


การออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกที่คำนึงถึงการป้องกันโครงข่าย
เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย



นางสาว ภัทรินทร์ ลีลารัมย์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-5203-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF WDM NETWORKS SUPPORTING MULTICAST TRAFFIC
WITH SINGLE LINK FAILURE PROTECTION



Miss Pattarin Leelarusmee

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-5203-2

ภัทรินทร์ ลีลาวัศมี : การออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกที่คำนึงถึงการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย (DESIGN OF WDM NETWORKS SUPPORTING MULTICAST TRAFFIC WITH SINGLE LINK FAILURE PROTECTION) อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ฉัตรฉัตร วุฒิสถิตกุลกิจ, 93 หน้า. ISBN 974-17-5203-2.

วิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาการออกแบบโครงข่าย WDM แบบมัลติคาสต์ที่สามารถปกป้องความเสียหายได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย 4 วิธี ได้แก่ วงแหวนหนึ่งวงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันหนึ่งเซสชัน (OFO) วงแหวนหนึ่งวงสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (OFA) วงแหวนจำนวนหนึ่งสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (MFA) และการกู้คืนโดยการเชื่อมต่อ (JPR) วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือพิจารณาและเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ รวมทั้งทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แต่ละวิธีในด้านความง่ายในการจัดการควบคุมโครงข่ายและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ยิ่งไปกว่านั้นวิทยานิพนธ์นี้ยังวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นว่ามีผลอย่างไรต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมของระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้ Integer Linear Programming (ILP) จะถูกใช้เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยค่อนข้างนานแม้ว่าโครงข่ายนั้นจะเป็นโครงข่ายขนาดเล็ก ดังนั้นอัลกอริทึมฮิวริสติกจึงได้ถูกนำเสนอและนำมาประยุกต์ใช้ในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่

จากการวิเคราะห์ผลเฉลยสามารถสรุปได้ว่า การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี JPR เป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่เหมาะสมที่สุดโดยต้องการเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายต่ำสุด ส่วนวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MFA จะเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนในการจัดการสูงสุดและเป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่บนพื้นฐานของวงแหวนที่ต้องการเส้นใยแก้วนำแสงต่ำสุด และไม่มีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของวงแหวนเหมือนกับการจัดสรรเส้นทางใหม่บนพื้นฐานของวงแหวนแบบอื่น ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา...2547.....

4270452021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: WDM / MULTICAST / PROTECTION / OFO / OFA / MFA / JPR

PATTARIN LEELARUSMEE: DESIGN OF WDM NETWORKS SUPPORTING MULTICAST TRAFFIC WITH SINGLE LINK FAILURE PROTECTION. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ. Ph.D., 93 pp. ISBN 974-17-5203-2.

This thesis studies four designing schemes with single link failure protection capability for WDM networks, namely one ring for one multicast-session (OFO), one ring for all multicast-session (OFA), multi ring for all multicast-session (MFA) and joined part recovery (JPR). Key aspects that are taken into consideration and comparison of the designs include a total fiber requirement, ease of operation and practical feasibility. Moreover, in this thesis, the influence of wavelength conversion and a number of wavelengths are multiplexed in a fiber on the system designs is also analyzed. The mathematical models based on integer linear programming (ILP) are used as a solution technique for obtaining the total fiber requirement of each designing schemes. Since the ILP formulations are computational expensive even for the small size networks, heuristic algorithms are also proposed and applied to large-scale networks.

Based on the simulation results, the JPR is the most appropriate protection scheme that can accomplish the lowest total fiber requirement. Based on ring-based protection schemes, the MFA is the most complicate scheme that requires the lowest number of fiber on the system. In addition, unlike other ring-based protection schemes, the MFA has no limitations on the applicable size of ring.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

Academic Year...2004.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ. ดร. วัลลภกร วุฒิสัทธาภิบาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยด้วยดีเสมอมา รวมทั้งการกระตุ้นเอาใจใส่ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย บวรธรรมรัตน์ คุณสถิตพงษ์ พุทธิประเสริฐ คุณกณิกา สุขสมบุญ คุณจิราภา ทรงธนศักดิ์ และคุณอนุชิต จตุรงค์ปัญญา สำหรับคำปรึกษา กำลังใจ และความช่วยเหลือตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ชั้น 13 ตึกวิศวกรรมไฟฟ้า4 ทุกท่าน โดยเฉพาะเพื่อน ๆ ในชั้นปีเดียวกันที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และข้อคิดที่ดีมาโดยตลอด ทำให้การศึกษปริญญามหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเต็มไปด้วยคุณค่าและความหมายดี ๆ สำหรับผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกๆ ท่านในครอบครัว ของผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนทางการเงินและกำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมาจนสามารถสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 แนวทางในการออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกที่ค้ำเนื่องถึงกรณีที หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย.....	7
2.1 โครงข่าย WDM.....	7
2.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDM.....	9
2.3 การจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย.....	12
2.3.1 เทคนิคการปกป้องความเสียหายบนพื้นฐานของวงแหวน (Ring-based Protection Techniques).....	15
2.3.1.1 วิธีใช้วงแหวนหนึ่งวงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันหนึ่งเซสชัน (One Ring for One Multicast-session, OFO).....	17
2.3.1.2 วิธีใช้วงแหวนหนึ่งวงสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (One Ring for All Multicast-session, OFA).....	18
2.3.1.1 วิธีใช้วงแหวนจำนวนหนึ่งสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (Multi Ring for All Multicast-session, MFA).....	19
2.3.2 เทคนิคการปกป้องความเสียหายบนพื้นฐานของเส้นทาง (Path-based Protection Techniques).....	20

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3	แบบจำลองคณิตศาสตร์..... 22
2.4	แบบจำลองของโครงข่าย (Network Model)..... 22
2.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย ต้องการ..... 23
3.2.1	การจำลองปัญหาด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment..... 26
3.2.1.1	การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี OFO..... 26
3.2.1.2	การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี OFA..... 27
3.2.1.3	การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี MFA..... 28
3.2.1.4	การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี JPR..... 30
3.2.2	การจำลองปัญหาด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment..... 31
3.2.2.1	การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี OFO..... 32
3.2.2.2	การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี OFA..... 33
3.2.2.3	การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี MFA..... 35
3.2.2.4	การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี JPR..... 37
3.3	ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่กำหนดในการหาผลเฉลย..... 38
4	อัลกอริทึมฮิวริสติก..... 41
4.1	การทำงานของอัลกอริทึมฮิวริสติก..... 41
4.2	อัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO..... 42
4.3	อัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFA..... 44
4.4	อัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MFA..... 45
4.5	อัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JPR..... 47

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย.....	50
5.1 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	50
5.1.1 การเปรียบเทียบในเชิงความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์...	57
5.1.2 การเปรียบเทียบในเชิงเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลอง.....	60
5.1.3 การเปรียบเทียบในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย ต้องการ.....	61
5.1.4 ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง ทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ.....	67
5.1.5 การเปรียบเทียบในเชิงต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพการใช้ เส้นใยแก้วนำแสง.....	68
5.2 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยของอัลกอริทึมฮิวริสติก.....	71
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	78
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	78
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	92

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1	ตัวย่อของแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่..... 38
ตารางที่ 3.2	พารามิเตอร์และตัวแปรที่จะต้องกำหนดให้และที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 39
ตารางที่ 3.3	จำนวนตัวแปร (Number of Variables, N_v) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 39
ตารางที่ 3.4	จำนวนสมการ (Number of Variables, N_c) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 40
ตารางที่ 5.1	จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N_7L (ก) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย NWC ได้รับความเสียหาย (ข) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย WC ได้รับความเสียหาย.... 51
ตารางที่ 5.2	เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N_7L (ก) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย NWC ได้รับความเสียหาย (ข) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย WC ได้รับความเสียหาย..... 53
ตารางที่ 5.3	จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N_13L (ก) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย NWC ได้รับความเสียหาย (ข) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย WC ได้รับความเสียหาย..... 54
ตารางที่ 5.4	เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N_13L (ก) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย NWC ได้รับความเสียหาย (ข) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย WC ได้รับความเสียหาย..... 56

ตารางที่ 5.5	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N_7L ต้องการ เมื่อทำการหาผลเฉลี่ยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ILP) และจากอัลกอริทึมที่ออกแบบไว้ (Heu) (ก) กรณีโครงข่าย NWC (ข) กรณีโครงข่าย WC.....	73
ตารางที่ 5.6	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N_13L ต้องการ เมื่อทำการหาผลเฉลี่ยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ILP) และจากอัลกอริทึมที่ออกแบบไว้ (Heu) (ก) กรณีโครงข่าย NWC (ข) กรณีโครงข่าย WC.....	74



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น.....	8
รูปที่ 2.2	SaD สวิตช์ขนาด PXP.....	8
รูปที่ 2.3	MC-OXC ขนาด 3X3 บนพื้นฐานของ SaD สวิตช์.....	9
รูปที่ 2.4	การส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ในลักษณะการให้บริการแบบ Video-on-demand โดยมีการแสดงการเชื่อมต่อของมัลติคาสต์เซสชันต่าง ๆ.....	12
รูปที่ 2.5	ความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในการรับส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์.....	14
รูปที่ 2.6	แผนภูมิรูปแบบการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง...	15
รูปที่ 2.7	การจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธีใช้วงแหวนในการป้องกันความเสียหาย.....	16
รูปที่ 2.8	วิธีการปกป้องความเสียหายแบบ OFO.....	17
รูปที่ 2.9	วิธีการปกป้องความเสียหายแบบ OFA.....	18
รูปที่ 2.10	วิธีการปกป้องความเสียหายแบบ MFA.....	19
รูปที่ 2.11	วิธีการปกป้องความเสียหายแบบ JPR.....	20
รูปที่ 4.1	อัลกอริทึมฮิวริสติก.....	42
รูปที่ 4.2	ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO.....	43
รูปที่ 4.3	ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFA.....	44
รูปที่ 2.4	ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MFA.....	47
รูปที่ 4.5	ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JPR.....	49
รูปที่ 5.1	โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 5N_7L (ข) โครงข่าย 7N_13L....	50
รูปที่ 5.2	กราฟฟิสิกของโครงข่าย (ก) โครงข่าย 5N_7L (ข) โครงข่าย 7N_13L	57
รูปที่ 5.3	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L ต้องการ (ก) กรณีสรางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment Jointly (ข) กรณีสรางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment.....	61
รูปที่ 5.4	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N_7L ประเภท NWC ต้องการในกรณีสรางแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment	65

รูปที่ 5.5	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N_7L ประเภท WC ต้องการ ในกรณีสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment.....	66
รูปที่ 5.6	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N_13L ประเภท NWC ต้องการ ในกรณีสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment.....	66
รูปที่ 5.7	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N_13L ประเภท WC ต้องการ ในกรณีสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment.....	67
รูปที่ 5.8	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมของโครงข่ายแบบ WC ต่อจำนวนเส้นใย แก้วนำแสงโดยรวมของโครงข่ายแบบ NWC (WC/NWC fiber ratio) ของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment.....	68
รูปที่ 5.9	ต้นทุนของโครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L (ก) กรณีสร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment Jointly (ข) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment.....	69
รูปที่ 5.10	ประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L (ก) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment Jointly (ข) กรณีสร้างแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment.....	71
รูปที่ 5.11	โครงข่าย Euro-core (โครงข่าย 11 โหนด 25 ข่ายเชื่อมโยง).....	74
รูปที่ 5.12	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย Euro-core ทั้งกรณีโครงข่าย NWC และ WC ต้องการ และอัตราส่วนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวม ของโครงข่าย WC ต่อโครงข่าย NWC (WC/NWC fiber ratio).....	75
รูปที่ 5.13	ต้นทุนและประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย Euro-core กรณีโครงข่าย NWC และ WC.....	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ด้วยความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคมทำให้อินเทอร์เน็ตได้กลายเป็นเทคโนโลยีทางสารสนเทศที่มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการสื่อสารแบบไร้พรมแดน เพื่อเป็นการตอบสนองของความต้องการในการบริโภคข่าวสารข้อมูลของผู้ใช้ที่มีแนวโน้มจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในอนาคต จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตรูปแบบต่าง ๆ ขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การให้บริการ e-Business การศึกษาทางไกล (Distance Learning) การประชุมทางไกล (Teleconference) การตรวจรักษาโรคทางไกล (Telenursing) การส่งข้อมูลวิดีโอไปยังผู้รับที่ร้องขอ (Video-on-demand) และเกมส์ออนไลน์ (Game Online) ด้วยความสะดวกรวดเร็วในการใช้บริการประกอบกับค่าใช้จ่ายที่มีปริมาณไม่มากเมื่อเทียบกับความสะดวกที่ผู้ใช้บริการจะได้รับทำให้บริการดังกล่าวนี้ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากทั้งในด้านของธุรกิจ การศึกษา ความบันเทิง รวมทั้งการใช้ชีวิตประจำวัน เพื่อที่จะสามารถรองรับบริการในรูปแบบต่าง ๆ นี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงข่ายที่ใช้เป็นตัวเชื่อมโยงในการส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้บริการและผู้ใช้บริการต้องเป็นโครงข่ายที่มีช่องทางการสื่อสาร (Channel) หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่มีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถรองรับข้อมูลที่มีปริมาณและความเร็วในการส่งที่สูงขึ้นได้ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการนำเทคโนโลยีมัลติเพลกซ์เชิงความยาวคลื่นแสง (Wavelength Division Multiplexing, WDM) [1-3] มาใช้ในการสื่อสาร หลักการคือทำการมัลติเพลกซ์ช่องสัญญาณแสงจำนวนหนึ่งรวมกันโดยอาศัยคลื่นพาหะที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันเพื่อส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน ทำให้การเข้าใช้ประโยชน์ของแบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วนำแสงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้มีการนำเทคโนโลยี WDM มาใช้ในการออกแบบโครงข่ายความเร็วสูง ซึ่งจะสามารถส่งข้อมูลได้สูงถึงระดับ Tbps

จากการศึกษางานวิจัยเรื่องการออกแบบโครงข่าย WDM ในช่วงที่ผ่านมา เมื่อทำการพิจารณาจะพบว่าโดยมากเป็นงานวิจัยเพื่อรองรับการให้บริการหรือทราฟฟิกแบบยูนิคาสต์ (Unicast) ซึ่งเป็นทราฟฟิกที่มีลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างต้นทางและปลายทางในการส่งข้อมูลเป็นการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (Point-to-point) แต่ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและพฤติกรรมของผู้ใช้บริการใน

โครงข่าย พบว่าในอนาคตบริการแบบมัลติคาสต์ (Multicast) มีแนวโน้มที่จะได้รับการตอบสนองจากผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น เพราะสามารถตอบสนองความต้องการบริการรูปแบบเดียวกันสำหรับผู้ใช้งานจำนวนมากได้ในช่วงเวลาเดียวกัน โดยอาศัยการเชื่อมต่อระหว่างแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint) ในการส่งข้อมูล ด้วยรูปแบบของบริการที่เปลี่ยนไป จึงต้องมีการประยุกต์ปรับเปลี่ยนโครงข่ายให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยที่ผ่านมา [4,5] ได้มีการนำเสนอข้อดีของการกำหนดทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์เปรียบเทียบกับกำหนดทราฟฟิกแบบยูนิคาสต์ให้กับโครงข่าย ในงานวิจัย [4] จะเป็นการนำ Light Tree เข้ามาใช้ในการรับส่งข้อมูลทำให้ค่าหน่วงเวลา (Delay) ในการรับส่งข้อมูลมีค่าลดลง ส่วนงานวิจัย [5] จะเป็นงานวิจัยที่ทำในเชิงเปรียบเทียบเหมือนกับงานวิจัย [4] แต่มีการพิจารณาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของการติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณ (Splitter) และอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter) ให้กับโครงข่าย การวิจัยเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบดังกล่าวถือเป็นการเปิดประเด็นมุมมองใหม่ ทำให้เกิดงานวิจัยอื่น ๆ ตามมาอีกมากที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับการรับส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ ซึ่งปัญหาทางด้านการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายยังจัดเป็นปัญหาที่สำคัญและได้มีการวิจัยพิจารณาอย่างมากในงานวิจัยเกี่ยวกับการรับส่งข้อมูลแบบมัลติ-คาสต์เช่นกัน โดยงานวิจัย [6] เป็นงานวิจัยในเชิงของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับมัลติคาสต์ทราฟฟิกด้วยอัลกอริทึมฮิวริสติกเพื่อให้ได้โครงข่ายที่สามารถทำการรับส่งข้อมูลได้ตามระดับคุณภาพบริการที่กำหนดไว้ด้วยค่าความยาวคลื่นในการส่งที่น้อยที่สุด ซึ่งหลังจากงานวิจัยดังกล่าว ก็ได้มีงานวิจัย [7] ที่พิจารณาในเชิงเดียวกันกับงานวิจัย [6] แต่ได้มีการพิจารณาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่ายในด้านต้นทุนและค่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งข้อมูลด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ในบางงานวิจัยก็ทำการศึกษาเฉพาะการจัดสรรเส้นทางในโครงข่ายเท่านั้น [8] โดยมีวัตถุประสงค์ให้โครงข่ายที่พิจารณาสามารถจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกด้วยค่าต้นทุนในการติดตั้งข่ายเชื่อมโยงน้อยที่สุด และยังคงรักษาคุณภาพของสัญญาณไม่ให้มีค่าหน่วงเวลาในการรับส่งข้อมูลเกินกว่าที่กำหนดไว้ได้ จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมาในตอนต้น พบว่าในหลายงานวิจัยได้มีการพิจารณาถึงคุณภาพการบริการในการรับส่งข้อมูลประกอบกับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย แต่อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบคุณภาพการบริการรับส่งข้อมูลด้วยการพิจารณาจากค่าหน่วงเวลาเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถรองรับปัญหาที่เกิดกับการรับส่งข้อมูลในความเป็นจริงได้ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการนำเสนองานวิจัยที่ [9] ขึ้น เพื่อเป็นการออกแบบโครงข่ายโดยมีการคำนึงถึงค่ากำลังของสัญญาณที่โนดปลายทางจะได้รับในการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ เนื่องจากการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์นั้นสัญญาณข้อมูลที่ส่งจากต้นทางจะถูกคัดลอกและแยก (Split) ออกเป็น

สัญญาณย่อยจำนวนหนึ่งเพื่อส่งต่อไปยังปลายทาง การส่งข้อมูลในลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้บางครั้งปลายทางจะไม่ได้รับสัญญาณที่ส่งไปถึง เนื่องจากค่ากำลังสัญญาณข้อมูลถูกลดทอนลงจากการแยกสัญญาณที่ในดกกลางทางจนหมดก่อนที่สัญญาณจะเดินทางไปถึงปลายทาง นอกจากนี้ปัญหาดังกล่าวในบางงานวิจัยจะเป็นการศึกษาการออกแบบโครงข่ายซึ่งประกอบไปด้วยโหนดที่สามารถทำมัลติคาสต์ได้ในจำนวนจำกัด ปัญหาการออกแบบโครงข่ายภายใต้เงื่อนไขนี้จะเรียกว่า ปัญหาแบบ Sparse Light-splitting [5] และเรียกโครงข่ายที่มีข้อจำกัดนี้ว่า Sparse Light-splitting Optical Network [9]

ในการออกแบบโครงข่ายนั้นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นประการแรกคือ ทำอย่างไรให้โครงข่ายที่ออกแบบสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างสูงที่สุดโดยที่มีการลงทุนต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากโครงข่าย WDM เป็นโครงข่ายที่ทำการส่งข้อมูลผ่านทางสัญญาณแสง อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากเดิมที่เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์จะต้องเปลี่ยนไปเป็นอุปกรณ์ทางแสงแทนเพื่อให้เกิดความเร็วในการส่งข้อมูล ต้นทุนของโครงข่ายจึงต้องมีการพิจารณาถึงต้นทุนที่เกิดจากอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ด้วย และด้วยเหตุผลที่ว่าโครงข่าย WDM เป็นโครงข่ายความเร็วสูง ทำให้เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงข่ายเนื่องจากอุปกรณ์หรือสายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย จะทำให้ข้อมูลที่ส่งผ่านโครงข่ายนี้จะเกิดการสูญหาย (Loss) ผลเสียที่เกิดขึ้นนี้จะรุนแรงกว่ากรณีส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายความเร็วต่ำ ดังนั้นในการออกแบบโครงข่ายนอกจากจะพิจารณาออกแบบให้โครงข่ายสามารถรองรับทราฟฟิกได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีการลงทุนที่ต่ำแล้ว ยังต้องออกแบบให้โครงข่ายสามารถที่จะแก้ปัญหาที่เกิดจากการที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโครงข่ายได้รับความเสียหายด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงงานวิจัยที่มีในปัจจุบันพบว่างานวิจัยที่ศึกษาถึงผลกระทบและการแก้ไขปัญหาเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงข่ายที่รองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกนั้นมีอยู่น้อยมาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงถือเป็นการเปิดประเด็นการศึกษาวิจัยมุมมองใหม่ รวมทั้งเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่างานวิจัยเหล่านั้นไม่มีการศึกษาถึงผลกระทบของการที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นอยู่ในโครงข่ายในแง่ต้นทุนของโครงข่าย และในการวิจัยจะกำหนดให้แต่ละข่ายเชื่อมโยงมีเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวเท่านั้น แต่ละเส้นใยแก้วนำแสงที่กำหนดสามารถที่จะรับส่งข้อมูลด้วยค่าความยาวคลื่นไม่จำกัด [5,6,7] ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ ในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้แต่ละข่ายเชื่อมโยงสามารถมีเส้นใยแก้วนำแสงได้มากกว่าหนึ่งเส้น นอกจากนี้แต่ละเส้นใยแก้วนำแสงที่กำหนดจะรองรับความยาวคลื่นได้จำนวนจำกัด การออกแบบโครงข่ายจะทำโดยจำกัดค่าจำนวนความยาวคลื่นต่อเส้นใยแก้วนำแสงแล้วทำการคำนวณหาเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็ยังมีข้อจำกัดในการออกแบบโครงข่าย กล่าวคือ โครงข่ายที่ออกแบบจะทำการกำหนดให้โหนดในโครงข่ายทุกโหนดเป็นโหนดที่ทำมัลติคาสต์ได้ นอกจากนี้ในการรับส่งข้อมูลจะต้องไม่มีการลดทอนของ

สัญญาณข้อมูลจากการทำมัลติคาสต์ โดยจะทำการกำหนดให้มีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical Amplifier) ในโครงข่ายด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย WDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก (Multicast Traffic) กรณีที่โครงข่ายมีและไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาในกรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหายได้ด้วยเทคนิคการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO OFA MFA และ JPR รวมทั้งพิจารณาความซับซ้อนในการบริหารโครงข่ายด้วยเทคนิคดังกล่าว

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่ใช้ Integer Linear Programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย WDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก กรณีที่โครงข่ายมีและไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาในกรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหายได้ ด้วยเทคนิคการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO OFA MFA และ JPR รวมทั้งพิจารณาความซับซ้อนในการบริหารโครงข่ายด้วยเทคนิคดังกล่าว
2. เสนออัลกอริทึมฮิวริสติกที่ใช้หาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย WDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก กรณีที่โครงข่ายมีและไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาในกรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหายได้ ด้วยเทคนิคการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO OFA MFA และ JPR รวมทั้งพิจารณาความซับซ้อนในการบริหารโครงข่ายด้วยเทคนิคดังกล่าว
3. ศึกษาข้อดีและข้อเสียในด้านจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย และ ความซับซ้อนในการบริหารโครงข่าย จากกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย ทำการศึกษาและเปรียบเทียบในกรณีที่โครงข่ายมีและไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 1.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี WDM
 - 1.2 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก กรณีที่โครงข่ายมีการปกป้องโครงข่ายจากกรณีหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย
 - 2.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายกรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
 - 2.2 ทดสอบหาผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่ได้เสนอไว้ในข้อ 2.1 ว่าให้ผลเฉลยที่ถูกต้องหรือไม่ เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้สามารถหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่โครงข่ายต้องการได้อย่างถูกต้อง
 - 2.3 ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโครงข่ายและทราฟฟิกหลาย ๆ รูปแบบ และทำการวิเคราะห์ผล
3. สร้างอัลกอริทึมฮิวริสติกเพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก กรณีที่โครงข่ายมีการปกป้องโครงข่ายจากกรณีหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย
 - 3.1 ออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมฮิวริสติกเพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย กรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
 - 3.2 เปรียบเทียบผลเฉลยที่หาจากอัลกอริทึมที่ออกแบบไว้ในข้อ 3.1 กับผลเฉลยที่หาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึม
 - 3.3 เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายของแต่ละวิธีปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้

3.4 ทดสอบอัลกอริทึมด้วยโครงข่ายและทราฟฟิกหลาย ๆ รูปแบบ และทำการวิเคราะห์ผล

4. เปรียบเทียบระหว่างต้นทุนของโครงข่ายที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ
5. รวบรวมและสรุปผลการวิจัย เพื่อเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่ใช้ Integer Linear Programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองในการคำนวณเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย WDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก กรณีที่โครงข่ายมีและไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาในกรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหายได้ ด้วยเทคนิคการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO OFA MFA และ JPR รวมทั้งพิจารณาความซับซ้อนในการบริหารโครงข่ายด้วยเทคนิคดังกล่าว
2. สามารถออกแบบอัลกอริทึมฮิวริสติกที่ใช้หาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย WDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก กรณีที่โครงข่ายมีและไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาในกรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหายได้ ด้วยเทคนิคการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO OFA MFA และ JPR รวมทั้งพิจารณาความซับซ้อนในการบริหารโครงข่ายด้วยเทคนิคดังกล่าว
3. ทำให้ทราบถึงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประกอบการพิจารณาออกแบบวิธีการปกป้องโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายได้
4. ทำให้ทราบถึงประโยชน์ของการใช้ อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

บทที่ 2

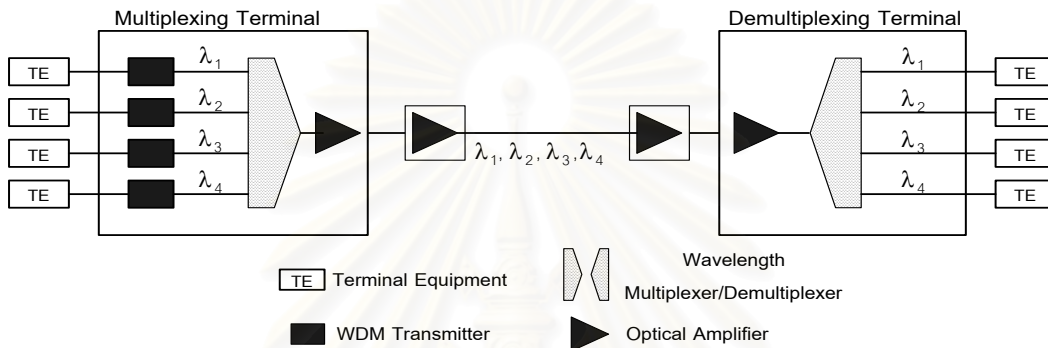
แนวทางในการออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ ทราฟฟิกที่คำนึงถึงกรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM การพิจารณาค่าต้นทุนของโครงข่ายจากจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่ต้องทำการติดตั้งให้กับโครงข่าย และการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย โดยจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานโดยทั่วไปที่เป็นความรู้เบื้องต้นในการออกแบบโครงข่ายอันประกอบไปด้วย ลักษณะและโครงสร้างของโครงข่าย WDM รายละเอียดเกี่ยวกับคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ และการจัดสรรเส้นทางการรับส่งข้อมูลให้กับทราฟฟิกภายในโครงข่าย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงข่าย WDM เป็นโครงข่ายเชิงแสงดังนั้นแต่ละเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรภายในโครงข่ายจะต้องได้รับการจัดสรรค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางดังกล่าวด้วย นอกจากนี้ แต่ละเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรจะต้องสามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ได้เมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย

2.1 โครงข่าย WDM

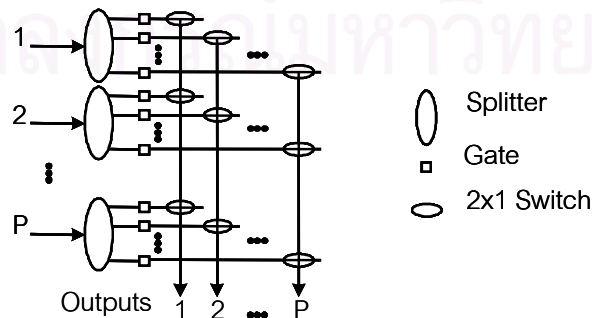
โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM จะประกอบไปด้วยโหนด (Node) และข่ายเชื่อมโยง (Link) โดยข่ายเชื่อมโยงจะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างโหนดของโครงข่าย และเป็นตัวกลางในการส่งผ่านข้อมูลภายในโครงข่าย อุปกรณ์ภายในโหนดของโครงข่ายจะประกอบไปด้วย Wavelength Multiplexer (WM), Wavelength Demultiplexer (WD) และ Space Switch ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกันเป็นตัวกำหนดเส้นทางในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางกับปลายทางของโครงข่าย อุปกรณ์ทั้งหมดภายในโหนดของโครงข่ายจะเรียกรวมกันว่า Optical Cross Connect (OXC) [10] นอกจากนี้ ในบางโครงข่ายอาจจะมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter, WC) ให้กับ OXCs เพื่อทำหน้าที่แปลงผันค่าความยาวคลื่นให้กับช่องสัญญาณสื่อสารที่วิ่งผ่านโหนดของโครงข่าย ระบบของการส่งข้อมูลโดยอาศัยการมัลติเพลกซ์สัญญาณแบบ WDM จะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ในภาคส่งของระบบประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงและเครื่องส่งสัญญาณ (WDM Transmitter) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ให้เป็นสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่น จากนั้นสัญญาณแสงจะถูกมัลติเพลกซ์ให้เป็นลำแสงเดียวกันโดยอาศัยตัวมัลติเพลกซ์ (Wavelength Multiplexer) สัญญาณที่ถูกมัลติเพลกซ์นี้จะถูกส่งไปยังเส้นใยแก้วนำแสง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการลดทอนหรือการสูญเสียพลังงานของ

สัญญาณในการส่งข้อมูล สัญญาณที่ถูกส่งไปอาจจะต้องมีการขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical Amplifier) ในระหว่างที่ทำการส่งสัญญาณ ส่วนที่ภาครับของระบบจะประกอบด้วยตัวดีมัลติเพลกซ์ (Wavelength Demultiplexer) ซึ่งทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงเป็นสัญญาณแต่ละความยาวคลื่น ก่อนที่จะแปลงกลับเป็นสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ดั้งเดิม นอกจากนี้เพื่อเป็นการป้องกันการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณที่ถูกดีมัลติเพลกซ์รวมกันเพื่อส่งผ่านไป ในสายส่งเส้นเดียวกัน แต่ละช่องสัญญาณจะต้องมีค่าความยาวคลื่นของสัญญาณแสงแตกต่างกัน



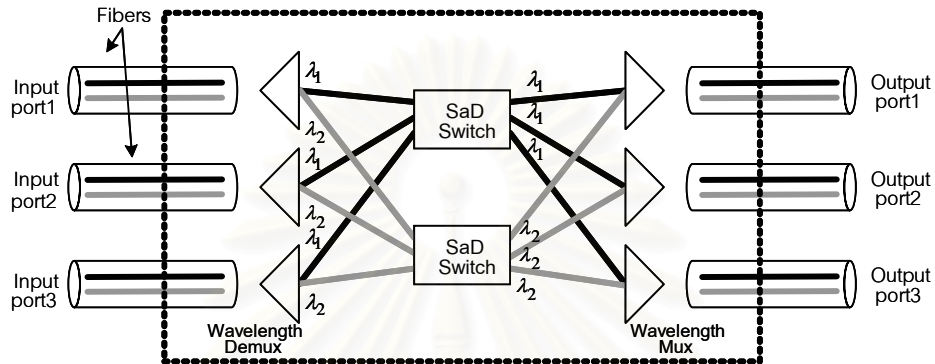
รูปที่ 2.1 ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น [11]

ในการนำโครงข่าย WDM มาใช้รองรับการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์นั้น นอกจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น โครงข่ายยังต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถทำการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ได้ด้วย นั่นคือ โหนดต้นทางสามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางจำนวนมากพร้อมกันได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีงานวิจัยที่นำเสนอสวิตช์ที่สามารถทำมัลติคาสต์ได้ [6] โดยสวิตช์ดังกล่าวจะทำการแยกสัญญาณที่เข้าเชื่อมโยงขาเข้าออกเป็นสัญญาณขนาดย่อยจำนวน N สัญญาณ สัญญาณย่อยแต่ละสัญญาณจะมีค่ากำลังของสัญญาณเท่ากับ P/N โดย P เป็นค่ากำลังของสัญญาณที่เข้าเชื่อมโยงขาเข้า สัญญาณย่อยแต่ละสัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังขาเข้าเชื่อมโยงขาออกของสวิตช์จำนวน N ขาเข้าเชื่อมโยง สวิตช์ดังกล่าวนี้จะถูกเรียกว่า SaD สวิตช์ (Splitter-and-delivery Switch) [12] มีโครงสร้างดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 SaD สวิตช์ขนาด $P \times P$ [12]

SaD สวิตช์จะถูกติดตั้งร่วมกับ WM และ WD เพื่อทำหน้าที่กำหนดเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ระหว่างโหนดต้นทางกับกลุ่มโหนดปลายทางของโครงข่าย อุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกเรียกรวมกันว่า MC-OXCs (Multicast-capable OXCs) โดยโครงสร้างของ MC-OXCs จะแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 MC-OXC ขนาด 3 x 3 บนพื้นฐานของ SaD สวิตช์ [9]

2.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDM

การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDM จัดเป็นปัญหาที่สำคัญและมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมากในการออกแบบโครงข่าย WDM [6-9,13-29] การออกแบบโครงข่ายจะเป็นการสร้างวิถี (Path) การเชื่อมต่อระหว่างโหนด (Node) ต่าง ๆ ในโครงข่ายที่ต้องการติดต่อถึงกันในระบบที่ใช้ช่องสัญญาณ WDM เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้ในระบบได้ทั้งหมด ในการสร้างวิถีดังกล่าวจะต้องมีการกำหนดเส้นทางและช่องสัญญาณให้กับทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกด้วย โดยในกรณีนี้แต่ละช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกกำหนดเป็นค่าความยาวคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสง ดังนั้น การกำหนดเส้นทางและช่องสัญญาณให้กับทราฟฟิกจึงถูกเรียกเป็นการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย (Routing and Wavelength Assignment, RWA) [5,13] และเพื่อให้การทำ RWA ให้กับทราฟฟิกของโครงข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การพิจารณาถึงคุณลักษณะของทราฟฟิกที่เข้ามายังระบบจึงเป็นที่ตั้งสำคัญ จากการศึกษาผลงานการวิจัยที่เผยแพร่อยู่ในปัจจุบันเกี่ยวกับลักษณะของทราฟฟิกในโครงข่าย พบว่า ทราฟฟิกจะแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ ทราฟฟิกแบบคงที่ (Static Traffic) [6,7,14,25] และทราฟฟิกแบบพลวัต (Dynamic Traffic) [4,15] หรือทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การกำหนดลักษณะของทราฟฟิกดังกล่าวนี้มาจากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลทางสถิติ พบว่าทราฟฟิกบนโครงข่ายขนาดใหญ่ที่ครอบคลุมพื้นที่ในระดับการเชื่อมต่อระหว่างประเทศหรือทวีปจะมีลักษณะเป็นทราฟฟิกแบบคงที่ ซึ่งจริง ๆ แล้วทราฟฟิกแบบคงที่

อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของทราฟฟิกบ้าง แต่จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย นาน ๆ ครั้ง จึงจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงการออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกซึ่งมีรูปแบบเป็นการให้บริการโปรแกรมประยุกต์แบบต่าง ๆ สำหรับอินเทอร์เน็ต บริการดังกล่าวนี้จะเป็นบริการที่อยู่บนโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อในระดับทั่วโลก ดังนั้นทราฟฟิกที่กำหนดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นทราฟฟิกแบบคงที่

การทำ RWA [7,13] บนโครงข่ายนั้น สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การจัดสรรเส้นทาง (Routing) [8,14] และการจัดสรรความยาวคลื่น (Wavelength Assignment, WA) [6,9,15-16] จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าบางงานวิจัยจะมีการออกแบบโครงข่ายโดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ทำการจัดสรรเส้นทางที่ทำให้ต้นทุนโดยรวมของโครงข่ายมีค่าต่ำสุด หลังจากนั้นจึงนำเส้นทางที่ได้จัดสรรไว้แล้วนี้มาทำการจัดสรรค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางโดยยังคงรักษาค่าต้นทุนของโครงข่ายโดยรวมให้ยังคงมีค่าที่ต่ำอยู่ [8,14] นอกจากงานวิจัยดังกล่าวนี้แล้ว งานวิจัยบางงานจะพิจารณาจัดสรรเฉพาะค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางที่กำหนดไว้แล้วเพียงอย่างเดียวเท่านั้น [6,9,15,16] หรือมีฉะนั้นก็จะทำการพิจารณาจัดสรรทั้งเส้นทางและค่าความยาวคลื่นไปพร้อม ๆ กัน [7,13]

เมื่อพิจารณาถึงเส้นทางการเชื่อมต่อที่ใช้ในการรองรับบริการแบบมัลติคาสต์จะพบว่า โหนดต้นทางในการส่งข้อมูลจะต้องสร้างเส้นทางการเชื่อมต่อในการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่ทำการร้องขอข้อมูลเป็นจำนวนมากได้ นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาถึงลักษณะของการเชื่อมต่อระหว่างโหนดในโครงข่ายแล้ว จะเห็นได้ว่าโหนดในโครงข่ายจะมีลักษณะการเชื่อมต่อแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-multipoint) จากลักษณะดังกล่าวจึงได้มีการนำโครงสร้างของต้นไม้ (Tree) มาใช้เป็นโครงสร้างพื้นฐานในการสร้างเส้นทางการเชื่อมต่อ โครงสร้างดังกล่าวนี้จะมีข้อดีคือมีการใช้สายเชื่อมโยงร่วมกันในการส่งข้อมูลทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายมีจำนวนลดลงเมื่อเทียบกับการส่งข้อมูลบนพื้นฐานการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (Point-to-point) จากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางทั้งหมด สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการจัดสรรเส้นทางให้กับโครงข่าย คือ ทำอย่างไรให้เส้นทางที่ถูกจัดสรรสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกบนโครงข่ายได้ด้วยค่าต้นทุนที่ต่ำสุด ปัญหาดังกล่าวนี้นี้จะเป็นปัญหาที่พิจารณาในลักษณะของการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) เวลาที่ใช้ในการผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับขนาดของปัญหาและปริมาณของคำตอบทั้งหมดที่เป็นไปได้ กล่าวคือ จะไม่สามารถหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้ในเวลาอันจำกัดเมื่อปัญหาที่พิจารณามีขนาดใหญ่ ปัญหาดังกล่าวนี้นี้สามารถกล่าวได้ว่าเป็นปัญหาในระดับ NP-complete [16,17] ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงได้มีการนำเสนออัลกอริทึมต่าง ๆ มาใช้ในการสร้างเส้นทางการเชื่อมต่อในการรับส่งข้อมูลแบบต้นไม้ที่ให้ค่าต้นทุนต่ำสุด ตัวอย่างของอัลกอริทึมที่มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยในปัจจุบัน คือ SPH (Shortest Path Algorithm) [8,17] และ MST

(Minimum Spanning Tree Algorithm) โดยในกรณีของ SPH นั้นทุกเส้นทางที่เชื่อมต่อจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางจะเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด การจัดสรรเส้นทางวิธีนี้จะเหมาะสำหรับการเชื่อมต่อที่ต้องการการรับรองคุณภาพการบริการไม่หามีค่าหน่วงเวลาในการรับส่งข้อมูลเกินกว่าที่กำหนดไว้ แต่จะไม่มีมีการรับประกันว่าจำนวนข่ายเชื่อมโยงโดยรวมของ SPH จะเป็นค่าที่ต่ำสุด ส่วนกรณีของ MST นั้น จะเป็นการสร้างเส้นทางแผ่ (Span) ไปทั่วทุกโหนดในโครงข่าย โดยเส้นทางที่สร้างจะต้องเป็นเส้นทางที่มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงโดยรวมน้อยที่สุด ในส่วนของการจัดสรรเส้นทาง การเชื่อมต่อแบบต้นไม้สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการสร้างเส้นทางแผ่ไปทั่วทุกโหนดในกลุ่มของโหนดปลายทางที่ทำการร้องขอข้อมูลจากโหนดต้นทาง แล้วทำการเลือกเส้นทางในการรับส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์จากเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ โดยพิจารณาให้เส้นทางที่ทำให้ค่าต้นทุนโดยรวมของโครงข่ายมีค่าต่ำสุดเป็นคำตอบ การเชื่อมต่อแบบต้นไม้ที่มีโหนดต้นทางเพียงโหนดเดียว แต่ทำการส่งข้อมูลไปยังกลุ่มโหนดปลายทางหลาย ๆ กลุ่ม และในแต่ละกลุ่มปลายทางจะประกอบไปด้วยสมาชิกที่แตกต่างกันไป โครงสร้างการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ในลักษณะนี้จะเรียกว่า มัลติคาสต์เซสชัน (Multicast Session) [17-20] รูปที่ 4 จะแสดงการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ของมัลติคาสต์โหนดในเซสชันต่าง ๆ ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลในลักษณะการให้บริการแบบ Video-on-demand คือ Server ของ Website ที่ให้บริการข้อมูลแบบวิดีโอ จะทำการส่งข้อมูลไปให้ผู้ใช้ที่ทำการโหลดข้อมูลผ่านทางโครงข่ายอินเทอร์เน็ต

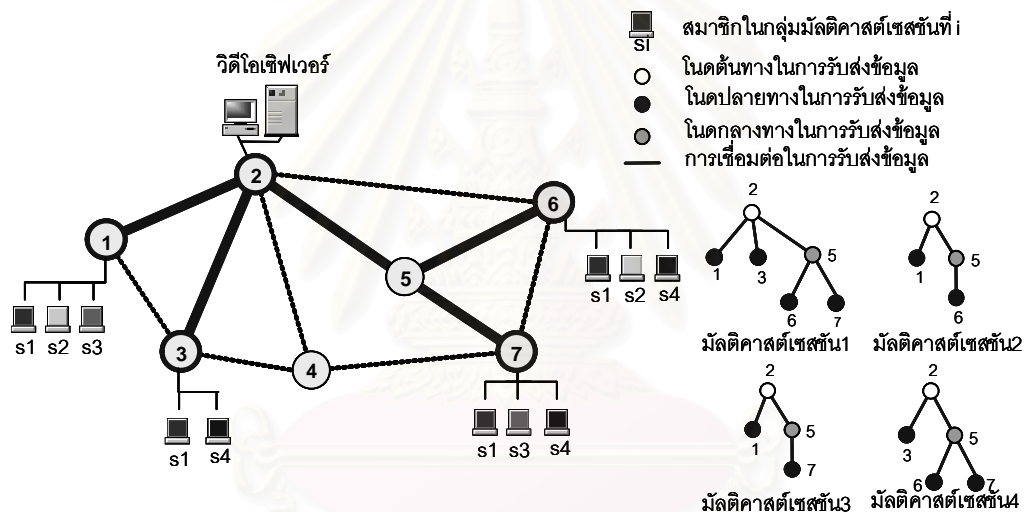
นอกจากการจัดสรรเส้นทางดังที่กล่าวมาในตอนต้น สิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการออกแบบโครงข่ายคือการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางหรือวิถีต่าง ๆ ในโครงข่าย โครงข่ายใด ๆ จะมีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นภายในโครงข่าย ก็ต่อเมื่ออุปกรณ์ของโครงข่ายได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter) ภายในอุปกรณ์ จากคุณสมบัติดังกล่าวและเพื่อความสะดวกในการศึกษาจึงได้แบ่งประเภทของโครงข่ายออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ [21-22] ตามความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของโครงข่าย ดังนี้

1. กรณีโครงข่ายยินยอมให้ทำการแปลงผันความยาวคลื่นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของเส้นทางที่ใช้รับส่งข้อมูลได้ (No Wavelength Continuity, NWC) กรณีนี้เส้นทางที่เชื่อมโยงจากโหนดต้นทางไปยังกลุ่มโหนดปลายทางสามารถแปลงผันค่าความยาวคลื่นได้เมื่อเส้นทางนั้นวิ่งผ่านโหนดของโครงข่าย ดังนั้น ในโครงข่ายประเภทนี้จึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ MC-OXCs เพื่อใช้ในการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางของโครงข่าย

2. กรณีที่โครงข่ายจัดสรรค่าความยาวคลื่นให้กับแต่ละข่ายเชื่อมโยงของเส้นทางที่ใช้รับส่งข้อมูลเพียงค่าเดียวตลอดทั้งเส้นทาง (Wavelength Continuity, WC) กรณีนี้เส้นทางที่เชื่อมโยง

จากโหนดต้นทางไปยังกลุ่มโหนดปลายทางจะกำหนดค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น ไม่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นที่โหนดระหว่างทางภายในโครงข่ายได้ กรณีนี้ช่องสัญญาณในแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่รองรับทราฟฟิกของเส้นทางจะต้องมีค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกัน ดังนั้นโครงข่ายประเภทนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ MC-OXCs ในบางงานวิจัยจะเรียกการจัดเส้นทางในลักษณะโครงสร้างต้นไม้ที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นในลักษณะนี้ว่า โครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light Tree) [9] ซึ่งจะมีการนิยามคุณลักษณะเช่นเดียวกันกับการนิยาม วิธีเชิงแสง (Light Path) [4] นั่นเอง

นอกจากการกำหนดในลักษณะดังกล่าวนี้ ในบางงานวิจัยจะนิยามการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 2 กรณีนี้ เป็น Virtual Wavelength Path (VWP) และ Wavelength Path (WP) [21-22] ตามลำดับ ซึ่งมีการกำหนดนิยามเช่นเดียวกับ NWC และ WC



รูปที่ 2.4 การส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ในลักษณะการให้บริการแบบ

Video-on-demand โดยมีการแสดงการเชื่อมต่อของมัลติคาสต์เซชันต่าง ๆ

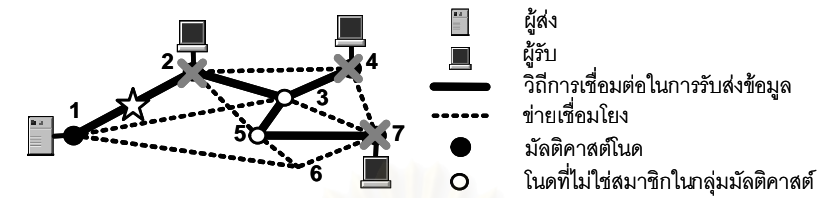
2.3 การจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อน้ำข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย

ในการออกแบบโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายที่ได้รับการออกแบบมีความน่าเชื่อถือ (Reliability) โครงข่ายที่ถูกออกแบบจะต้องมีความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากอุปกรณ์บางส่วนของโครงข่ายได้รับความเสียหายได้ มาตรการหนึ่งที่ใช้ปกป้องความเสียหายของโครงข่าย (Protection) คือ การเผื่อความจุสำรอง (Spare Capacity) เพื่อใช้ในการรองรับทราฟฟิกที่ถูกรบกวนจากความเสียหาย ความเสียหายที่พบได้มากและมีความซับซ้อนในการป้องกันความเสียหายไม่สูงมาก คือ ความเสียหายที่น้ำข่ายเชื่อมโยง (Single-link Failure) ในวิทยานิพนธ์ฉบับ

นี้จะเรียกเส้นทางที่ถูกจัดสรรขึ้นมาใหม่เพื่อป้องกันความเสียหายว่าวิถีสำรอง (Protection Path) จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงข่าย WDM ที่มีการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากความเสียหายในโครงข่ายนั้น โดยมากจะเป็นการจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับยูนิคาสต์ทราฟฟิกที่ถูกรบกวนจากความเสียหายที่เกิดในโครงข่าย เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทางใหม่จะแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ ๆ [15,22-24] ตามลักษณะการเลือกเส้นทางที่เป็นวิถีสำรองให้กับเส้นทางที่ถูกรบกวนจากข่ายเชื่อมโยงที่ขาด ได้แก่ Path Restoration Approach (PR) [25-27] และ Link Restoration Approach (LR) การจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วย PR เทคนิคนั้นเส้นทางที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ขาดจะมีการจัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างโหนดต้นทางกับปลายทางของโครงข่าย ส่วนการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วย LR เทคนิคนั้น เส้นทางที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ขาดจะมีการจัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างโหนดทั้ง 2 ด้านของข่ายเชื่อมโยงที่ขาด การจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วย LR เทคนิคนั้นจะมีความเร็วในการจัดสรรเส้นทางใหม่สูงกว่า PR เทคนิค เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางใหม่จะกระทำที่ตำแหน่งปลายทั้งสองข้างของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย ไม่จำเป็นต้องทำการส่งสัญญาณหรือข่าวสารย้อนกลับไปยังโหนดต้นทางเพื่อบอกให้ทราบถึงความเสียหายที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม LR เทคนิคจะมีความยืดหยุ่นในการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงต่ำกว่า PR เทคนิค เนื่องจากต้องจัดสรรให้เส้นทางสำรองวิ่งอ้อมข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความเสียหาย ทำให้จำนวนเส้นทางสำรองที่เป็นไปได้ในการส่งข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่า PR เทคนิค และผลจากการจัดสรรเส้นทางอ้อมข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายจะสร้างความต้องการทรัพยากรในการจัดสรรเส้นทางใหม่ของ LR เทคนิคมีมากกว่า PR เทคนิค งานวิจัยในส่วนของ LR และ PR เทคนิคนั้น นับว่าเป็นงานวิจัยที่นิยมและได้รับความสนใจเป็นจำนวนมากในการออกแบบโครงข่ายให้สามารถปกป้องความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการรับส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ได้ โดยในปัจจุบันยังคงพบว่าม้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในส่วนขอเทคนิคดังกล่าว [27] โดยมีการประยุกต์เพื่อผสมผสานข้อดีระหว่างทั้งสองวิธีเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ทั้งคุณสมบัติในแง่ของความเร็วในการจัดสรรเส้นทางใหม่และการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ [28]

อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยกรรมวิธีในการจัดสรรเส้นทางดังที่ได้นำเสนอไปในตอนต้นนั้นเป็นการปกป้องความเสียหายที่เกิดขึ้นกับยูนิคาสต์ทราฟฟิกที่มีการรับส่งแบบจุดต่อจุด นั่นคือเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงจะทำให้ผู้รับหนึ่งผู้รับไม่ได้รับข่าวสารข้อมูลจากผู้ส่ง แต่เนื่องจากแนวโน้มของการรองรับมัลติมีเดียทราฟฟิกทำให้การรับส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ทราฟฟิกเข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงความจำเป็นในการปกป้องความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงข่ายก็จะพบว่ามีความจำเป็นมากกว่าในกรณีที่มีการรับส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ทราฟฟิก เนื่องจากความเสียหายที่เกิดจะส่งผลกระทบต่อผู้รับจำนวนมาก ตัวอย่างความเสียหายที่หนึ่งข่าย

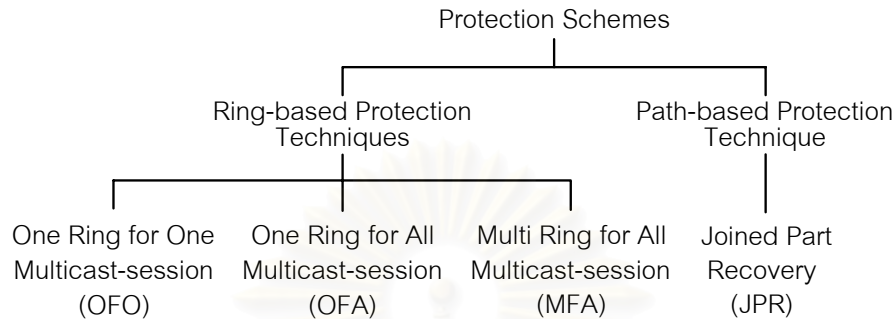
เชื่อมโยงในการรับส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์จะแสดงดังรูปที่ 2.5 จากรูปจะพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงจะส่งผลกระทบต่อผู้รับทั้งหมดในโครงข่ายที่ร้องขอข้อมูลจากผู้ส่ง



รูปที่ 2.5 ความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในการรับส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์

แต่เดิมนั้นการส่งข้อมูลไปยังปลายทางจะต้องเริ่มทำการเชื่อมต่อเพื่อส่งข้อมูลจากต้นทาง แต่ด้วยคุณลักษณะของโครงสร้างแบบต้นไม้ทำให้การเชื่อมต่อเพื่อส่งข้อมูลไม่ต้องเริ่มที่ตำแหน่งต้นทางเสมอไป โดยจะมีโหนดกลางทางเป็นผู้ทำหน้าที่แทน โหนดกลางทางในที่นี้จะทำการคัดลอกข้อมูลที่ได้รับมาแล้วทำการส่งต่อไปยังเส้นทางต่าง ๆ ที่เชื่อมต่อกับโหนดเพื่อส่งข้อมูลไปยังปลายทางอีกที่ทำให้เส้นทางของการส่งข้อมูลไปยังปลายทางมีทางเลือกในการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น ทางเลือกในการเชื่อมต่อที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลให้การจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงการส่งข้อมูลผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายสามารถกระทำได้หลายรูปแบบด้วยกัน อาทิเช่น งานวิจัยที่ [18-19] จะเป็นการปกป้องความเสียหายของโครงข่ายในการรับส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์โดยนำหลักการของการเชื่อมต่อแบบต้นไม้สำรอง (Redundant Tree) [20] มาใช้ หลักการดังกล่าวนี้ประยุกต์มาจากการปกป้องโครงข่ายแบบ 1+1 (1+1 Protection) [23,26] ซึ่งมีคุณสมบัติในการปกป้องโครงข่ายโดยอัตโนมัติ (Automatic Protection) กล่าวคือ โครงข่ายจะทำการเลือกการเชื่อมต่อแบบต้นไม้สำหรับรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกไว้ 2 การเชื่อมต่อ หนึ่งการเชื่อมต่อจะเป็นการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ปกติ (Primary Tree) และอีกหนึ่งการเชื่อมต่อจะเป็นการเชื่อมต่อแบบต้นไม้สำรอง (Redundant Tree) เมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง โครงข่ายจะเปลี่ยนมาทำการรับส่งข้อมูลผ่านการเชื่อมต่อแบบต้นไม้สำรองที่ได้ทำการกำหนดไว้ล่วงหน้า (Preplan) แทนการรับส่งข้อมูลผ่านการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ปกติ นอกจากนี้แต่ละการเชื่อมต่อแบบต้นไม้สำรองของแต่ละมัลติคาสต์ทราฟฟิกจะไม่มีการใช้ข่ายเชื่อมโยงร่วมระหว่างกัน กล่าวคือ แต่ละมัลติคาสต์ทราฟฟิกจะมีการปกป้องโครงข่ายอย่างอิสระต่อกันนั่นเอง (Dedicated Protection) เพื่อให้การศึกษาทางด้านกรปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายในการรับส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์มีความครอบคลุมและสมบูรณ์มากขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอเทคนิคในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายโดยการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกเพิ่มเติมดังแผนภูมิในรูปที่ 2.6 โดยจะจำแนกวิธีการในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย

ออกเป็น 2 เทคนิคใหญ่ ๆ ได้แก่ เทคนิคการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายบนพื้นฐานของวงแหวน (Ring-based Protection) และเทคนิคการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายบนพื้นฐานของเส้นทาง (Path-based Protection)



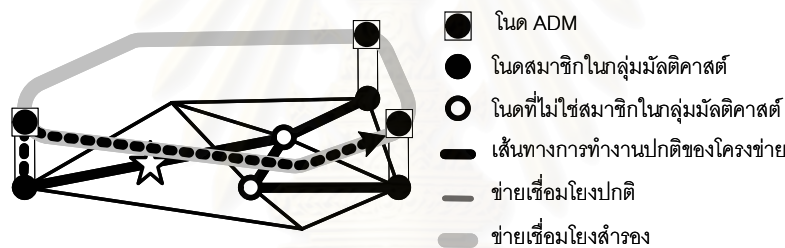
รูปที่ 2.6 แผนภูมิรูปแบบการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง

จากแผนภูมิจะพบว่าในแต่ละเทคนิคในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายยังประกอบไปด้วยวิธีในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายแบบต่าง ๆ ในส่วนของเทคนิคการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายบนพื้นฐานของวงแหวนจะประกอบไปด้วยวิธีในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย 3 วิธี ได้แก่ วิธีใช้วงแหวนหนึ่งวงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันหนึ่งเซสชัน (One Ring for one Multicast-session, OFO) วิธีใช้วงแหวนหนึ่งวงสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (One Ring for all Multicast-session, OFA) และวิธีใช้วงแหวนจำนวนหนึ่งสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (Multi-ring for all Multicast-session, MFA) ส่วนของเทคนิคการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายบนพื้นฐานของเส้นทางจะประกอบไปด้วยวิธีในการปกป้องความเสียหายเพียงวิธีเดียว คือ วิธีการกู้คืนโดยการเชื่อมต่อ (Joined Part Recovery, JPR) ส่วนของเนื้อหาและรายละเอียดของการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายในแต่ละวิธีการดังที่ได้นำเสนอมานั้น จะทำการกล่าวถึงในรายละเอียด ดังนี้

2.3.1 เทคนิคการปกป้องความเสียหายบนพื้นฐานของวงแหวน (Ring-based Protection Techniques)

วิธีนี้เป็นใช้วงแหวนมาสร้างเส้นทางในการรองรับทราฟฟิกที่ถูกกู้คืนเนื่องจากข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย ข้อดีของการจัดสรรเส้นทางด้วยวงแหวนคือสามารถแก้ไขความผิดพลาดในโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความเสียหายได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะพบว่าการใช้วงแหวนในการจัดสรรเส้นทางใหม่จะใช้เวลาในการส่งข้อมูลไม่เกิน 50 ms. [29] และนอกจากนี้ยังพบว่าการจัดสรรเส้นทางด้วยวงแหวนจะมีความซับซ้อนในการป้องกันความเสียหายต่ำ

เนื่องจากไม่ต้องเสียเวลาในการประมวลผลที่โหนดระหว่างทางในการส่งข้อมูลเพราะใช้ ADM (Add-drop Multiplexers) ซึ่งอาศัยหลักการส่งข้อมูลขึ้นไปยังวงแหวน (Add) และดึงข้อมูลลงมาจากวงแหวน (Drop) ในการส่งต่อข้อมูล ทำให้ความซับซ้อนในการรับส่งข้อมูลน้อยกว่า OXCs ที่อาศัยการสวิตช์ข้อมูลไปยังพอร์ตปลายทาง แต่อย่างไรก็ตาม การใช้วงแหวนมาสร้างเส้นทางในการรับส่งข้อมูลจะมีข้อเสีย คือมีประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรที่ต่ำกว่าการสร้างเส้นทางแบบร่างแห (Mesh) เนื่องจากรูปแบบการวางเส้นใยแก้วนำแสงในโครงข่ายจะถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็นรูปวงแหวนเท่านั้น นอกจากนี้ทุกข่ายเชื่อมโยงในวงแหวนที่วางจะต้องมีค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงเท่ากัน นั่นคือ มีค่าเท่ากับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงบนข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกหนาแน่นที่สุด ทำให้ความจุบางส่วนในระบบอาจไม่ได้ใช้ประโยชน์ รูปที่ 2.7 เป็นการแสดงการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง จากรูป OXCs ของโหนดสมาชิกในกลุ่มมัลติคาสต์จะทำการสวิตช์ข้อมูลส่งไปให้ ADM เพื่อทำการส่งข้อมูลที่กู้คืนมาไปยังเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่เชื่อมต่อในลักษณะวงแหวน



รูปที่ 2.7 การจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธีใช้วงแหวนในการปกป้องความเสียหาย

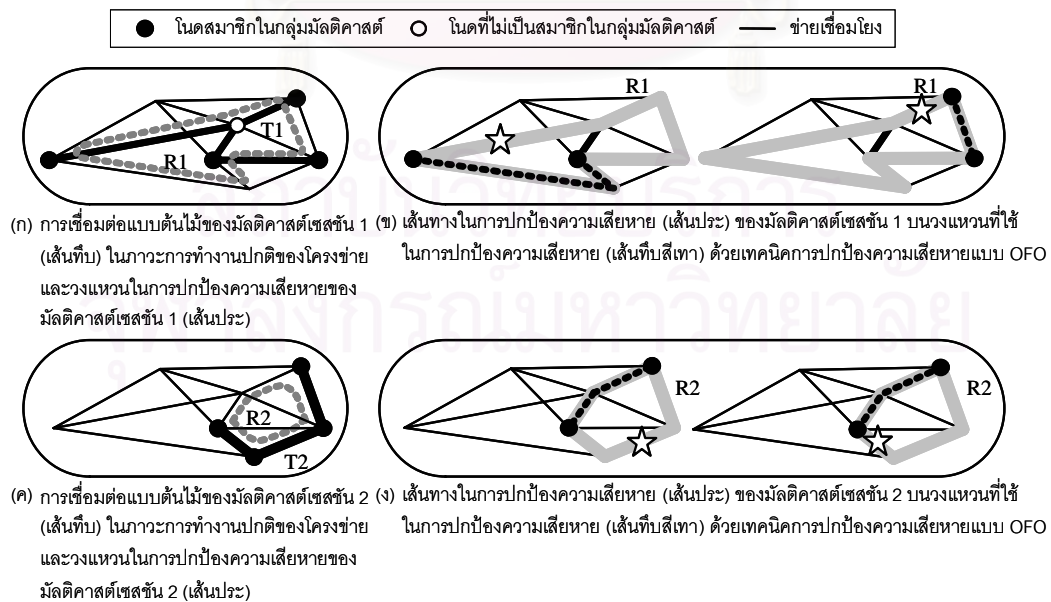
จากคุณสมบัติที่กล่าวมาในตอนต้น เพื่อให้โครงข่ายที่ออกแบบสามารถใช่วงแหวนในการปกป้องความเสียหายได้อย่างมีประสิทธิภาพนั่นคือสามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ได้อย่างคุ้มค่ากรรวิธีในการเลือกวงแหวนเพื่อปกป้องความเสียหายในโครงข่ายจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบโครงข่าย เนื่องจากความแตกต่างในเรื่องของขนาดและจำนวนของวงแหวนที่ใช้จะส่งผลต่อปริมาณเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องติดตั้งให้กับระบบซึ่งเป็นค่าต้นทุนหลักที่เราจะพิจารณาในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้แบ่งเทคนิคการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายบนพื้นฐานของวงแหวนออกเป็นวิธีย่อยทั้งหมด 3 วิธีด้วยกันตามกรรวิธีที่ใช้ในการเลือกวงแหวน ดังนี้

1. วิธีใช่วงแหวนหนึ่งวงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันหนึ่งเซสชัน (One Ring for One Multicast-session, OFO)

2. วิธีใช้วงแหวนหนึ่งวงสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (One Ring for All Multicast-session, OFA)
3. วิธีใช้วงแหวนจำนวนหนึ่งสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (Multi-ring for All Multicast-session, MFA)

2.3.1.1 วิธีใช้วงแหวนหนึ่งวงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันหนึ่งเซสชัน (One Ring for One Multicast-session, OFO)

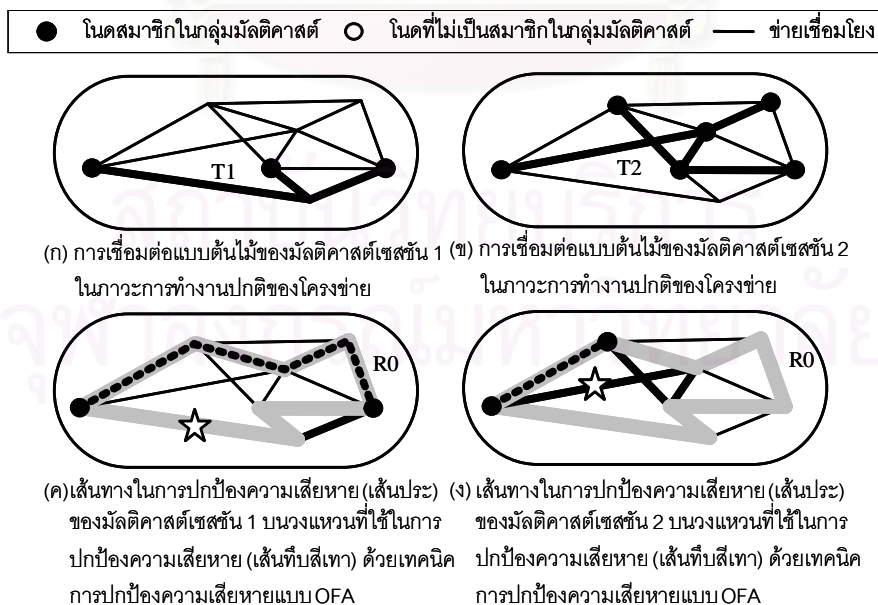
วิธีนี้แต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะมีวงแหวนในการปกป้องความเสียหายของโครงข่ายหนึ่งวง ต่อหนึ่งมัลติคาสต์เซสชัน วงแหวนแต่ละวงจะทำการปกป้องโครงข่ายอย่างอิสระต่อกัน และเส้นทางสำรองที่รองรับทราฟฟิกที่กู้คืนจากความเสียหายของแต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะต้องอยู่บนวงแหวนที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายของมัลติคาสต์เซสชันนั้น ๆ เพียงวงเดียว ไม่มีการกระจายทราฟฟิกข้ามวงแหวน วงแหวนที่ใช้ปกป้องความเสียหายในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะต้องสามารถรองรับทราฟฟิกที่หนาแน่นที่สุดที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความเสียหายในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันได้ จากหลักการดังกล่าว การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จึงเรียกว่า วิธีใช้วงแหวนหนึ่งวงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันหนึ่งเซสชันหรือ OFO นั่นเอง ตัวอย่างการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO จะแสดงในรูปที่ 2.8 แต่อย่างไรก็ตาม การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จะเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรที่ใช้เนื่องจากไม่มีการใช้ข่ายเชื่อมโยงร่วมกันระหว่างเส้นทางสำรองในแต่ละมัลติคาสต์เซสชัน



รูปที่ 2.8 วิธีการปกป้องความเสียหายแบบ OFO

2.3.1.2 วิธีใช้วงแหวนหนึ่งวงแหวนสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (One Ring for All Multicast-session, OFA)

เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี OFO นั้น วงแหวนที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะไม่มีการใช้งานซ้ำเชื่อมโยงร่วมกันในการกระจายทราฟฟิก กล่าวคือ แต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะมีการใช้งานวงแหวนในการปกป้องความเสียหายอย่างอิสระต่อกัน ทำให้เส้นใยแก้วนำแสงที่วางมีการใช้งานความจุของสายเชื่อมโยงไม่เต็มที่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงจึงได้มีการนำเสนอการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ทำการรวมทราฟฟิกมากระจายลงบนวงแหวนเพียงวงเดียวเพื่อให้ช่องสัญญาณของสายเชื่อมโยงในวงแหวนมีการใช้งานเพิ่มขึ้น เป็นการช่วยลดค่าต้นทุนของโครงข่าย ทำให้เส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่วางมีจำนวนลดลงเนื่องจากมีการใช้งานร่วมกันระหว่างมัลติคาสต์เซสชัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากทุกมัลติคาสต์เซสชันจะใช้วงแหวนในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายเพียงวงเดียวเท่านั้น ดังนั้นขนาดของวงแหวนที่ใช้จะต้องใหญ่พอที่จะสามารถครอบคลุมปัญหาในทุกกรณีที่เกิดขึ้นในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันได้ นอกจากนี้แต่ละสายเชื่อมโยงสำรองของวงแหวนจะต้องมีความจุมากพอที่จะสามารถรองรับทุกทราฟฟิกที่ได้รับการกู้คืนจากความเสียหายที่หนึ่งสายเชื่อมโยงของทุกมัลติคาสต์เซสชันได้ เนื่องจากวิธีในการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้ใช้วงแหวนเพียงวงเดียวในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายในทุกมัลติคาสต์เซสชัน การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จึงเรียกว่าวิธีใช้วงแหวนหนึ่งวงสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชันหรือ OFA นั่นเอง ตัวอย่างการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFA จะแสดงในรูปที่ 2.9

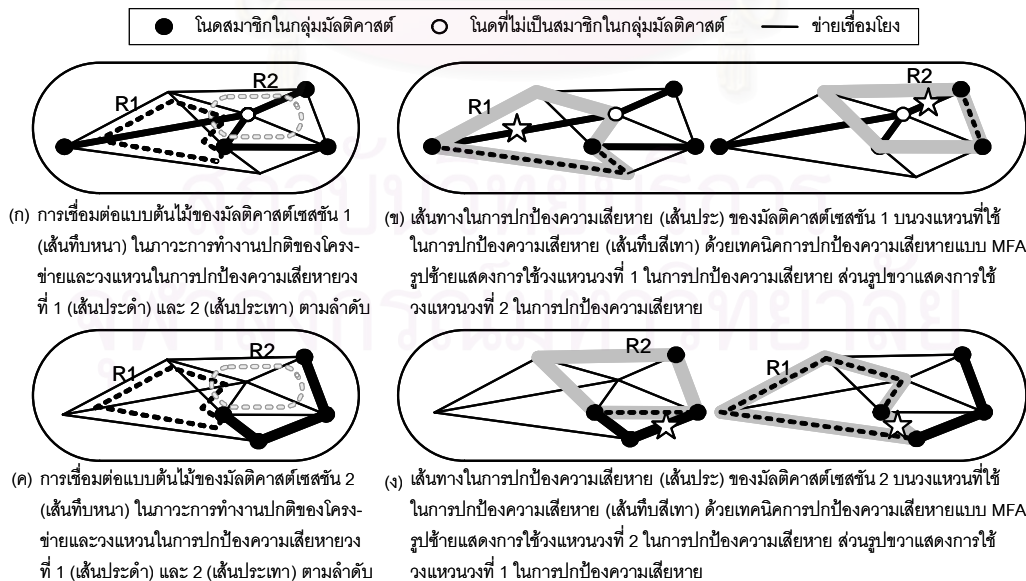


รูปที่ 2.9 วิธีการปกป้องความเสียหายแบบ OFA

จากที่กล่าวมาในตอนต้น พบว่าจริง ๆ แล้วการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี OFA น่าจะเป็นวิธีที่ประหยัดทรัพยากรที่ใช้ในการเดินใยแก้วนำแสงสำรองเพื่อรองรับเส้นทางที่ถูกจัดสรรเส้นทางขึ้นมาใหม่ แต่จริง ๆ แล้วการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จะมีข้อจำกัดในแง่ของการนำไปใช้งานจริงในเชิงปฏิบัติเนื่องจากจริง ๆ แล้ว โครงข่ายบางโครงข่ายอาจจะไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ในการรับส่งข้อมูลเป็นลักษณะของวงแหวนที่สามารถรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกขนาดใหญ่ได้ ทำให้การเลือกวงแหวนในการปกป้องความเสียหายวิธีนี้ไม่มีความยืดหยุ่นเพียงพอ นอกจากนี้การใช้วงแหวนขนาดใหญ่ในการปกป้องความเสียหายนั้นจะทำให้ต้นทุนที่ใช้ในการสร้างวงแหวนมีค่าสูงตามไปด้วย เนื่องจากต้นทุนของวงแหวนจะพิจารณาจากจำนวนสายเชื่อมโยงของวงแหวนคุณกับผลคูณระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่วางบนวงแหวนกับจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพล็กซ์กันในเส้นใยแก้วนำแสง

2.3.1.3 วิธีใช้วงแหวนจำนวนหนึ่งสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (Multi-ring for All Multicast session, MFA)

เพื่อเป็นการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับการเลือกวงแหวนในการปกป้องความเสียหายในโครงข่าย จึงได้มีการเสนอแนวคิดการออกแบบโครงข่ายโดยใช้วงแหวนที่มีขนาดเล็กลงจำนวนหลาย ๆ วงมารองรับทราฟฟิกของเส้นทางที่ถูกจัดสรรใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรและเป็นการลดค่าต้นทุนของโครงข่าย ทราฟฟิกที่กระจายในวงแหวนไม่จำเป็นต้องเป็นทราฟฟิกที่มาจากการแก้ไขปัญหามาของมัลติคาสต์เซสชันในเซสชันเดียวกันเท่านั้น



รูปที่ 2.10 วิธีการปกป้องความเสียหายแบบ MFA

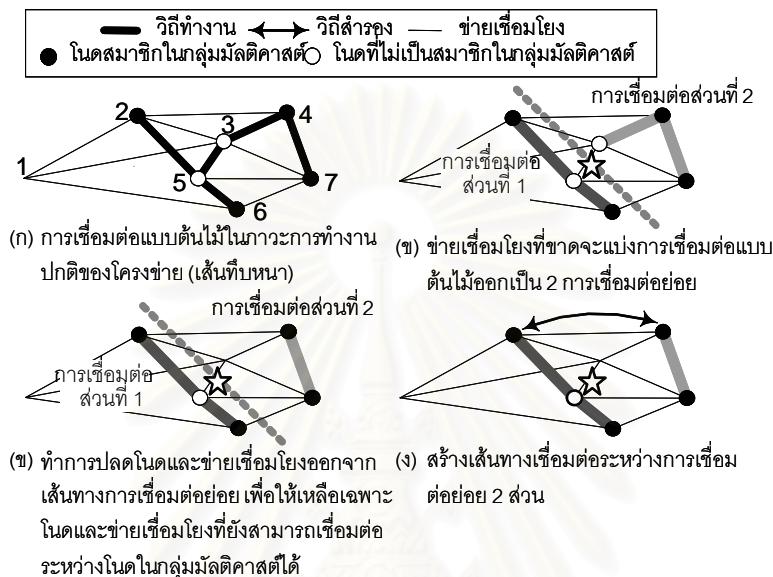
เนื่องจากวิธีในการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้ใช้วงแหวนจำนวนมากกว่าหนึ่งวงในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายในทุกมัลติคาสต์เซสชัน การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จึงเรียกว่าวิธีใช้วงแหวนจำนวนหนึ่งสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชันหรือ MFA นั่นเอง ตัวอย่างการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MFA จะแสดงในรูปที่ 2.10

วิธีต่าง ๆ ที่กล่าวมาในตอนต้นนั้นจัดเป็นวิธีที่อยู่บนพื้นฐานของวงแหวนในการจัดสรรเส้นทางใหม่ ซึ่งลักษณะโครงสร้างของวงแหวนนั้นเมื่อเทียบกับลักษณะโครงสร้างของการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ในการรับส่งข้อมูลแล้ว พบว่าจะมีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานที่แตกต่างกัน ทั้งในแง่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลที่ติดตั้งในแต่ละโหนดของโครงข่าย เช่น การเชื่อมต่อแบบต้นไม้จะใช้ OXCs ส่วนในการรับส่งข้อมูลแบบวงแหวนจะใช้ ADM นอกจากนี้ในการเชื่อมต่อแบบต้นไม้นั้น การส่งข้อมูลอาจจะกระทำได้หลายทิศทางโดยอาศัยการแยกข้อมูลด้วยตัว Splitter ที่ติดตั้งอยู่ที่โหนด ในขณะที่การรับส่งข้อมูลภายในวงแหวนจะกระทำได้สองทิศทางเท่านั้น ด้วยคุณลักษณะและโครงสร้างที่แตกต่างกันระหว่างการจัดสรรเส้นทางปกติในโครงข่ายที่อาศัยการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ในการรับส่งข้อมูล และการจัดสรรเส้นทางสำรองเพื่อปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายที่อาศัยการรับส่งข้อมูลแบบวงแหวน ทำให้โครงข่ายจำเป็นที่จะต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติที่จำเป็นในการรับส่งข้อมูล ในที่นี้อุปกรณ์ที่ต้องทำการติดตั้งเพิ่มเติมคือ ADM นั่นเอง และเพื่อให้เนื้อหาในการออกแบบการจัดสรรเส้นทางใหม่ภายในโครงข่ายมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จึงได้มีแนวคิดในการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของการจัดสรรเส้นทางสำรองเหมือนกับโครงสร้างของการจัดสรรเส้นทางปกติ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในเนื้อหาส่วนถัดไป

2.3.2 เทคนิคการปกป้องความเสียหายบนพื้นฐานของเส้นทาง (Path-based Protection Technique)

การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จะแตกต่างไปจากการจัดสรรเส้นทางแบบอื่น ๆ ที่ใช้วงแหวนในการสร้างเส้นทางสำรอง เนื่องจากเส้นทางสำรองที่ได้ไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นทางที่ตั้งอยู่บนวงแหวนที่ใช้ปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายเท่านั้น แต่สามารถเป็นเส้นทางเชื่อมต่อใด ๆ ที่เป็นไปได้บนโครงข่าย การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้พบว่าเมื่อข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย โหนดปลายทางบางโหนดจะได้รับผลกระทบจากความเสียหายดังกล่าวทำให้ไม่ได้รับข้อมูลที่ส่งมาจากโหนดต้นทาง เมื่อพิจารณาถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงในการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ระหว่างกลุ่มมัลติคาสต์โหนด จะเห็นได้ว่า กลุ่มมัลติคาสต์โหนดที่เชื่อมต่อกันถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังรูปที่ 2.11 (ข) ในวิธีนี้โครงข่ายจะทำการกัฏรภาพฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายที่

เกิดขึ้น โดยสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างกลุ่มมัลติคาสต์โนด 2 กลุ่มนี้ เส้นทางที่ได้ไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างโนดในกลุ่มมัลติคาสต์โนดด้วยกันอาจจะเป็นการเชื่อมต่อกับโนดที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่านข้อมูลก็ได้ โดยลักษณะการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยการเชื่อมต่อนี้จะแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วิธีการปกป้องความเสียหายแบบ JPR

การเชื่อมต่อด้วยโนดใด ๆ ดังกล่าว ทำให้เส้นทางที่เป็นไปได้ในการเชื่อมต่อโครงข่ายมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นมากกว่าการที่กำหนดให้ทำการเชื่อมต่อโครงข่ายระหว่างโนดในกลุ่มมัลติคาสต์ด้วยกันเท่านั้น นอกจากนี้ ยังทำการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้เส้นใยแก้วนำแสงด้วยการปลดช่องสัญญาณภายในเส้นใยแก้วนำแสงที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายออก อย่างไรก็ตาม การปลดช่องสัญญาณดังกล่าวจะต้องไม่ส่งผลต่อลักษณะการเชื่อมต่อของโนดที่เหลือในกลุ่มมัลติคาสต์ เนื่องจากวิธีในการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้ใช้หลักการเชื่อมต่อในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จึงเรียกว่า วิธีการกู้คืนโดยการเชื่อมต่อ (Joined Part Recovery) หรือ JPR นั่นเอง

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองของโครงข่ายที่ใช้ในการออกแบบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการเพื่อให้ได้โครงข่ายที่สามารถปกป้องความเสียหายจากการที่หนึ่งสายเชื่อมโยงในโครงข่ายขาดหรือได้รับความเสียหายได้ โดยอาศัย Integer Linear Programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลอง สมการทางคณิตศาสตร์และคำจำกัดความที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง รวมทั้งวิธีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

3.1 แบบจำลองของโครงข่าย (Network Model)

เนื้อหาในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงแบบจำลองของโครงข่ายที่ใช้ในการออกแบบ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการแทนที่โครงข่าย WDM ที่พิจารณาด้วยกราฟแบบไม่แสดงทิศทาง (Undirected Graph) $G(V, E)$ ซึ่งประกอบไปด้วยเซตของ MC-OXC โหนด (V) จำนวน N โหนด, $|V| = N$ และเซตของสายเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical Links) (E) แบบไม่แสดงทิศทาง (Undirected Links) จำนวน L สายเชื่อมโยง, $|E| = L$ โดยในแต่ละสายเชื่อมโยงจะประกอบด้วยกลุ่มของเส้นใยแก้วนำแสงที่ทำหน้าที่รองรับเส้นทางที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางกับปลายทาง รวมทั้งทำการกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้นมีจำนวนจำกัดเท่ากับ M นอกจากนี้ยังกำหนดให้แต่ละโหนด MC-OXC มีการติดตั้งอุปกรณ์ในการทำมัลติคาสต์เพื่อทำการคัดลอกและแยก (Split) สัญญาณแสงออกเป็นสัญญาณย่อยจำนวนหนึ่ง ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่ร้องขอข้อมูลดังกล่าวเป็นจำนวนมากได้ นอกจากนี้ยังทำการกำหนดให้ปริมาณทราฟฟิกของแต่ละการเชื่อมต่อแบบมัลติคาสต์ในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกแบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Static Traffic) ซึ่งสอดคล้องกับหลักความเป็นจริงที่ว่า โครงข่ายที่ออกแบบในที่นี้เป็นโครงข่ายขนาดใหญ่มีพื้นที่ครอบคลุมกว้างขวางรวมทั้งมีการเชื่อมโยงในระดับประเทศหรือทวีป (Core Network) ดังนั้น เมื่อทำการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทราฟฟิกในโครงข่ายจะพบว่าระดับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทราฟฟิกจะมีน้อยมาก นาน ๆ ครั้งจึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงทำการกำหนดให้ปริมาณของทราฟฟิกในโครงข่ายที่พิจารณาเป็นปริมาณทราฟฟิกแบบคงที่

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่ โครงข่ายต้องการ

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการกล่าวถึงแบบจำลองที่ใช้ในการจัดสรรเส้นใยแก้วนำแสงให้กับโครงข่ายในการจัดสรรเส้นใยแก้วนำแสงให้กับโครงข่ายนั้น เส้นใยแก้วนำแสงจะถูกจัดสรรไปตามลักษณะการใช้งานภายในโครงข่าย ดังนี้

- เส้นใยแก้วนำแสงทำงาน (Working Fiber) เป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นวิถีทำงาน (Active Path) ซึ่งเป็นเส้นทางใช้งานทั่วไปเมื่อโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ หรือสภาวะที่ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงข่ายนั่นเอง
- เส้นใยแก้วนำแสงสำรอง (Spare Fiber) เป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นวิถีสำรอง (Protection Path) ซึ่งเป็นเส้นทางที่จะถูกเปลี่ยนไปใช้งานจากเส้นทางปกติเมื่อหนึ่งสายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย

ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองปัญหาการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM เพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. Optimized Spare Fiber Assignment เป็นวิธีการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย ในกรณีนี้จะต้องมีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นของวิถีทำงานมาให้ รวมทั้งกำหนดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานมาให้อีกด้วยเพื่อจะได้นำมาพิจารณาร่วมกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ได้จากแบบจำลองเป็นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ
2. Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment เป็นวิธีการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดอันประกอบไปด้วยเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองพร้อมกัน โดยไม่ต้องทำการกำหนดเส้นทาง ความยาวคลื่น และจำนวนของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานมาให้เหมือนกับวิธีแรก

เมื่อทำการพิจารณาจะพบว่า การจำลองปัญหาในกรณีแรกจะเป็นการจำลองปัญหาสำหรับโครงข่ายที่มีการใช้งานจริงในทางปฏิบัติแล้ว แต่อย่างไรก็ดีไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ในการปกป้องความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในโครงข่าย นั่นคือ ยังไม่มีการติดตั้งเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพิ่มเติมให้กับ

โครงข่าย ส่วนในกรณีของการจำลองปัญหาในกรณีที่สองนั้น จะเป็นการออกแบบโครงข่ายที่ยังไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ สำหรับการใช้งานเลย ในกรณีนี้สิ่งที่โครงข่ายต้องการจะทราบเพื่อที่จะทำการประมาณราคาต้นทุนของโครงข่าย จะเป็นค่าจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่ต้องทำการติดตั้งให้กับโครงข่ายซึ่งจะประกอบไปด้วยเส้นใยแก้วนำแสงใช้งานปกติและเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งสองกรณี โดยกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ดังนี้

M	จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ลงบนเส้นใยแก้วนำแสงได้
w_j	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานของข่ายเชื่อมโยงที่ j
s_j	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่ j
m	จำนวนมัลติคาสต์เซสชัน
L	จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาทั้งหมดในโครงข่าย
d_{sg}	ปริมาณทราฟฟิกของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg
t_{sg}	จำนวนเส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ในการรับส่งข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมดของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg
N_r	จำนวนวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่าย
MR	จำนวนสูงสุดของวงแหวนที่สามารถเป็นวงแหวนในการปกป้องความเสียหาย
$T_{sg,n}$	เส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ที่เป็นวิธีทำงานลำดับที่ n สำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ sg (ใช้ในกรณี NWC)
$T_{sg,m,\lambda}$	เส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ที่เป็นวิธีทำงานลำดับที่ n ของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg ที่มีค่าความยาวคลื่นเป็น λ (ใช้ในกรณี WC)
$R_{sg,q}$	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้แต่ละข่ายเชื่อมโยงบนวงแหวนที่ครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg วงที่ q
R_i	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้แต่ละข่ายเชื่อมโยงของวงแหวนวงที่ i
$l_{sg,q}$	จำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดบนวงแหวนที่ครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg วงที่ q
l_i	จำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดบนวงแหวนวงที่ i
Q_{sg}	จำนวนวงแหวนที่ครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg
K_i	จำนวนเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้บนวงแหวนวงที่ i

- $r_{sg,q}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อวงแหวนที่ครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg วงที่ q ถูกเลือกเป็นวงแหวนในการปกป้องความเสียหาย ถ้าไม่ถูกเลือกจะมีค่าเป็น 0
- r_i มีค่าเป็น 1 เมื่อวงแหวนวงที่ i ถูกเลือกเป็นวงแหวนในการปกป้องความเสียหายของโครงข่าย ถ้าไม่ถูกเลือกจะมีค่าเป็น 0
- $\delta_{sg,n}^j$ มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ที่ n ของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ j ถ้าไม่วิ่งผ่านจะมีค่าเป็น 0
- α_{sg}^i มีค่าเป็น 1 เมื่อวงแหวนวงที่ i ครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg ถ้าไม่ครอบคลุมจะมีค่าเป็น 0
- $p_{i,ii}^j$ เส้นทางลำดับที่ ii บนวงแหวนที่ i ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวิธีสำรองในการปกป้องโครงข่ายในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงที่ j' ได้รับความเสียหาย (ใช้ในกรณี NWC)
- $p_{i,ii,\lambda}^j$ เส้นทางลำดับที่ ii บนวงแหวนที่ i ที่ค่าความยาวคลื่น λ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวิธีสำรองในการปกป้องโครงข่ายในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงที่ j' ได้รับความเสียหาย (ใช้ในกรณี WC)
- $P_{i,ii}^{j',sg,n}$ เส้นทางลำดับที่ ii บนวงแหวนที่ i ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวิธีสำรองในการปกป้องโครงข่ายของเส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ที่ n สำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ sg เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ j' ได้รับความเสียหาย (ใช้ในกรณี NWC)
- $P_{i,ii,\lambda}^{j',sg,n}$ เส้นทางลำดับที่ ii บนวงแหวนที่ i ที่ค่าความยาวคลื่น λ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวิธีสำรองในการปกป้องโครงข่ายของเส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ที่ n สำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ sg เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ j' ได้รับความเสียหาย (ใช้ในกรณี WC)
- $\gamma_{i,ii}^{j',sg,n}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ ii บนวงแหวนที่ i สามารถนำมาใช้เป็นวิธีสำรองสำหรับการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ที่ n ของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงที่ j' ได้รับความเสียหาย ถ้าเส้นทางที่ ii บนวงแหวนที่ i ไม่สามารถนำมาใช้เป็นวิธีสำรองได้จะมีค่าเป็น 0
- $\beta_{i,ii}^j$ มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ ii บนวงแหวนที่ i วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยง j' ถ้าไม่วิ่งผ่านจะมีค่าเป็น 0
- $\beta_{sg,n,b}^{j',j}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อวิธีสำรองลำดับที่ b จากวิธีสำรองที่เป็นไปได้ทั้งหมดของเส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ที่ n สำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ sg ได้รับความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยง j' วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ j ถ้าไม่วิ่งผ่านจะมีค่าเป็น 0

3.2.1 การจำลองปัญหาด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการจำลองปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ จากที่กล่าวมาในตอนต้น จะพบว่าวิธีการจำลองปัญหานี้จะต้องมีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นที่ใช้สำหรับเส้นทางทำงานปกติของโครงข่ายมาให้ รวมทั้งกำหนดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานปกติทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายมาให้ด้วย ซึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จะกำหนดให้เป็น $T_{sg,n}$ และ w_j ตามลำดับสำหรับกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นหรือเป็นโครงข่ายแบบ NWC ส่วนในกรณีโครงข่ายแบบ WC จะทำการกำหนดให้เป็น $T_{sg,n,\lambda}$ และ w_j ตามลำดับ

3.2.1.1 การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี OFO

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) คือ

$$\min : \left\{ \sum_{sg=1}^m \sum_{q=1}^{Q_{sg}} l_{sg,q} R_{sg,q} \right\} \quad (3.1)$$

และมีฟังก์ชันข้อบังคับ (Constraint Function) ดังนี้

▪ กรณีโครงข่ายแบบ NWC

$$\sum_{q=1}^{Q_{sg}} r_{sg,q} = 1 \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.2)$$

$$R_{sg,q} \leq \left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times r_{sg,q} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall q = 1, 2, \dots, Q_{sg} \quad (3.3)$$

$$\sum_{q=1}^{Q_{sg}} (M \times R_{sg,q}) - \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j'} \geq 0 \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall j' = 1, 2, \dots, L \quad (3.4)$$

▪ กรณีโครงข่ายแบบ WC

$$\sum_{q=1}^{Q_{sg}} r_{sg,q} = 1 \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.5)$$

$$R_{sg,q} \leq \left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times r_{sg,q} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall q = 1, 2, \dots, Q_{sg} \quad (3.6)$$

$$\sum_{q=1}^{Q_{sg}} R_{sg,q} - \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^{j'} \geq 0 \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.7)$$

$$R_{sg,q} \in \{0, 1, 2, \dots\}; r_{sg,q} \in \{0, 1\} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall q = 1, 2, \dots, Q_{sg} \quad (3.8)$$

สมการที่ (3.1) แสดงผลรวมของเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย เนื่องจากในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของวงแหวนมีความต้องการเส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนเท่า ๆ กัน ดังนั้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับวงแหวนใด ๆ นั้นจะ

มีค่าเท่ากับขนาดของวงแหวนหรือจำนวนขั้วเชื่อมโยงทั้งหมดของวงแหวนคูณกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่วางบนวงแหวนแต่ละวง สมการที่ (3.2) ถึง (3.4) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ NWC โดยสมการที่ (3.2) แสดงแต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะใช้วงแหวนในการรองรับความเสียหายเพียงวงเดียวเท่านั้น สมการที่ (3.3) แสดงเส้นใยแก้วนำแสงสำรองของโครงข่ายจะถูกวางลงบนแต่ละขั้วเชื่อมโยงของวงแหวนวงที่ถูกเลือกเท่านั้น สมการที่ (3.4) แสดงจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดของเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ขั้วเชื่อมโยงใด ๆ บนวงแหวนที่ถูกเลือกเป็นวงแหวนในการรองรับความเสียหายของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg จะต้องมียุทธศาสตร์ที่จะสามารถรองรับวิถีสำรองทั้งหมดที่วิ่งผ่านวงแหวน นั่นคือ จะต้องสามารถรองรับวิถีทำงานที่หนาแน่นที่สุดที่วิ่งผ่านขั้วเชื่อมโยง j' ที่ได้รับความเสียหายของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg ได้นั่นเอง ส่วนสมการที่ (3.5) ถึง (3.7) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ WC โดยสมการที่ (3.5) เป็นฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกวงแหวนเช่นเดียวกับสมการที่ (3.2) ส่วนสมการที่ (3.6) ถึง (3.7) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการจัดสรรเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเช่นเดียวกับสมการที่ (3.3) และ (3.4) แต่มีการพิจารณาค่าความยาวคลื่นของวิถีสำรองต่าง ๆ ในฟังก์ชันข้อบังคับดังกล่าวด้วย ส่วนสมการที่ (3.8) แสดง $R_{sg,q}$ เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ และ $r_{sg,q}$ เป็นตัวแปรประเภทยูเนียน (Boolean Variable) นั่นคือมีค่าเป็น 1 หรือ 0 นั่นเอง

3.2.1.2 การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี OFA

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

$$\min : \left\{ \sum_{i=1}^{N_r} l_i R_i \right\} \quad (3.9)$$

และมีฟังก์ชันข้อบังคับ ดังนี้

▪ กรณีโครงข่ายแบบ NWC

$$\sum_{i=1}^{N_r} r_i \alpha_i^{sg} = 1 \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.10)$$

$$M \times R_i - \left(\sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j'} \right) r_i \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_r; \forall j' = 1, 2, \dots, L \quad (3.11)$$

▪ กรณีโครงข่ายแบบ WC

$$\sum_{i=1}^{N_r} r_i \alpha_i^{sg} = 1 \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.12)$$

$$R_i - \left(\sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^{j'} \right) r_i \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_r; \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.13)$$

$$R_i \in \{0,1,2,\dots\}; r_i \in \{0,1\} \quad \forall i = 1,2,\dots,N_r \quad (3.14)$$

สมการที่ (3.9) แสดงผลรวมของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับวงแหวนใด ๆ ในโครงข่ายเพื่อใช้ในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย สมการที่ (3.10) ถึง (3.11) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ NWC โดยสมการที่ (3.10) แสดงวงแหวนที่ใช้รองรับทราฟฟิกที่ถูกกู้คืนจากความเสียหายของแต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะมีเพียงวงเดียวเท่านั้นเมื่อพิจารณาจากวงแหวนทั้งหมดที่เป็นไปได้ในโครงข่าย และจากสมการเดียวกันนี้จะพบว่าวงแหวนที่แต่ละมัลติคาสต์เซสชันเลือกจะเป็นวงแหวนวงเดียวกัน สมการที่ (3.11) แสดงจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดของแต่ละข่ายเชื่อมโยงในวงแหวนที่ i จะต้องมีปริมาณมากพอที่จะสามารถรองรับวิธีสำรองทั้งหมดที่วิ่งผ่านวงแหวนได้ กล่าวคือ วงแหวนที่ใช้จะต้องมีช่องสัญญาณมากพอที่จะสามารถรองรับทุกวิธีทำงานของทุกมัลติคาสต์เซสชันที่ทำการเปลี่ยนเส้นทางมาใช้เส้นทางบนวงแหวนเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยง j' ได้ ส่วนสมการที่ (3.12) ถึง (3.13) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ WC โดยสมการที่ (3.12) เป็นฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกวงแหวนเช่นเดียวกับสมการที่ (3.10) ส่วนสมการที่ (3.13) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับสำหรับการจัดสรรเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเช่นเดียวกับสมการที่ (3.11) แต่มีการพิจารณาค่าความยาวคลื่นของวิธีสำรองต่าง ๆ ในฟังก์ชันข้อบังคับดังกล่าวด้วย ส่วนสมการที่ (3.13) แสดง R_i เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ และ r_i เป็นตัวแปรประเภทบูลีนนั่นคือมีค่าเป็น 1 หรือ 0

3.2.1.3 การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี MFA

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

$$\min : \left\{ \sum_{i=1}^{N_r} l_i R_i \right\} \quad (3.15)$$

และมีฟังก์ชันข้อบังคับ ดังนี้

▪ กรณีโครงข่ายแบบ NWC

$$\sum_{i=1}^{N_r} r_i \leq MR \quad (3.16)$$

$$\left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times r_i - \sum_{ii=1}^{K_i} p_{i,ii}^{j'} \geq 0 \quad \forall j' = 1,2,\dots,L; \forall i = 1,2,\dots,N_r \quad (3.17)$$

$$\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{ii=1}^{K_i} P_{i,ii}^{j',sg,n} \gamma_{i,ii}^{j',sg,n} (1 - \beta_{i,ii}^{j'}) - T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j'} \geq 0$$

$$\forall j' = 1,2,\dots,L; \forall sg = 1,2,\dots,m; \forall n = 1,2,\dots,t_{sg} \quad (3.18)$$

$$p_{i,ii}^{j'} - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} P_{i,ii}^{j',sg,n} \geq 0 \quad \forall j' = 1,2,\dots,L; \forall i = 1,2,\dots,N_r; \forall ii = 1,2,\dots,K_i \quad (3.19)$$

$$M \times R_i - \sum_{ii=1}^{K_i} p_{i,ii}^{j'} \beta_{i,ii}^j \geq 0 \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; j \neq j'; \forall i = 1, 2, \dots, N_r \quad (3.20)$$

▪ กรณีโครงข่ายแบบ WC

$$\sum_{i=1}^{N_r} r_i \leq MR \quad (3.21)$$

$$\left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times r_i - \sum_{ii=1}^{K_i} p_{i,ii,\lambda}^{j'} \geq 0$$

$$\forall \lambda = 1, 2, \dots, M; \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall i = 1, 2, \dots, N_r \quad (3.22)$$

$$\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{ii=1}^{K_i} P_{i,ii,\lambda}^{j',sg,n} \gamma_{i,ii}^{j',sg,n} (1 - \beta_{i,ii}^{j'}) - T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^{j'} \geq 0$$

$$\forall \lambda = 1, 2, \dots, M; \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall n = 1, 2, \dots, t_{sg} \quad (3.23)$$

$$p_{i,ii,\lambda}^{j'} - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} P_{i,ii,\lambda}^{j',sg,n} \geq 0$$

$$\forall \lambda = 1, 2, \dots, M; \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall i = 1, 2, \dots, N_r; \forall ii = 1, 2, \dots, K_i \quad (3.24)$$

$$R_i - \sum_{ii=1}^{K_i} p_{i,ii,\lambda}^{j'} \beta_{i,ii}^j \geq 0$$

$$\forall j' = 1, 2, \dots, L; j \neq j'; \forall i = 1, 2, \dots, N_r; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.25)$$

$$R_i, p_{i,ii}^{j'}, p_{i,ii,\lambda}^{j'}, P_{i,ii}^{j',sg,n}, P_{i,ii,\lambda}^{j',sg,n} \in \{0, 1, 2, \dots\}; r_i \in \{0, 1\}$$

$$\forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall i = 1, 2, \dots, N_r; \forall ii = 1, 2, \dots, K_i; \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall n = 1, 2, \dots, t_{sg}$$

$$\forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.26)$$

สมการที่ (3.15) แสดงผลรวมของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับวงแหวนใด ๆ ในโครงข่ายเพื่อใช้ในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้กับวงแหวนใด ๆ มีค่าเท่ากับขนาดของวงแหวนหรือจำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดของวงแหวนคูณกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่จัดสรรให้กับวงแหวนแต่ละวง ซึ่งเงื่อนไขที่กำหนดจะคล้ายกับการคำนวณหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดของวิธี OFA ในสมการที่ (3.9) สมการที่ (3.16) ถึง (3.20) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ NWC โดยสมการที่ (3.16) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกวงแหวน ซึ่งอาศัยหลักเกณฑ์ในการเลือกวงแหวนเช่นเดียวกับวิธี OFA แต่จะสามารถทำการกำหนดจำนวนวงแหวนที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายได้ โดยจะกำหนดให้โครงข่ายมีวงแหวนในการปกป้องความเสียหายได้ไม่เกิน MR วงแหวน ข้อกำหนดดังกล่าวนี้จะต่างจากข้อกำหนดของวิธี OFA ที่กำหนดให้มีวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายได้เพียงวงเดียวเท่านั้น สมการที่ (3.17) แสดงเฉพาะเส้นทางที่ตั้งอยู่บนวงแหวนที่ถูกเลือกเท่านั้นที่สามารถใช้

เป็นวิธีสำรวจในการส่งผ่านข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายในโครงข่ายได้ สมการที่ (3.18) แสดงวิธีทำงานที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยง j' ซึ่งเป็นข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความเสียหายจะได้รับการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยการเลี้ยงไปใช้วิธีสำรวจบนวงแหวนที่เลือกไว้จากสมการที่ (3.16) สมการที่ (3.19) แสดงถึงจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดของแต่ละวิธีสำรวจที่ติดตั้งบนวงแหวนจะต้องมีปริมาณมากพอที่จะสามารถรองรับทุกเส้นทางของทุกมัลติคาสต์เซสชันที่ได้รับการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงใด ๆ ในโครงข่ายได้รับความเสียหายโดยเลี้ยงมาใช้วิธีสำรวจดังกล่าว สมการที่ (3.20) แสดงจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดของแต่ละข่ายเชื่อมโยงในวงแหวนที่ i จะต้องมีปริมาณมากพอที่จะสามารถรองรับวิธีสำรวจที่หนาแน่นที่สุดที่วิ่งผ่านวงแหวน ส่วนสมการที่ (3.21) ถึง (3.25) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ NWC โดยสมการที่ (3.21) เป็นฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกวงแหวนเช่นเดียวกับสมการที่ (3.16) ส่วนสมการที่ (3.22) ถึง (3.25) เป็นฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางซึ่งมีข้อกำหนดในการเลือกเส้นทางเช่นเดียวกับสมการที่ (3.17) ถึง (3.20) แต่มีการกำหนดค่าความยาวคลื่นของเส้นทางเพิ่มเข้าไปด้วย ส่วนสมการที่ (3.26) แสดง R_i $p_{i,ii}^{j'}$ $p_{i,ii,\lambda}^{j'}$ $p_{i,ii}^{j',sg,n}$ $p_{i,ii,\lambda}^{j',sg,n}$ เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ และ r_i เป็นตัวแปรประเภทบูลีนนั่นคือมีค่าเป็น 1 หรือ 0

3.2.1.4 การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี JPR

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

$$\min : \left\{ \sum_{j=1}^L s_j \right\} \quad (3.27)$$

และมีฟังก์ชันข้อบังคับ ดังนี้

▪ กรณีโครงข่ายแบบ NWC

$$\sum_{b=1}^{B_{sg,n}^{j'}} \xi_{sg,n,b}^{j'} = T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j'} \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall n = 1, 2, \dots, t_{sg} \quad (3.28)$$

$$M \times s_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} \sum_{b=1}^{B_{sg,n}^{j'}} \xi_{sg,n,b}^{j'} \beta_{sg,n,b}^{j',j} + (M \times w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^j) + \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j'} \delta_{sg,n}^j \geq 0 \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; j \neq j' \quad (3.29)$$

▪ กรณีโครงข่ายแบบ WC

$$\sum_{b=1}^{B_{sg,n}^{j'}} \xi_{sg,n,b,\lambda}^{j'} = T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^{j'} \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall n = 1, 2, \dots, t_{sg}; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.30)$$

$$s_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} \sum_{b=1}^{B_{sg,n}^{j'}} \xi_{sg,n,b,\lambda}^{j'} \beta_{sg,n,b}^{j',j} + (w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^j) + \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^{j'} \delta_{sg,n}^j \geq 0$$

$$\forall j' = 1, 2, \dots, L; j \neq j'; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.31)$$

$$s_j, \xi_{sg,n,b}^{j'}, \xi_{sg,n,b,\lambda}^{j'} \in \{0, 1, 2, \dots\}$$

$$\forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall j = 1, 2, \dots, L; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M; \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall n = 1, 2, \dots, t_{sg};$$

$$\forall b = 1, 2, \dots, B_{sg,n}^{j'} \quad (3.32)$$

สมการที่ (3.27) แสดงผลรวมของเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย สมการที่ (3.28) ถึง (3.29) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ NWC โดยสมการที่ (3.28) แสดงทุกเส้นทางที่เชื่อมต่อแบบต้นไม้ที่เป็นวิธีทำงานซึ่งถูกรบกวนจากการที่ข่ายเชื่อมโยง j' ได้รับความเสียหายจะทำการเปลี่ยนเส้นทางมาใช้เส้นทางที่เชื่อมต่อแบบต้นไม้ที่เป็นวิธีสำรองแทน นั่นคือ วิธีสำรองของโครงข่ายจะต้องมีปริมาณมากพอที่จะสามารถรองรับทุกวิธีทำงานที่ทำการเปลี่ยนเส้นทางมาใช้วิธีสำรองดังกล่าว ส่วนสมการที่ (3.29) แสดงจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดของเส้นใยแก้วนำแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะต้องสามารถรองรับทุกวิธีสำรองที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวเมื่อข่ายเชื่อมโยง j' ได้รับความเสียหายได้ โดยพจน์ที่ 3 ของสมการหมายถึง ช่องสัญญาณที่เหลือของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานจะถูกนำมาใช้เป็นช่องสัญญาณของแต่ละวิธีสำรองในโครงข่าย ส่วนพจน์ที่ 4 ของสมการหมายถึง แต่ละวิธีทำงานที่ถูกรบกวนจากความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยง j' จะทำการปลดช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานที่ถูกจองไว้โดยวิธีทำงานดังกล่าวออก ช่องสัญญาณที่ถูกปลดออกนี้จะสามารถนำไปใช้เป็นช่องสัญญาณของแต่ละวิธีสำรองที่ใช้ในการแก้ปัญหากรณีที่ข่ายเชื่อมโยง j' ได้รับความเสียหายได้ ส่วนสมการที่ (3.30) ถึง (3.31) เป็นฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ WC ซึ่งมีข้อกำหนดในการเลือกเส้นทางเช่นเดียวกับสมการที่ (3.28) ถึง (3.29) แต่มีการกำหนดค่าความยาวคลื่นของเส้นทางเพิ่มเข้าไปด้วย และสมการสุดท้ายคือ สมการที่ (3.32) แสดง s_j , $\xi_{sg,n,b}^{j'}$ และ $\xi_{sg,n,b,\lambda}^{j'}$ เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ

3.2.2 การจำลองปัญหาแบบ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการจำลองปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการในการสร้างโครงข่ายที่สามารถปกป้องตัวเองจากความเสียหายที่เกิดจากหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ได้จากการออกแบบจะประกอบด้วยเส้นใย

แก้วนำแสงที่เป็นเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง การจำลองปัญหาด้วยวิธีนี้เราต้องทำการจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่กำหนดให้โครงข่ายรวมทั้งต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายด้วย ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายในกรณีนี้จึงไม่ต้องทำการกำหนดเส้นทางและค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติมาให้เหมือนกับกรณีของ Optimized Spare Fiber Assignment แต่ใช้กรรมวิธีในการปกป้องโครงข่ายเหมือนเดิม นั่นคือใช้ OFO OFA MFA และ JPR ในการปกป้องโครงข่าย

3.2.2.1 การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี OFO

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

$$\min : \left\{ \sum_{j=1}^L w_j + \sum_{sg=1}^m \sum_{q=1}^{Q_{sg}} l_{sg,q} R_{sg,q} \right\} \quad (3.33)$$

และมีฟังก์ชันข้อบังคับ ดังนี้

▪ กรณีโครงข่ายแบบ NWC

$$\sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} = d_{sg} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.34)$$

$$M \times w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, L \quad (3.35)$$

$$\sum_{q=1}^{Q_{sg}} r_{sg,q} = 1 \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.36)$$

$$R_{sg,q} \leq \left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times r_{sg,q} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall q = 1, 2, \dots, Q_{sg} \quad (3.37)$$

$$\sum_{q=1}^{Q_{sg}} (M \times R_{sg,q}) - \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j'} \geq 0 \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall j' = 1, 2, \dots, L \quad (3.38)$$

▪ กรณีโครงข่ายแบบ WC

$$\sum_{n=1}^{t_{sg}} \sum_{\lambda=1}^M T_{sg,n,\lambda} = d_{sg} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.39)$$

$$w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, L; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.40)$$

$$\sum_{q=1}^{Q_{sg}} r_{sg,q} = 1 \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.41)$$

$$R_{sg,q} \leq \left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times r_{sg,q} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall q = 1, 2, \dots, Q_{sg} \quad (3.42)$$

$$\sum_{q=1}^{Q_{sg}} R_{sg,q} - \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^{j'} \geq 0 \quad \forall sg = 1,2,\dots,m; \forall j' = 1,2,\dots,L; \forall \lambda = 1,2,\dots,M \quad (3.43)$$

$$w_j, T_{sg,n} R_{sg,q} \in \{0,1,2,\dots\}; r_{sg,q} \in \{0,1\}$$

$$\forall j = 1,2,\dots,L; \forall sg = 1,2,\dots,m; \forall n = 1,2,\dots,t_{sg}; \forall \lambda = 1,2,\dots,M; \forall q = 1,2,\dots,Q_{sg} \quad (3.44)$$

สมการที่ (3.33) แสดงถึงผลรวมของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย สมการที่ (3.34) ถึง (3.38) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ NWC ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชันข้อบังคับในการจัดสรรเส้นทางของวิถีทำงานในสมการที่ (3.34) ถึง (3.35) และฟังก์ชันข้อบังคับในการจัดสรรเส้นทางของวิถีสำรองในสมการที่ (3.39) ถึง (3.43) ตามลำดับ สมการที่ (3.34) แสดงจำนวนการเชื่อมต่อแบบต้นไม้มืดจัดสรรให้กับแต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะต้องมีปริมาณเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่มัลติคาสต์เซสชันนั้น ๆ ทำการร้องขอ ส่วนสมการที่ (3.35) แสดงจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานจะต้องมากพอที่จะรองรับทุกเส้นทางเชื่อมต่อแบบต้นไม้มืดที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยง j ได้ สมการที่ (3.36) เป็นฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกวงแหวนที่ใช้ปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายซึ่งมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาเช่นเดียวกับสมการที่ (3.2) สมการที่ (3.37) แสดงเส้นใยแก้วนำแสงสำรองของโครงข่ายจะถูกวางลงบนข่ายเชื่อมโยงของวงแหวนที่ถูกเลือกเท่านั้น สมการที่ (3.38) แสดงจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดของเส้นใยแก้วนำแสงสำรองบนวงแหวนที่ใช้ปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg จะต้องมีความเพียงพอที่จะสามารถรองรับทุกวิถีสำรองที่วิ่งผ่านวงแหวน กล่าวคือ วงแหวนที่ใช้จะต้องมีช่องสัญญาณมากพอที่จะสามารถรองรับทุกวิถีทำงานของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg ที่ทำการเปลี่ยนเส้นทางมาใช้เส้นทางบนวงแหวนเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยง j' ส่วนสมการที่ (3.39) ถึง (3.43) เป็นฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ WC ซึ่งมีข้อกำหนดในการเลือกเส้นทางเช่นเดียวกับสมการที่ (3.34) ถึง (3.38) แต่มีการกำหนดค่าความยาวคลื่นของเส้นทางเพิ่มเข้าไปด้วย ส่วนสมการที่ (3.44) แสดง $w_j, R_{sg,q}, T_{sg,n}, T_{sg,n,\lambda}$ เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ และ $r_{sg,q}$ เป็นตัวแปรประเภทยูเนียนั้นคือมีค่าเป็น 1 หรือ 0

3.2.2.2 การจัดสรรเส้นทางใหม่วิถี OFA

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

$$\min : \sum_{j=1}^L w_j + \sum_{sg=1}^m l_i R_i \quad (3.45)$$

และมีฟังก์ชันข้อบังคับ ดังนี้

▪ กรณีโครงข่ายแบบ NWC

$$\sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} = d_{sg} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.46)$$

$$M \times w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, L \quad (3.47)$$

$$\sum_{i=1}^{N_r} r_i \alpha_i^{sg} = 1 \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.48)$$

$$R_i \leq \left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times r_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_r \quad (3.49)$$

$$\sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j'} - M \times R_i \leq \left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times (1 - r_i) \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall i = 1, 2, \dots, N_r \quad (3.50)$$

▪ กรณีโครงข่ายแบบ WC

$$\sum_{n=1}^{t_{sg}} \sum_{\lambda=1}^M T_{sg,n,\lambda} = d_{sg} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.51)$$

$$w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, L; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.52)$$

$$\sum_{i=1}^{N_r} r_i \alpha_i^{sg} = 1 \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.53)$$

$$R_i \leq \left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times r_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_r \quad (3.54)$$

$$\sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^{j'} - R_i \leq \left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times (1 - r_i) \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall i = 1, 2, \dots, N_r; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.55)$$

$$w_j, T_{sg,n}, T_{sg,n,\lambda}, R_i \in \{0, 1, 2, \dots\}; r_i \in \{0, 1\}$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, L; \forall i = 1, 2, \dots, N_r; \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall n = 1, 2, \dots, t_{sg}; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.56)$$

สมการที่ (3.45) แสดงถึงผลรวมของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย สมการที่ (3.46) ถึง (3.50) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ NWC ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชันข้อบังคับในการจัดสรรเส้นทางของวิถีทำงานเช่นเดียวกับสมการที่ (3.34) ถึง (3.35) ซึ่งในที่นี้จะใช้เป็นสมการที่ (3.46) ถึง (3.47) ตามลำดับ ส่วนสมการที่ (3.48) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกวงแหวนที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายซึ่งมีลักษณะในการพิจารณาเช่นเดียวกับสมการที่ (3.10) สมการที่ (3.50) แสดงจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดของเส้นใยแก้วนำแสงสำรองจะต้องมีปริมาณมากพอที่จะสามารถรองรับจำนวนวิถีสำรองทั้งหมดที่วิ่งผ่านวงแหวน กล่าวคือ จะต้องสามารถรองรับทุกเส้นทางที่เชื่อมต่อบน

ต้นไม้ที่หนาแน่นที่สุดที่หลีกเลี่ยงความเสียหายที่ชายเชื่อมโยง j' ด้วยการเปลี่ยนมาใช้เส้นทางบนวงแหวนที่เลือก เงื่อนไขดังกล่าวนี้จะเป็นจริงได้ ก็ต่อเมื่อเส้นใยแก้วนำแสงสำรองดังกล่าวเป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่ตั้งอยู่บนชายเชื่อมโยงของวงแหวนที่เลือกเท่านั้น นั่นคือ สมการที่ (3.49) ต้องเป็นจริงด้วย ส่วนสมการที่ (3.51) ถึง (3.55) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ WC ซึ่งมีข้อกำหนดในการเลือกเส้นทางเช่นเดียวกับสมการที่ (3.46) ถึง (3.50) แต่มีการกำหนดค่าความยาวคลื่นของเส้นทางเพิ่มเข้าไปด้วย ส่วนสมการที่ (3.56) แสดง w_j , $T_{sg,n}$, $T_{sg,n,\lambda}$, R_i เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ และ r_i เป็นตัวแปรประเภทบูลีน นั่นคือมีค่าเป็น 1 หรือ 0

3.2.2.3 การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี MFA

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

$$\min : \sum_{j=1}^L w_j + \sum_{sg=1}^m l_{sg} R_{sg} \quad (3.57)$$

และมีฟังก์ชันข้อบังคับ ดังนี้

▪ กรณีโครงข่ายแบบ NWC

$$\sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} = d_{sg} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.58)$$

$$M \times w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, L \quad (3.59)$$

$$\sum_{i=1}^{N_r} r_i \leq MR \quad (3.60)$$

$$\left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times r_i - \sum_{ii=1}^{Q_i} p_{i,ii}^{j'} \geq 0 \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall i = 1, 2, \dots, N_r \quad (3.61)$$

$$\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{ii=1}^{Q_i} P_{i,ii}^{j',sg,n} \gamma_{i,ii}^{j',sg,n} (1 - \beta_{i,ii}^{j'}) - T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j'} \geq 0 \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall n = 1, 2, \dots, t_{sg} \quad (3.62)$$

$$p_{i,ii}^{j'} - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} P_{i,ii}^{j',sg,n} \geq 0 \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall i = 1, 2, \dots, N_r; \forall ii = 1, 2, \dots, Q_i \quad (3.63)$$

$$M \times R_i - \sum_{ii=1}^{Q_i} p_{i,ii}^{j'} \beta_{i,ii}^j \geq 0 \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; j \neq j'; \forall i = 1, 2, \dots, N_r \quad (3.64)$$

▪ กรณีโครงข่ายแบบ WC

$$\sum_{n=1}^{t_{sg}} \sum_{\lambda=1}^M T_{sg,n,\lambda} = d_{sg} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.65)$$

$$w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, L; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.66)$$

$$\sum_{i=1}^{N_r} r_i \leq MR \quad (3.67)$$

$$\left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) \times r_i - \sum_{ii=1}^{Q_i} p_{i,ii,\lambda}^{j'} \geq 0 \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall i = 1, 2, \dots, N_r \quad (3.68)$$

$$\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{ii=1}^{Q_i} P_{i,ii,\lambda}^{j',sg,n} \gamma_{i,ii}^{j',sg,n} (1 - \beta_{i,ii}^{j'}) - T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^{j'} \geq 0$$

$$\forall \lambda = 1, 2, \dots, M; \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall n = 1, 2, \dots, t_{sg} \quad (3.69)$$

$$p_{i,ii,\lambda}^{j'} - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} P_{i,ii,\lambda}^{j',sg,n} \geq 0$$

$$\forall \lambda = 1, 2, \dots, M; \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall i = 1, 2, \dots, N_r; \forall ii = 1, 2, \dots, Q_i \quad (3.70)$$

$$R_i - \sum_{ii=1}^{Q_i} p_{i,ii,\lambda}^{j'} \beta_{i,ii}^{j'} \geq 0$$

$$\forall j' = 1, 2, \dots, L; j \neq j'; \forall i = 1, 2, \dots, N_r; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.71)$$

$$w_j, T_{sg,n}, T_{sg,n,\lambda}, R_i, p_{i,ii}^{j'}, p_{i,ii,\lambda}^{j'}, P_{i,ii}^{j',sg,n}, P_{i,ii,\lambda}^{j',sg,n} \in \{0, 1, 2, \dots\}; r_i \in \{0, 1\}$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, L; \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall i = 1, 2, \dots, N_r; \forall ii = 1, 2, \dots, Q_i; \forall sg = 1, 2, \dots, m;$$

$$\forall n = 1, 2, \dots, t_{sg}; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.72)$$

สมการที่ (3.57) แสดงถึงผลรวมของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย สมการที่ (3.58) ถึง (3.64) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ NWC ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชันข้อบังคับในการจัดสรรเส้นทางของวิถีทำงานเช่นเดียวกับสมการที่ (3.34) ถึง (3.35) ซึ่งในที่นี้จะใช้เป็นสมการที่ (3.58) ถึง (3.59) ตามลำดับ ส่วนสมการที่ (3.60) ถึง (3.64) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกวิถีสำรองและวงแหวนที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายซึ่งมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาเช่นเดียวกับสมการที่ (3.16) ถึง (3.20) ส่วนสมการที่ (3.65) ถึง (3.71) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ WC ซึ่งมีข้อกำหนดในการเลือกเส้นทางเช่นเดียวกับสมการที่ (3.58) ถึง (3.64) แต่มีการกำหนดค่าความยาวคลื่นของเส้นทางเพิ่มเข้าไปด้วย ส่วนสมการที่ (3.72) แสดง w_j , $T_{sg,n}$, $T_{sg,n,\lambda}$, R_i , $p_{i,ii}^{j'}$, $p_{i,ii,\lambda}^{j'}$, $P_{i,ii}^{j',sg,n}$, $P_{i,ii,\lambda}^{j',sg,n}$ เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ และ r_i เป็นตัวแปรประเภทยูนิต นั่นคือมีค่าเป็น 1 หรือ 0

3.2.2.4 การจัดสรรเส้นทางใหม่วิถี JPR

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

$$\min : \sum_{j=1}^L \{w_j + s_j\} \quad (3.73)$$

และมีฟังก์ชันข้อบังคับ ดังนี้

▪ กรณีโครงข่ายแบบ NWC

$$\sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} = d_{sg} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.74)$$

$$M \times w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, L \quad (3.75)$$

$$\sum_{b=1}^{B_{sg,n}^j} \xi_{sg,n,b}^{j'} = T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j'} \quad \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall n = 1, 2, \dots, t_{sg} \quad (3.76)$$

$$M \times s_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} \sum_{b=1}^{B_{sg,n}^j} \xi_{sg,n,b}^{j'} \beta_{sg,n,b}^{j',j} + (M \times w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^j) + \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j'} \delta_{sg,n}^j \geq 0$$

$$\forall j' = 1, 2, \dots, L; j \neq j' \quad (3.77)$$

▪ กรณีโครงข่ายแบบ WC

$$\sum_{n=1}^{t_{sg}} \sum_{\lambda=1}^M T_{sg,n,\lambda} = d_{sg} \quad \forall sg = 1, 2, \dots, m \quad (3.78)$$

$$w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, L; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.79)$$

$$\sum_{b=1}^{B_{sg,n}^j} \xi_{sg,n,b,\lambda}^{j'} = T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^{j'}$$

$$\forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall n = 1, 2, \dots, t_{sg}; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.80)$$

$$s_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} \sum_{b=1}^{B_{sg,n}^j} \xi_{sg,n,b,\lambda}^{j'} \beta_{sg,n,b}^{j',j} + (w_j - \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^j) + \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n,\lambda} \delta_{sg,n}^{j'} \delta_{sg,n}^j \geq 0$$

$$\forall j' = 1, 2, \dots, L; j \neq j'; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M \quad (3.81)$$

$$w_j, s_j, \xi_{sg,n,b}^{j'}, \xi_{sg,n,b,\lambda}^{j'} \in \{0, 1, 2, \dots\}$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, L; \forall j' = 1, 2, \dots, L; \forall sg = 1, 2, \dots, m; \forall n = 1, 2, \dots, t_{sg}; \forall \lambda = 1, 2, \dots, M$$

$$\forall b = 1, 2, \dots, B_{sg,n}^j \quad (3.82)$$

สมการที่ (3.77) แสดงถึงผลรวมของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย สมการที่ (3.78) ถึง (3.81) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ NWC ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชันข้อบังคับในการจัดสรรเส้นทางของวิถีทำงานเช่นเดียวกับสมการที่ (3.34) ถึง (3.35) ซึ่งในที่นี้จะใช้เป็นสมการที่ (3.74) ถึง (3.75) ตามลำดับ ส่วนสมการที่ (3.76) ถึง (3.77) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกวิถีสำรองซึ่งมีหลักเกณฑ์ในการ

พิจารณาเช่นเดียวกับสมการที่ (3.28) ถึง (3.29) ส่วนสมการที่ (3.78) ถึง (3.81) เป็นสมการฟังก์ชันข้อบังคับในการเลือกเส้นทางของโครงข่ายแบบ WC ซึ่งมีข้อกำหนดในการเลือกเส้นทางเช่นเดียวกับสมการที่ (3.74) ถึง (3.77) แต่มีการกำหนดค่าความยาวคลื่นของเส้นทางเพิ่มเข้าไปด้วย ส่วนสมการที่ (3.82) แสดง w_j s_j $T_{sg,n}$ $T_{sg,n,\lambda}$ $\xi_{sg,n,b}^j$ และ $\xi_{sg,n,b,\lambda}^j$ เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ

3.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่กำหนดในการหาผลเฉลย

เนื่องด้วยเนื้อหาในบทนี้เป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันประกอบไปด้วยสมการและตัวแปรต่าง ๆ ในการหาผลเฉลยของแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ตามกรรมวิธีที่ใช้ในการจำลองปัญหา ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการทำความเข้าใจในเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ จึงได้ทำการสรุปตัวของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ตามกรรมวิธีที่ใช้ในการจำลองปัญหาไว้ในตารางที่ 3.1 นอกจากนี้ยังได้ทำการสรุปพารามิเตอร์และตัวแปรที่จะต้องกำหนดให้และที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบต่าง ๆ ตามกรรมวิธีในการจำลองปัญหาไว้ในตารางที่ 3.2 ส่วนตารางที่ 3.3 และ 3.4 จะแสดงถึงจำนวนตัวแปร (Number of Variables, N_v) และจำนวนสมการ (Number of Constraints, N_c) ของแต่ละแบบจำลองตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ตัวย่อของแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่

Protection Schemes	Optimized Spare Fiber Assignment	Jointly Optimized Spare and Working Fiber Assignment
One Ring Protection for One Multicast Session	OFO	JOFO
One Ring Protection for All Multicast Session	OFA	JOFA
Multi Ring Protection for All Multicast Session	MFA	JMFA
Joined Part Recovery	JPR	JJPR

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และตัวแปรที่จะต้องกำหนดให้และที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Protection Schemes	Input	Output
OFO	$T_{sg,n}, T_{sg,n,\lambda}, \delta_{sg,n}^{j'}, l_{sg,q}, M$	$R_{sg,q}, r_{sg,q}$
OFA	$T_{sg,n}, T_{sg,n,\lambda}, \delta_{sg,n}^{j'}, \alpha_i^{sg}, l_i, M$	R_i, r_i
MFA	$MR, d_{sg}, l_i, M, \delta_{sg,n}^{j'}, \gamma_{i,ii}^{j',sg,n}, T_{sg,n}, T_{sg,n,\lambda}, \beta_{i,ii}^{j'}$	$R_i, r_i, p_{i,ii}^{j'}, p_{i,ii,\lambda}^{j'}, p_{i,ii}^{j',sg,n}, p_{i,ii,\lambda}^{j',sg,n}$
JPR	$T_{sg,n}, T_{sg,n,\lambda}, \delta_{sg,n}^{j'}, \beta_{sg,n,b}^{j',j}, M$	$s_j, \xi_{sg,n,b}^{j'}, \zeta_{sg,n,b,\lambda}^{j'}$
JOFO	$d_{sg}, \delta_{sg,n}^{j'}, l_{sg,q}, M$	$w_j, T_{sg,n}, T_{sg,n,\lambda}, R_{sg,q}, r_{sg,q}$
JOFA	$d_{sg}, \delta_{sg,n}^{j'}, \alpha_i^{sg}, l_i, M$	$w_j, T_{sg,n}, T_{sg,n,\lambda}, R_i, r_i$
JMFA	$MR, d_{sg}, l_i, M, \delta_{sg,n}^{j'}, \gamma_{i,ii}^{j',sg,n}, \beta_{i,ii}^{j'}$	$R_i, r_i, w_j, T_{sg,n}, T_{sg,n,\lambda}, p_{i,ii}^{j'}, p_{i,ii,\lambda}^{j'}, p_{i,ii}^{j',sg,n}, p_{i,ii,\lambda}^{j',sg,n}$
JJPR	$d_{sg}, M, \delta_{sg,n}^{j'}, \beta_{sg,n,b}^{j',j}$	$w_j, s_j, T_{sg,n}, T_{sg,n,\lambda}, \xi_{sg,n,b}^{j'}, \zeta_{sg,n,b,\lambda}^{j'}$

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวแปร (Number of Variables, N_v) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Protection Schemes	N_v	
	NWC	WC
OFO	$2 \sum_{sg=1}^m Q_{sg}$	$2 \sum_{sg=1}^m Q_{sg}$
OFA	$2N_r$	$2N_r$
MFA	$2N_r + L \sum_{i=1}^{N_r} K_i (\sum_{sg=1}^m t_{sg} + 1)$	$2N_r + LM \sum_{i=1}^{N_r} K_i (\sum_{sg=1}^m t_{sg} + 1)$
JPR	$L + \sum_{j'=1}^L \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} B_{sg,n}^{j'}$	$L + M \sum_{j'=1}^L \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} B_{sg,n}^{j'}$
JOFO	$L + \sum_{sg=1}^m t_{sg} + 2 \sum_{sg=1}^m Q_{sg}$	$L + M \sum_{sg=1}^m t_{sg} + 2 \sum_{sg=1}^m Q_{sg}$
JOFA	$L + 2N_r + \sum_{sg=1}^m t_{sg}$	$L + 2N_r + M \sum_{sg=1}^m t_{sg}$
JMFA	$L + 2N_r + \sum_{sg=1}^m t_{sg} + L \sum_{i=1}^{N_r} K_i (\sum_{sg=1}^m t_{sg} + 1)$	$L + 2N_r + M \sum_{sg=1}^m t_{sg} + LM \sum_{i=1}^{N_r} K_i (\sum_{sg=1}^m t_{sg} + 1)$
JJPR	$2L + \sum_{sg=1}^m t_{sg} + \sum_{j'=1}^L \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} B_{sg,n}^{j'}$	$2L + M \sum_{sg=1}^m t_{sg} + M \sum_{j'=1}^L \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} B_{sg,n}^{j'}$

ตารางที่ 3.4 จำนวนสมการ (Number of Constraints, N_c) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Protection Schemes	N_c	
	NWC	WC
OFO	$m + mL + \sum_{sg=1}^m Q_{sg}$	$m + mML + \sum_{sg=1}^m Q_{sg}$
OFA	$m + LN_r$	$m + MLN_r$
MFA	$1 + L(LN_r + \sum_{sg=1}^m t_{sg} + \sum_{i=1}^{N_r} K_i)$	$1 + ML(LN_r + \sum_{sg=1}^m t_{sg} + \sum_{i=1}^{N_r} K_i)$
JPR	$L(\sum_{sg=1}^m t_{sg} + L - 1)$	$ML(\sum_{sg=1}^m t_{sg} + L - 1)$
JOFO	$2m + L(m + 1) + \sum_{sg=1}^m Q_{sg}$	$2m + ML(m + 1) + \sum_{sg=1}^m Q_{sg}$
JOFA	$2m + L + N_r(L + 1)$	$2m + ML + N_r(ML + 1)$
JMFA	$1 + m + L(LN_r + \sum_{sg=1}^m t_{sg} + \sum_{i=1}^{N_r} K_i + 1)$	$1 + m + ML(LN_r + \sum_{sg=1}^m t_{sg} + \sum_{i=1}^{N_r} K_i + 1)$
JJPR	$m + L(\sum_{sg=1}^m t_{sg} + L)$	$m + ML(\sum_{sg=1}^m t_{sg} + L)$

บทที่ 4

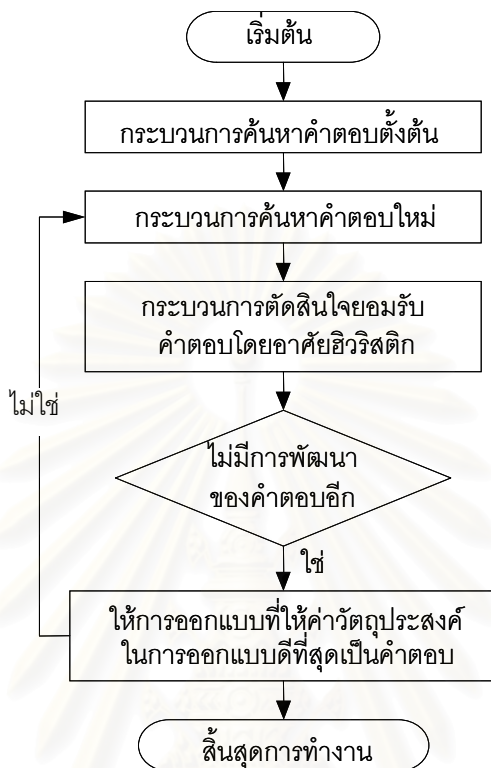
อัลกอริทึมฮิวริสติก

จากการศึกษาถึงผลเฉลยที่ได้จากการจำลองปัญหาด้วยสมการคณิตศาสตร์ในบทที่ 3 จะพบว่า แบบจำลองของโครงข่ายที่มีจำนวนโหนดและชายเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้นจะใช้เวลาในการหาผลเฉลยที่นานขึ้น นั่นคือ เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของโครงข่าย ซึ่งการเพิ่มขึ้นของจำนวนโหนดและชายเชื่อมโยงในโครงข่ายนี้จะส่งผลให้จำนวนสมการและตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ขนาดของโครงข่ายที่มีอิทธิพลต่อเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยแล้ว กรรมวิธีที่ใช้ในการหาผลเฉลยก็นับเป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยเช่นกัน จากการพิจารณาพบว่า การหาผลเฉลยด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะเป็นการหาผลเฉลยจากคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ดังนั้นเพื่อให้สามารถหาผลเฉลยของโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้ภายในเวลาที่เหมาะสม การหาผลเฉลยด้วยอัลกอริทึมฮิวริสติกจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งในการหาผลเฉลยที่ถูกนำมาใช้แทนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่อย่างไรก็ตามผลเฉลยที่ได้จากการหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมฮิวริสติกจะเป็นผลเฉลยที่ได้มาจากคำตอบที่เป็นไปได้เพียงบางส่วน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าที่ได้จากอัลกอริทึมฮิวริสติกนี้ไม่ใช่ค่าผลเฉลยที่ดีที่สุด (Optimal Solution) แต่เป็นค่าผลเฉลยที่ดีในระดับหนึ่งที่สามารถหาได้ในเวลาที่เหมาะสมแทน

4.1 การทำงานของอัลกอริทึมฮิวริสติก

เพื่อให้การทำความเข้าใจเนื้อหาในบทนี้ง่ายขึ้น ก่อนอื่นจึงจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจถึงการทำงานของอัลกอริทึมฮิวริสติกซึ่งมีหลักการทั่วไป คือ เริ่มแรกจะทำการหาผลเฉลยค่าตั้งต้นซึ่งทำโดยการสุ่มหาค่าผลเฉลยหรือใช้อัลกอริทึมในการหาค่าผลเฉลย หลังจากนั้นจะทำการปรับปรุงผลเฉลยที่ได้ โดยการปรับปรุงค่าผลเฉลยจะถูกแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนสำคัญ คือ กระบวนการค้นหาคำตอบใหม่ และกระบวนการตัดสินใจเพื่อยอมรับคำตอบ กระบวนการค้นหาคำตอบใหม่ คือ การปรับเปลี่ยนการออกแบบโครงข่ายจากเดิมไปสู่การออกแบบที่อาจจะให้วัตถุประสงค์ในการออกแบบอัลกอริทึมดีขึ้น คำตอบใหม่นี้อาจได้รับการยอมรับหรือไม่ก็ได้ โดยการพิจารณาจะทำในกระบวนการตัดสินใจเพื่อยอมรับคำตอบ กระบวนการค้นหาคำตอบใหม่และกระบวนการตัดสินใจเพื่อยอมรับคำตอบจะถูกทำซ้ำหลาย ๆ รอบ (Iterative) จนกว่าจะได้คำตอบเป็นที่น่าพอใจหรือไม่เห็นการพัฒนาของคำตอบอีก

ภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ ขั้นตอนการปรับปรุงการออกแบบให้ดีขึ้นด้วยอัลกอริทึมฮิวริสติกมีผังงานดังรูปที่ 4.1

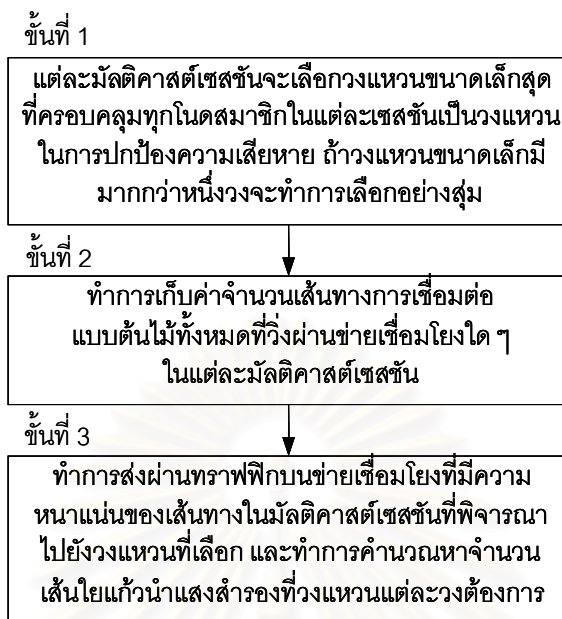


รูปที่ 4.1 อัลกอริทึมฮิวริสติก

หลักการดังกล่าวจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอัลกอริทึมฮิวริสติกในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO OFA MFA และ JPR ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2 อัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO

อัลกอริทึมนี้เป็นการออกแบบเพื่อหาต้นทุนของโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO ทั้งในกรณี NWC และ WC ซึ่งต้นทุนของโครงข่ายที่หาได้เป็นต้นทุนที่คิดจากความเป็นไปได้ทั้งหมดของเหตุการณ์ที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย เนื่องจากค่าต้นทุนในการติดตั้งเส้นใยแก้วนำแสงของวงแหวนแต่ละวงจะแปรผันตามขนาดของวงแหวนที่เลือก ดังนั้นการเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กจะประหยัดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในการติดตั้งบนโครงข่ายมากกว่าการเลือกวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ การเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถแก้ไขปัญหากรณีหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหายในแต่ละมัลติคาสต์เซชันได้ จึงน่าจะทำให้การใช้ทรัพยากรในวงแหวนที่เลือกคุ้มค่าที่สุด รูปที่ 4.2 เป็นการแสดงผังงานของอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO



รูปที่ 4.2 ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO

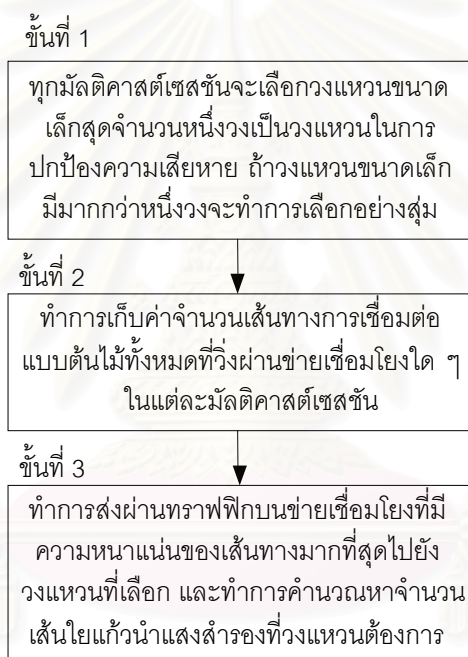
และสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

- ขั้นที่ 1: แต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะทำการเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กสุดจากวงแหวนทั้งหมดที่เป็นไปได้มาใช้เป็นวงแหวนในการปกป้องความเสียหาย โดยวงแหวนดังกล่าวจะต้องเป็นวงแหวนที่ครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกในมัลติคาสต์เซสชันนั้น ๆ ถ้าวงแหวนที่มีขนาดเล็กสุดในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันมีจำนวนมากกว่าหนึ่งวงจะทำการสุ่มเลือกวงแหวนขึ้นมาหนึ่งวง
- ขั้นที่ 2: นิยาม เมตริกซ์ T เพื่อใช้เก็บค่าจำนวนเส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ทั้งหมดที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงใด ๆ ในแต่ละมัลติคาสต์เซสชัน โดยทำการเก็บค่าจำนวนเส้นทางการเชื่อมต่อที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ j ของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg ลงบนแต่ละสดมภ์ที่ j ของเมตริกซ์แถวที่ sg
- ขั้นที่ 3: ในกรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย เส้นทางทุกเส้นทางในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายจะถูกเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่บนวงแหวนที่เลือกจากขั้นที่ 1 เนื่องจากวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายจะต้องมีจำนวนช่องสัญญาณในปริมาณมากพอที่จะสามารถรองรับทุกเส้นทางที่เป็นวิถีสำรองที่ส่งผ่านวงแหวนได้ นั่นคือจะต้องสามารถรองรับทุกเส้นทางที่เป็นวิถีทำงานที่หนาแน่นที่สุดที่ถูกกระทบจากความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ หรือกล่าวได้ว่า แต่ละข่ายเชื่อมโยงของวงแหวนจะวางเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานบนข่ายเชื่อมโยงที่มี

ความหนาแน่นของเส้นทางมากที่สุด ดังนั้น จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่วงแหวนในการปกป้องความเสียหายของมัลติคาสต์เซสชันที่ sg ต้องการจะมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดในแถวที่ sg ของเมตริกซ์ T คูณกับจำนวนขั้วเชื่อมโยงทั้งหมดของวงแหวน

4.3 อัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFA

อัลกอริทึมนี้เป็นการออกแบบเพื่อหาต้นทุนของโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFA ทั้งในกรณี NWC และ WC ซึ่งต้นทุนของโครงข่ายที่หาได้เป็นต้นทุนที่คิดจากความเป็นไปได้ทั้งหมดของเหตุการณ์ที่หนึ่งขั้วเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย เนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFA ซึ่งสามารถแสดงเป็นผังงานได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFA

และสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นที่ 1: ทำการเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กสุดจากวงแหวนทั้งหมดที่เป็นไปได้มาใช้เป็นวงแหวนในการปกป้องความเสียหาย โดยวงแหวนดังกล่าวจะต้องเป็นวงแหวนที่มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกของแต่ละมัลติคาสต์เซสชันได้ ในกรณีที่มัลติคาสต์เซสชันที่มีวงแหวนที่มีขนาดเล็กสุดเป็นจำนวนมากกว่าหนึ่งวง จะทำการเลือกวงแหวนดังกล่าวขึ้นมาหนึ่งวงอย่างสุ่ม

ขั้นที่ 2: นิยาม เมตริกซ์ T เพื่อใช้เก็บค่าจำนวนเส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้อันทั้งหมดที่วิ่งผ่านขั้วเชื่อมโยงใด ๆ ในโครงข่าย ลงในเมตริกซ์แถวที่ 0

ขั้นที่ 3: ในกรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย เส้นทางทุกเส้นทางบนโครงข่ายที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายจะถูกเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่บนวงแหวนที่เลือกจากขั้นที่ 1 เนื่องจากวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายจะต้องมีจำนวนช่องสัญญาณในปริมาณมากพอที่จะสามารถรองรับทุกเส้นทางที่เป็นวิธีสำรองที่ส่งผ่านวงแหวนได้ นั่นคือ จะต้องสามารถรองรับทุกเส้นทางที่เป็นวิธีทำงานที่หนาแน่นที่สุดที่ถูกกระทบจากความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ หรือกล่าวได้ว่า แต่ละข่ายเชื่อมโยงของวงแหวนจะวางเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานบนข่ายเชื่อมโยงที่มีความหนาแน่นของเส้นทางมากที่สุด ดังนั้น จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองจะสามารถคำนวณได้จากค่าสูงสุดในแถวที่ 0 ของเมตริกซ์ \mathbf{T} คูณกับจำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดของวงแหวนนั่นเอง

4.4 อัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MFA

อัลกอริทึมนี้เป็นการออกแบบเพื่อหาต้นทุนของโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MFA ทั้งในกรณี NWC และ WC ซึ่งต้นทุนของโครงข่ายที่หาได้เป็นต้นทุนที่คิดจากความเป็นไปได้ทั้งหมดของเหตุการณ์ที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย เนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MFA ซึ่งสามารถแสดงเป็นผังงานได้ดังรูปที่ 4.4 และสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นที่ 1: หาวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่าย และทำการเลือกชุดของวงแหวนมาจำนวนหนึ่งให้ครอบคลุมเพื่อรองรับทราฟฟิกระหว่างคูโหนดสมาชิกในแต่ละมัลติคาสต์เซตชัน

ขั้นที่ 2: นำข่ายเชื่อมโยงที่ j ออกจากโครงข่าย เพื่อสมมติเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงที่ j ได้รับความเสียหาย

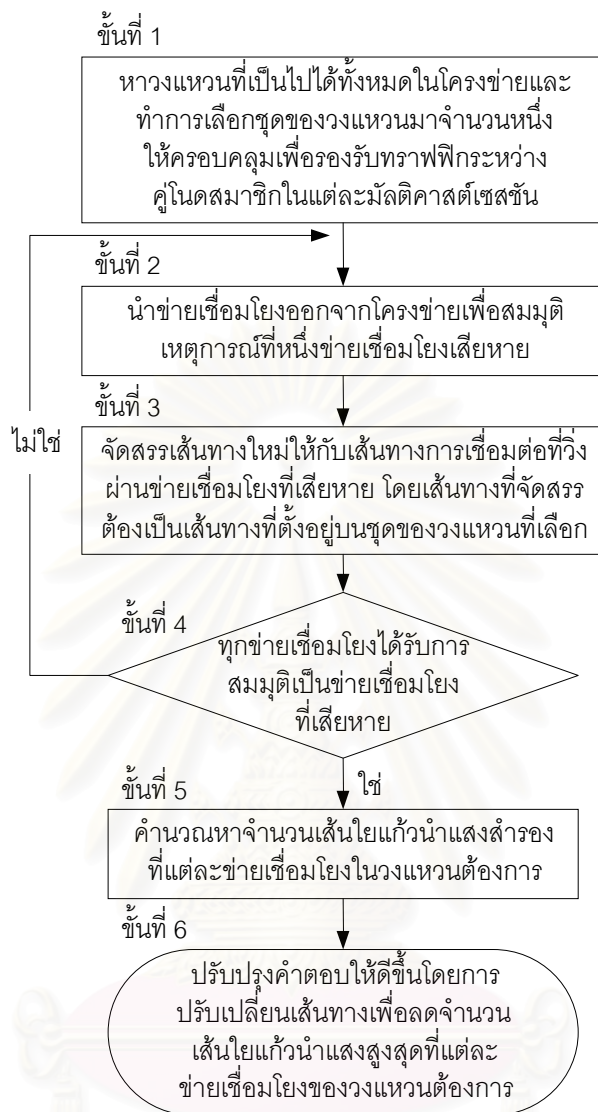
ขั้นที่ 3: เส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้อันทั้งหมดที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ j ที่กำหนดจากขั้นที่ 2 จะถูกเปลี่ยนไปใช้เส้นทางสำรองบนชุดของวงแหวนที่เลือกเพื่อหลีกเลี่ยงการส่งข้อมูลผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย นิยามเมตริกซ์ \mathbf{R}_x เพื่อใช้เก็บค่าจำนวนเส้นทางสำรองที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงใด ๆ ในวงแหวน x โดยจำนวนเส้นทางสำรองบนวงแหวน x ที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 จะถูกเก็บไว้ใน r_{1j} ซึ่งเป็นสมาชิกของเมตริกซ์ \mathbf{R}_x

ขั้นที่ 4: ทำขั้นที่ 2 และ 3 ซ้ำจนกระทั่งทุกเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงขาดได้รับการพิจารณา

ขั้นที่ 5: ค่าสูงสุดของสมาชิกที่ j ของเมตริกซ์ \mathbf{R}_x จะเป็นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ข่ายเชื่อมโยง j ของวงแหวน x ต้องการเพื่อให้สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย ดังนั้น จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองของวงแหวน x จะสามารถคำนวณได้

จากค่าสูงสุดในสดมภ์ที่ j ของเมตริกซ์ \mathbf{R}_x คูณกับจำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดของวงแหวน x นั้นเอง ทำการคำนวณหาเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดที่แต่ละวงแหวนต้องการ

ขั้นที่ 6: เพื่อให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองจากขั้นที่ 5 เป็นค่าต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้ ทราฟฟิกที่ส่งผ่านวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายแต่ละวงต้องมีการกระจายของทราฟฟิกอย่างได้ดุล นั่นคือ ต้องไม่มีการใช้ข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของวงแหวนมากเกินไป ดังนั้นค่าสูงสุดของสดมภ์ใดสดมภ์หนึ่งของเมตริกซ์ \mathbf{R}_x จะถูกพิจารณาเป็นค่าตั้งต้น หลังจากนั้น ทำการลดค่าตั้งต้นนี้โดยการปรับเปลี่ยนเส้นทางในโครงข่าย ซึ่งเส้นทางที่สามารถทำการปรับเปลี่ยนได้ นี้ต้องเป็นเส้นทางสำรองบนชุดของวงแหวนที่เลือกเท่านั้น โดยโครงข่ายจะทำการลองเปลี่ยนไปใช้เส้นทางสำรองใหม่แทนเส้นทางสำรองที่จัดสรรไว้ในตอนต้น ถ้าเส้นทางสำรองใหม่ทำให้ค่าตั้งต้นที่พิจารณามีค่าลดลง แต่ไม่ทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการมีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะเปลี่ยนไปใช้เส้นทางสำรองใหม่อย่างถาวร ซึ่งขั้นตอนนี้จะกระทำซ้ำจนกระทั่งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการไม่สามารถลดลงได้อีก



รูปที่ 4.4 ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MFA

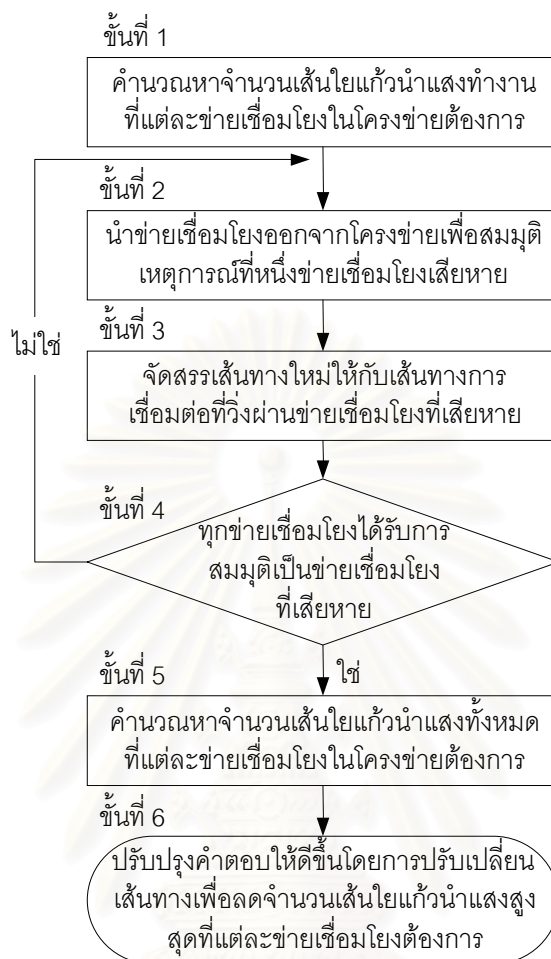
4.5 อัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JPR

อัลกอริทึมนี้เป็นการออกแบบเพื่อหาต้นทุนของโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JPR ทั้งในกรณี NWC และ WC ซึ่งต้นทุนของโครงข่ายที่หาได้เป็นต้นทุนที่คิดจากความเป็นไปได้ทั้งหมดของเหตุการณ์ที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย เนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JPR ซึ่งสามารถแสดงเป็นผังงานได้ดังรูปที่ 4.5 และสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นที่ 1: หาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานที่แต่ละข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายต้องการ หลังจากนั้น

นิยามเมตริกซ์ \mathbf{R} และทำการเก็บค่าผลลัพธ์ที่หาได้ลงในแถวที่ 0 ของเมตริกซ์ \mathbf{R}

- ขั้นที่ 2: นำข่ายเชื่อมโยงที่ j ออกจากโครงข่าย เพื่อสมมติเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงที่ j ได้รับความเสียหาย
- ขั้นที่ 3: เส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้ทั้งหมดที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ j ที่กำหนดจากขั้นที่ 1 จะถูกเปลี่ยนไปใช้เส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้สำรองเพื่อหลีกเลี่ยงการส่งข้อมูลผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย หลังจากทำการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางที่ได้รับความเสียหายแล้ว ทำการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายต้องการ หลังจากนั้นทำการเก็บค่าผลเฉลยที่ได้ลงในเมตริกซ์ \mathbf{R} แถวที่ j โดยจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่ 1 จะถูกเก็บไว้ใน r_{1j} ซึ่งเป็นสมาชิกของเมตริกซ์ \mathbf{R}
- ขั้นที่ 4: ทำขั้นที่ 2 และ 3 ซ้ำจนกระทั่งทุกเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงขาดได้รับการพิจารณา
- ขั้นที่ 5: ค่าสูงสุดของสดมภ์ที่ j ของเมตริกซ์ \mathbf{R} จะเป็นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ข่ายเชื่อมโยง j ต้องการเพื่อให้สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย ดังนั้นผลรวมของค่าสูงสุดในแต่ละสดมภ์ของเมตริกซ์ \mathbf{R} จะเป็นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการเพื่อให้สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย
- ขั้นที่ 6: เพื่อให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจากขั้นที่ 5 เป็นค่าต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้นค่าสูงสุดของสดมภ์ใดสดมภ์หนึ่งของเมตริกซ์ \mathbf{R} จะถูกพิจารณาเป็นค่าตั้งต้น หลังจากนั้น ทำการลดค่าตั้งต้นนี้โดยการปรับเปลี่ยนเส้นทางในโครงข่าย ซึ่งเส้นทางที่สามารถทำการปรับเปลี่ยนได้นี้ต้องเป็นเส้นทางการเชื่อมต่อแบบต้นไม้สำรองเท่านั้น โดยโครงข่ายจะทำการลองเปลี่ยนไปใช้เส้นทางสำรองใหม่แทนเส้นทางสำรองที่จัดสรรไว้ในตอนต้น ถ้าเส้นทางสำรองใหม่ทำให้ค่าตั้งต้นที่พิจารณามีค่าลดลง แต่ไม่ทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการมีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะเปลี่ยนไปใช้เส้นทางสำรองใหม่อย่างถาวร ซึ่งขั้นตอนนี้จะกระทำซ้ำจนกระทั่งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการไม่สามารถลดลงได้อีก



รูปที่ 4.5 ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JPR

อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอไปในเนื้อหาบทที่ 4 นี้จะถูกนำไปใช้หาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมจะถูกนำเสนอในเนื้อหาบทถัดไป

บทที่ 5

ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย

เนื้อหาในส่วนนี้ จะเป็นการกล่าวถึงผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ในเนื้อหาบทที่ 3 รวมทั้งผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากฮิวริสติกอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้ในเนื้อหาบทที่ 4

5.1 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้ จะทำการนำเสนอผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งในกรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถทำการแก้ไขปัญหาเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ ในการวิเคราะห์ผลจะใช้โครงข่ายขนาดเล็ก 2 โครงข่ายที่แสดงในรูปที่ 5.1 (ก) (ข) โดยทั้งสองโครงข่ายจะมีลักษณะทางกายภาพและปริมาณกราฟิกดังนี้

1. โครงข่ายในรูป 5.1 (ก) เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโนด (Node) ทั้งหมด 5 โหนด และมีจำนวนข่ายเชื่อมโยง (Link) ทั้งหมด 7 ข่ายเชื่อมโยง ปริมาณกราฟิกที่ใช้ในการทดลองของแต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะมีค่าไม่เท่ากัน ปริมาณกราฟิกทั้งหมดของโครงข่ายมีค่าเท่ากับ 10 และเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกโครงข่ายนี้ว่า โครงข่าย 5N_7L
2. โครงข่ายในรูป 5.1 (ข) เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโนดทั้งหมด 7 โหนด และมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมด 13 ข่ายเชื่อมโยง ปริมาณกราฟิกที่ใช้ในการทดลองของแต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะมีค่าไม่เท่ากัน ปริมาณกราฟิกทั้งหมดของโครงข่ายมีค่าเท่ากับ 18 และเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกโครงข่ายนี้ว่า โครงข่าย 7N_13L



รูปที่ 5.1 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 5N_7L (ข) โครงข่าย 7N_13L

อนึ่ง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CPLEX6.6 [30] ซึ่งทำงานอยู่บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ XP สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานคือเครื่อง Pentium 4 ความเร็ว 1.4 GHz หน่วยความจำ 256 MHz ในการผลเฉลย

ตารางที่ 5.1 จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N_7L (ก) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาน้ำหนึ่งขั้วเชื่อมโยงเสียหายได้เมื่อหนึ่งขั้วเชื่อมโยงในโครงข่าย NWC ได้รับความเสียหาย (ข) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อหนึ่งขั้วเชื่อมโยงในโครงข่าย WC ได้รับความเสียหาย

M	NO (NWC)		Protection Schemes (NWC)															
			OFO		OFA		MFA		JPR		JOFO		JOFA		JMFA		JJPR	
	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	N_c	N_v	N_c
1	69	12	26	96	14	54	38822	1394	726	476	95	65	83	73	38891	1406	795	488
2	69	12	26	96	14	54	38822	1394	726	476	95	65	83	73	38891	1406	795	488
3	69	12	26	96	14	54	38822	1394	726	476	95	65	83	73	38891	1406	795	488
4	69	12	26	96	14	54	38822	1394	726	476	95	65	83	73	38891	1406	795	488
5	69	12	26	96	14	54	38822	1394	726	476	95	65	83	73	38891	1406	795	488
6	69	12	26	96	14	54	38822	1394	726	476	95	65	83	73	38891	1406	795	488
7	69	12	26	96	14	54	38822	1394	726	476	95	65	83	73	38891	1406	795	488
8	69	12	26	96	14	54	38822	1394	726	476	95	65	83	73	38891	1406	795	488

(ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

M	NO (WC)		Protection Schemes (WC)															
			OFO		OFA		MFA		JPR		JOFO		JOFA		JMFA		JJPR	
	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	N_c	N_v	N_c
1	69	12	26	96	14	54	38822	1394	502	476	95	65	83	73	38891	1406	571	488
2	131	19	26	187	14	103	77630	2787	997	952	157	107	145	129	77761	2806	1128	971
3	193	26	26	278	14	152	116438	4180	1492	1428	219	149	207	185	116631	4206	1685	1454
4	255	33	26	369	14	201	155246	5573	1987	1904	281	191	269	241	155501	5606	2242	1937
5	317	40	26	460	14	250	194054	6966	2482	2380	343	233	331	297	194371	7006	2799	2420
6	379	47	26	551	14	299	232862	8359	2977	2856	405	275	393	353	233241	8406	3356	2903
7	441	54	26	642	14	348	271670	9752	3472	3332	467	317	455	409	272111	9806	3913	3386
8	503	61	26	733	14	397	310478	11145	3967	3808	529	359	517	465	310981	11206	4470	3869

(๑)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.2 เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 5N_7L
 (ก) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย NWC ได้รับความเสียหาย (ข) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย WC ได้รับความเสียหาย

M	Protection Schemes (NWC)								
	NO	OFO	OFA	MFA	JPR	JOFO	JOFA	JMFA	JJPR
1	90 ms.	0	0	90 ms.	10 ms.	0.3 sec.	50 ms.	3.25 sec.	0.26 sec.
2	20 ms.	0	0	70 ms.	10 ms.	0.38 sec.	60 ms.	6.64 sec.	0.26 sec.
3	10 ms.	0	0	0.4 sec.	10 ms.	0.59 sec.	90 ms.	1.85 sec.	1.41 sec.
4	10 ms.	0	10 ms.	60 ms.	10 ms.	0.53 sec.	50 ms.	3.06 sec.	1.77 sec.
5	10 ms.	0	0	0.2 sec.	20 ms.	0.66 sec.	30 ms.	2.38 sec.	3.44 sec.
6	10 ms.	10 ms.	0	0.29 sec.	20 ms.	0.77 sec.	40 ms.	2.38 sec.	1.23 sec.
7	10 ms.	0	0	0.13 sec.	20 ms.	1.03 sec.	50 ms.	2.15 sec.	2.4 sec.
8	10 ms.	0	10 ms.	0.16 sec.	20 ms.	1.57 sec.	50 ms.	1.96 sec.	1.78 sec.

(ก)

M	Protection Schemes (WC)								
	NO	OFO	OFA	MFA	JPR	JOFO	JOFA	JMFA	JJPR
1	0	10 ms.	10 ms.	30 ms.	30 ms.	20 ms.	50 ms.	6.3 sec.	0.30 sec.
2	30 ms.	10 ms.	0	80 ms.	0	0.24 sec.	0.11 sec.	> 10 hr.	7.44 sec.
3	50 ms.	0	10 ms.	50 ms.	10 ms.	0.65 sec.	0.42 sec.	> 10 hr.	4.81 min.
4	70 ms.	0	0	50 ms.	10 ms.	1.8 sec.	0.69 sec.	> 10 hr.	10.11 min.
5	19 ms.	10 ms.	0	0.97 sec.	50 ms.	3.17 sec.	1.3 sec.	> 10 hr.	10.28 min.
6	4.31 sec.	10 ms.	10 ms.	60 ms.	10 ms.	17.94 sec.	19.65 sec.	> 10 hr.	5.82 hrs
7	26 ms.	0	0	0.72 sec.	10 ms.	2.64 sec.	21.27 sec.	> 10 hr.	19.83 min.
8	73 ms.	0	0	0.47 sec.	0.11 sec.	7.34 sec.	8.1 sec.	> 10 hr.	41.23 min.

(ข)

ตารางที่ 5.3 จำนวนสมการ (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N_13L (ก) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย NWC ได้รับความเสียหาย (ข) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย WC ได้รับความเสียหาย

M	NO (NWC)		Protection Schemes (NWC)															
			OFO		OFA		MFA		JPR		JOFO		JOFA		JMFA		JJPR	
	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	N_c	N_v	N_c
1	58	22	416	334	124	815	92122	47048	1898	741	474	356	182	899	92180	5145	1956	763
2	58	22	416	334	124	815	92122	47048	1898	741	474	356	182	899	92180	5145	1956	763
3	58	22	416	334	124	815	92122	47048	1898	741	474	356	182	899	92180	5145	1956	763
4	58	22	416	334	124	815	92122	47048	1898	741	474	356	182	899	92180	5145	1956	763
5	58	22	416	334	124	815	92122	47048	1898	741	474	356	182	899	92180	5145	1956	763
6	58	22	416	334	124	815	92122	47048	1898	741	474	356	182	899	92180	5145	1956	763
7	58	22	416	334	124	815	92122	47048	1898	741	474	356	182	899	92180	5145	1956	763
8	58	22	416	334	124	815	92122	47048	1898	741	474	356	182	899	92180	5145	1956	763

(ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

M	NO (WC)		Protection Schemes (WC)															
			OFO		OFA		MFA		JPR		JOFO		JOFA		JMFA		JJPR	
	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	N_c	N_v	N_c
1	58	22	416	334	124	815	92122	47048	1898	741	474	356	182	899	92180	5145	1956	763
2	103	35	416	451	124	1621	184214	94095	3783	1482	519	486	227	1718	184317	10280	3886	1517
3	148	48	416	568	124	2427	276306	141142	5668	2223	564	616	272	2537	276454	15415	5816	2271
4	193	61	416	685	124	3233	368398	188189	7553	2964	609	746	317	3356	368591	20550	7746	3025
5	238	74	416	802	124	4039	460490	235236	9438	3705	654	876	362	4175	460728	25685	9676	3779
6	283	87	416	919	124	4845	552582	282283	11323	4446	699	1006	407	4994	552865	30820	11606	4533
7	328	100	416	1036	124	5651	644674	329330	13208	5187	744	1136	452	5813	645002	35955	13536	5287
8	373	113	416	1153	124	6457	736766	376377	15093	5928	789	1266	497	6632	737139	41090	15466	6041

(๑)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4 เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N_13L
 (ก) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย NWC ได้รับความเสียหาย (ข) กรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย WC ได้รับความเสียหาย

M	Protection Schemes (NWC)								
	NO	OFO	OFA	MFA	JPR	JOFO	JOFA	JMFA	JJPR
1	80 ms.	0	70 ms.	0.71 sec.	50 ms.	80 ms.	0.67 sec.	2.83 min.	2.66 sec.
2	60 ms.	0	10 ms.	2.01 sec.	0.15 sec.	0.32 sec.	0.68 sec.	4.97 min.	4.9 sec.
3	20 ms.	0	10 ms.	1.14 sec.	0.15 sec.	0.1 sec.	1.05 sec.	5.5 min.	20.74 sec.
4	0	10 ms.	10 ms.	2.02 sec.	0.17 sec.	60 ms.	0.86 sec.	3.38 min.	11.22 sec.
5	0	0	10 ms.	1.8 sec.	0.39 sec.	0.19 sec.	0.77 sec.	3.52 min.	27.82 sec.
6	20 ms.	0	10 ms.	2 sec.	0.47 sec.	80 ms.	1.25 sec.	2.1 min.	8.74 sec.
7	20 ms.	10 ms.	30 ms.	0.56 sec.	0.16 sec.	30 ms.	0.98 sec.	2.38 min.	6.01 sec.
8	20 ms.	0	20 ms.	0.76 sec.	0.17 sec.	0.1 sec.	1.61 sec.	2 min.	6.22 sec.

(ก)

M	Protection Schemes (WC)								
	NO	OFO	OFA	MFA	JPR	JOFO	JOFA	JMFA	JJPR
1	0	10 ms.	80 ms.	0.73 sec.	10 ms.	80 ms.	1.18 sec.	3.04 min.	2.15 sec.
2	50 ms.	10 ms.	10 ms.	3.87 sec.	1.26 sec.	0.19 sec.	6.84 sec.	40.58 min.	1.35 min.
3	1.24 sec.	0	10 ms.	2.13 sec.	0.78 sec.	2.59 min.	38.26 sec.	6.79 hrs.	1.69 hrs.
4	0.44 sec.	10 ms.	30 ms.	6.36 sec.	0.7 sec.	12.39 sec.	1.42 min.	> 10 hr.	> 10 hr.
5	2.25 sec.	0	20 ms.	5.78 sec.	3.4 sec.	20.72 sec.	15.96 min.	> 10 hr.	> 10 hr.
6	1.92 sec.	10 ms.	20 ms.	7.93 sec.	2.84 sec.	23.34 sec.	3.63 hrs.	> 10 hr.	> 10 hr.
7	2.31 sec.	10 ms.	20 ms.	1.12 sec.	1.37 sec.	35.93 sec.	10.16 min.	> 10 hr.	> 10 hr.
8	1.05 min.	0	40 ms.	1.16 sec.	0.54 sec.	14.4 min.	25.12 min.	> 10 hr.	> 10 hr.

(ข)

session	demand	source	destination
1	1	5	2 3
2	2	5	1 3 2
3	3	5	4 2
4	1	5	4 2 1 3
5	3	5	1 3

(ก)

session	demand	source	destination
1	2	2	5 7 3 1 4
2	1	2	3 6 1
3	2	2	4 3 5
4	3	2	7 5
5	2	2	3 1 4 7
6	1	2	4 6
7	3	2	6 5
8	2	2	5 4 6
9	3	2	3 1

(ข)

รูปที่ 5.2 ทราฟฟิกของโครงข่าย (ก) โครงข่าย 5N_7L (ข) โครงข่าย 7N_13L

ผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 5.1 ถึง 5.4 จะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ โดยแบ่งพิจารณาตามหัวข้อดังต่อไปนี้

- การเปรียบเทียบในเชิงความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- การเปรียบเทียบในเชิงเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลอง

5.1.1 การเปรียบเทียบในเชิงความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการออกแบบเพื่อให้ได้วิธีในการปกป้องโครงข่ายที่เหมาะสมนั้น ปัจจัยที่ใช้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของกรรมวิธีที่ใช้ นั้น นอกจากจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายแล้ว ความซับซ้อนของวิธีที่ใช้ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการพิจารณา เนื้อหาในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะทำการเปรียบเทียบในเชิงความซับซ้อนของแบบจำลอง ซึ่งความซับซ้อนดังกล่าวจะแสดงในรูปของจำนวนสมการ (Constraint, N_c) และจำนวนของตัวแปร (Variable, N_v) ที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อพิจารณาจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของโครงข่ายประเภท NWC ในโครงข่าย 5N_7L และ 7N_13L กรณีที่โครงข่ายไม่สามารถปกป้องความเสียหายที่หนึ่งขายเชื่อมโยงได้ พบว่า จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรทั้งหมดในการสร้างแบบจำลองของโครงข่ายจะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสง (M) ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และ 5.3 ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีโครงข่าย 5N_7L จำนวนสมการ N_c จะมีค่าเท่ากับ 12 ในทุกค่าของ M และจำนวนตัวแปร N_v จะมีค่าเท่ากับ 69 ในทุกค่าของ M เช่นกัน แต่ในกรณีของโครงข่ายประเภท WC กลับพบว่าจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองจะมีความสัมพันธ์กับค่า M กล่าวคือ จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรจะเพิ่มตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น เช่น ในกรณีโครงข่าย 7N_13L ที่ $M=2$ พบว่า N_c และ N_v ของสมการจะมีค่าเท่ากับ

35 และ 103 แต่เมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5 ค่า N_c และ N_v จะเพิ่มขึ้นเป็น 74 และ 238 ตามลำดับ จากผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า กรณีโครงข่ายไม่สามารถปกป้องความเสียหายที่หนึ่ง ข่ายเชื่อมโยงได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายแบบ WC จะมีความซับซ้อนมากกว่า แบบจำลองของโครงข่ายแบบ NWC

แต่ในกรณีที่โครงข่ายมีกรรมวิธีในการปกป้องความเสียหายด้วยการจัดสรรเส้นทางใหม่ แบบ OFO OFA MFA และ JPR จะเห็นว่า ไม่ว่าจะเป็นการสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment หรือวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment จำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของโครงข่ายประเภท NWC ในทั้งสองโครงข่าย จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า M แต่ในทางกลับกัน จำนวนตัวแปรและจำนวนสมการของแบบจำลองในโครงข่ายประเภท WC จะแปรผันตามค่า M ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะคล้ายคลึงกับข้อสรุปที่ได้ในกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถปกป้องความเสียหายได้ กล่าวคือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายแบบ WC จะมีความซับซ้อนของแบบจำลองมากกว่าแบบจำลองของโครงข่ายแบบ NWC นั่นเอง เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรในกรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีกรรมวิธีในการปกป้องความเสียหาย พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่สามารถปกป้องความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้จะมีจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรมากกว่าแบบจำลองของโครงข่ายที่ไม่สามารถปกป้องความเสียหายได้ ยกตัวอย่างเช่น จากตารางที่ 5.1 กรณีที่โครงข่าย 5N_7L ไม่สามารถปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายได้ แบบจำลองจะมี N_c และ N_v เท่ากับ 12 และ 69 แต่ในกรณีที่โครงข่ายสามารถปกป้องความเสียหายด้วยการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JPR แบบจำลองของโครงข่ายจะมี N_c และ N_v เพิ่มขึ้นเป็น 476 และ 726 ตามลำดับ เมื่อแบบจำลองดังกล่าวถูกสร้างด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment สาเหตุที่แบบจำลองของโครงข่ายที่สามารถปกป้องความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้มีจำนวนสมการและตัวแปรมากกว่ากรณีที่โครงข่ายไม่สามารถปกป้องความเสียหายได้ เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวจะต้องมีสมการและตัวแปรเพิ่มเติมในการจัดสรรวิธีสำรองให้กับวิถีทำงานที่ได้รับความเสียหายในทุกกรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายขาดหรือเสียหาย

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง จากการอ่านค่าในตารางที่ 5.1 พบว่า การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO OFA MFA และ JPR จะมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 26, 14, 38822 และ 726 ตามลำดับ ส่วนการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JOFO JOFA JMFA และ JJPR จะมีจำนวนตัวแปรเพิ่มขึ้นเป็น 95, 83, 38891 และ 795 ตามลำดับ นั่นคือแบบจำลองที่สร้างด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment ของทุกวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จะใช้ตัวแปรในการสร้างแบบจำลองน้อยกว่า การสร้างแบบจำลองมากกว่าวิธี Optimized Spare Fiber Assignment แต่เมื่อพิจารณาจำนวนสมการของแบบจำลองพบว่า การ

จัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO OFA MFA และ JPR จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 53, 54, 1394 และ 476 ตามลำดับ ส่วนการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JOFO JOFA JMFA และ JJPR จะมีจำนวนสมการเท่ากับ 65, 73, 1406 และ 488 ตามลำดับ นั่นคือทุกวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จะใช้สมการในการสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment มากกว่าวิธี Optimized Spare Fiber Assignment จึงสามารถสรุปได้ว่า ความซับซ้อนของแบบจำลองที่ถูกสร้างด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment ในทุกวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จะมีความซับซ้อนมากกว่าแบบจำลองที่ถูกสร้างด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment

นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบความซับซ้อนระหว่างแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ของแบบจำลองทั้งในกรณี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment พบว่า ความซับซ้อนของแบบจำลองในแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จะมีการเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ $MFA > JPR > OFA > OFO$ โดยการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MFA จะมีความซับซ้อนของแบบจำลองมากที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแบบจำลองของ MFA จะต้องประกอบไปด้วยสมการข้อบังคับในการเลือกวงแหวน และสมการข้อบังคับในการเลือกเส้นทางการเชื่อมต่อบนวงแหวน โดยจะต้องกำหนดให้สมการดังกล่าวมีความสอดคล้องกันเพื่อให้วิถีสำรองของโครงข่ายเป็นวิถีที่ตั้งอยู่บนวงแหวนวงที่เลือกเท่านั้น ทำให้การจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวงแหวนวิธีนี้มีความซับซ้อนมากกว่าการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO และ OFA ที่ต้องการเฉพาะสมการข้อบังคับในการเลือกวงแหวนเท่านั้น ไม่มีสมการในการจัดสรรเส้นทางบนวงแหวนอีกที่ ส่วนสาเหตุที่การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO มีความซับซ้อนของแบบจำลองมากกว่าการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFA นั้น เกิดจากการที่แต่ละมัลติคาสต์เซชันของ OFO มีการเลือกวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายอย่างอิสระต่อกัน การแยกพิจารณานี้ทำให้สมการที่ใช้สร้างแบบจำลองของ OFO มีจำนวนมากกว่า OFA นั่นเอง สำหรับกรณีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JPR นั้น นอกจากจะต้องมีสมการในการจัดสรรวิถีสำรองให้กับโครงข่ายแล้ว แต่ละวิธีทำงานที่วิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายก็จะมีการปลดช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานเพื่อนำช่องสัญญาณที่ปลดออกนี้ไปใช้เป็นช่องสัญญาณของวิถีสำรองแทน การพิจารณาปลดช่องสัญญาณดังกล่าวนี้ทำให้การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JPR มีความซับซ้อนของสมการมากกว่าการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO และ OFA ที่ทำการพิจารณาจัดสรรวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JPR ก็ยังมีความซับซ้อนของสมการน้อยกว่าการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MFA อยู่ดี

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความซับซ้อนของโครงข่ายระหว่างโครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L พบว่า ความซับซ้อนของแบบจำลองมีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดของโครงข่าย

ที่พิจารณา สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองจะมีความสัมพันธ์กับจำนวนโนดและจำนวนข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย ทำให้แบบจำลองของโครงข่ายขนาดใหญ่มีความซับซ้อนมากกว่าแบบจำลองของโครงข่ายที่มีขนาดเล็ก เช่น แบบจำลองที่สร้างด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment ของโครงข่าย 5N_7L ประเภท NWC กรณีที่โครงข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี OFA จะมี N_c และ N_v เท่ากับ 54 และ 14 แต่ในโครงข่าย 7N_13L จะมี N_c และ N_v เพิ่มขึ้นเป็น 815 และ 124 ตามลำดับ

5.1.2 การเปรียบเทียบในเชิงเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลอง

เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลองในกรณีที่โครงข่ายไม่มีกรรมวิธีในการปกป้องความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ จะเห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายแบบ WC จะใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยนานกว่าแบบจำลองของโครงข่ายแบบ NWC เนื่องจากโครงข่ายแบบ NWC มีความซับซ้อนของแบบจำลองมากกว่านั่นเอง ยกตัวอย่างเช่น จากค่าในตารางที่ 5.1 เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยที่ $M=6$ ของโครงข่ายแบบ NWC ใช้เวลาแค่เพียง 0.01 วินาที ขณะที่โครงข่ายแบบ WC ใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 4.31 วินาที

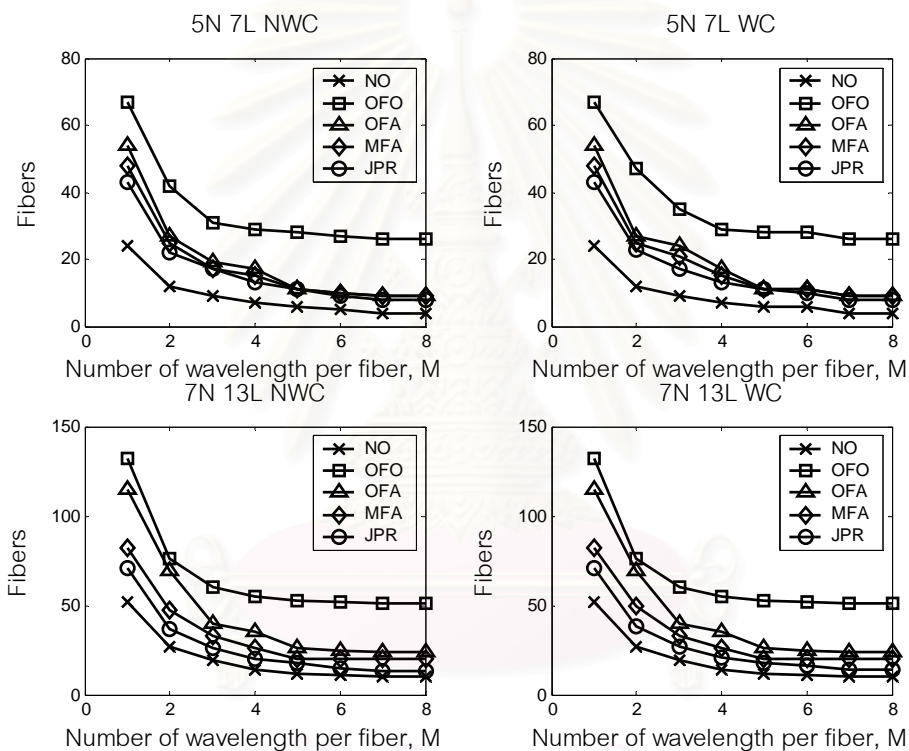
ส่วนในกรณีที่โครงข่ายมีกรรมวิธีในการปกป้องความเสียหายด้วยการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งในกรณีที่สร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment เมื่อพิจารณาในเชิงของเวลาก็จะพบว่าเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจะนานกว่ากรณีที่โครงข่ายไม่สามารถปกป้องความเสียหายได้ และเมื่อทำการพิจารณาประเภทของโครงข่าย พบว่าแบบจำลองโครงข่ายแบบ NWC จะใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยเร็วกว่าแบบจำลองของโครงข่ายแบบ WC ข้อสรุปดังกล่าวนี้จะตรงกับข้อสรุปของโครงข่ายในกรณีที่ไม่มีกรรมวิธีในการปกป้องความเสียหาย ยกตัวอย่างเช่น จากค่าในตารางที่ 5.2 เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยที่ $M=6$ ของโครงข่ายแบบ NWC ใช้เวลาแค่เพียง 0.01 วินาที ขณะที่โครงข่ายแบบ WC ใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 4.31 วินาที

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของโครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L พบว่าเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของแบบจำลองที่ใช้ และเนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองแปรผันตามขนาดของโครงข่ายที่ใช้พิจารณา การหาผลเฉลยของโครงข่าย 7N_13L จึงใช้เวลาในการหาคำตอบนานกว่าเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของโครงข่าย 5N_7L ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีขนาดเล็กกว่านั่นเอง

นอกจากการพิจารณาในเชิงความซับซ้อนของแบบจำลองและเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลย วิทยานิพนธ์นี้ยังได้พิจารณาถึงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ ดังนี้

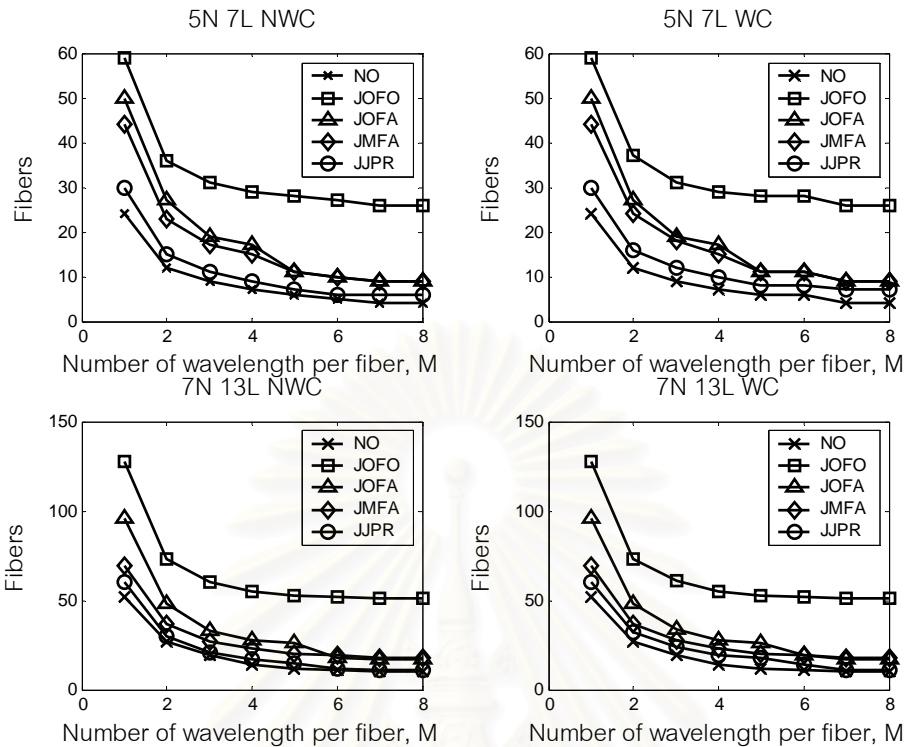
5.1.3 การเปรียบเทียบในเชิงเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

เนื้อหาในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเชิงของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ ซึ่งมีรายละเอียดของเนื้อหา ดังนี้



(ก)

รูปที่ 5.3 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L ต้องการ (ก) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment Jointly (ข) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment



(ข)

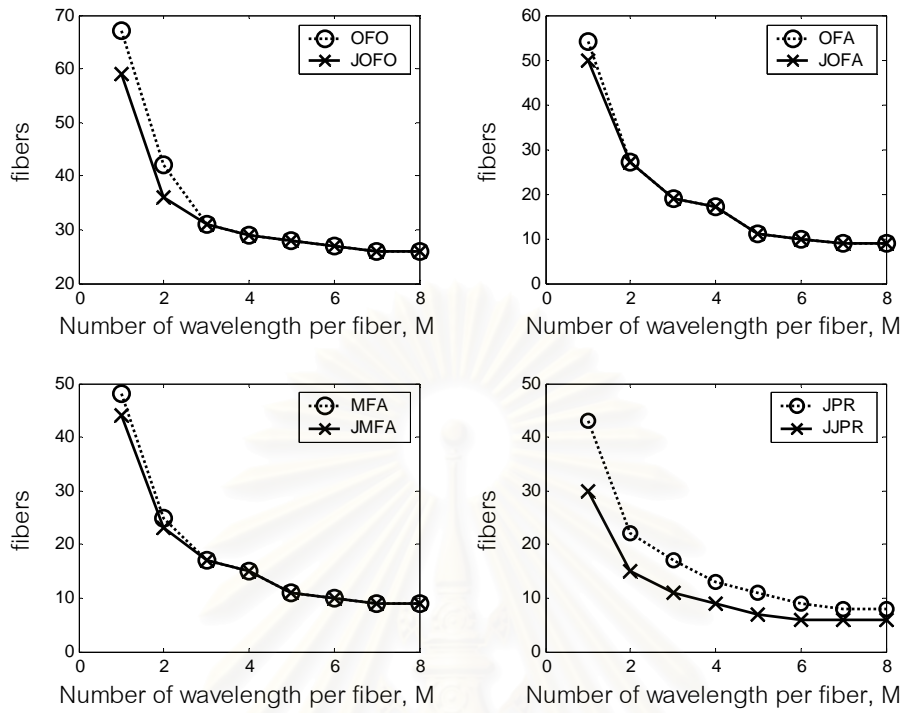
รูปที่ 5.3 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L ต้องการ (ก) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment Jointly (ข) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment

จากรูปที่ 5.3 เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L ต้องการทั้งในกรณีที่สร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment Jointly และวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment พบว่าจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการมีค่าลดลงเมื่อ M มีค่าสูงขึ้น โดยจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดค่าน้อย ๆ และจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อค่าความยาวคลื่นสูงสุดมีค่ามากพอ สาเหตุที่เป็นอย่างนี้ เนื่องจากการที่ค่า M เพิ่มขึ้นนั้นจำนวนช่องสัญญาณในแต่ละเส้นใยแก้วนำแสงก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย การที่จำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นนี้จะทำให้จำนวนของเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องทำการติดตั้งมีค่าลดลงแต่อย่างไรก็ตาม เมื่อ M มีค่ามากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้วพบว่าจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจะไม่สามารถลดลงได้อีก

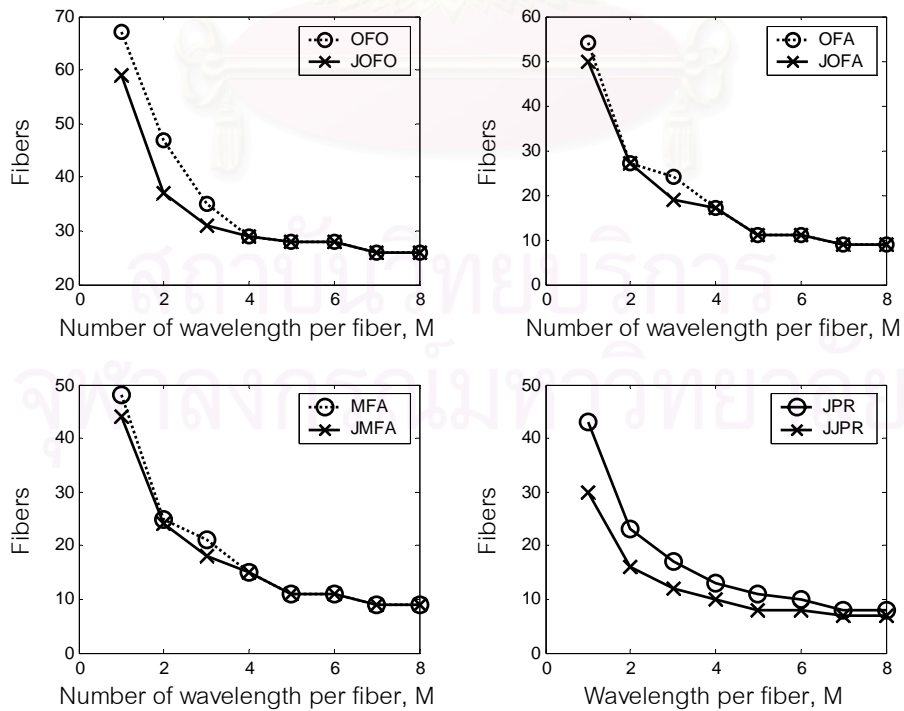
จากผลเฉลยที่ได้ในทุกวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ สามารถสรุปได้ว่า การใช้งานของสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงร่วมกันระหว่างวิธีทำงานและวิธีสำรองจะช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย โดยวิธี JPR นั้นแต่ละเส้นใยแก้วนำแสงในโครงข่ายจะยินยอมให้มีการใช้งานของสัญญาณร่วมกันระหว่างวิธีทำงานและวิธีสำรองของโครงข่าย ต่างจากวิธี MFA ที่ไม่ยินยอมให้มีการใช้งานของสัญญาณร่วมกัน เนื่องจากวิธีทำงานและวิธีสำรองของโครงข่ายมีการจัดสรรเส้นทางและการใช้อุปกรณ์ในการส่งต่อข้อมูลที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าว วิธี JPR จึงประหยัดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในการติดตั้งให้กับโครงข่ายมากกว่าวิธี MFA นอกจากนี้ยังพบว่า จำนวนของวงแหวนที่ใช้ในการปกป้องความเสียหายจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ ซึ่งจริง ๆ แล้วการเพิ่มจำนวนวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายจะทำให้แต่ละวิธีสำรองมีทางเลือกในการจัดสรรเส้นทางเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากคุณสมบัติของวงแหวนที่ว่าแต่ละข่ายเชื่อมโยงของวงแหวนจะต้องทำการจองช่องสัญญาณเป็นจำนวนเท่า ๆ กัน นั่นคือ จะต้องทำการจองช่องสัญญาณในปริมาณที่มากพอที่จะสามารถรองรับทราฟฟิกที่หนาแน่นที่สุดได้ ซึ่งการจองช่องสัญญาณในลักษณะดังกล่าว จะทำให้บางช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงในวงแหวนไม่ถูกใช้งาน นั่นคือ วงแหวนที่ใช้จะทำการจองช่องสัญญาณเกินกว่าภาวการณ์ใช้งานจริง เพื่อเป็นลดปัญหาดังกล่าว ทราฟฟิกที่ถูกจัดวิธีทั้งหมดจะต้องกระจายกันอย่างได้ดุลบนวงแหวน เพื่อให้ไม่มีการใช้งานเส้นใยแก้วนำแสง ณ ข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเป็นจำนวนมากเกินไป ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี MFA ซึ่งยินยอมให้มีวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายได้มากกว่าหนึ่งวงจะต้องการเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเป็นจำนวนน้อยกว่าวิธี OFA ที่ยินยอมให้มีวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายเพียงวงเดียวเท่านั้น เนื่องจากวิธี MFA จะมีกระจายของทราฟฟิกในวงแหวนมากกว่าวิธี OFA ที่แต่ละวิธีสำรองจะต้องถูกกระจายลงบนวงแหวนเพียงวงเดียว และเมื่อทำการพิจารณาเพิ่มเติมจะพบว่าไม่เพียงแต่จำนวนของวงแหวนเท่านั้นที่ส่งผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการแต่ขนาดของวงแหวนที่ใช้ก็ส่งผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมเช่นกัน ดังนั้น วิธี OFA ที่ใช้วงแหวนขนาดใหญ่สุดเพื่อให้สามารถครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกของทุกมัลติคาสต์เซสชันได้ จะต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในปริมาณที่มากกว่าวิธี MFA ที่ใช้วงแหวนขนาดเล็กกว่าเป็นวงแหวนในการปกป้องโครงข่าย เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธี OFO และวิธี OFA พบว่า การใช้งานของสัญญาณของข่ายเส้นใยแก้วนำแสงสำรองร่วมกันระหว่างวิธีสำรองในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย โดยวิธี OFA นั้นแต่ละเส้นใยแก้วนำแสงสำรองจะยินยอมให้มีการใช้งานของสัญญาณร่วมกันระหว่างวิธีสำรองในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันต่างจากวิธี OFO ที่ไม่ยินยอมให้มีการใช้งานของสัญญาณร่วมกัน ดังนั้น วิธี OFA จึงประหยัดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในการติดตั้งให้กับโครงข่ายมากกว่าวิธี OFO กล่าวโดยสรุปจะ

ได้ว่า จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการในแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จะมีการเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ OFO > OFA > MFA > JPR

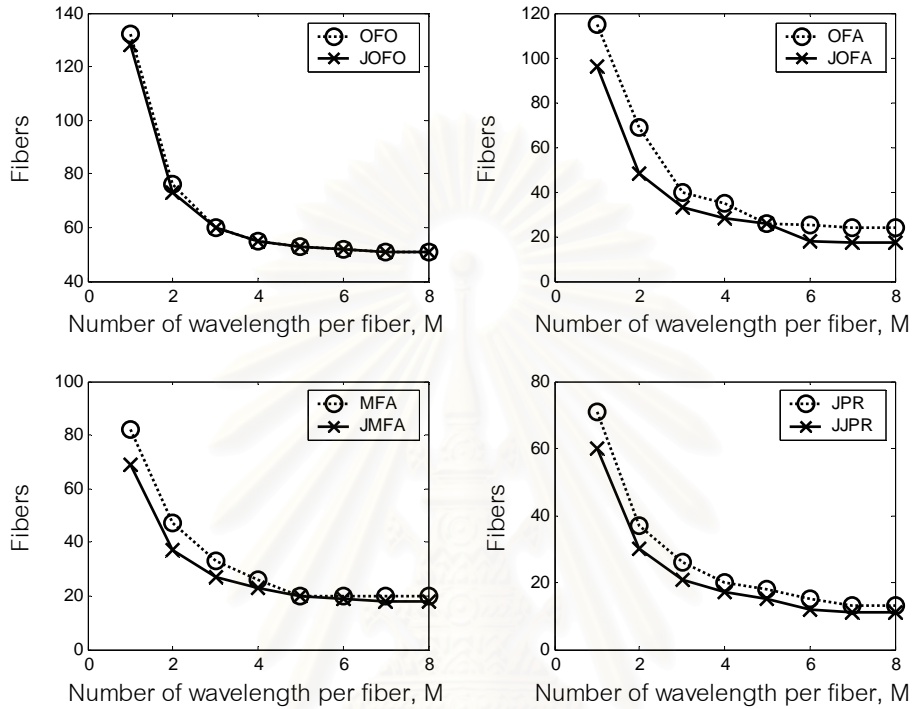
ในส่วนที่จะพิจารณาต่อไป จะเป็นการเปรียบเทียบผลของกรรมวิธีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment และวิธี Optimized Spare Fiber Assignment ในรูปที่ 5.4 ถึง 5.7 จะสามารถสรุปได้ว่าวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment ให้ผลเฉลยที่ต่ำกว่าหรือเทียบเท่าวิธี Optimized Spare Fiber Assignment ในทุก ๆ ประเภทของโครงข่าย และทุก ๆ ประเภทของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากในวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment นั้น วิธีทำงานและวิธีสำรองของโครงข่ายจะถูกจัดสรรพร้อมกันเพื่อให้ได้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงค่าต่ำสุด แต่ในวิธี Optimized Spare Fiber Assignment โครงข่ายจะจัดสรรเฉพาะวิธีสำรองโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีทำงานบนโครงข่าย ทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่ได้จากวิธี Optimized Spare Fiber Assignment ไม่เป็นค่าที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment จะให้ค่าผลเฉลยที่มากกว่าวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment แต่การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีนี้ก็มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติบางกรณี นั่นคือสามารถนำไปใช้ออกแบบสำหรับโครงข่ายที่มีการวางและใช้งานจริงแล้ว แต่ยังไม่ได้มีการกำหนดวิธีการในการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องทำการติดตั้งเพิ่มให้กับโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายที่ใช้งานแล้วสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งสายเชื่อมโยงเสียหายได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 5.4 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N_7L ประเภท NWC ต้องการ ในกรณีสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment

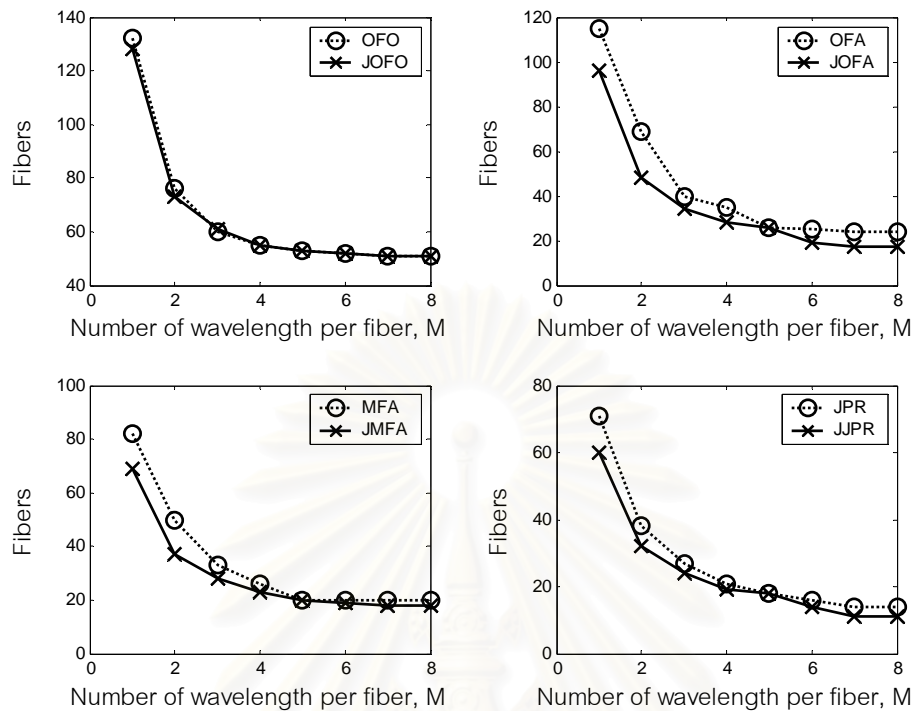


รูปที่ 5.5 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N_7L ประเภท WC ต้องการ ในกรณีสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment



รูปที่ 5.6 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N_13L ประเภท NWC ต้องการ ในกรณีสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

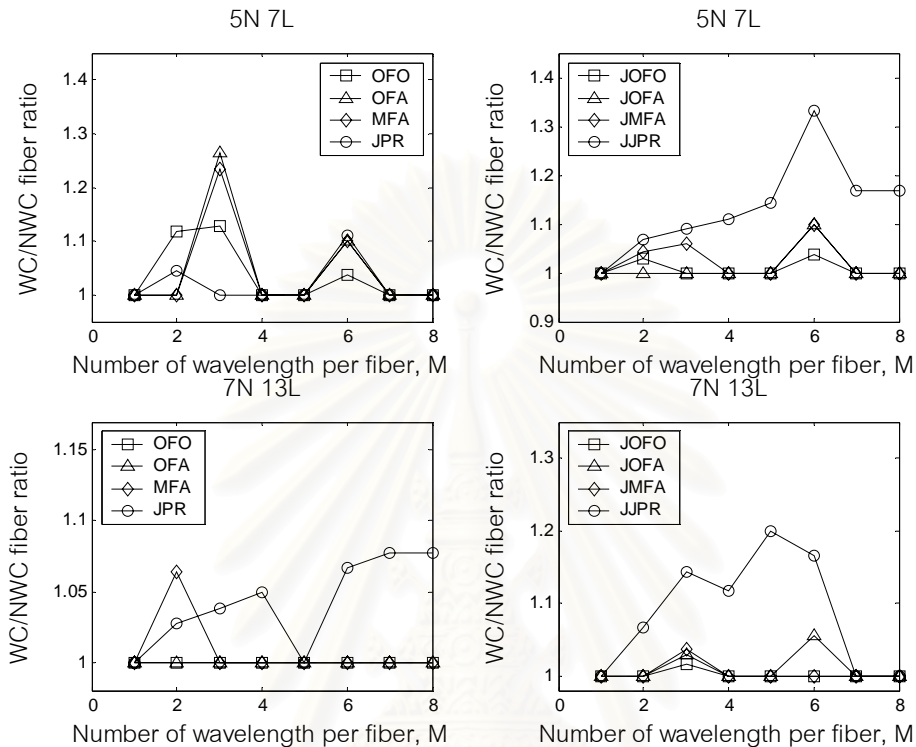


รูปที่ 5.7 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N_13L ประเภท WC ต้องการ ในกรณีสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment

5.1.4 ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

จากรูปที่ 5.8 พบว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมของโครงข่าย โดยอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมของโครงข่ายมีค่าลดลง โดยจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมของโครงข่าย 5N_7L ในกรณีที่สร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment จะมีค่าลดลงประมาณ 4-26% ส่วนกรณีที่สร้างแบบจำลองด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment จะมีค่าลดลงประมาณ 3-33% สำหรับโครงข่าย 7N_13L ในกรณีที่สร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment จะมีค่าลดลงประมาณ 3-8% ส่วนกรณีที่สร้างแบบจำลองด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment จะมีค่าลดลงประมาณ 2-17% สาเหตุที่จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าลดลงนี้เนื่องจาก ในกรณีของโครงข่ายแบบ WC จะกำหนดให้เส้นทางที่จัดสรรในโครงข่ายต้องมีค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง ทำให้ในกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถหาค่าความยาวคลื่นที่ยังไม่มีการใช้งานมาจัดสรร

ให้กับเส้นทางดังกล่าวได้ โครงข่ายจะต้องทำเพิ่มช่องสัญญาณโดยการวางเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถรองรับเส้นทางที่มีปัญหาดังกล่าวได้ การแก้ปัญหาด้วยวิธีดังกล่าวนี้ ส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายแบบ WC มีค่ามากกว่าโครงข่ายแบบ NWC



รูปที่ 5.8 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมของโครงข่ายแบบ WC ต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมของโครงข่ายแบบ NWC (WC/NWC fiber ratio) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment

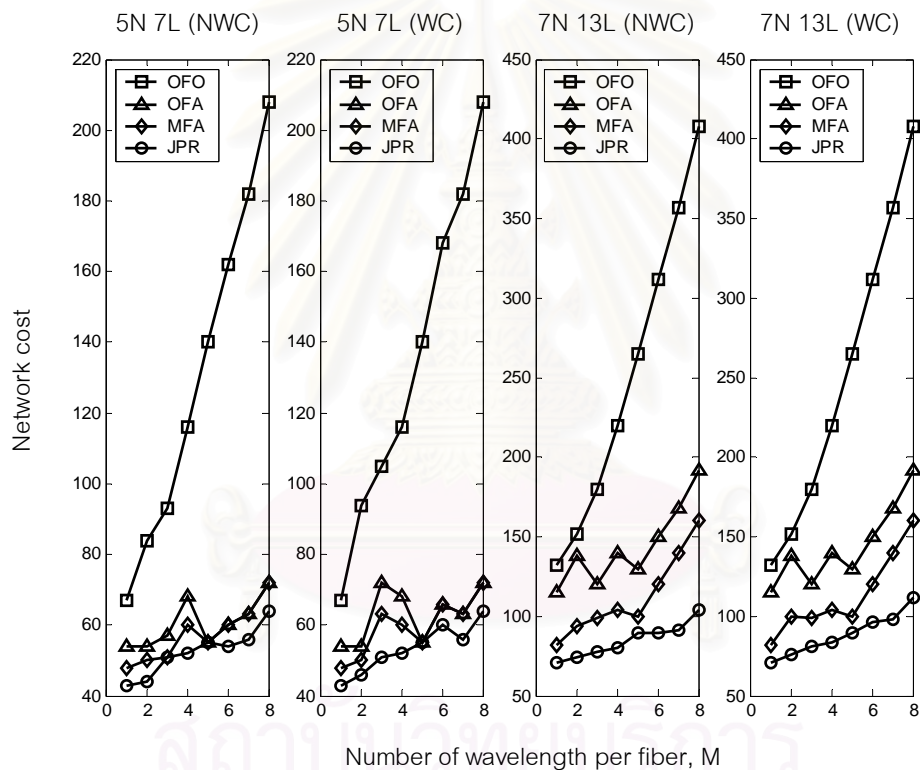
แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าที่บางช่วงของค่า M อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะไม่มีผลต่อต้นทุนของโครงข่าย เช่น ที่โครงข่าย 5N_7L ในกรณีนี้ที่สร้างแบบจำลองด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment พบว่าที่ค่า $M = 1, 4, 5, 7$ และ 8 นั้น อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะไม่ส่งผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมของโครงข่าย จากข้อสังเกตดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะมีผลต่อต้นทุนของโครงข่ายที่บางช่วงของค่า M เท่านั้น

5.1.5 การเปรียบเทียบในเชิงต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสง

ต้นทุนของโครงข่าย (Network Cost) ที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะนิยามให้มีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการกับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสง (M)

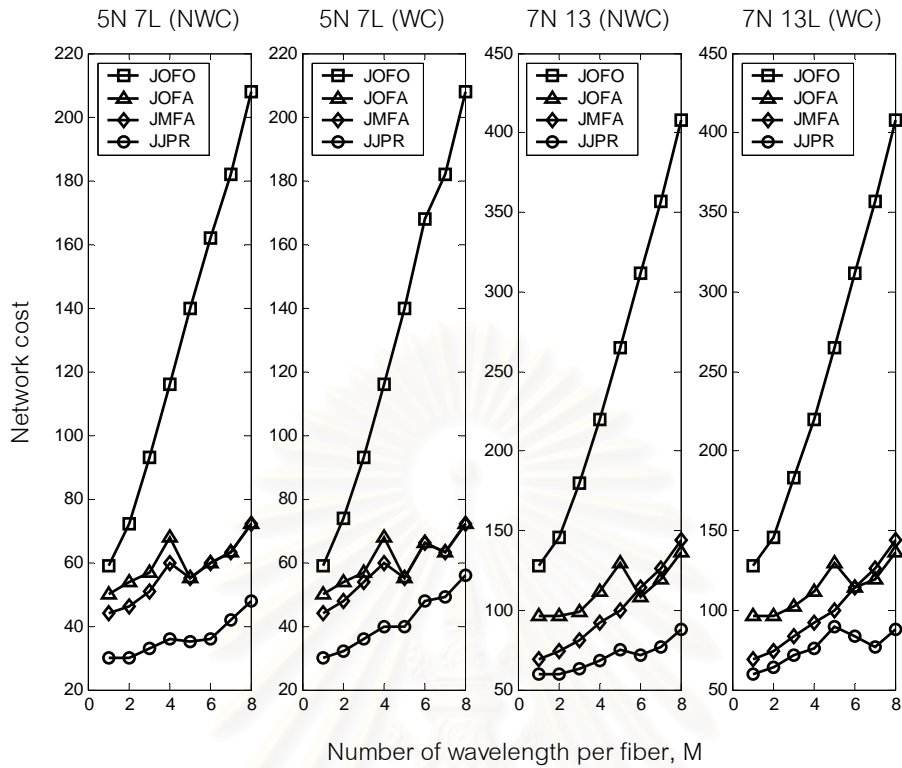
$$\text{Network cost} = \text{Total number of fiber requirement} \times M$$

ส่วนประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงจะนิยามให้มีค่าเท่ากับอัตราส่วนร้อยละของช่องสัญญาณที่ถูกใช้งานต่อจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดในโครงข่าย



(ก)

รูปที่ 5.9 ต้นทุนของโครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L (ก) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment Jointly (ข) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment

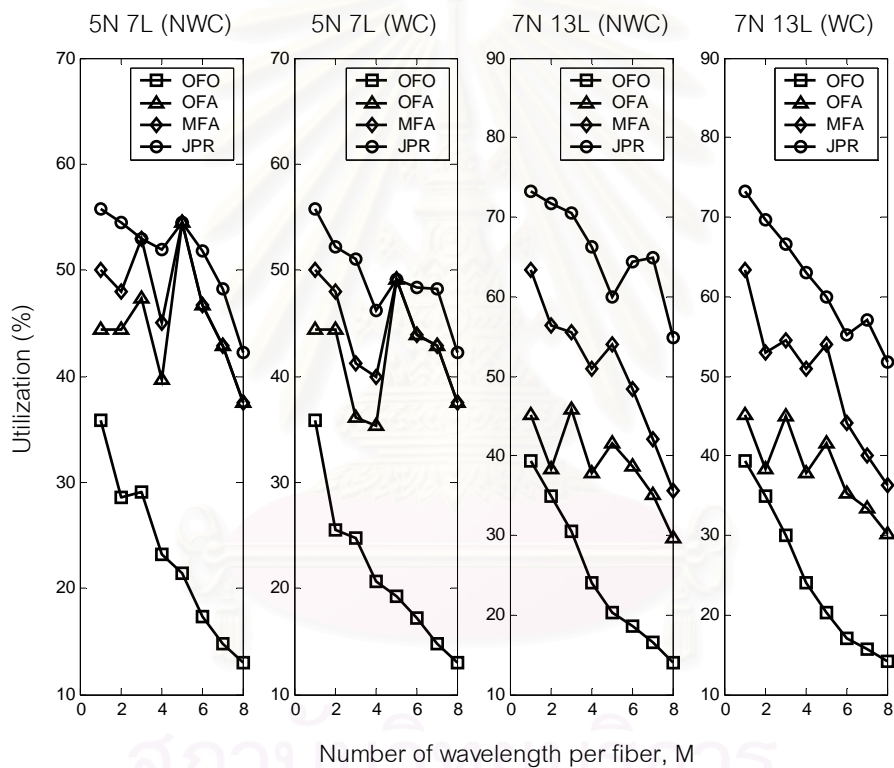


(ข)

รูปที่ 5.9 ต้นทุนของโครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L (ก) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment Jointly (ข) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment

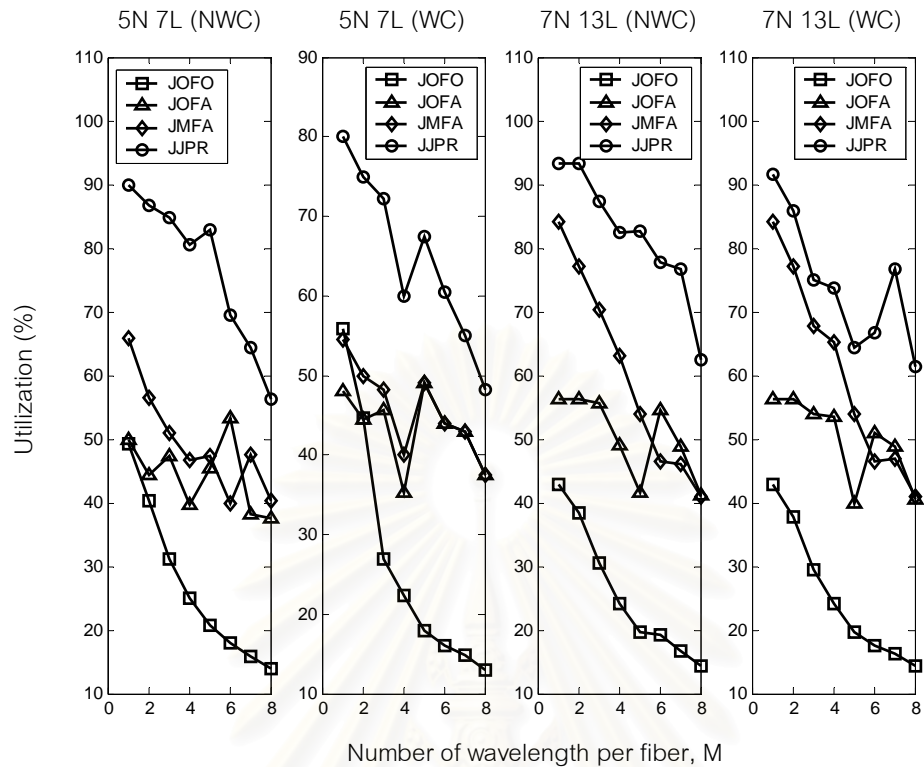
จากรูปที่ 5.9 (ก) และ (ข) พบว่าต้นทุนของโครงข่ายจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า M โดยการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFO จะมีค่าต้นทุนของโครงข่ายสูงสุดและค่าต้นทุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามค่า M ส่วนการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ OFA MFA และ JPR จะเป็นการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ต้องการค่าต้นทุนน้อยกว่าวิธี OFO ตามลำดับจากมากไปน้อย นอกจากนี้ค่าต้นทุนที่ได้ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า M ที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าต้นทุนดังกล่าวจะมีการตกลงเป็นระยะ เช่น ที่ค่า $M = 5$ ของโครงข่าย 5N_7L ค่าต้นทุนของโครงข่ายจะมีค่าตกลง เมื่อพิจารณาต้นทุนของโครงข่ายประกอบกับการพิจารณาประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงในรูปที่ 5.10 (ก) และ (ข) พบว่ากรณีที่ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าตกลงที่ค่า M บางค่านั้น เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงจะพบว่า ณ จุดดังกล่าวเส้นใยแก้วนำแสงจะมีประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายมีแนวโน้มลดลงตามค่า M ที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งตรงกันข้ามกับต้นทุนของโครงข่าย นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงจะมีการเพิ่มขึ้นเป็นระยะที่ M บาง

ค่า การที่โครงข่ายมีประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงลดลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้นนี้ เนื่องจากโครงข่ายมีช่องสัญญาณสำหรับรองรับทราฟฟิกเป็นจำนวนมาก ถ้าช่องสัญญาณดังกล่าวมีจำนวนมากขึ้นเกินกว่าความต้องการใช้งานจริงทำให้เกิดช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้งานเป็นจำนวนมากในระบบ ดังนั้นประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายจึงมีค่าลดลง จากผลเฉลยในรูปที่ 5.9 (ก) และ (ข) สามารถเรียงลำดับต้นทุนของโครงข่ายโดยรวมตามกรรมวิธีในการจัดสรรเส้นทางใหม่จากมากไปน้อยได้ดังนี้ $OFO > OFA > MFA > JPR$ และจากผลเฉลยในรูปที่ 5.10 (ก) และ (ข) สามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมตามกรรมวิธีในการจัดสรรเส้นทางใหม่จากมากไปน้อยได้ดังนี้ $JPR > MFA > OFA > OFO$



(ก)

รูปที่ 5.10 ประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L (ก) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment Jointly (ข) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment



(ข)

รูปที่ 5.10 ประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 5N_7L และโครงข่าย 7N_13L (ก) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Optimized Spare Fiber Assignment Jointly (ข) กรณีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment

5.2 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยของอัลกอริทึมฮิวริสติก

ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยของอัลกอริทึมฮิวริสติก

- การเปรียบเทียบในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ
- ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

ตารางที่ 5.5 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 5N_7L ต้องการ เมื่อทำการหาผลเฉลี่ยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ILP) และจากอัลกอริทึมที่ออกแบบไว้ (Heu) (ก) กรณีโครงข่าย NWC (ข) กรณีโครงข่าย WC

M	Protection Schemes (NWC)							
	OFO		OFA		MFA		JPR	
	ILP	Heu	ILP	Heu	ILP	Heu	ILP	Heu
1	67	67	54	54	48	48	43	43
2	42	42	27	27	25	28	22	22
3	31	31	19	19	17	21	17	17
4	29	29	17	17	15	15	13	14
5	28	28	11	11	11	11	11	11
6	27	27	10	10	10	10	9	10
7	26	26	9	9	9	9	8	9
8	26	26	9	9	9	9	8	9

(ก)

M	Protection Schemes (WC)							
	OFO		OFA		MFA		JPR	
	ILP	Heu	ILP	Heu	ILP	Heu	ILP	Heu
1	67	67	54	54	48	48	43	43
2	47	47	27	27	25	29	23	24
3	35	35	24	24	21	24	17	18
4	29	29	17	17	15	16	13	14
5	28	28	11	11	11	13	11	11
6	28	28	11	11	11	11	10	11
7	26	26	9	9	9	9	8	9
8	26	26	9	9	9	9	8	8

(ข)

ตารางที่ 5.6 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N_13L ต้องการ เมื่อทำการหาผลเฉลี่ยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ILP) และจากอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้ (Heu) (ก) กรณีโครงข่าย NWC (ข) กรณีโครงข่าย WC

M	Protection Schemes (NWC)							
	OFO		OFA		MFA		JPR	
	ILP	Heu	ILP	Heu	ILP	Heu	ILP	Heu
1	132	132	115	115	82	83	71	71
2	76	76	69	69	47	51	37	38
3	60	60	40	40	33	33	26	26
4	55	55	35	35	26	26	20	20
5	53	53	26	26	20	23	18	18
6	52	52	25	25	20	22	15	15
7	51	51	24	24	20	20	13	14
8	51	51	24	24	20	20	13	13

(ก)

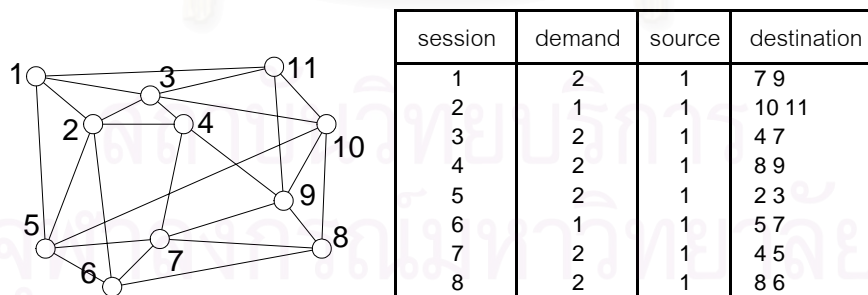
M	Protection Schemes (WC)							
	OFO		OFA		MFA		JPR	
	ILP	Heu	ILP	Heu	ILP	Heu	ILP	Heu
1	132	132	115	115	82	83	71	71
2	76	76	69	69	50	53	38	39
3	60	60	40	40	33	31	27	28
4	55	55	35	35	26	26	21	21
5	53	53	26	26	20	24	18	18
6	52	52	25	25	20	22	16	18
7	51	51	24	24	20	20	14	16
8	51	51	24	24	20	20	14	14

(ข)

ตารางที่ 5.5 และ 5.6 เป็นการเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการทั้งในกรณีที่โครงข่ายมีและ

ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นภายในโครงข่าย จากผลเฉลยพบว่า จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการในกรณีที่โครงข่ายทำการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี OFO และ OFA นั้น ผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมจะมีค่าเท่ากับผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในทุกจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสง แต่ในกรณีที่โครงข่ายทำการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี MFA และ JPR จะเห็นว่า จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการของอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้มีค่าสูงกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยในกรณีที่โครงข่าย 5N_7L ที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี MFA ในกรณีที่โครงข่าย NWC และ WC จะมีค่าสูงกว่าถึง 4.86% และ 6.71% ส่วนกรณีที่จัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี JPR ในกรณีที่โครงข่าย NWC และ WC จะมีค่าสูงกว่า 3% และ 3.76% ตามลำดับ ส่วนกรณีที่โครงข่าย 7N_13L ที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี MFA ในกรณีที่โครงข่าย NWC และ WC จะมีค่าสูงกว่าถึง 3.73% และ 2.95% ส่วนกรณีที่จัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี JPR ในกรณีที่โครงข่าย NWC และ WC จะมีค่าสูงกว่า 0.94% และ 2.74% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วพบว่า ผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมจะมีค่ามากกว่าผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ถึง 7% ซึ่งนับว่าเป็นค่าประมาณที่พอยอมรับได้ในระดับหนึ่ง จากผลการเปรียบเทียบทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า อัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้กรณีที่โครงข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ทั้งกรณีที่โครงข่าย NWC และโครงข่าย WC มีสมรรถนะในการให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่หาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

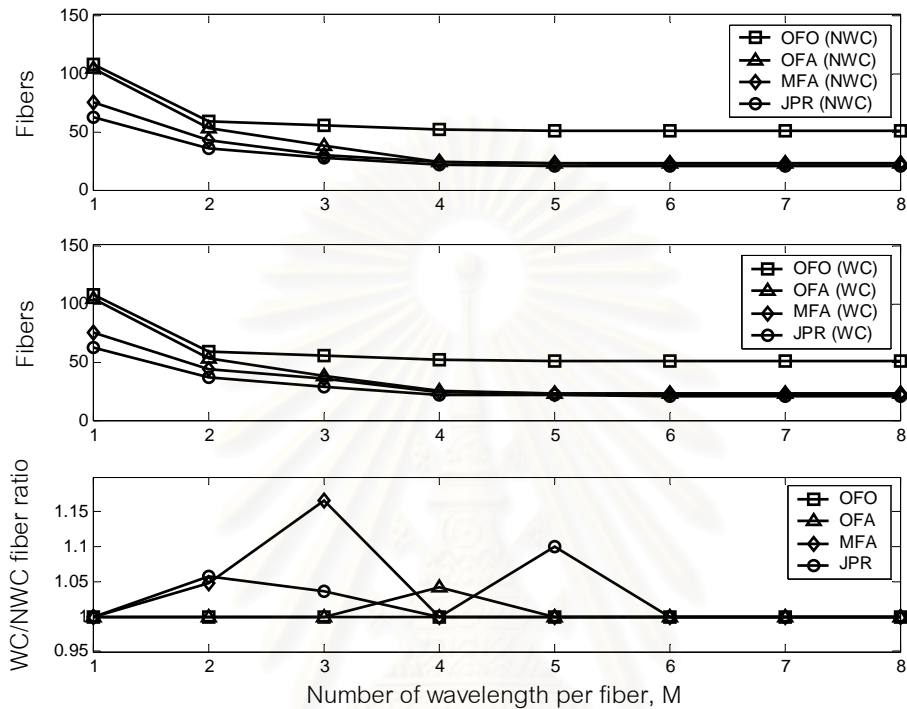
นอกจากผลเฉลยที่ได้จากโครงข่ายทดสอบ 5N_7L และ 7N_13L แล้ว วิทยานิพนธ์นี้ยังได้นำอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้มาทำการทดลองหาผลเฉลยในโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ที่มีการใช้งานจริงในปัจจุบันซึ่งมีลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 โครงข่าย Euro-core (โครงข่าย 11 โหนด 25 ข่ายเชื่อมโยง)

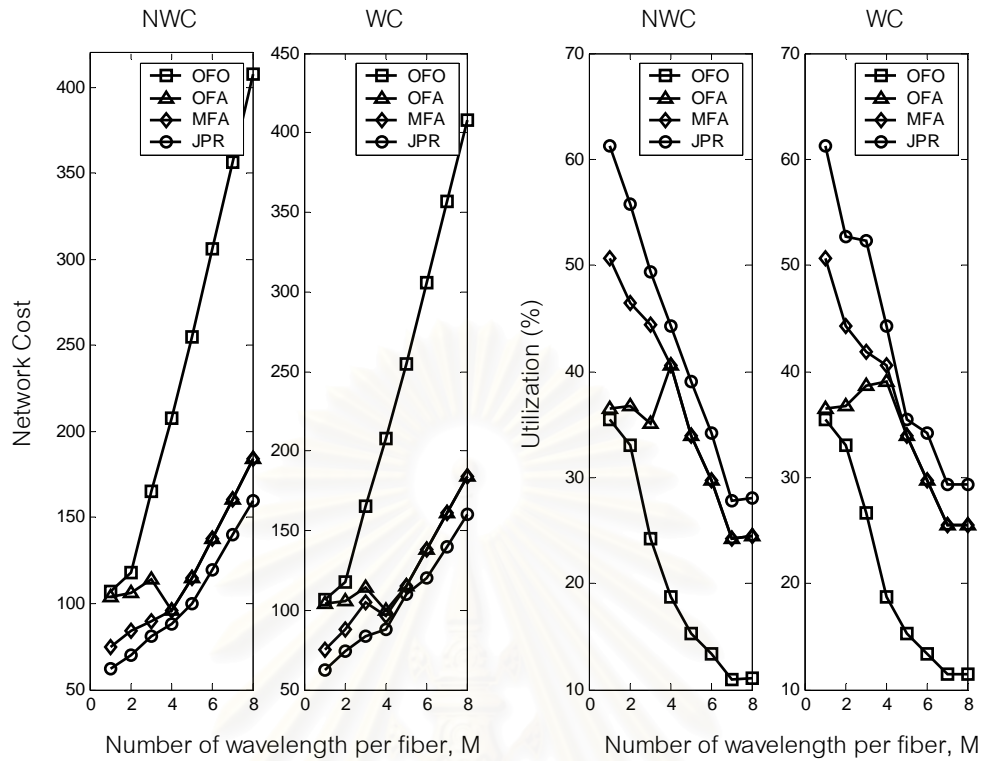
เมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย Euro-core แบบ NWC และ WC ต้องการจากผลเฉลยในรูปที่ 5.12 สามารถเรียงลำดับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายโดยรวมตามกรรมวิธีในการจัดสรรเส้นทางใหม่จากมากไปน้อยได้ดังนี้ OFO > OFA > MFA >

JPR นอกจากนี้ยังพบว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการเฉพาะที่บางช่วงของค่า M เท่านั้นเช่นเดียวกับผลสรุปของผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 5.12 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย Euro-core ทั้งกรณีโครงข่าย NWC และ WC ต้องการ และอัตราส่วนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมของโครงข่าย WC ต่อโครงข่าย NWC (WC/NWC fiber ratio)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบในเชิงต้นทุนและประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมของโครงข่ายจากรูปที่ 5.13 พบว่าต้นทุนของโครงข่ายจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า M ที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การที่ M มีค่าเพิ่มมากขึ้นนี้จะส่งผลให้จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้งานในโครงข่ายมีเพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้ที่ M ค่าสูง ๆ โครงข่ายจะมีประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงลดลง



รูปที่ 5.13 ต้นทุนและประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย Euro-core กรณีโครงข่าย NWC และ WC

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการออกแบบโครงข่าย WDM ที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ด้วยการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลบหลีกข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย ซึ่งวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ได้ศึกษามีด้วยกัน 4 วิธีได้แก่ วิธีใช้วงแหวนหนึ่งวงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันหนึ่งเซสชัน (One Ring for One Multicast-session, OFO) วิธีใช้วงแหวนหนึ่งวงสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (One Ring for All Multicast-session, OFA) วิธีใช้วงแหวนจำนวนหนึ่งสำหรับทุกมัลติคาสต์เซสชัน (Multi-ring for All Multicast-session, MFA) และวิธีการกู้คืนโดยการเชื่อมต่อ (Joined Part Recovery, JPR) โดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบ คือ ทำการประมาณค่าจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการเพื่อให้ได้โครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ตามแต่ละวิธีจัดสรรเส้นทางใหม่ ทั้งในกรณีที่โครงข่ายสามารถและไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นได้

การออกแบบโครงข่ายในวิทยานิพนธ์จะใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย โดยใช้ Integer linear programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลเฉลยที่ได้สามารถรับประกันได้ว่าเป็นผลเฉลยที่ดีที่สุด กล่าวคือ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายจะมีค่าต่ำสุด การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาผลเฉลยของปัญหาในวิทยานิพนธ์จะถูกพิจารณาตามกรรมวิธีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยจะแบ่งออกเป็น 2 วิธี วิธีแรกคือ วิธี Optimized Spare Fiber Assignment ซึ่งเป็นวิธีการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่โครงข่ายต้องการ ในการหาผลเฉลยจะต้องมีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นที่เป็นวิถีทำงานของโครงข่ายมาให้ ส่วนวิธีที่สองคือ วิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment ซึ่งเป็นวิธีในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่โครงข่ายต้องการพร้อมกัน การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีนี้ไม่ต้องการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นของวิถีทำงานมาให้เหมือนกับวิธีแรก

เมื่อพิจารณาความซับซ้อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในแง่ของจำนวนสมการ (Constraint) และจำนวนตัวแปร (Variable) ทั้งในกรณี Optimized Spare Fiber Assignment และ Jointly

Optimized Working and Spare Fiber Assignment ในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง (5N_7L) และโครงข่าย 7 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยง (7N_13L) ต้องการจะพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ จะใช้สมการและตัวแปรในการสร้างแบบจำลองมากกว่าแบบจำลองของโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะได้ว่าวิธี MFA มีจำนวนสมการและตัวแปรของแบบจำลองมากที่สุด ถัดมาเป็นวิธี JPR และ OFA ตามลำดับจากมากไปน้อย ส่วนวิธี OFO จะมีจำนวนสมการและตัวแปรน้อยสุด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างโครงข่ายแบบ NWC และ WC จะเห็นได้ว่าแบบจำลองของโครงข่ายแบบ WC จะมีจำนวนสมการและตัวแปรมากกว่าแบบจำลองของโครงข่ายแบบ NWC โดยจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่แบบจำลองสำหรับโครงข่าย NWC จะมีจำนวนคงที่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีจำนวนสมการและตัวแปรมากกว่าจะต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานกว่า นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกรรมวิธีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง 2 วิธี พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment จะใช้สมการและตัวแปรในการสร้างแบบจำลองมากกว่าวิธี Optimized Spare Fiber Assignment กล่าวคือ ใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานกว่า แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาด้านจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ วิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment จะประหยัดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าวิธี Optimized Spare Fiber Assignment

เมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการจากการจำลองปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นได้ว่า โครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้จะต้องการติดตั้งเส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนมากกว่าโครงข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีทั้งในกรณีที่สร้างแบบจำลองด้วยวิธี Jointly Optimized Working and Spare Fiber Assignment และวิธี Optimized Spare Fiber Assignment จะได้ว่าวิธี JPR เป็นวิธีที่ประหยัดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายมากที่สุด ตามมาด้วยวิธี MFA และ OFA ที่ต้องการเส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนเพิ่มขึ้นจากวิธี JPR ตามลำดับ ส่วนวิธี OFO จะเป็นวิธีที่สิ้นเปลืองเส้นใยแก้วนำแสงมากที่สุด จากผลที่ได้พบว่า การใช้งานช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงร่วมกันระหว่างวิธีทำงานและวิธีสำรองจะช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย โดยวิธี JPR นั้นแต่ละเส้นใยแก้วนำแสงในโครงข่ายจะยินยอมให้มีการใช้งานช่องสัญญาณร่วมกันระหว่างวิธีทำงานและวิธีสำรองของโครงข่าย ต่างจากวิธี MFA ที่ไม่ยินยอมให้มีการใช้งานช่องสัญญาณร่วมกัน เนื่องจากวิธีทำงานและวิธีสำรองของโครงข่ายมีการ

จัดสรรเส้นทางและการใช้อุปกรณ์ในการส่งต่อข้อมูลที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าว วิธี JPR จึงประหยัดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในการติดตั้งให้กับโครงข่ายมากกว่าวิธี MFA

นอกจากนี้ยังพบว่า จำนวนของวงแหวนที่ใช้ในการปกป้องความเสียหายจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ ซึ่งจริง ๆ แล้วการเพิ่มจำนวนวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายจะทำให้แต่ละวิธีสำรองมีทางเลือกในการจัดสรรเส้นทางเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากคุณสมบัติของวงแหวนที่ว่าแต่ละข่ายเชื่อมโยงของวงแหวนจะต้องทำการจองช่องสัญญาณเป็นจำนวนเท่า ๆ กัน นั่นคือจะต้องทำการจองช่องสัญญาณในปริมาณที่มากพอที่จะสามารถรองรับทราฟฟิกที่หนาแน่นที่สุดได้ ซึ่งการจองช่องสัญญาณในลักษณะดังกล่าว จะทำให้บางช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงในวงแหวนไม่ถูกใช้งาน นั่นคือ วงแหวนที่ใช้จะทำการจองช่องสัญญาณเกินกว่าภาวการณ์ใช้งานจริง เพื่อเป็นลดปัญหาดังกล่าว ทราฟฟิกที่ถูกจัดวิธีทั้งหมดจะต้องกระจายกันอย่างได้ดุลบนวงแหวน เพื่อให้ไม่มีการใช้งานเส้นใยแก้วนำแสง ณ ข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเป็นจำนวนมากเกินไป ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี MFA ซึ่งยินยอมให้มีวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายได้มากกว่าหนึ่งวงจะต้องการเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเป็นจำนวนน้อยกว่าวิธี OFA ที่ยินยอมให้มีวงแหวนในการปกป้องโครงข่ายเพียงวงเดียวเท่านั้น เนื่องจากวิธี MFA จะมีกระจายของทราฟฟิกในวงแหวนมากกว่าวิธี OFA ที่แต่ละวิธีสำรองจะต้องถูกกระจายลงบนวงแหวนเพียงวงเดียว และเมื่อทำการพิจารณาเพิ่มเติมจะพบว่าไม่เพียงแต่จำนวนของวงแหวนเท่านั้นที่ส่งผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการแต่ขนาดของวงแหวนที่ใช้ก็ส่งผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมเช่นกัน ดังนั้น วิธี OFA ที่ใช้วงแหวนขนาดใหญ่สุดเพื่อให้สามารถครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกของทุกมัลติคาสต์เซสชันได้ จะต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในปริมาณที่มากกว่าวิธี MFA ที่ใช้วงแหวนขนาดเล็กกว่าเป็นวงแหวนในการปกป้องโครงข่าย เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธี OFO และวิธี OFA พบว่า การใช้งานช่องสัญญาณของข่ายเส้นใยแก้วนำแสงสำรองร่วมกันระหว่างวิธีสำรองในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันจะช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย โดยวิธี OFA นั้นแต่ละเส้นใยแก้วนำแสงสำรองจะยินยอมให้มีการใช้งานช่องสัญญาณร่วมกันระหว่างวิธีสำรองในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันต่างจากวิธี OFO ที่ไม่ยินยอมให้มีการใช้งานช่องสัญญาณร่วมกัน ดังนั้น วิธี OFA จึงประหยัดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในการติดตั้งให้กับโครงข่ายมากกว่าวิธี OFO

แม้ว่าการออกแบบโครงข่ายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายมีค่าต่ำสุด แต่เนื่องจากวิธีการดังกล่าวจะใช้เวลาในการหาผลเฉลยที่ค่อนข้างนาน แม้ว่าผลเฉลยดังกล่าวจะเป็นผลเฉลยของโครงข่ายที่มีขนาดเล็กก็ตาม ซึ่งจาก

การทดลองพบว่าในบางวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จะใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานกว่า 10 ชั่วโมงขึ้นไป ดังนั้น เพื่อให้สามารถประมาณหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายขนาดใหญ่ได้ด้วยเวลาในการหาผลเฉลยที่เหมาะสม วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนออีกกรรมวิธีในการหาผลเฉลยด้วยอัลกอริทึมฮิวริสติก

อัลกอริทึมที่ได้จะนำมาใช้ในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่าย EURO-core (รูปที่ 5.11) ที่มีจำนวนโนดและข่ายเชื่อมโยงเท่ากับ 11 โหนด 25 ข่ายเชื่อมโยงต้องการ ทั้งในกรณีโครงข่ายแบบ NWC และ WC ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ JPR จะเป็นวิธีที่ประหยัดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่เพียงวิธีเดียวที่มีการใช้ช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงร่วมกันระหว่างวิธีสำรวจและวิธีทำงานของโครงข่าย ส่วนวิธี MFA OFA และ OFO จะต้องการเส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งผลสรุปที่ได้นี้จะตรงกับผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษาอิทธิพลของจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสง (M) ที่ต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ เพื่อทำการสรุปหาข้อดีข้อเสียของการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่าย WDM เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้ ทั้งในกรณีของโครงข่ายแบบ NWC และ WC สามารถสรุปได้ว่า จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสงจะช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่โครงข่ายต้องการได้ โดยโครงข่ายจะต้องการเส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนลดลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องจากการที่ M มีค่าเพิ่มขึ้นนั้น จำนวนช่องสัญญาณในการรองรับทราฟฟิกของโครงข่ายก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ค่าที่เพิ่มมากขึ้นนี้ทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการวางเส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนมากเพื่อให้ได้จำนวนช่องสัญญาณที่เพียงพอกับปริมาณทราฟฟิกในโครงข่าย ในทางกลับกัน เมื่อจำนวนช่องสัญญาณของโครงข่ายมีจำนวนมากเกินกว่าการใช้งานจริงของทราฟฟิกภายในโครงข่าย ทำให้การวางเส้นใยแก้วนำแสงในกรณีนี้ไม่เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด นั่นคือ บางช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงไม่ถูกใช้งาน ในกรณีนี้จะสามารถกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสง (Utilization) ของโครงข่ายจะมีค่าลดลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น

จากการพิจารณาผลของการแปลงผันความยาวคลื่น เมื่อพิจารณาในแง่ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสามารถสรุปได้ว่า การแปลงผันความยาวคลื่นจะสามารถช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงใน

กรณีที่โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้หนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้มากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถแก้ไข ปัญหา ซึ่งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ลดได้จะขึ้นอยู่กับค่า M และวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ โดยการแปลงผันความยาวคลื่นจะทำให้โครงข่ายต้องการเส้นใยแก้วนำแสงในปริมาณที่ต่างกัน แต่จะมีผลน้อยลงและเริ่มคงที่เมื่อ M มีค่ามากจนถึงค่าหนึ่ง

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในขั้นต่อไปที่น่าสนใจ

1. ต้องการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันบังคับที่ค่อนข้างมีความซับซ้อน เพื่อเป็นการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยประมาณ งานวิจัยในขั้นต่อไปจึงเป็นหาค่าขอบเขตล่างของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการ ทั้งกรณีที่โครงข่ายมีการใช้งานในภาวะปกติ และกรณีที่โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายได้

2. เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ โครงข่าย WDM จะถูกกำหนดให้มีการจัดสรรเส้นทางในการรับส่งข้อมูลบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบต้นไม้ (Tree) ในภาวะปกติของโครงข่าย และได้ทำการนำเสนอ การแก้ไขปัญหานี้หนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายด้วยกันหลายวิธี หนึ่งในวิธีดังกล่าวจะเป็นการปกป้องโครงข่ายโดยนำหลักการของวงแหวน (Ring) มาใช้ปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย งานวิจัยที่น่าสนใจต่อไปคือการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของวงแหวนจำนวนหนึ่ง (Multi Ring) กรณีนี้วงแหวนที่ใช้จะรองรับทั้งทราฟฟิกปกติของโครงข่ายและทราฟฟิกสำรองที่ถูกกู้คืนจากความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง ซึ่งต่างจากวิทยานิพนธ์นี้ที่กำหนดให้เฉพาะทราฟฟิกสำรองเท่านั้นที่สามารถส่งข้อมูลผ่านวงแหวนได้

3. เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ทำการแก้ไขปัญหานี้หนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายด้วยการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางที่ถูกครอบงำจากข่ายเชื่อมโยงที่ขาดเพื่อให้โครงข่ายมีค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงต่ำสุด ซึ่งเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรใหม่นี้จะมีการกำหนดระดับเตรียมไว้ล่วงหน้าแล้ว แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจาก วัตถุประสงค์ในการออกแบบโครงข่ายของวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะจำนวนของเส้นใยแก้วนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการเป็นหลัก โดยไม่ได้ทำการพิจารณาถึงค่าความหน่วงเวลา (Delay) ในการส่งสัญญาณหรือข่าวสารไปแจ้งยังต้นทางและปลายทางของเส้นทาง ที่ได้รับความเสียหาย เพื่อให้ทำการเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ในการรับส่งข้อมูล ดังนั้นในงานวิจัยขั้นต่อไป จึงควรมีการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณในกระบวนการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับ

เส้นทางที่ได้รับความเสียหายประกอบไปกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง เพื่อให้การพิจารณา มีความสมบูรณ์ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

4. เนื่องจากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์จะเป็นการปกป้องโครงข่ายแบบ 100% นั่นคือทุกเส้นทางที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายจะได้รับการจัดสรรเส้นทางใหม่ ทำให้ทรัพยากรที่ใช้เพื่อรองรับวิธีสำรองดังกล่าวมีปริมาณสูง ซึ่งบางกรณีโครงข่ายจะมีทรัพยากรสำรองไม่เพียงพอ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนที่ใช้ในการปกป้องโครงข่าย งานวิจัยต่อไปที่น่าสนใจคือการปกป้องโครงข่ายเพียงบางส่วน นั่นคือมีนำมาตราฐานการรับประกันคุณภาพการปกป้องโครงข่าย (Quality of Protection, QoP) มาใช้งาน โดยมีการนำเงื่อนไขบางอย่างเข้ามาพิจารณาเพิ่ม เช่น ค่าความหน่วงเวลา ถ้าเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรใหม่มีค่าความหน่วงเวลาของเส้นทางเกินกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้ก็จะไม่ทำการปรับเปลี่ยนเส้นทางที่ได้รับความเสียหายนั้น ๆ ไปใช้เส้นทางดังกล่าว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. R. E. Wagner et al. MONET: Multi-Wavelength Optical Networking. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology. 14 (June 1996): 1349-1355.
2. I. P. Kaminow et al. A Wideband All-Optical WDM Network. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 14 (1996): 780-799.
3. L. D. Garrett et al. The MONET New Jersey Network Demonstration. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 16 (September 1998): 1199-1219.
4. I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi. Lightpath Communications: An Approach to High Bandwidth Optical WAN's. IEEE Transactions on Communications. 40 (July 1992): 1171-1182.
5. R. Malli, X. Zhang and C. Qiao. Benefit of Multicasting in All-Optical Networks. in Proceedings SPIE. 3531 (1998): 9-20.
6. X. Jia, et.al. Optimization of wavelength for QoS Multicast in WDM networks. IEEE Transactions on Communications. 49 (February 2001): 341-350.
7. B. Chen and J. Wang. Efficient routing and wavelength assignment for multicast in wavelength-routed networks. IEEE Journal Selection Areas Communications. 20 (January 2002): 97-109.
8. T. Znati, T. Alvabiah and R. Melhem. Point-to-multipoint Path Establishment Schemes to Support Multicasting in WDM Networks. in Proc. 3rd IFIP Working Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM'99). (February 1999): 1-22.
9. Y. Xin, G. N. Rouskas and H. G. Perros. Light-Tree Routing Under Optical Layer Power Budget Constraints. Infocom submission. (2003): 1-11.
10. S. Okamoto and K. Sato. Optical Path Cross-Connect Systems for Photonic Transport Networks. IEEE GLOBECOM '93. 1 (November 1993): 474-480.
11. A. Jourdan et al. Fully Reconfigurable WDM Optical Crossconnect: Feasibility Validation and Preparation of Prototype Crossconnect for ACTS "OPEN" Field Trials. in Proceedings ECOC'97. (1997): 55-58.

12. W. S. Hu and Q. J. Zeng. Multicasting Optical Cross Connects Employing Splitter-and-Delivery Switch. IEEE Photonics technology letters. 10 (July 1998): 970-972.
13. R. Libesking-Hadas and R. Melhem. Multicast Routing and Wavelength Assignment in Multihop Optical Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking. 10 (October 2002): 621-629.
14. S. Yan, M. Ali and S. Deogun. Route optimization of multicast sessions in sparse light-splitting optical networks. IEEE GLOBECOM'01. 4 (2001): 2134-2138.
15. J. Wang, B. Chen and R. N. Uma. Dynamic Wavelength Assignment for Multicast in All-Optical WDM Networks to Maximize the Network Capacity. IEEE Journal Selection Areas Communications. 21 (October 2003): 1274-1284.
16. Baroni, P. Bayvel, R. J. Gibbens and S. K. Korotky. Analysis and design of resilient multifiber wavelength-routed optical transport networks. Journal of Lightwave Technology. 17 (May 1999): 743-758.
17. J. He, S.-H. Gary Chan and D. H. K. Tsang. Multicasting in WDM. IEEE Communications Surveys. 4 (2002): 2-20.
18. N. K. Singhal and B. Mukherjee. Protecting Multicast Sessions in WDM Optical Mesh Networks. Journal of Lightwave Technology. 21 (April 2003): 884-892.
29. G. Xue, L. Chen and K. Thulasiraman. Quality-of-Service and Quality-of-Protection Issues in Preplanned Recovery Schemes Using Redundant Trees. IEEE Journal Selection Areas Communications. 21 (October 2003): 1332-1345.
20. M. Médard et al. Redundant Trees for Preplanned Recovery in Arbitrary Vertex-Redundant or Edge-Redundant Graphs. IEEE/ACM Transactions on Networking. 7 (October 1999): 641-651.
21. N. Nagatsu, S. Okamoto and K. sato. Optical Path Accommodation Design Considering Failure Restoration with Minimum Cross-connect System Scale. IEEE Network Operations and Management Symposium. 1 (April1996): 213-224.

22. L. Wuttisittikulij and M.J. O'Mahony. Use of Spare Wavelength for Traffic Restoration in Multi-Wavelength Transport Network. IEEE Communication. 3 (1996): 1778-1782.
23. S. Ramamurthy, L. Sahasrabudde and B. Mukherjee. Survivable WDM Mesh Networks. Journal of Lightwave Technology. 21 (April 2003): 870-883.
24. A. Fumagalli and L. Valcarengi. IP Restoration vs. WDM Protection Is There an Optimal Choice?. IEEE Network. (November 2000): 34-41.
25. S. De Patre, G. Maier, M. Martinelli and A. Pattavina. Design of Static WDM Mesh Networks with Dedicated Path-protection. Proceedings of the 6th Optical Networks Design and Modeling IFIP Conference. (February 2002).
26. D. Zhou and S. Subramaniam. Survivability in Optical Networks. IEEE Network. (November 2000): 16-23.
27. G. Li et al. Efficient Distributed Restoration Path Selection for Shared Mesh Restoration. IEEE/ACM Transactions on Networking. 11 (October 2003): 761-771.
28. D. Xu et al. Novel Algorithms for Shared Segment Protection. IEEE Journal Selection Areas Communications. 21 (October 2003): 1320-1331.
29. D. Stamatelakis and W.D. Grover. Network Restorability Design Using Pre-configured Trees, Cycles, and Mixtures of Pattern Types. TR Labs Technical Report. (October 2000).
30. ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม CPLEX สามารถหาได้จาก WWW.CPLEX.COM



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจาก ส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงาน
การประชุมทางวิชาการ 2004 IEEE Sarnoff Symposium on Advances in Wired and Wireless
Communications ที่เมืองนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา ในวันที่ 26-27 เมษายน พ.ศ. 2547 ใน
ชื่อบทความทางวิชาการเรื่อง Design and Analysis of five protection schemes for
preplanned recovery in multicast WDM networks ดังนั้น จึงขอนำบทความที่ได้รับการตีพิมพ์
มาเสนออีกครั้งหนึ่ง ในภาคผนวก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Design and Analysis of Five Protection Schemes for Preplanned Recovery in Multicast WDM Networks

Pattarin Leelarumsee, Charoenchai Bowornummarat and Lunchakorn Wuttisittikulki

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 10330

Email: Pattarin.L@student.chula.ac.th, Charoenchai.B@student.chula.ac.th and wlunchak@chula.ac.th

Abstract- This paper proposes five novel protection strategies against single link failure in multicast multi-fiber WDM networks. These strategies are able to provide rapid recovery from failure by reserving sufficient preplanned spare capacity. Mathematical formulations based on the integer linear programming (ILP) are derived to determine optimal multicast routing and wavelength assignment (MC-RWA) while achieving 100% restoration. Based on a sample network, it is shown that the joined-path recovery (JPR) scheme is the most cost-effective, whereas the ring-based protection strategies offer other advantages, *i.e.* fast and reliable recovery.

I. INTRODUCTION

Optical network with Wavelength Division Multiplexing (WDM) technology is currently seen as a choice of promising transport networks to meet the tremendous growth of bandwidth demands and low latency in emerging multicast applications such as Internet game, distance learning and video on demand [1]-[3]. The structure of tree spanning all multicast members is employed to establish point-to-multipoint connection for supporting multicast traffic. With the intensive-bandwidth in optical fibers, a network element failure such as a fiber cut will be the cause disrupted destinations from severe data loss. The impact will increase dramatically, if the failed link of multicast tree carries the traffic for several destinations. Therefore, to protect multicast traffic against the interruption, survivability must be considered in designing WDM networks. To achieve full protection and fast recovery times, backup paths should be determined and centrally computed in advance before failure occurs.

In the literature, many research studies on survivability in WDM optical networks have focused on the recovery of point-to-point (unicast) traffic [4]-[9]. Yet, few research studies have focused on multicast traffic using concepts such as dedicated paths [10]-[11] and shared backup paths [12]. To achieve full protection and fast recovery time, backup paths should be determined and centrally computed in advance before failure occurs. Consequently, the five protection schemes for handling on the physical layer of the network using concepts of ring-based protection techniques and path-based protection technique are propose in this paper. The optimal multicast routing and the wavelength assignment (MC-RWA) in multicast WDM networks are achieved by mathematical formulations based on the Integer Linear Programming (ILP).

The remainder of this paper is organized as follows. Section II provides the description of five protection schemes. The mathematical formulations based on ILP are proposed in section III. Section IV presents simulation results and the comparison among protection techniques. Finally, the conclusion is given in the Section V.

II. MULTICAST-TREE PROTECTION SCHEMES

A classification of all proposed protection strategies is shown in Fig. 1. As illustrated, the protection schemes are classified into two major techniques, namely ring-based protection techniques and path-based protection technique.

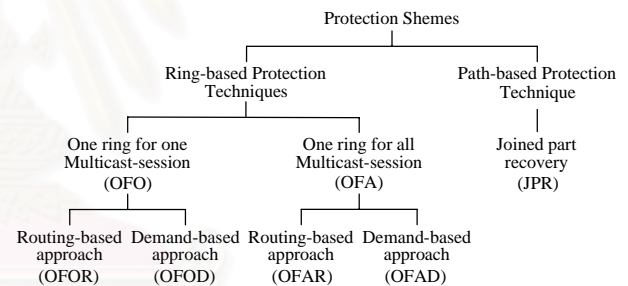


Figure 1. Classification of multicast protection schemes

A. Path-based Protection Technique

In this scheme, the disrupted multicast trees are re-routed along alternative physical paths which provide the survivable networks with minimal fiber requirements. In this paper, only one protection scheme using path-based protection technique, namely joined path recovery is proposed.

A.1 Joined path recovery (JPR)

In the JPR scheme, when a link is cut, each affected multicast tree is separated into two disconnected sections or sub trees. After separation, each sub tree may contain some nonmember nodes that are no longer needed for connecting member nodes. Hence, these nodes are detached and their associated links are released from the sub trees. Two sub trees try to rejoin together by re-routing along alternative joined paths. For clarity, Fig. 2 shows the mechanism of JPR protection strategy. Inasmuch as each multicast tree can have several different joined paths depending on the place of failure

along the multicast tree, so the selection of an inappropriate joined path will result in ineffectively use of spare capacity.

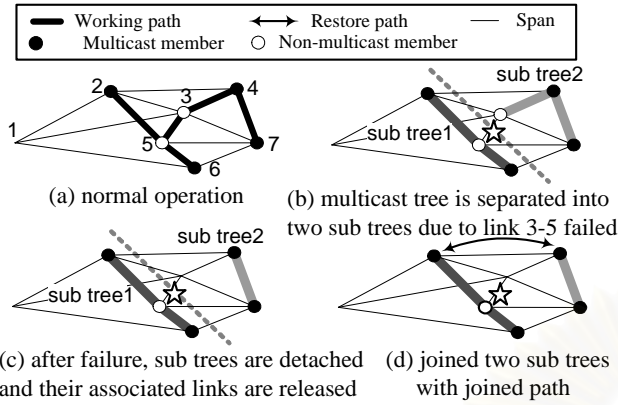


Figure 2. Joined part recovery (JPR) technique. Fig. 2(b) shows disrupted multicast tree is separated into two disconnected sub trees. Fig. 2(c) illustrates sub trees are trimmed by detached some non-member nodes and their associated links. Two sub trees are rejoined by a protection path in Fig. 2(d).

B. Ring-based Protection Techniques

Using the ring-based design concept for protecting multicast sessions, two protection schemes, namely one ring for one multicast session and one ring for all multicast sessions are proposed. In these schemes, the disrupted multicast trees are re-routed upon a set of chosen protection rings that provide 100% survivability with the minimal number of fiber requirements.

B.1 One ring for one multicast session (OFO)

In OFO scheme, each multicast session is allocated in a separated and dedicated ring. To restore the failure, the disrupted traffics in the same session is rerouted on a single predefined ring. No traffic is allowed to get across rings in order to avoid the complicated control and management. Consequently, the aim of this design is how to select the optimal rings in order to minimize the spare capacity requirements. Note that, this concept is rather easy to manage and straight forward. However, networks using this protection technique may suffer from low capacity utilization. To enhance the understanding of OFO mechanism, Fig. 3 shows a network with OFO protection strategy.

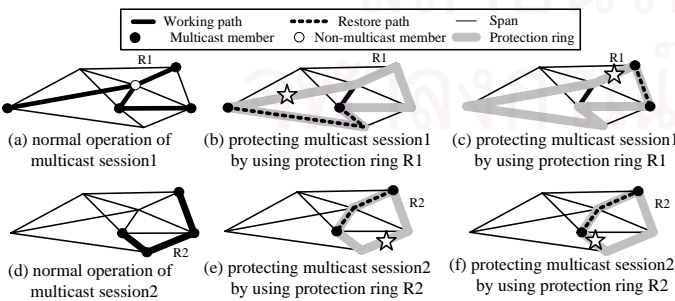


Figure 3. One ring for one multicast session (OFO) strategy. (a) and (d) are two multicast sessions and two dedicated protection rings. (b)-(c), (e) and (f) show the restored path along the protection rings.

In fact, we can further divide the OFO technique into two sub-types according to the way in which the traffics are restored, namely OFO with routing-based approach (OFOR) and OFO with demand-based approach (OFOD). For the OFOR scheme, only interrupted multicast trees are re-routed along protection rings. Meanwhile, for the OFOD, all multicast trees are re-routed even they may not be disturbed by the failure.

B.2 One ring for all multicast session (OFA)

The restoration process of this scheme can be considered as a modification technique from the OFO scheme. To achieve efficient capacity utilization, all channel capacity upon a single protection ring can be shared by several restoration paths from different multicast sessions. However, only one ring is chosen for handling all restored traffics; see Fig. 4 for the example. Under the OFA mechanism, the size of the protection ring must conceptually be large enough to cover all multicast members of multicast sessions. In fact, this strategy can be divided into two sub-types according to the way in which the traffic are restored, namely OFA with routing-based approach (OFAR) and OFA with demand-based approach (OFAD). As demonstrated, Fig. 4 shows the OFA protection scheme on the example mechanism.

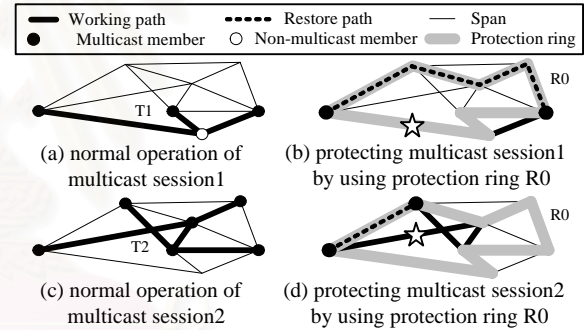


Figure 4. One ring for all multicast session (OFA) strategy.

Fig. 4(a) and 4(c) illustrate two multicast tree. Fig. 4(b) and 4(d) present the restored path upon single protection ring.

III. MULTICAST PROTECTION FORMULATIONS

In this section, the ILP formulations are developed for five protection strategies as described in the previous section. The ILP models are used for accomplishing the optimal resource allocation. The optical network is modeled as an undirected graph, where \mathcal{N} denotes a set of optical nodes, and \mathcal{L} denotes a set of undirected links. Each unidirectional link consists of several optical fibers. Every optical node is equipped with full wavelength converters capable of converting an incoming wavelength to any other out coming wavelengths. The number of wavelength channels carried by each fiber are equal to λ . For serving multicast traffics, optical splitters are included in OXCs so as to be multicast-capable OXCs (MC-OXCs). Since some techniques are proposed by using the ring concept, OADMs are equipped with optical nodes for providing ring property. Let us introduce the parameters and variables that are used in the ILP formulations as defined in Table 1.

TABLE I
NETWORK PARAMETERS AND VARIABLES USED
IN THE MATHEMATICAL FORMULATIONS

Network parameters (inputs)			
N	number of nodes in the network	$W_{sg,n}^j$	takes the value of one if multicast tree n of multicast session sg releases associated links of detached nodes when a failure occurred on link j , and zero, otherwise (JPR case)
L	number of links in the network	$\xi_{sg,n}^{j,j'}$	takes the value of one if multicast tree n of multicast session sg releases link j when a failure occurred on link j' , and zero, otherwise (JPR case)
M	number of wavelengths multiplexed per fiber	$h_{sd,k}^{j,sg,n}$	takes the value of one if route k of node pair sd is the shortest backup route that protect the failure on link j along multicast tree n of multicast session sg , and zero, otherwise (JPR case)
m	a set of multicast requests of a network	Q_{sg}	a set of candidate rings of multicast session sg
$T_{sg,n}$	traffic demand on selected multicast tree n of multicast session sg	Network variables (outputs)	
d_{sg}	total demand of multicast session sg in units of wavelength channels	S_j	number of spare fibers contained in link j (JPR case)
t_{sg}	total candidate multicast tree of multicast session sg	$R_{sg,q}$	number of spare fibers on candidate smallest rings $q \in Q_{sg}$ for multicast session sg (OFO case)
N_{sd}^j	a set of node pair in a network, i.e., $N(N-1)/2$	R_i	number of spare fibers on ring i (every link of ring has the same number of optical fibers) (OFA case)
K_{sd}	a set of candidate routes of node pair sd	r_i	a Boolean variable, a candidate protection ring i $i \in N_r$ (OFA case)
N_r	a set of possible rings in a network	$r_{sg,q}$	a Boolean variable, a candidate smallest protection ring $q \in Q_{sg}$ for multicast session sg (OFO case)
$l_{sg,q}$	total number of physical links of ring $q \in Q_{sg}$	$p_{sd,k}^j$	a candidate physical route k of node pair sd for protecting the failure on link j (JPR case)
l_i	total number of physical links of ring $i \in N_r$	$p_{sd,k}^{j,sg,n}$	a candidate physical route k of node pair sd for protecting the failure on link j upon multicast tree n of multicast session sg (JPR case)
$\delta_{sg,n}^{j,j'}$	takes the value of one if multicast tree $n \in t_{sg}$ of multicast session sg passing through link j' , and zero, otherwise	α_i^{sg}	takes the value of one if ring i cover all members of multicast session sg (OFA case)
$\gamma_{sd,k}^{j,sg,n}$	takes the value of one if route k of node pair sd is the backup route for protecting the failure on link j' upon multicast tree n of multicast session sg , and zero, otherwise (JPR case)		
$\beta_{sd,k}^j$	takes the value of one if route k of node pair sd passing through link j' , and zero, otherwise (JPR case)		

A. ILP formulations of path-based protection technique

A.1 JPR mathematical formulation

Minimizing the total spare fiber requirements:

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

The constraints to be satisfied are:

$$\sum_{sd=1}^{N_{sd}} \sum_{k=1}^{K_{sd}} P_{sd,k}^{j,sg,n} \gamma_{sd,k}^{j,sg,n} h_{sd,k}^{j,sg,n} (1 - \beta_{sd,k}^j) = T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j,j'} \quad (2)$$

for $1 \leq j' \leq L; 1 \leq sg \leq m; 1 \leq n \leq t_{sg}$

$$p_{sd,k}^j = \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} P_{sd,k}^{j,sg,n} \quad (3)$$

for $1 \leq j' \leq L; 1 \leq sd \leq N_{sd}; 1 \leq k \leq K_{sd}$

$$M \times s_j - \sum_{sd=1}^{N_{sd}} \sum_{k=1}^{K_{sd}} p_{sd,k}^j \beta_{sd,k}^j + \sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} W_{sg,n}^j \xi_{sg,n}^{j,j'} \geq 0 \quad (4)$$

for $1 \leq j' \leq L; j \neq j'$

$$s_j, p_{sd,k}^j, P_{sd,k}^{j,sg,n} \in \{0,1,2,\dots\} \quad (5)$$

for $1 \leq j' \leq L; 1 \leq j \leq L; 1 \leq sd \leq N_{sd}; 1 \leq k \leq K_{sd};$

$1 \leq sg \leq m; 1 \leq n \leq t_{sg}$

The objective function (1) is to minimize the total number of spare fiber requirements. The constraints (2) state that disrupted trees are rerouted through the shortest joined paths. The constraints (3) ensure that the wavelength capacity for any restored route is sufficient for supporting all joined paths given by constraints (2). The constraints (4) ensure that the wavelength capacity of each spare link should be sufficient to support the joined path crossing. In addition, the third term of constraints (4) means that released channels on link j can be used as spare capacity of joined paths. The constraints (5) assure that s_j , $p_{sd,k}^j$ and $P_{sd,k}^{j,sg,n}$ are non-negative integers.

B. ILP formulations of ring-based protection techniques

B.1 OFO mathematical formulation

Minimizing the total spare fiber requirements:

$$\min : \left\{ \sum_{sg=1}^m \sum_{q=1}^{Q_{sg}} l_{sg,q} R_{sg,q} \right\} \quad (6)$$

The constraints to be satisfied are:

$$\sum_{sg=1}^m r_{sg,q} = 1; \quad \text{for } 1 \leq sg \leq m \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{OFOD case;} \quad & M \times R_{sg,q} - \left(\sum_{q=1}^{Q_{sg}} d_{sg} \right) r_{sg,q} \geq 0 \\ \text{OFOR case;} \quad & M \times R_{sg,q} - \left(\sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j,j'} \right) r_{sg,q} \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

for $1 \leq j' \leq L; 1 \leq sg \leq m; 1 \leq q \leq Q_{sg}$

$$R_{sg,q} \in \{0,1,2,\dots\}; r_{sg,q} \in \{0,1\} \quad (9)$$

for $1 \leq sg \leq m; 1 \leq q \leq Q_{sg}$

The objective function (6) is to minimize the total number of spare fibers to protect multicast sessions. The constraints (7) enforce that each multicast session has only one protection ring. The constraints (8) ensure that the spare fibers are sufficient to meet the restored traffics carrying on them. In addition, OFOD will reroute all traffic demands in this multicast session, but OFOR will reroute only interrupted active routes instead. The constraints (9) assure that s_{sg}^j is non-negative integers and $r_{sg,q}$ is Boolean.

B.1 OFA mathematical formulation

Minimizing the total spare fiber requirements:

$$\min : \left\{ \sum_{i=1}^{N_r} l_i R_i \right\} \quad (10)$$

The constraints to be satisfied are:

$$\sum_{i=1}^{N_r} r_i \alpha_i^{sg} = 1; \quad \text{for } 1 \leq sg \leq m \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{OFAD case;} \quad & M \times R_i - \left(\sum_{sg=1}^m d_{sg} \right) r_i \geq 0 \\ \text{OFAR case;} \quad & M \times R_i - \left(\sum_{sg=1}^m \sum_{n=1}^{t_{sg}} T_{sg,n} \delta_{sg,n}^{j,j'} \right) r_i \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

for $1 \leq i \leq N_r; 1 \leq j' \leq L$

$$R_i \in \{0,1,2,\dots\}; r_i \in \{0,1\}; \text{ for } 1 \leq i \leq N_r \quad (13)$$

The objective function (10) is to minimize the total number of spare fibers allocated on the single protection ring. The constraints (11) enforce that all multicast sessions has only one protection ring. The constraints (12) ensure that the channel capacity of protection ring is sufficient to meet restored traffics passing through it. Constraints (13) assure that R_i is non-negative integers and r_i is Boolean.

IV. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we analyze and compare the spare capacity requirements among five proposed protection schemes on a test network as shown in Fig. 5. Note that, all ILP mathematical formulations are optimally solved by using the CPLEX 6.6 program.

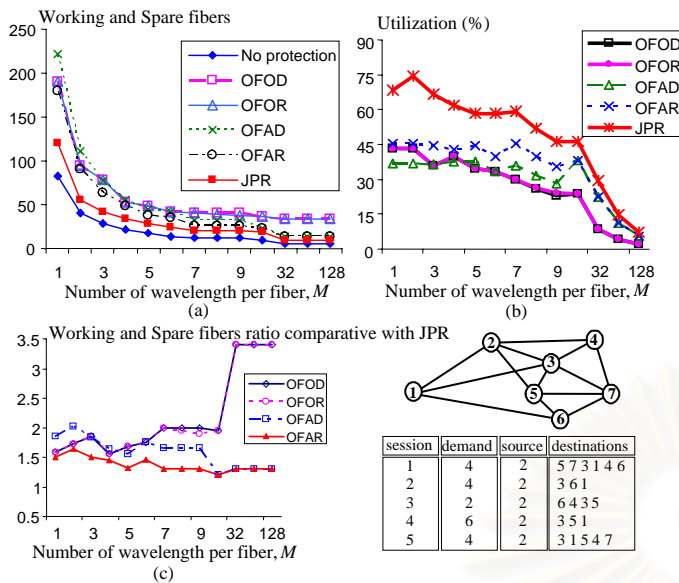


Figure 5. Simulation results in the test network.

Fig. 5(a) shows the total fiber requirements of all five protection schemes. The results indicate that the JPR technique requires the minimum spare fibers, whereas the other four ring-based protection strategies always require more the total fibers than the JPR by at least 20% as illustrated in Fig. 5(c). Therefore, it is clear that a path-based protection scheme is the cheapest protection scheme with respect to ring-based protection scheme in terms of total fiber requirements implicitly. When examining the influence of number of wavelengths per fiber on the fibers requirements, the total number of fibers tends to decrease as the number of available wavelengths per fiber, M increases. Moreover, when the number of available wavelengths per fiber increases, the dropping of fiber utilization can be observed. Thus, we can see that the network will be cost-effective at a small number of wavelengths per fiber.

Under ring-based scheme, Fig. 5(a) and Fig. 5(c) show that the fiber requirements of routing-based and demand-based approach in the OFO scheme are very comparable for all value of M . However, in the OFA scheme, the routing-based approach provides lower number of fiber requirements than the demand-based approach. When comparing between OFO and OFA schemes, Fig. 5(a) demonstrates that the OFA scheme requires lower fiber requirements than the OFO scheme at a large value of M . Moreover, based on network design outcomes, Fig. 5(c) shows that the OFO is the worst protection scheme as by far requires total fibers 3.5 times more than the best protection technique (JPR) at a large value of M . This is because the channel capacity upon a protection ring of OFA scheme can be shared; whereas the channel capacity upon protection rings of OFO scheme are dedicated. However, since

the size of single protection ring of OFA strategy must be large enough to cover all multicast sessions, the OFAD which re-routes all traffics in the network would become the worst protection scheme as requiring large total number of fibers at a small value of M .

V. CONCLUSIONS

In this paper, we present five protection schemes to continue the multicast services for a single link failure. As the simulation results, the JPR is the best protection scheme among all protection strategies in the terms of total fiber requirements on a test network. However, the protection paths of JPR scheme are allocated following the place of failure along the multicast tree. Therefore, to select appropriate protection paths in JPR scheme is more complicated than other protection schemes that selecting appropriate rings for covering any multicast sessions in networks.

REFERENCES

- [1] R. Malli, X. Zhang, and C. Qiao, "Benefit of multicasting in all-optical networks," in *Proc. SPIE Conf. All-optical Networking*, vol.2531, pp. 209-220, Nov. 1998.
- [2] B. Chen and J. Wang, "Efficient Routing and Wavelength Assignment for Multicast in WDM Networks," *IEEE J. selected areas in Commun.*, vol. 20, No.1, pp. 97-109, 2002.
- [3] J. He, et.al., "Multicasting in WDM Networks," *IEEE Commun. Surveys*, vol. 4, No. 1, pp. 2-20, 2002.
- [4] S. Ramamurthy, L. Sahasrabudde and B. Mukherjee, "Survivable WDM mesh networks," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 870-883, April 2003.
- [5] L. Wuttisittikulij, et.al, "A Comparative Study of Mesh and Multiring Designs for Survivable WDM Networks," *IEICE Trans. of Commun.*, vol. E83-B, No. 10, pp. 2270-2277, Oct 2000.
- [6] S. Baroni, et.al., "Analysis and Design of Resilient Multifiber Wavelength-Routed Optical Transport Networks," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 743-758, May 1999.
- [7] L. Wuttisittikulij and M.J. O'Mahony, "Design of a WDM Network Using a Multi-ring Approach," in *IEEE Proc. GLOBECOM'97*, pp. 551-555, Nov 1997.
- [8] A. Dacomo, et.al, "Design of Static Resilient WDM Mesh Networks with Multiple Heuristic Criteria," in *IEEE Proc. INFOCOM'02*, pp. 1793-1802, 2002.
- [9] C. Baworntummarat and L. Wuttisittikulij, "On the Comparison of Optical WDM Mesh Network Protection Strategies," in *IEEE Proc.MILCOM'2000*.
- [10] N. K. Singhal and B. Mukherjee, "Protecting multicast sessions in WDM mesh networks," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 884-892, April 2003.
- [11] M. Medard, et.al., "Redundant trees for preplanned recovery in arbitrary vertex redundant or edge-redundant graphs," *IEEE/ACM Trans. Networking.*, vol. 7, pp. 641-652, Oct. 1999.
- [12] C. Baworntummarat, L. Wuttisittikulij and S. Segkhoonthod, "Light-Tree Based Protection Strategies for Multicast Traffic in Transport WDM Mesh Networks with Multi-Fiber Systems," in *IEEE Proc. ICC2004*, 2004.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ภัทรินทร์ สีสาร์ศรี เกิดเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ.2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย