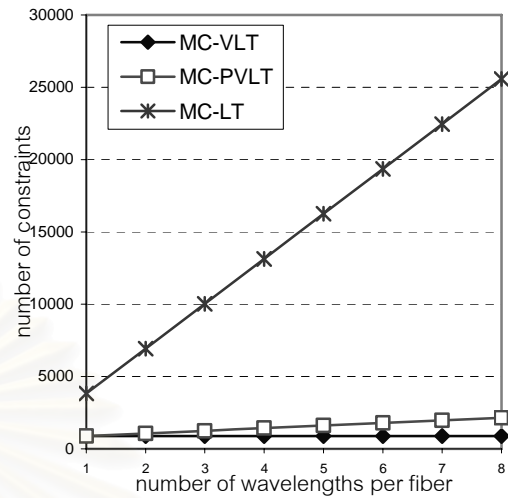
ในหัวข้อนี้ จะใช้กราฟซึ่งแสดงจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความซับซ้อนด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 ตามลำดับ ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความซับซ้อน

โครงข่าย 5N-7L

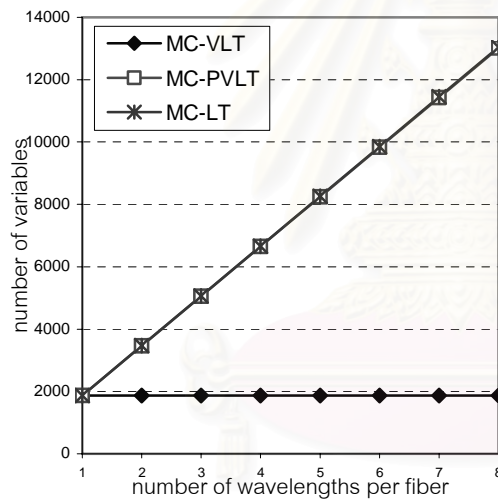


(ก)

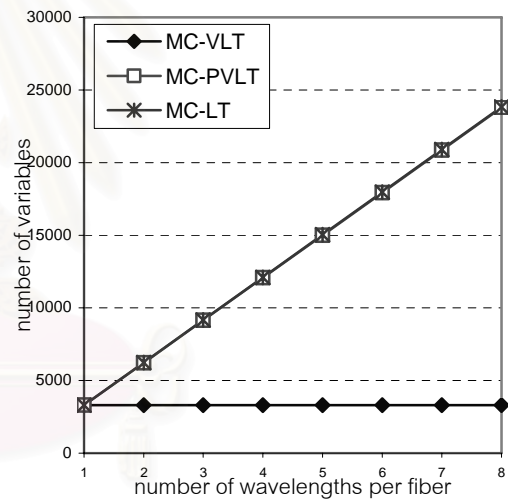
โครงข่าย 7N-10L



(ข)



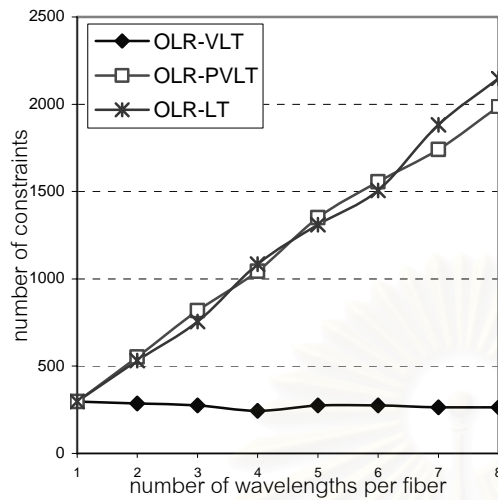
(ค)



(ง)

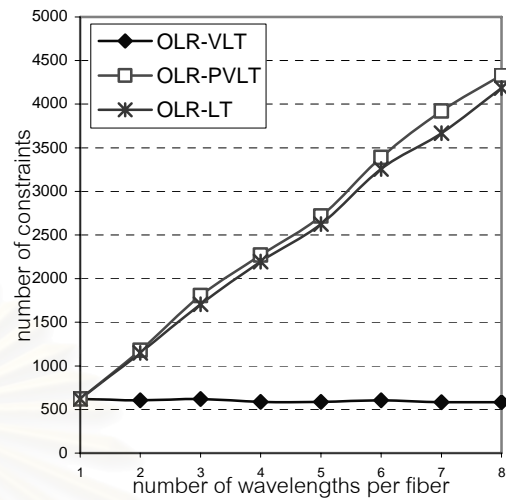
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่แก้ไขปัญหานี้ข้างหนึ่งข้างยี่สิบเอ็ดได้รับความขัดข้องด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ

โครงข่าย 5N-7L

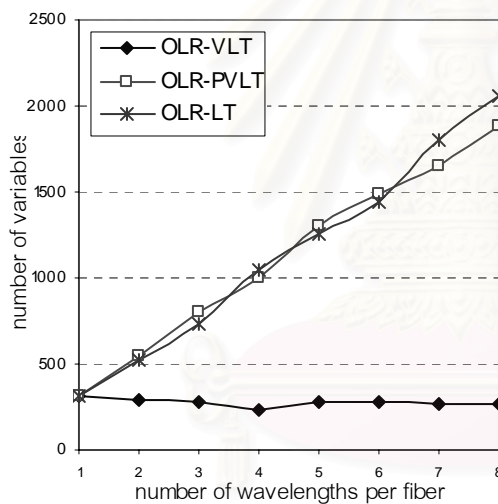


(ก)

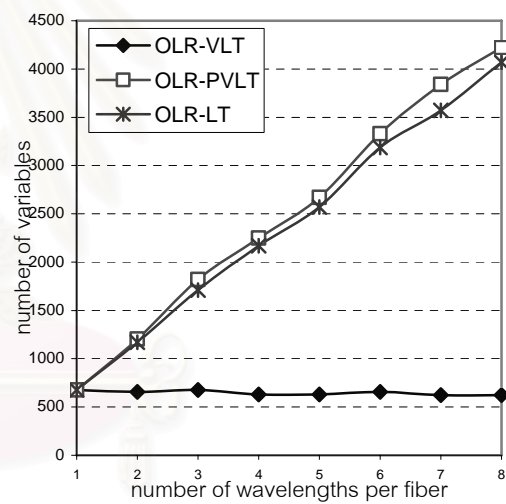
โครงข่าย 7N-10L



(ข)



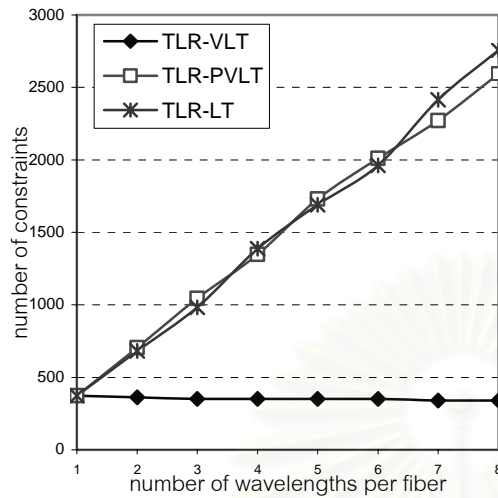
(ค)



(ง)

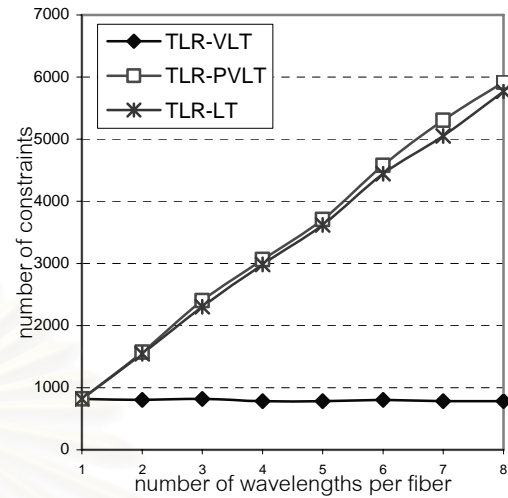
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่แก้ไขปัญหานี้ข้างหนึ่งข้างเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ

โครงข่าย 5N-7L

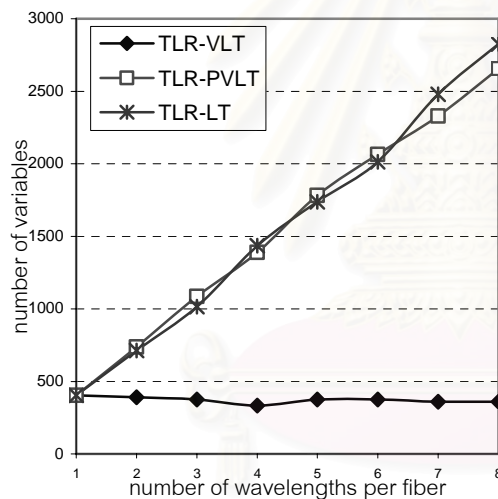


(ก)

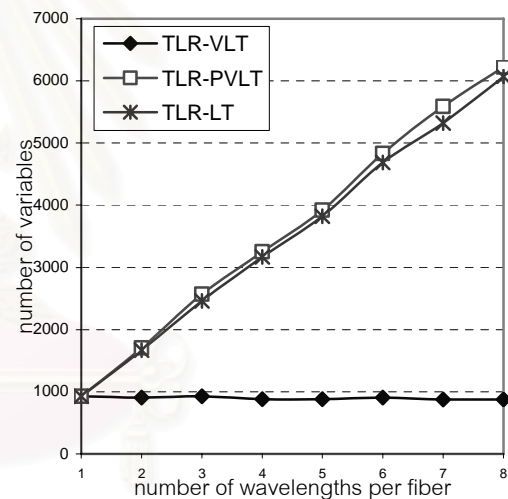
โครงข่าย 7N-10L



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่แก้ไขปัญหานี้ข้างหนึ่งข้างเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีโครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L สามารถแก้ไขปัญหานี้ซึ่งเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 จะพบว่าสำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรทั้งหมดที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท VLT จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า M แต่จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท PVLT และ LT จะแปรผันกับค่า M ยกตัวอย่างเช่น กรณีโครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT ในรูปที่ 4.4 (ก) และ (ค) จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 602 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 1865 ในทุกค่าของ M กรณีโครงข่าย 5N-7L ประเภท PVLT จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 686 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 3457 ที่ $M = 2$ และจำนวนสมการจะเพิ่มเป็น 1190 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 13009 ที่ค่า $M = 8$ ส่วนกรณีโครงข่าย 5N-7L ประเภท LT จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 3875 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 3467 ที่ $M = 2$ และจำนวนสมการจะเพิ่มเป็น 13931 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 13049 ที่ค่า $M = 8$ และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลย จะได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท LT ใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยมากที่สุด รองลงมาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท PVLT และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท VLT จะใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยน้อยที่สุดดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ยกตัวอย่างเช่น กรณีโครงข่าย 5N-7L ที่มีการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร และทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นแบบโหนดต้นทางร่วม ที่ $M = 8$ แบบจำลองของโครงข่ายประเภท LT จะสามารถหาผลเฉลยได้ภายใน 17 ชั่วโมง ส่วนในโครงข่ายประเภท PVLT และ VLT จะสามารถหาผลเฉลยได้ภายในเวลา 9 ชั่วโมง และ 2 วินาที ตามลำดับ จะสังเกตว่า ผลที่ได้จากข้อสรุปนี้จะเหมือนกับข้อสรุปที่ได้ในกรณีโครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ซึ่งเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง

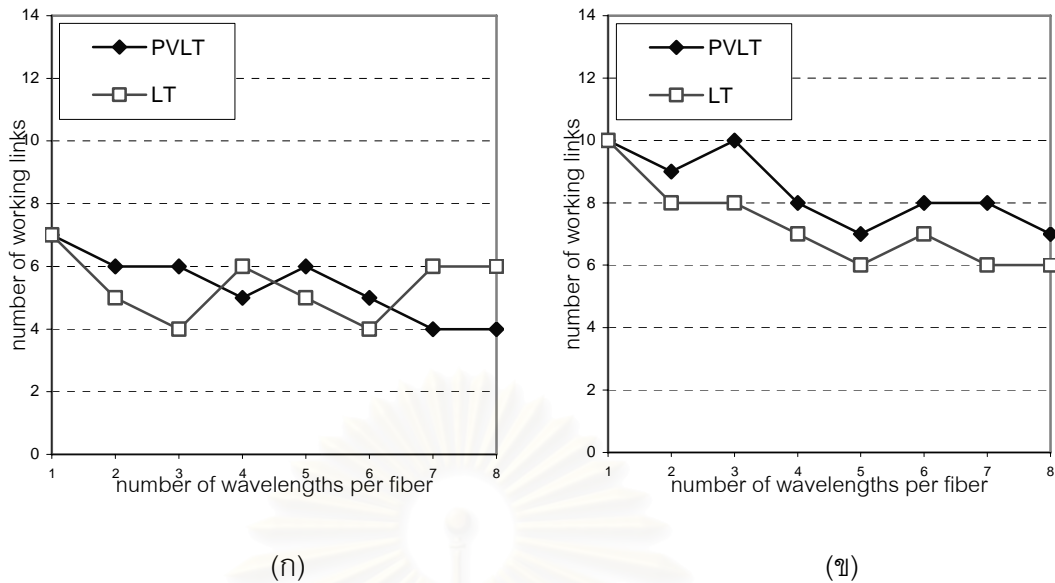
เมื่อพิจารณาวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR จะพบว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรทั้งหมดที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT จะเปลี่ยนแปลงตามค่า M ที่เปลี่ยนไป ยกตัวอย่างเช่น กรณีโครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT ที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ในรูปที่ 4.5 (ก) และ (ค) จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 286 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 294 ที่ $M = 2$ และเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นเป็น 8 จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรจะลดลงเหลือ 264 และ 264 ตามลำดับ กรณีโครงข่าย 5N-7L ประเภท PVLT จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 552 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 546 ที่ $M = 2$ และเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นเป็น 8 จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรจะเพิ่มขึ้นเป็น 1986 และ 1888 ตามลำดับ ส่วนกรณีโครงข่าย 5N-7L ประเภท LT จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 531 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 521 ที่ $M = 2$

และเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นเป็น 8 จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรจะเพิ่มขึ้นเป็น 2148 และ 2058 ตามลำดับ จะสังเกตว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของโครงข่ายประเภท VLT มีแนวโน้มลดลงเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และ TLR จะขึ้นอยู่กับจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกในสถานะโครงข่ายปกติ กล่าวคือ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และ TLR จะอนุญาตให้เฉพาะทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องเท่านั้นที่สามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่เมื่อเกิดเหตุการณ์หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง นั่นหมายถึง หากข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องไม่ได้รับทราฟฟิกในสถานะโครงข่ายปกติ โครงข่ายก็ จะไม่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ ดังนั้น จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรสำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ในโครงข่ายประเภท VLT จะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกในสถานะโครงข่ายปกติมีค่าลดลง และการที่จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกในสถานะโครงข่ายปกติมีค่าลดลงนั้น เกิดจากการที่ M มีค่าเพิ่มขึ้น ฉะนั้น จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของโครงข่ายประเภท VLT มีแนวโน้มลดลงเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาโครงข่ายประเภท PVLT และ LT จะพบว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรสำหรับโครงข่ายประเภท PVLT และ LT จะขึ้นอยู่กับปัจจัยสองปัจจัย ปัจจัยแรกได้แก่ จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกในสถานะโครงข่ายปกติ ซึ่งยิ่งจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกในสถานะปกติลดลง จำนวนตัวแปรและจำนวนสมการสำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ก็จะมีค่าลดลง ส่วนปัจจัยที่สองได้แก่ ค่า M กล่าวคือ ยิ่ง M มีค่าเพิ่มขึ้น จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องมีการเงื่อนไขในการกำหนดความยาวคลื่นสำหรับวิธียุทธศาสตร์แต่ละวิธีด้วย ซึ่งปัจจัยหลังนี้ส่งผลต่อจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรมากกว่าปัจจัยแรก (ดังสมการในตารางที่ 3.3 ถึงตารางที่ 3.5) ทำให้จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรสำหรับโครงข่ายประเภท PVLT และ LT มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR จะพบว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรทั้งหมดที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT จะเปลี่ยนแปลงตามค่า M ที่เปลี่ยนไป ยกตัวอย่างเช่น กรณีโครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT ที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ในรูปที่ 4.6 (ก) และ (ค) จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 362 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 390 ที่ $M = 2$ และเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นเป็น 8 จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรจะลดลงเหลือ 340 และ 360 ตามลำดับ กรณีโครงข่าย 5N-7L ประเภท PVLT จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 704 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 738 ที่ $M = 2$ และเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นเป็น 8 จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรจะเพิ่มขึ้นเป็น 2594 และ 2656 ตามลำดับ ส่วนกรณีโครงข่าย

5N-7L ประเภท LT จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 683 และมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 713 ที่ $M = 2$ และเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นเป็น 8 จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรจะเพิ่มขึ้นเป็น 2756 และ 2826 ตามลำดับ จะสังเกตว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของโครงข่ายประเภท VLT มีแนวโน้มลดลงเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเหตุผลเป็นเช่นเดียวกับกรณีโครงข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และเมื่อพิจารณาโครงข่ายประเภท PVLT และ LT จะพบว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรสำหรับโครงข่ายประเภท PVLT และ LT จะขึ้นอยู่กับปัจจัยสามปัจจัย สองปัจจัยแรกจะเหมือนกับกรณีโครงข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และปัจจัยที่สามได้แก่ จำนวนวิถีนูรณะบนวงแหวนที่ใช้แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง จากสามปัจจัยนี้ ทำให้จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรสำหรับโครงข่ายประเภท PVLT และ LT มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาความซับซ้อนของแบบจำลองระหว่างโครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT จะพบว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองในโครงข่ายประเภท VLT จะมีค่าน้อยที่สุด ส่วนจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองในโครงข่ายประเภท PVLT และ LT จะขึ้นอยู่กับจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่รองรับกราฟฟิกในสถานะโครงข่ายปกติซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7 ที่ค่า M ใด ๆ โดยรูปที่ 4.7 แสดงจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่รองรับกราฟฟิกในสถานะโครงข่ายปกติ จะสังเกตได้ว่า ที่ค่า M ที่จำนวนข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายประเภท PVLT มีค่ามากกว่าโครงข่ายประเภท LT จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองโครงข่ายประเภท PVLT จะมากกว่าโครงข่าย LT ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 5N-7L ในรูปที่ 4.7 ที่ค่า $M = 2, 3, 5$ และ 6 โครงข่ายประเภท PVLT จะมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่รองรับกราฟฟิกในสถานะโครงข่ายปกติมากกว่าโครงข่ายประเภท LT ส่งผลให้จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองในโครงข่ายประเภท PVLT ที่ค่า M ดังกล่าวมีค่ามากกว่าโครงข่ายประเภท PVLT ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 สำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และ TLR ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ที่ค่า M ที่จำนวนข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายประเภท PVLT มีค่าน้อยกว่าโครงข่ายประเภท LT จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองโครงข่ายประเภท PVLT จะน้อยกว่าโครงข่าย LT ดังจะเห็นได้ที่ค่า $M = 4, 7$ และ 8 เพราะฉะนั้น สามารถกล่าวได้ว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท PVLT และ LT จะขึ้นอยู่กับจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่รองรับกราฟฟิกในสถานะโครงข่ายปกติ

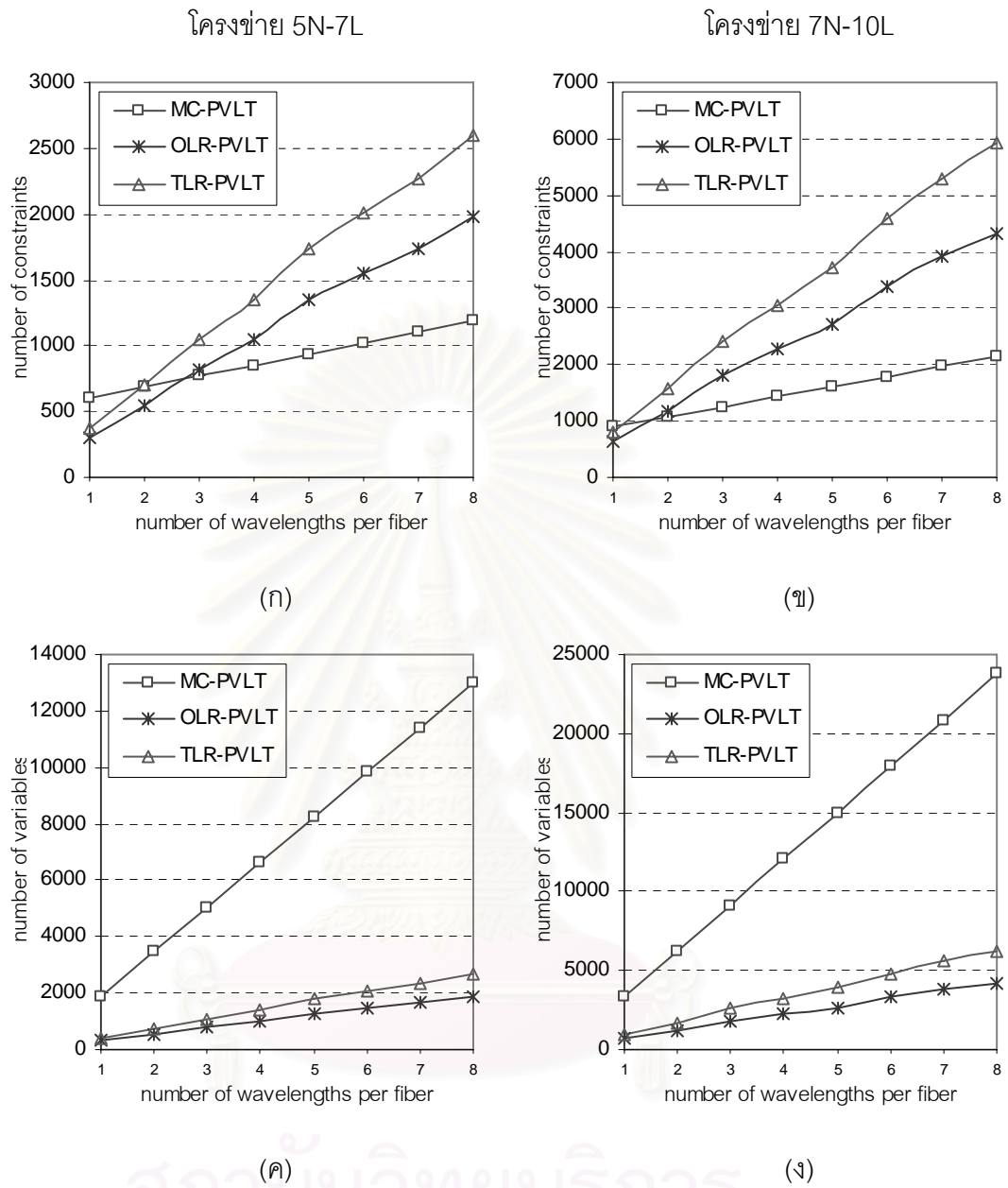


รูปที่ 4.7 จำนวนสายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกในสภาวะโครงข่ายปกติ (ก) กรณีโครงข่าย 5N-7L และ (ข) กรณีโครงข่าย 7N-10L

ดังนั้น สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า สำหรับกรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งสายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยการใช่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC แบบจำลองของโครงข่ายประเภท VLT จะมีความซับซ้อนน้อยที่สุด รองลงมาได้แก่แบบจำลองของโครงข่ายประเภท PVL ส่วนแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากที่สุดได้แก่แบบจำลองของโครงข่ายประเภท LT และสำหรับกรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งสายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยการใช่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และ TLR แบบจำลองของโครงข่ายประเภท VLT จะมีความซับซ้อนน้อยที่สุด ถัดมาได้แก่แบบจำลองของโครงข่ายประเภท PVL และ LT ซึ่งความซับซ้อนของแบบจำลองทั้งสองจะขึ้นอยู่กับจำนวนสายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกในสภาวะโครงข่ายปกติ

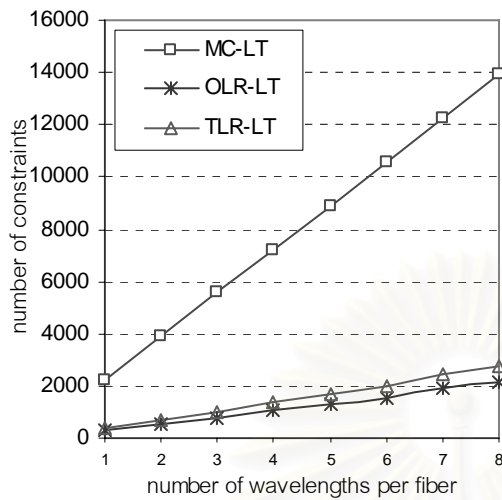
4.2.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่

เนื้อหาในส่วนนี้ จะเป็นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR โดยรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท VLT PVL และ LT ตามลำดับ กับค่า M



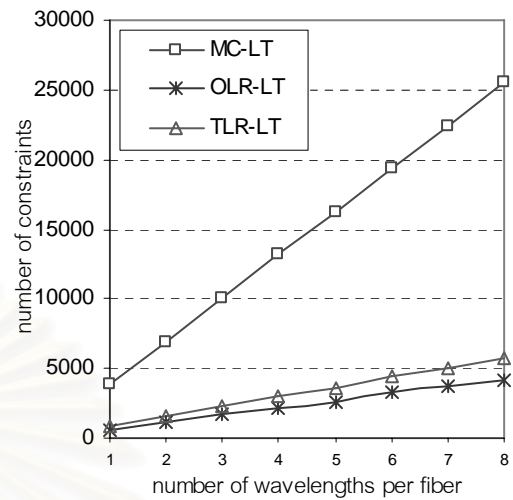
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท PVLT กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ

โครงข่าย 5N-7L

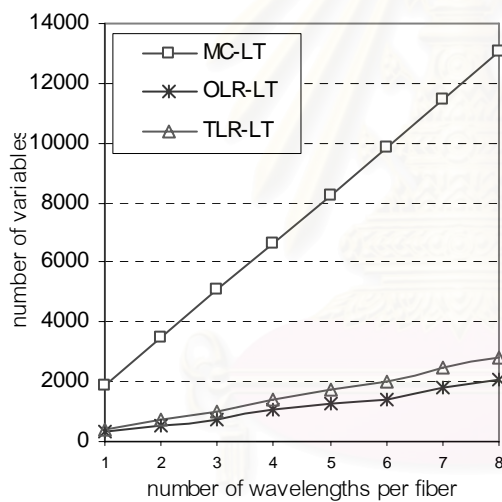


(ก)

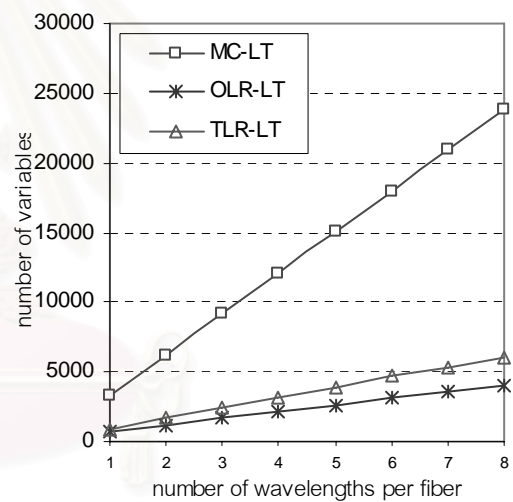
โครงข่าย 7N-10L



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท LT กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) (ก) และ (ข) กราฟจำนวนสมการของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ (ค) และ (ง) กราฟจำนวนตัวแปรของโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L ตามลำดับ

พิจารณากราฟรูปที่ 4.8 สำหรับกรณีโครงข่ายประเภท VLT และกราฟรูปที่ 4.10 สำหรับโครงข่ายประเภท LT จะพบว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ จะสามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ $MC \geq TLR \geq OLR$ ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 7N-10L ประเภท LT ในรูปที่ 4.10 ที่ค่า $M = 4$ วิธี MC TLR และ OLR จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 13139 2987 และ 2195 ตามลำดับ มีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 12094 3169 และ 2169 ตามลำดับ สาเหตุที่การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC มีความซับซ้อนของแบบจำลองมากที่สุด เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC จะอนุญาตให้มัลติคาสต์เซสชันทั้งหมดภายในโครงข่ายสามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่เมื่อเกิดเหตุการณ์หนึ่งข้างเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง โดยไม่พิจารณาว่ามัลติคาสต์เซสชันนั้นได้รับผลกระทบจากข้างเชื่อมโยงที่ขัดข้องหรือไม่ นั่นคือ เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข้างเชื่อมโยงขึ้นในโครงข่าย ทุกมัลติคาสต์เซสชันจะถูกจัดเส้นทางและความยาวคลื่นใหม่ ส่งผลให้แบบจำลองของ MC จะประกอบไปด้วยสมการข้อบังคับในการจัดเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับทุก ๆ มัลติคาสต์เซสชันที่อยู่ในโครงข่ายในทุก ๆ เหตุการณ์ที่เกิดความขัดข้องหนึ่งข้างเชื่อมโยงขึ้น ทำให้การจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธีนี้มีความซับซ้อนมากกว่าการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR และ OLR ที่การจัดเส้นทางและความยาวคลื่นจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อข้างเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องนั้นรองรับทราฟฟิกในโครงข่าย

สาเหตุที่การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR มีจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองมากกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR เนื่องจากจำนวนวิธีบูรณะของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR จะขึ้นอยู่กับลักษณะของข้างเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้อง นั่นคือหากวิธีทำงานอยู่บนวงแหวนที่ถูกเลือกเพื่อใช้แก้ไขปัญหานั้นข้างเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้อง จะได้วิธีบูรณะเพียงวิธีเดียว แต่หากวิธีทำงานอยู่คร่อมวงแหวน จะได้วิธีบูรณะสองวิธี ดังนั้นนอกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จะต้องมีเงื่อนไขในการเลือกวงแหวนแล้ว จะต้องมีเงื่อนไขข้อบังคับในส่วนของการพิจารณาเส้นทางที่ใช้เป็นวิธีบูรณะบนวงแหวนนั้นด้วย ซึ่งต่างจากวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ที่จำนวนวิธีบูรณะจะมีเพียงวิธีเดียวไม่ว่าข้างเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องจะอยู่บนวงแหวนหรือคร่อมวงแหวน ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้ มีเพียงเงื่อนไขในการเลือกวงแหวนเท่านั้น ส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ OLR มีจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรน้อยที่สุด

ดังนั้น เมื่อพิจารณาในเชิงของเวลาที่ใช้คำนวณหาผลเฉลย สามารถกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC จะใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยมากที่สุด รองลงมาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ

TLR และ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR จะใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยน้อยที่สุดดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.4 ยกตัวอย่างเช่น ตารางที่ 4.3 (ค) กรณีโครงข่าย 7N-10L ประเภท LT ที่มีการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่ที่ $M = 2$ แบบจำลองของโครงข่ายวิธี MC จะใช้เวลา 4 ชั่วโมง 33 นาที 30 วินาทีในการหาผลเฉลย ส่วนแบบจำลองของโครงข่ายวิธี TLR และ OLR จะใช้เวลา 7 นาที 11 วินาที และ 9.80 วินาทีตามลำดับ ในการหาผลเฉลย

พิจารณากราฟรูปที่ 4.9 สำหรับกรณีโครงข่ายประเภท PVLT จะพบว่า จำนวนสมการของแบบจำลองในแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จะสามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ $TLR \geq OLR \geq MC$ ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 7N-10L ประเภท PVLT ในรูปที่ 4.9 ที่ค่า $M = 4$ วิธี TLR OLR และ MC จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 3060 2268 และ 1430 ตามลำดับ จะสังเกตว่าจำนวนสมการของแบบจำลองของวิธี TLR และ OLR จะมีค่าใกล้เคียงกับจำนวนสมการในกรณีของโครงข่ายประเภท LT แต่จำนวนสมการของแบบจำลองของวิธี MC จะมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองของโครงข่ายประเภท LT ค่อนข้างมาก เนื่องจากแบบจำลองของโครงข่ายประเภท PVLT ไม่มีเงื่อนไขในส่วนของการกำหนดค่าความยาวคลื่นให้กับแต่ละมัลติคาสต์เซสชัน จึงส่งผลให้เมื่อเปรียบเทียบจำนวนสมการระหว่างวิธี MC TLR และ OLR จะได้ว่าแบบจำลองของวิธี TLR มีจำนวนสมการมากกว่าแบบจำลองของวิธี OLR และวิธี MC ตามลำดับ ดังนั้น ผลของจำนวนสมการที่มากกว่าน่าจะส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธี TLR ต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานกว่าแบบ OLR และ MC แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในเชิงของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.4 จะพบว่า ข้อสรุปดังกล่าวไม่เป็นจริงเพราะโดยเฉลี่ยแล้วเวลาในการคำนวณหาผลเฉลยของ MC กลับมากที่สุด ยกตัวอย่างเช่น ตารางที่ 4.3 (ข) กรณีโครงข่าย 7N-10L ประเภท PVLT ที่มีการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร ที่ $M = 4$ แบบจำลองของโครงข่ายวิธี MC จะใช้เวลา 7 ชั่วโมง 33 นาที 32 วินาทีในการหาผลเฉลย ส่วนแบบจำลองของโครงข่ายวิธี TLR และ OLR จะใช้เวลา 11 นาที 5 วินาที และ 40.86 วินาทีตามลำดับ ในการหาผลเฉลย เหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะเมื่อพิจารณาในแง่ของจำนวนตัวแปร จะพบว่า แบบจำลอง MC มีตัวแปรมากกว่าแบบจำลอง TLR และ OLR ทั้งนี้เนื่องมาจาก การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC จะอนุญาตให้มัลติคาสต์เซสชันทั้งหมดภายในโครงข่ายสามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่เมื่อเกิดเหตุการณ์หนึ่งขายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องโดยไม่พิจารณาว่ามัลติคาสต์เซสชันนั้นได้รับผลกระทบจากขายเชื่อมโยงที่ขัดข้องหรือไม่ ทำให้แบบจำลองของวิธีนี้มีจำนวนตัวแปรมากกว่าแบบจำลองของวิธี TLR และ OLR ที่การจัดเส้นทางและความยาวคลื่นจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อขายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องนั้นรองรับทราฟฟิกในโครงข่าย ซึ่งจำนวนตัวแปรที่

มากกว่านี้ ทำให้แบบจำลองของวิธี MC มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น แม้ว่าวิธี MC จะมีจำนวนสมการน้อยกว่าวิธี TLR และ OLR ก็ตาม จากผลดังกล่าว สามารถเรียงลำดับความซับซ้อนของแบบจำลองสำหรับโครงข่ายประเภท PVLT จากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ $MC \geq TLR \geq OLR$

จากการวิเคราะห์ข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า สำหรับกรณีโครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองในแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จะสามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ $MC \geq TLR \geq OLR$

4.2.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเชิงขนาดของโครงข่าย

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความซับซ้อนของโครงข่ายระหว่างโครงข่าย 5N-7L และโครงข่าย 7N-10L จะพบว่า ความซับซ้อนของแบบจำลองมีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดของโครงข่ายที่พิจารณา สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองจะมีความสัมพันธ์กับจำนวนโหนดและจำนวนสายเชื่อมโยงของโครงข่าย ทำให้แบบจำลองของโครงข่ายขนาดใหญ่มีความซับซ้อนมากกว่าแบบจำลองของโครงข่ายที่มีขนาดเล็กเช่น แบบจำลองของโครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT ที่ค่า $M = 4$ ในรูปที่ 4.8 กรณีที่โครงข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี MC จะมีจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรเท่ากับ 602 และ 1865 แต่ในโครงข่าย 7N-10L จะจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรเพิ่มขึ้นเป็น 890 และ 3296 ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของโครงข่ายทั้งสอง จะพบว่า เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของแบบจำลองที่ใช้ และเนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองแปรผันตามขนาดของโครงข่ายที่ใช้พิจารณา การหาผลเฉลยของโครงข่าย 7N-10L จึงใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานกว่าเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของโครงข่าย 5N-7L ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีขนาดเล็กกว่านั่นเอง ยกตัวอย่างเช่น ตารางที่ 4.1 (ก) กรณีโครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT ที่มีการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร ที่ $M = 4$ แบบจำลองของโครงข่ายวิธี MC จะใช้เวลา 9.13 วินาทีในการหาผลเฉลย ส่วนกรณีโครงข่าย 7N-10L ในตารางที่ 4.3 (ก) จะใช้เวลา 3 นาที 8 วินาที ในการหาผลเฉลย

ตารางที่ 4.1 เวลา (วินาที) ที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลี่ยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N-7L ทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโหนดต้นทางร่วม

(ก) โครงข่าย VLT

M	กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (VLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (VLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.30	6.38	0.06	0.24	0.05	1.28	0.17	0.57
2	0.06	9.83	0.09	0.24	0.17	473.84	0.08	0.39
3	0.27	48.13	0.06	0.18	0.28	6.77	0.08	0.24
4	0.05	9.13	0.05	0.15	0.24	7804.34	0.11	0.27
5	0.45	4.55	0.05	0.18	0.22	1.61	0.06	0.15
6	0.08	2.25	0.06	0.18	0.13	1.00	0.05	0.15
7	0.03	2.25	0.02	0.09	0.19	1.20	0.02	0.09
8	0.31	1.94	0.02	0.03	0.08	1.38	0.05	0.15
16	0.13	0.67	0.03	0.09	0.11	0.34	0.02	0.06
32	0.16	0.59	0.03	0.09	0.45	0.39	0.02	0.06
64	0.06	0.66	0.03	0.09	0.22	0.38	0.02	0.03
128	0.08	0.70	0.05	0.09	0.24	0.33	0.02	0.06



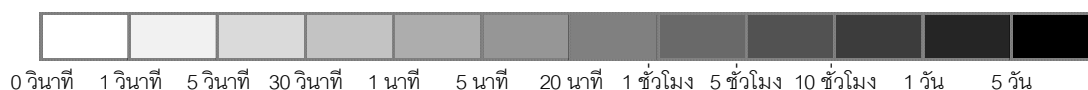
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ข) โครงข่าย PVLT

M	กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (PVLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (PVLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.03	8.78	0.13	0.33	0.06	1.16	0.19	0.84
2	0.09	2129.53	0.59	1.02	0.13	5.56	0.34	0.75
3	1.58	2457.63	0.66	1.92	0.55	38.19	0.95	2.94
4	1.52	550.97	0.19	1.08	0.48	416.36	0.86	2.73
5	121.45	2189.67	0.56	2.19	0.77	14.58	2.20	6.66
6	848.88	1579.02	1.02	1.35	4.83	1730.33	2.06	5.76
7	59.81	31511.06	0.39	1.02	4.89	3988.91	0.94	2.40
8	74.75	32062.03	0.44	0.99	8.22	9767.64	0.94	2.40
16	295.50	34163.39	0.30	0.18	30.06	41043.17	2.78	6.51
32	430.06	32147.29	0.31	0.24	193.78	51454.84	0.06	0.24
64	1574.44	36225.42	0.36	0.42	232.06	52081.65	0.11	0.33
128	2125.95	43658.35	0.45	0.66	627.84	51077.83	0.22	0.69

(ค) โครงข่าย LT

M	กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (LT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (LT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.02	5.72	0.13	0.33	0.03	1.11	0.20	0.75
2	0.69	2262.84	0.06	0.15	0.84	346.59	0.55	1.26
3	2.36	11157.75	0.02	0.24	6.26	3691.16	0.97	2.34
4	9.28	68658.59	0.63	1.17	27.55	32358.22	1.30	2.97
5	279.22	3303.83	0.44	0.69	779.86	39993.08	1.33	3.09
6	2522.36	86716.95	0.03	0.03	2473.73	54208.23	1.13	3.48
7	2813.64	56987.14	0.48	1.08	2678.14	255246.71	1.16	3.42
8	3413.64	59786.24	0.51	1.02	2984.36	85719.29	1.13	3.48
16	7267.54	54123.25	0.50	1.17	6489.26	56461.59	1.17	3.48
32	8897.68	36478.41	0.53	1.23	8496.12	56860.56	1.19	3.66
64	17086.59	55423.64	0.63	1.47	20058.26	59512.89	1.27	4.02
128	19856.78	58996.58	0.75	1.83	21565.18	62165.22	1.42	4.41



ตารางที่ 4.2 เวลา (วินาที) ที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลี่ยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N-7L ทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อกราฟฟิกในโครงข่ายเป็นกราฟฟิกโนดต้นทางแยก

(ก) โครงข่าย VLT

M	กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (VLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (VLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.03	7.73	0.33	0.81	0.19	1797.42	0.20	0.42
2	0.08	6.97	0.09	0.48	0.19	1.72	0.14	0.39
3	0.06	5.02	0.11	0.39	0.13	1.45	0.08	0.27
4	0.49	28.09	0.09	0.27	0.44	4.16	0.11	0.27
5	0.80	7.92	0.11	0.33	0.14	1.94	0.16	0.39
6	0.20	2.45	0.06	0.27	0.06	0.97	0.03	0.15
7	0.16	5.34	0.03	0.18	0.06	1.75	0.05	0.18
8	0.33	3.66	0.06	0.15	0.08	1.78	0.05	0.15
16	0.26	0.75	0.05	0.15	0.08	0.36	0.03	0.09
32	0.16	0.69	0.05	0.15	0.09	0.33	0.05	0.15
64	0.20	0.70	0.03	0.15	0.20	0.31	0.03	0.09
128	0.34	0.66	0.05	0.15	0.22	0.27	0.02	0.09



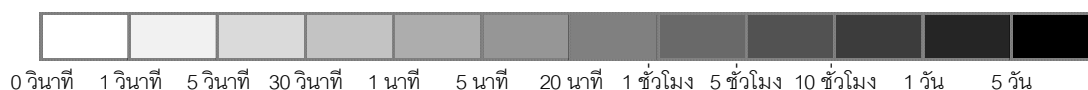
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ข) โครงข่าย PVLТ

M	กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (PVLТ)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (PVLТ)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.05	10.06	0.25	0.51	0.05	23.02	0.20	0.42
2	0.17	166.64	0.50	1.23	0.44	7.86	0.45	1.08
3	1.00	83.03	0.83	2.01	0.64	416.36	0.83	1.89
4	2.69	379.56	0.38	2.31	2.23	1730.33	0.86	2.25
5	193.20	5521.75	1.19	1.89	4.75	3988.91	1.36	3.15
6	322.50	4607.77	1.45	3.39	5.06	9767.64	1.27	3.39
7	288.17	5901.31	3.48	6.99	14.53	81525.75	1.50	3.09
8	749.00	16030.83	3.24	7.32	15.20	84799.72	0.94	2.94
16	5570.03	26539.91	0.05	0.18	209.95	85032.08	2.50	6.09
32	1967.91	27086.11	0.09	0.27	332.84	73185.17	2.58	7.14
64	5858.20	53079.82	0.14	0.48	542.79	76070.56	2.66	7.23
128	6035.94	66576.32	0.27	0.90	1394.52	72121.11	2.73	7.56

(ค) โครงข่าย LT

M	กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (LT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (LT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.01	6.99	0.25	0.57	0.03	65.06	0.19	0.42
2	0.42	649.38	0.28	0.81	2.03	213.55	0.59	1.17
3	4.05	25854.55	0.39	0.93	10.41	8620.73	1.02	3.18
4	23.61	52461.63	0.34	1.50	58.00	61620.73	1.52	3.24
5	465.19	10999.16	0.02	0.09	1559.72	197867.78	1.00	3.27
6	3291.13	33844.25	0.03	0.09	5918.13	47762.80	1.16	2.67
7	3291.13	57463.51	0.02	0.09	5219.75	60151.69	1.13	2.85
8	3291.13	64635.57	0.03	0.09	6988.53	63204.05	1.14	2.67
16	6583.44	60874.65	0.03	0.15	7986.85	66069.93	1.14	2.82
32	8796.96	61672.94	0.06	0.24	18684.59	77867.78	1.20	2.85
64	16876.58	62493.56	0.11	0.42	22596.57	81558.94	1.27	3.09
128	20087.95	70659.54	0.25	0.75	22978.65	82641.03	1.45	3.69



ตารางที่ 4.3 เวลา (วินาที) ที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลี่ยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N-10L ทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโหนดต้นทางร่วม

(ก) โครงข่าย VLT

M	กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (VLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (VLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.25	213.31	2.14	4.85	0.06	385.70	2.09	4.60
2	0.95	121.03	2.56	9.85	0.38	1235.77	1.80	11.70
3	0.58	1143.31	0.80	4.05	1.20	1139.33	1.74	5.10
4	2.06	187.98	0.81	2.50	1.05	20.27	1.64	5.30
5	0.75	62440.42	0.86	1.80	0.45	316.14	1.48	4.05
6	0.73	11.64	0.95	3.75	0.38	115.84	1.38	3.80
7	0.28	20.91	1.16	1.80	0.17	3.97	1.26	2.50
8	0.25	4.72	0.64	3.05	0.14	1.58	0.81	1.43
16	0.08	1.30	0.22	0.65	0.11	0.41	0.13	0.24
32	0.06	0.80	0.22	0.70	0.13	0.34	0.09	0.30
64	0.06	1.00	0.16	0.70	0.16	0.39	0.09	0.35
128	0.06	1.00	0.16	0.70	0.16	0.41	0.06	0.25



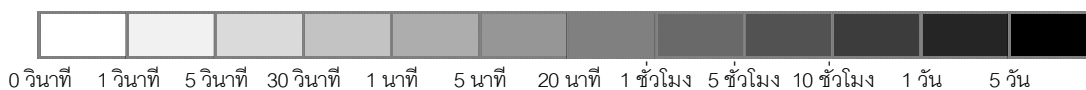
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ข) โครงข่าย PVLT

M	กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (PVLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (PVLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.03	218.45	2.83	74.68	0.06	366.42	2.34	48.41
2	1.09	16676.47	15.33	220.42	1.05	61025.92	17.25	248.75
3	2.02	56253.48	1171.17	15024.10	4.16	13528.14	19.05	457.32
4	14.08	27212.23	40.86	664.87	9.55	53023.14	23.36	274.50
5	16.50	1155.72	21.58	363.08	9.19	2364.08	38.94	570.62
6	31.36	4667.76	50.56	841.51	153.09	1210.50	35.39	932.67
7	22.17	20810.11	41.31	589.16	6.77	10558.58	24.09	614.91
8	339.77	32062.03	29.24	758.60	1056.11	1890.59	32.69	956.87
16	985.26	34163.39	5.19	345.05	2844.16	91043.17	30.72	1030.00
32	4901.03	42147.29	41.17	1397.20	785.33	91454.84	14.97	445.99
64	4018.80	66225.42	4.00	185.92	4474.53	102081.65	16.42	314.67
128	4790.22	73658.35	4.44	202.91	8542.28	101077.83	16.89	328.57

(ค) โครงข่าย LT

M	กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (LT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (LT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.05	284.23	2.83	76.74	0.06	745.36	2.39	48.93
2	2.23	15432.35	4.41	43.26	4.64	12456.36	8.61	301.79
3	17.34	16485.94	8.08	382.13	133.20	17856.36	14.86	362.05
4	51.88	16410.39	9.80	431.57	601.72	35468.23	25.41	613.37
5	262.61	103183.36	25.06	2.58	2168.92	84563.22	30.73	761.17
6	436.13	34859.70	5.09	221.45	1133.47	42136.36	16.28	288.92
7	1267.80	54197.83	1.70	43.26	3145.20	55487.96	16.39	287.89
8	2219.03	78456.01	1.30	161.71	5481.24	65487.21	16.30	285.83
16	4865.95	106487.90	1.31	164.29	7416.94	110325.08	16.45	291.49
32	6478.25	156478.41	1.44	165.83	7102.11	184765.36	16.59	292.01
64	6687.01	175423.64	1.61	171.50	7412.94	201454.02	16.64	300.76
128	6478.35	178996.58	1.98	183.34	7846.66	210487.11	17.05	316.21



ตารางที่ 4.4 เวลา (วินาที) ที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลี่ยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N-10L ทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกในดต้นทางแยก

(ก) โครงข่าย VLT

M	กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (VLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (VLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.02	889.23	4.64	14.75	0.06	72.39	2.97	9.20
2	2.23	1003.58	4.27	20.15	0.23	1406.64	2.67	15.55
3	3.50	2261.86	5.64	4.75	0.14	27.56	1.91	3.45
4	9.63	121.78	4.00	3.90	0.78	21.14	1.13	3.05
5	1.14	11.94	1.26	2.35	0.27	33.56	1.70	4.60
6	3.25	851.56	3.86	5.55	0.28	900.61	0.80	2.20
7	0.33	10.16	1.63	3.35	0.20	1.39	0.94	1.24
8	1.13	3.70	0.72	1.35	0.14	0.86	1.03	1.20
16	0.42	1.08	0.59	1.02	0.13	0.52	0.28	0.48
32	0.38	0.70	0.55	0.68	0.17	0.27	0.16	0.17
64	0.44	1.47	0.48	1.25	0.19	0.30	0.19	0.25
128	0.45	1.47	0.42	1.50	0.17	0.28	0.14	0.26



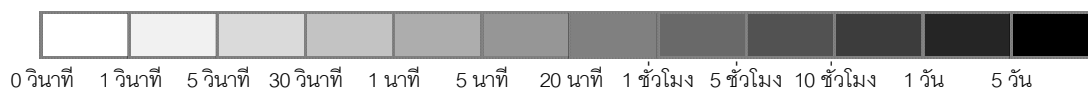
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

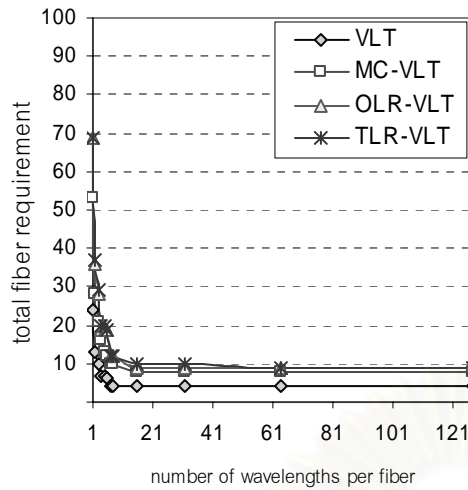
(ข) โครงข่าย PVLT

M	กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (PVLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (PVLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.03	880.61	4.00	111.76	0.08	117.86	3.39	73.13
2	23.59	6439.34	14.23	277.07	0.51	5346.83	17.13	238.96
3	80.14	52057.91	38.06	388.83	1.03	451.39	12.39	367.71
4	142.22	1944.45	28.48	731.30	4.56	273.72	21.58	369.26
5	69.00	1337.28	20.50	1307.07	5.20	1896.48	26.25	449.60
6	76.80	45831.22	81.72	802.37	4.02	12947.08	15.45	508.82
7	14.36	214376.08	65.67	2044.55	9.30	3720.38	25.67	822.46
8	604.59	256.47	6.38	262.14	28.48	3434.05	31.20	1172.66
16	1699.34	6399.16	4.39	157.59	1831.39	7472.64	4.20	141.63
32	5123.00	15275.16	4.49	161.20	8269.45	10207.19	9.75	740.57
64	5415.84	53079.82	4.67	167.38	2178.52	106070.56	9.45	585.04
128	6412.23	96576.32	5.09	183.34	3842.67	102121.00	9.74	599.46

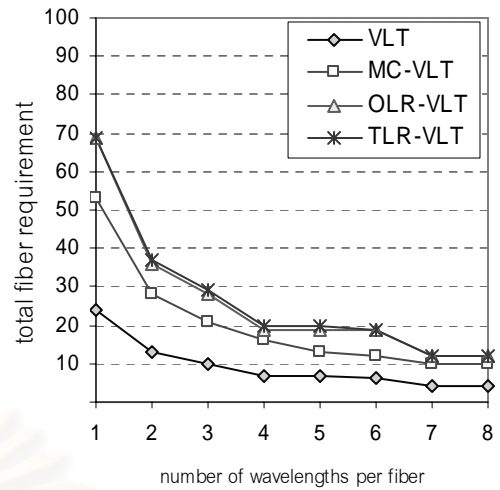
(ค) โครงข่าย LT

M	กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (LT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง			NO (LT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหา หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	0.03	800.09	3.98	113.30	0.08	605.06	3.38	74.16
2	1.80	11373.16	9.33	149.87	2.55	26513.55	5.55	194.67
3	6.14	14930.88	2.36	95.79	11.83	28620.73	11.67	321.88
4	31.05	15486.24	1.56	86.01	52.41	61620.73	9.55	286.34
5	66.69	16458.23	2.25	103.00	219.20	197867.78	9.88	330.63
6	156.44	22354.58	2.03	105.58	447.88	47762.80	9.22	264.20
7	424.17	45796.25	3.11	87.55	1223.09	60151.69	8.83	253.38
8	1146.54	78654.23	2.20	65.92	5468.23	63204.05	8.83	252.87
16	4786.57	90874.65	2.22	69.01	8256.41	66069.93	8.88	255.96
32	8122.33	181672.94	2.33	72.62	9712.23	197867.78	9.13	257.50
64	8039.95	182493.56	2.58	78.28	9745.24	201558.94	9.17	264.20
128	8450.97	190659.54	3.03	94.25	9845.36	242641.03	9.50	280.16



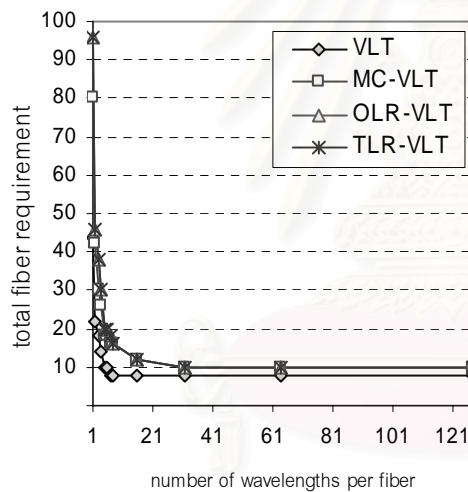


(ก-1)

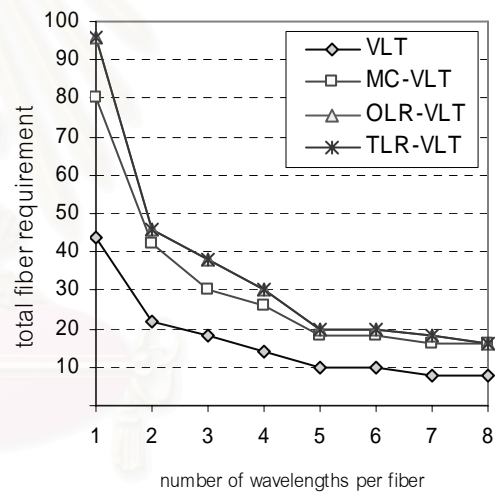


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



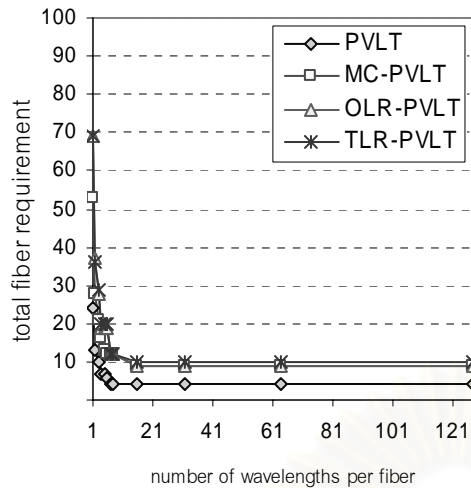
(ข-1)



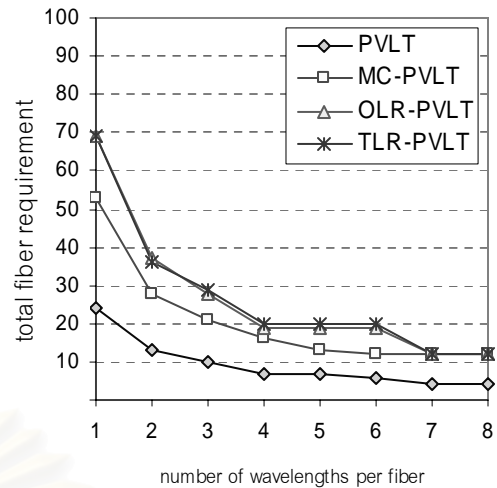
(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.11 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT ต้องการทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโหนดต้นทางร่วม

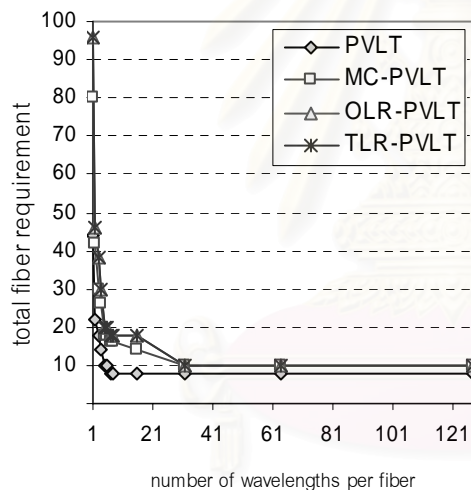


(ก-1)

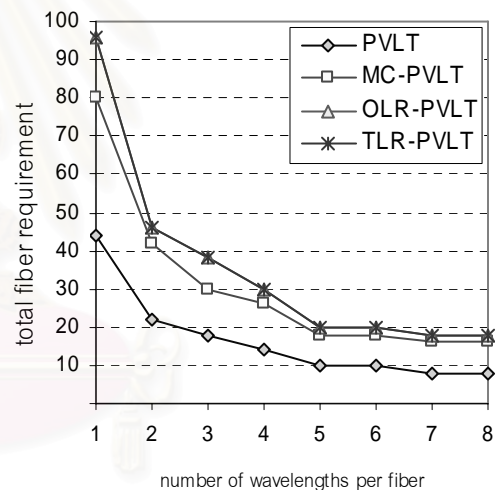


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



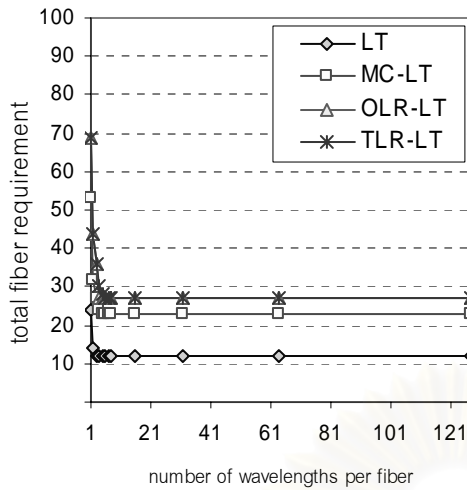
(ข-1)



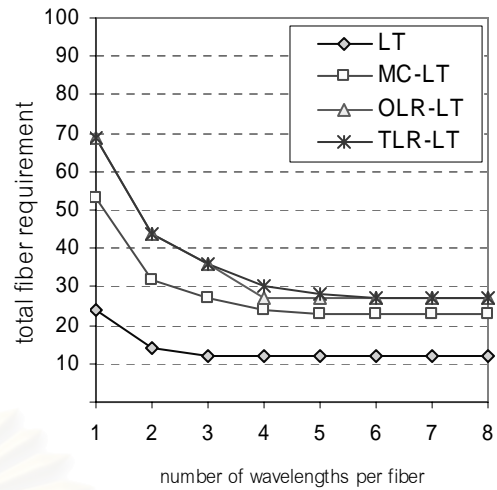
(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.12 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N-7L ประเภท PVLТ ต้องการทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข้างหนึ่งข้างใดเองได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกชนิดต้นทางร่วม

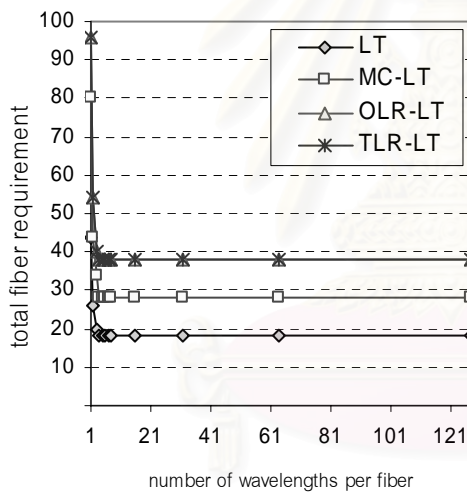


(ก-1)

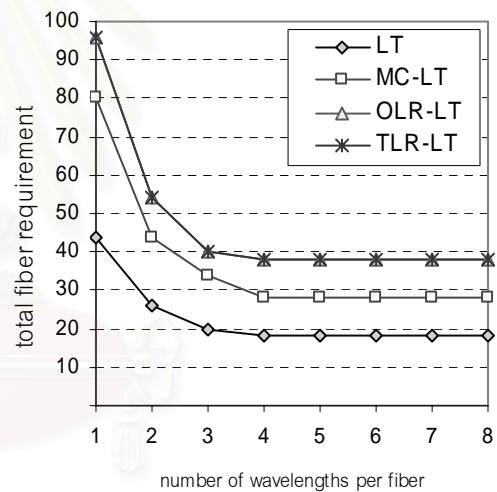


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



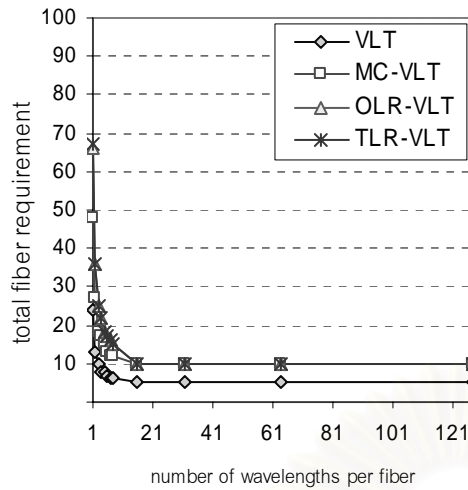
(ข-1)



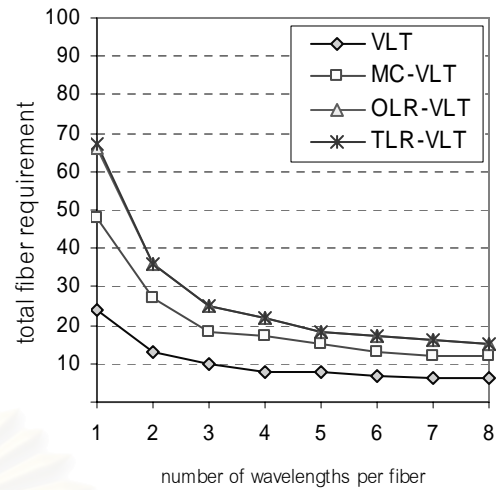
(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.13 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N-7L ประเภท LT ต้องการทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโหนดต้นทางร่วม

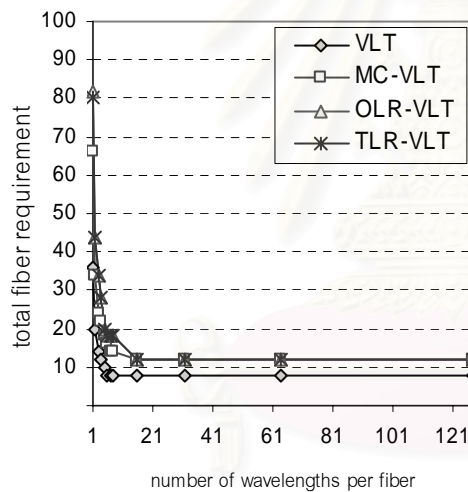


(ก-1)

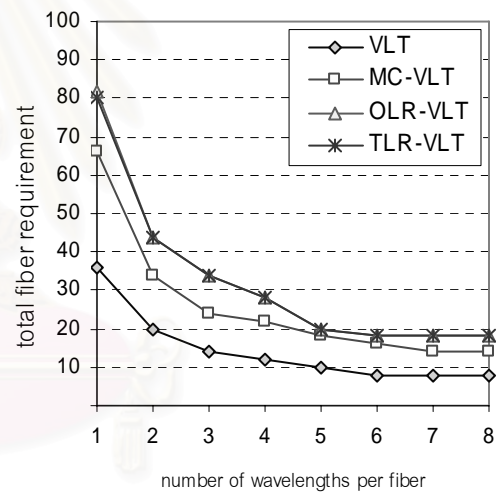


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



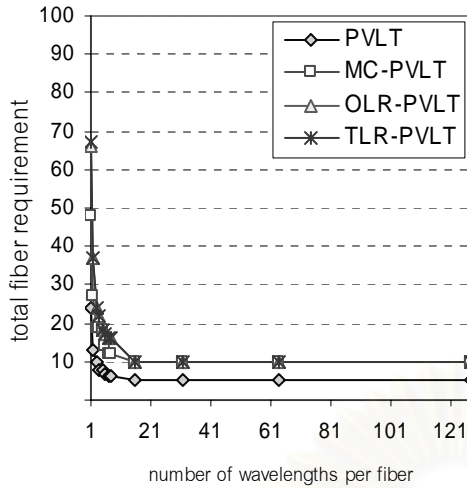
(ข-1)



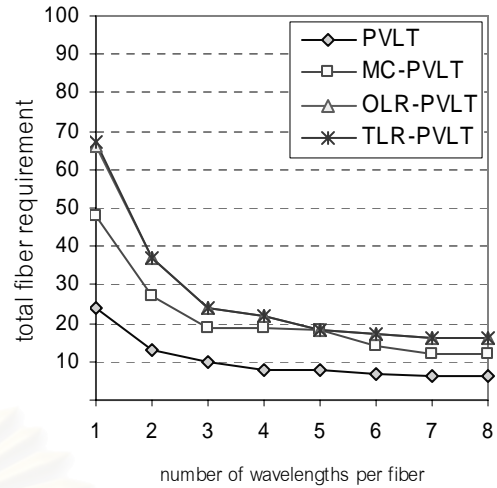
(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.14 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT ต้องการทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโนดต้นทางแยก

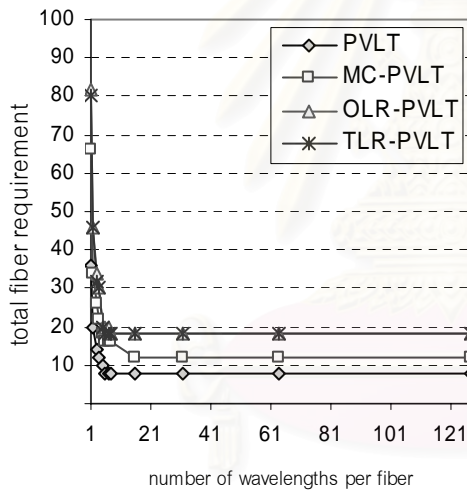


(ก-1)

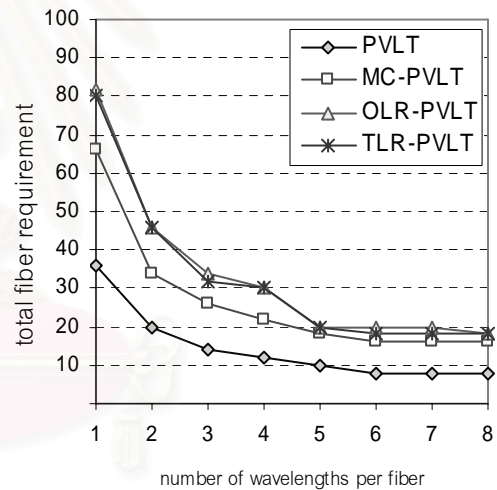


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



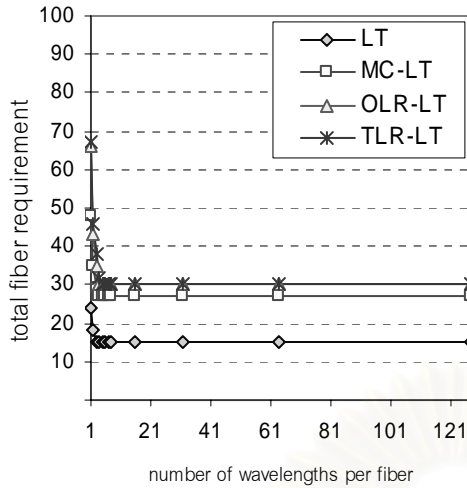
(ข-1)



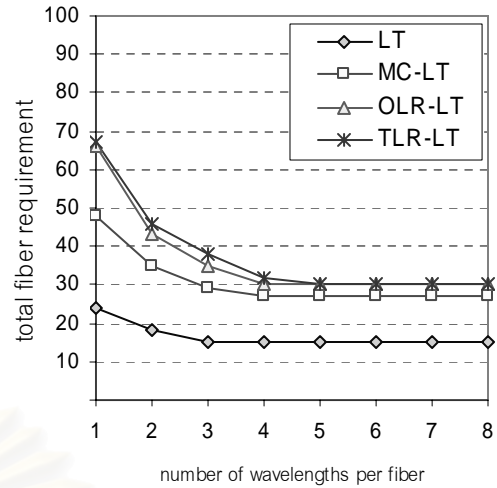
(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.15 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N-7L ประเภท PVLТ ต้องการทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข้างเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกในทิศทางแยก

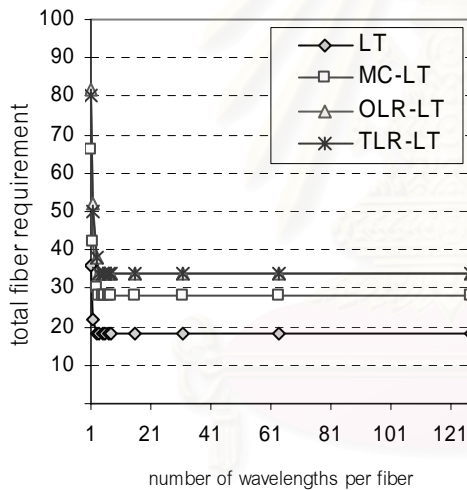


(ก-1)

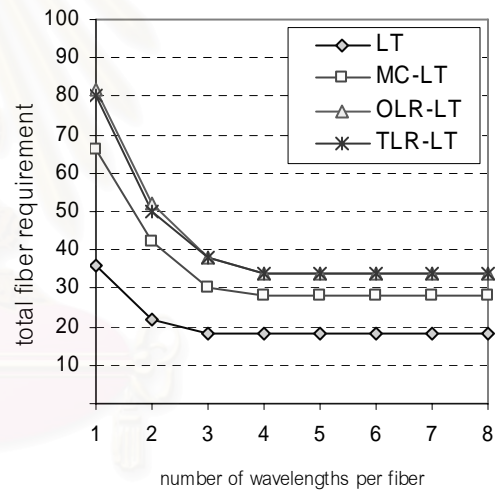


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



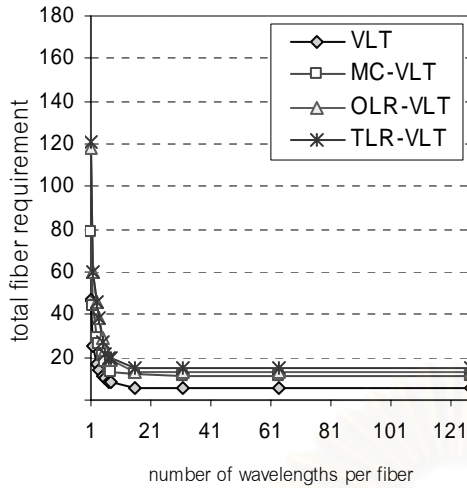
(ข-1)



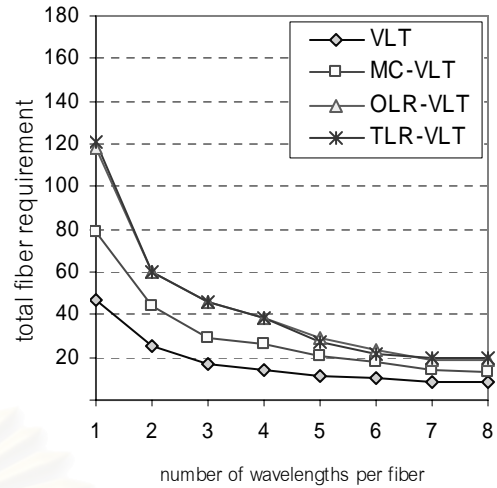
(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.16 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N-7L ประเภท LT ต้องการทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข้างเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโหนดต้นทางแยก

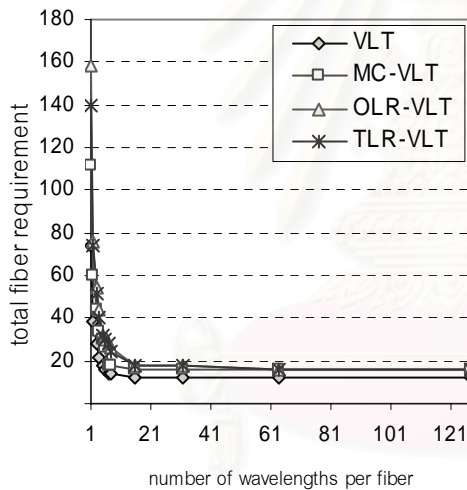


(ก-1)

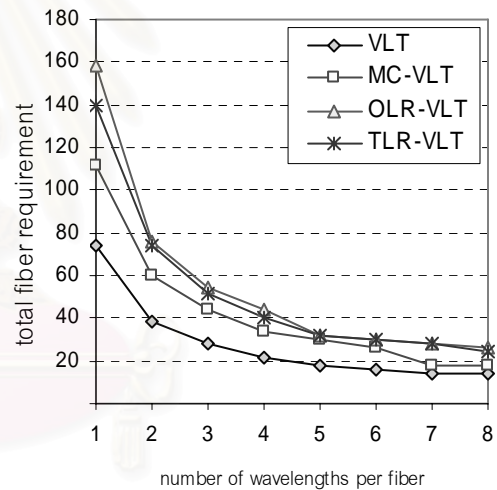


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



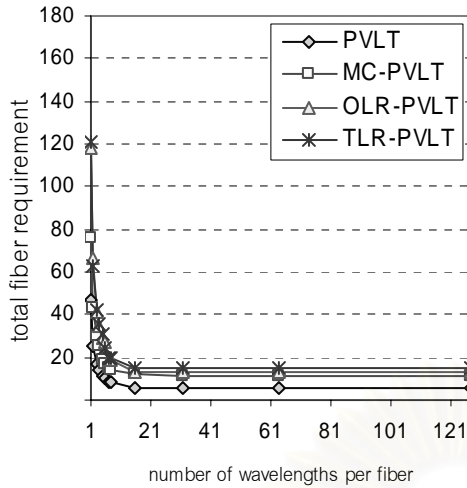
(ข-1)



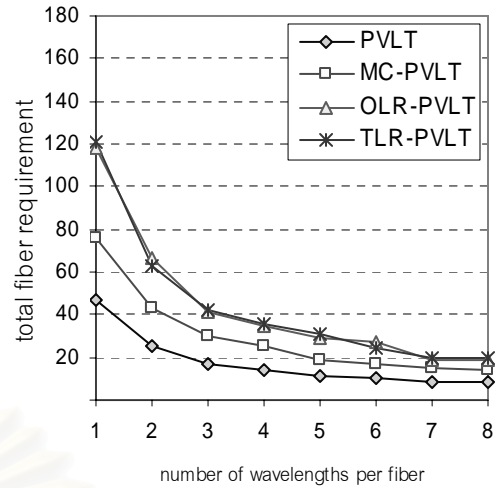
(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.17 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N-10L ประเภท VLT ต้องการทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข้างเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโหนดต้นทางร่วม

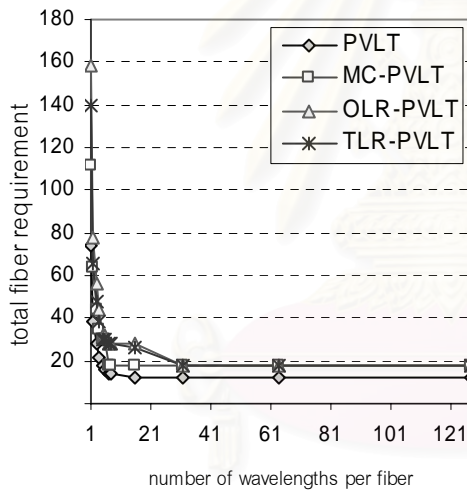


(ก-1)

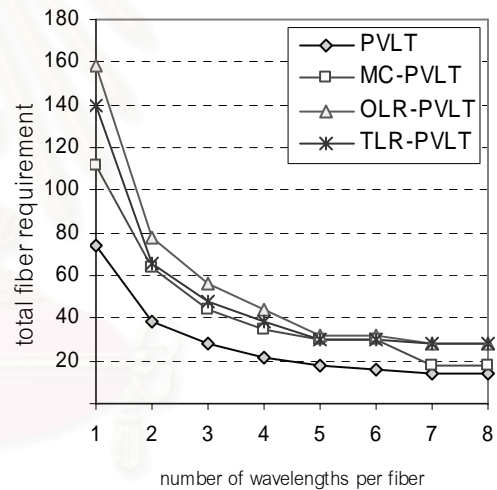


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



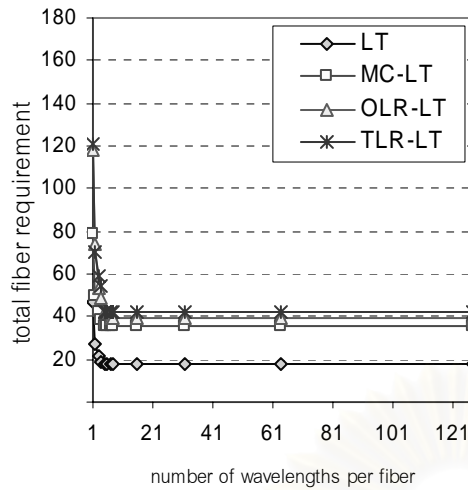
(ข-1)



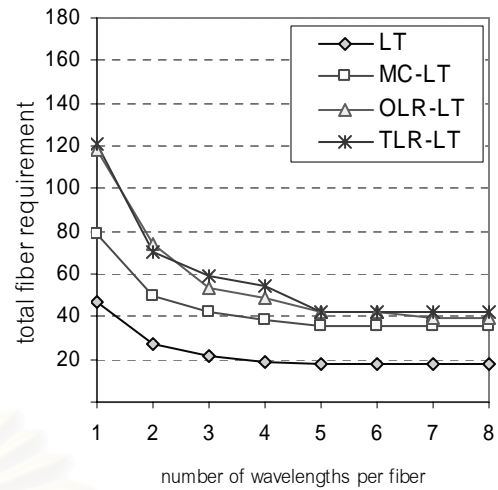
(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.18 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N-10L ประเภท PVLТ ต้องการทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกในทิศทางร่วม

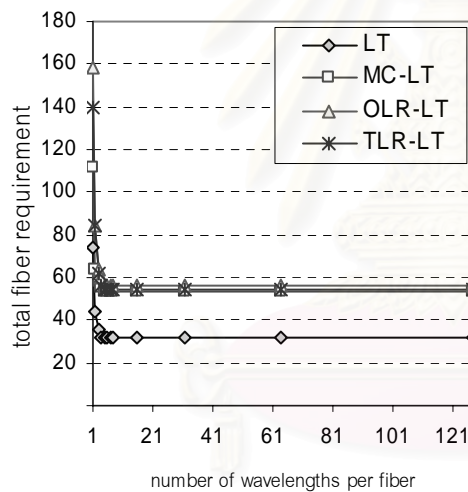


(ก-1)

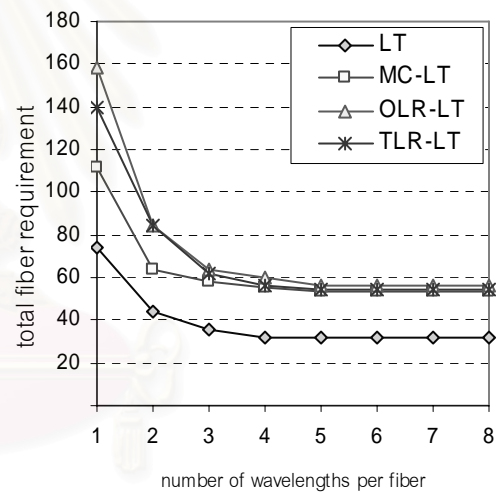


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



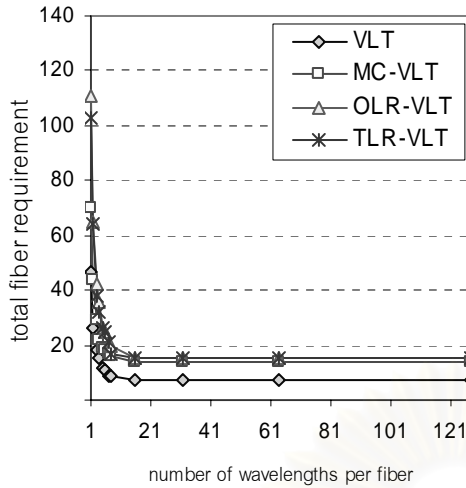
(ข-1)



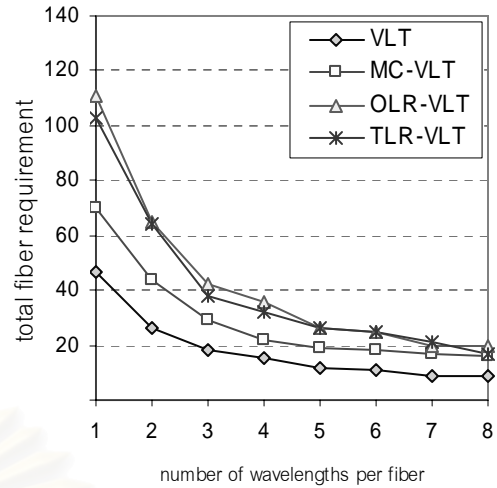
(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.19 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N-10L ประเภท LT ต้องการทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข้างเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกชนิดต้นทางร่วม

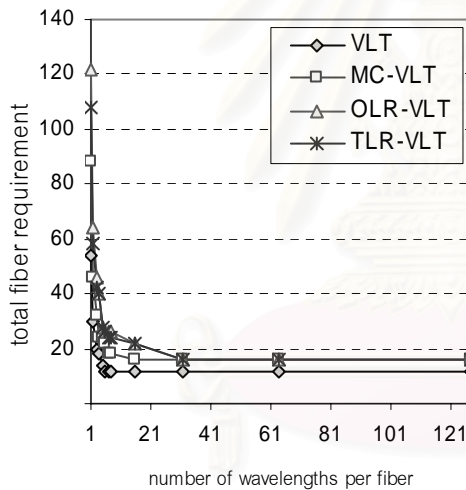


(ก-1)

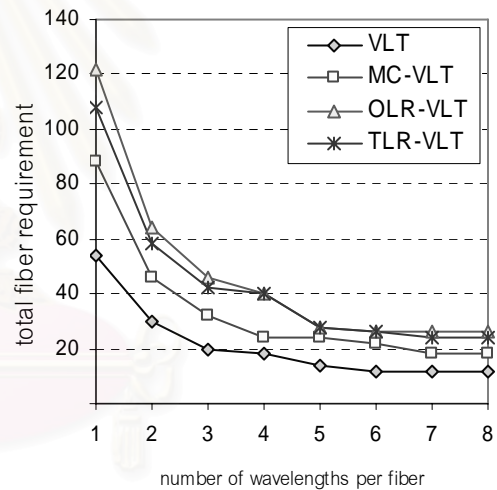


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



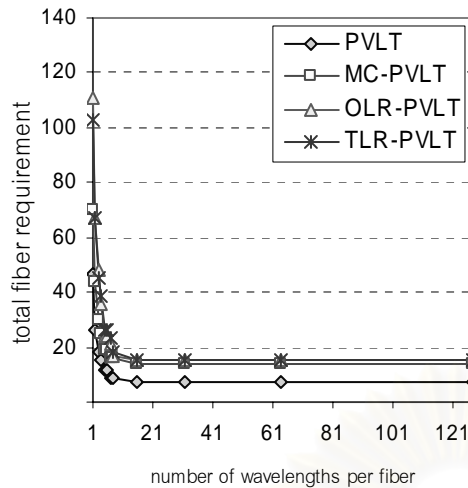
(ข-1)



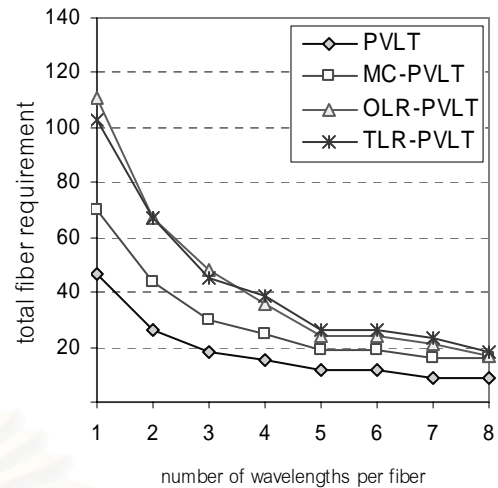
(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.20 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N-10L ประเภท VLT ต้องการทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข้างเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อกราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกในต้นทางแยก

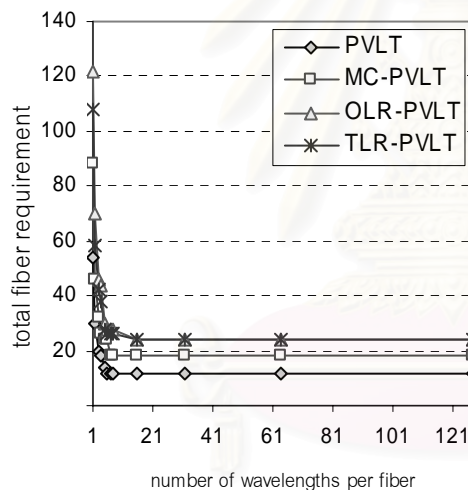


(ก-1)

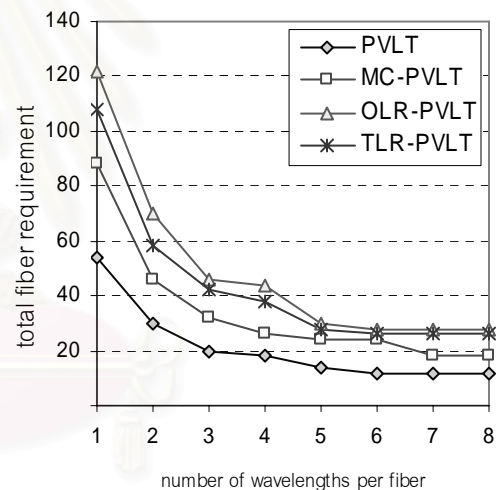


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



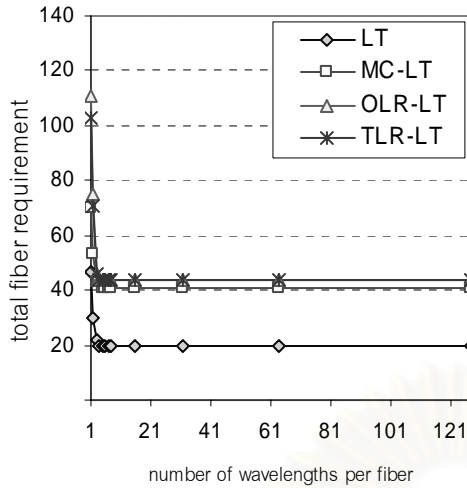
(ข-1)



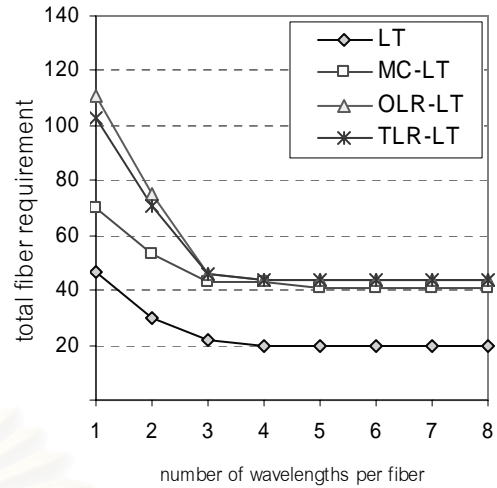
(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.21 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N-10L ประเภท PVL ต้องการทั้งในสภาวะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข้างเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกชนิดต้นทางแยก

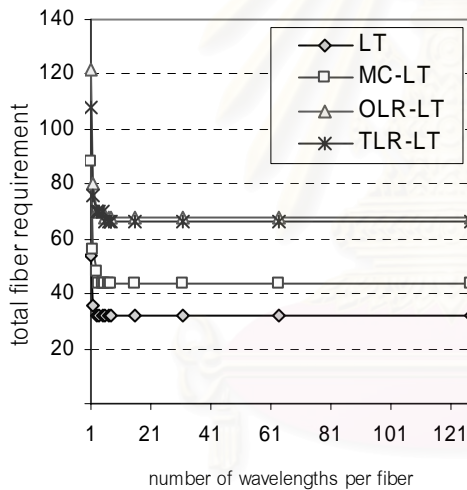


(ก-1)

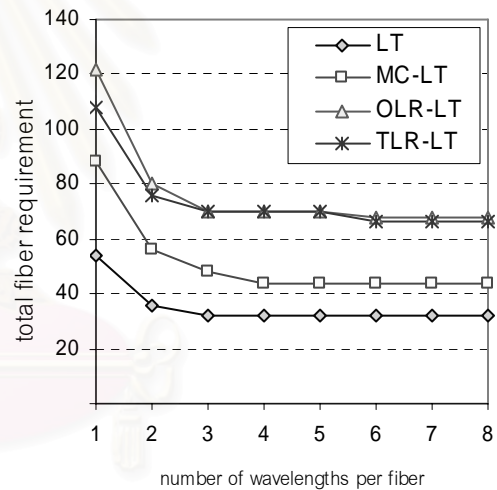


(ก-2)

(ก) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร



(ข-1)



(ข-2)

(ข) กรณีโครงข่ายวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

รูปที่ 4.22 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N-10L ประเภท LT ต้องการทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข้างเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกโนดต้นทางแยก

4.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบในเชิงจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ โครงข่ายต้องการ

เนื้อหาในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเชิงของจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ โดยกราฟจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ต้องการทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่าย เชื่อมโยงได้รับความขัดข้องจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.22 โดยรูปย่อย (ก) และ (ข) จะแสดงจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร และสมมาตร ตามลำดับ รูปย่อย (ก-1) และ (ข-1) จะแสดงจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อค่า M มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 128 ส่วนรูปย่อย (ก-2) และ (ข-2) จะเป็นรูปขยายของรูปย่อยที่ (ก-1) และ (ข-1) ตามลำดับ โดยจะแสดงจำนวนเส้นใยนำแสงในช่วงที่ค่า M มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 8 เท่านั้น

4.3.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการเมื่อโครงข่าย สามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง

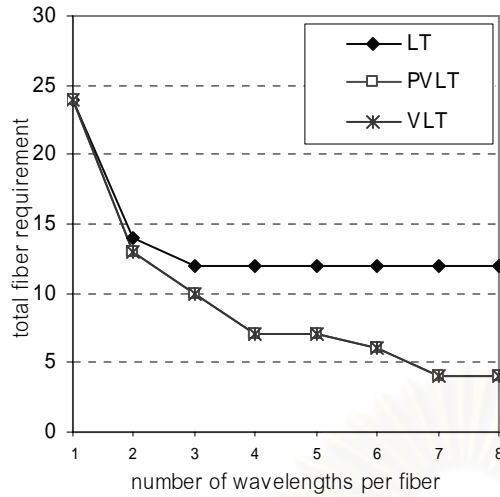
เมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ในกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องต้องการ ซึ่งได้แสดงผลเฉลยไว้ในรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.22 จะพบว่า ไม่ว่าโครงข่ายจะมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร หรือไม่สมมาตร จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการจะมีค่าลดลงเมื่อ M มีค่าสูงขึ้น โดยจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ค่า M มีค่าน้อย ๆ และจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อค่า M มีค่ามากพอ ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจาก เมื่อค่า M ของเส้นใยนำแสงมีค่าสูงขึ้น นั้นหมายถึง แต่ละเส้นใยนำแสงจะมีช่องสัญญาณเป็นจำนวนเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้น จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการจึงสามารถลดลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ ณ ค่า M ที่ต่ำกว่า ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT มีกราฟฟิกในโครงข่ายเป็นแบบโนดต้นทางร่วม และมีการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร ที่ค่า $M = 1$ ในรูปที่ 4.11 (ก) โครงข่ายต้องการเส้นใยนำแสงจำนวน 24 เส้น และเมื่อค่า $M = 2$ โครงข่ายต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงลดลงเหลือ 13 เส้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อ M มีค่ามากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้ว พบว่าจำนวนเส้นใยนำแสงจะไม่สามารถลดลงได้อีก ซึ่งจากรูปจะพบว่า ที่ $M \geq 7$ จำนวนเส้นใยนำแสงจะไม่สามารถลดลงได้อีก

เมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ในกรณีที่โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องต้องการ ซึ่งได้แสดงผลเฉลยไว้

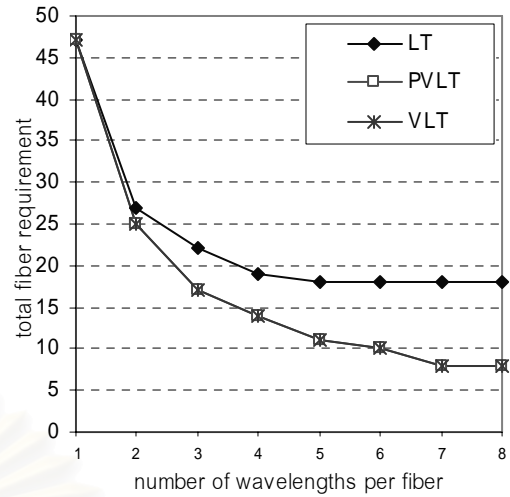
ในรูปที่ 4.11 ถึง รูปที่ 4.22 จะพบว่า ไม่ว่าโครงข่ายจะมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร หรือไม่สมมาตร จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการจะมีค่าลดลงเมื่อ M มีค่าสูงขึ้น โดยจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ค่า M มีค่าน้อย ๆ และจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อค่า M มีค่ามากพอ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะเหมือนกับข้อสรุปที่ได้ในกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง แต่อย่างไรก็ตาม จำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องต้องการจะมีจำนวนมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง ทั้งนี้เนื่องจาก โครงข่ายจะต้องสำรองช่องสัญญาณไว้ส่วนหนึ่งเพื่อรองรับเส้นทางที่เป็นวิถีสำรองเมื่อเกิดเหตุการณ์หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT ที่มีการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร และมีทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นแบบโหนดต้นทางรวม ที่ค่า $M = 1$ ในรูปที่ 4.11 (ก) เมื่อโครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง โครงข่ายต้องการเส้นใยนำแสงจำนวน 24 เส้น และเมื่อโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธี MC TLR และ OLR โครงข่ายต้องการเส้นใยนำแสงจำนวน 53 69 และ 69 เส้น ตามลำดับ

4.3.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายประเภทต่าง ๆ ต้องการ

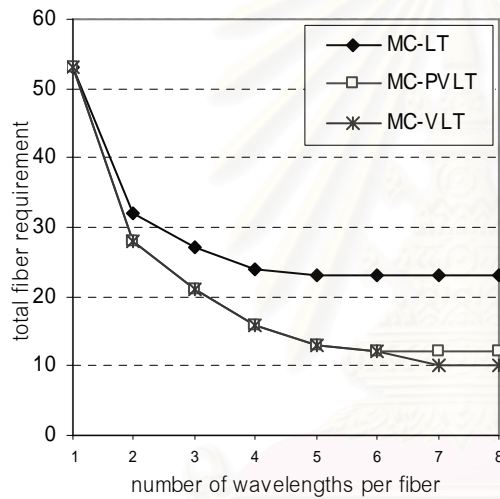
เมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ต้องการระหว่างโครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT จะใช้รูปที่ 4.23 ซึ่งแสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงระหว่างโครงข่ายทั้งสามประเภทของโครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ที่มีการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร และมีทราฟฟิกเป็นโหนดต้นทางรวมในการวิเคราะห์ผล โดยสมมติที่หนึ่งจะเป็นผลเฉลยของโครงข่าย 5N-7L และสมมติที่สองจะเป็นผลเฉลยของโครงข่าย 7N-10L ซึ่งจากรูปจะพบว่า จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการสามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ $LT \geq PVLT \geq VLT$ โดยในที่นี้ ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 7N-10L ที่ค่า $M = 4$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.23 สมมติที่สอง เมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC โครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT ต้องการเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนเท่ากับ 22 25 และ 43 ตามลำดับ เมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR โครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT ต้องการเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนเท่ากับ 36 36 และ 44 ตามลำดับ เมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR โครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT ต้องการเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนเท่ากับ 32 39 และ 44 ตามลำดับ



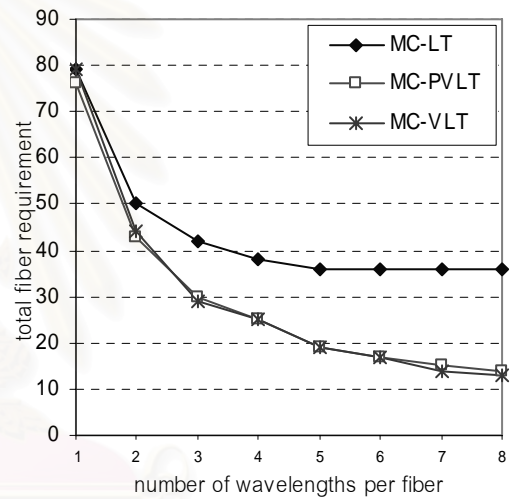
(ก)



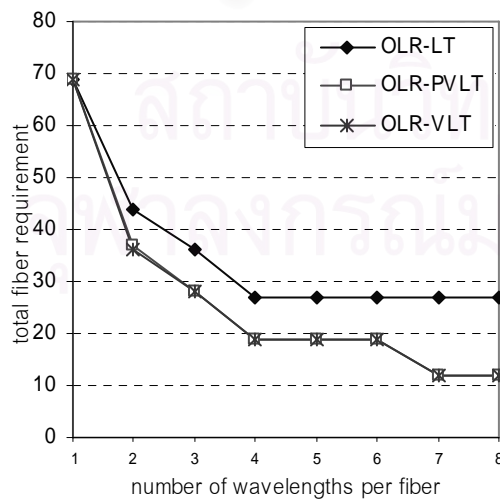
(ข)



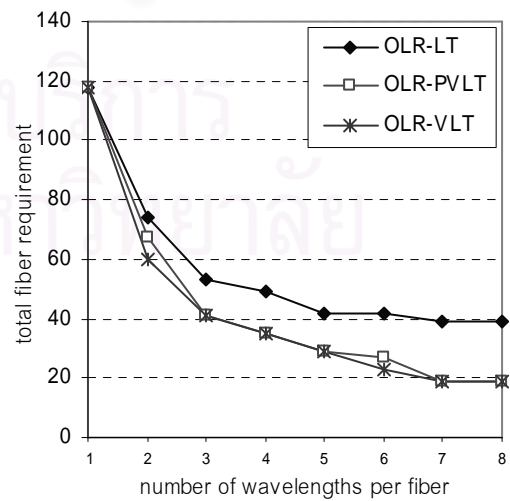
(ค)



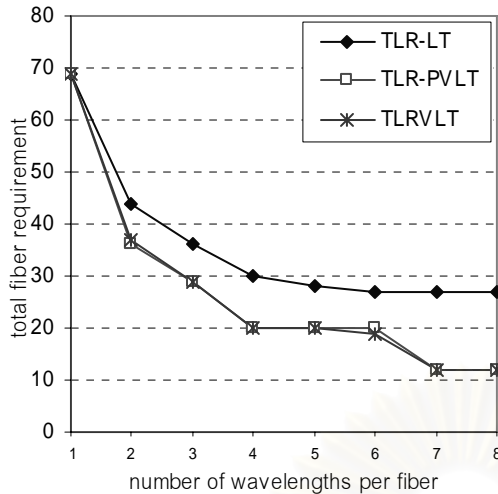
(ด)



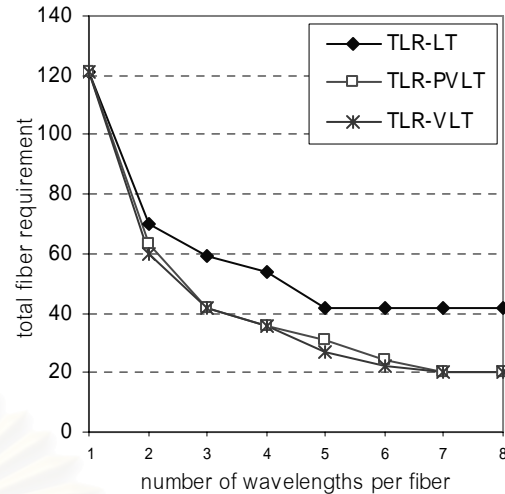
(จ)



(ฉ)



(ข)



(ข)

รูปที่ 4.23 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิก โหนดต้นทางร่วม (ก) และ (ข) โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ด้วยวิธี เชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง (ค) และ (ง) โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L แก้ไขปัญหานี้ด้วยวิธี เชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธี MC (จ) และ (ฉ) โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L แก้ไขปัญหานี้ด้วยวิธี เชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธี OLR (ช) และ (ซ) โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L แก้ไขปัญหานี้ด้วยวิธีเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธี TLR

4.3.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่แต่ละวิธีการ จัดสรรเส้นทางใหม่ต้องการ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลเฉลยระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR สามารถแยกพิจารณาตามลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายได้ดังนี้

4.3.3.1 กรณีโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

พิจารณาเปรียบเทียบผลเฉลยระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ในโครงข่าย 5N-7L ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตรในรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.16 ใน ข้อย่อย (ข) พบว่า วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงน้อยกว่าวิธี OLR และ TLR ไม่ว่าโครงข่ายนั้นจะเป็นประเภท VLT PVLT หรือ LT สาเหตุที่วิธีการจัดสรร เส้นทางใหม่แบบ MC เป็นวิธีที่ต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงน้อยที่สุด เนื่องจาก เมื่อเกิดความ ขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขึ้นในโครงข่าย ทุกมัลติคาสต์เซสชันจะถูกจัดเส้นทางและกำหนดความ ยาวคลื่นใหม่ โดยไม่สนใจว่าข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องจะรองรับทราฟฟิกอยู่หรือไม่ ทำให้ วิธีนี้มีความยืดหยุ่นในการจัดเส้นทางใหม่ให้กับโครงข่ายมากกว่าวิธี OLR และ TLR ที่การจัด

เส้นทางและความยาวคลื่นจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อสายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องรองรับทราฟฟิกเท่านั้น ดังนั้น วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC จึงต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงน้อยกว่าวิธี OLR และ TLR

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลยวิธี OLR และ TLR จะพบว่า สำหรับโครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกแบบโนดต้นทางร่วม ไม่ว่าจะ เป็นโครงข่ายประเภท VLT PVLT หรือ LT วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR จะให้ผลเฉลยเท่ากับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ในทุกค่าของ M แต่สำหรับโครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกแบบโนดต้นทางแยก จะพบว่า เกือบทุกค่า M วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR จะให้ผลเฉลยที่เท่ากับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR จะมีเพียงบางค่าของ M เท่านั้นที่ผลเฉลยทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน กล่าวคือ วิธี OLR ต้องการเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนที่มากกว่าวิธี TLR ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 5N-7L ประเภท LT ที่ $M = 2$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.16 (ข) วิธี TLR ต้องการเส้นใยนำแสงจำนวน 50 เส้น ส่วนวิธี OLR ต้องการเส้นใยนำแสงจำนวน 52 เส้น เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร จะทำให้วงแหวนที่ถูกเลือกสำหรับแก้ไขปัญหาหนึ่งสายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง ที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR สามารถใช้งานความจุที่มีอยู่ตั้งนั้น จากผลการเปรียบเทียบทั้งสามวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จึงสามารถสรุปได้ว่า สำหรับโครงข่าย 5N-7L ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร เส้นใยนำแสงที่ต้องการเมื่อโครงข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC จะมีจำนวนน้อยที่สุด ส่วนวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR และ OLR จะต้องการเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก

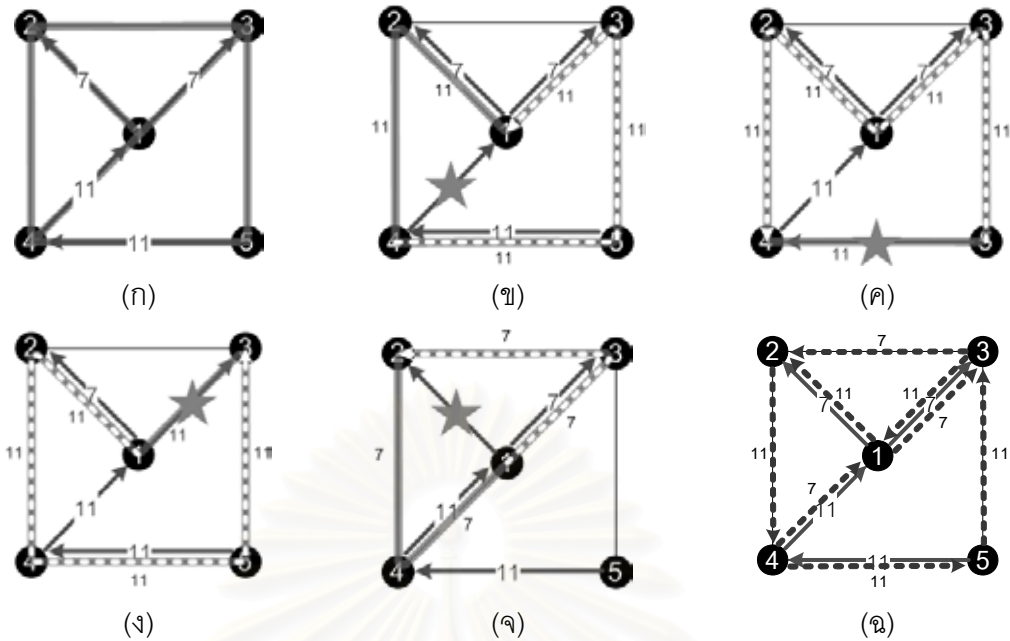
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลเฉลยระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ในโครงข่าย 7N-10L ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตรในรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.22 ซ้อย่อย (ข) จะพบว่า วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงน้อยกว่าวิธี OLR และ TLR ไม่ว่าจะโครงข่ายนั้นจะเป็นประเภท VLT PVLT หรือ LT และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลยวิธี OLR และ TLR จะพบว่า ไม่ว่าจะ เป็นโครงข่ายประเภท VLT PVLT หรือ LT ที่รองรับทราฟฟิกแบบโนดต้นทางร่วม หรือแบบโนดต้นทางแยก วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR จะให้ผลเฉลยมากกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ที่ส่วนใหญ่ของค่า M จะมีเพียงบางค่าของ M เท่านั้นที่ผลเฉลยทั้งสองมีเท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 7N-10L ประเภท LT ที่รองรับทราฟฟิกแบบโนดต้นทางแยก ที่ค่า $M = 1$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.22 (ข) วิธี TLR ต้องการเส้นใยนำแสงจำนวน 108 เส้น ส่วนวิธี OLR ต้องการเส้นใยนำแสงจำนวน 122 เส้น ดังนั้น จากผลการเปรียบเทียบทั้งสามวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จึงสามารถสรุปได้ว่า สำหรับโครงข่าย 7N-10L ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC เป็นวิธีการ

จัดสรรเส้นทางใหม่ที่ทำให้ต้นทุนต่ำสุด วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ต้องการต้นทุนเพิ่มขึ้นเป็นอันดับสอง ส่วนวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ต้องการต้นทุนสูงสุดคือ วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ OLR

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวไปข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า สำหรับโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC เป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ต้องการเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนต่ำที่สุด ถัดมาได้แก่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ส่วนวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงสูงสุดคือ วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ OLR แต่อย่างไรก็ตาม หากโครงข่ายที่พิจารณาเป็นโครงข่ายขนาดเล็ก วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR จะให้ผลเฉลยที่เท่ากับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR

4.3.3.2 กรณีโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร

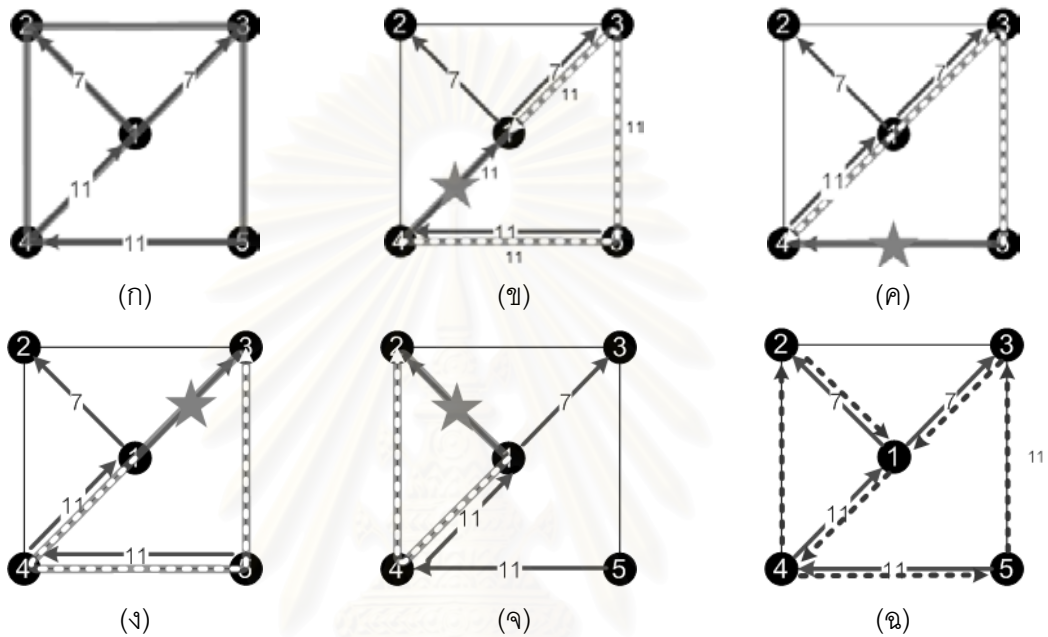
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลเฉลยระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ในโครงข่าย 5N-7L ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรในรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.16 ในข้อย่อย (ก) พบว่า วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงน้อยกว่าวิธี OLR และ TLR ไม่ว่าจะโครงข่ายนั้นจะเป็นประเภท VLT PVLТ หรือ LT ซึ่งข้อสรุปนี้จะเหมือนกับกรณีโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลยวิธี OLR และ TLR จะพบว่า สำหรับกรณีโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรที่บางค่าของ M จะเกิดเหตุการณ์ที่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR มีเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนที่น้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT ที่รองรับทราฟฟิกแบบโหนดต้นทางร่วม และ $M = 32$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) วิธี TLR ต้องการเส้นใยนำแสงจำนวน 10 เส้น ส่วนวิธี OLR ต้องการเส้นใยนำแสงจำนวน 9 เส้น ซึ่งผลที่ได้ถือว่ามีตรงข้ามสมมติฐานที่ตั้งไว้ในตอนแรกที่ว่า วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR จะต้องการเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนที่น้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR โดยปัจจัยที่ทำให้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ต้องการเส้นใยนำแสงน้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR เนื่องจาก วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR สามารถรวมช่องสัญญาณสำรองและช่องสัญญาณทำงานไว้ในเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกันได้มากกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR เพื่อให้เข้าใจชัดเจนยิ่งขึ้น จะอธิบายโดยใช้รูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 ลักษณะการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายบนโครงข่าย 5N-7L ที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR

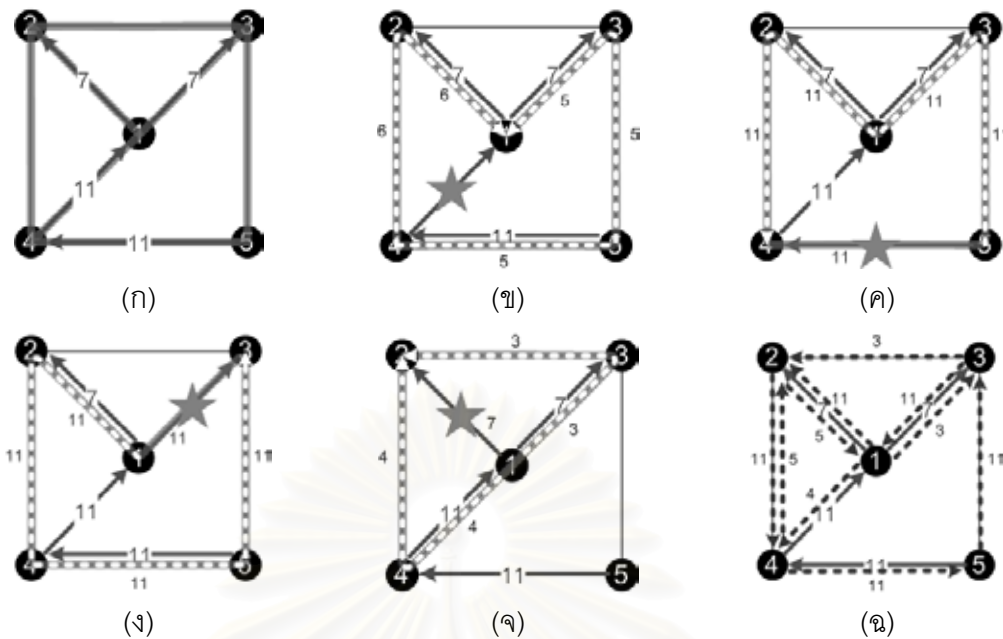
รูปที่ 4.24 แสดงลักษณะการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายบนโครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT ที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ที่ค่า $M = 32$ โดยเส้นลูกศรที่บดดำแทนช่องสัญญาณทำงานในสภาวะปกติ เส้นลูกศรประสีขาวแทนวิถีบูรณะเมื่อเกิดเหตุการณ์หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง รูปที่ 4.24 (ก) แสดงจำนวนช่องสัญญาณที่รองรับทราฟฟิกในสภาวะโครงข่ายไม่มีความขัดข้องเกิดขึ้น ซึ่งจะพบว่า มีข่ายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกจำนวน 4 ข่ายเชื่อมโยง เมื่อเกิดเหตุการณ์ข่ายเชื่อมโยง 1-3 ได้รับความขัดข้องดังรูปที่ 4.24 (ข) ทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจำนวน 11 ช่องสัญญาณจะถูกเปลี่ยนไปใช้วิถีบูรณะที่อยู่บนวงแหวนที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งก็คือวงแหวนที่ผ่านข่ายเชื่อมโยง 4-5 5-3 3-1 1-2 และ 2-4 และวงแหวนวงเดียวกันนี้ สามารถใช้เป็นวงแหวนสำหรับแก้ไขปัญหาข่ายเชื่อมโยง 5-4 และ 1-3 ได้รับความขัดข้องด้วย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.24 (ค) และ (ง) แต่เมื่อข่ายเชื่อมโยง 1-2 ได้รับความขัดข้องดังรูปที่ 4.24 (จ) วงแหวนที่ใช้แก้ไขปัญหาจะเป็นวงแหวนที่ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1-3 3-2 2-4 และ 4-1 และเมื่อพิจารณาเหตุการณ์ความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในทุกเหตุการณ์ที่เป็นไปได้แล้ว จะได้จำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการดังรูปที่ 4.24 (ฉ) โดยเส้นที่บดดำแทนช่องสัญญาณทำงาน และเส้นประสีดำแทนช่องสัญญาณสำรอง จะสังเกตว่า ข่ายเชื่อมโยง 1-2 และ 4-1 จะสามารถรวมช่องสัญญาณสำรองและช่องสัญญาณทำงานไว้ในเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกันได้ ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการมีค่าเท่ากับ 9 เส้น ส่วนรูปที่ 4.25 แสดงลักษณะการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายบนโครงข่าย 5N-7L ประเภท VLT

ที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ที่ค่า $M = 32$ ซึ่งเมื่อพิจารณาเหตุการณ์ความขัดข้องหนึ่งข้างเชื่อมโยงในทุกเหตุการณ์ที่เป็นไปได้แล้ว จะได้จำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการดังรูปที่ 4.25 (ก) ซึ่งจะพบว่า โครงข่ายไม่สามารถรวมช่องสัญญาณสำรองและช่องสัญญาณทำงานไว้ในเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกันได้เลย ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการมีค่ามากกว่าวิธี OLR คือเท่ากับ 10 เส้น



รูปที่ 4.25 ลักษณะการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข้างเชื่อมโยงได้รับความเสียหายบนโครงข่าย 5N-7L ที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR

ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่ทำให้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ต้องการเส้นใยนำแสงน้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR คือ หากวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR มีบางเหตุการณ์ที่ข้างเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องเป็นข้างเชื่อมโยงที่คร่อมวงแหวนดังรูปที่ 4.24 (ข) และความจุสำรองบนวงแหวนนี้ สามารถใช้แก้ไขปัญหาความขัดข้องที่ข้างเชื่อมโยงอื่น ๆ ได้ดังรูปที่ 4.24 (ค) และ (ง) จะทำให้ความจุสำรองที่โครงข่ายต้องการมีค่าน้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR



รูปที่ 4.26 ลักษณะการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ใช้วงแหวนแบบเดียวกัน

รูปที่ 4.26 แสดงลักษณะการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR แต่วงแหวนที่ใช้แก้ไขปัญหานั้นขยายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องจะเป็นวงแหวนลักษณะเดียวกับที่ใช้ในวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ซึ่งจะพบว่า หากวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR เลือกวงแหวนแบบเดียวกับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ซึ่งก็คือ วงแหวนที่ผ่านขยายเชื่อมโยง 4-5 5-3 3-1 1-2 และ 2-4 ในการแก้ไขปัญหาคความขัดข้องในโครงข่าย เมื่อเกิดความขัดข้องที่ขยายเชื่อมโยง 4-1 ซึ่งเป็นขยายเชื่อมโยงที่ครอบคลุมวงแหวน วิธีบูรณะเดิมที่กำหนดให้ในวิธี OLR จะไม่สามารถกำหนดให้กับวิธี TLR ได้ กล่าวคือ เมื่อขยายเชื่อมโยง 4-1 ได้รับความขัดข้องการเพื่อความจุสำรองบนวงแหวนดังกล่าวจะมีลักษณะ 4-5 5-3 3-1 4-2 และ 2-1 ดังรูปที่ 4.26 (ข) ซึ่งจะมีความจุสำรองบนขยายเชื่อมโยง 2 ข่ายคือ ขยายเชื่อมโยง 4-2 และ 2-1 ที่มีทิศสวนทางกับความจุสำรองที่ใช้สำหรับแก้ไขปัญหาคขยายเชื่อมโยง 5-4 และ 1-3 ได้รับความขัดข้องซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.26 (ค) และ (ง) ทำให้วิธี TLR ต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงเท่ากับ 12 เส้นดังรูปที่ 4.26 (ฉ) ซึ่งมีค่ามากกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ดังนั้น เพื่อให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการมีค่าลดลง วิธี TLR จึงต้องเลือกวงแหวนลักษณะอื่น ซึ่งสุดท้ายจะได้ลักษณะดังรูปที่ 4.25 จะสังเกตว่าวงแหวนที่ถูกเลือกสำหรับแก้ไขปัญหาคความขัดข้องหนึ่งขยายเชื่อมโยงจะเป็นวงแหวนที่ผ่านขยายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องทั้งหมด ซึ่งวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ก็สามารถเลือกวงแหวนลักษณะนี้ได้ แต่จะทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องการมีค่าสูงกว่าการเลือกวงแหวนลักษณะดังรูปที่ 4.24 แต่เนื่องจากวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ TLR ไม่สามารถเลือกวงแหวน

ลักษณะดังรูปที่ 4.24 ได้ จึงจำเป็นต้องเลือกวงแหวนลักษณะดังรูปที่ 4.25 แทน ส่งผลให้ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโครงข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ TLR มีค่าสูงกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ OLR

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลเฉลยระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ในโครงข่าย 7N-10L ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรในรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.22 ในข้อย่อย (ก) พบว่า วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงน้อยกว่าวิธี OLR และ TLR ไม่ว่าจะโครงข่ายนั้นจะเป็นประเภท VLT PVLТ หรือ LT ซึ่งข้อสรุปนี้จะเหมือนกับกรณีโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลยวิธี OLR และ TLR จะพบว่า สำหรับกรณีโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรที่บางค่าของ M จะเกิดเหตุการณ์ที่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR มีเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนที่น้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 7N-10L ประเภท LT ที่มีทราฟฟิกแบบโหนดต้นทางร่วม และ $M = 4$ ในตารางที่ 4.7 (ก) วิธี TLR ต้องการเส้นใยนำแสงจำนวน 59 เส้น ส่วนวิธี OLR ต้องการเส้นใยนำแสงจำนวน 53 เส้น ซึ่งสาเหตุที่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR มีจำนวนเส้นใยนำแสงน้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับกรณีโครงข่าย 5N-7L ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า สำหรับโครงข่าย 7N-10L ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC เป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ให้ต้นทุนต่ำสุด ส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR และ OLR จะขึ้นอยู่กับลักษณะทราฟฟิกในสภาวะปกติ แต่โดยส่วนใหญ่แล้ว วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR จะมีจำนวนเส้นใยนำแสงเพิ่มขึ้นเป็นอันดับสอง และวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR จะมีจำนวนเส้นใยนำแสงมากที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวไปข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า สำหรับโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC เป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ให้ต้นทุนต่ำสุด วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ต้องการต้นทุนเพิ่มขึ้นเป็นอันดับสอง ส่วนวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ต้องการต้นทุนสูงสุดคือ วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ OLR ส่วนกรณีโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร เส้นใยนำแสงที่ต้องการเมื่อโครงข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC จะมีจำนวนน้อยที่สุด เช่นเดียวกับในกรณีโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร ถัดมาได้แก่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR และ OLR ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR และ OLR จะขึ้นอยู่กับลักษณะของทราฟฟิกในสภาวะปกติ และ

ความสามารถของโครงข่ายในการรวมช่องสัญญาณทำงานและช่องสัญญาณสำรองไว้ในเส้นใยนำแสงเดียวกัน

4.4 ผลของลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ

ในส่วนที่จะพิจารณาต่อไป จะเป็นการเปรียบเทียบผลของลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายกับจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ โดยจะใช้โครงข่าย 5N-7L ในการวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 4.5 จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N-7L ต้องการเมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร และแบบไม่สมมาตร

(ก) โครงข่ายประเภท VLT

M	กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (VLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไข ปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมต่อ ขัดข้อง			NO (VLT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไข ปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมต่อ ขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	24	48	66	67	36	66	82	80
2	13	27	36	36	20	34	44	44
3	10	18	24	24	14	24	34	32
4	8	17	22	22	12	22	28	28
5	8	15	18	18	10	18	20	20
6	7	13	17	17	8	16	18	18
7	6	12	16	16	8	14	18	18
8	6	12	15	15	8	14	18	18
16	5	10	10	10	8	12	12	12
32	5	10	10	10	8	12	12	12
64	5	10	10	10	8	12	12	12
128	5	10	10	10	8	12	12	12

(ข) โครงข่ายประเภท PVLТ

M	กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (PVLТ)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไข ปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมต่อ ขัดข้อง			NO (PVLТ)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไข ปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมต่อ ขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	24	48	66	67	36	66	82	80
2	13	27	37	37	20	34	46	46
3	10	19	24	24	14	26	34	32
4	8	19	22	22	12	22	30	30
5	8	18	18	18	10	18	20	20
6	7	14	17	17	8	16	20	18
7	6	12	16	16	8	16	20	18
8	6	12	16	16	8	16	18	18
16	5	10	10	10	8	12	18	18
32	5	10	10	10	8	12	18	18
64	5	10	10	10	8	12	18	18
128	5	10	10	10	8	12	18	18

(ค) โครงข่ายประเภท LT

M	กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร				กรณีวงเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร			
	NO (LT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไข ปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมต่อ ขัดข้อง			NO (LT)	กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไข ปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมต่อ ขัดข้อง		
		MC	OLR	TLR		MC	OLR	TLR
1	24	48	66	67	36	66	82	80
2	18	35	43	46	22	42	52	50
3	15	29	35	38	18	30	38	38
4	15	27	30	32	18	28	34	34
5	15	27	30	30	18	28	34	34
6	15	27	30	30	18	28	34	34
7	15	27	30	30	18	28	34	34
8	15	27	30	30	18	28	34	34
16	15	27	30	30	18	28	34	34
32	15	27	30	30	18	28	34	34
64	15	27	30	30	18	28	34	34
128	15	27	30	30	18	28	34	34

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการเมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายแบบไม่สมมาตรและแบบสมมาตรในตารางที่ 4.5 (ก) ถึง (ค) จะพบว่า การออกแบบโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรจะให้ผลเฉลี่ยที่ต่ำกว่าหรือเทียบเท่ากับการออกแบบโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตรในทุก ๆ ประเภทของโครงข่าย และทุก ๆ ประเภทของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ ยกตัวอย่างเช่น กรณีโครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงเป็นแบบสมมาตรต้องการจะมีค่ามากกว่าจำนวนเส้นใยนำแสงในโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร 14-60% 14-60% และ 20-50% ตามลำดับ กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธี MC จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงเป็นแบบสมมาตรต้องการจะมีค่ามากกว่าจำนวนเส้นใยนำแสงในโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร 17-38% 0-38% และ 4-38% ตามลำดับ กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธี OLR จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงเป็นแบบสมมาตรต้องการจะมีค่ามากกว่าจำนวนเส้นใยนำแสงในโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร 6-42% 11-80% และ 9-24% ตามลำดับ และกรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องด้วยวิธี TLR จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงเป็นแบบสมมาตรต้องการจะมีค่ามากกว่าจำนวนเส้นใยนำแสงในโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร 6-33% 6-80% และ 0-19% ตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากในทางปฏิบัติ ทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงเดียวกันในทิศทางสวนทางกัน อาจจะมีปริมาณไม่เท่ากัน หากในโครงข่ายมีการกำหนดให้ลักษณะการวางเส้นใยนำแสงเป็นแบบสมมาตร นั่นคือ จำนวนเส้นใยนำแสงที่วางในแต่ละทิศทางมีค่าเท่ากันคือ เท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่วางในทิศทางที่รองรับทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้นที่มากที่สุด ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการมีจำนวนมากเกินความต้องการ ในทางตรงกันข้าม หากในโครงข่ายมีการกำหนดให้ลักษณะการวางเส้นใยนำแสงเป็นแบบไม่สมมาตร จำนวนเส้นใยนำแสงที่วางในแต่ละทิศทางจะมีค่าสอดคล้องกับปริมาณทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้นจริง ข่ายเชื่อมโยงในทิศทางที่รองรับทราฟฟิกที่มีปริมาณมากกว่าจะมีจำนวนเส้นใยนำแสงมากกว่าข่ายเชื่อมโยงในทิศทางที่รองรับทราฟฟิกที่มีปริมาณน้อยกว่า ส่งผลให้จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรมีน้อยกว่าโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งคือ จำนวน

เส้นใยนำแสงของโครงข่ายที่มีการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตรจะมีค่ามากกว่าโครงข่ายที่มีการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรน้อยกว่า 100% แสดงให้เห็นว่า การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นในโครงข่ายทั้งสองประเภทจะมีลักษณะแตกต่างกันเพื่อให้ได้ต้นทุนของโครงข่ายที่ต่ำที่สุด เพราะหากโครงข่ายทั้งสองประเภทมีการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายที่เหมือนกันแล้ว ต้นทุนของโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตรจะมีค่ามากกว่าโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรได้สูงสุดถึง 100% ขึ้นอยู่กับลักษณะของทราฟฟิกในโครงข่าย เพราะฉะนั้น การเปลี่ยนลักษณะของโครงข่ายจากโครงข่ายที่มีการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรไปเป็นโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร ควรจะมีการจัดเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายใหม่ เพื่อให้ได้โครงข่ายที่มีต้นทุนต่ำที่สุด

4.5 ผลของจำนวนวงแหวนในวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และ TLR ที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ

จากการแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดเจนโดยใช้วิธีจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และ TLR ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งเป็นวิธีที่กำหนดให้วิถึบูรณะอยู่บนวงแหวนที่กำหนดไว้ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของจำนวนวงแหวนที่ใช้ในการแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดเจนที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ โดยจะใช้โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ประเภท PVLT ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร และทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นแบบโนดต้นทางแยกในการวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 4.6 จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ที่ใช้วงแหวนจำนวน 1 วง 2 วง 3 วง และไม่จำกัดวง ตามลำดับ

(ก) โครงข่าย 5N-7L

จำนวนความยาว คลื่นสูงสุดที่ มัลติเพลกซ์ใน เส้นใยนำแสง (M)	จำนวนวงแหวน (วง)			
	1	2	3	ไม่จำกัด
1	66	62	62	62
2	37	35	35	35
3	24	23	23	23
4	22	20	20	20
5	18	17	17	17
6	17	15	15	15
7	16	15	15	15
8	16	15	15	15
16	10	10	10	10
32	10	10	10	10
64	10	10	10	10

(ข) โครงข่าย 7N-10L

จำนวนความยาว คลื่นสูงสุดที่ มัลติเพลกซ์ใน เส้นใยนำแสง (M)	จำนวนวงแหวน (วง)			
	1	2	3	ไม่จำกัด
1	111	102	101	101
2	67	58	57	57
3	48	41	41	41
4	36	34	34	34
5	24	23	23	23
6	24	23	23	23
7	21	19	19	19
8	17	17	17	17
16	15	15	15	15
32	15	15	15	15
64	15	15	15	15

ตารางที่ 4.7 จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ที่ใช้วงแหวนจำนวน 1 วง 2 วง 3 วง และไม่จำกัดวง ตามลำดับ

(ก) โครงข่าย 5N-7L

จำนวนความยาว คลื่นสูงสุดที่ มัลติเพลกซ์ใน เส้นใยนำแสง (M)	จำนวนวงแหวน (วง)			
	1	2	3	ไม่จำกัด
1	67	62	62	62
2	37	35	35	35
3	24	23	23	23
4	22	21	21	21
5	18	17	17	17
6	17	15	15	15
7	16	15	15	15
8	16	15	15	15
16	10	10	10	10
32	10	10	10	10
64	10	10	10	10

(ข) โครงข่าย 7N-10L

จำนวนความยาว คลื่นสูงสุดที่ มัลติเพลกซ์ใน เส้นใยนำแสง (M)	จำนวนวงแหวน (วง)			
	1	2	3	ไม่จำกัด
1	103	96	95	95
2	67	59	58	58
3	45	42	41	41
4	39	33	33	33
5	26	25	25	25
6	26	25	25	25
7	23	20	20	20
8	18	18	18	18
16	15	15	15	15
32	15	15	15	15
64	15	15	15	15

พิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเมื่อโครงข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.6 จะพบว่า จำนวนวงแหวนที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาความขัดข้องในโครงข่ายจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ โดยเมื่อเพิ่มจำนวนวงแหวนจาก 1 วงเป็น 2 วง จำนวนเส้นใยนำแสงกรณีโครงข่าย 5N-7L จะลดลง 0-12% และในกรณีโครงข่าย 7N-10L จะลดลง 0-15% เหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากจำนวนวงแหวนเป็นตัวสะท้อนถึงจำนวนวิธีบูรณะที่สามารถใช้แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง นั่นคือ หากกำหนดให้มีวงแหวนเพียงวงเดียวสำหรับป้องกันความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง นั่นหมายถึงมีวิธีบูรณะเพียงวิธีเดียวสำหรับรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้อง และจะถูกเปลี่ยนมาใช้วิธีบูรณะนี้ ความจุโดยรวมของวงแหวนก็ต้องเท่ากับผลคูณระหว่างจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ประกอบกันเป็นวงแหวนกับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องนั้น แต่หากกำหนดวงแหวนมากกว่าหนึ่งวงสำหรับป้องกันโครงข่าย เมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับผลกระทบก็สามารถเปลี่ยนไปใช้วิธีบูรณะบนวงแหวนได้มากกว่าหนึ่งวง ก็จะเป็นการกระจายทราฟฟิกไปบนวงแหวนหลาย ๆ วง ส่งผลให้โครงข่ายต้องการความจุสำรองโดยรวมน้อยลง สังเกตว่า สำหรับโครงข่าย 5N-7L จำนวนวงแหวนจะไม่มีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการที่ค่า $M \geq 16$ และการเพิ่มจำนวนวงแหวนมากกว่า 2 วงจะไม่ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการลดลงได้อีก นั่นคือ จำนวนวงแหวนที่เพียงพอสำหรับใช้ลดจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่าย 5N-7L ต้องการจะมีค่าเท่ากับ 2 วง และสำหรับโครงข่าย 7N-10L จำนวนวงแหวนจะไม่มีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการที่ค่า $M \geq 8$ และการเพิ่มจำนวนวงแหวนมากกว่า 3 วงจะไม่ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการลดลงได้อีก นั่นคือ จำนวนวงแหวนที่เพียงพอสำหรับใช้ลดจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่าย 7N-10L ต้องการจะมีค่าเท่ากับ 3 วง

พิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเมื่อโครงข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.7 จะพบว่า จำนวนวงแหวนที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาความขัดข้องในโครงข่ายจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ โดยเมื่อเพิ่มจำนวนวงแหวนจาก 1 วงเป็น 2 วง จำนวนเส้นใยนำแสงกรณีโครงข่าย 5N-7L จะลดลง 0-12% และในกรณีโครงข่าย 7N-10L จะลดลง 0-16% ซึ่งผลการวิเคราะห์จะเหมือนกับกรณีโครงข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR นั่นคือ หากกำหนดให้มีวงแหวนเพียงวงเดียวสำหรับป้องกันความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง นั่นหมายถึงมีวิธีบูรณะเพียงวิธีเดียวสำหรับรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องและจะถูกเปลี่ยนมาใช้วิธีบูรณะนี้ แต่หากกำหนดวงแหวนมากกว่าหนึ่งวงสำหรับป้องกันโครงข่าย เมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยง

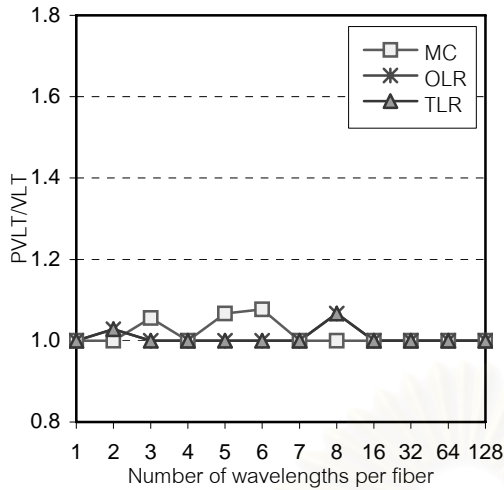
ที่ได้รับผลกระทบก็สามารถเปลี่ยนไปใช้วิธีบูรณะบนวงแหวนได้มากกว่าหนึ่งวง ส่งผลให้โครงข่ายต้องการความจุสำรองโดยรวมน้อยลง สังเกตว่า การเพิ่มจำนวนวงแหวนในโครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L มากกว่า 2 และ 3 วง ตามลำดับ จะไม่ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการลดลงได้อีก

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า จำนวนวงแหวนที่ใช้แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ นั่นคือ การเพิ่มจำนวนวงแหวนจะช่วยให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนวงแหวนจะสามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการลงได้ค่า ๆ หนึ่งเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 5N-7L จะใช้วงแหวนสำหรับแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องจำนวน 2 วงก็สามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการลงได้ถึงค่าต่ำที่สุดที่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จะทำได้ แต่สำหรับโครงข่ายขนาด 7N-10L ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะใช้วงแหวน 3 วงสำหรับลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงให้ถึงค่าต่ำสุด

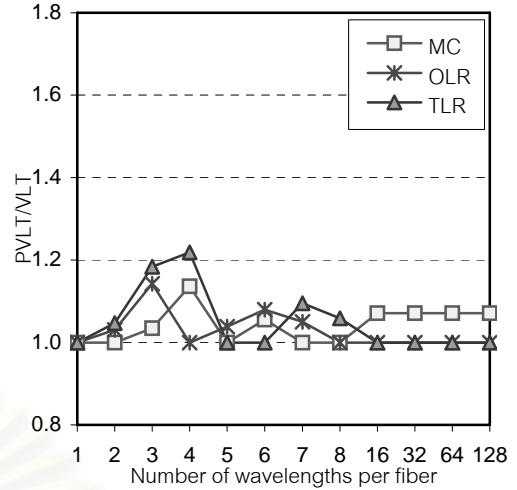
4.6 ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ

ในหัวข้อนี้ จะศึกษาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อต้นทุนของโครงข่ายทั้งกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้ และกรณีที่โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้ด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR โดยจะใช้โครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร และทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นแบบโนดต้นทางแยกในการวิเคราะห์ผล

จากการหาต้นทุนของโครงข่ายทั้งประเภท LT PVLT และ VLT โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 3 สามารถสรุปผลเฉลยบางส่วนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28 โดยรูปที่ 4.27 (ก) และ (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท PVLT ต่อโครงข่ายประเภท VLT กับค่า M ของโครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ตามลำดับ โดยแกนตั้งของกราฟคืออัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท PVLT ต่อโครงข่ายประเภท VLT ส่วนรูปที่ 4.28 (ก) และ (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท LT ต่อโครงข่ายประเภท VLT กับค่า M ของโครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ตามลำดับ โดยแกนตั้งของกราฟคืออัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท LT ต่อโครงข่ายประเภท VLT ส่วนแกนนอนของกราฟคือ ค่า M

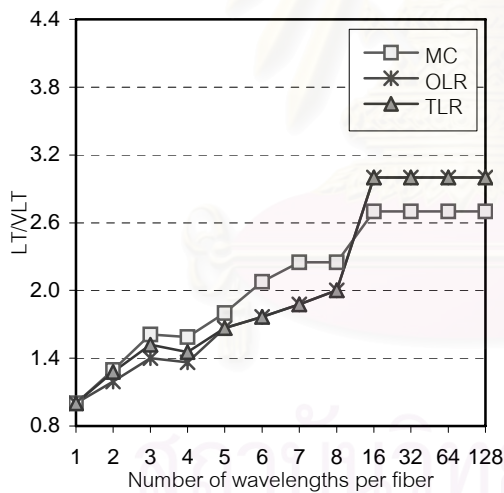


(ก) โครงข่าย 5N-7L

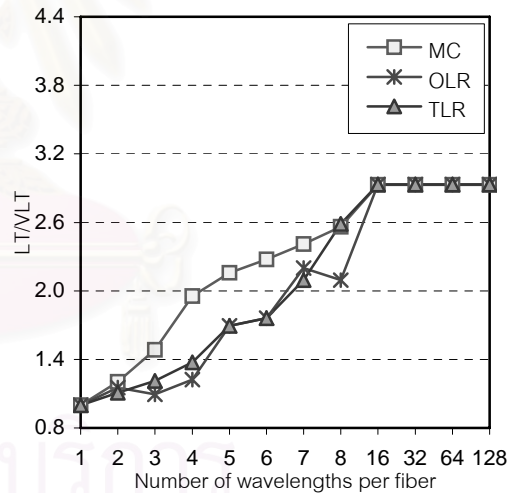


(ข) โครงข่าย 7N-10L

รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท PVLT ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท VLT (PVL/MLT ratio) กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M)



(ก) โครงข่าย 5N-7L



(ข) โครงข่าย 7N-10L

รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท LT ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท VLT (LT/MLT ratio) กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M)

พิจารณาอัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท PVLT ต่อโครงข่ายประเภท VLT กับค่า M ในรูปที่ 4.27 พบว่า อัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท PVLT ต่อโครงข่ายประเภท VLT จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 ในทุก ๆ ค่าของ M นั่นคือ โครงข่าย

ประเภท PVLT มักจะต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงมากกว่าหรือเท่ากับโครงข่ายประเภท VLT เนื่องจาก การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่ายประเภท PVLT จะมีข้อจำกัดกว่า ในโครงข่ายประเภท VLT คือ อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่ายประเภท PVLT จะถูกติดตั้งเฉพาะในจุดที่เป็นสมาชิกของกลุ่มมัลติคาสต์เท่านั้น แต่โครงข่ายประเภท VLT จะติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในทุกโหนดของโครงข่าย การกำหนดความยาวคลื่นในโครงข่ายประเภท PVLT จึงพิจารณาแยกแต่ละกึ่งเชิงแสง นั่นคือ ความยาวคลื่นที่ถูกกำหนดให้กับโครงข่ายต้นไม้มัลติคาสต์ในแต่ละกึ่งเชิงแสงจะสามารถมีค่าแตกต่างกันได้ แต่ความยาวคลื่นของโครงข่ายที่อยู่บนกึ่งเชิงแสงเดียวกันจะต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกัน ดังนั้น หากข่ายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกไม่มีความยาวคลื่นที่ต้องการวางอยู่ จึงจำเป็นต้องวางเส้นใยนำแสงเพิ่มให้กับข่ายเชื่อมโยงนั้น ส่งผลให้เส้นใยนำแสงในโครงข่ายประเภท PVLT มีค่าสูงกว่าโครงข่ายประเภท VLT อย่างไรก็ตาม จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายประเภท PVLT ต้องการจะมีค่ามากกว่าจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายประเภท VLT ต้องการเฉพาะที่บางค่า M เท่านั้น เพราะฉะนั้น สามารถสรุปได้ว่า หากเลือกค่า M อย่างเหมาะสมแล้ว สามารถใช้โครงข่ายประเภท PVLT แทนโครงข่ายประเภท VLT ได้โดยไม่ต้องวางเส้นใยนำแสงเพิ่มลงในโครงข่าย ยิ่งไปกว่านั้น การใช้โครงข่ายประเภท PVLT แทนโครงข่ายประเภท VLT จะเป็นการลดต้นทุนของโครงข่ายในแง่ของจำนวนอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ต้องติดตั้งลงในโครงข่ายด้วย

พิจารณาอัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท LT ต่อโครงข่ายประเภท VLT กับค่า M ในรูปที่ 4.28 พบว่า อัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท LT ต่อโครงข่ายประเภท VLT จะมีค่าเท่ากับ 1 ที่ค่า $M = 1$ และมีค่ามากกว่า 1 ที่ค่า $M > 1$ นั่นคือโครงข่ายประเภท LT ต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงที่ติดตั้งในโครงข่ายมากกว่าโครงข่ายประเภท VLT โดยจากรูปที่ 4.28 จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายประเภท LT จะมากกว่าโครงข่ายประเภท VLT 1-3 เท่า สำหรับโครงข่าย 5N-7L และ 1-2.93 เท่า สำหรับโครงข่าย 7N-10L สาเหตุที่จำนวนเส้นใยนำแสงในโครงข่ายประเภท LT มีค่ามากกว่าจำนวนเส้นใยนำแสงในโครงข่ายประเภท VLT เนื่องจาก ในกรณีของโครงข่ายประเภท LT จะกำหนดให้เส้นทางที่จัดสรรในโครงข่ายต้องมีค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดทั้งเส้นทางทั้งในสถานะโครงข่ายปกติ และสถานะที่เกิดความขัดข้องขึ้นในโครงข่าย ทำให้ในกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถหาค่าความยาวคลื่นที่ต้องการมาจัดสรรให้กับเส้นทางดังกล่าวได้ โครงข่ายจะต้องเพิ่มช่องสัญญาณโดยการวางเส้นใยนำแสงเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถรองรับเส้นทางที่มีปัญหาดังกล่าว การแก้ปัญหาด้วยวิธีดังกล่าวนี้ ส่งผลให้จำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท LT มีค่ามากกว่าโครงข่ายประเภท VLT เพราะฉะนั้น สามารถสรุปได้ว่า การใช้โครงข่ายประเภท LT แทนโครงข่ายประเภท VLT

จะต้องวางเส้นใยนำแสงเพิ่มลงในโครงข่าย แต่อย่างไรก็ตาม การใช้โครงข่ายประเภท LT แทนโครงข่ายประเภท VLT จะเป็นการลดต้นทุนของโครงข่ายในแง่ของจำนวนอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ต้องติดตั้งลงในโครงข่าย นั่นคือ โครงข่ายประเภท LT จะไม่มีต้นทุนของโครงข่ายในแง่ของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

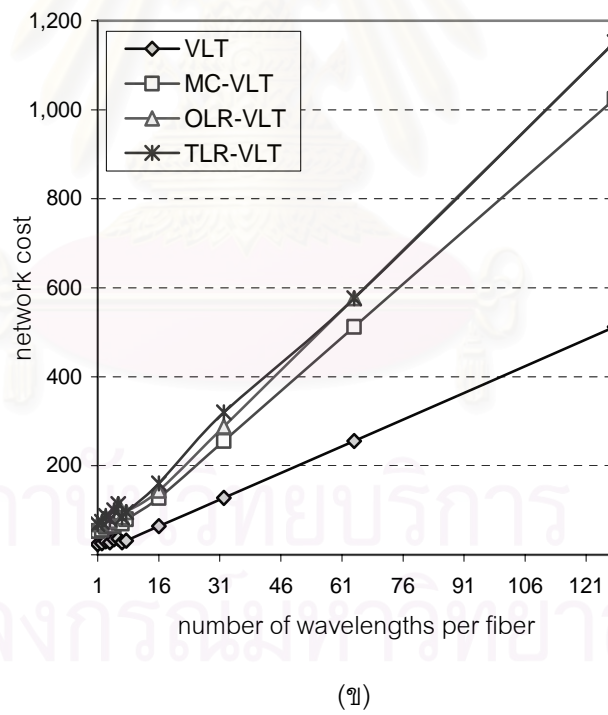
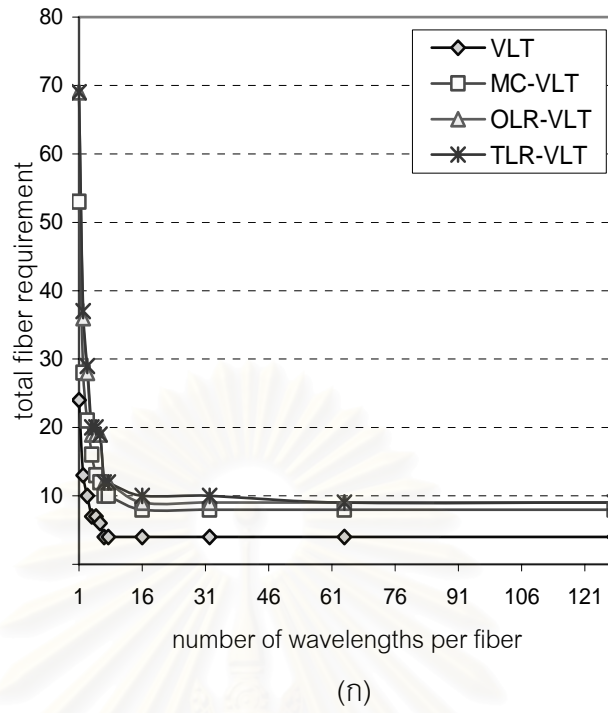
จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท PVLT ต่อโครงข่ายประเภท VLT กับค่า M และอัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายประเภท LT ต่อโครงข่ายประเภท VLT กับค่า M สามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่าย นั่นคือ อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะส่งผลให้จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของโครงข่ายมีค่าลดลง โดยสามารถเรียงลำดับจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการระหว่างวิธี LT PVLT และ VLT จากน้อยไปหามากได้ดังนี้ $VLT \leq PVLT \leq LT$ และสามารถเรียงลำดับจำนวนอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ต้องติดตั้งลงในโครงข่ายจากน้อยไปหามากได้ดังนี้ $LT \leq PVLT \leq VLT$

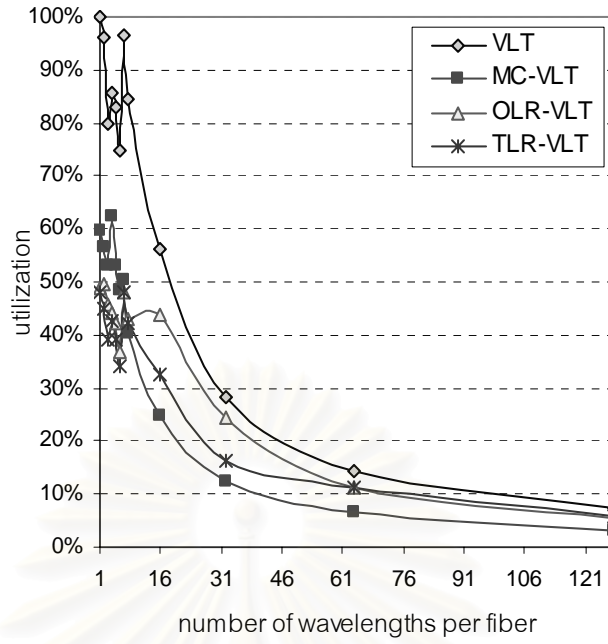
4.7 การเปรียบเทียบในเชิงต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพของโครงข่าย

ต้นทุนของโครงข่าย (Network Cost) ที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะนิยามให้มีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการกับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M)

$$\text{Network Cost} = \text{Total number of fiber requirement} \times M$$

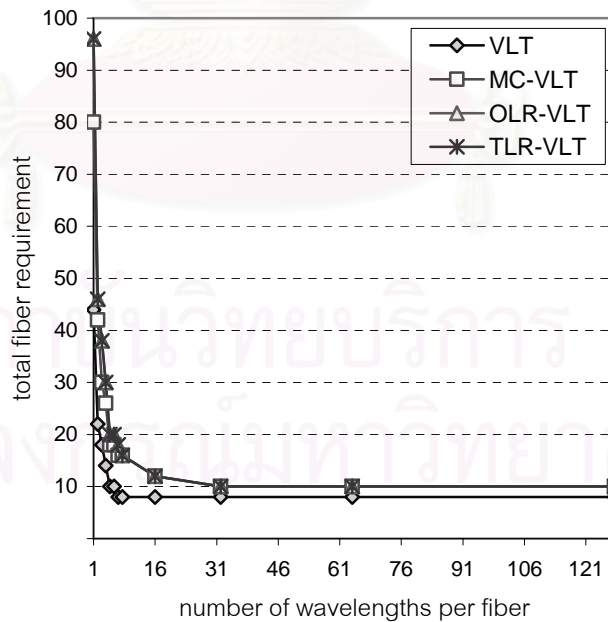
ส่วนประสิทธิภาพของโครงข่ายจะนิยามให้มีค่าเท่ากับอัตราส่วนร้อยละของช่องสัญญาณที่ถูกใช้งานต่อจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดในโครงข่าย โดยจะใช้โครงข่าย 5N-7L ในการวิเคราะห์ผล



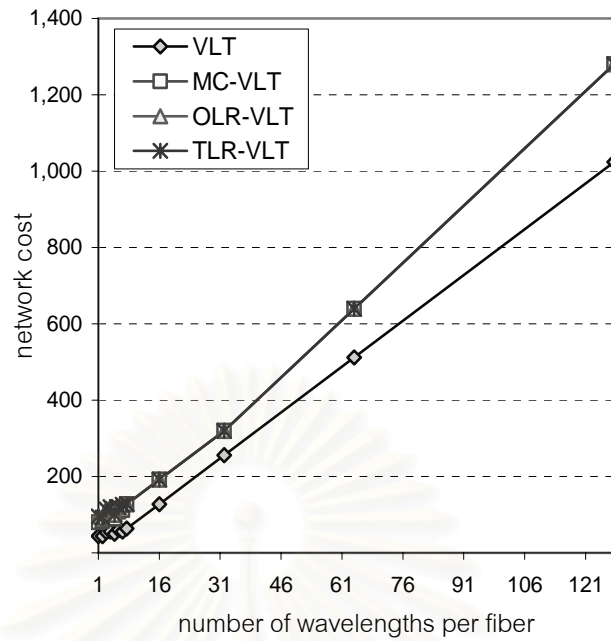


(ค)

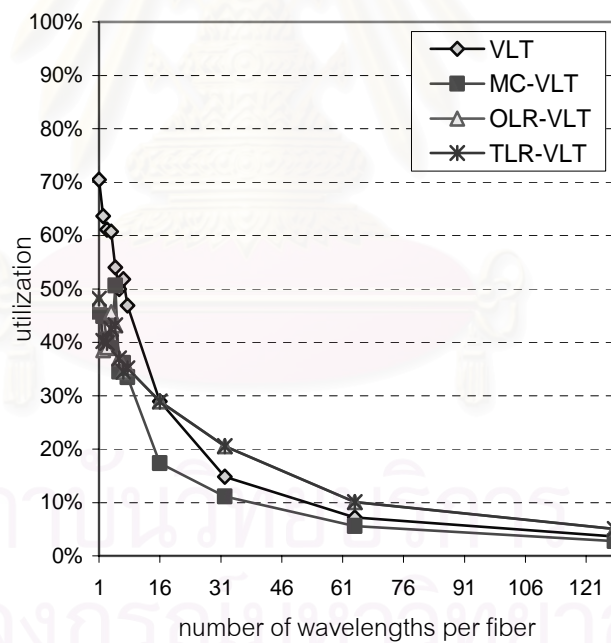
รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพของโครงข่าย เมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร (ก) จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ (ข) ต้นทุนของโครงข่าย และ (ค) ประสิทธิภาพของโครงข่าย



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพของโครงข่าย เมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร (ก) จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ (ข) ต้นทุนของโครงข่าย และ (ค) ประสิทธิภาพของโครงข่าย

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการกับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) ในรูปที่ 4.29 (ก) จะพบว่า จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการจะมีค่าลดลงเมื่อ M มีค่าสูงขึ้น โดยจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ค่า M มีค่าน้อย ๆ และจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อค่า M มีค่ามากพอ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อ M มีค่ามากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้ว พบว่าจำนวนเส้นใยนำแสงจะไม่สามารถลดลงได้อีก แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มค่า M ที่มากเกินไป ทำให้เหลือช่องสัญญาณในโครงข่ายเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายมีค่าลดลงเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงในรูปที่ 4.29 (ค) และจากรูปที่ 4.29 (ข) พบว่า ต้นทุนของโครงข่ายจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า M โดยการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC จะมีค่าต้นทุนของโครงข่ายต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งสามวิธี แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าต้นทุนดังกล่าวจะมีการตกลงเป็นระยะ เช่นที่ค่า $M = 5$ และเมื่อพิจารณาประกอบกับประสิทธิภาพของโครงข่ายในรูปที่ 4.29 (ค) พบว่ากรณีที่ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าตกลงที่ค่า M บางค่านั้น ประสิทธิภาพของโครงข่าย ณ จุดนั้นจะเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของโครงข่ายระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และ TLR สำหรับโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรดังรูปที่ 4.29 (ค) จะพบว่า ประสิทธิภาพของโครงข่ายของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR จะมีค่ามากกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ซึ่งผลที่ได้ถือได้ว่าไม่ตรงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ในตอนแรกที่ว่า วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR จะมีประสิทธิภาพของโครงข่ายมากกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ถึงแม้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR จะมีการใช้เส้นใยนำแสงไม่เต็มประสิทธิภาพเมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องเป็นข่ายเชื่อมโยงที่ครอบคลุมวงแหวนที่ใช้แก้ไขปัญหาความขัดข้องนั้น แต่เมื่อพิจารณาในทุก ๆ เหตุการณ์ความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงที่เป็นไปได้ จะพบว่า วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR สามารถใช้ความจุสำรองที่มีอยู่สำหรับแก้ไขเหตุการณ์ความขัดข้องที่ข่ายเชื่อมโยงได้มากกว่าหนึ่งเหตุการณ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายโดยรวมมีค่าดีขึ้น ในทางตรงกันข้าม สำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขึ้น โครงข่ายจะพยายามใช้ช่องสัญญาณในวงแหวนให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด นั่นคือ หากข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องเป็นข่ายเชื่อมโยงที่อยู่บนวงแหวนแล้ว วิกิบูรณะจะมี 1 วิธี และหากข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องเป็นข่ายเชื่อมโยงที่ครอบคลุมวงแหวนแล้ว วิกิบูรณะจะมี 2 วิธี แต่อย่างไรก็ตาม ความจุสำรองที่เหลือในโครงข่ายสำหรับแก้ไขเหตุการณ์ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งได้รับความขัดข้อง อาจจะไม่สามารถใช้แก้ไขเหตุการณ์อีกข่ายเชื่อมโยงหนึ่งได้รับความขัดข้องได้ ทั้งนี้ เพราะเหตุผลเดียวกับที่ได้อธิบายไว้ในปัจจัยที่ทำให้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ต้องการเส้นใยนำแสงน้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ

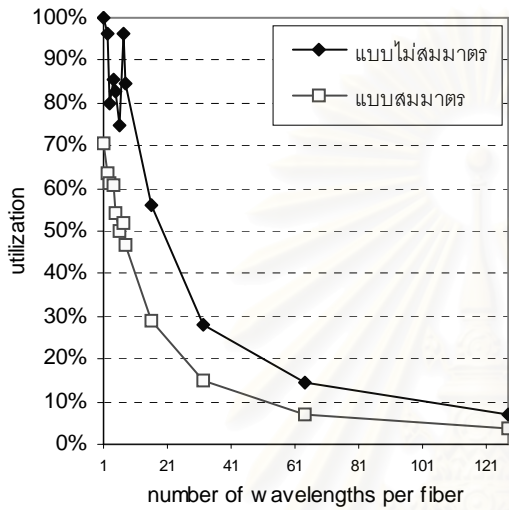
TLR จากเหตุผลดังกล่าว ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของโครงข่ายที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR มีค่าน้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของโครงข่ายระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR สำหรับโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตรดังรูปที่ 4.30 (ค) จะพบว่า ประสิทธิภาพของโครงข่ายของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งสามวิธีจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น การเลือกวิธีสำหรับใช้แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องทั้งสามวิธีจะให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายที่ใกล้เคียงกัน แต่จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการในทั้งสามวิธีจะแตกต่างกันดังรูปที่ 4.30 (ก)

4.7.1 ผลของลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายที่มีต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย

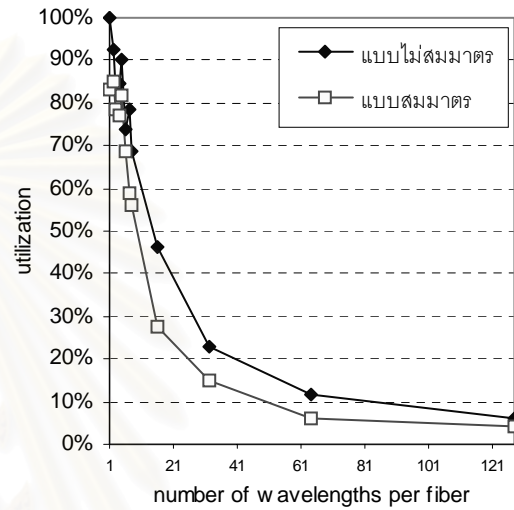
เมื่อพิจารณาด้านทุนของโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร และไม่สมมาตรจะได้ดังรูปที่ 4.31 โดยรูปที่ 4.31 สดมภ์ที่หนึ่ง และสดมภ์ที่สอง เป็นกราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกแบบโหนดต้นทางร่วม และแบบโหนดต้นทางแยกตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า สำหรับกรณีโครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง ประสิทธิภาพของโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรจะมีค่ามากกว่าโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงข่ายเดียวกันในทิศทางสวนทางกันอาจจะมีปริมาณไม่เท่ากัน หากในโครงข่ายมีการกำหนดให้ลักษณะการวางเส้นใยนำแสงเป็นแบบสมมาตร นั่นคือ จำนวนเส้นใยนำแสงที่วางในแต่ละทิศทางมีค่าเท่ากันคือ เท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่วางในทิศทางที่รองรับทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้นที่มากที่สุด ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการมีจำนวนมากเกินความต้องการ ส่งผลให้ในโครงข่ายเหลือช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้งานเป็นจำนวนมาก ประสิทธิภาพของโครงข่ายก็จะมีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้าม หากในโครงข่ายมีการกำหนดให้ลักษณะการวางเส้นใยนำแสงเป็นแบบไม่สมมาตร จำนวนเส้นใยนำแสงที่วางในแต่ละทิศทางจะมีค่าสอดคล้องกับปริมาณทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้นจริง ข่ายเชื่อมโยงในทิศทางที่รองรับทราฟฟิกที่มีปริมาณมากกว่าจะมีจำนวนเส้นใยนำแสงมากกว่าข่ายเชื่อมโยงในทิศทางที่รองรับทราฟฟิกที่มีปริมาณน้อยกว่า ส่งผลให้ในโครงข่ายเหลือช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้งานเป็นจำนวนน้อย ประสิทธิภาพการของโครงข่ายก็จะมีค่าสูง

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของโครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องจะพบว่า ประสิทธิภาพของโครงข่ายที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.31 (ค) และ (ง) กรณีโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรจะมีค่าสูงกว่าเมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตรในทุกค่าของ M เหตุที่เป็นเช่นนี้

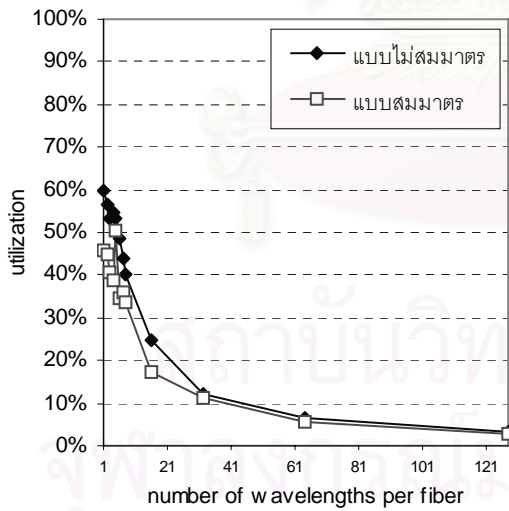
เนื่องจาก วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC มีลักษณะการจัดเส้นทางและความยาวคลื่นสำหรับ
 วัตถุประสงค์คล้ายกับการจัดเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข้าง
 เชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง ทำให้ลักษณะของกราฟประสิทธิภาพการใช้งานเส้นใยนำแสงสำหรับ
 วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC มีแนวโน้มคล้ายกับกรณีโครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่ง
 ข้างเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง



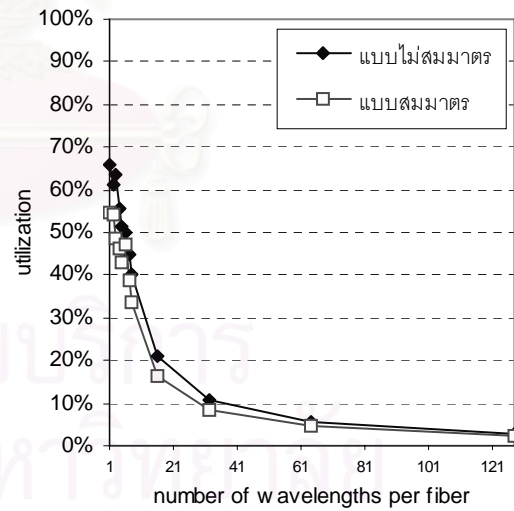
(ก)



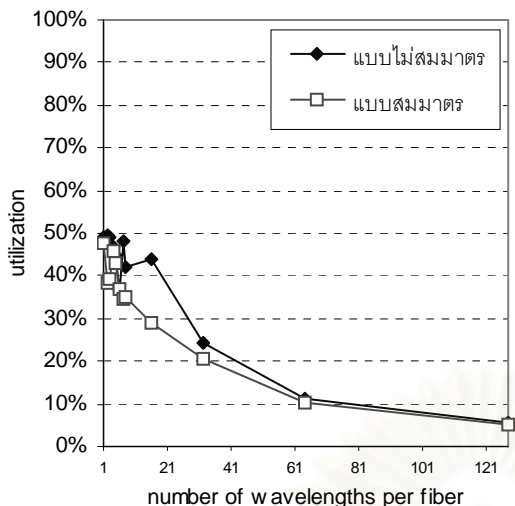
(ข)



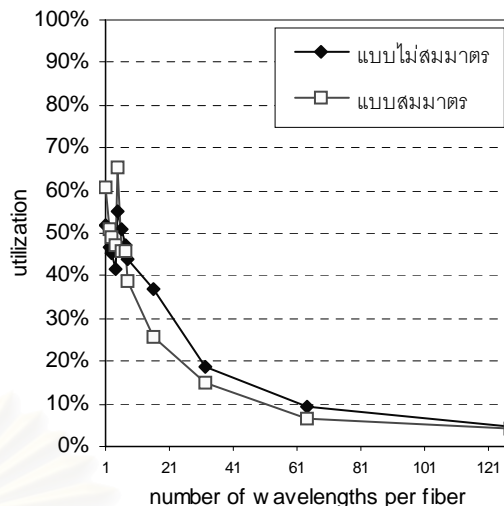
(ค)



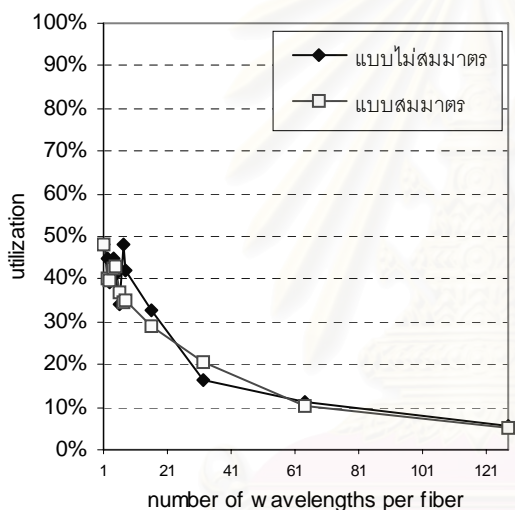
(ง)



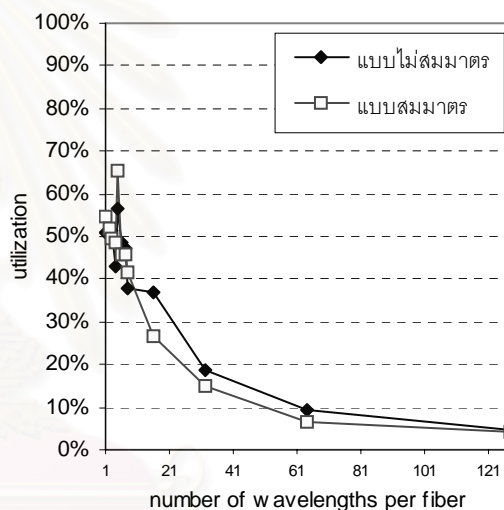
(จ)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร และไม่สมมาตร (ก) และ (ข) โครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นแบบโนดต้นทางร่วม และโนดต้นทางแยก ตามลำดับ (ค) (จ) และ (ข) โครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกเป็นแบบโนดต้นทางร่วม และมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ตามลำดับ (ง) (ข) และ (ข) โครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกเป็นแบบโนดต้นทางแยก และมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ตามลำดับ

สำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และ TLR ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.31 (จ) ถึง (ข) จะพบว่า เกือบทุกค่า M ประสิทธิภาพการใช้งานเส้นใยนำแสงในโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรจะมีค่ามากกว่าเมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบ

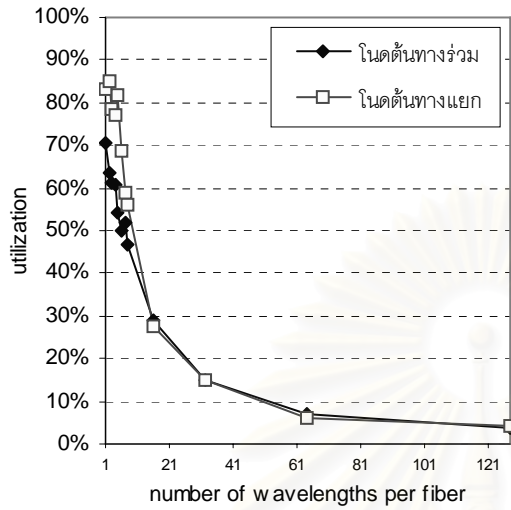
สมมาตร จะมีเพียงบางค่าของ M เท่านั้น ที่ประสิทธิภาพการใช้งานเส้นใยนำแสงในโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ระยะเวลาโดยเฉลี่ยที่ใช้ส่งทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตรจะมีค่ามากกว่าโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้จ่ายของสัญญาของโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตรมีค่ามากกว่าโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร

กล่าวโดยสรุป สำหรับกรณีโครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง และกรณีโครงข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ประสิทธิภาพของโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรจะมีค่ามากกว่าโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร แต่สำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR และ TLR จะพบว่า ประสิทธิภาพการใช้งานเส้นใยนำแสงในโครงข่ายจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาโดยเฉลี่ยที่ใช้ส่งทราฟฟิกทั้งหมดในโครงข่าย

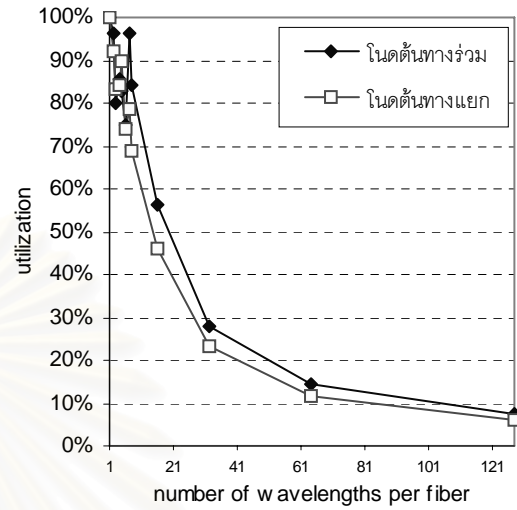
4.7.2 ผลของลักษณะของทราฟฟิกที่มีต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย

เมื่อเปรียบเทียบผลของลักษณะของทราฟฟิกในโครงข่ายที่มีต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตรซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.32 สดมภ์ที่หนึ่ง จะพบว่า ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีที่โครงข่ายรองรับทราฟฟิกแบบโหนดต้นทางแยกจะมีค่ามากกว่ากรณีที่โครงข่ายรองรับทราฟฟิกแบบโหนดต้นทางร่วม โดยผลต่างของประสิทธิภาพระหว่างทราฟฟิกทั้งสองประเภทในโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องจะมีค่ามากกว่าในโครงข่ายที่มีความสามารถในการแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง ทั้งนี้เนื่องจาก ลักษณะทิศทางของทราฟฟิกแบบโหนดต้นทางร่วมโดยรวมในสถานะโครงข่ายปกติจะมีทิศทางไปในทางเดียวกันคือ ออกจากโหนดต้นทางเดียวกัน ดังนั้น หากโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร จะทำให้เส้นใยนำแสงในทิศสวนทางกับทิศทางของทราฟฟิกส่วนใหญ่ในโครงข่ายถูกใช้งานน้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายของทราฟฟิกแบบโหนดต้นทางร่วมมีค่าน้อยกว่าทราฟฟิกแบบโหนดต้นทางแยก แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับโครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง ทิศทางของทราฟฟิกจะมีความหลากหลายมากขึ้น โครงข่ายอาจจะใช้ช่องสัญญาที่ไม่ถูกใช้งานข้างต้นเป็นวิธียุทธศาสตร์ ทำให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายของทราฟฟิกแบบโหนดต้นทางร่วมมีค่าใกล้เคียงกับทราฟฟิกแบบโหนดต้น

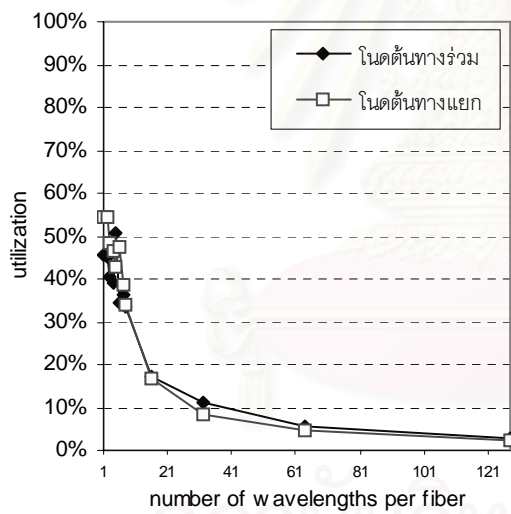
ทางแยกมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการลดลงของความแตกต่างของประสิทธิภาพของโครงข่าย ระหว่างทราฟฟิกแบบโหนดต้นทางร่วม และแบบโหนดต้นทางแยก



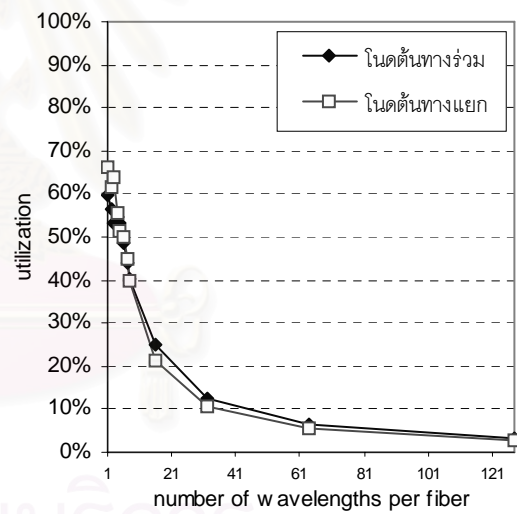
(ก)



(ข)

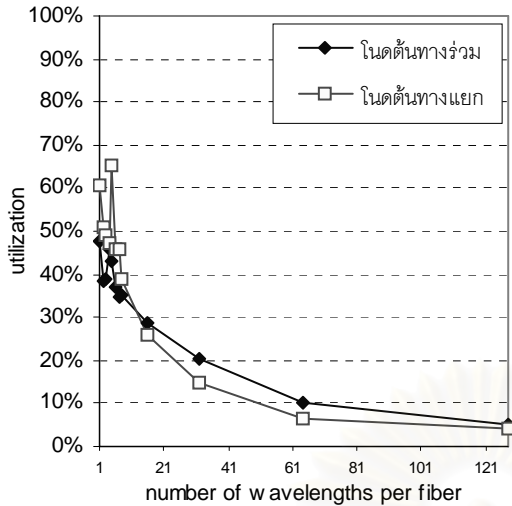


(ค)

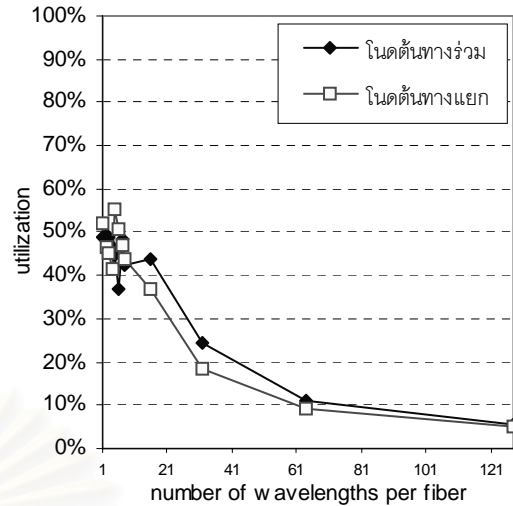


(ง)

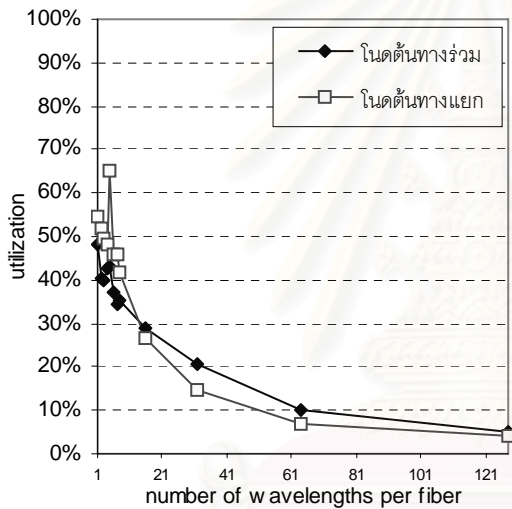
สงวนลิขสิทธิ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



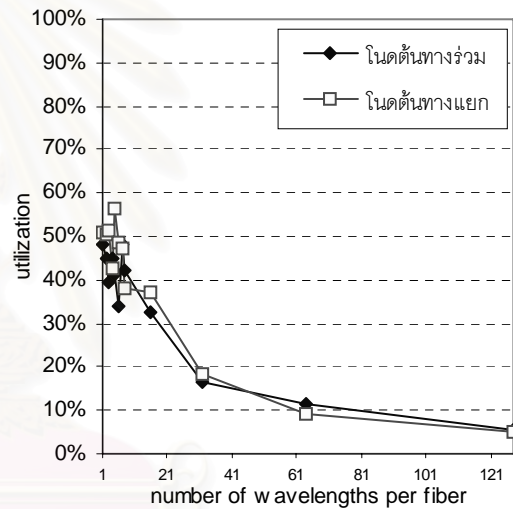
(จ)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบโนดต้นทางร่วม และโนดต้นทางแยก (ก) และ (ข) โครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร และไม่สมมาตร ตามลำดับ (ค) (จ) และ (ข) โครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร และมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ตามลำดับ (ง) (ด) และ (ข) โครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร และมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลของลักษณะของทราฟฟิกในโครงข่ายที่มีต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อลักษณะการวางเส้นใยนำแสงเป็นแบบไม่สมมาตรซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.32 สดมภ์ที่สอง ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีที่โครงข่ายรองรับทราฟฟิกแบบโนดต้นทางแยกและแบบโนดต้น

ทางร่วมจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจาก โครงข่ายมีการวางเส้นใยนำแสงตามปริมาณทราฟฟิก ที่มีอยู่จริง ทำให้ลักษณะของทราฟฟิกที่แตกต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย

กล่าวโดยสรุป สำหรับกรณีโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นแบบโนดต้นทางแยกจะมีค่ามากกว่าเมื่อ ทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นแบบโนดต้นทางร่วม และสำหรับกรณีโครงข่ายมีลักษณะการวาง เส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นแบบโนดต้น ทางแยกและแบบโนดต้นทางร่วมจะมีค่าใกล้เคียงกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ศึกษาการออกแบบโครงข่าย WDM ระบบหลายเส้นใยนำแสงเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ โดยจะเสนอวิธีการออกแบบโครงข่ายทั้งในกรณีที่โครงข่ายสามารถ และไม่สามารถแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง โดยในกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง จะเป็นการศึกษาการจัดเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ ส่วนในกรณีที่โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้นั้น จะเป็นการศึกษาการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลบหลีกข่ายเชื่อมโยงที่ขัดข้อง ซึ่งวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ได้ศึกษามีด้วยกัน 3 วิธีได้แก่ วิธีต้นทุนต่ำสุด (Minimal Cost Approach, MC) วิธีใช้วงแหวนทิศทางเดียว (One way Light Ring Approach, OLR) และวิธีใช้วงแหวนสองทิศทาง (Two way Light Ring Approach, TLR) ซึ่งทั้งสองกรณีจะมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบคือ พิจารณาหาต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่ ค่าจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ เพื่อให้ได้โครงข่ายที่สามารถรองรับทราฟฟิกทั้งหมดได้ รวมทั้งเปรียบเทียบแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ในด้านต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย และความซับซ้อนของแบบจำลอง ทั้งในกรณีทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ กรณีบางโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ และกรณีทุกโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่

การออกแบบโครงข่ายในวิทยานิพนธ์จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย โดยใช้ Integer linear programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลเฉลยที่ได้สามารถรับประกันได้ว่าเป็นผลเฉลยที่ดีที่สุด กล่าวคือ จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายจะมีค่าต่ำสุด การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาผลเฉลยของปัญหาในวิทยานิพนธ์จะใช้วิธี Optimized Spare Capacity Assignment ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งเป็นวิธีการหาความจุสำรองที่โครงข่ายต้องการ โดยในการหาผลเฉลยจะต้องมีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นที่เป็นวิถีทำงานของโครงข่ายมาให้

จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เสนอไว้เพื่อทดสอบหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง และโครงข่าย 7 โหนด 10 ข่ายเชื่อมโยงต้องการ สามารถสรุปผลการทดสอบในแง่ของความซับซ้อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งในที่นี้ได้แก่จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท VLT จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบจำลองของโครงข่ายประเภท PVLT และ LT ทั้งนี้ เนื่องมาจากจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรทั้งหมดที่ใช้สร้างแบบจำลองของโครงข่าย VLT ไม่ขึ้นอยู่กับค่าจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) ในทางตรงกันข้าม จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของโครงข่ายประเภท PVLT และ LT จะเพิ่มขึ้นตามค่า M ของเส้นใยนำแสง อีกทั้งโครงข่ายประเภท LT ยังต้องมีเงื่อนไขของการเลือกค่าความยาวคลื่นสำหรับแต่ละมัลติคาสต์เซสชันอีกด้วย เพราะฉะนั้น สามารถเรียงลำดับความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากน้อยไปหามากได้คือ $VLT \leq PVLT \leq LT$ และด้วยเหตุนี้เอง ทำให้เมื่อพิจารณาในเชิงของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (computational time) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย LT จึงใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยนานกว่าแบบจำลองของโครงข่าย PVLT และ VLT ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC OLR และ TLR สำหรับกรณีโครงข่ายประเภท VLT PVLT และ LT จะพบว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองในแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จะสามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ $MC \geq TLR \geq OLR$ สาเหตุที่การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC มีความซับซ้อนของแบบจำลองมากที่สุด เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC จะอนุญาตให้มัลติคาสต์เซสชันทั้งหมดภายในโครงข่ายสามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่เมื่อเกิดเหตุการณ์หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง โดยไม่พิจารณาว่ามัลติคาสต์เซสชันนั้นได้รับความกระทบจากข่ายเชื่อมโยงที่ขัดข้องหรือไม่ นั่นคือ เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขึ้นในโครงข่าย ทุกมัลติคาสต์เซสชันจะถูกจัดเส้นทางและความยาวคลื่นใหม่ ส่งผลให้แบบจำลองของ MC มีความซับซ้อนของแบบจำลองมากที่สุด ส่วนสาเหตุที่การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR มีความซับซ้อนของแบบจำลองมากกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR เนื่องจากจำนวนวิถึบูรณะของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR จะขึ้นอยู่กับลักษณะของข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้อง นั่นคือ หากวิถีทำงานอยู่บนวงแหวนที่ถูกเลือกเพื่อใช้แก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง จะได้วิถีบูรณะเพียงวิถีเดียว แต่หากวิถีทำงานอยู่คร่อมวงแหวน จะได้วิถีบูรณะสองวิถี ดังนั้น นอกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จะต้องมีเงื่อนไขในการเลือกวงแหวนแล้ว จะต้องต้องมีเงื่อนไขบังคับในส่วนของการพิจารณาเส้นทางที่ใช้เป็นวิถีบูรณะ

บนวงแหวนนั้นด้วย ซึ่งต่างจากวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OLR ที่จำนวนวิธีบูรณะจะมีเพียงวิธีเดียวไม่ว่าสายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องจะอยู่บนวงแหวนหรือक्रमวงแหวน ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี OLR มีเพียงเงื่อนไขในการเลือกวงแหวนเท่านั้น ส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ OLR มีความซับซ้อนของแบบจำลองน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการจากการจำลองปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะได้ว่า โครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหานี้สายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้จะต้องการเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนมากกว่าโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีทั้งในกรณีโครงข่าย VLT PVLT และ LT จะได้ว่า สำหรับโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC เป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ให้ต้นทุนต่ำสุด วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR ต้องการต้นทุนเพิ่มขึ้นเป็นอันดับสอง ส่วนวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ต้องการต้นทุนสูงสุดคือวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ OLR ส่วนกรณีโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตร เส้นใยนำแสงที่ต้องการเมื่อโครงข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC จะมีจำนวนน้อยที่สุด เช่นเดียวกับในกรณีโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร รองลงมาได้แก่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR และ OLR ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR และ OLR จะขึ้นอยู่กับลักษณะของทราฟฟิกในสภาวะปกติและความสามารถของโครงข่ายในการรวมช่องสัญญาณทำงานและช่องสัญญาณสำรองไว้ในเส้นใยนำแสงเดียวกัน ข้อสังเกตสำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TLR คือ ถึงแม้วิธี TLR จะให้ต้นทุนของโครงข่ายในแง่ของจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการน้อยกว่าวิธี OLR แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จะมีต้นทุนของโครงข่ายในแง่ของอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงเพิ่มขึ้นมาด้วย

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการเมื่อโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร จะพบว่าการออกแบบโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรจะให้ผลเฉลยที่ต่ำกว่าหรือเทียบเท่าการออกแบบโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตรในทุก ๆ ประเภทของโครงข่าย และทุก ๆ ประเภทของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก หากโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงเป็นแบบสมมาตร จำนวนเส้นใยนำแสงที่วางในแต่ละทิศทางจะมีค่าเท่ากับจำนวนเส้นใยนำแสงที่วางในทิศทางที่รองรับทราฟฟิกที่ผ่านสายเชื่อมโยงนั้นมากที่สุด ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการมีจำนวนมากเกิน

ความต้องการ ในทางตรงกันข้าม หากโครงข่ายมีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงเป็นแบบไม่สมมาตร จำนวนเส้นใยนำแสงที่วางในแต่ละทิศทางจะมีค่าสอดคล้องกับปริมาณทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้นจริง ข่ายเชื่อมโยงในทิศทางที่รองรับทราฟฟิกที่มีปริมาณมากกว่าจะมีจำนวนเส้นใยนำแสงมากกว่าข่ายเชื่อมโยงในทิศทางที่รองรับทราฟฟิกที่มีปริมาณน้อยกว่า ส่งผลให้จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบไม่สมมาตรมีน้อยกว่าโครงข่ายที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงแบบสมมาตร

นอกจากนี้ยังพบว่า จำนวนวงแหวนที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาความขัดข้องในโครงข่ายจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ เนื่องจากจำนวนวงแหวนเป็นตัวสะท้อนถึงจำนวนวิธีบูรณะที่สามารถใช้แก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง นั่นคือ หากกำหนดให้มีวงแหวนเพียงวงเดียวสำหรับป้องกันความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยง นั้นหมายถึงมีวิธีบูรณะเพียงวิธีเดียวสำหรับรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้อง และจะถูกเปลี่ยนมาใช้วิธีบูรณะนี้ ความจุโดยรวมของวงแหวนก็จะต้องเท่ากับผลคูณระหว่างจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ประกอบกันเป็นวงแหวนกับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความขัดข้องนั้น แต่หากกำหนดวงแหวนมากกว่าหนึ่งวงสำหรับป้องกันโครงข่าย เมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับผลกระทบก็สามารถเปลี่ยนไปใช้วิธีบูรณะบนวงแหวนได้มากกว่าหนึ่งวง ก็จะเป็นการกระจายทราฟฟิกไปบนวงแหวนหลาย ๆ วง ส่งผลให้โครงข่ายต้องการความจุสำรองโดยรวมน้อยลง

จากการศึกษาอิทธิพลของจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) ที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ สามารถสรุปผลการศึกษานี้ได้ว่า เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีของโครงข่ายแบบ VLT PVLT และ LT จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสงจะช่วยลดจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการได้ โดยโครงข่ายจะต้องการเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนลดลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องจาก การที่ M มีค่าเพิ่มขึ้นนั้น จำนวนช่องสัญญาณในการรองรับทราฟฟิกของโครงข่ายก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ค่าที่เพิ่มมากขึ้นนี้ทำให้ไม่จำเป็นต้องวางเส้นใยนำแสงเป็นจำนวนมากเพื่อให้ได้จำนวนช่องสัญญาณที่เพียงพอกับปริมาณทราฟฟิกในโครงข่าย ในทางกลับกัน เมื่อจำนวนช่องสัญญาณของโครงข่ายมีจำนวนมากเกินกว่าการใช้งานจริงของทราฟฟิกภายในโครงข่าย ทำให้การวางเส้นใยนำแสงในกรณีนี้ไม่เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด นั่นคือ บางช่องสัญญาณของเส้นใยนำแสงไม่ถูกใช้งาน ในกรณีนี้จะสามารถกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพของโครงข่ายจะมีค่าลดลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น

จากการพิจารณาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อต้นทุนของโครงข่าย ทั้งนี้ เพื่อสรุปข้อดีและข้อเสียของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่าย WDM ซึ่งหลังจากใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบไว้หาต้นทุนของโครงข่ายทั้งประเภท VLT PVLT และ LT สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ว่า อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดต้นทุนของโครงข่ายคือ จำนวนเส้นใยนำแสงได้ทั้งในกรณีที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่ง ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้ ซึ่งจำนวนเส้นใยนำแสงที่ลดได้จะขึ้นอยู่กับค่า M และวิธีการ จัดสรรเส้นทางใหม่ โดยการแปลงผันความยาวคลื่นจะทำให้โครงข่ายต้องการเส้นใยแก้วนำแสงใน ปริมาณที่ต่างกัน แต่จะมีผลน้อยลงและเริ่มคงที่เมื่อ M มีค่ามากจนถึงค่าหนึ่ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในขั้นต่อไปที่น่าสนใจ

1 แม้ว่าข้อดีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาต้นทุนของโครงข่ายคือ ต้นทุนที่หา ได้จะเป็นต้นทุนที่ต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาต้นทุนของ โครงข่ายยังมีข้อเสียคือ ใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยที่ค่อนข้างนานแม้ว่าจะใช้แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาต้นทุนของโครงข่ายขนาดเล็กก็ตาม ดังนั้น งานวิจัยที่น่าสนใจที่ สามารถทำต่อจากข้อสรุปนี้ได้คือ การสร้างขั้นตอนวิธีฮิวริสติกสำหรับออกแบบโครงข่ายที่มีการ พิจารณาทิศทางของกราฟฟิกเพื่อใช้สำหรับหาต้นทุนของโครงข่ายที่ใหญ่ขึ้น

2 เนื่องจากเทคนิคในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาต้นทุนของโครงข่ายที่ สามารถแก้ไขปัญหาค่าความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในวิทยานิพนธ์นี้เป็นเทคนิคที่ใช้หาความจุ สำรองที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อรองรับอุบัติเหตุเท่านั้น ซึ่งแบบจำลองนี้เหมาะกับโครงข่าย ที่มีกาใช้งานอยู่ และต้องการวางความจุสำรองเพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อให้โครงข่ายสามารถแก้ไข ปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้ ดังนั้น งานวิจัยที่สามารถทำต่อได้คือ การสร้าง แบบจำลองสำหรับโครงข่ายที่ยังไม่มีการใช้งานในทางปฏิบัติ แต่มีความต้องการทราบถึงต้นทุน ของโครงข่ายก่อนที่จะมีการวางโครงข่ายจริง

3 ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้โครงข่ายประเภท PVLT ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี OLR และ TLR สำหรับโครงข่ายประเภท LT นั่นคือ วิธีบูรณะจะไม่ สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้ ทำให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าสูง ซึ่งสำหรับโครงข่ายประเภท PVLT นั้น โนดสมาชิกของกลุ่มมัลติคาสต์จะมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ เพราะฉะนั้น วิธีบูรณะสามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้หากวิธีนั้นผ่านโหนดสมาชิกภายใน

กลุ่มมัลติคาสต์ งานวิจัยที่น่าสนใจต่อไปคือการออกแบบวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี OLR และ TLR สำหรับโครงข่ายประเภท PVLТ เพื่อให้ต้นทุนของโครงข่ายประเภท PVLТ ที่สามารถแก้ไข ปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้งมีค่าลดลง

4 เนื่องจากวัตถุประสงค์ในการออกแบบโครงข่ายของวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะ จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการเป็นหลัก ซึ่งในทางปฏิบัติ ต้นทุนของโครงข่ายในแง่ของเส้นใยนำแสง นอกจากจะพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมแล้ว ยังพิจารณารวมไปถึง ความยาวของเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ต้องติดตั้งลงในโครงข่ายด้วย ดังนั้นในงานวิจัยขั้นต่อไป จึงควรมีการพิจารณาระยะห่างระหว่างโหนดภายในโครงข่ายเพื่อใช้คำนวณหาความยาวของเส้นใยนำแสงที่ต้องติดตั้งลงไป และกำหนดให้ความยาวของเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ต้องติดตั้งลงในโครงข่ายเป็นวัตถุประสงค์ในการออกแบบโครงข่าย เพื่อให้การพิจารณา มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. B. Mukherjee. WDM optical communication networks: Progress and Challenges. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 18 (October 2000) : 1810-1824.
2. K. N. Sivarajan. Optical Networking Systems Trends & Opportunities. A Tejas Networks White Paper. (May 2000).
3. George N. Rouskas. Routing and Wavelength Assignment in Optical WDM Networks. Wiley Encyclopedia of Telecommunications. (John Proakis, Editor), John Wiley & Sons, 2001.
4. H. Zang, J. P. Jue and B. Mukherjee. A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks. Optical Networks Magazine. 1 (January 2000) : 47-60.
5. R. M. Krishnaswamy and K. N. Sivarajan. Algorithms for Routing and Wavelength Assignment Based on Solutions of LP-Relaxations. IEEE Communications Letters. 5 (October 2001).
6. M. Tornatore, G. Maier and A. Pattavina. WDM Network Optimization by ILP Based on Source Formulation. Proceedings of IEEE Infocom. 3 (June 2002) : 1813-1821.
7. B. Jaumard, C. Meyer and B. Thiongane. Comparison of ILP Formulations for the RWA Problem. Journal of LaTeX class files. 1 (November 2002).
8. L. H. Sahasrabudde and B. Mukherjee. Light-trees: Optical multicasting for improved performance in wavelength-routed networks. IEEE Communication Magazine. 37 (February 1999) : 67-73.
9. J. He, S.-H. Chan and D. Tsang. Routing and wavelength assignment for WDM multicast networks. IEEE GLOBECOM 2001. 3 (November 2001) : 1536-1540.
10. X. H. Jia, D.Z. Du, X. D. Hu, M. K. Lee and J. Gu. Optimization of Wavelength Assignment for QoS Multicast in WDM Networks. IEEE Transactions on Communications. 49 (February 2001).

11. X. Zhang, J. Wei and C. Qiao. Constrained Multicast Routing in WDM Networks with Sparse Light Splitting. IEEE INFOCOM 2000. 1 (March 2000) : 1781-1790.
12. C. Boworntummarat. Wavelength Routing and Optical Layer Network Protection Approaches Against Single Link Failures for Multicast Traffic on WDM Networks. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University. (2003).
13. C. Baworntummarat and L. Wuttisittikulij. On the comparison of optical WDM mesh network protection strategies. MILCOM 2000 - IEEE Military Communications Conference. 1 (October 2000) : 886-891.
14. C. Boworntummarat, L. Wuttisittikulij and S. Segkhoonthod. Light-tree based protection strategies for multicast traffic in transport WDM mesh networks with multi-fiber systems. ICC 2004 - IEEE International Conference on Communications. 27 (June 2004) : 1791-1795.
15. P. Leelarusmee, C. Boworntummarat and L. Wuttisittikulij. Design and analysis of five protection schemes for preplanned recovery in multicast WDM networks. Proceedings of IEEE Sarnoff Symposium 2004. (April 2004).
16. D.A. Schupke, C.G. Gruber and A. Autenrieth Optimal Configuration of p-Cycles in WDM Networks. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC) 2002. (April 28 - May 2, 2002) : 2761-2765.
17. C. G Gruber and D.A Schupke. Capacity-efficient Planning of Resilient Networks with p-Cycles. 10th International Telecommunication Network Strategy and Planning Symposium (Networks 2002). (June 23 - June 27, 2002).
18. W. Grover. Understanding p-Cycles, Enhanced Rings, and Oriented Cycle Covers. 1st Intl. Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). (November 11 – 14, 2002) : 305-308.
19. W.-D. Zhong and Z.-R. Zhang. Design of Survivable WDM Networks with Shared-P-Cycles. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2004. (February 2004).
20. W. Hu and Q. Zeng. Multicasting optical cross connects employing splitter-and-delivery switch. IEEE Photon. Technol. Lett. 10 (July 1998) : 970-972.

21. M. Ali and J. Deogun. Cost-Effective Implementation of Multicasting in Wavelength-Routed Networks. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology Special Issue on Optical Networks. 18 (December 2000) : 1628-1638.
22. Yufeng Xin and George N. Rouskas. Multicast Routing Under Optical Layer Constraints. IEEE INFOCOM 2004. (March 2004).
23. T. Y. Chow, F. Chudak and A. M. Ffrench. Fast Optical Layer Mesh Protection Using Pre-Cross-Connected Trails. IEEE/ACM Transactions on Networking. 12 (June 2004).
24. S. Baroni, S.K. Korotky and P. Bayvel. Wavelength interchange in multi-wavelength optical transport networks. Proceedings. ECOC'97. 3 (1997) : 164-167.
25. CPLEX user's manual. www.cplex.com: CPLEX's website



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก ผลเฉลยในเชิงความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื้อหาในส่วนนี้แสดงตารางจำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N-7L และ 7N-10L ทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N-7L ทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อกราฟฟิกในโครงข่ายเป็นกราฟฟิกโนดต้นทางร่วม

(ก) โครงข่าย VLT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (VLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง						NO (VLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v
1	100	447	602	1865	297	309	373	405	107	447	609	1865	304	309	380	405
2	100	447	602	1865	286	294	362	390	107	447	609	1865	304	309	380	405
3	100	447	602	1865	275	279	351	375	107	447	609	1865	304	309	380	405
4	100	447	602	1865	275	279	351	375	107	447	609	1865	282	279	358	375
5	100	447	602	1865	275	279	351	375	107	447	609	1865	282	279	358	375
6	100	447	602	1865	275	279	351	375	107	447	609	1865	282	279	358	375
7	100	447	602	1865	264	264	340	360	107	447	609	1865	271	264	347	360
8	100	447	602	1865	264	264	340	360	107	447	609	1865	271	264	347	360
16	100	447	602	1865	266	267	342	363	107	447	609	1865	273	267	349	363
32	100	447	602	1865	266	267	342	363	107	447	609	1865	273	267	349	363
64	100	447	602	1865	266	267	342	363	107	447	609	1865	273	267	349	363
128	100	447	602	1865	266	267	342	363	107	447	609	1865	273	267	349	363

(ข) โครงข่าย PVLT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (PVLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง						NO (PVLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	100	447	602	1865	297	309	373	405	107	447	609	1865	304	309	380	405
2	114	843	686	3457	552	546	704	738	121	843	693	3457	559	546	711	738
3	128	1239	770	5049	818	798	1046	1086	135	1239	777	5049	825	798	1053	1086
4	142	1635	854	6641	1043	1005	1347	1389	149	1635	861	6641	1050	1005	1354	1389
5	156	2031	938	8233	1350	1302	1730	1782	163	2031	945	8233	1306	1247	1686	1727
6	170	2427	1022	9825	1555	1489	2011	2065	177	2427	1029	9825	1562	1489	2018	2065
7	184	2823	1106	11417	1740	1656	2272	2328	191	2823	1113	11417	1747	1656	2279	2328
8	198	3219	1190	13009	1986	1888	2594	2656	205	3219	1197	13009	1993	1888	2601	2656
16	310	6387	1862	25745	3986	3777	5202	5313	317	6387	1869	25745	3993	3777	5209	5313
32	534	12723	3206	51217	7954	7521	10386	10593	541	12723	3213	51217	7961	7521	10393	10593
64	982	25395	5894	102161	15890	15009	20754	21153	989	25395	5901	102161	15897	15009	20761	21153
128	1878	50739	11270	204049	31762	29985	41490	42273	1885	50739	11277	204049	31769	29985	41497	42273

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ค) โครงข่าย LT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (LT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง						NO (LT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	501	452	2199	1870	297	309	373	405	508	452	2206	1870	304	309	380	405
2	911	853	3875	3467	531	521	683	713	918	853	3882	3467	580	571	732	763
3	1321	1254	5551	5064	756	728	984	1016	1328	1254	5558	5064	856	833	1084	1121
4	1731	1655	7227	6661	1084	1050	1388	1434	1738	1655	7234	6661	1132	1095	1436	1479
5	2141	2056	8903	8258	1309	1258	1689	1738	2148	2056	8910	8258	1408	1357	1788	1837
6	2551	2457	10579	9855	1506	1437	1962	2013	2558	2457	10586	9855	1684	1619	2140	2195
7	2961	2858	12255	11452	1882	1806	2414	2478	2968	2858	12262	11452	1960	1881	2492	2553
8	3371	3259	13931	13049	2148	2058	2756	2826	3378	3259	13938	13049	2236	2143	2844	2911
16	6651	6467	27339	25825	4276	4074	5492	5610	6658	6467	27346	25825	4444	4239	5660	5775
32	13211	12883	54155	51377	8532	8106	10964	11178	13218	12883	54162	51377	8860	8431	11292	11503
64	26331	25715	107787	102481	17044	16170	21908	22314	26338	25715	107794	102481	17692	16815	22556	22959
128	52571	51379	215051	204689	34068	32298	43796	44586	52578	51379	215058	204689	35356	33583	45084	45871

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N-7L ทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อกราฟฟิกในโครงข่ายเป็นกราฟฟิกโนดต้นทางแยก

(ก) โครงข่าย VLT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (VLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง						NO (VLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v
1	100	450	602	1855	286	294	362	390	107	450	609	1855	293	294	369	390
2	100	450	602	1855	275	279	351	375	107	450	609	1855	293	294	369	390
3	100	450	602	1855	286	294	362	390	107	450	609	1855	282	279	358	375
4	100	450	602	1855	286	294	362	390	107	450	609	1855	282	279	358	375
5	100	450	602	1855	297	309	373	405	107	450	609	1855	282	279	358	375
6	100	450	602	1855	275	279	351	375	107	450	609	1855	271	264	347	360
7	100	450	602	1855	275	279	351	375	107	450	609	1855	271	264	347	360
8	100	450	602	1855	275	279	351	375	107	450	609	1855	271	264	347	360
16	100	450	602	1855	275	279	351	375	107	450	609	1855	271	264	347	360
32	100	450	602	1855	275	279	351	375	107	450	609	1855	273	267	349	363
64	100	450	602	1855	275	279	351	375	107	450	609	1855	271	264	347	360
128	100	450	602	1855	275	279	351	375	107	450	609	1855	273	267	349	363

(ข) โครงข่าย PVLT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (PVLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง						NO (PVLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv		
1	100	450	602	1855	286	294	362	390	107	450	609	1855	293	294	369	390
2	114	849	686	3437	531	521	683	713	121	849	693	3437	559	546	711	738
3	128	1248	770	5019	818	798	1046	1086	135	1248	777	5019	794	763	1022	1051
4	142	1647	854	6601	1084	1050	1388	1434	149	1647	861	6601	1050	1005	1354	1389
5	156	2046	938	8183	1350	1302	1730	1782	163	2046	945	8183	1306	1247	1686	1727
6	170	2445	1022	9765	1616	1554	2072	2130	177	2445	1029	9765	1501	1424	1957	2000
7	184	2844	1106	11347	1811	1731	2343	2403	191	2844	1113	11347	1747	1656	2279	2328
8	198	3243	1190	12929	2067	1973	2675	2741	205	3243	1197	12929	1993	1888	2601	2656
16	310	6435	1862	25585	4115	3909	5331	5445	317	6435	1869	25585	3993	3777	5209	5313
32	534	12819	3206	50897	8211	7781	10643	10853	541	12819	3213	50897	7961	7521	10393	10593
64	982	25587	5894	101521	16403	15525	21267	21669	989	25587	5901	101521	15897	15009	20761	21153
128	1878	51123	11270	202769	32787	31013	42515	43301	1885	51123	11277	202769	31769	29985	41497	42273

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ค) โครงข่าย LT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (LT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง						NO (LT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	504	455	2189	1860	286	294	362	390	511	455	2196	1860	293	294	369	390
2	917	859	3855	3447	573	571	725	763	924	859	3862	3447	559	546	711	738
3	1330	1263	5521	5034	824	805	1052	1093	1337	1263	5528	5034	856	833	1084	1121
4	1743	1667	7187	6621	1125	1095	1429	1479	1750	1667	7194	6621	1132	1095	1436	1479
5	2156	2071	8853	8208	1299	1247	1679	1727	2163	2071	8860	8208	1408	1357	1788	1837
6	2569	2475	10519	9795	1555	1489	2011	2065	2576	2475	10526	9795	1684	1619	2140	2195
7	2982	2879	12185	11382	1811	1731	2343	2403	2989	2879	12192	11382	1960	1881	2492	2553
8	3395	3283	13851	12969	2067	1973	2675	2741	3402	3283	13858	12969	2236	2143	2844	2911
16	6699	6515	27179	25665	4115	3909	5331	5445	6706	6515	27186	25665	4444	4239	5660	5775
32	13307	12979	53835	51057	8211	7781	10643	10853	13314	12979	53842	51057	8860	8431	11292	11503
64	26523	25907	107147	101841	16403	15525	21267	21669	26530	25907	107154	101841	17692	16815	22556	22959
128	52955	51763	213771	203409	32787	31013	42515	43301	52962	51763	213778	203409	35356	33583	45084	45871

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N-10L ทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อกราฟฟิกในโครงข่ายเป็นกราฟฟิกโนดต้นทางร่วม

(ก) โครงข่าย VLT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (VLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง						NO (VLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v
1	109	563	890	3296	622	678	820	928	119	563	900	3296	632	678	830	928
2	109	563	890	3296	607	657	805	907	119	563	900	3296	632	678	830	928
3	109	563	890	3296	622	678	820	928	119	563	900	3296	632	678	830	928
4	109	563	890	3296	588	630	786	880	119	563	900	3296	613	651	811	901
5	109	563	890	3296	588	630	786	880	119	563	900	3296	613	651	811	901
6	109	563	890	3296	607	657	805	907	119	563	900	3296	594	624	792	874
7	109	563	890	3296	584	624	782	874	119	563	900	3296	579	603	777	853
8	109	563	890	3296	584	624	782	874	119	563	900	3296	579	603	777	853
16	109	563	890	3296	546	570	744	820	119	563	900	3296	556	570	754	820
32	109	563	890	3296	550	576	748	826	119	563	900	3296	560	576	758	826
64	109	563	890	3296	550	576	748	826	119	563	900	3296	556	570	754	820
128	109	563	890	3296	550	576	748	826	119	563	900	3296	556	570	754	820

(ข) โครงข่าย PVLT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (PVLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง						NO (PVLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	109	563	890	3296	622	678	820	928	119	563	900	3296	632	678	830	928
2	129	1071	1070	6222	1177	1205	1573	1705	139	1071	1080	6222	1187	1205	1583	1705
3	149	1579	1250	9148	1806	1822	2400	2572	159	1579	1260	9148	1816	1822	2410	2572
4	169	2087	1430	12074	2268	2250	3060	3250	179	2087	1440	12074	2335	2313	3127	3313
5	189	2595	1610	15000	2717	2669	3707	3919	199	2595	1620	15000	2909	2867	3899	4117
6	209	3103	1790	17926	3388	3330	4576	4830	219	3103	1800	17926	3374	3304	4562	4804
7	229	3611	1970	20852	3920	3840	5306	5590	239	3611	1980	20852	3803	3705	5189	5455
8	249	4119	2150	23778	4331	4223	5915	6223	259	4119	2160	23778	4341	4223	5925	6223
16	409	8183	3590	47186	8410	8136	11578	12136	419	8183	3600	47186	8356	8070	11524	12070
32	729	16311	6470	94002	16794	16200	23130	24200	739	16311	6480	94002	16804	16200	23140	24200
64	1369	32567	12230	187634	33562	32328	46234	48328	1379	32567	12240	187634	33572	32328	46244	48328
128	2649	65079	23750	374898	67098	64584	92442	96584	2659	65079	23760	374898	67108	64584	92452	96584

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ค) โครงข่าย LT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (LT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง						NO (LT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	622	568	3821	3301	622	678	820	928	632	568	3831	3301	632	678	830	928
2	1150	1081	6927	6232	1148	1170	1544	1670	1160	1081	6937	6232	1187	1205	1583	1705
3	1678	1594	10033	9163	1708	1710	2302	2460	1688	1594	10043	9163	1816	1822	2410	2572
4	2206	2107	13139	12094	2195	2169	2987	3169	2216	2107	13149	12094	2335	2313	3127	3313
5	2734	2620	16245	15025	2626	2570	3616	3820	2744	2620	16255	15025	3000	2966	3990	4216
6	3262	3133	19351	17956	3255	3187	4443	4687	3272	3133	19361	17956	3374	3304	4562	4804
7	3790	3646	22457	20887	3666	3570	5052	5320	3800	3646	22467	20887	3930	3840	5316	5590
8	4318	4159	25563	23818	4186	4070	5770	6070	4328	4159	25573	23818	4486	4376	6070	6376
16	8542	8263	50411	47266	8346	8070	11514	12070	8552	8263	50421	47266	8934	8664	12102	12664
32	16990	16471	100107	94162	16666	16070	23002	24070	17000	16471	100117	94162	17830	17240	24166	25240
64	33886	32887	199499	187954	33306	32070	45978	48070	33896	32887	199509	187954	35622	34392	48294	50392
128	67678	65719	398283	375538	66586	64070	91930	96070	67688	65719	398293	375538	71206	68696	96550	100696

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4 จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N-10L ทั้งในสถานะที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง เมื่อกราฟฟิกในโครงข่ายเป็นกราฟฟิกโนดต้นทางแยก

(ก) โครงข่าย VLT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (VLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง						NO (VLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v	N_c	N_v
1	109	556	890	3301	603	651	801	901	119	556	900	3301	594	624	792	874
2	109	556	890	3301	622	678	820	928	119	556	900	3301	594	624	792	874
3	109	556	890	3301	588	630	786	880	119	556	900	3301	594	624	792	874
4	109	556	890	3301	607	657	805	907	119	556	900	3301	594	624	792	874
5	109	556	890	3301	603	651	801	901	119	556	900	3301	579	603	777	853
6	109	556	890	3301	603	651	801	901	119	556	900	3301	556	570	754	820
7	109	556	890	3301	584	624	782	874	119	556	900	3301	560	576	758	826
8	109	556	890	3301	584	624	782	874	119	556	900	3301	560	576	758	826
16	109	556	890	3301	569	603	767	853	119	556	900	3301	556	570	754	820
32	109	556	890	3301	569	603	767	853	119	556	900	3301	560	576	758	826
64	109	556	890	3301	569	603	767	853	119	556	900	3301	556	570	754	820
128	109	556	890	3301	569	603	767	853	119	556	900	3301	556	570	754	820

(ข) โครงข่าย PVLT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (PVLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ซึ่งเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง						NO (PVLT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ซึ่งเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	109	556	890	3301	603	651	801	901	119	556	900	3301	594	624	792	874
2	129	1057	1070	6232	1177	1205	1573	1705	139	1057	1080	6232	1150	1160	1546	1660
3	149	1558	1250	9163	1696	1696	2290	2446	159	1558	1260	9163	1706	1696	2300	2446
4	169	2059	1430	12094	2179	2151	2971	3151	179	2059	1440	12094	2205	2169	2997	3169
5	189	2560	1610	15025	2990	2966	3980	4216	199	2560	1620	15025	2727	2669	3717	3919
6	209	3061	1790	17956	3388	3330	4576	4830	219	3061	1800	17956	3156	3070	4344	4570
7	229	3562	1970	20887	3948	3870	5334	5620	239	3562	1980	20887	3676	3570	5062	5320
8	249	4063	2150	23818	4621	4529	6205	6529	259	4063	2160	23818	4228	4104	5812	6104
16	409	8071	3590	47266	8699	8433	11867	12433	419	8071	3600	47266	8420	8136	11588	12136
32	729	16087	6470	94162	17371	16785	23707	24785	739	16087	6480	94162	16804	16200	23140	24200
64	1369	32119	12230	187954	34715	33489	47387	49489	1379	32119	12240	187954	33572	32328	46244	48328
128	2649	64183	23750	375538	69403	66897	94747	98897	2659	64183	23760	375538	67108	64584	92452	96584

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ค) โครงข่าย LT

M	กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร								กรณีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายเป็นแบบสมมาตร							
	NO (LT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ซึ่งเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง						NO (LT)		โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ซึ่งเชื่อมโยงได้รับความชัดซึ้ง					
			MC		OLR		TLR				MC		OLR		TLR	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	615	561	3826	3306	603	651	801	901	625	561	3836	3306	594	624	792	874
2	1136	1067	6937	6242	1140	1160	1536	1660	1146	1067	6947	6242	1113	1115	1509	1615
3	1657	1573	10048	9178	1696	1696	2290	2446	1667	1573	10058	9178	1651	1633	2245	2383
4	2178	2079	13159	12114	2195	2169	2987	3169	2188	2079	13169	12114	2189	2151	2981	3151
5	2699	2585	16270	15050	2737	2691	3727	3941	2709	2585	16280	15050	2727	2669	3717	3919
6	3220	3091	19381	17986	3279	3213	4467	4713	3230	3091	19391	17986	3265	3187	4453	4687
7	3741	3597	22492	20922	3821	3735	5207	5485	3751	3597	22502	20922	3803	3705	5189	5455
8	4262	4103	25603	23858	4363	4257	5947	6257	4272	4103	25613	23858	4341	4223	5925	6223
16	8430	8151	50491	47346	8699	8433	11867	12433	8440	8151	50501	47346	8645	8367	11813	12367
32	16766	16247	100267	94322	17371	16785	23707	24785	16776	16247	100277	94322	17253	16655	23589	24655
64	33438	32439	199819	188274	34715	33489	47387	49489	33448	32439	199829	188274	34469	33231	47141	49231
128	66782	64823	398923	376178	69403	66897	94747	98897	66792	64823	398933	376178	68901	66383	94245	98383

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

- 1 วรารัตน์ วัฒนวรากุล, ศักดิ์ เสกขุนทด และ ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ “การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายร่างแห WDM ชนิดหลายเส้นใยนำแสงเพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกแบบไม่สมมาตร,” วารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, จังหวัดภูเก็ต, ประเทศไทย, 20 – 21 ตุลาคม 2548.
- 2 W. Wattanavarakul, S.Segkhoonthod, and L. Wuttisittikulij, “Design of Multicast Routing and Wavelength Assignment in Multifiber WDM Mesh Networks for Asymmetric Traffics,” in the Proceedings of IEEE International Region 10 Technical Conference (TENCON'05, Melbourne, Australia), 22 – 24 November 2005.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายร่างแห WDM ชนิดหลายเส้นใยนำแสง
เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกแบบไม่สมมาตร**
**Multicast Routing and Wavelength Assignment in Multifiber WDM Mesh Networks
for Asymmetric Traffics**

วรารัตน์ วัฒนวรกุล, สักดิ์ เสกขุนทด และ ลัญฉกร วุฒิสัทกุลกิจ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
254 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

โทร. (662) 2186908 E-mail: Warangrat.W@student.chula.ac.th, sak@gits.net.th and wlunchak@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ เสนอการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายร่างแห WDM ชนิดหลายเส้นใยนำแสงเพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกแบบไม่สมมาตร โดยพิจารณาการออกแบบโครงข่าย 3 วิธีคือ LT PVLТ และ VLT และใช้เทคนิค Integer Linear Programming (ILP) ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบวิธีทั้ง 3 ในเชิงจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ การวิเคราะห์ผลเฉลยจากโครงข่ายตัวอย่างสรุปได้ว่า การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี PVLТ และ VLT มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธี LT เนื่องจากต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต่ำกว่า กล่าวคือ อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของระบบ แต่การติดตั้งไม่จำเป็นต่อกระทำที่ทุกโหนดของโครงข่าย การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเฉพาะบางโหนดจะให้ประสิทธิภาพในแง่ของจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายตัวอย่างต้องการเท่ากับการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในทุกโหนดของโครงข่าย

คำสำคัญ: การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น, เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น, มัลติคาสต์, หลายเส้นใยนำแสง

Abstract

This paper proposes new mathematical formulations for solving the multicast routing and wavelength assignment (MC-RWA) in multifiber WDM mesh networks for asymmetric traffics. We investigated MC-RWA problems in three different MC-RWA network design approaches namely Light-Tree (LT), Partial Virtual Light-Tree (PVLТ), and Virtual Light-Tree (VLT) meshed network. The objective is to minimize the number of fiber requirements. Numerical results on a small test network demonstrate that in most cases PVLТ and VLT networks require fewer fibers than LT network, signifying that wavelength conversions can be useful for reducing fiber requirements in asymmetrical multicast environments using mesh design approaches. Nonetheless, conversion is not always needed, as partial wavelength

converter allocation appears to be as effective as full allocation with respect to capacity requirement under certain network environments.

Keywords: Multicast routing and wavelength assignment, multifiber, wavelength division multiplexing

1. คำนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM) ได้ถูกนำมาใช้ในการสื่อสาร เนื่องจากแนวโน้มความต้องการบริโภคข้อมูลข่าวสารของผู้ใช้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างมาก และด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีรวมทั้งพฤติกรรมของผู้ใช้บริการพบว่าในอนาคตบริการแบบมัลติคาสต์ (Multicast) มีแนวโน้มที่จะได้รับการตอบสนองจากผู้เพิ่มมากขึ้น เพราะสามารถตอบสนองความต้องการบริการรูปแบบเดียวกันสำหรับผู้ใช้จำนวนมากได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งบริการที่มีลักษณะทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์หลาย ๆ ประเภทเช่น การศึกษาทางไกล การประชุมทางไกล และการส่งข้อมูลวิดีโอ ไปยังผู้รับที่ร้องขอ ล้วนต้องการโครงข่ายที่มีช่องทางสื่อสาร (Channel) หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่มีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถรองรับข้อมูลที่มีปริมาณและความเร็วในการส่งที่สูงขึ้นได้ จากการศึกษางานวิจัยเรื่องการออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ในช่วงที่ผ่านมา เมื่อพิจารณาจะพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ [1-3] ถึงแม้จะมีขอบเขตสำหรับโครงข่ายชนิดหนึ่งเส้นใยนำแสงและทราฟฟิกแบบสมมาตร แต่มีลักษณะแตกต่างกันในเชิงวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น และจุดประสงค์ของแบบจำลอง ซึ่งส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นในด้านการลดต้นทุนของโครงข่าย เช่น การหาจำนวนความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก และการหาจำนวนการเชื่อมต่อที่มากที่สุดเมื่อข้อสัญญามีจำนวนจำกัด อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในแง่การลดจำนวนเส้นใยนำแสง ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงเมื่อต้องการสร้าง

โครงข่ายเพื่อใช้งานจริงนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก ในบทความนี้จะนำเสนอการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายร่างแห WDM ชนิดหลายเส้นใยแสงเพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกแบบไม่สมมาตร

ในบทความนี้ เริ่มแรกจะกล่าวถึงวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ หลังจากนั้นจะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละวิธี ส่วนที่ 4 จะแสดงผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการออกแบบโครงข่ายในแต่ละวิธี สุดท้ายจะเป็นการสรุปผล

2. การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์เพื่อให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้โครงข่ายมีค่าต่ำสุด โดยสามารถแยกพิจารณาการจัดสรรเส้นทาง และการจัดสรรความยาวคลื่นได้ดังนี้

2.1 การจัดสรรเส้นทาง

การจัดสรรเส้นทางจะอยู่บนพื้นฐานของโครงข่ายต้นไม้เชิงแสง นั่นคือ โหนดสมาชิกในกลุ่มมัลติคาสต์เดียวกันทุกโหนดจะต้องเชื่อมต่อกันในลักษณะที่ไม่ทำให้เกิดวงปิด และเส้นทางการเชื่อมต่อต้องมีทิศทางออกจากโหนดต้นทางไปสิ้นสุดยังกลุ่มโหนดปลายทาง โดยเรียกการเชื่อมต่อระหว่างโหนดใด ๆ ในกลุ่มมัลติคาสต์เดียวกันว่า กิ่งเชิงแสง (Optical branch) [4] ลักษณะ โครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 1 (ก) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 (ข)

2.2 การจัดสรรความยาวคลื่น

การจัดสรรความยาวคลื่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีดังนี้

2.2.1 วิธีโครงข่ายต้นไม้เชิงแสง (Light-tree method, LT)

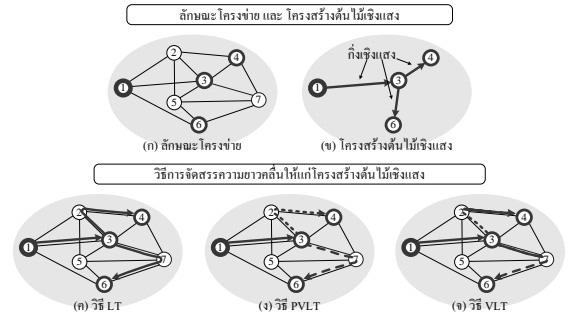
วิธีนี้ความยาวคลื่นที่ถูกจัดสรรให้กับกิ่งเชิงแสง (Optical branch) ทุกกิ่งในโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงจะเป็นความยาวคลื่นค่าเดียวกัน นั่นคือ จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้จะเท่ากับจำนวนโครงข่ายต้นไม้เชิงแสง

2.2.2 วิธีโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงเสมือนบางส่วน (Partial Virtual Light-tree method, PVLT)

วิธีนี้จะพิจารณาการจัดสรรความยาวคลื่นแยกแต่ละกิ่งเชิงแสง นั่นคือ ความยาวคลื่นที่ถูกจัดสรรให้กับโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงในแต่ละกิ่งเชิงแสงนั้นสามารถแตกต่างกันได้ แต่ความยาวคลื่นของโครงข่ายที่อยู่บนกิ่งเชิงแสงเดียวกันจะต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกัน ดังนั้น วิธีนี้จึงอนุญาตให้โหนดของโครงข่ายบางโหนดสามารถติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้

2.2.3 วิธีโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-tree method, VLT)

วิธีนี้จะพิจารณาการจัดสรรความยาวคลื่นแยกแต่ละข่ายเชื่อมโยง นั่นคือ ความยาวคลื่นที่ถูกจัดสรรให้กับโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพนั้นสามารถแตกต่างกันได้ ดังนั้นวิธีนี้จึงอนุญาตให้ทุกโหนดของโครงข่ายสามารถติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ ลักษณะการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 (ค) (ง) และ (จ) ตามลำดับ



รูปที่ 1 ลักษณะการจัดสรรความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDM โดยอยู่บนพื้นฐานของโครงข่ายต้นไม้เชิงแสง

3. แบบจำลองของโครงข่าย

บทความนี้ จะแทนที่โครงข่าย WDM ที่พิจารณาด้วยกราฟแบบแสดงทิศทาง (Directed Graph) $G(V, E)$ ซึ่งประกอบไปด้วยเซตของโหนด (V) จำนวน N โหนด, $|V| = N$ และเซตของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical Links) (E) แบบแสดงทิศทาง (Directed Links) จำนวน L ข่ายเชื่อมโยง, $|E| = L$ โดยในแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะประกอบด้วยกลุ่มของเส้นใยนำแสงที่ทำหน้าที่รองรับเส้นทางที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูล และกำหนดให้แต่ละโหนดมีการติดตั้งอุปกรณ์คัดลอกและแยก (Split) สัญญาณแสงออกเป็นสัญญาณย่อยจำนวนหนึ่ง ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่ร้องขอข้อมูลดังกล่าวเป็นจำนวนมากได้ นอกจากนี้ยังกำหนดให้ทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นแบบไม่สมมาตร (Asymmetric) และคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Static) ปัญหาในการออกแบบจะถูกจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีพารามิเตอร์ และตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้จำลองปัญหาดังต่อไปนี้

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
$K = R $	จำนวนมัลติคาสต์เซสชัน
$r_k(s_k, D_k)$	มัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ซึ่งมีโหนดต้นทาง s_k และมีชุดโหนดปลายทางคือ ชุด D_k
t_k	ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k
Δ	จำนวนสัญญาณที่มากที่สุดที่อนุญาตให้ออกจากตัวแยกสัญญาณได้ (Fanout)
M	จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ลงบนเส้นใยนำแสงได้
$\xi_{sd,p}^{mn}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อกิ่งเชิงแสง sd สามารถใช้เส้นทางที่ p ของคู่โหนด mn เป็นเส้นทางในการส่งข้อมูลได้ ถ้าไม่สามารถใช้ได้จะมีค่าเป็น 0
$\delta_{ij,p}^{sd}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ p ของกิ่งเชิงแสง sd ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0
P_{mn}	ชุดของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างคู่โหนด mn
I_∞	ค่าคงที่จำนวนเต็มที่มีค่ามาก
ตัวแปร	คำอธิบาย
f_{ij}	จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้ข่ายเชื่อมโยง ij
$a_{r_k,p}^{mn}$	เส้นทางทางกายภาพลำดับที่ p ของคู่โหนด mn ที่รองรับมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k (สำหรับวิธี VLT)

- $a_{r_k,p,\lambda}^{mn}$ เส้นทางทางกายภาพลำดับที่ p ของคู่อินด mn ซึ่งใช้ความยาวคลื่น λ ที่รองรับมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k (สำหรับวิธี LT และ วิธี PVLT)
- x_k^{ij} มีค่าเป็น 1 เมื่อกิ่งเชิงแสงที่ส่งข้อมูลจากโหนด i ไปยังโหนด j ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ถ้าไม่ถูกใช้จะมีค่าเป็น 0
- $W_{r_k,\lambda}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อความยาวคลื่น λ ถูกเลือกเพื่อใช้ส่งข้อมูลสำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ถ้าไม่ถูกเลือกจะมีค่าเป็น 0 (สำหรับวิธี LT)

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

ในการหาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Light-tree) T_k เพื่อรองรับมัลติคาสต์เซสชันที่ $r_k (s_k, D_k)$ นั้น จะต้องแทนที่โครงข่าย WDM ที่พิจารณาด้วยกราฟแบบแสดงทิศทาง $G_k = (E_k, V_k)$ โดยชุดของโหนด E_k จะประกอบไปด้วยโหนดต้นทาง s_k และชุดของโหนดปลายทาง D_k รวมทั้งสิ้นจำนวน N_k โหนด, $|E_k| = N_k$ และชุดของเส้นเชื่อมเชิงตรรกะ (Logical arcs) V_k แสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $V_k = \{ij \in V_k | i, j \in N_k \wedge i \neq j\}$ แล้วเปลี่ยนกราฟแบบแสดงทิศทาง G_k ที่ได้ให้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด T_k โดยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\sum_{ij \in V_k} x_k^{ij} = N_k - 1, \quad \forall r_k \in R \quad (1)$$

$$\sum_{jij \in V_k} x_k^{ij} \leq \Delta, \quad \forall i \in E_k, \forall r_k \in R \quad (2)$$

$$\sum_{jij \in V_k} x_k^{ij} \geq 1, \quad \forall i \in E_k, \forall r_k \in R \quad (3)$$

$$\sum_{ij \in \mathcal{G}(S)} x_k^{ij} \geq 1, \quad \forall S \subset E_k, S \neq \emptyset, N \quad (4)$$

$$\sum_{ij \in V_k} x_k^{ij} = \begin{cases} 0 & , j = source \\ 1 & , otherwise \end{cases}, \quad \forall j \in E_k, \forall r_k \in R \quad (5)$$

$$x_k^{ij} + x_k^{ji} \leq 1, \quad \forall ij \in V_k, \forall r_k \in R \quad (6)$$

ข้อบังคับที่ (1) กำหนดให้โครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องประกอบด้วยกิ่งเชิงแสงจำนวน $N_k - 1$ กิ่ง ข้อบังคับที่ (2) จะพิจารณาจำนวนเส้นเชื่อมขาออกของแต่ละโหนด ซึ่งจะถูกจำกัดด้วยค่า fanout ข้อบังคับที่ (3) และ (4) เป็นการรับประกันว่าทุกโหนดที่เป็นสมาชิกของกลุ่มมัลติคาสต์สามารถเชื่อมต่อกันได้ และโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องไม่มีลักษณะเป็นวงปิด โดย $\mathcal{G}(S) = \{ij \in V_k | i \in S, j \notin S\}$ คือเซตตัด (Cut-set) ของเซตย่อย (Subset) S ข้อบังคับที่ (5) เป็นการป้องกันการส่งข้อมูลย้อนกลับเข้าสู่โหนดต้นทาง ส่วนข้อบังคับที่ (6) จะป้องกันการเลือกเส้นทางแบบย้อนกลับทางเดิมบนเส้นเชื่อมเดียวกัน

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายวิธี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (7)$$

และมีข้อบังคับข้อ (1) ถึง (6) และ

$$\sum_{p \in P_{mn}} \sum_{\lambda=1}^M a_{r_k,p,\lambda}^{mn} \xi_{sd,p}^{mn} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in V_k, \forall r_k \in R \quad (8)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{mn}} a_{r_k,p,\lambda}^{mn} \xi_{sd,p}^{mn} \delta_{ij,p}^{sd} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L \quad (9)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{r_k,\lambda} = 1, \quad \forall r_k \in R \quad (10)$$

$$a_{r_k,p,\lambda}^{mn} \xi_{sd,p}^{mn} \leq I_\infty \times W_{r_k,\lambda}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \quad \forall sd \in V_k, \forall r_k \in R \quad (11)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองวิธี LT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (7) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับกราฟที่เพิ่มขึ้น โดยมีข้อบังคับที่ (1) ถึง (6) เป็นข้อบังคับที่ใช้หาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด ข้อบังคับที่ (8) จะกำหนดให้เส้นเชื่อมเชิงตรรกะทุกเส้นต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ ข้อบังคับที่ (9) ใช้บังคับให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายสามารถรองรับปริมาณกราฟที่ทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ ข้อบังคับที่ (10) กำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซสชันเลือกความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียว และความยาวคลื่นนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นที่เลือกได้จากข้อบังคับที่ (8) ซึ่งแสดงได้ดังข้อบังคับที่ (11)

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายวิธี PVLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี PVLT จะมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองสำหรับวิธี LT แต่จะไม่มีกำหนดข้อบังคับในการเลือก และการกำหนดความยาวคลื่น กล่าวคือ วิธี PVLT จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อ (7) ข้อบังคับ (1) ถึง (6) และ (8) ถึง (9) เท่านั้น

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายวิธี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (12)$$

และมีข้อบังคับข้อ (1) ถึง (6) และ

$$\sum_{p \in P_{mn}} a_{r_k,p}^{mn} \xi_{sd,p}^{mn} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in V_k, \forall r_k \in R \quad (13)$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{mn}} a_{r_k,p}^{mn} \xi_{sd,p}^{mn} \delta_{ij,p}^{sd} \geq 0, \quad \forall ij \in L \quad (14)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองวิธี VLT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (12) และมีข้อบังคับข้อ (1) ถึง (6) และ (13) ถึง (14) ซึ่งข้อบังคับที่ (13) เป็นข้อบังคับที่ให้เส้นเชื่อมเชิงตรรกะทุกเส้นจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ ส่วนข้อบังคับที่ (14) ใช้บังคับให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดได้

4. ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย

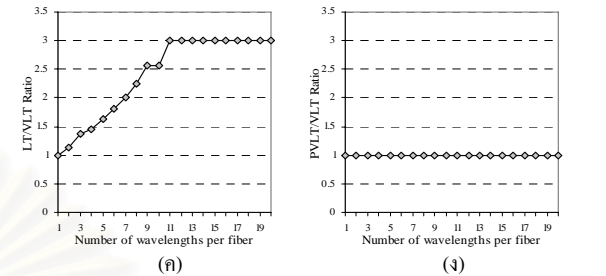
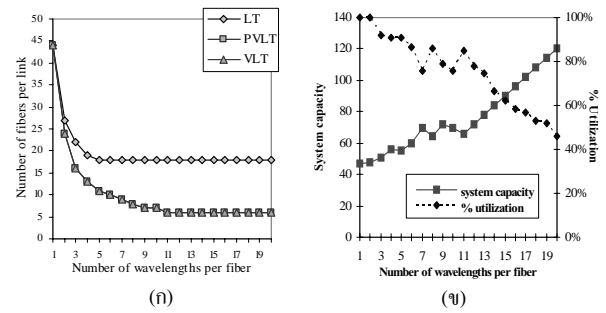
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น โดยใช้โครงข่ายทดสอบขนาด 7 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยง ทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ 5 เซสชัน แต่ละเซสชันมีจำนวนโหนดปลายทางตั้งแต่ 2 ถึง 4 โหนด ค่า fanout เท่ากับ 3 และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CPLEX6.6 [5] ในการหาผลเฉลย

รูปที่ 2 (ก) แสดงจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายทดสอบต้องการ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าผลเฉลยที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายทั้ง 3 วิธีจะมีลักษณะคล้ายกัน คือมีค่าลดลงเมื่อ M มีค่าสูงขึ้น โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงค่า M ค่าน้อย ๆ และจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อค่า M มีค่ามากพอ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการที่ค่า M เพิ่มขึ้น จำนวนช่องสัญญาณในแต่ละเส้นใยนำแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการที่จำนวนช่องสัญญาณมีค่าเพิ่มมากขึ้นนี้ทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องติดตั้งมีค่าลดลง และเนื่องจากลักษณะของกราฟทั้ง 3 วิธีมีแนวโน้มที่คล้ายกัน ในที่นี้จึงแสดงกราฟการใช้งาน และความจุของระบบเฉพาะโครงข่ายที่ออกแบบด้วยวิธี VLT ดังรูปที่ 2 (ข) เท่านั้น จะเห็นว่าเมื่อค่า M เพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การใช้งานช่องสัญญาณของระบบจะลดลงและลดลงอย่างมากเมื่อ $M \geq 11$ ทั้งนี้ เนื่องจากที่ค่า $M \geq 11$ จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการจะไม่ลดลงอีก ทำให้การเพิ่มค่า M เป็นการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณที่เหลือในระบบให้มากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การใช้งานลดลงอย่างเห็นได้ชัด

เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยในแง่วิธีที่ใช้ในการออกแบบสามารถเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายทดสอบต้องการเมื่อออกแบบด้วยวิธี LT กับวิธี VLT และวิธี PVLT กับวิธี VLT ได้ดังรูปที่ 2 (ค) และ (ง) ตามลำดับ จากกราฟพบว่า ที่ $M = 1$ ทั้ง 3 วิธีจะให้ผลเฉลยที่เท่ากัน แสดงให้เห็นถึงความสมมูลกันของทั้ง 3 วิธี รูปที่ 2 (ค) แสดงให้เห็นว่าโดยรวมแล้ววิธี LT ต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงมากกว่าวิธี VLT โดยต้องการมากกว่าถึง 3 เท่าที่ $M \geq 11$ เนื่องจากถึงแม้ค่า M จะมากขึ้น แต่วิธี LT อนุญาตให้แต่ละโครงข่ายต้นไม่เชิงแสงเลือกใช้ความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น ทำให้การเพิ่มค่า M สำหรับวิธี LT มีผลต่อการลดของจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมน้อย และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธี PVLT และวิธี VLT พบว่าวิธีทั้งสองให้ผลเฉลยที่เท่ากันทุกค่า M เพราะฉะนั้น จากการเปรียบเทียบข้างต้นสามารถเรียงลำดับจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายทดสอบต้องการจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ $LT > PVLT = VLT$

5. สรุป

บทความฉบับนี้ เสนอการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายร่างแห WDM ชนิดหลายเส้นใยแสงเพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกแบบไม่สมมาตร โดยพิจารณาการออกแบบโครงข่าย 3 วิธีคือ LT PVLT และ VLT การวิเคราะห์ผลเฉลยจากโครงข่ายร่างแห 7 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยงสรุปได้ว่า การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี PVLT และ VLT มี



รูปที่ 2 ผลเฉลยของโครงข่ายทดสอบ

ประสิทธิภาพดีกว่าวิธี LT เนื่องจากต้องการจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต่ำกว่า กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายทดสอบต้องการภายใต้ทราฟฟิกแบบไม่สมมาตร แต่การติดตั้งไม่จำเป็นต้องกระทำที่ทุกโหนดของโครงข่าย การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเฉพาะบางโหนดจะให้ประสิทธิภาพในแง่ของจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายตัวอย่างต้องการเท่ากับการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในทุกโหนดของโครงข่าย แต่อย่างไรก็ดี ต้นทุนที่ควรคำนึงถึงจากการออกแบบโครงข่ายโดยวิธีทั้ง 2 คือค่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST)

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. He, S. -H. Chan and D. Tsang, "Routing and wavelength assignment for WDM multicast networks", *IEEE. GLOBECOM 2001*, vol. 3, pp. 1536-1540, 2001.
- [2] X. H. Jia, D.Z. Du, X. D. Hu, M. K. Lee, and J. Gu, "Optimization of Wavelength Assignment for QoS Multicast in WDM Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, no. 2, February 2001.
- [3] S. Yan, M. Ali, and J. Deogun, "Route Optimization of Multicast Sessions in Sparse Light-splitting Optical Networks," *IEEE Global Telecommunications Conference*, no. 1, pp. 2134-2138, November, 2001.
- [4] C. Boworntummarat, L. Wuttisittikulki, and S. Segkhoonthod, "Light-Tree Based Protection Strategies for Multicast Traffic in Transport WDM Mesh Networks with Multi-Fiber System," *in IEEE Proc. ICC2004*, 2004.
- [5] ILOG CPLEX User's manual.

Design of Multicast Routing and Wavelength Assignment in Multifiber WDM Mesh Networks for Asymmetric Traffics

W. Wattanavarakul

Department of Electrical Engineering
Chulalongkorn University
Bangkok, Thailand, 10330
Warangrat.W@student.chula.ac.th

S.Segkhoonthod

National Electronics and Computer
Technology Center, (NSTDA)
Bangkok, Thailand, 10400
sak@gits.net.th

L. Wuttisittikulkij

Department of Electrical Engineering
Chulalongkorn University
Bangkok, Thailand, 10330
wlunchak@chula.ac.th

Abstract—This paper proposes new mathematical formulations for solving the multicast routing and wavelength assignment (MC-RWA) in multifiber WDM mesh networks for asymmetric traffics. We investigated MC-RWA problems in three different MC-RWA network design approaches namely Light-Tree (LT), Partial Virtual Light-Tree (PVLТ), and Virtual Light-Tree (VLT) meshed network. Given a static multicast asymmetric traffic set, the number of wavelengths a fiber can support, and the network design approach (LT, PVLТ, or VLT), we seek to realize the minimal number of fiber requirements. Numerical results on a small test network are given for highlighting the key characteristics of each MC-RWA strategies. Based on the test network, the numerical results demonstrate that in most cases PVLТ and VLT networks require fewer fibers than LT network, signifying that wavelength conversions can be useful for reducing fiber requirements in asymmetrical multicast environments using mesh design approaches. Nonetheless, conversion is not always needed, as partial wavelength converter allocation appears to be as effective as full allocation with respect to capacity requirement under certain network environments.

I. INTRODUCTION

Demand for network bandwidth has been increasing dramatically in recent years. Wavelength Division Multiplexing (WDM) is a promising technology that is capable of satisfying this explosive bandwidth demands as it provides an economical and practical way of utilizing the huge bandwidth of a fiber. WDM networks offer large capacities to support broadband and high-quality services, among which multicast services such as distance learning and video conferencing are becoming more and more prevalent. Multicast is a transport of data information from a source node to a set of destination nodes in a network. In optical networks, multicast can be theoretically supported by using the concept of lightpath, a widely used transmission in unicast system. When adopting the concept of lightpath to multicast environment, the source node creates a dedicated connection to each multicast destination node separately. However, such approach poses a serious drawback, as excessive number of transmitters and receivers are required across the multicast area. As a result, a

This work was supported in part by the Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST) and Cooperative Project between Department of Electrical Engineering and Private Section for Research and Development for the financial support.

light-tree concept was proposed in [1] in order to resolve this problem. A light-tree, which is a tree in virtual topology, enables communications between a source node and a set of destination nodes. It is a point-to-multipoint all optical channel which may span multiple fiber links. Each fork node of the tree is a multicast-capable optical switch, where a power splitter [2]-[3] is used to replicate and split an input optical signal into multiple signals which are then forwarded to output ports without electrical conversions. Hence, light-trees facilitate point to multipoint communications (i.e., multicast).

In literature, there are numerous research papers [4]-[9] in the area of efficient multicast routing and wavelength assignment (MC-RWA). However, most works are rather diverse, as they look and aim at distinct design aspects for different purposes and system assumptions. For instance, references [4]-[5] propose algorithms for MC-RWA in single-hop system in which no wavelength conversion is allowed. The objective of [4] is to maximize the number of multicast connections (this will be termed as the Max MC-RWA) that may be established in a WDM network. On the contrary, the objective of [5] is the minimization of the number of wavelengths used in establishing multicast connections (called Min MC-RWA) with end-to-end delay bounded. It also assumes a bidirectional communication, where data information is transmitted in two directions, i.e. from the source node to the destination nodes and vice versa. Algorithms for finding multicast trees with the objective of minimizing number of wavelengths are also discussed in [6]-[7]. However, these researches are for multi-hop systems, where wavelength conversion is permitted. In [6], four heuristic algorithms are proposed to construct a source-based multicast light-forest consisting of one or more multicast trees in WDM networks with sparse splitting. The performance indicators of these algorithms are compared in terms of the number of wavelengths used, the bandwidth consumed per forest, and number of hops from a source node to multicast members. The multicast routing problem in sparse splitting network is also presented in [7]. However, the objective of [7] aims to minimize the total number of fibers used in establishing the multicast sessions with the assumption that the multicast capable nodes are evenly distributed throughout the network. Heuristic algorithms based on Tabu Search are applied. Although the numerical results indicate that the proposed heuristic algorithms can reduce the number of fibers used for

routing a multicast session, we note that using heuristic methods give sub-optimal solutions.

In all the above papers, although there are many problem formulations and solution methodologies that get efficient multicast routing and wavelength assignment, these algorithms consider only single-fiber systems where only a pair of fibers one of each direction is placed in each physical link. Therefore, these algorithms may not be applied to network with multifiber networks. The concepts of MC-RWA for multifiber networks have only recently been pursued [8]-[9]. However, it appears that most of papers that deal with multifiber networks consider only symmetric traffic which may not suitable for some applications such as WEB/WAP or video on demand which is asymmetrical in natural traffic. Moreover, there objectives aim to find the Max MC-RWA, which is finding maximal number of multicast traffic that the networks can support, in stead of minimizing the number of fibers need to support multicast traffic, which is finding minimal network resources to support all multicast traffic. Since MC-RWA in multifiber networks is a complex problem, and being essential in practical environment, yet research progress in this area remains limited as compared to that for single-fiber networks.

In this paper, we propose MC-RWA problem formulations in multifiber network environment with the objective of minimizing total number of fibers needed to support multicast asymmetric traffic. Three different wavelength assignment strategies namely Light-Tree (LT) strategy, Partial Virtual Light-Tree (PVLTL) strategy, and Virtual Light-Tree (VLT) strategy [10] are examined.

The remainder of this paper is organized as follows. In Section II, the concepts and strategies of MC-RWA in three kinds of WDM network are introduced. The formulation to solve the MC-RWA based on ILP formulation will be presented in Section III. In Section IV, numerical examples and results will be shown. Finally, we conclude this paper in Section V.

II. MULTICAST ROUTING AND WAVELENGTH ASSIGNMENT (MC-RWA)

In this paper, a concept of light-tree applied to serve multicast sessions is defined as a combination of optical branches. An optical branch is defined as a lightpath provided to connect between two nodes that are members of the same multicast session and allows data information to pass through it only in one direction. Therefore, in order to reach all members of the multicast session, the optical branches to form the light-tree must cover all members of the multicast session and the root node of a light-tree is the source node, while the end nodes of each optical branch are the destination nodes of the light-tree. It is clear that an optical branch defined in this paper is similar to those in [11] except that this paper assumed unidirectional branch whereas [11] assumed bidirectional branch. Fig. 1 shows an example of a light-tree in accordance with the definition.

As illustrated, Fig. 1 shows a multicast session with a source node 1 and a set of destination nodes 3, 4, and 6.

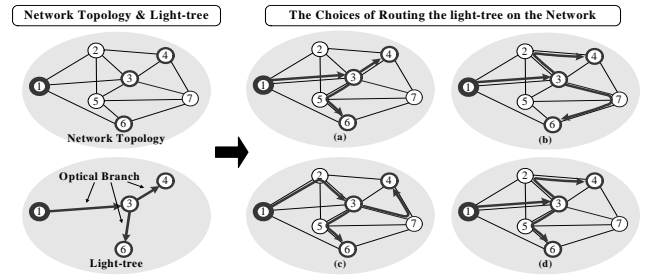


Figure 1. An example of a light-tree spanning on the network for unidirectional communications.

Therefore, one possible light-tree composes of three optical branches; 1-3, 3-4, and 3-6. We assume that the nodes of light-tree which are capable of replicating and splitting the data information must be the members of multicast session. Hence, in this example, optical power splitter must be attached at node 3. From Fig. 1, the sample light-tree is created on the logical topology of the optical network. Thus, there exist choices to accommodate the light-tree on the physical topology. Four different routing patterns for accommodating the light-tree are given as the examples.

A. Wavelength allocation strategy

From the wavelength assignment perspective, there are several distinct assignment policies that can be employed. In this paper, three different wavelength allocations are classified according to the wavelength conversion capability of each node.

1) Light-Tree (LT) strategy:

When setting up a light-tree on an optical network, only a single light of the same wavelength is assigned to every optical branch concatenated to form the light-tree. Such a strategy requires least complicated node configuration as no wavelength converter is needed.

2) Partial Virtual Light-Tree (PVLTL) strategy:

An optical network using the PVLTL strategy has an ability to assign wavelengths to a light-tree based on a branch-by-branch fashion, i.e., a wavelength on a branch serving the light-tree can differ from that of other branches, but the wavelength along the links of a branch cannot be changed. With this scheme, optical networks must therefore include wavelength converters at the multicast member nodes.

3) Virtual Light-Tree (VLT) strategy:

For this strategy, optical networks are able to assign several wavelengths to a light-tree as with the PVLTL strategy. However, optical networks using this strategy will allocate the wavelengths based on a link-by-link fashion instead, which is less stringent than the PVLTL strategy. Namely, a wavelength of a physical link of a light-tree can differ from that of other physical links. In effect, the number of wavelength converters used for the VLT strategy would be more than that for the PVLTL strategy.

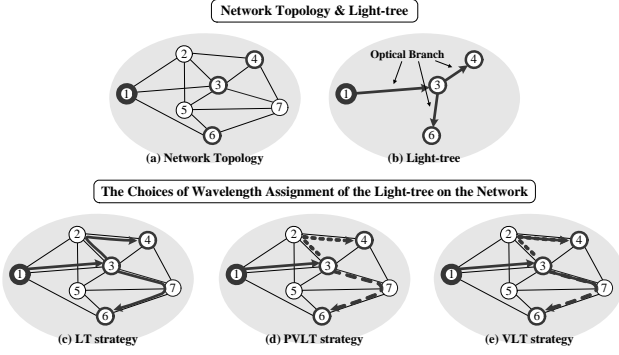


Figure 2. Multicast wavelength assignment strategy: (a) network topology, (b) a light-tree composed of three optical branches, (c) LT strategy, (d) PVL strategy, and (e) VLT strategy. Different styles of line refer to different wavelengths allocated for the sample light-tree.

To clearly understand the mechanism of each wavelength assignment strategy, an illustrative example of allocating wavelengths for a light-tree is given in Fig. 2.

III. LIGHTPATH ALLOCATION: ILP FORMULATIONS

In this section, we will give integer linear program (ILP) formulations of the MC-RWA problem for multifiber networks with the objective of minimizing the total number of fibers. Table I introduces the network parameters and network variables used to form the proposed ILP formulations.

A. Network Model

The WDM network is modeled by an directed graph $G = (N, L)$, where N denotes a set of optical nodes, $i = \{1, 2, 3, \dots, N\}$, with $|N| = N$. Meanwhile, the physical links are represented by a set of directed links, $L \subset N \times N$, where a physical link ij is in the set L if there exists a link from nodes i to node j . Each link may consist of a bundle carrying unidirectional fibers for data transmissions in one direction of the link. Moreover, each optical fiber is limited to multiplexing the number of wavelengths up to M .

B. Light-Tree Creation Formulation

To determine an optimal light-tree T_k for supporting multicast request, $r_k(s_k, D_k)$, we construct a directed graph $G_k = (N_k, A_k)$ corresponding to $r_k(s_k, D_k)$. The set of nodes N_k has elements consisting of s_k and the set of destinations, D_k , namely $N_k = \{i \in N_k | i = s_k \vee i \in D_k\}$. Meanwhile, the set of logical directed arcs A_k is defined mathematically as $A_k = \{ij \in A_k | i, j \in N_k \wedge i \neq j\}$.

Based on the graph, $G_k = (N_k, A_k)$, we develop the light-tree formulation by employing a concept of transforming the graph G_k to the optimal light-tree T_k . Since the light-tree should have $|N_k| - 1$ optical branches, the first two constraints of the formulation are

TABLE I. NETWORK PARAMETERS AND NETWORK VARIABLES

Symbol	DESCRIPTION
N	total number of nodes of the network;
L	total number of physical links of the network;
$K = R $	total number of multicast traffic requests of the network;
$r_k(s_k, D_k)$	multicast traffic request r_k from source s_k to set of destinations D_k ;
t_{r_k}	total traffic demand of the multicast traffic request r_k in units of wavelength channels;
Δ	the fanout of optical splitters;
M	a maximal number of wavelengths per fiber;
$\xi_{sd, p}^{mn}$	takes the value of one if route p of node pair mn can be used as an optical branch of node pair sd , and zero, otherwise;
$\delta_{ij, p}^{sd}$	takes the value of one if route p of node pair sd passes through link ij , and zero, otherwise;
P_{mn}	a set of candidate routes of node pair sd ;
f_{ij}	total number of optical fibers on physical link ij ;
$x_{r_k}^{ij}$	a Boolean variable, an optical branch between nodes i and j to form a light-tree for carrying multicast demand r_k ;
$a_{r_k, p}^{mn}$	a candidate physical route p of node pair sd for multicast demand r_k (for the VLT system);
$a_{r_k, p, \lambda}^{mn}$	a candidate physical route p of node pair sd occupying wavelength λ for multicast demand r_k (for the LT and PVL strategy);
I_∞	an arbitrarily high constant integer;
$W_{r_k, \lambda}$	a Boolean variable, a wavelength channel λ occupied by multicast demand r_k (only for the LT system);

$$\sum_{ij \in A_k} x_{r_k}^{ij} = |N_k| - 1, \quad \forall r_k \in R \quad (1)$$

$$x_{r_k}^{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall ij \in A_k, \forall r_k \in R \quad (2)$$

Next, based on the definition of a tree, all member nodes of the light-tree T_k should be connected. However, due to the limitation of the performance of the optical splitters which is characterized by the fanout Δ , the summation of all outgoing arcs of each member node of the light-tree T_k should satisfy this limit by using the constraints:

$$1 \leq \sum_{j: ij \in A_k} x_{r_k}^{ij} \leq \Delta, \quad \forall i \in N_k, \forall r_k \in R \quad (3)$$

Moreover, to ensure that the optimal light-tree T_k should not contain looping lightpaths involving either the source node or the set of destination nodes of the connections, we express the limitation of an incoming arc of each member node of the light-tree T_k in terms of the constraints:

$$\sum_{ij \in A_k} x_{r_k}^{ij} = \begin{cases} 0, & j = \text{source} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad \forall j \in N_k, \forall r_k \in R \quad (4)$$

Finally, to ensure that the optimal light-tree T_k should not contain a cycle and to avoid selecting two optical branches which connect the same node pairs, two counter direction optical branches can not be selected simultaneously.

$$x_{r_k}^{ij} + x_{r_k}^{ji} \leq 1, \quad \forall ij \in A_k, \forall r_k \in R \quad (5)$$

C. Mesh Network Design Formulation

For the MC-RWA problem definition of the mesh network design, we can describe the corresponding ILP formulation based on an optical network $G = (N, L)$ and the light-tree constraints introduced above as follows:

1) LT wavelength assignment strategy

The objective is to minimize the total number of fiber requirements:

$$\min: \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (6)$$

Subject to the constraints (1) to (5), and:

$$\sum_{p \in P_{mn}} \sum_{\lambda=1}^M a_{r_k, p, \lambda}^{mn} \xi_{sd, p}^{mn} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (7)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{mn}} a_{r_k, p, \lambda}^{mn} \xi_{sd, p}^{mn} \delta_{ij, p}^{sd} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L \quad (8)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{r_k, \lambda} = 1, \quad \forall r_k \in R \quad (9)$$

$$a_{r_k, p, \lambda}^{mn} \xi_{sd, p}^{mn} \leq I_{\infty} \times W_{r_k, \lambda}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (10)$$

$$W_{r_k, \lambda} \in \{0, 1\}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R \quad (11)$$

$$a_{r_k, p, \lambda}^{mn} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall p \in P_{mn}, \forall r_k \in R \quad (12)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (13)$$

As formulated for the LT wavelength allocation strategy, the objective function (6) is the minimization of the total number of optical fibers needed to support the multicast demand set, R . Constraint sets (1)-(5) as introduced in the pervious subsection are contained in the formulation to find the optimal light-trees. Constraint (7) ensures that exactly physical routes are selected and wavelengths must be assigned to them. Constraint set (8) ensures that for any physical link, the channel capacity of each wavelength can accommodate the traffic routed on it. Constraint (9) states that only a single wavelength must be selected to support each multicast session. Constraint (10) enforces that no physical path selected from constraint (7)

is permitted to route on wavelength λ , unless the multicast session selects wavelength λ . Finally, constraints (11)-(13) limit the network variables of the wavelength variables, the physical routes and optical fibers to be in the nonnegative integer set, Z^+ .

2) PVLW wavelength assignment strategy

The objective is to minimize the total number of fiber requirements:

$$\min: \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (14)$$

Subject to the constraints (1) to (5), and:

$$\sum_{p \in P_{mn}} \sum_{\lambda=1}^M a_{r_k, p, \lambda}^{mn} \xi_{sd, p}^{mn} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (15)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{mn}} a_{r_k, p, \lambda}^{mn} \xi_{sd, p}^{mn} \delta_{ij, p}^{sd} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L \quad (16)$$

$$a_{r_k, p, \lambda}^{mn} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall p \in P_{mn}, \forall r_k \in R \quad (17)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (18)$$

As we can see, the constraints of the PVLW system resemble those of the LT system, except the constraints (9)-(11) that do not exist in PVLW strategy.

3) VLT wavelength assignment strategy

The objective is to minimize the total number of fiber requirements:

$$\min: \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (19)$$

Subject to the constraints (1) to (5), and:

$$\sum_{p \in P_{mn}} a_{r_k, p}^{mn} \xi_{sd, p}^{mn} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (20)$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{mn}} a_{r_k, p}^{mn} \xi_{sd, p}^{mn} \delta_{ij, p}^{sd} \geq 0, \quad \forall ij \in L \quad (21)$$

$$a_{r_k, p}^{mn} \in Z^+, \quad \forall p \in P_{mn}, \forall r_k \in R \quad (22)$$

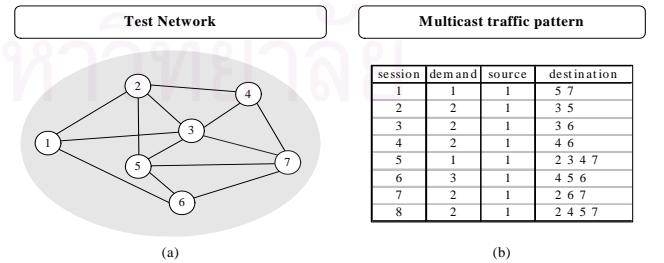


Figure 3. Experimental network topology and their multicast traffic demand. (a) the small test network, (b) multicast traffic pattern.

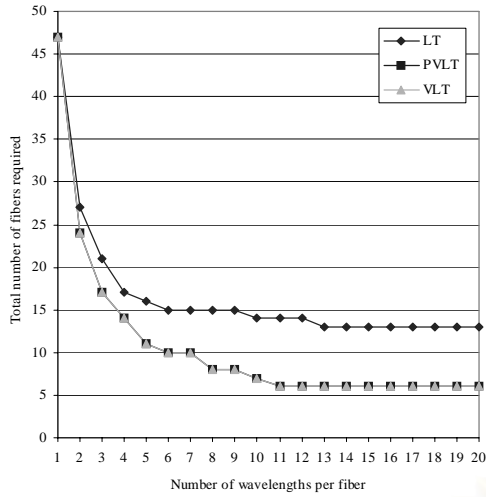


Figure 4. Numerical result in term of number of fibers required.

$$f_{ij} \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall ij \in L \quad (23)$$

The objective function (19) is to minimize the total number of optical fibers needed to support the multicast demand set, R . Constraint sets (1)-(5) are used to determine the optimal light-trees. Constraint (20) expresses that exactly physical routes are selected for optical branches of the light-trees. Due to the link-by-link wavelength assignment of VLT, constraint set (21) states that the wavelength capacity of each physical link should be sufficient to meet the multicast traffic load crossing to it. Finally, constraints (22) and (23) ensure that the variables representing the physical routes and optical fibers are nonnegative integer.

IV. NUMERICAL EXAMPLES AND RESULTS

In this section, we present the numerical results obtained from the ILP formulations by using a small test network of 7 nodes and 13 links. The simulation network topology and their multicast traffic demand are shown in Fig. 3 (a) and (b), respectively. All the ILP models implemented for the

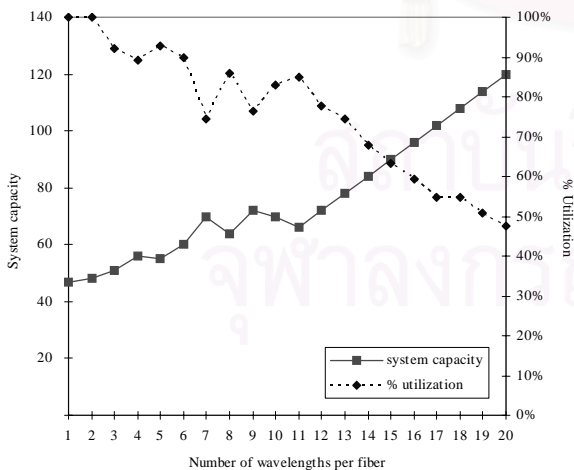


Figure 5. System capacity and its utilization versus the number of wavelengths per fiber, M in the case of VLT.

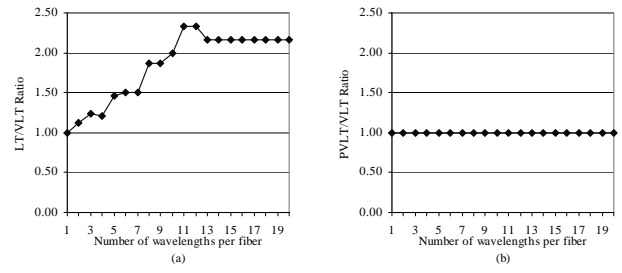


Figure 6. Ratios of fiber requirements among the LT, PVL, and VLT wavelength assignment techniques. (a) LT to VLT fiber requirement ratio and (b) PVL to VLT fiber requirement ratio.

discussion are solved by the CPLEX optimization package [12]. Throughout these simulations, we let the parameter fanout, Δ equal to 3. Moreover, the number of destination nodes of each multicast session is varied from 2 to 4. By the optimization process, the goal is to find minimal number of fiber requirements.

Let us now investigate the results for three network design approaches. Fig. 4 plots the total number of fibers required versus the number of wavelengths per fiber (M). It is clear that graph characteristics of three different design approaches exhibits similar trend. Fiber requirements tend to decrease as the values of M increase. This is as expected because when M increases the channel capacity per fiber is increased and thus more multicast sessions can be simultaneously supported in the same fiber, exemplifying the key advantage of WDM technology. For example, if the network employs fibers with $M = 2$, the total number of fibers can be reduced to approximately half of that of $M = 1$. Nevertheless, when the number of wavelengths multiplexed is further increased say up to 6 the number of fibers is no longer proportionally reduced. Indeed, at $M \geq 11$ no further fiber reduction is observed. Such behavior can be explained clearly by measuring the utilization of system resources and the available total system capacity; this is shown in Fig. 5. As we can see, for large values of M the utilization gets deteriorated. For example, the network resource utilization could be as low as 50% of its total available capacity at $M = 20$.

When comparing between three wavelength allocation

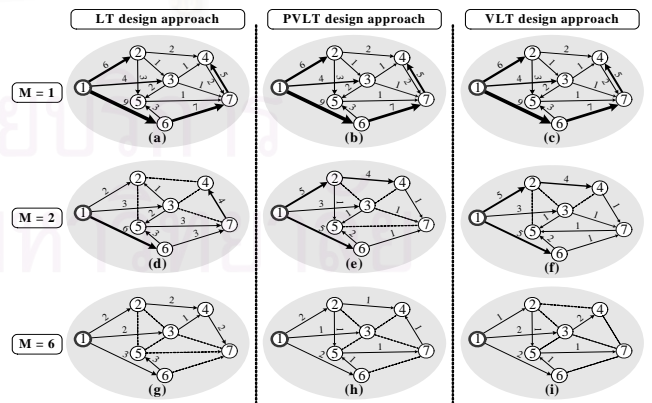


Figure 7. Fiber requirements for LT, PVL, and VLT design approach. (a)-(c) Fiber requirements for $M = 1$, (d)-(f) Fiber requirements for $M = 2$, and (g)-(i) Fiber requirements for $M = 6$.

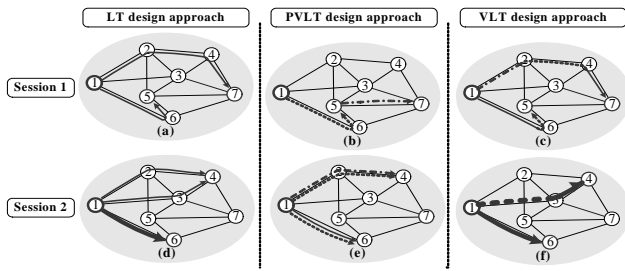


Figure 8. Examples of routing pattern for $M = 6$. (a)-(c) routing pattern of multicast session 1, and (d)-(f) routing pattern of multicast session 2.

schemes. The results in terms of the LT to VLT fiber requirement ratio and the PVL to VLT fiber requirement ratio are shown in Fig. 6 (a) and (b), respectively. At $M = 1$, the number of fibers required by the LT, PVL and VLT are equal. In principle when $M = 1$, all three systems are effectively identical, hence resulting in exactly the same network design outcome. For larger values of M , the LT become less effective with respect to network resource allocation. For example, fiber requirement for the LT case is 2.33 times more than that is required by the VLT technique for $M = 1$. This simulation results suggest that in multicast environment with asymmetric traffic the flexibility in assigning wavelengths offered by the conversion devices could potentially enable network design and optimization to be more efficient.

To further understand how routing and wavelength assignment actually behaves for different network design approaches, we have investigated the details of their resource allocation and a few results are highlighted in Fig. 7. First, for $M = 1$ design outcomes of LT, PVL and VLT are all the same. Most links are placed with unidirectional fibers, except for one link between nodes 4 and 7. Note that the number placed adjacent to each link represent the number of fibers. These results exemplify that the mathematical formulation derived here can be used to design multicast optical networks without assumption that fibers must be placed in pair, accordingly providing a highly effective way to accommodate asymmetric traffic. For $M = 2$, it appears that the number of fibers required on each link in most cases is reduced with a few links no longer used. It is observed that not only the number of fibers required is different in each design but also the patterns of unused links vary. It is interesting to understand why these design approaches give rather different results. For the VLT, which is the most flexible and effective method, it appears by examining the average number of links required per session that the VLT is most frequently able to find very effective tree to accommodate the multicast traffic. For the PVL which is less flexible in terms of conversion capability it turns out that tree selected by the PVL is slightly longer, implying less effective allocation. The LT is most limited in resource allocation as it has no wavelength conversion at all. It is found that wavelength conflicts occur rather often, causing the LT to increase the number of fibers whilst aiming for short tree. These scenarios can be clearly seen in the case when $M = 6$. Moreover, when consider routing and wavelength in more details, the examples of routing pattern for $M = 6$ with multicast session 1 and 4 are considered. Figure 8 illustrates

that to achieve the optimal network resources, multicast traffic is sometimes splits their traffics into more than one path. These scenarios most occur in LT and PVL case where wavelength continuity is concerned. Thus, more number of fibers is needed.

V. CONCLUSION

In this paper, we have presented mathematical formulations for solving the MC-RWA problem with the objective of minimizing total number of fibers required to support multicast asymmetric traffic in multifiber WDM mesh networks. Three network design approaches namely Light-tree (LT), Partial Virtual Light-tree (PVL), and Virtual Light-tree (VLT) mesh network are considered. Based on the small test network, the numerical results demonstrate that for multicast WDM networks, LT network requires more fibers than PVL and VLT network, implying that having wavelength conversions can help reduce the number of fiber requirements. When comparing between PVL and VLT, it appears that they both offer very similar results. Consequently, it is useful to consider wavelength conversions as a possible means to assist in network fiber saving for multifiber mesh design approaches. However, the extra cost that shall be considered is the wavelength conversion cost.

REFERENCES

- [1] L. H. Sahasrabudde and B. Mukherjee, "Light-trees: Optical multicasting for improved performance in wavelength-routed networks," *IEEE Communication Magazine*, pp. 67-73, February 1999.
- [2] W.S. Hu and Q.J. Zeng, "Multicast optical cross connects employing splitter-and-delivery switch," *IEEE Photonic Technology Letters*, vol. 10, pp. 970-972, July 1998.
- [3] M. Ali and J.S. Deogun, "Cost-effective implementation of multicasting in WRN," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, December 2000.
- [4] J. He, S. -H. Chan and D. Tsang, "Routing and wavelength assignment for WDM multicast networks", *IEEE. GLOBECOM 2001*, vol. 3, pp. 1536-1540, 2001.
- [5] X. H. Jia, D.Z. Du, X. D. Hu, M. K. Lee, and J. Gu, "Optimization of Wavelength Assignment for QoS Multicast in WDM Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, no. 2, February 2001.
- [6] X. Zhang, J. Wei, C. Qiao, "Constrained Multicast Routing in WDM Networks with Sparse Light Splitting," *INFOCOM 2000*, pages 100-110, 2000.
- [7] S. Yan, M. Ali, and J. Deogun, "Route Optimization of Multicast Sessions in Sparse Light-splitting Optical Networks," *IEEE*, 2001.
- [8] M. Saad, and Z. Q. Luo, "On the Routing and Wavelength Assignment in Multifiber WDM Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 9, November 2004.
- [9] 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*, vol. 17, no. 5, May 1999.
- [10] C. Boworntummarat, "Wavelength Routing and Optical Layer Network Protection Approaches Against Single Link Failures for Multicast Traffic on WDM Networks," A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 2003.
- [11] C. Boworntummarat, L. Wuttisittikulij, and S. Segkhoonthod, "Light-tree based protection strategies for multicast traffic in transport WDM mesh networks with multi-fiber systems," *Proc. IEEE ICC'04*, June 2004.
- [12] ILOG CPLEX User's manual. Available: <http://www.cplex.com>

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรางรัตน์ วัฒนวรากุล เกิดวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ.2522 ที่จังหวัดเชียงใหม่ เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ในปีการศึกษา 2541 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ในปีการศึกษา 2544 เข้าทำงานที่บริษัท ทู คอรัปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ในตำแหน่งวิศวกรในปี 2545 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2546 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย