

การเลือกวงแหวน การจัดเส้นทาง และการจัดสรรความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่น
ที่มีการป้องกัน โครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย



นายพรชัย ธนาคมสาคร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

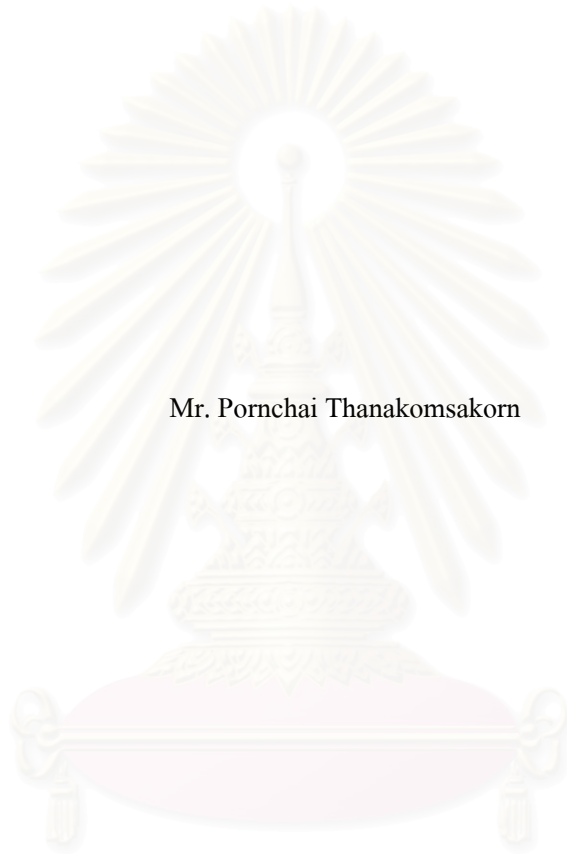
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0669-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RING SELECTION ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION IN MULTIWAVELENGTH
NETWORK WITH SINGLE LINK FAILURE PROTECTION



Mr. Pornchai Thanakomsakorn

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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 2001

ISBN 974-03-0669-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเลือกวงแหวน การจัดเส้นทาง และการจัดสรรความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบหลาย
ความยาวคลื่นที่มีการป้องกัน โครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย

โดย นายพรชัย ชนาคมสาคร

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.ลัญจกร วุฒิสิริทกุลกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสิริทกุลกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พรชัย ชนาคัมสาคร : การเลือกวงแหวน การจัดเส้นทาง และการจัดสรรความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข้อผิดพลาดของเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย (RING SELECTION ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION IN MULTI-WAVELENGTH NETWORK WITH SINGLE LINK FAILURE PROTECTION) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ, 100 หน้า, ISBN 974-03-0669-1

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการจัดสรรวงแหวน เส้นทาง และความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงเพื่อให้โครงข่ายสามารถรองรับความต้องการทราฟฟิกได้ในสภาวะการใช้งานปกติและสภาวะเมื่อเกิดความเสียหายจากข้อผิดพลาดของเชื่อมโยงหนึ่ง การจัดสรรวงแหวน เส้นทาง และความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Integer Linear Programming (ILP) เพื่อใช้ในการหาต้นทุนของโครงข่ายซึ่งวัดจากจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุดที่ใช้อุปกรณ์รองรับความต้องการทราฟฟิกของโครงข่าย โดยงานวิจัยนี้แบ่งโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงออกเป็น 2 แบบตามลักษณะของวิธีที่ใช้ในการรองรับทราฟฟิก แบบแรกทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดต้องส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยใช้อุปกรณ์เพียงวงเดียว ส่วนแบบที่สองทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดสามารถส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยใช้วงแหวนมากกว่าหนึ่งวง ซึ่งหมายความว่าทราฟฟิกจะถูกส่งผ่านจากวงแหวนหนึ่งไปยังอีกวงแหวนหนึ่งที่อยู่ติดกันได้

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ คือ วิเคราะห์และเปรียบเทียบต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับวิธีการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงทั้ง 2 แบบ ซึ่งในกระบวนการออกแบบได้ทำการวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และจำนวนความยาวคลื่นมากที่สุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสง (M) ว่ามีผลอย่างไรต่อต้นทุนโครงข่าย นอกจากนี้วิทยานิพนธ์นี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายแบบเมช จากการทดสอบโดยการจำลองแบบด้วยโครงข่ายตัวอย่างพบว่า วิธีการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงแบบที่สองมีต้นทุนที่ต่ำกว่าแบบแรก แต่ข้อดีของแบบที่สอง คือ มีความซับซ้อนมากกว่า และเมื่อศึกษาถึงผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น พบว่า ในสภาวะที่ต้องมีการเผื่อความจุสำรอง อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเป็นอุปกรณ์ที่มีความจำเป็นต่อโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงสำหรับค่า M บางค่าเท่านั้น ส่วนค่าของ M จะส่งผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนวงแหวนที่จัดสรรให้กับโครงข่ายดังนี้คือ เมื่อค่า M เพิ่มขึ้นส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนวงแหวนลดลง นอกจากนี้ จากการเปรียบเทียบต้นทุนกับโครงข่ายแบบเมชพบว่า ในสภาวะปกติต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงทั้ง 2 แบบมีค่าพัดเดียวกับโครงข่ายแบบเมช แต่ในสภาวะที่ต้องมีการเผื่อความจุสำรองพบว่าโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงทั้ง 2 แบบจะมีค่าสูงกว่าต้นทุนที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายแบบเมชไม่เกิน 19 % อย่างไรก็ตาม โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงก็ยังถือว่าเป็นวิธีการออกแบบที่มีการป้องกันความเสียหายได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพโดยใช้อุปกรณ์ทางแสงที่ไม่ซับซ้อน แสดงให้เห็นว่า วิธีการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่เสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาควิชา..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....

4270440221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : RING SELECTION, ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION / MULTI-WAVELENGTH RING NETWORKS / WAVELENGTH CONVERSION

PORNCHAI THANAKOMSAKORN : RING SELECTION ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION IN MULTI-WAVELENGTH NETWORK WITH SINGLE LINK FAILURE PROTECTION.

THESIS ADVISOR : LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ, Ph.D. 100 pp. ISBN 974-03-0669-1.

This thesis presents mathematical models for ring selection, routing and wavelength allocation in multi-wavelength multi-ring networks to support traffic demand both in case of normal operation and all single link failure scenarios. For ring selection, routing and wavelength allocation in multi-ring networks, mathematical model formulations based on the Integer Linear Programming (ILP) are used to determine the network costs which are measured in terms of the optimal number of fibers required for supporting a given traffic demand. In this research, multi-ring networks can be classified into two techniques according to the way in which traffic demands are supported. In the first, any traffic between any node pair must be restricted to transmit from a source node to a destination node over only one ring. In the second technique, any traffic between any node pair can be transmitted from a source node into a destination node using more than one ring, i.e. traffic may be transmitted through a number of adjacent rings.

The main objective of this thesis is to analyze and compare the network costs between two multi-ring design techniques. In the design process, various salient design aspects are identified and comprehensively addressed. These include the influence of wavelength conversion and the number of wavelengths multiplexed in a fiber (M) on the system design and performance. Moreover, the cost of the multi-ring and mesh design approaches are compared. In the study, based on our simulation on some sample networks, it is shown that the second technique of multi-ring design can achieve the lower cost than the first one, but its shortcomings lie in the complexity. From the wavelength-converter-effect evaluation, it is revealed that under the failure scenario, the wavelength converter is a necessary device in multi-ring networks for only some values of M . The values of M have effect on the number of fibers and the number of rings which are allocated to networks, i.e. if M value increases, it will make number of fibers and number of rings decreased. In addition, comparing the design costs between the multi-ring and mesh design approaches, it is found that under normal operation, the cost difference is not substantial. On the contrary, under the failure scenario, it appears that multi-ring networks require less than 19 % additional costs in comparison to the mesh network design. However, the multi-ring network is a design approach that offers fast and effective restoration against link failures using relatively simple optical equipment as opposed to the mesh design counterpart. Consequently, the multi-ring network design is considered suitable and effective for practical applications.

Department of Electrical Engineering

Student's signature.....

Field of study Electrical Engineering

Advisor's signature.....

Academic year 2001

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์.....	1
1.2 ความเป็นมาและเหตุผล.....	1
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.4 เป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 ความรู้พื้นฐาน.....	7
2.1 โครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น.....	7
2.2 ประเภทโครงสร้างของโครงข่าย WDM.....	8
2.2.1 โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช (Mesh).....	8
2.2.2 โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน (Ring).....	9
2.2.2.1 ชนิดของโครงข่ายรูปวงแหวน.....	10
2.2.2.2 อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter).....	12
2.2.2.3 วิธีการป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวน.....	13
2.2.2.4 การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองให้กับเส้นทางสำรอง.....	15
2.3 ชนิดของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง (Multi-Ring).....	17
2.4 Integer Linear Programming (ILP).....	19
3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง ที่มีเงื่อนไขการกระจายกราฟฟิกในการออกแบบลักษณะที่ 1.....	21
3.1 กล่าวนำ.....	21
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	22
3.2.1 Optimized spare fiber assignment.....	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2.2 Jointly optimized working and spare fiber assignment.....	29
3.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลเฉลย.....	32
3.3.1 ผลการทดสอบ.....	32
3.3.2 การวิเคราะห์ผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	41
3.3.2.1 การวิเคราะห์ผลเฉลยของวิธี Optimized spare fiber assignment....	41
(ก) จำนวนเส้นใยแก้วที่ใช้ในโครงข่ายแบบหลายวงแหวน.....	41
(ข) ความซับซ้อนและเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	44
3.3.2.2 การวิเคราะห์ผลเฉลยของวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment.....	46
(ก) จำนวนเส้นใยแก้วที่ใช้ในโครงข่ายแบบหลายวงแหวน.....	46
(ข) ความซับซ้อนและเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	50
4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีเงื่อนไขการกระจายทรอปิกในการออกแบบลักษณะที่ 2.....	52
4.1 กล่าวนำ.....	52
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	53
4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection).....	54
4.2.1.1 แบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง (High complexity model).....	54
4.2.1.2 แบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำ (Low complexity model).....	57
4.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากหนึ่งขั้วเชื่อมโยงเสียหาย.....	58
4.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลเฉลย.....	62
4.3.1 ผลของจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพล็กซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงและอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย.....	62
4.3.2 การจัดสรรเส้นทางของโครงข่าย.....	66
4.3.3 ความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	72

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3.3.1	ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปร จำนวน constraint และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 72
4.3.3.2	ผลของขนาดโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปร จำนวน constraint และเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 74
4.3.4	ขนาดของวงแหวนที่มีผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง..... 76
5	เปรียบเทียบต้นทุนสำหรับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง และแบบเมช 79
5.1	กล่าวนำ..... 79
5.2	เปรียบเทียบต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิก 3 รูปแบบ..... 80
5.3	เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและต้นทุนที่ต้องการระหว่างโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช..... 86
5.4	เปรียบเทียบความซับซ้อนของกลไกในการรองรับทราฟฟิกและเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยระหว่างโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายแบบเมช..... 88
6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 93
6.1	บทสรุป..... 93
6.2	ข้อเสนอแนะ..... 97
รายการอ้างอิง 98
ประวัติผู้วิจัย 100

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1	ตัวย่อของแต่ละวิธีการป้องกันโครงข่าย..... 30
ตารางที่ 3.2	พารามิเตอร์และตัวแปรที่จะต้องกำหนดให้และที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 30
ตารางที่ 3.3	จำนวนตัวแปร และจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลองกรณีมีและไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและเป็นกรณีที่กราฟฟิกของคูนิตทุกคูนิตมีค่ามากกว่าศูนย์..... 31
ตารางที่ 3.4	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 4N_3R ต้องการ (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ (ค) กรณีมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ..... 35
ตารางที่ 3.5	จำนวน constraint (Nc) และจำนวนตัวแปร (Nv) ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 4N_3R (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ(ค) กรณีมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ..... 36
ตารางที่ 3.6	เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (Run time) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 4N_3R (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ (ค) กรณีมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ..... 37
ตารางที่ 3.7	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N_7R ต้องการ (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ (ค) กรณีมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ..... 38
ตารางที่ 3.8	จำนวน constraint (Nc) และจำนวนตัวแปร (Nv) ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N_7R (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ (ค) กรณีมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ..... 39
ตารางที่ 3.9	เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (Run time) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N_7R (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ (ค) กรณีมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ..... 40

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 3.10	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่อข่ายเชื่อม โยงหนึ่งข่ายและปริมาณทราฟฟิกที่ถูกรองรับในวงแหวนแต่ละวงที่ค่า M เท่ากับ 1-4.....	41
ตารางที่ 3.11	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่อข่ายเชื่อม โยงหนึ่งข่ายสำหรับ โครงข่ายที่ใช้วิธี JPSF กรณี WC.....	47
ตารางที่ 3.12	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการในกรณี NWC ที่มีการป้องกัน โครงข่ายแบบ Path protection โดยที่อุปกรณ์รับ-ส่งสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นได้.....	49
ตารางที่ 4.1	จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลองกรณีที่มี และไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและเป็นกรณีที่ทราฟฟิกของคู่โหนดทุกคู่มีค่ามากกว่าศูนย์.....	61
ตารางที่ 4.2	ผลของ M และการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่าย (ก) กรณีที่โครงข่ายไม่มีการป้องกันความเสียหาย (No protection) และ(ข) กรณีที่โครงข่ายมีการป้องกัน โครงข่ายจากข่ายเชื่อม โยงหนึ่งเสียหาย.....	63
ตารางที่ 4.3	รายละเอียดของวงแหวน และจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายกรณี NWC ที่ ค่า M=2.....	64
ตารางที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับ จำนวนเส้นทางต่อโหนดของโครงข่ายที่มีและไม่มีการป้องกัน โครงข่ายจากข่ายเชื่อม โยงหนึ่งเสียหาย ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 (ก) กรณี NWC และ (ข) กรณี WC.....	67
ตารางที่ 4.5	เปรียบเทียบค่าระหว่าง Average shortest path of network กับ Average distance per connection ของโครงข่ายขนาดต่างกัน 5 โครงข่าย ที่ค่า M เท่ากับ 1 สำหรับทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มเท่ากับ 1.....	71
ตารางที่ 4.6	ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายกรณี (ก) ไม่มีการป้องกัน โครงข่าย (No protection) และ (ข) มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อม โยงหนึ่งเสียหาย.....	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 4.7	ผลของขนาดของโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	75
ตารางที่ 5.1	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงรวมของโครงข่ายที่ค่า $M=1, 2, 4$ และ 8 สำหรับกรณี (ก) NWC และ (ข) WC.....	81
ตารางที่ 5.2	จำนวนช่องสัญญาณรวมของโครงข่ายที่ค่า $M=1, 2, 4$ และ 8 สำหรับกรณี (ก) NWC และ (ข) WC.....	82
ตารางที่ 5.3	คุณลักษณะการเลือกวงแหวนของโครงข่ายแบบหลายวงแหวนกรณี WC (ก) $M=2$ และ(ข) $M=8$	84

สารบัญรูป

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบการส่งสัญญาณข้อมูล 4 ช่องสัญญาณแบบจุดต่อจุด โดยใช้เทคโนโลยี WDM.....	7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM.....	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโนดในโครงข่าย WDM ที่มีโครงสร้างแบบเมช.....	9
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโนดและ ADM ของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน.....	10
รูปที่ 2.5 การส่งข้อมูลระหว่างคู่โนด A-B ในวงแหวนแบบ Uni-directional.....	11
รูปที่ 2.6 การส่งข้อมูลระหว่างคู่โนด A-B ในวงแหวนแบบ Bi-directional.....	11
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	12
รูปที่ 2.8 การจัดสรรเส้นทางสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection และ Line protection.....	14
รูปที่ 2.9 การรองรับเส้นทางสำรองด้วยความจุที่เหลือบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน.....	16
รูปที่ 2.10 การวางวงแหวนในการออกแบบลักษณะที่ 1.....	17
รูปที่ 2.11 การวางวงแหวนในการออกแบบลักษณะที่ 2.....	18
รูปที่ 2.12 ผลการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นจากการใช้ integer linear programming..	20
รูปที่ 2.13 ผลการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้ linear programming.....	20
รูปที่ 3.1 โครงข่ายและปริมาณทราฟฟิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 4N_3R และ (ข) โครงข่าย 7N_7R.....	33
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้แสดงหลักการของแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง.....	54
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้แสดงหลักการของแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำ.....	57
รูปที่ 4.3 โครงข่าย 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง.....	63
รูปที่ 4.4 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่าย 5N_7L ที่ค่า M=2.....	65
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average distance per connection กับ Number of routes per node pair ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 สำหรับโครงข่าย 5N_7L ที่ไม่มีการป้องกันความเสียหาย.....	68
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Utilization กับ number of routes per node pair ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 สำหรับโครงข่าย 5N_7L ที่ไม่มีการป้องกันความเสียหาย.....	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average distance per connection กับ Number of routes per node pair ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 สำหรับโครงข่าย 5N_7Lที่มีการป้องกันข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย.....	70
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกับการจำกัดขนาดวงแหวนด้วยค่า MRS ของโครงข่ายขนาด 11 โหนด 15 ข่ายเชื่อมโยง.....	77
รูปที่ 5.1 โทโปโลยีและปริมาณกราฟฟิคของโครงข่ายที่ใช้ทดสอบ.....	80
รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายแบบเมช.....	87
รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายแบบเมช..	88
รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงกับโครงสร้างแบบเมช (ก) กรณี WC และ (ข) กรณี NWC.....	91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจัดสรรวงแหวน เส้นทาง และความยาวคลื่น เพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถรองรับความเสียหายที่ง่ายเชื่อมโยงหนึ่งให้กับโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงได้ ทั้งในกรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
2. เปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายในเชิงของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช

1.2 ความเป็นมาและเหตุผล

ในอดีตที่ผ่านมาระบบสื่อสารและโทรคมนาคมต่างๆ จะใช้สายทองแดงหรือเคเบิลแกนร่วมเป็นตัวกลางในการส่งข้อมูลเป็นส่วนใหญ่ ตัวกลางเหล่านี้จะมีการสูญเสียที่ความถี่สูงค่อนข้างมากทำให้ไม่สามารถสื่อสารในระยะทางไกลๆ ได้ ดังนั้นการสื่อสารในระยะทางไกลๆ จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) เป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ระบบสื่อสารที่ช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวคือ ระบบสื่อสารผ่านตัวกลางที่เรียกว่า เส้นใยแก้วนำแสง (optical fiber) ซึ่งเป็นตัวกลางชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการใช้เป็นตัวกลางนำสัญญาณของโครงข่ายความจุสูง

ปัจจุบันระบบโทรคมนาคมและสื่อสารข้อมูลมีปริมาณความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก เช่น ระบบอินเทอร์เน็ต ระบบสื่อสารข้อมูลภาพและเสียง เทคนิคการมัลติเพล็กซ์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาใช้กับโครงข่ายทางแสง (optical network) คือ มัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing : WDM) [1-2] เพื่อเพิ่มความจุในการส่งให้เพียงพอกับความต้องการที่เพิ่มขึ้น เทคนิคดังกล่าวอาศัยหลักการคือ มัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันเข้าด้วยกันแล้วส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียว โดยปกติแล้วความเร็วแต่ละช่องสัญญาณจะอยู่ในระดับ Gbit/s ดังนั้นความเร็วรวมของข้อมูลที่ส่งผ่านในตัวกลางจะสูงถึงระดับ Tbit/s

เนื่องจากในอดีตที่ผ่านมามีงานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การออกแบบโครงข่าย WDM ที่มีโครงสร้างแบบเมช [3-5] เป็นหลักซึ่งเป็นการออกแบบที่ทำให้ทรัพยากรของโครงข่ายอันได้แก่จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพมาก แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการออกแบบด้วยวิธีนี้ คือ การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นมีความซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของการที่อุปกรณ์บางส่วนในโครงข่ายไม่ทำงาน เช่น เส้นใยแก้วนำแสงบางสายเชื่อมโยงถูกตัดขาด อีกทั้งต้องใช้ Optical cross-connect [6] ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดของโครงข่ายซึ่งต้องใช้ซอฟต์แวร์ของระบบที่มีความซับซ้อนในการควบคุม ด้วยเหตุนี้จึงได้มีผู้เสนอแนวทางการออกแบบที่แตกต่างออกไป [7-8] คือ ได้เสนอวิธีการที่อาศัยโครงสร้างของโครงข่ายแบบวงแหวนเป็นพื้นฐานในการออกแบบ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการใช้โครงสร้างแบบวงแหวนเพื่อให้สามารถรองรับความต้องการทราฟฟิกของโครงข่ายแทนโครงข่ายแบบเมชได้

เหตุผลที่ใช้โครงสร้างแบบวงแหวนในการออกแบบมีอยู่หลายประการคือ

1. โครงสร้างของโครงข่ายแบบวงแหวนเป็นโครงสร้างไม่ซับซ้อน ดังนั้นการควบคุมและการจัดการของโครงข่ายจึงทำได้ง่าย
2. มีการจัดสรรเส้นทาง และความยาวคลื่นที่ง่าย เนื่องจากเส้นทางระหว่างโหนดหนึ่งในวงแหวนมี 2 เส้นทาง คือ เส้นทางที่มีทิศทางตามเข็มนาฬิกาและเส้นทางที่มีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นที่สายเชื่อมโยงของโครงข่ายก็สามารถใช้เส้นทางที่เหลือเพื่อรองรับความเสียหายจากทราฟฟิกที่ผ่านสายเชื่อมโยงที่เสียหายได้ ซึ่งวิธีป้องกันโครงข่ายเพื่อข้อมูลที่ผ่านสายเชื่อมโยงที่เสียหายนั้นถูกทำอย่างอัตโนมัติโดยฮาร์ดแวร์สวิตช์ที่มีความเร็ว และความเชื่อถือได้สูง
3. โหนดของโครงข่ายรูปวงแหวนมีระบบฮาร์ดแวร์ที่ทำหน้าที่ Add-drop multiplexer เท่านั้น จึงมีความซับซ้อนน้อยกว่าโครงข่ายแบบเมชที่ใช้ optical-cross connect ที่ต้องอาศัยระบบซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการควบคุม

แต่จากการศึกษาพบว่า การใช้โครงข่ายแบบวงแหวนเดี่ยว 1 วง ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากประสิทธิภาพการใช้ช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายค่อนข้างต่ำ จึงได้มีผู้เสนอการออกแบบโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่น โดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนเดี่ยวหลายๆวง แทนการใช้วงแหวนเดี่ยวเพียง 1 วง ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาวิธีการจัดการโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายๆวงโดยจะจำลองโครงข่ายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้เนื่องจากการแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถให้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดให้ได้ (optimal solution) เช่น การหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุด ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Integer Linear Programming (ILP) ในการหาผลเฉลยสำหรับการจัดสรรวงแหวน เส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายแบบหลายความ

ยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง โดยมีเงื่อนไขที่กำหนด คือ เพื่อให้โครงข่ายสามารถจัดสรรจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุดที่สามารถรองรับความต้องการทางทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่ายได้ทั้งในสภาวะการทำงานปกติและเมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งได้ แต่เป็นที่ทราบกันดีว่า ILP มีความซับซ้อนในการคำนวณเมื่อตัวแปรและ constraint มีจำนวนเพิ่มขึ้น ทำให้ ILP ถูกจำกัดด้วยความเร็วของ CPU ที่ใช้ในการประมวลผล เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่จะต้องใช้เวลาประมวลผลนาน แต่ในปัจจุบันจะเห็นว่า CPU มีการพัฒนาให้มีความเร็วที่สูงขึ้นอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นในอนาคตข้อจำกัดทางด้านเวลาของการใช้ ILP จะน้อยลง ส่งผลให้ ILP สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวได้ดีที่สุดวิธีหนึ่ง ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการพัฒนาและออกแบบไว้ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ๆ ได้ในอนาคต

เนื่องจากสาเหตุของการที่โครงข่ายได้รับความเสียหายมีมากหลายสาเหตุด้วยกันเช่น อาจเกิดจากที่โหนดของโครงข่ายเสียหาย (node failure) หลายๆข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายพร้อมกัน (multiple link failure) หรือข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายได้รับความเสียหาย (single link failure) ซึ่งสังเกตได้ว่า ความเสียหายที่มีสาเหตุจากประการสุดท้ายมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นมากที่สุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาวิธีแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากความเสียหายประการสุดท้ายเท่านั้น

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

- 1.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing: WDM)
- 1.2 ศึกษาวิธีการออกแบบโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบเมช (Mesh)
- 1.3 ศึกษาวิธีการออกแบบโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง
- 1.4 ศึกษาวิธีการป้องกันโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนที่สามารถรองรับความล้มเหลวจากหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย
- 1.5 ศึกษาบทความเกี่ยวกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ [9-11] ในการแก้ปัญหาสำหรับโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่น

2. ศึกษาวิธีการจัดสรรวงแหวน เส้นทาง และ ความยาวคลื่น ในโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง
 - 2.1 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำหรับโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง [12] ให้สามารถรองรับความต้องการทางทราฟฟิกของระบบเมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งทั้งในกรณีที่โครงข่ายมี และไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ โดยมีข้อกำหนดว่า ทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆ ต้องส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางด้วยวงแหวนเพียงวงเดียว
 - 2.2 ทดสอบแบบจำลองในข้อที่ 2.1 เพื่อศึกษาผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นซึ่งมีผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำหรับวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection และ Line protection พร้อมทั้งศึกษาข้อได้เปรียบ และเสียเปรียบของการป้องกันโครงข่ายทั้งสองแบบ
 - 2.3 ออกแบบโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงให้สามารถรองรับความต้องการทางทราฟฟิกของระบบเมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งทั้งในกรณีที่โครงข่ายมี และไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ โดยมีข้อกำหนดว่า ทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆ สามารถส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยใช้วงแหวนมากกว่าหนึ่งวง ซึ่งหมายความว่าทราฟฟิกจะถูกส่งผ่านจากวงแหวนหนึ่งไปยังอีกวงแหวนหนึ่งที่อยู่ติดกันได้
 - 2.4 ทดสอบแบบจำลองในข้อที่ 2.3 เพื่อศึกษาผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นซึ่งมีผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำหรับวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Line protection
 - 2.5 เปรียบเทียบต้นทุนในเชิงของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.3 กับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช [13] และ ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ
3. รวบรวมและสรุปผลการวิจัยทั้งหมดเพื่อเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 เป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย

1. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบเพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำหรับโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงให้สามารถรองรับความต้องการทางทราฟฟิกของระบบเมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งด้วยวิธีการป้องกันโครงข่าย 2 แบบ คือ Path protection และ Line protection ทั้งในกรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ โดยมีข้อกำหนดว่า ทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆต้องส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางด้วยวงแหวนเพียงวงเดียว
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในออกแบบเพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำหรับโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงให้สามารถรองรับความต้องการทางทราฟฟิกของระบบเมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งด้วยวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Line protection ทั้งในกรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ โดยมีข้อกำหนดว่า ทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆสามารถส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยใช้วงแหวนมากกว่าหนึ่งวง ซึ่งหมายความว่าทราฟฟิกจะถูกส่งผ่านจากวงแหวนหนึ่งไปยังอีกวงแหวนหนึ่งที่อยู่ติดกันได้
3. ศึกษาผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในข้อที่ 1 และ 2
4. เปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงทั้ง 2 แบบในข้อที่ 1 และ 2 กับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช เพื่อศึกษาความแตกต่างของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายที่มีโครงสร้างและเทคนิคการป้องกันโครงข่ายที่ต่างกัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบโครงข่ายเพื่อจัดสรรทรัพยากรให้มีต้นทุนต่ำที่สุดโดยใช้โครงข่ายที่ไม่ซับซ้อนและสามารถป้องกันทราฟฟิกภายในโครงข่ายจากผลกระทบที่เกิดจากความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งได้อย่างรวดเร็วและมีความแน่นอนสูง
2. ทำให้ทราบถึงประโยชน์ที่ได้รับจากอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
3. ทำให้ทราบถึงผลดีและผลเสียของวิธีการป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวนแบบต่างๆแต่ละวิธีเพื่อสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาออกแบบโครงข่ายได้อย่างเหมาะสม
4. ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของการหาผลตอบโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



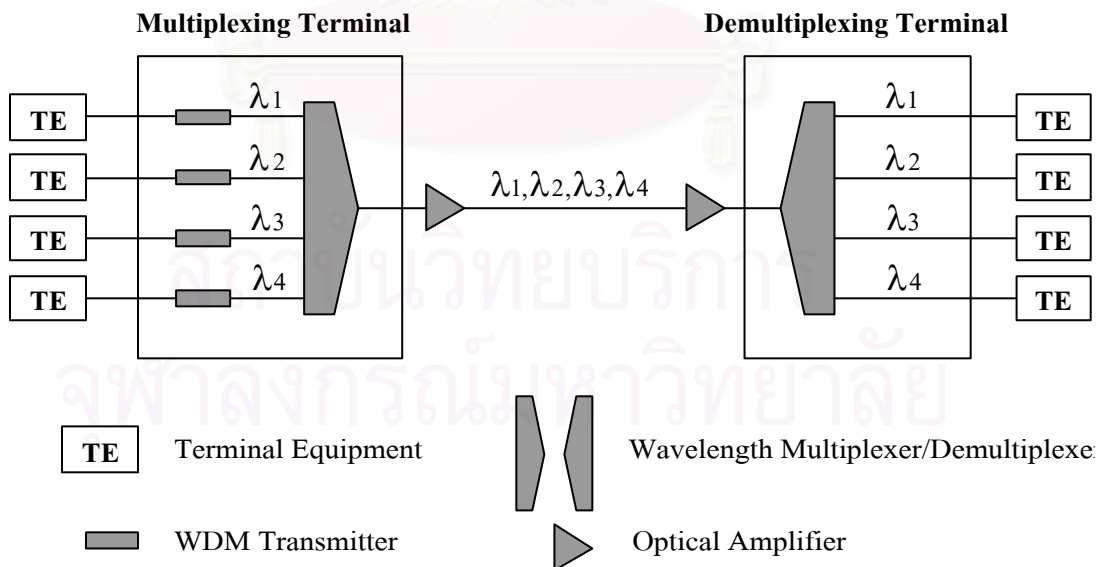
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

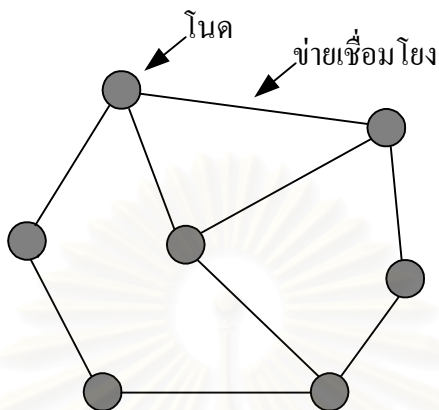
2.1 โครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing : WDM) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งข้อมูลด้วยแสง โดยใช้การรวมสัญญาณข้อมูลหลายสายข้อมูล (data stream) เข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น โดยแต่ละสายข้อมูลจะมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไป การรวมข้อมูลที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงจะใช้ตัวมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น (wavelength multiplexer) และการแยกสัญญาณข้อมูลกลับคืนมาจะใช้ตัวดีมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น (wavelength demultiplexer) เทคโนโลยี WDM มีประโยชน์อย่างมากในการสื่อสารระยะไกล เนื่องจากการเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงจะช่วยเพิ่มความจุให้กับโครงข่ายอย่างมากโดยไม่ต้องวางเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากสิ้นเปลืองเวลาและงบประมาณ รูปที่ 2.1 เป็นตัวอย่างการใช้เทคโนโลยี WDM ในการส่งสัญญาณข้อมูล 4 ช่องสัญญาณแบบจุดต่อจุด



รูปที่ 2.1 ระบบการส่งสัญญาณข้อมูล 4 ช่องสัญญาณแบบจุดต่อจุด โดยใช้เทคโนโลยี WDM

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM ที่แสดงในรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยโนด (node) จำนวนหนึ่งซึ่งทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลกับโนดอื่นๆภายในโครงข่าย โดยการรับและส่งข้อมูลจะถูกกระทำผ่านข่ายเชื่อมโยง (link) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการวางเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM

โดยลักษณะโครงสร้างของโนดที่ใช้ในโครงข่าย WDM นั้นขึ้นอยู่กับว่าโครงข่ายนั้นมีวิธีการจัดการโครงข่ายด้วยโครงสร้างแบบใด เช่น โครงสร้างแบบเมชหรือแบบวงแหวน ซึ่งการจัดการโครงข่ายที่มีโครงสร้างทั้ง 2 แบบดังกล่าวจะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น โนดที่มีลักษณะแตกต่างกันไปซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2.2 ประเภทโครงสร้างของโครงข่าย WDM

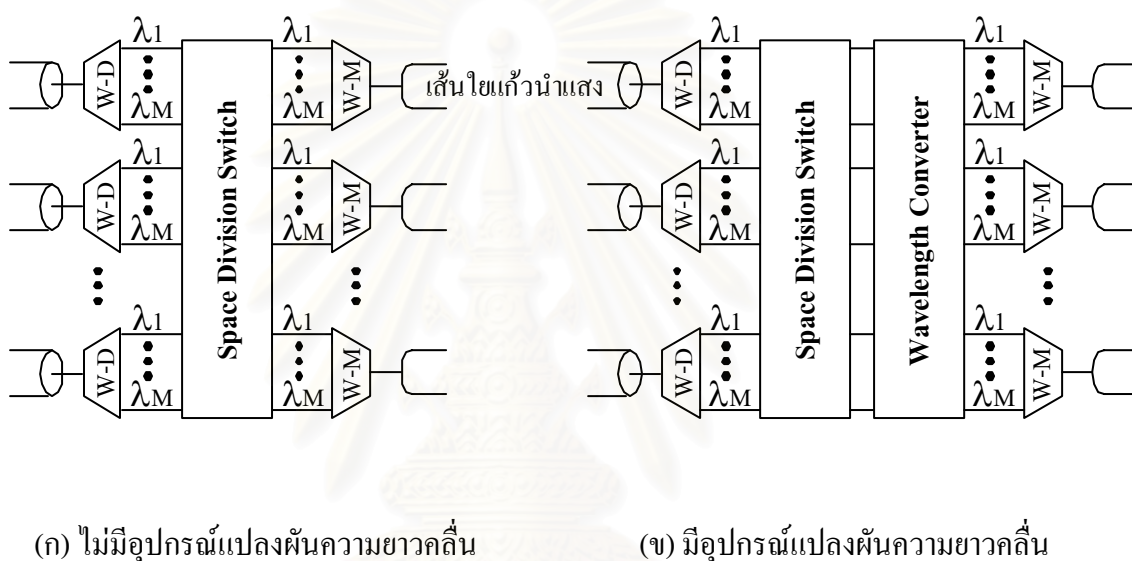
โครงสร้างของโครงข่าย WDM สามารถแบ่งตามลักษณะการจัดการโครงข่ายได้ 2 ประเภท คือ โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช (Mesh) และโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน (Ring)

2.2.1 โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช (Mesh)

โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมชนั้นเส้นทางที่ใช้ในการจัดสรรให้กับแต่ละคู่โนดของโครงข่ายจะมีหลายเส้นทาง ดังนั้นโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมชจึงมีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรความยาวคลื่นและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายสูง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นกับโครงข่ายการจัดสรรเส้นทางสำรองให้กับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบนั้นจะมีได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับตำแหน่งความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเส้นทางที่รองรับทราฟฟิก ตัวอย่างเช่น วิธีบนพื้นฐานของข่ายเชื่อมโยงเดี่ยว (Single Link Basis Approach : SLB) หรือ วิธีต้นทุนต่ำสุด (Minimal Cost Approach : MC) ใน [13] เส้นทางที่รองรับทราฟฟิกเมื่อเกิดความเสียหายในตำแหน่งของข่ายเชื่อมโยงที่ต่างกันก็จะมีเส้นทางสำรองที่ใช้รองรับความเสียหายที่

ต่างกันด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่โนดของโครงข่ายจะต้องมีความซับซ้อนและความสามารถในการควบคุมสูง

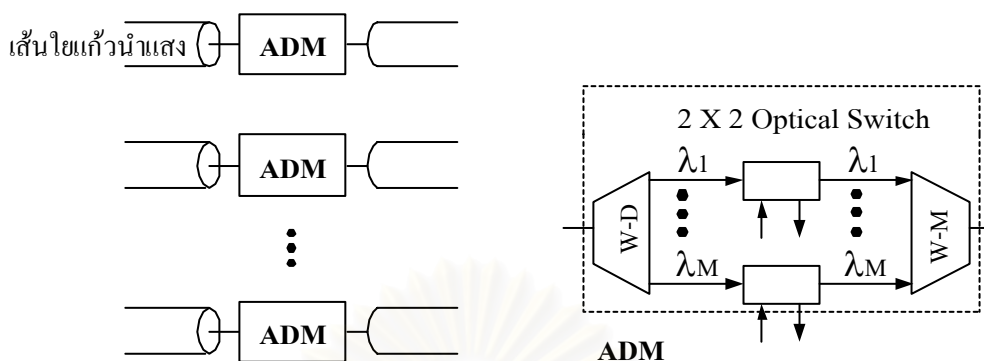
รูปที่ 2.3 (ก) แสดงโครงสร้างของโนดที่ใช้ในโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมชที่เรียกว่า Optical Cross-connect (OXC) [6] ซึ่งประกอบด้วยตัวมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น (W-M), ตัวดีมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น (W-D) และสวิตช์แบบแบ่งเส้นทาง (Space Division Switch) โดยที่โนดอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter) เพิ่มเติมเพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของช่องสัญญาณที่วิ่งผ่าน โนด ดังในรูปที่ 2.3 (ข)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโนดในโครงข่าย WDM ที่มีโครงสร้างแบบเมช

2.2.2 โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน (Ring)

โครงสร้างแบบวงแหวนนั้นเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและเป็นระเบียบชัดเจนเนื่องจากเส้นทางของคู่โนดภายในวงแหวนมีเพียง 2 เส้นทางคือ เส้นทางที่มีทิศทางตามเข็มนาฬิกาและเส้นทางที่มีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายก็จะใช้เส้นทางที่เหลือเพื่อรองรับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบได้ทันทีด้วยสวิตช์ที่มีความเร็วสูงทำให้สามารถกู้ข้อมูลได้รวดเร็วจึงเกิดการสูญเสียข้อมูลน้อยที่สุด อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายแบบวงแหวนเป็นเพียง Add-Drop Multiplexer: ADM ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) ซึ่งจะเห็นว่าโครงสร้างของ ADM ที่แสดงในรูปที่ 2.4 (ข) จะประกอบด้วยทางเข้าและออกของเส้นใยแก้วนำแสงและจะใช้สวิตช์แสงที่มีขนาด 2×2 (2×2 optical switch) ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าโครงสร้างโนดของโครงข่ายแบบเมชที่แสดงในรูปที่ 2.3



(ก) โครงสร้างโหนดของโครงข่ายรูปวงแหวน

(ข) โครงสร้างของ ADM

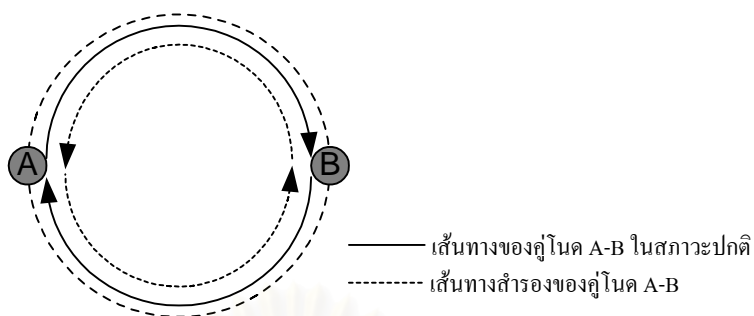
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโหนดและ ADM ของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน

2.2.2.1 ชนิดของโครงข่ายรูปวงแหวน

โครงข่ายรูปวงแหวนที่ใช้ในการออกแบบแบ่งออกเป็น 2 ชนิด [14] คือ

1. วงแหวนแบบ Uni-directional

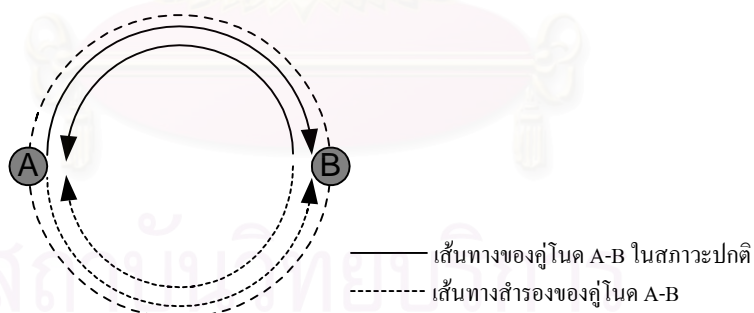
ในวงแหวนชนิดนี้ ข้อมูลขาไปและขากลับของแต่ละโหนดในวงแหวนจะถูกส่งในทิศทางเดียวกันตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาอย่างใดอย่างหนึ่ง จากรูปที่ 2.5 เป็นการส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนด A-B ซึ่งมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นโครงข่ายจะใช้เส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวเพื่อรองรับการเชื่อมโยงของข้อมูลทั้งขาไปและขากลับระหว่างคู่โหนด และเมื่อมีความเสียหายที่ขาเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายเกิดขึ้นจะต้องเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงสำรองอีกชุดหนึ่งเพื่อรองรับความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยทิศทางการส่งข้อมูลในเส้นใยแก้วนำแสงสำรองจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของข้อมูลในสถานะปกติ นั่นคือมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จะเห็นว่าวงแหวนแบบนี้จะไม่มี การจัดสรรเส้นทางเนื่องจากต้องใช้เส้นทางทั้ง 2 เส้นทางเพื่อรองรับข้อมูลทั้งขาไปและกลับ



รูปที่ 2.5 การส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนด A-B ในวงแหวนแบบ Uni-directional

2. วงแหวนแบบ Bi-directional

ในวงแหวนชนิดนี้ข้อมูลขาไปและขากลับของแต่ละโหนดในวงแหวนจะใช้เส้นทางเดียวกันแต่มีทิศทางการส่งตรงกันข้ามกัน โดยรูปที่ 2.6 แสดงการส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนด A-B วงแหวนจะต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้นเพื่อรองรับข้อมูลขาไปและขากลับ เมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งก็จะใช้เส้นทางตรงกันข้ามกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเพื่อรองรับข้อมูลขาไปและขากลับที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายดังกล่าว โดยมีเทคนิคการป้องกันโครงข่ายอยู่ 2 วิธี คือ Path protection และ Line protection ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อวิธีการป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวน



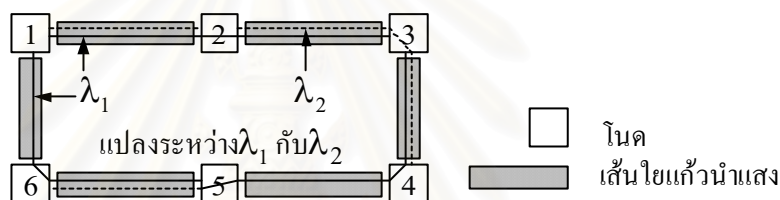
รูปที่ 2.6 การส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนด A-B ในวงแหวนแบบ Bi-directional

วิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงแหวนแบบ Bi-directional ในการออกแบบ เนื่องจากข้อมูลขาไปและขากลับของแต่ละโหนดสามารถเลือกเส้นทางได้ 2 เส้นทาง ดังนั้นคู่โหนดต่างๆจึงอาจเลือกใช้เส้นทางใดก็ได้ ในทางปฏิบัติการออกแบบจะเลือกเส้นทางที่ทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงรวมที่ต้องการในวงแหวนต่ำที่สุด

ก่อนที่จะกล่าวถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนจะขอกล่าวถึงอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นซึ่งมีผลต่อการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นดังกล่าว

2.2.2.2 อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter)

โดยปกติแล้วการส่งสัญญาณแสงจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางจะใช้ความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวตลอดทั้งเส้นทางทำให้โหนดที่จะเกิดการกวนกันของความยาวคลื่นค่าเดียวกัน (Wavelength blocking) มีสูงทำให้ต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นในข่ายเชื่อมโยงที่มีการใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกัน ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาเรื่องนี้จึงนำอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น [15] มาเสริมขีดความสามารถของโหนด ทำให้โหนดสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นของสัญญาณที่เข้ามาให้เป็นความยาวคลื่นใหม่สำหรับส่งไปยังปลายทางได้ อุปกรณ์นี้จึงช่วยทำให้ปัญหาการจัดสรรความยาวคลื่นหมดไปเพราะไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการใช้ความยาวคลื่นเดียวตลอดเส้นทางอีกต่อไป



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เพื่อให้เห็นถึงประโยชน์ของอุปกรณ์ชิ้นนี้จึงขอยกตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.7 สมมุติว่าต้องการสร้างช่องสัญญาณเพิ่มระหว่างคู่โหนด (3,6) จะเห็นว่าไม่สามารถใช้ค่าความยาวคลื่น λ_1 หรือ λ_2 ได้เลย ดังนั้นจึงต้องเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นขึ้นอีก 1 ค่าความยาวคลื่น คือ λ_3 รวมเป็น 3 ค่าความยาวคลื่นหรือต้องเพิ่มจำนวนใยแก้วนำแสงในกรณีที่ต้องการใช้ความยาวคลื่นเดิมเพียง 2 ค่า แต่ถ้ามีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะสามารถใช้เส้นทาง 3-4-5-6 โดยมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่โหนด 5 ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้จำนวนความยาวคลื่นหรือเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มเพื่อรองรับการสร้างช่องสัญญาณระหว่างคู่โหนด (3,6)

ตัวอย่างดังกล่าวเป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งที่แสดงถึงประโยชน์ของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ช่วยลดจำนวนความยาวคลื่นหรือจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลงได้ แต่อุปกรณ์ดังกล่าวอาจไม่เป็นประโยชน์กับปริมาณทราฟฟิกรูปแบบอื่นเสมอไป ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงต่อไป

2.2.2.3 วิธีการป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวน

โครงข่ายที่มีการคำนึงถึงการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งที่ได้รับ ความเสียหาย นั้น เมื่อโครงข่ายอยู่ในสถานะการทำงานปกติกราฟฟิกที่ส่งจาก โหนดต้นทางไปยัง โหนดปลายทางจะ ถูกรองรับด้วยเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน (working fiber) และเมื่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งได้รับความเสียหายกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจะเปลี่ยนไปใช้เส้นทางสำรองที่รองรับด้วยเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง (spare fiber) ดังนั้นการป้องกันโครงข่ายจึงหมายถึง การจัดสรรวิธีสำรองเพื่อรองรับกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ซึ่งการจัดสรรวิธีสำรองนั้นจะต้องจัดสรรทั้งเส้นทางสำรอง และความยาวคลื่นสำรองซึ่งการป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวนแบบ Bi-directional แบ่งได้เป็น 2 วิธีที่แตกต่างกันตรงเส้นทางที่จัดสรรให้กับวิธีสำรองสำหรับกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบเมื่อมีข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย [16] คือ

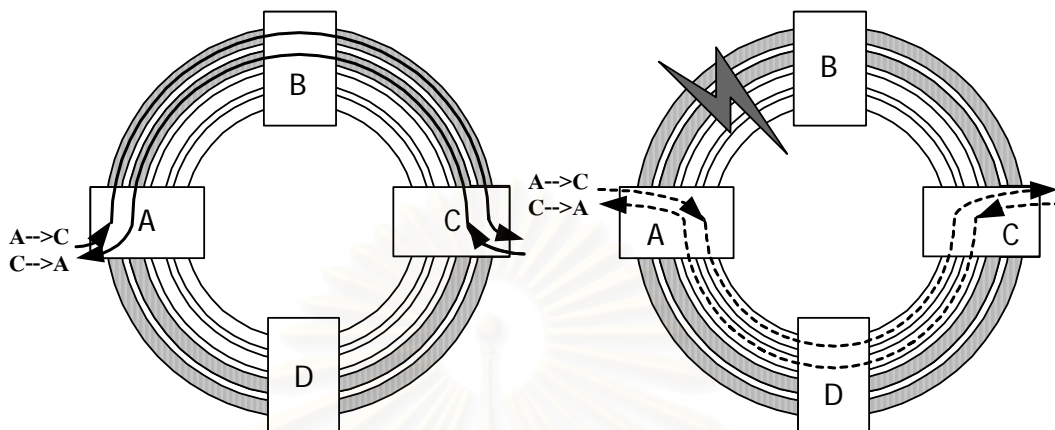
1. การจัดสรรเส้นทางสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection

เมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่าย กราฟฟิกของคู่โหนดแต่ละคู่โหนดที่ถูกรบกวนบนข่ายเชื่อมโยงนั้นจะถูกจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งหมดจาก โหนดต้นทางไปยัง โหนดปลายทาง แต่เนื่องจากเส้นทางที่เป็นไปได้ระหว่างคู่โหนดหนึ่งๆในวงแหวนมีเพียง 2 เส้นทาง ดังนั้นเส้นทางที่จัดสรรให้ใหม่จึงอยู่ตรงกันข้ามกับเส้นทางเดิมเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข)

2. การจัดสรรเส้นทางสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Line protection

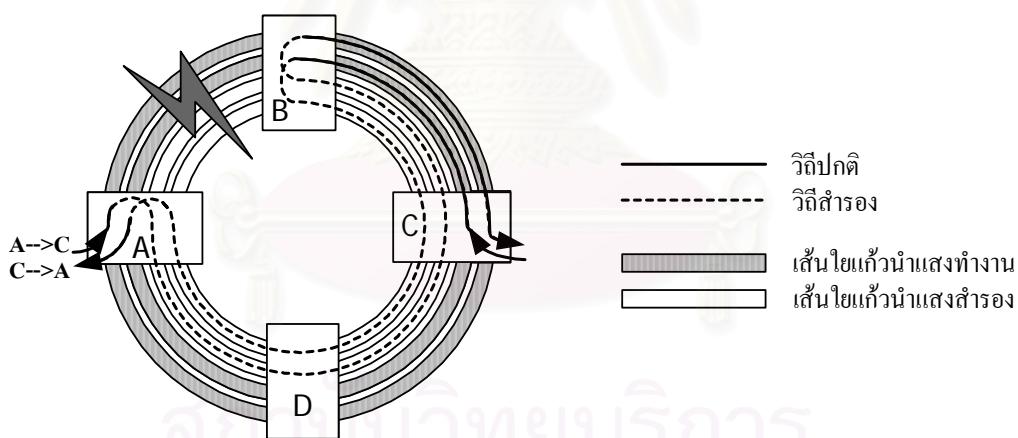
เมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่าย กราฟฟิกที่ถูกรบกวนบนข่ายเชื่อมโยงนั้นจะถูกจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงเฉพาะข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเท่านั้น ดังนั้นสัญญาณจะเดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานจาก โหนดต้นทางมายัง โหนดที่อยู่ติดกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายซึ่งจะทำหน้าที่วนสัญญาณกลับ (Loop back) ไปในทิศทางตรงกันข้ามบนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองจนกระทั่งเมื่อสัญญาณส่งมาถึง โหนดที่อยู่ติดกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายอีกด้านหนึ่งก็จะถูกวนกลับอีกครั้งจากเส้นใยแก้วนำแสงสำรองกลับไปยังเส้นใยแก้วนำแสงทำงานดังเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ค)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) สถานะการทำงานปกติ

(ข) Path protection



(ค) Line protection

รูปที่ 2.8 การจัดสรรเส้นทางสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection และ Line protection

2.2.2.4 การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองให้กับเส้นทางสำรอง

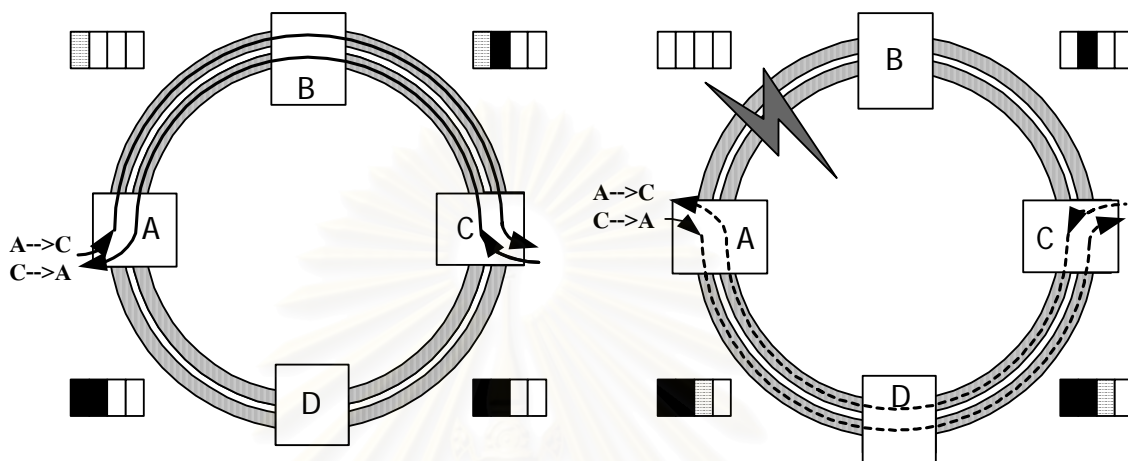
การจัดสรรเส้นทางสำรองด้วยวิธีการป้องกันโครงข่ายทั้ง 2 วิธีคือ Path protection และ Line protection เส้นทางสำรองเหล่านั้นถูกจัดสรรความยาวคลื่นได้ 2 แบบ ซึ่งแบ่งตามเส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นแหล่งของความยาวคลื่นสำรอง คือ

1. การรองรับเส้นทางสำรองด้วยเส้นใยแก้วนำแสงสำรองอีกชุดหนึ่งต่างหาก (Share Fiber) [16-17]

วิธีนี้เส้นทางสำรองถูกรองรับด้วยเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งวางเพิ่มเพื่อใช้เป็นเส้นใยแก้วนำแสงสำรองโดยเฉพาะ โดยไม่เกี่ยวข้องกับเส้นใยแก้วนำแสงทำงานที่วางอยู่แล้วเลย วิธีรองรับเส้นทางสำรองดังกล่าวแสดงได้ดังในรูปที่ 2.8

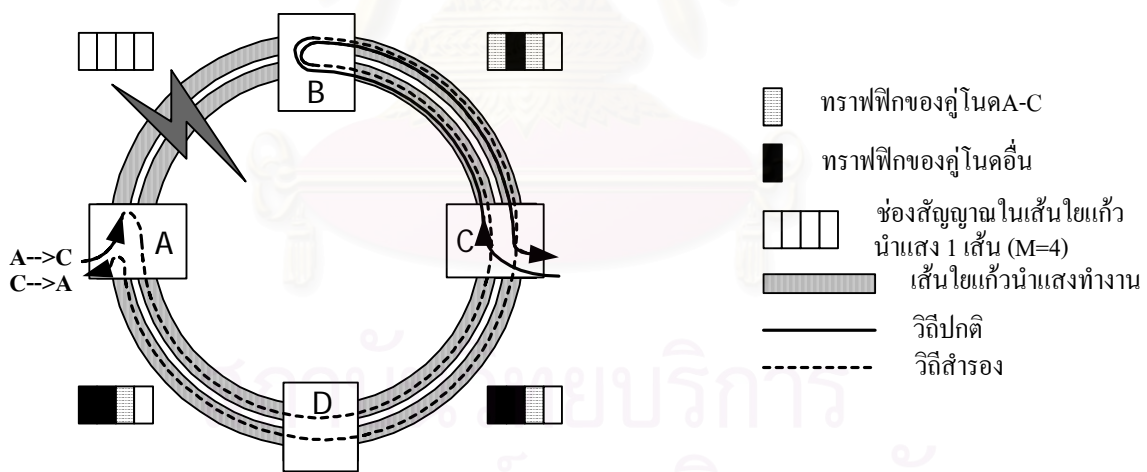
2. การรองรับเส้นทางสำรองด้วยความจุที่เหลือบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน (Share Wavelength) [16-17]

วิธีนี้เส้นทางสำรองจะถูกรองรับด้วยความจุหรือความยาวคลื่นที่เหลืออยู่ในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน ทั้งนี้เนื่องจากวงแหวนบางวงที่รองรับทราฟฟิกจะมีการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรไม่ถึง 100 % ก็จะมี ความจุเหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานบางเส้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถผลิตเพลกซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสง (M) สูงๆ จึงทำให้มีความจุที่เหลือจากการใช้งานซึ่งสามารถนำไปใช้รองรับเส้นทางสำรองได้ และถ้าความจุสำรองที่เหลือนี้ไม่เพียงพอก็จะใช้เส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพื่อรองรับเส้นทางสำรองที่เหลือ ดังนั้นเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในวิธีนี้จะน้อยกว่าวิธีแรก รูปที่ 2.9 แสดงการรองรับเส้นทางสำรองด้วยความจุที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน โดยให้ทราฟฟิกของคู่โหนด A-C ใช้เส้นทาง A-B-C และเกิดความเสียหายที่ขั้วเชื่อมโยง A-B หากใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางด้วยวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection ทราฟฟิก จาก A ไป C จะเปลี่ยนไปใช้เส้นทางตรงข้ามคือ A-D-C บนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานที่มีความจุเหลืออยู่ ส่วนการจัดสรรเส้นทางสำรองด้วยวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Line protection ทราฟฟิกเฉพาะในขั้วเชื่อมโยงที่เสียหายจะถูกวนสัญญาณกลับ (Loop back) ไปใช้ความจุสำรองที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน สังเกตว่าวิธีนี้ ทราฟฟิกส่วนที่อยู่ในขั้วเชื่อมโยงอื่นที่ไม่ถูกรบกวนจะยังคงถูกส่งไปบนความจุค่าเดิมตามปกติโดยไม่ต้องจัดสรรความจุสำรองให้กับทราฟฟิกในส่วนนี้ ในตัวอย่างนี้จะเห็นว่า การใช้ค่า M ตั้งแต่ 4 ขึ้นไปจะทำให้มีช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานเหลือมากพอสำหรับความจุสำรอง ดังนั้นจึงไม่ต้องเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเข้าไปในโครงข่ายอีก



(ก) สถานะการทำงานปกติ

(ข) Path protection

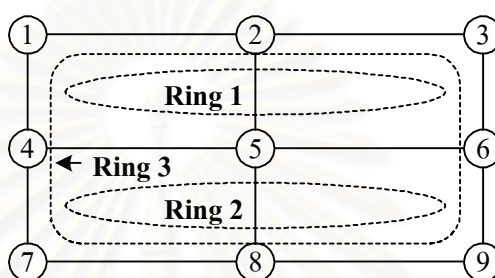


(ค) Line protection

รูปที่ 2.9 การรองรับเส้นทางสำรองด้วยความจุที่เหลือบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน

2.3 ชนิดของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง (Multi-Ring)

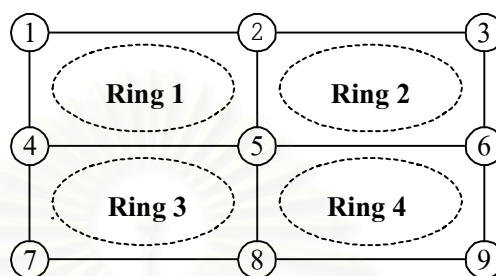
จากการศึกษาพบว่า การใช้โครงข่ายแบบวงแหวนเดี่ยว 1 วง ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากจะทำให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายค่อนข้างต่ำ จึงได้มีผู้เสนอการออกแบบโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่น โดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนเดี่ยวหลายๆวงแทนการใช้วงแหวนเดี่ยวเพียง 1 วง ในการออกแบบนี้แบ่งเป็น 2 ลักษณะ ตามลักษณะการกระจายทราฟฟิกให้กับวงแหวนเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการของโครงข่ายดังรูปที่ 2.10 และ 2.11



รูปที่ 2.10 การวางวงแหวนในการออกแบบลักษณะที่ 1

ในการออกแบบลักษณะที่ 1 แต่ละทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆ ต้องรองรับโดยวงแหวนเพียงหนึ่งวงเท่านั้น นั่นคือ ในระหว่างที่ส่งสัญญาณจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางจะไม่ยอมให้สัญญาณนั้นข้ามไปยังวงแหวนอื่นได้ จากตัวอย่างการวางวงแหวนในลักษณะที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าวงแหวน 3 วงจะถูกเลือกเพื่อให้ปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดสามารถรองรับได้ด้วยวงแหวนเพียงวงเดียว และจะเห็นว่ากรวางวงแหวนในลักษณะนี้ต้องมีวงแหวนขนาดใหญ่รวมอยู่ด้วยเพื่อให้ ทราฟฟิกของคู่โหนดที่อยู่ไกลกันสามารถรองรับได้ด้วยวงแหวนเพียงวงเดียว โดยข้อกำหนดเพิ่มเติมของการออกแบบลักษณะที่ 1 มีอยู่ 2 แบบ คือ แบบแรกทราฟฟิกทั้งหมดของแต่ละคู่โหนดสามารถรองรับด้วยวงแหวนที่ครอบคลุมคู่โหนดนั้นๆ ได้เพียงวงเดียว ตัวอย่างเช่น รูปที่ 2.10 สมมติว่าปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนด (1,6) เท่ากับ 5 ช่องสัญญาณ มีวงแหวนที่ครอบคลุมคู่โหนดอยู่ 2 วง คือ วงที่ 1 และ 3 ช่องสัญญาณทั้งหมดสามารถแบ่งให้รองรับได้โดยวงใดวงหนึ่งเท่านั้นคือ วงที่ 1 หรือวงที่ 3 ส่วนแบบที่สองทราฟฟิกทั้งหมดของแต่ละคู่โหนดสามารถแบ่งให้รองรับด้วยวงแหวนที่ครอบคลุมคู่โหนดนั้นๆ ได้มากกว่า 1 วง ตัวอย่างเช่น รูปที่ 2.10 สมมติว่าปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนด (1,6) เท่ากับ 5 ช่องสัญญาณ มีวงแหวนที่ครอบคลุมคู่โหนดอยู่ 2 วง คือ วงที่ 1 และวงที่ 3 ช่องสัญญาณทั้งหมดสามารถแบ่งให้รองรับโดยวงที่ 1 จำนวน 3 ช่องสัญญาณ และวงที่ 3 จำนวน 2 ช่องสัญญาณเป็นต้น จากข้อกำหนดที่กล่าวมาทั้ง 2 แบบจะเห็นว่าแบบที่สองมีความยืดหยุ่นในการกระจายทราฟฟิกมากกว่าแบบแรก ดังนั้นการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบ

ที่สองเนื่องจากข้อกำหนดในลักษณะนี้จะสามารถออกแบบโครงข่ายดังกล่าวให้มีต้นทุนที่ต่ำได้ โดยเทคนิคการป้องกันโครงข่ายของการออกแบบในลักษณะที่ 1 นี้จะใช้การป้องกันทั้ง 2 วิธี คือ Path protection และ Line protection ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละโหนดของโครงข่ายในลักษณะนี้จะใช้เพียง add-drop Multiplexer เนื่องจากแต่ละทรานซิปของแต่ละคู่โหนดขึ้นอยู่กับวงแหวนวงใดวงหนึ่งเท่านั้น



รูปที่ 2.11 การวางวงแหวนในการออกแบบลักษณะที่ 2

ในการออกแบบลักษณะที่ 2 แต่ละทรานซิประหว่างคู่โหนดใดๆ สามารถรองรับได้โดยวงแหวนมากกว่า 1 วง นั่นคือ สัญญาณที่เดินทางจากต้นทางไปยังปลายทางสามารถเดินทางข้ามวงแหวนที่อยู่ติดกันได้ จากตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าวงแหวนที่เลือกจะเป็นเพียงวงแหวนขนาดเล็กเพียง 4 วง การวางวงแหวนในลักษณะนี้มีข้อจำกัดน้อยกว่าการวางวงแหวนในการออกแบบลักษณะที่ 1 นั่นคือไม่จำเป็นต้องเลือกวงแหวนขนาดใหญ่ เนื่องจากต้องการให้มีวงแหวนผ่านทุกโหนดเท่านั้นก็จะทำให้สามารถรองรับปริมาณทรานซิปของทุกๆ โหนดได้ ตัวอย่างเช่น รูปที่ 2.11 ต้องการส่งสัญญาณจากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 9 จะต้องใช้วงแหวนมากกว่า 1 วง นั่นคืออาจใช้วงแหวนที่ 1 และ 4 โดยมีการข้ามวงที่โหนดที่ 5 ส่วนในกรณีการออกแบบลักษณะที่ 1 (รูปที่ 2.10) จะใช้เพียงวงแหวนที่ 3 ในการรองรับปริมาณทรานซิป ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละโหนดของโครงข่ายในลักษณะนี้จะใช้ add-drop Multiplexer ส่วนโหนดที่มีการส่งผ่านสัญญาณจากวงแหวนหนึ่งไปยังอีกวงแหวนหนึ่งนั้นจะต้องมีสวิตช์เพื่อใช้ในการเปลี่ยนวงแหวนที่ใช้ส่งผ่านสัญญาณ โดยเทคนิคการป้องกันโครงข่ายของการออกแบบในลักษณะที่ 2 นี้จะใช้วิธีการป้องกันแบบ Line protection ดังนั้นเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นที่ส่วนหนึ่งส่วนใดของช่องสัญญาณก็จะทำการวนสัญญาณกลับภายในวงแหวนที่เป็นผู้ควบคุมช่องสัญญาณในส่วนดังกล่าว

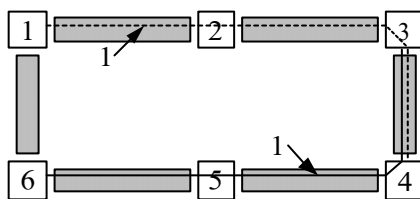
วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาการออกแบบทั้ง 2 ลักษณะตามที่ได้กล่าวมา โดยจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจัดสรรวงแหวน เส้นทางและความยาวคลื่น เพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำสุดที่ใช้ในโครงข่าย โดยการออกแบบในลักษณะที่ 1 จะทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [12] ให้สามารถรองรับความเสียหายจากขั้วเชื่อมโยงหนึ่งได้ ส่วนการออกแบบใน

ลักษณะที่ 2 จะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถรองรับความเสียหายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งได้ ซึ่งหัวข้อถัดไปจะได้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบ

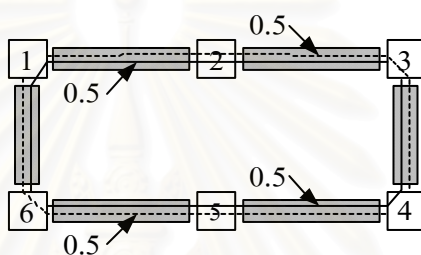
2.4 Integer Linear Programming (ILP)

การออกแบบโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงตามที่ได้อธิบายมานั้นวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การออกแบบโดยการแปลงปัญหาการจัดสรรวงแหวนเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Integer Linear Programming (ILP) ซึ่งเป็นชุดสมการเชิงเส้น โดยค่าของพารามิเตอร์และตัวแปรทุกตัวต้องเป็นจำนวนเต็มหรือศูนย์ โดยมี objective function ที่ใช้หาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่น้อยที่สุดที่สามารถรองรับความต้องการทางทราฟฟิกของโครงข่ายได้

เนื่องจากการออกแบบวิธีการจัดสรรวงแหวน เส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จำนวนความยาวคลื่น และจำนวนช่องสัญญาณ ฯลฯ ล้วนแล้วแต่เป็นพารามิเตอร์ที่มีค่าเป็นจำนวนเต็มทั้งสิ้น ดังนั้นการใช้ ILP จะเหมาะสมกับปัญหามากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ linear Programming (LP) เนื่องจาก LP ค่าของพารามิเตอร์ซึ่งได้แก่ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จำนวนความยาวคลื่นและจำนวนช่องสัญญาณมีค่าเป็นทศนิยมได้ เมื่อค่าทศนิยมดังกล่าวรวมกันเป็นจำนวนเต็มได้พอดีจะทำให้ผลเฉลยที่ได้ไม่ใช่ผลเฉลยที่ถูกต้อง ยกตัวอย่างเช่นการสร้างช่องสัญญาณเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกระหว่างคู่โหนด (1,4) และ (3,6) ซึ่งต้องการทราฟฟิกคู่ละ 1 การต่อ ถ้าใช้ ILP จะต้องใช้ความยาวคลื่นทั้งสิ้น 2 ความยาวคลื่นซึ่งเป็นผลเฉลยที่ถูกต้องดังรูปที่ 2.12 แต่ถ้าใช้ LP สำหรับคู่โหนดแต่ละคู่อาจจะทำให้เกิดการสร้างช่องสัญญาณบนเส้นทางทั้งสองเส้นทางละ 0.5 ช่องสัญญาณ (ระหว่างโหนดในวงแหวนจะมีเส้นทาง 2 เส้นทางให้เลือกใช้) เป็นผลทำให้ใช้ความยาวคลื่นเพียง 1 ความยาวคลื่นเท่านั้นซึ่งเป็นผลเฉลยที่ไม่ถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 ผลการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นจากการใช้ integer linear programming



รูปที่ 2.13 ผลการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้ linear programming

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง ที่มีเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิกในการออกแบบลักษณะที่ 1

3.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง ซึ่งไม่ได้มีการคำนึงถึงการป้องกันโครงข่ายจากความเสียหายใดๆใน [12] ให้สามารถป้องกันโครงข่ายจากเหตุการณ์ใดๆ เหตุการณ์ที่ขั้วเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายได้ โดยใช้วิธีการป้องกันโครงข่าย 2 วิธีด้วยกันคือ Path protection และ Line protection ที่มีการสำรองความจุ 2 แบบคือ Share Fiber และ Share Wavelength วัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลอง คือ เพื่อจัดสรรวงแหวน เส้นทาง และความยาวคลื่นให้โครงข่ายสามารถใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับความเสียหายที่ขั้วเชื่อมโยงหนึ่งให้กับโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงได้ โดยแบบจำลองดังกล่าว จะใช้เงื่อนไขการกระจายทราฟฟิกสำหรับการออกแบบในลักษณะที่ 1 ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 คือ ทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆ ต้องส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยใช้วงแหวนเพียงหนึ่งวงเท่านั้น โดยที่ทราฟฟิกทั้งหมดของคู่โหนดแต่ละคู่สามารถแบ่งให้รองรับด้วยวงแหวนที่ครอบคลุมคู่โหนดนั้นได้มากกว่าหนึ่งวง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น 2 แบบด้วยกันคือ Optimized spare fiber assignment และ Jointly optimized working and spare fiber assignment ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป โดยแบบจำลองแต่ละแบบจะทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความซับซ้อนทางด้านเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลองซึ่งการวิเคราะห์ความซับซ้อนทางด้านเวลาและผลเฉลยนั้นสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณีด้วยกัน คือ กรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และ กรณีที่โครงข่ายมีวิธีการป้องกันและการสำรองความจุที่แตกต่างกัน และสุดท้ายจะทำการเปรียบเทียบความซับซ้อนทางด้านเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยและผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่ทำการพัฒนาขึ้นทั้ง 2 แบบดังกล่าว

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในกระบวนการหาผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาขั้นตอนการออกแบบโครงข่าย 4 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

1. เลือกโครงข่ายรูปวงแหวนจากวงแหวนทั้งหมดที่เป็นไปได้มาจำนวนหนึ่ง เซตของวงแหวนที่ได้รับการเลือกตั้งกล่าวจะต้องสามารถรองรับทราฟฟิกของคู่โหนดทุกคู่ตามเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิกที่กำหนดได้ นั่นคือ ทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆต้องส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยใช้วงแหวนเพียงหนึ่งวงเท่านั้น
2. จัดสรรปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดแต่ละคู่บนเซตของวงแหวนที่ได้จากข้อ 1 โดยที่ ทราฟฟิกทั้งหมดของคู่โหนดแต่ละคู่สามารถแบ่งให้รองรับด้วยวงแหวนที่ครอบคลุมคู่โหนดนั้นได้อย่างน้อยหนึ่งวง
3. จัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่เหมาะสมให้กับทราฟฟิกที่ถูกรองรับโดยวงแหวนแต่ละวงในสภาวะการทำงานปกติของโครงข่าย เพื่อหาผลเฉลยของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานที่น้อยที่สุดที่สามารถรองรับทราฟฟิกดังกล่าวได้
4. พิจารณาเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดสำหรับกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายในวงแหวนแต่ละวงและทำการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นใหม่ให้กับทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายนั้นๆอย่างเหมาะสมเพื่อหาผลเฉลยของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดที่สามารถรองรับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ทุกๆ เหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายได้

เนื่องจากบทนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้สามารถป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายได้ ซึ่งเราได้ทำการแบ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการพัฒนาออกเป็น 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. วิธี Optimized spare fiber assignment เป็นวิธีการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพื่อรองรับความเสียหายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายเท่านั้น ดังนั้นแบบจำลองนี้จะต้องทราบถึงการจัดสรรวงแหวน เส้นทาง และความยาวคลื่นของระบบปกติที่ยังไม่มีการป้องกันโครงข่ายซึ่งได้มาจากโครงข่ายที่ใช้งานจริงหรืออาจได้มาจากผลเฉลยของแบบจำลองในขั้นตอนที่ 1-3 ก็ได้ เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยในขั้นตอนที่ 4 ตามที่ได้กล่าวไว้ในกระบวนการหาผลเฉลย
2. วิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment เป็นวิธีการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน และเส้นใยแก้วนำแสงสำรองไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งเป็นการออกแบบระบบก่อนวางโครงข่ายจริง ดังนั้นกระบวนการในการหาผลเฉลยของแบบจำลองจึงต้องทำขั้นตอนที่ 1-4 จนกระทั่งได้ผลเฉลยของการจัดสรรวงแหวน เส้นทางและความ

ยาวคลื่นที่ทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงรวม (จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน + จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง) ของโครงข่ายที่น้อยที่สุด

การออกแบบทั้ง 2 วิธี สามารถออกแบบโครงข่ายที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter: WC) และไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Non Wavelength Converter: NWC) ซึ่งแบบจำลองโครงข่ายกรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะสามารถเพิ่มขีดความสามารถให้กับโหนด อีกทั้งยังช่วยลดความซับซ้อนของปัญหาเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2.2.2

โดยตัวแปรและค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงต้องการมีดังนี้

- N จำนวนโหนดในโครงข่าย
- D จำนวนคู่โหนดทั้งหมดซึ่งมีค่าเท่ากับ $N(N-1)/2$
- C จำนวนวงแหวนทั้งหมดที่มีอยู่ในโครงข่าย
- n_j จำนวนโหนดของวงแหวนที่ j ซึ่งเท่ากับจำนวนข่ายเชื่อมโยงภายในวงแหวน
- t_i ปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดที่ i ซึ่งวัดในหน่วยของจำนวนช่องสัญญาณการต่อ (connections)
- W_j จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานต่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายของวงแหวนที่ j
- S_j จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองต่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายของวงแหวนที่ j
- $d_{i,j}$ ปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดที่ i ที่ถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ j
- $\delta_{i,j,k,l}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ k ของคู่โหนดที่ i วงแหวนที่ j ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l
มีค่าเป็น 0 เมื่อเส้นทางที่ k ของคู่โหนดที่ i วงแหวนที่ j ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l
- $x_{i,j,k,m}$ ปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดที่ i ที่รองรับด้วยวงแหวนที่ j เส้นทางที่ k โดยใช้ความยาวคลื่นที่ m (ใช้ในกรณี NWC)
- $x_{i,j,k}$ ปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดที่ i ที่รองรับด้วยวงแหวนที่ j เส้นทางที่ k (ใช้ในกรณี WC)
- $r_{i,j,m}^{l'}$ เส้นทางสำรองที่รองรับทราฟฟิกของคู่โหนดที่ i วงแหวนที่ j โดยใช้ความยาวคลื่นที่ m เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ l' ขาด (ใช้ในกรณี NWC)
- $r_{i,j}^{l'}$ เส้นทางสำรองที่รองรับทราฟฟิกของคู่โหนดที่ i วงแหวนที่ j เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ l' ขาด (ใช้ในกรณี WC)
- $\beta_{i,j,l}^{l'}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางสำรองของคู่โหนดที่ i วงแหวนที่ j ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l'
มีค่าเป็น 0 เมื่อเส้นทางสำรองของคู่โหนดที่ i วงแหวนที่ j ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l' เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ l' ขาด

$N, D, C, n_j, t_i, \delta_{i,j,k,l}$ และ $\beta'_{i,j,l}$ เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้กับแบบจำลอง ส่วน $d_{i,j}, W_j, S_j, x_{i,j,k,m}, x_{i,j,k}, r'_{i,j,m}$ และ $r'_{i,j}$ เป็นตัวแปรของแบบจำลอง

ต่อไปจะขอกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอใน [12] กรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่ายจากความเสียหายใดๆ ซึ่งมี objective function เป็น

$$\text{Min} : \sum_{j=1}^C n_j W_j \quad (3.1)$$

โดยมี constraint ต่างๆ ดังนี้

กรณี WC

1. สำหรับคู่โหนดแต่ละคู่ในโครงข่าย ปริมาณทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่ i สามารถรองรับโดยวงแหวนวงใดก็ได้ที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกนั้นหรือปริมาณทราฟฟิกดังกล่าวอาจแบ่งให้รองรับโดยวงแหวนหลายๆ วงก็ได้

$$\sum_{j=1}^C d_{i,j} = t_i \quad i=1,2,\dots,D \quad (3.2)$$

2. เมื่อพิจารณาวงแหวนที่ละวง สำหรับคู่โหนดแต่ละคู่ ปริมาณทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่ i อาจจะใช้เส้นทางที่มีทิศทางตามเข็มนาฬิกา หรือเส้นทางที่มีทิศทางทวนเข็มนาฬิกาก็ได้

$$\sum_{k=1}^2 x_{i,j,k} = d_{i,j} \quad i=1,2,\dots,D; \quad j=1,2,\dots,C \quad (3.3)$$

3. เมื่อพิจารณาวงแหวนที่ละวง สำหรับข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่าย ปริมาณทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l ต้องมีค่าไม่เกินค่าผลคูณระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ เส้นใยแก้วนำแสงมากที่สุด ในวงแหวนกับจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง l เส้นซึ่งค่าผลคูณดังกล่าวจะหมายถึงค่าที่มากที่สุดของจำนวนการต่อที่สามารถผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l ได้

$$MW_j - \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k} \delta_{i,j,l} \geq 0 \quad l=1,2,\dots,n_j; \quad j=1,2,\dots,C \quad (3.4)$$

4. $W_j, x_{i,j,k}$ และ $d_{i,j}$ เป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

$$W_j, x_{i,j,k} \text{ และ } d_{i,j} \in \{0,1,2,\dots\}$$

$$i=1,2,\dots,D; \quad j=1,2,\dots,C; \quad k=1,2$$

กรณี NWC

1. สำหรับคู่โหนดแต่ละคู่ในโครงข่าย ปริมาณทราฟฟิกระหว่างโหนดที่ i สามารถรองรับโดยวงแหวนวงใดก็ได้ที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกนั้นหรือปริมาณทราฟฟิกดังกล่าวอาจแบ่งให้รองรับโดยวงแหวนหลาย ๆ วงก็ได้

$$\sum_{j=1}^C d_{i,j} = t_i \quad i=1,2,\dots,D \quad (3.5)$$

2. เมื่อพิจารณาวงแหวนที่ละวง สำหรับคู่โหนดแต่ละคู่ ปริมาณทราฟฟิกระหว่างโหนดที่ i อาจจะใช้เส้นทางที่มีทิศทางตามเข็มนาฬิกา หรือเส้นทางที่มีทิศทางทวนเข็มนาฬิกาก็ได้และใช้ความยาวคลื่นที่มีลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงค่าใดก็ได้

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k,m} = d_{i,j} \quad i=1,2,\dots,D; j=1,2,\dots,C \quad (3.6)$$

3. เมื่อพิจารณาวงแหวนที่ละวงสำหรับความยาวคลื่นแต่ละค่าในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่าย ปริมาณทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l และใช้ความยาวคลื่นที่ m ต้องมีค่าไม่เกินจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมากที่สุดในวงแหวนซึ่งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวจะหมายถึงจำนวนครั้งที่ใช้ความยาวคลื่นค่าเดิมซ้ำได้นั่นเอง

$$W_j - \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k,m} \delta_{i,j,l} \geq 0 \quad l=1,2,\dots,n_j; m=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,C \quad (3.7)$$

4. W_j , $x_{i,j,k,m}$ และ $d_{i,j}$ เป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

$$W_j, x_{i,j,k,m} \text{ และ } d_{i,j} \in \{0,1,2,\dots\}$$

$$i=1,2,\dots,D; j=1,2,\dots,C; m=1,2,\dots,M; k=1,2$$

3.2.1 Optimized spare fiber assignment

ในหัวข้อนี้เราจะเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงโดยจะศึกษาเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้สำหรับการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection และ Line protection โดยวิธีการป้องกันโครงข่ายแต่ละวิธีจะใช้การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองให้กับเส้นทางสำรองตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2.2.4 ได้แก่ การรองรับเส้นทางสำรองด้วยเส้นใยแก้วนำแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก (Share Fiber) และ การรองรับเส้นทางสำรองด้วยความจุที่เหลือบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน (Share Wavelength) โดยตัวย่อที่ใช้แทนแบบจำลองได้แก่ P และ L หมายถึงวิธีการป้องกัน

โครงข่ายแบบ Path protection และ Line protection ตามลำดับ ส่วน SW และ SF หมายถึงการสำรองความจุให้กับเส้นทางสำรองแบบ Share Wavelength และ Share Fiber ตามลำดับ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่าวิธีนี้จะต้องกำหนดวงแหวน เส้นทางและความยาวคลื่น รวมทั้ง จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานที่ใช้กับวงแหวนแต่ละวงในสภาวะการทำงานปกติ (กรณีที่โครงข่ายไม่มีการคำนึงถึงความเสียหาย) มาให้ซึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ ต้องกำหนด W_j และ $x_{i,j,k,m}$ สำหรับกรณี NWC หรือ W_j และ $x_{i,j,k}$ สำหรับกรณี WC โดยมี objective function คือ

$$\text{Min} : \sum_{j=1}^C n_j S_j \quad (3.8)$$

เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของวงแหวนแต่ละวงขาดไม่สามารถใช้งานได้จะมี constraint ต่างๆ ดังนี้

กรณี WC

1. ในวงแหวนแต่ละวง กรณี Path protection เส้นทางของคู่โหนดใด ๆ ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยง l' ขาดโครงข่ายจะเปลี่ยนไปใช้เส้นทางตรงกันข้าม และ กรณี Line protection เส้นทางของคู่โหนดใด ๆ ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยง l' ขาด โครงข่ายจะวนสัญญาณกลับระหว่างโหนดที่ติดกับข่ายเชื่อมโยง l'

$$r'_{i,j} = \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k} \delta_{i,j,l'} \quad i=1,2,\dots,D; l'=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,C \quad (3.9)$$

2. จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายของวงแหวนจะต้องเพียงพอที่จะรองรับเส้นทางสำรองทั้งหมดเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในวงแหวนเกิดความเสียหาย

PSW

$$MS_j - \sum_{i=1}^D r'_{i,j} \beta'_{i,j,l'} + \left(MW_j - \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k} \delta_{i,k,l'} \right) + \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^2 (x_{i,j,k} \delta_{i,k,l'}) \delta_{i,k,l'} \geq 0 \quad (3.10)$$

PSF

$$MS_j - \sum_{i=1}^D r'_{i,j} \beta'_{i,j,l'} \geq 0 \quad (3.11)$$

LSW

$$MS_j - \sum_{i=1}^D r'_{i,j} \beta'_{i,j,l'} + \left(MW_j - \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k} \delta_{i,k,l'} \right) \geq 0 \quad (3.12)$$

LSF

$$MS_j - \sum_{i=1}^D r_{i,j}^{l'} \beta_{i,j}^{l'} \geq 0 \quad (3.13)$$

โดยที่ $l=1,2,\dots,n_j$; $l=l'$; $j=1,2,\dots,C$

จากสมการในกรณี PSW และ LSW พจน์ที่ 3 ของสมการหมายถึงช่องสัญญาณที่ไม่ได้ถูกใช้งานในเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นช่องสัญญาณให้กับเส้นทางสำรองได้ ส่วนพจน์ที่ 4 ในกรณี PSW มีความหมายว่า เมื่อโครงข่ายตรวจพบข้อขัดข้องที่ขาดและตรวจพบเส้นทางที่ถูกรบกวนจากข้อขัดข้องที่ขาด ส่วนควบคุมและจัดการโครงข่ายก็จะส่งสัญญาณไปบอกโหนดต้นทางและปลายทางของเส้นทางที่ถูกรบกวน เพื่อให้ปลดช่องสัญญาณที่ถูกรบกวนให้ว่างเพื่อสามารถใช้เป็นช่องสัญญาณให้กับเส้นทางสำรองได้เราจึงเรียกพจน์ที่ 4 สำหรับกรณี PSW ว่า “พจน์การปลดช่องสัญญาณ” จะเห็นว่าในกรณี LSW ไม่มีพจน์ที่ 4 เนื่องจากเส้นทางที่ถูกรบกวนซึ่งอยู่ในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานยังคงถูกใช้เพื่อไปวนสัญญาณที่โหนดซึ่งอยู่ระหว่างข้อขัดข้องที่ขาด ส่วนกรณี PSF และ LSF เส้นทางสำรองทั้งหมดจะใช้เส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพื่อรองรับเส้นทางสำรองทั้งหมด จึงไม่มีพจน์ที่ 3 และ 4 เหมือนในกรณีของ PSW และ LSW

3. s_j และ $r_{i,j}^{l'}$ เป็นจำนวนเต็มบวกหรือ ศูนย์

$$s_j, r_{i,j}^{l'} \in \{0,1,2,\dots\}$$

$$i=1,2,\dots,D; l=1,2,\dots,n_j; j=1,2,\dots,C$$

กรณี NWC

กรณีของโครงข่ายแบบวงแหวนที่โหนดไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น เส้นทางสำรองแต่ละเส้นทางที่จัดสรรให้กับโครงข่ายจะต้องมีการกำหนดค่าความยาวคลื่นที่คงที่ตลอดทั้งเส้นทาง ดังนั้นในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของโครงข่ายแบบวงแหวนจึงต้องมีการเพิ่มมิติในการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางแต่ละเส้นทางด้วย

1. ในวงแหวนแต่ละวง กรณี Path protection เส้นทางของคู่โหนดใด ๆ ที่ผ่านข้อขัดข้อง l' ขาด โครงข่ายจะเปลี่ยนไปใช้เส้นทางตรงกันข้ามส่วนกรณีของ Line protection เส้นทางของคู่โหนดใด ๆ ที่ผ่านข้อขัดข้อง l' ขาด โครงข่ายจะวนสัญญาณกลับระหว่างคู่โหนดติดกับข้อขัดข้องนั้น โดยที่เส้นทางสำรองจะต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกับเส้นทางปกติ

$$r_{i,j,m}^{l'} = \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k,m} \delta_{i,j,l'} \quad m=1,2,\dots,M; \quad i=1,2,\dots,D; \quad l'=1,2,\dots,n; \quad j=1,2,\dots,C \quad (3.14)$$

ถ้าโหนดของโครงข่ายมีเครื่องรับ-ส่งสัญญาณแสงที่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้ในกรณีการป้องกันโครงข่ายด้วยวิธี Path protection สมการที่ (3.14) จะถูกเปลี่ยนเป็นสมการที่ (3.15) ดังนี้

$$\sum_{m=1}^M r_{i,j,m}^{l'} = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k,m} \delta_{i,j,l'} \quad i=1, 2, \dots, D; \quad l'=1, 2, \dots, n; \quad j=1, 2, \dots, C \quad (3.15)$$

สมการที่ (3.15) หมายความว่า เมื่อโครงข่ายมีเครื่องรับ-ส่งสัญญาณแสงที่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้ (Tunable) ทำให้เส้นทางสำรองไม่จำเป็นต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกับเส้นทางปกติเหมือนกับสมการที่ (3.14)

- จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายของวงแหวนจะต้องเพียงพอที่จะรองรับเส้นทางสำรองทั้งหมดเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของวงแหวนเกิดความเสียหาย

PSW

$$S_j - \sum_{i=1}^D r_{i,j,m}^{l'} \beta_{i,j,l'} + \left(W_j - \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k,m} \delta_{i,k,l} \right) + \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^2 (x_{i,j,k,m} \delta_{i,k,l}) \delta_{i,k,l'} \geq 0 \quad (3.16)$$

PSF

$$S_j - \sum_{i=1}^D r_{i,j,m}^{l'} \beta_{i,j,l'} \geq 0 \quad (3.17)$$

LSW

$$S_j - \sum_{i=1}^D r_{i,j,m}^{l'} \beta_{i,j,l'} + \left(W_j - \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k,m} \delta_{i,k,l} \right) \geq 0 \quad (3.18)$$

LSF

$$S_j - \sum_{i=1}^D r_{i,j,m}^{l'} \beta_{i,j,l'} \geq 0 \quad (3.19)$$

โดยที่ $l=1,2,\dots,n$; $l=l'$; $m=1,2,\dots,M$; $j=1,2,\dots,C$

3.2.2 Jointly optimized working and spare fiber assignment

หัวข้อนี้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงเพื่อใช้หาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุดที่สามารถรองรับสภาวะการทำงานปกติ และเมื่อเกิดความเสียหายที่ขั้วเชื่อมโยงข่ายหนึ่งของโครงข่ายได้ ดังนั้นแบบจำลองจึงมีการหาทั้งเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน และเส้นใยแก้วนำแสงสำรองไปพร้อมๆกัน ซึ่งมี objective function คือ

$$\text{Min: } \sum_{j=1}^C n_j (W_j + S_j) \quad (3.20)$$

กรณี WC

สำหรับวิธี PSW, PSF, LSW และ LSF แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จากการรวม constraint ที่ (3.2), (3.3), (3.4), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12) และ (3.13) โดย 4 สมการหลังสุดจะใช้สำหรับวิธี PSW, PSF, LSW และ LSF ตามลำดับ

กรณี NWC

สำหรับวิธี PSW, PSF, LSW และ LSF แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จากการรวม constraint ที่ (3.5), (3.6), (3.7), (3.14), (3.16), (3.17), (3.18) และ (3.19) โดย 4 สมการหลังสุดจะใช้สำหรับวิธี PSW, PSF, LSW และ LSF ตามลำดับ

เพื่อให้การนำเสนอวิทยานิพนธ์เป็นไปอย่างสะดวก จึงขอกำหนดตัวของวิธีการป้องกันโครงข่ายที่จะศึกษาไว้ในตารางที่ 3.1 ตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้แบบจำลองพร้อมทั้งส่วนที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลอง ส่วนในตารางที่ 3.3 แสดงถึงจำนวนของ constraint และ ตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง โดยที่ N_c แสดงถึงจำนวน constraint ของแบบจำลองแต่ละแบบ และ N_v แสดงถึง จำนวนตัวแปรของแบบจำลองแต่ละแบบ

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างของวิธีการป้องกันโครงข่าย

Protection Schemes	Optimized spare fiber assignment	Jointly optimized spare and working fiber assignment
Path protection	PSW, PSF	JPSW, JPSF
Span protection	LSW, LSF	JLSW, JLSF

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และตัวแปรที่จะต้องกำหนดค่าให้และที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Protection schemes	Input	Output
PSW, PSF, LSW, LSF	$t_i, W_j, x_{i,j,k,m}, x_{i,j,k}, \delta_{i,j,k,l}, \beta'_{i,j,l}, M$	$S_j, r_{i,j,m}, r_{i,j}$
JPSW, JPSF, JLSW, JLSF	$t_i, \delta_{i,j,k,l}, \beta'_{i,j,l}, M$	$d_{i,j}, W_j, S_j, x_{i,j,k,m}, x_{i,j,k}, r_{i,j,m}, r_{i,j}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวแปร และจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลองกรณีมีและไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความย
ทุกคู่มีค่ามากกว่าศูนย์

Protection schemes	Nv		NWC	
	NWC	WC		
No protection	$(2M+1) \sum_{j=1}^C \frac{n_j(n_j-1)}{2} + C$	$3 \sum_{j=1}^C \frac{n_j(n_j-1)}{2} + C$	$\frac{N(N-1)}{2} + \sum_{j=1}^C \frac{n_j(n_j-1)}{2}$	
PSW,PSF LSW,LSF	$M \sum_{j=1}^C \frac{n_j^2(n_j-1)}{2} + C$	$\sum_{j=1}^C \frac{n_j^2(n_j-1)}{2} + C$	$M \sum_{j=1}^C \frac{n_j^2(n_j-1)}{2} + M$	
JPSW,JPSF JLSW,JLSF	$(2M+1) \sum_{j=1}^C \frac{n_j(n_j-1)}{2}$ $+ M \sum_{j=1}^C \frac{n_j^2(n_j-1)}{2} + 2C$	$3 \sum_{j=1}^C \frac{n_j(n_j-1)}{2} + \sum_{j=1}^C \frac{n_j^2(n_j-1)}{2} + 2C$	$\frac{N(N-1)}{2} + \sum_{j=1}^C \frac{n_j(n_j-1)}{2}$ $+ M \sum_{j=1}^C \frac{n_j^2(n_j-1)}{2} + N$	



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลเฉลย

ในการหาผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะสมมติให้ขั้วเชื่อมโงยทุกขั้วของโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์มีระยะทางเท่ากันทั้งหมด เพื่อไม่ให้มีผลต่อการคำนวณหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย โดยจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะเป็นการสื่อสารทางเดียวเท่านั้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาการสื่อสาร 2 ทาง ซึ่งแต่ละเส้นทางใช้เส้นใยแก้วนำแสงคนละเส้นผลเฉลยที่ได้จึงต้องคูณด้วย 2 และสำหรับโครงข่ายกรณี WC จะสมมติให้โครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในทุกๆ โหนดด้วย

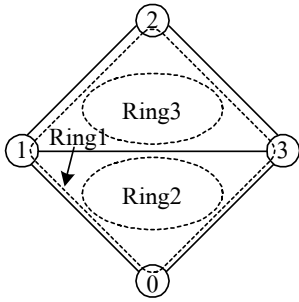
นอกจากนี้ ปริมาณทราฟฟิกที่โหนดแต่ละคู่ภายในโครงข่ายต้องการจะต้องกำหนดให้เป็นจำนวนช่องสัญญาณแสงที่โหนดแต่ละคู่ต้องการ โดยปริมาณทราฟฟิกที่กำหนดให้นี้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ (static traffic)

3.3.1 ผลการทดสอบ

ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.2 สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ CPLEX 6.6 [18] ในการคำนวณหาต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายทั้งหมด โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลดังกล่าวคือ เครื่อง PC Intel Pentium 667 MHz ซึ่งใช้ RAM ขนาด 128 MB โดยในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์ถึงความซับซ้อนและผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีกั้นโครงข่ายจากความเสียหายที่ขั้วเชื่อมโงยหนึ่ง ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกรณีที่ไม่มีการกั้นโครงข่ายกับกรณีที่มีการกั้นโครงข่ายเพื่อหารูปแบบการกั้นโครงข่ายที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุด เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและใช้ประโยชน์ในทางปฏิบัติต่อไป

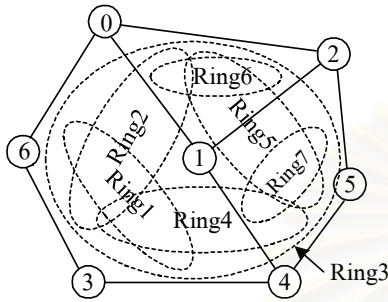
โดยโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นโครงข่ายขนาดเล็ก 2 โครงข่ายที่แสดงในรูปที่ 3.1 โดยโครงข่ายทั้งสอง จะมีลักษณะทางกายภาพ และปริมาณทราฟฟิกดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



node	0	1	2	3
0		1	1	1
1			1	1
2				1
3				

(ก)



node	0	1	2	3	4	5	6
0		3	5	2	1	9	1
1			6	2	2	4	5
2				2	2	5	4
3					1	4	7
4						5	1
5							3
6							

(ข)

รูปที่ 3.1 โครงข่ายและปริมาณกราฟฟิกรที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 4N_3R และ (ข) โครงข่าย 7N_7R

1. โครงข่ายรูปที่ 3.1 (ก) เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโหนดทั้งหมด 4 โหนด โดยสมมติให้กราฟฟิกของโครงข่ายมีลักษณะเป็นยูนิฟอร์ม กล่าวคือ ปริมาณกราฟฟิกของโหนดแต่ละคุ่มีค่าเท่ากัน และกำหนดให้ปริมาณกราฟฟิกของโหนดแต่ละคุ่มีค่าเท่ากับ 1 คือมีการต่อในโหนดแต่ละคุ่มีค่าเท่ากับ 1 ช่องสัญญาณ โดยมีจำนวนวงแหวนทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่ใช้พิจารณาในการจัดสรรสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เท่ากับ 3 วง และเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกโครงข่ายดังกล่าวว่า โครงข่าย 4N_3R หรือเรียกว่า โครงข่าย 4 โหนด 3 วงแหวน
2. โครงข่ายรูปที่ 3.1 (ข) เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโหนดทั้งหมด 7 โหนด ซึ่งจะเห็นว่าเป็นโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่กว่าโครงข่ายแบบแรกในรูปที่ 3.1 (ก) แต่ในโครงข่ายที่ 2 นี้จะสมมติให้ลักษณะกราฟฟิกเป็นแบบนอนยูนิฟอร์ม (non-uniform) ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับ กราฟฟิกของโครงข่ายแรก นั่นคือ ปริมาณกราฟฟิกในโหนดแต่ละคุ่มีค่าไม่เท่ากันหรืออาจมีค่าเป็นศูนย์ในโหนดบางคุ่มีโดยมีปริมาณกราฟฟิกรวมของโครงข่ายเท่ากับ 74 การต่อ สำหรับการสื่อสารทางเดียว ส่วนจำนวนวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่ใช้พิจารณาในการจัดสรรสำหรับแบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์เท่ากับ 7 วง ซึ่งมากกว่าโครงข่ายรูป (ก) ถึง 4 วง และเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกโครงข่ายนี้ว่าโครงข่าย 7N_7R หรือเรียกว่าโครงข่าย 7 โหนด 7 วงแหวน

ในส่วนนี้จะแสดงการวิเคราะห์ผลเฉลยและความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ออกแบบโดยวิธี Optimized spare fiber assignment และ Jointly optimized working and spare fiber assignment สำหรับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง ซึ่งทั้ง 2 วิธีจะถูกแสดงความซับซ้อนในรูปของเวลาในการประมวลผล (run time) จำนวนตัวแปร และจำนวน constraint โดยตารางที่ 3.5 แสดงถึงจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint สำหรับการออกแบบทั้ง 2 วิธีที่ใช้โครงข่าย 4N_3R ในการทดสอบ ส่วนตารางที่ 3.8 แสดงถึงจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint ของการออกแบบทั้ง 2 วิธีที่ใช้โครงข่าย 7N_7R ในการทดสอบ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 4N_3R ต้องการ (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ (ค) กรณีมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ

(ก)

M	No protection	
	WC	NWC
1	10	10
2	7	7
4	4	4
8	4	4

(ข)

M	Protection schemes for WC case							
	PSW	JPSW	PSF	JPSF	LSW	JLSW	LSF	JLSF
1	17 (70%)	15	20 (100%)	20	20 (100%)	17	20 (100%)	20
2	11 (57.2%)	8	14 (100%)	12	11 (57.2%)	10	14 (100%)	14
4	4 (0%)	4	8 (100%)	8	8 (100%)	7	8 (100%)	8
8	4 (0%)	4	8 (100%)	8	4 (0%)	4	8 (100%)	8

(ค)

M	Protection schemes for NWC case							
	PSW	JPSW	PSF	JPSF	LSW	JLSW	LSF	JLSF
1	17 (70%)	15	20 (100%)	20	20 (100%)	17	20 (100%)	20
2	11 (57.2%)	8	14 (100%)	14	14 (100%)	11	14 (100%)	14
4	8 (100%)	7	8 (100%)	8	8 (100%)	8	8 (100%)	8
8	4 (0%)	4	8 (100%)	8	8 (100%)	8	8 (100%)	8

หมายเหตุ ค่าเปอร์เซ็นต์ที่อยู่หลังผลเฉลยสำหรับวิธี Optimized spare fiber assignment นั้นหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องใช้เมื่อเทียบกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่ายในตารางที่ 3.4 (ก)

ตารางที่ 3.5 จำนวน constraint (Nc) และจำนวนตัวแปร (Nv) ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 4N_3R (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ (ค) กรณีมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ

(ก)

M	No protection			
	WC		NWC	
	Nc	Nv	Nc	Nv
1	28	39	28	34
2	28	39	38	63
4	28	39	58	111
8	28	39	98	207

(ข)

M	Protection schemes (WC)															
	PSW		JPSW		PSF		JPSF		LSW		JLSW		LSF		JLSF	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	66	45	94	84	66	45	94	84	66	45	94	84	66	45	94	84
2	66	45	94	84	66	45	94	84	66	45	94	84	66	45	94	84
4	66	45	94	84	66	45	94	84	66	45	94	84	66	45	94	84
8	66	45	94	84	66	45	94	84	66	45	94	84	66	45	94	84

(ค)

M	Protection schemes (NWC)															
	PSW		JPSW		PSF		JPSF		LSW		JLSW		LSF		JLSF	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	66	45	94	84	66	45	94	84	66	45	94	84	66	45	94	84
2	132	87	170	150	132	87	170	150	132	87	170	150	132	87	170	150
4	264	171	322	282	264	171	322	282	264	171	322	282	264	171	322	282
8	528	339	626	546	528	339	626	546	528	339	626	546	528	339	626	546

ตารางที่ 3.6 เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (Run time) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 4N_3R (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ (ค) กรณีมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ

(ก)

M	Run time of No protection (sec)	
	WC	NWC
1	0.02	0.02
2	0.02	0.06
4	0.02	0.11
8	0.02	0.24

(ข)

M	Run time of Protection schemes for WC case(sec)							
	PSW	JPSW	PSF	JPSF	LSW	JLSW	LSF	JLSF
1	0.01	0.02	0.05	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03
2	0.01	0.02	0.05	0.05	0.01	0.03	0.01	0.03
4	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03
8	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.06	0.06	0.02

(ค)

M	Run time of Protection schemes for NWC case(sec)							
	PSW	JPSW	PSF	JPSF	LSW	JLSW	LSF	JLSF
1	0.01	0.02	0.11	0.04	0.01	0.02	0.01	0.03
2	0.01	0.22	0.11	0.27	0.01	0.19	0.01	0.1
4	0.01	1.19	0.04	0.83	0.03	0.36	0.01	0.15
8	0.01	12.93	0.25	2.19	0.01	1.58	0.01	0.76

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.7 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 7N_7R ต้องการ (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ (ค) กรณีมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ

(ก)

M	No protection	
	WC	NWC
1	122	122
2	62	62
4	32	32
8	17	17

(ข)

M	Protection schemes for WC case							
	PSW	JPSW	PSF	JPSF	LSW	JLSW	LSF	JLSF
1	244 (100%)	243	244 (100%)	244	244 (100%)	244	244 (100%)	244
2	124 (100%)	122	124 (100%)	124	124 (100%)	122	124 (100%)	124
4	64 (100%)	62	64 (100%)	64	64 (100%)	62	64 (100%)	64
8	34 (100%)	32	34 (100%)	34	34 (100%)	32	34 (100%)	34

(ค)

M	Protection schemes for NWC case							
	PSW	JPSW	PSF	JPSF	LSW	JLSW	LSF	JLSF
1	244 (100%)	243	244 (100%)	244	244 (100%)	244	244 (100%)	244
2	124 (100%)	123	124 (100%)	124	124 (100%)	124	124 (100%)	124
4	64 (100%)	63	64 (100%)	64	64 (100%)	64	64 (100%)	64
8	34 (100%)	34	34 (100%)	34	34 (100%)	34	34 (100%)	34

คำอธิบาย:

หมายเหตุ ค่าเปอร์เซ็นต์ที่อยู่หลังผลเฉลยสำหรับวิธี Optimized spare fiber assignment นั้นหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องใช้เมื่อเทียบกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่ายในตารางที่ 3.7 (ก)

ตารางที่ 3.8 จำนวน constraint (Nc) และจำนวนตัวแปร (Nv) ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 7N_7R (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ (ค) กรณีมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ

(ก)

M	No protection			
	WC		NWC	
	Nc	Nv	Nc	Nv
1	137	240	137	240
2	137	240	173	400
4	137	240	245	720
8	137	240	389	1360

(ข)

M	Protection schemes (WC)															
	PSW		JPSW		PSF		JPSF		LSW		JLSW		LSF		JLSF	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	620	467	757	174	620	467	757	174	620	467	757	174	620	467	757	174
2	620	467	757	174	620	467	757	174	620	467	757	174	620	467	757	174
4	620	467	757	174	620	467	757	174	620	467	757	174	620	467	757	174
8	620	467	757	174	620	467	757	174	620	467	757	174	620	467	757	174

(ค)

M	Protection schemes (NWC)															
	PSW		JPSW		PSF		JPSF		LSW		JLSW		LSF		JLSF	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	620	467	757	714	620	467	757	714	620	467	757	714	620	467	757	714
2	1240	927	1413	1334	1240	927	1413	1334	1240	927	1413	1334	1240	927	1413	1334
4	2480	1847	2725	2574	2480	1847	2725	2574	2480	1847	2725	2574	2480	1847	2725	2574
8	4960	3687	5349	5054	4960	3687	5349	5054	4960	3687	5349	5054	4960	3687	5349	5054

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.9 เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (Run time) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ
 โครงข่าย 7N_7R (ก) กรณีไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) (ข) และ (ค) กรณีมีการ
 ป้องกัน โครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่าย WC และ NWC ตามลำดับ

(ก)

M	Run time of No protection (sec)	
	WC	NWC
1	0.04	0.1
2	0.36	2.58
4	0.32	6.55
8	0.32	75.56

(ข)

M	Run time of Protection schemes for WC case (sec)							
	PSW	JPSW	PSF	JPSF	LSW	JLSW	LSF	JLSF
1	0.01	1.22	0.01	0.3	0.01	0.2	0.01	0.17
2	0.01	0.35	0.01	1.25	0.02	0.26	0.01	0.44
4	0.01	27.62	0.01	2.18	0.01	0.57	0.01	0.47
8	0.01	1.51	0.01	0.88	0.01	0.92	0.03	0.44

(ค)

M	Run time of Protection schemes for NWC case (sec)							
	PSW	JPSW	PSF	JPSF	LSW	JLSW	LSF	JLSF
1	0.01	0.63	0.01	0.3	0.01	0.19	0.01	0.16
2	0.04	2.44 mins	0.01	29.58	0.04	9.32	0.02	11.73
4	0.06	1.17 hours	0.05	13.64 mins	0.07	15.8 mins	0.05	6.605 mins
8	0.3	16.24 hours	0.1	14.66 hours	0.13	7.42 hours	0.1	24.2 mins

3.3.2 การวิเคราะห์ผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.3.2.1 การวิเคราะห์ผลเฉลยของวิธี Optimized spare fiber assignment

(ก) จำนวนเส้นใยแก้วที่ใช้ในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

ต่อไปจะทำการวิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย เมื่อพิจารณาถึงโครงข่าย 4N_3R ในกรณีที่ไม่มีกรงกันโครงข่าย ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.4 (ก) จะเห็นว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่มีผลที่จะทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลง นั่นคือจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี WC และ NWC จะมีค่าเท่ากับ 10, 7, 4 และ 4 เส้นที่ค่า M เท่ากับ 1, 2, 4 และ 8 ตามลำดับ จากผลที่ได้จะเห็นว่าเมื่อ M เพิ่มขึ้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้จะลดลงเนื่องจากจำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้น และการที่จำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้จำนวนวงแหวนที่จัดสรรให้ลดลงด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะจำนวนช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นทำให้วงแหวนแต่ละวงมีช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้งานเหลือมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงต่ำลงส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้สูง ดังนั้นกราฟฟิกของคู่โหนดซึ่งเหมาะสมที่จะรองรับโดยช่องสัญญาณที่เหลือดังกล่าวก็จะเลือกที่จะรองรับกราฟฟิกในวงแหวนที่มีช่องสัญญาณที่เหลือนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงให้สูงที่สุดทำให้วงแหวนบางวงมีจำนวนกราฟฟิกที่รองรับมากขึ้นซึ่งก็ส่งผลให้จำนวนวงแหวนที่ใช้รองรับกราฟฟิกลดลงเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นนั่นเอง ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 4N_3R กรณี NWC ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 สามารถแสดงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายและปริมาณกราฟฟิกที่ถูกรองรับในวงแหวนแต่ละวงที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลองได้ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายและปริมาณกราฟฟิกที่ถูกรองรับในวงแหวนแต่ละวงที่ค่า M เท่ากับ 1-4

Ring	Number of nodes	Description of Ring	M=1		M=2		M=3		M=4	
			Fiber	traffic	Fiber	traffic	Fiber	traffic	Fiber	traffic
1	4	0-1-2-3-0	1	2	1	4	1	6	1	6
2	3	0-1-3-0	1	3	-	-	-	-	-	-
3	3	1-2-3-1	1	1	1	2	-	-	-	-
Total number of fibers			10		7		4		4	

จากตารางที่ 3.10 จะเห็นว่าที่ค่า M เท่ากับ 1 จะต้องใช้วงแหวนถึง 3 วงในการรองรับกราฟฟิกเพื่อให้ได้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้น้อยที่สุด โดยแบ่งปริมาณกราฟฟิกเป็น 2, 3 และ 1 ช่องสัญญาณให้รองรับโดยวงแหวนที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อ M เพิ่มขึ้นเป็น 2 จะเลือกวงแหวน

เพียง 2 วง คือวงแหวนที่ 1 และ 3 เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมด สังเกตว่าเป็นเช่นนี้เพราะช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้ในวงแหวนที่ 1 และ 3 เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงต่ำ ดังนั้นทราฟฟิกของวงแหวนที่ 2 ที่ค่า M เป็น 1 จะเลือกที่จะรองรับด้วยช่องสัญญาณที่เหลือของวงแหวนที่ 1 และ 3 เป็นจำนวน 2 และ 1 ช่องสัญญาณตามลำดับเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นเป็น 2 นั้นเอง และเมื่อค่า M มากกว่า 3 เป็นต้นไป โครงข่ายจะใช้วงแหวนเพียงวงเดียวเท่านั้น โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงต่อข่ายเชื่อมโยงเพียงเส้นเดียว ส่วนกรณี WC จะให้ผลเช่นเดียวกับกรณี NWC ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจำนวนวงแหวนที่แบบจำลองเลือกจะแปรผกผันกับค่า M ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้ทราบว่าที่ค่า M สูงๆ นั้นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงจะไม่ส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้วงแหวนเพียงวงเดียว ยกตัวอย่างเช่น จากตารางที่ 3.10 ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถ้าใช้วงแหวนเพียงวงเดียวจะต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าใช้วงแหวน 3 วง ถึง 2 เส้น ในขณะที่ค่า M เท่ากับ 3 การใช้วงแหวน 2 วง และ 3 วงจะต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าการใช้วงแหวนเพียงวงเดียวถึง 3 และ 6 เส้นตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงโครงข่าย 4N_3R กรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายด้วยวิธี PSW, PSF, LSW และ LSF ซึ่งสามารถหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่โครงข่ายต้องการได้จากวิธี optimized spare fiber assignment โดยแสดงผลไว้ในตารางที่ 3.4 (ข) และ (ค) จากตารางที่ 3.4 (ข) กรณี WC จะเห็นว่าโครงข่ายต้องการเส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของกรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่ายซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 (ก) ทั้งนี้เนื่องจากโครงข่ายจะต้องสำรองเส้นใยแก้วนำแสงไว้ส่วนหนึ่งเพื่อรองรับเส้นทางสำรองเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย เมื่อพิจารณากรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection จะเห็นว่าวิธี PSW จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของวิธี PSF กล่าวคือที่ M เท่ากับ 1 วิธี PSW จะต้องเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง 7 เส้น ในขณะที่วิธี PSF ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพิ่มถึง 10 เส้น ซึ่งมากกว่าของวิธี PSW ถึง 42.86% ทั้งนี้เนื่องจากวิธี PSW สามารถใช้ช่องสัญญาณที่เหลือและช่องสัญญาณที่ถูกปลด (พจน์ที่ 2 และ 3 ของสมการที่ (3.10)) ในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานเพื่อรองรับเส้นทางสำรองส่วนหนึ่งได้ จึงทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ใช้น้อยกว่าของวิธี PSF ส่วนวิธี PSF เส้นทางสำรองจะต้องอยู่บนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองทั้งหมดไม่อนุญาตให้ใช้ช่องสัญญาณที่เหลือบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานได้จึงทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองจะต้องสามารถรองรับเหตุการณ์ที่เลวร้ายที่สุดได้ นั่นคือ เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่มีปริมาณทราฟฟิกหนาแน่นที่สุดเกิดความเสียหาย ทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองในวงแหวนแต่ละวงที่ได้มีค่าเท่ากับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานสำหรับค่า M ทุกค่า ดังนั้นจะเห็นว่าวิธี PSW จะประหยัดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกว่าวิธี PSF ซึ่งจากตารางที่ 3.4 (ข) และ (ค) ที่ค่า M สูงขึ้นจำนวนช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานของโครงข่ายที่ไม่มีการป้องกันความเสียหายในตารางที่ 3.4 (ก) มากพอที่จะรองรับเส้นทางสำรองทั้งหมดได้โดย

ไม่จำเป็นต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงสำรองเลย เช่นที่ M เท่ากับ 4 และ 8 ใ้วงแหวนวงที่ 1 รองรับกราฟฟิกทั้งหมดโดยจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ใช้เป็นศูนย์

เมื่อพิจารณาถึงโครงข่าย 4N_3R กรณี NWC ดังในตารางที่ 3.4 (ค) จะเห็นว่าจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ได้ของวิธี PSW จะมีค่าเท่ากับของกรณี WC ที่ค่า M เท่ากับ 1, 2 และ 8 ส่วนที่ค่า M เท่ากับ 4 จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าของกรณี WC ถึง 4 เส้นหรือ 100% เนื่องจากช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานไม่สามารถใช้รองรับเส้นทางสำรองที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวตลอดเส้นทางได้ ส่วนวิธี PSF จะมีค่าเท่ากับของกรณี WC ที่ค่า M เท่ากับ 1, 2, 4 และ 8 ดังนั้นสรุปได้ว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมีผลต่อการลดลงของจำนวนเส้นใยแสงของโครงข่าย 4N_3R ที่ใช้วิธี PSW ในค่า M บางค่า แต่ไม่มีผลกับวิธี PSF เลย

ส่วนกรณีของโครงข่ายที่มีการป้องกันแบบ Line protection จากตารางที่ 3.4 (ข) กรณี WC จะเห็นว่าวิธี LSW จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าของวิธี LSF ที่ค่าบางค่าของ M เท่านั้น นั่นคือ น้อยกว่า 21.43% และ 50% ที่ค่า M เท่ากับ 2 และ 8 ตามลำดับ ส่วนที่ค่า M เท่ากับ 1 และ 4 จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเท่ากันคือ 10 และ 4 เส้น และเมื่อพิจารณากรณี NWC ดังตารางที่ 3.4 (ค) วิธี LSW และ LSF จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเท่ากันคือ 10, 7, 4 และ 4 เส้น ที่ค่า M เท่ากับ 1, 2, 4 และ 8 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นทางสำรองต้องใช้ความยาวคลื่นต่อเนื่องตลอดเส้นทางเช่นเดียวกับกรณี NWC ของการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection อีกทั้งในตำแหน่งสัญญาณจากเส้นใยแก้วนำแสงทำงานผ่านคูโนดที่อยู่ติดกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายไปยังความจุสำรองที่อยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายนั้น จะต้องมีความยาวคลื่นเดียวกัน ทำให้ LSW ไม่สามารถใช้ช่องสัญญาณที่เหลือ (พจน์ที่ 2 ของสมการที่ (3.12)) ได้เลยจึงต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองถึง 100% เท่ากับวิธี LSF และเมื่อพิจารณาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจากตารางที่ 3.4 (ข) จะเห็นว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองสำหรับวิธี LSW ได้ในค่าบางค่าของ M เท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบการป้องกันโครงข่ายทั้ง 2 แบบ คือ Path protection และ Line protection จะเห็นว่าวิธี PSW สามารถประหยัดต้นทุนหรือจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าวิธี LSW กล่าวคือ กรณี WC วิธี PSW จะมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่า 30% และ 100% ที่ M เท่ากับ 1 และ 4 ตามลำดับ ส่วนกรณี NWC จะมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่า 30%, 42.8% และ 100% ที่ค่า M เท่ากับ 1, 2 และ 8 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงวิธี PSF และ LSF จากตารางที่ 3.4 (ข) และ (ค) ไม่ว่าจะจะมีหรือไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นก็ตามจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่เพิ่มขึ้นของโครงข่ายจะเท่ากับ 100% ของโครงข่ายกรณีที่ไม่มีการป้องกันความเสียหายในค่าทุก ๆ ค่าของ M นั่นคือต้องใช้

เส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับความเสียหายเท่ากับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานนั่นเอง

ส่วนโครงข่าย 7N_7R เมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่ใช้กับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงซึ่งแสดงในตารางที่ 3.7 จากตารางที่ 3.7 (ก) จะเห็นว่าในโครงข่ายที่ไม่มีการป้องกันความเสียหายนั้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการจะลดลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งจำนวนวงแหวนที่เลือกใช้เพื่อรองรับทราฟฟิกจะแปรผกผันตามค่า M ที่เพิ่มขึ้นซึ่งข้อสังเกตที่ได้นี้ตรงกับผลที่ได้จากโครงข่าย 4N_3R อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงข่าย 7N_7R มีขนาดใหญ่กว่าโครงข่าย 4N_3R รวมทั้งโครงข่ายมีทราฟฟิกในปริมาณที่มากกว่าด้วย ดังนั้นโครงข่าย 7N_7R จึงต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่มากกว่าโครงข่าย 4N_3R และเมื่อพิจารณาโครงข่าย 7N_7R กรณี WC และ NWC จะพบว่าสำหรับค่าทุกค่าของ M โครงข่ายทั้ง 2 ประเภทมีผลเฉลี่ยที่เท่ากัน ดังนั้นโครงข่าย 7N_7R กรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่ายนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ส่งผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายเลย

เมื่อพิจารณาถึงโครงข่าย 7N_7R กรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายด้วยวิธี PSW, PSF, LSW และ LSF สามารถแสดงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง ในตารางที่ 3.7 (ข) และ (ค) สำหรับกรณี WC และ NWC ตามลำดับจะพบว่าทั้งกรณี WC และ NWC ที่ค่า M เดียวกันจะมีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากันทั้ง 4 วิธี คือ 244, 124, 64 และ 34 เส้น ที่ค่า M เท่ากับ 1, 2, 4 และ 8 ตามลำดับ ซึ่งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ใช้นั้นเท่ากับ 100% เมื่อเทียบกับเส้นใยแก้วนำแสงทำงานสำหรับโครงข่ายที่ไม่มีการป้องกันความเสียหายสำหรับค่าทุกค่าของ M ดังนั้นในโครงข่าย 7N_7R ถ้าใช้วิธี Optimized spare fiber assignment ในการหาผลเฉลี่ยสำหรับวิธี PSW, PSF, LSW และ LSF สามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายลดลงได้

(ข) ความซับซ้อนและเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลี่ยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากตารางที่ 3.5 (ก) แสดงถึงจำนวนตัวแปร (N_v) และ constraint (N_c) ของโครงข่าย 4N_3R ที่ไม่มีการป้องกันความเสียหาย (No protection) กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC) และไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC) ที่ค่า M เท่ากับ 1, 2, 4 และ 8 จะเห็นว่าจำนวนตัวแปร และ constraint ของแบบจำลองกรณี WC จะมีค่าคงที่ตลอด คือมี $N_c = 28$ และ $N_v = 39$ ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองนี้ไม่จำเป็นต้องจัดสรรความยาวคลื่นให้กับแต่ละเส้นทางให้มีค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง แต่จะอาศัยการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ link by link basis คือข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายที่รองรับเส้นทางของทราฟฟิกหนึ่งการค่อนั้นสามารถเลือกใช้ความยาวคลื่นค่าใดที่เหมาะสมก็ได้ ส่วนกรณี NWC เมื่อค่า M เพิ่มขึ้นจำนวนตัวแปร และ constraint ก็

จะเพิ่มขึ้นตามค่าของ M เนื่องจากต้องมีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางแต่ละเส้นทางให้มีความยาวคลื่นเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง ดังนั้นจากตารางที่ 3.6 (ก) จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยกรณี WC จะใช้เวลาประมาณ 0.02 วินาที ที่ค่า M เท่ากับ 1, 2, 4 และ 8 แต่กรณี NWC เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยจะสูงขึ้นตามค่าของ M คือ เมื่อ $M = 1$ จะใช้เวลา 0.02 วินาที เมื่อ $M = 8$ จะใช้เวลาคำนวณ 0.24 วินาที เป็นต้น อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ก็ไม่ต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากโครงข่ายที่ใช้เป็นโครงข่ายขนาด 4 โหนด และมีวงแหวนที่ใช้พิจารณาในการเลือกเพียง 3 วง ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยจึงทำให้ที่ค่า M ที่ต่างกันเวลาที่ใช้ในการคำนวณจึงไม่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทั้ง 2 จะเห็นว่า กรณี WC มีความซับซ้อนน้อยกว่า NWC ทั้งทางตัวแปร และ constraint

เมื่อพิจารณาถึงกรณีที่โครงข่ายมีการคำนึงถึงการป้องกันโครงข่ายจากข้อผิดพลาดของสายใยหนึ่งเสียหาย โดยมีการวางเส้นใยแก้วนำแสงสำรองให้กับวงแหวนแต่ละวงของโครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทุก ๆ เหตุการณ์ที่สายใยหนึ่งเสียหายได้ ตารางที่ 3.5 (ข) แสดงจำนวนตัวแปรและ constraint ที่ค่า M เท่ากับ 1, 2, 4 และ 8 ของแบบจำลองกรณี WC ที่ใช้วิธี Optimized spare fiber assignment จะเห็นว่าในวิธี PSW, PSF, LSW และ LSF จำนวนตัวแปร และ constraint จะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้นนั่นคือ มี $N_c = 66$ และ $N_v = 45$ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นทางสำรองไม่จำเป็นต้องมีการจัดสรรความยาวคลื่น ส่วนกรณี NWC จากตารางที่ 3.5 (ค) จะเห็นว่าวิธี PSW, PSF, LSW และ LSF จะมีจำนวนตัวแปร และ constraint เท่ากันที่ค่า M เดียวกัน และเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นจำนวนตัวแปรและ constraint ก็เพิ่มขึ้น เช่น เมื่อ M เท่ากับ 1, $N_c = 66$ และ $N_v = 45$ และเมื่อ M เท่ากับ 2, $N_c = 132$ และ $N_v = 87$ แต่จากการพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเห็นว่าวิธี PSW, PSF, LSW และ LSF ไม่ว่าจะเป็กรณี WC หรือ NWC ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.6 (ข) และ (ค) ตามลำดับ จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 0.01 วินาที ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองเหล่านี้ใช้หาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพียงอย่างเดียว โดยอาศัยข้อมูลจากโครงข่ายปกติคือ เส้นทางที่ใช้ในสภาวะปกติและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานในวงแหวนแต่ละวงที่ถูกใช้งานจริงในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง จึงทำให้เวลาในการหาผลเฉลยที่ได้ไม่ว่าจะเป็นการป้องกันโครงข่ายแบบใดที่มีหรือไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นก็ตาม ก็ยังคงใช้เวลาในการคำนวณไม่นานและเวลาก็ไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อพิจารณาโครงข่าย 7N_7R จากตารางที่ 3.8 (ก) กรณีที่มีและไม่มีการป้องกันโครงข่ายจากข้อผิดพลาดของสายใยหนึ่งเสียหายจะเห็นว่า กรณี WC จำนวนตัวแปร และ constraint จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า M ส่วนในกรณี NWC จำนวนตัวแปรและ constraint เพิ่มขึ้นตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งข้อสรุปนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับที่ได้อธิบายในโครงข่าย 4N_3R อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงข่าย 7N_7R มีขนาดใหญ่กว่าโครงข่าย 4N_3R ดังนั้นจำนวนตัวแปรและ constraint ที่ใช้จึงมี

จำนวนมากกว่า แต่ถึงแม้จะมีตัวแปร และ constraint ที่มากกว่าก็ตามเวลาที่ใช้ในการคำนวณก็ยังคงใช้เวลาไม่นานซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของโครงข่ายที่ใช้ทดสอบไม่ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยสำหรับวิธี Optimized spare fiber assignment

3.3.2.2 การวิเคราะห์ผลเฉลยของวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment

(ก) จำนวนเส้นใยแก้วที่ใช้ในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

เรื่องต่อไปที่จะกล่าวถึงคือการวิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment ตารางที่ 3.4 (ข) และ (ค) แสดงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 4N_3R ต้องการและเมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยสำหรับวิธีที่มีการสำรองความจุที่ต่างกัน จะเห็นว่าผลเฉลยของวิธี JPSW จะใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่ต่ำกว่าของวิธี JPSF ประมาณ 25-50% และ 12.5-50% สำหรับค่าทุกค่าของ M สำหรับกรณี WC และ NWC ตามลำดับ ส่วนวิธี JLSW จะใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่ต่ำกว่า JLSF ประมาณ 12.5-50% สำหรับค่าทุกค่าของ M ไม่ว่าจะเป็กรณ WC หรือ NWC ก็ตาม ดังนั้นสรุปได้ว่าการสำรองความจุแบบ Share Wavelength นั้นสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วของโครงข่าย 4N_3R ได้โดยเฉพาะที่ค่า M สูงเพียงพอจะสามารถประหยัดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ถึง 50% เมื่อเทียบกับสำรองความจุแบบ Share Fiber

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลเฉลยของโครงข่ายกรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายที่ต่างกันสำหรับกรณี WC เมื่อพิจารณาผลเฉลยระหว่างวิธี JPSW กับวิธี JLSW จะเห็นว่าวิธี JPSW ใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่าของวิธี JLSW ประมาณ 0-42.86% สำหรับค่าทุกค่าของ M ส่วนในกรณี NWC วิธี JPSW จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่าของวิธี JLSW ประมาณ 11.76-50% สำหรับค่าทุกค่าของ M และสำหรับวิธี JPSF และ JLSF นั้นจะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากันไม่ว่าจะเป็นกรณี WC หรือ NWC ก็ตาม อีกทั้งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองจะเท่ากับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานในวงแหวนแต่ละวงที่ได้จัดสรรให้ ยกเว้นวิธี JPSF กรณี WC ที่ค่า M เท่ากับ 2 เท่านั้น ซึ่งแสดงรายละเอียดในส่วนที่แรเงา ดังในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายสำหรับโครงข่ายที่ใช้วิธี JPSF
กรณี WC

Ring	M=1		M=2		M=4		M=8	
	W	S	W	S	W	S	W	S
1	1	1	2	1	1	1	1	1
2	1	1	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ W: Working fiber

S: Spare fiber

จากตารางที่ 3.11 จะเห็นว่าโครงข่าย 4N_3R ที่ค่า M เท่ากับ 2 จะใช้วงแหวนที่ 1 ซึ่งมีขนาด 4 โหนดเพียงวงเดียวในการรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เป็นแบบยูนิฟอร์ม โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงทำงาน 2 เส้น และ เส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพียงเส้นเดียว เนื่องจากเมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกหนาแน่นที่สุด เส้นทางสำรองที่เปลี่ยนไปใช้เส้นทางตรงกันข้ามนั้นมีการซ้อนทับกันในข่ายเชื่อมโยงทุกๆข่ายที่ไม่ใช่ข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายไม่เกิน 2 ช่องสัญญาณทำให้สามารถใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพียงเส้นเดียวเพื่อรองรับเส้นทางสำรอง 2 ช่องสัญญาณได้ ส่วนในกรณีของ NWC ถึงแม้การจัดสรรเส้นทางจะมีลักษณะเดียวกับกรณี WC ก็ตาม แต่เส้นทางสำรองต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกับของเส้นทางปกติทำให้เส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพียงเส้นเดียวไม่สามารถรองรับได้เนื่องจากการกวนกันของความยาวคลื่นค่าเดียวกันที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งจึงทำให้ต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเท่ากับเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม สำหรับโครงข่ายแบบวงแหวนขนาด 4 โหนด การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นกับวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection ที่มีการสำรองความจุแบบ Share Fiber จะสามารถใช้เส้นใยแก้วนำแสงสำรองน้อยกว่าเส้นใยแก้วนำแสงทำงานหนึ่งเส้นได้ ซึ่งต่างจากการป้องกันแบบ Line protection ที่มีการสำรองความจุแบบ Share Fiber ที่ต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานเท่ากับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเสมอไม่ว่าจะเป็นกรณี WC หรือ NWC ก็ตาม เนื่องจากเมื่อข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกที่หนาแน่นที่สุดเกิดความเสียหาย ทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบซึ่งเปลี่ยนไปใช้เส้นทางสำรองนั้นจะต้องผ่านข่ายเชื่อมโยงทุกๆข่ายที่ไม่ใช่ข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย

การเปรียบเทียบผลเฉลยของโครงข่ายกรณี WC และ NWC แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้กรณีค่าบางค่าของ M เท่านั้น ตัวอย่างเช่น

วิธี JPSW สามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ 42.86% ที่ค่า M เท่ากับ 4 ส่วนวิธี JPSF สามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ 14.29% ที่ค่า M เท่ากับ 2 และ วิธี JLSW สามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ 9.1%, 12.5% และ 50% ที่ค่า M เท่ากับ 2, 4 และ 8 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นนั้นสามารถส่งผลในการลดลงของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 4N_3R ที่ใช้วิธี JPSW, JPSF และ JLSW กรณีค่าบางค่าของ M เท่านั้น

ในกรณีโครงข่าย 7N_7R เมื่อพิจารณาผลเฉลี่ยของโครงข่ายที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.7 (ข) กรณี WC เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลี่ยของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายสำหรับวิธีที่มีการสำรองความจุที่ต่างกันคือ วิธี JPSW และ JPSF จะเห็นว่าผลเฉลี่ยที่ได้จากวิธี JPSW มีค่าน้อยกว่าประมาณ 0.4-6% สำหรับค่าทุกค่าของ M และสำหรับวิธี JLSW และ JLSF นั้นวิธี JLSW จะมีค่าน้อยกว่าประมาณ 0-6% ส่วนในกรณี NWC ดังแสดงในตารางที่ 3.7 (ค) นั้นวิธี JPSW จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต่ำกว่าของวิธี JPSF ประมาณ 0-1.6% สำหรับค่าทุกค่าของ M ส่วนวิธี JLSW จะมีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับของวิธี JLSF สำหรับค่าทุกค่าของ M ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการสำรองความจุแบบ Share Wavelength สามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้น้อยมาก ดังนั้นกรณีของโครงข่าย 7N_7R ที่มีความต้องการทางทราฟฟิกแบบออนยูนิฟอร์มนั้นการสำรองความจุแบบ Share Wavelength ไม่ส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ลดลงไม่ว่าจะเป็นกรณีของการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection หรือ Line protection ก็ตาม

เมื่อพิจารณาถึงการป้องกันโครงข่ายที่แตกต่างกันกรณี WC จะพบว่าวิธี JPSW จะใช้เส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่าของวิธี JLSW ประมาณ 0-0.41% สำหรับค่าทุกค่าของ M ส่วนวิธี JPSF และ JLSF จะมีค่าเท่ากันและเป็น 2 เท่าของโครงข่ายที่ไม่มีการป้องกันความเสียหายนั้นคือจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ใช้จะเท่ากับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานในวงแหวนทุกวงที่ได้จัดสรรให้ ส่วนกรณี NWC วิธี JPSW จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่าของวิธี JLSW ประมาณ 0-1.6% สำหรับค่าทุกค่าของ M ดังนั้นสำหรับโครงข่าย 7N_7R วิธีการป้องกันโครงข่ายที่แตกต่างกันจะมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยมากจึงสรุปได้ว่าวิธีการป้องกันโครงข่ายที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลให้โครงข่าย 7N_7R มีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลงได้และเมื่อพิจารณาถึงอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะเห็นว่าวิธี JPSW และ JLSW นั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ประมาณ 0-6.25% ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ที่น้อยมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ส่งผลในการลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 7N_7R ไม่ว่าโครงข่ายจะมีการป้องกันโครงข่ายแบบใดก็ตาม

จากที่กล่าวมาทั้งวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment และ optimized spare fiber assignment จะเห็นว่าแบบจำลองกรณี NWC ที่มีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection นั้น เส้นทางสำรองทั้งหมดจะถูกกำหนดให้มีความยาวคลื่นค่าเดียวกับของเส้นทางใน

สภาวะการทำงานปกติ ดังนั้นถ้าทำการพิจารณากรณีที่เส้นทางสำรองสามารถใช้ความยาวคลื่นค่าอื่นได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกับของเส้นทางในสภาวะการทำงานปกติ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณแสงจึงต้องสามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้ โดยแบบจำลองจะเปลี่ยนจากสมการที่ (3.14) ไปใช้สมการที่ (3.15) แทน ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการในกรณี NWC ที่มีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection โดยที่อุปกรณ์รับ-ส่งสามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้

(ก) โครงข่าย 4N_3R

M	Protection schemes for NWC case			
	PSW	JPSW	PSF	JPSF
1	17	15	20	20
2	11	8	14	14
4	4	4	8	8
8	4	4	8	8

(ข) โครงข่าย 7N_7R

M	Protection schemes for NWC case			
	PSW	JPSW	PSF	JPSF
1	244	243	244	244
2	124	122	124	124
4	64	62	64	64
8	34	32	34	34

จากตารางที่ 3.12 (ก) และ (ข) จะพบว่าผลที่ได้กรณีค่าทุกค่าของ M จะมีค่าเท่ากับของกรณี WC ทั้ง 2 โครงข่าย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สำหรับโครงข่ายที่ใช้ในการทดสอบนั้นการใช้เครื่องรับ-ส่งที่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้จะให้ผลเฉลยเท่ากับของกรณีที่โครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นใน โหนดทุก โหนดในแง่ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่าย

(๗) ความซับซ้อนและเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากตารางที่ 3.5 (๗) และ (๘) และ ตารางที่ 3.8 (๗) และ (๘) แสดงถึงความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 4N_3R และ 7N_7R โดยพิจารณาจากจำนวน constraint (N_c) และจำนวนตัวแปร (N_v) ซึ่งจากตารางเมื่อพิจารณาโครงข่าย กรณี WC จะพบว่าไม่ว่าจะเป็นวิธี JPSW, JPSP, JLSW และ JLSF จำนวนของ constraint และจำนวนตัวแปรไม่ขึ้นอยู่กับค่า M ของเส้นใยแก้วนำแสง ในขณะที่โครงข่าย กรณี NWC จำนวนของตัวแปร และ constraint จะแปรผันตามค่า M ซึ่งข้อสรุปดังกล่าวนี้ตรงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธี Optimized spare fiber assignment อย่างไรก็ตามจากตารางจะเห็นว่าวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment จะมีจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint มากกว่าวิธี Optimized spare fiber assignment ทั้งนี้เนื่องจากต้องเพิ่มจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint ให้กับแบบจำลองเพื่อใช้ในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับเส้นทางในสภาวะการทำงานปกติของโครงข่ายไปพร้อมกับการป้องกันโครงข่ายจากข้อขัดข้องของสายใยแก้วนำแสงด้วย จึงทำให้วิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment มีความซับซ้อนมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณของทั้ง 2 วิธี ตามที่ได้แสดงในตารางที่ 3.9 (ค) จะเห็นว่าวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment ใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานกว่าวิธี Optimized spare fiber assignment ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ M มีค่าเท่ากับ 8 วิธี JPSW จะใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานถึง 16.24 ชั่วโมง ในขณะที่วิธี PSW ใช้เวลาเพียง 0.3 วินาที เท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบความซับซ้อนระหว่างวิธี JPSW, JPSP, JLSW และ JLSF จะเห็นว่าทั้ง 2 โครงข่ายที่ใช้ในการทดสอบนั้น ทั้ง 4 วิธีจะมีจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint เท่ากัน ดังนั้นวิธี JPSW, JPSP, JLSW และ JLSF จะมีความซับซ้อนเหมือนกัน เวลาที่ใช้ในการคำนวณจึงน่าจะใกล้เคียงกัน แต่จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.9 (ค) ซึ่งแสดงเวลาในการหาผลเฉลยของโครงข่าย 7N_7R กรณี NWC จะเห็นว่าข้อสรุปดังกล่าวไม่เป็นจริง เพราะเวลาที่ใช้ในการคำนวณส่วนใหญ่ของวิธี JPSW จะมากกว่าของวิธีอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้คำนวณหาผลเฉลยระหว่างโครงข่าย 4N_3R และโครงข่าย 7N_7R ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.6 และ 3.9 จะพบว่าโดยเฉลี่ยแล้วโครงข่าย 7N_7R ต้องการเวลาในการคำนวณหาผลเฉลยนานกว่าโครงข่าย 4N_3R ซึ่งสำหรับแบบจำลองทุกแบบของโครงข่ายจะใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยไม่เกิน 20 วินาทีเท่านั้น ในขณะที่โครงข่าย 7N_7R ต้องการเวลาในการคำนวณหาผลเฉลยนานที่สุดถึง 16 ชั่วโมง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากแบบจำลองโครงข่าย 7N_7R มีความซับซ้อนมากกว่าโครงข่าย 4N_3R และความซับซ้อนนั้นจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของโครงข่าย อีกทั้งจำนวนวงแหวนที่ใช้ในการจัดสรร (ค่า C ในแบบจำลอง) นั้นจะแปรตามขนาดของโครงข่าย จึงทำให้ความซับซ้อนของแบบจำลองแปรผันตามขนาดของโครงข่ายด้วย

เรื่องสุดท้ายที่จะทำการวิเคราะห์ คือ การวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างผลเฉลยที่หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธี optimized spare fiber assignment ตารางที่ 3.6 (ข) และ (ค) แสดงถึงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่โครงข่าย $4N_{-}3R$ ต้องการ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยระหว่างวิธี PSW กับ JPSW และวิธี LSW กับ JLSW จะเห็นว่าผลเฉลยของวิธี JPSW และ JLSW ต่ำกว่าของวิธี PSW และ LSW ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่นในโครงข่าย กรณี WC วิธี JPSW จะให้ผลเฉลยที่ต่ำกว่าของวิธี PSW ประมาณ 0-27.27% สำหรับค่าทุกค่าของ M และเปอร์เซ็นต์ผลต่างของผลเฉลยของแบบจำลองทั้ง 2 แบบจะต่ำลงเมื่อโครงข่ายใช้วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Line protection กล่าวคือ วิธี JLSW จะให้ผลเฉลยที่ต่ำกว่าของวิธี LSW ประมาณ 0-15% สำหรับค่าทุกค่าของ M ดังนั้นจะเห็นว่าวิธี JPSW เป็นวิธีที่ใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุด

สรุปว่าวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment ให้ผลเฉลยที่ต่ำกว่าของวิธี optimized spare fiber assignment ในกรณีที่โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงมีการสำรองความจุแบบ Share Wavelength ส่วนในกรณีที่มีการสำรองความจุแบบ Share Fiber ผลเฉลยที่ได้จากวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment และวิธี optimized spare fiber assignment ไม่แตกต่างกันเลย อีกทั้งต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงสำรองเป็นจำนวนเท่ากับเส้นใยแก้วนำแสงทำงานในวงแหวนแต่ละวงที่ได้จัดสรรเพื่อรองรับความเสียหายทุกกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายเกิดความเสียหาย ยกเว้นวิธี JPSF กรณี WC ที่ค่า M เท่ากับ 2 สำหรับวงแหวนขนาด 4 โหนดที่มีกราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มนั้นจะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าเส้นใยแก้วนำแสงทำงานเพียงหนึ่งเส้นดังที่ได้อธิบายไว้ในส่วนของการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้

บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง ที่มีเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิกในการออกแบบลักษณะที่ 2

4.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงให้สามารถป้องกันความเสียหายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งได้ โดยในแบบจำลองจะใช้เงื่อนไขการกระจายทราฟฟิกสำหรับการออกแบบลักษณะที่ 2 ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 กล่าวคือ ทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆ สามารถส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยใช้วงแหวนมากกว่าหนึ่งวงได้ ซึ่งหมายความว่าทราฟฟิกจะถูกส่งผ่านจากวงแหวนหนึ่งไปยังอีกวงแหวนหนึ่งที่อยู่ติดกันได้ แบบจำลองดังกล่าวนี้จะใช้วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Line Protection ที่มีการสำรองความจุ 2 แบบ คือ Share Fiber และ Share Wavelength โดยมีวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลอง คือ เพื่อจัดสรรวงแหวน เส้นทางและความยาวคลื่นให้โครงข่ายสามารถใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งได้ แต่เนื่องจากข้อสรุปในบทที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าการใช้การป้องกันโครงข่ายแบบ Line protection ที่มีการสำรองความจุแบบ Share Fiber นั้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ใช้ในโครงข่ายจะเท่ากับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานที่ใช้ในโครงข่ายเสมอไม่ว่าจะเป็นกรณีที่โครงข่ายมีหรือไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นก็ตาม ทำให้เราสามารถหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองสำหรับการสำรองความจุแบบ Share Fiber ได้เมื่อทราบเพียงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานในสถานะการทำงานปกติของ วงแหวนแต่ละวงเท่านั้น ดังนั้นบทนี้จะกล่าวเฉพาะการสำรองความจุแบบ Share Wavelength เพียงอย่างเดียว

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ใช้เงื่อนไขการกระจายทราฟฟิกสำหรับการออกแบบลักษณะที่ 2 โดยแบบจำลองจะพิจารณาถึงผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายทั้งในกรณีที่มีและไม่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย รวมทั้งผลเฉลยในการจัดสรรเส้นทางของโครงข่าย และสุดท้ายจะกล่าวถึงผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและขนาดของโครงข่ายที่มีต่อความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ได้มาจากแนวคิดในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบเมชและใช้โครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงเพื่อรองรับความหนาแน่นของทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายที่มีทราฟฟิกผ่าน โดยการแบ่งทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายให้รองรับโดยวงแหวนที่ครอบคลุมข่ายเชื่อมโยงดังกล่าว ดังนั้นในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายที่ช่องสัญญาณระหว่างคู่โหนดเดินทางผ่านสามารถรองรับด้วยวงแหวนที่ต่างกันได้ ซึ่งก็เป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบในลักษณะที่ 2 นั้นเอง โดยตัวแปรและสัญลักษณ์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

J	เซตของวงแหวนที่ใช้พิจารณาในการเลือกของแบบจำลอง
L	เซตของข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย
N	จำนวนโหนดในโครงข่าย
I	เซตของคู่โหนดซึ่งมีจำนวนสมาชิกเท่ากับ $N(N-1)/2$ คู่โหนด
M	จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น
λ	เซตของความยาวคลื่นที่ใช้ในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้นซึ่งมีจำนวนเท่ากับ M ค่าความยาวคลื่น
n_j	จำนวนโหนดของวงแหวนที่ j ซึ่งเท่ากับจำนวนข่ายเชื่อมโยงของวงแหวน
t_i	ปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดที่ i ซึ่งวัดในหน่วยของช่องสัญญาณการต่อ (connections)
W_j	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานต่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายของวงแหวนที่ j
S_j	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองต่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายของวงแหวนที่ j
K_i	เซตของเส้นทางระหว่างคู่โหนดที่ i
$K_i(l)$	ชั้นเซตของเส้นทางระหว่างคู่โหนดที่ i ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l
$J(l)$	ชั้นเซตของวงแหวนที่ครอบคลุมข่ายเชื่อมโยงที่ l
$L(k)$	ชั้นเซตของข่ายเชื่อมโยงที่เส้นทางที่ k ตัดผ่าน
$L(j)$	ชั้นเซตของข่ายเชื่อมโยงในวงแหวนที่ j ซึ่งมีจำนวนสมาชิกเท่ากับ n_j ข่ายเชื่อมโยง
$x_{i,k}$	ปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดที่ i ที่รองรับด้วยเส้นทางที่ k (ใช้กับกรณี WC)
$x_{i,k,m}$	ปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดที่ i ที่รองรับด้วยเส้นทางที่ k โดยใช้ความยาวคลื่น m (ใช้กับกรณี NWC)
$x_{i,k,l,j}$	ปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดที่ i เส้นทางที่ k ที่ตำแหน่งข่ายเชื่อมโยงที่ l ซึ่งส่วนหนึ่งของเส้นทางที่ k ตัดผ่านนั้น ถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ j ซึ่งเป็นวงแหวนที่ครอบคลุมข่ายเชื่อมโยงที่ l (ใช้กับกรณี WC)

$x_{i,k,m,l,j}$ ปริมาณกราฟฟิกของคูโนดที่ i เส้นทางที่ k ความยาวคลื่น m ที่ตำแหน่งข่ายเชื่อมโยงที่ l ซึ่งส่วนของเส้นทางที่ k ตัดผ่านนั้น ถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ j ซึ่งเป็นวงแหวนหนึ่งที่ครอบคลุมข่ายเชื่อมโยงที่ l (ใช้กับกรณี NWC)

$r_{ij}^{l'}$ เส้นทางสำรองที่รองรับกราฟฟิกของคูโนดที่ i วงแหวนที่ j เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ l' ขาด (ใช้กับกรณี WC)

$r_{ij,m}^{l'}$ เส้นทางสำรองที่รองรับกราฟฟิกของคูโนดที่ i วงแหวนที่ j โดยใช้ความยาวคลื่น m เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ l' ขาด (ใช้กับกรณี NWC)

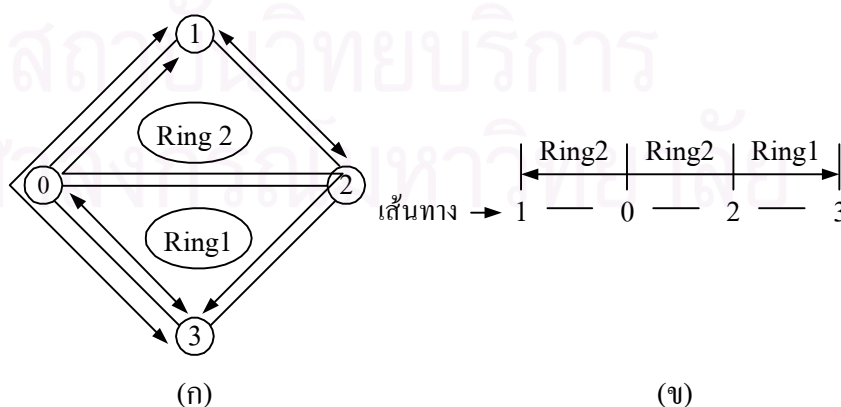
4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่ายนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง (High complexity model) และแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำ (Low complexity model) โดยแบบจำลองทั้งสองแบบต่างก็มี objective function ที่ใช้ในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่น้อยที่สุดเหมือนกันดังนี้

$$\text{Min} : \sum_{j \in J} n_j W_j \quad (4.1)$$

4.2.1.1 แบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง (High complexity model)

แบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงแสดงถึงตัวแปรที่ใช้บอกจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของวงแหวนแต่ละวง เส้นทางและความยาวคลื่นที่แบบจำลองได้จัดสรรให้ อีกทั้งยังมีตัวแปรที่ใช้ในการแสดงถึงข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายที่ช่องสัญญาณระหว่างคูโนดเดินทางผ่านว่าถูกรับด้วยวงแหวนใดด้วย ซึ่งสามารถอธิบายหลักการของแบบจำลองได้จากโครงข่ายตัวอย่างดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้แสดงหลักการของแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง

รูปที่ 4.1 (ก) แสดงถึงโครงข่ายขนาด 4 โหนด 5 ข่ายเชื่อมโยง ซึ่งใช้วงแหวน 2 วงในการรองรับช่องสัญญาณที่ได้จัดสรรเส้นทางไว้ จะเห็นว่าในแต่ละช่วงของช่องสัญญาณสามารถระบุวงแหวนที่ใช้ในการรองรับได้เนื่องจากมีวงแหวนที่ใช้รองรับเพียงวงเดียว ยกเว้นที่ข่ายเชื่อมโยง 0-2 เท่านั้นที่ช่องสัญญาณระหว่างคู่โหนด (1,3) ที่ใช้เส้นทาง 1-0-2-3 จะมีวงแหวนที่สามารถเลือกรองรับได้ 2 วงด้วยกัน ดังนั้นในแบบจำลองจึงต้องมีตัวแปรที่ใช้ระบุว่าช่องสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงนี้จะถูกรองรับด้วยวงใดซึ่งก็คือตัวแปร $x_{i,k,l,j}$ สำหรับกรณี WC และ $x_{i,k,m,l,j}$ สำหรับกรณี NWC ตามที่ได้กล่าวไว้ตอนต้นนั่นเอง จากตัวอย่างที่ใช้อธิบายนั้นกำหนดว่าช่องสัญญาณที่ข่ายเชื่อมโยง 0-2 จะถูกรองรับโดยวงแหวนที่ 2 โดยรูปที่ 4.2 (ข) แสดงถึงวงแหวนที่รองรับในแต่ละช่วงของช่องสัญญาณดังกล่าว ตัวแปรที่ใช้ระบุการรองรับช่องสัญญาณที่ข่ายเชื่อมโยง 0-2 จะถูกเซตให้มากกว่าศูนย์ที่วงแหวนที่ 2 แต่จะเป็นค่าใดนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนช่องสัญญาณ แต่จากตัวอย่างมีช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวจึงถูกเซตเป็นหนึ่งในเพื่อระบุให้รู้ว่าถูกรองรับโดยวงที่ 2 ส่วนวงแหวนที่ 1 จะเซตเป็นศูนย์เพื่อระบุให้รู้ว่าไม่ถูกรองรับโดยวงแหวนที่ 1 ดังนั้นถ้าในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงซึ่งเป็นทางผ่านของช่องสัญญาณมีวงแหวนที่สามารถรองรับได้หลายวงก็จะต้องมีตัวแปรที่ใช้ระบุเท่ากับจำนวนวงแหวนที่ครอบคลุมข่ายเชื่อมโยงนั้น โดยตัวแปรแต่ละตัวต้องมีดัชนีเพื่อระบุเพิ่มอีกด้วยว่าเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางใด (k) ระหว่างคู่โหนดใด (i) ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยง (l) จะได้ทราบถึงตำแหน่งของโหนดที่เป็นตัวส่งผ่านได้ถูกต้อง ซึ่งจากตัวอย่างทำให้ทราบได้ว่าจะใช้โหนด 2 เป็นตัวส่งผ่านช่องสัญญาณที่ใช้เส้นทาง 1-0-2-3 ในตำแหน่งข่ายเชื่อมโยง 0-2 จากวงแหวนที่ 2 มายังวงแหวนที่ 1

โดยแบบจำลองจะมี constraint ต่างๆดังนี้

กรณี WC

1. พิจารณาคู่โหนดแต่ละคู่ ปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดที่ i สามารถรองรับโดยเส้นทางที่ใช้ประโยชน์ของคู่โหนดที่ i ได้

$$\sum_{k \in K_i} x_{i,k} = t_i \quad \forall i \in I \quad (4.2)$$

2. พิจารณาคู่โหนดแต่ละคู่ i เส้นทางที่ k สำหรับข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่าย l ที่เส้นทางที่ k ตัดผ่านปริมาณทราฟฟิกที่ใช้เส้นทางที่ k สามารถรองรับโดยวงแหวนที่ครอบคลุมข่ายเชื่อมโยง l นั้นคือสามารถพิจารณาเลือกวงแหวนในการรองรับทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายที่เส้นทางที่ k ตัดผ่านได้

$$\sum_{j \in J(l)} x_{i,k,l,j} = x_{i,k} \quad \forall l \in L(k); \forall k \in K_i; \forall i \in I \quad (4.3)$$

3. พิจารณาวงแหวนที่ละวง สำหรับข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายที่ l ปริมาณกราฟฟิที่ถูกรองรับโดย ข่ายเชื่อมโยงที่ l ของวงแหวนที่ j นั้นจะต้องไม่เกินผลคูณระหว่างจำนวนความยาวคลื่นที่มีลติเพล็กซ์กับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานต่อข่ายเชื่อมโยงซึ่งผลคูณดังกล่าวหมายถึงจำนวนการต่อของช่องสัญญาณแสงมากที่สุดที่เกิดขึ้นได้

$$MW_j - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i(l)} x_{i,k,l,j} \geq 0 \quad \forall l \in L(j); \forall j \in J \quad (4.4)$$

กรณี NWC

1. พิจารณาคู่โหนดแต่ละคู่ ปริมาณกราฟฟิของคู่โหนดที่ i สามารถรองรับโดยเส้นทางที่ใช้ประโยชน์ของคู่โหนดที่ i ได้ โดยเส้นทางแต่ละเส้นจะถูกจัดสรรค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง

$$\sum_{m \in \lambda} \sum_{k \in K_i} x_{i,k,m} = t_i \quad \forall i \in I \quad (4.5)$$

2. พิจารณาคู่โหนดแต่ละคู่ i เส้นทางที่ k สำหรับข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่าย l ที่เส้นทางที่ k ตัดผ่านปริมาณกราฟฟิที่ใช้เส้นทางที่ k ความยาวคลื่น m สามารถรองรับโดยวงแหวนที่ครอบคลุมข่ายเชื่อมโยง l นั่นคือสามารถพิจารณาเลือกวงแหวนในการรองรับกราฟฟิในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายที่เส้นทางที่ k ตัดผ่านได้

$$\sum_{j \in J(l)} x_{i,k,m,l,j} = x_{i,k,m} \quad \forall m \in \lambda; \forall l \in L(k); \forall k \in K_i; \forall i \in I \quad (4.6)$$

3. พิจารณาวงแหวนที่ละวง สำหรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายของวงแหวนสามารถรองรับกราฟฟิที่ส่งผ่านมาได้ โดยจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่อข่ายเชื่อมโยงของวงแหวนจะเท่ากับจำนวนครั้งของการใช้ความยาวคลื่นซ้ำกันมากที่สุด

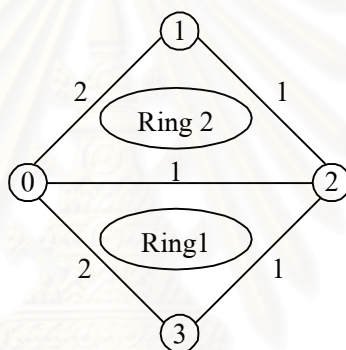
$$W_j - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i(l)} x_{i,k,m,l,j} \geq 0 \quad \forall m \in \lambda; \forall l \in L(j); \forall j \in J \quad (4.7)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.1.2 แบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำ (Low complexity model)

แบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำนั้นแสดงถึงตัวแปรที่ใช้บอกจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของวงแหวนกับเส้นทางและความยาวคลื่นที่แบบจำลองได้จัดสรรให้เท่านั้น แต่ไม่มีตัวแปรที่ใช้ในการแสดงว่าแต่ละช่วงของช่องสัญญาณระหว่างคู่โหนดนั้นถูกรองรับด้วยวงแหวนใด นั่นคือไม่มีตัวแปรที่แสดงถึงการส่งผ่านระหว่างวงแหวนนั่นเอง

หลักการของแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำคือ จะจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับทราฟฟิกของคู่โหนดแต่ละคู่ จากนั้นก็จะทำการพิจารณาความหนาแน่นของทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายยกตัวอย่างดังรูปที่ 4.2 แสดงโครงข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับทราฟฟิกในคู่โหนดแต่ละคู่ไว้ ซึ่งได้มาจากรูปที่ 4.1 โดยตัวเลขที่ระบุในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายนั้นแสดงถึงจำนวนช่องสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงนั้น



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้แสดงหลักการของแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำ

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าที่ข่ายเชื่อมโยง 0-2 นั้นมีช่องสัญญาณเท่ากับ 1 ช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นช่องสัญญาณของคู่โหนด (1,3) ที่ใช้เส้นทาง 1-0-2-3 ในการต่อระหว่างคู่โหนด เมื่อพิจารณาที่ค่า M เท่ากับ 1 จะพบว่าช่องสัญญาณที่ข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวจะถูกรองรับโดยวงแหวนวงที่ 1 หรือ 2 ก็ได้ เนื่องจากวงแหวนทั้ง 2 วงต่างก็สามารถรองรับช่องสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงนี้ได้ โดยไม่มีตัวแปรที่เป็นตัวบอกถึงตำแหน่งของโหนดที่จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านว่าจะเป็นโหนดใดระหว่างโหนด 0 หรือโหนด 2 ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการออกแบบเพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในแต่ละวงแหวนที่เลือกและการจัดสรรเส้นทางที่เหมาะสมเท่านั้น โดยไม่บอกถึงการส่งผ่านวงแหวนทำให้จำนวนตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองนี้มีน้อยกว่าแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถที่จะใช้กับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่กว่าได้ แต่โครงข่ายที่ใช้จะมีขนาดเท่าใดนั้นจะแสดงในส่วนของการวิเคราะห์ความซับซ้อนของแบบจำลองต่อไป

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมี constraint ต่างๆดังนี้

กรณี WC

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ constraint ที่ (4.2) และ

- พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่ละข่าย จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานของวงแหวนที่เลือกซึ่งครอบคลุมข่ายเชื่อมโยง l ต้องสามารถรองรับทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยง l ได้ ซึ่งจะต้องไม่เกินผลคูณระหว่างจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพล็กซ์กับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานต่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายของวงแหวนที่ครอบคลุมข่ายเชื่อมโยง l ซึ่งผลคูณดังกล่าวหมายถึงจำนวนการต่อของช่องสัญญาณแสงมากที่สุดที่เกิดขึ้นได้ในข่ายเชื่อมโยง l

$$M \sum_{j \in I(l)} w_j - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i(l)} x_{i,k} \geq 0 \quad \forall l \in L \quad (4.8)$$

กรณี NWC

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ constraint ที่ (4.5) และ

- พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่ละข่าย โดยแบ่งโครงข่ายออกเป็น M มิติซึ่งแต่ละมิติใช้ค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน สำหรับแต่ละมิติจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานของวงแหวนที่เลือกซึ่งครอบคลุมข่ายเชื่อมโยงที่ l สามารถรองรับจำนวนช่องสัญญาณความยาวคลื่น m ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l ได้ ดังนั้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถรองรับช่องสัญญาณทั้งหมดในข่ายเชื่อมโยงที่ l ได้ คือจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในมิติที่รองรับจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้ความยาวคลื่นซ้ำมากที่สุดภายในข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของวงแหวนแต่ละวง

$$\sum_{j \in I(l)} w_j - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i(l)} x_{i,k,m} \geq 0 \quad \forall m \in \lambda ; \forall l \in L \quad (4.9)$$

ถึงแม้ว่าแบบจำลองทั้ง 2 แบบได้แก่แบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงและแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำจะมีความซับซ้อนที่ต่างกันทั้งทางด้านของจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint ก็ตาม แต่ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองจะเท่ากัน

4.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายนั้น จะทำการจัดสรรวงแหวน เส้นทางและความยาวคลื่นเพื่อ Minimize จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองของวงแหวนแต่ละวงที่จัดสรรให้รองรับความต้องการทาง ทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่ายทั้งสภาวะการทำงานปกติและสภาวะเมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยง

หนึ่งได้ โดยมี objective function ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดของโครงข่ายคือ

$$\text{Min} : \sum_{j \in J} n_j (W_j + S_j) \quad (4.10)$$

โดยมี constraint ต่างๆดังนี้

กรณี WC

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ constraint ที่ (4.2), (4.3) และ (4.4) ของกรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่าย และ

1. พิจารณาวงแหวนที่ละวง ทราฟฟิกที่ถูกรองรับด้วยข่ายเชื่อมโยง l' ที่เสียหายของวงแหวนที่ j จะถูกเปลี่ยนไปใช้เส้นทางตรงข้าม โดยวนสัญญาณกลับในตำแหน่งของโหนดที่ติดกับข่ายเชื่อมโยง l'

$$r_{i,j}^{l'} = \sum_{k \in K_i(l')} x_{i,k,l',j} \quad \forall l' \in L(j); \forall i \in I; \forall j \in J \quad (4.11)$$

2. พิจารณาวงแหวนที่ละวง เมื่อข่ายเชื่อมโยง l' เสียหาย จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองต่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายจะต้องเพียงพอที่จะรองรับเส้นทางสำรองที่ผ่านข่ายเชื่อมโยง l ที่ไม่ใช่ข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายของวงแหวนได้ในทุกๆกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย

$$MS_j - \sum_{i \in I} r_{i,j}^{l'} + (MW_j - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i(l)} x_{i,k,l,j}) \geq 0 \quad \forall l \in L(j); l \neq l'; \forall j \in J \quad (4.12)$$

โดยพจน์ที่ 3 ของสมการเป็นช่องสัญญาณที่ไม่ได้ถูกใช้งานในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานซึ่งสามารถใช้รองรับเส้นทางสำรองได้ซึ่งก็คือ การสำรองความจุแบบ Share Wavelength นั้นเอง

กรณี NWC

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ constraint ที่ (4.5), (4.6) และ (4.7) ของกรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่าย และ

1. พิจารณาวงแหวนที่ละวง ทราฟฟิกที่ถูกรองรับด้วยข่ายเชื่อมโยง l' ที่เสียหายของวงแหวนที่ j จะถูกเปลี่ยนไปใช้เส้นทางตรงข้าม โดยวนสัญญาณกลับในตำแหน่งของโหนดที่ติดกับข่ายเชื่อมโยงเสียหาย l' โดยที่เส้นทางที่วนสัญญาณออกจากเส้นใยแก้วนำแสงทำงานจะต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกันกับก่อนที่จะวนสัญญาณ

$$r_{i,j,m}^{l'} = \sum_{k \in K_i(l')} x_{i,k,m,l',j} \quad \forall m \in \lambda; \forall l' \in L(j); \forall i \in I; \forall j \in J \quad (4.13)$$

2. พิจารณาวงแหวนที่ละวง เมื่อข่ายเชื่อมโยง l' เสียหาย จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองต่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายจะต้องเพียงพอที่จะรองรับเส้นทางสำรองที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l ที่ไม่ใช่ข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายของวงแหวน ในทุกๆกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย

$$s_j - \sum_{i \in I} r_{i,j,m}^{l'} + (w_j - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i(l)} x_{i,k,m,l,j}) \geq 0 \quad \forall m \in \lambda; \forall l \in L(j); l \neq l'; \forall j \in J \quad (4.14)$$

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนของแบบจำลองผ่านจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนตัวแปรและ จำนวน constraint ของแบบจำลองที่ได้กล่าวถึงข้างต้นทั้งหมด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลองกรณีที่มีและไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและเป็นกรณีกราฟฟิกของ คู่โหนดทุกคู่มีค่ามากกว่าศูนย์

No protection	Nv		Nc	
	NWC	WC	NWC	WC
Low complexity model	$M \sum_{i \in I} n(K_i) + n(J)$	$\sum_{i \in I} n(K_i) + n(J)$	$n(I) + Mn(L)$	$n(I) + n(L)$
High complexity model	$M \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L(k)} n(J(l))$ $+ M \sum_{i \in I} n(K_i) + n(J)$	$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L(k)} n(J(l)) + \sum_{i \in I} n(K_i)$ $+ n(J)$	$n(I) + M \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} n(L(k)) + M \sum_{j \in J} n(L(j))$	$n(I) + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} n(L(k)) + \sum_{j \in J} n(L(j))$
Line protection	$M \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L(k)} n(J(l)) + M \sum_{i \in I} n(K_i)$ $+ 2n(J) + n(I)M \sum_{j \in J} n(L(j))$	$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L(k)} n(J(l)) + \sum_{i \in I} n(K_i)$ $+ 2n(J) + n(I) \sum_{j \in J} n(L(j))$	$n(I) + M \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} n(L(k)) + 2M \sum_{j \in J} n(L(j))$ $+ n(I)M \sum_{j \in J} n(L(j))$	$n(I) + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} n(L(k)) + 2 \sum_{j \in J} n(L(j))$ $+ n(I) \sum_{j \in J} n(L(j))$

หมายเหตุ : เมื่อ $n(\cdot)$ คือจำนวนสมาชิกของเซตที่อยู่ในวงเล็บ

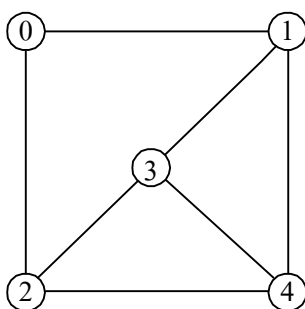
4.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลเฉลย

ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4.2 สามารถทำได้โดยใช้ โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ CPLEX 6.6 [18] ในการคำนวณหาต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายทั้งหมด โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลดังกล่าวคือ เครื่อง PC Intel Pentium 667 MHz โดยมี RAM ขนาด 128 MB

ในการหาผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะสมมติให้สายเชื่อมโยงทุกๆสายของโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์มีระยะทางเท่ากันทั้งหมด เพื่อไม่ให้มีผลต่อการคำนวณหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย โดยจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่ได้จะเป็นเพียงการสื่อสารทางเดียวเท่านั้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาการสื่อสาร 2 ทาง ซึ่งแต่ละทางใช้เส้นใยแก้วนำแสงคนละเส้น ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองจึงต้องคูณด้วย 2 และเนื่องจากแบบจำลองในบทนี้ช่องสัญญาณของคู่โหนดสามารถรองรับได้ด้วยวงแหวนมากกว่าหนึ่งวง ดังนั้นบางโหนดจะต้องมีสวิตช์ในการส่งผ่านช่องสัญญาณระหว่างวงแหวนซึ่งการส่งผ่านวงแหวนจะทำอย่างเป็นอิสระโดยไม่มีการบังคับให้โหนดใดเป็นตัวส่งผ่าน ทั้งนี้เพื่อให้แบบจำลองสามารถหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายได้น้อยที่สุดสำหรับการออกแบบดังกล่าว

4.3.1 ผลของจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง และอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย

ในส่วนนี้จะทดสอบแบบจำลองกับโครงข่ายตัวอย่างขนาด 5 โหนด 7 สายเชื่อมโยงดังแสดงในรูปที่ 4.3 กำหนดให้โครงข่ายมีความต้องการปริมาณทราฟฟิกที่มีรูปแบบยูนิฟอร์ม โดยจำนวนการต่อที่ต้องการในคู่โหนดแต่ละคู่มีค่าเท่ากับ 1 ช่องสัญญาณ และทำการทดสอบที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 5 กับโครงข่ายที่ไม่มีการป้องกันความเสียหาย (No protection) และโครงข่ายที่คำนึงถึงการป้องกันโครงข่ายจากสายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบที่ค่าทราฟฟิก และค่า M ดังกล่าวนี้สามารถวิเคราะห์ผลเฉลยได้ชัดเจนและเหมาะสมในด้านของเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยสำหรับโครงข่ายที่ใช้ทดสอบดังกล่าว



รูปที่ 4.3 โครงข่าย 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง

ตารางที่ 4.2 ผลของค่า M และการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่าย (ก) กรณีที่โครงข่ายไม่มีการป้องกันความเสียหาย (No protection) และ (ข) กรณีที่โครงข่ายมีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย

(ก)

M	No protection	
	NWC	WC
1	13	13
2	8	8
3	5	5
4	5	5
5	5	5

(ข)

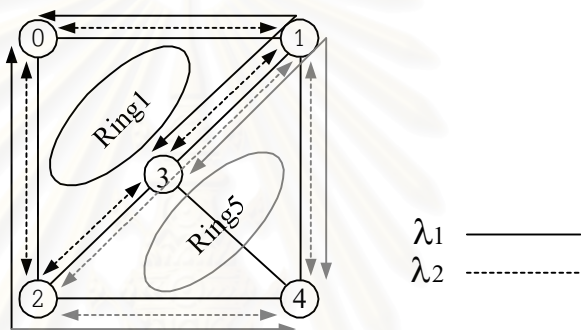
M	Protection	
	NWC	WC
1	26	26
2	16	13
3	10	10
4	10	8
5	10	8

ต่อไปจะทำการวิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย เมื่อพิจารณาถึงกรณี No protection ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 (ก) จะเห็นว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่มีผลที่จะทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลง นั่นคือจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี WC และ NWC จะมีค่าเท่ากับ 13, 8, 5, 5 และ 5 เส้นที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 5 ตามลำดับ จากผลที่ได้จะเห็นว่าเมื่อ M เพิ่มขึ้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้จะลดลงเนื่องจากจำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้นเพิ่มขึ้นซึ่งก็จะส่งผลให้จำนวนวงแหวนที่จัดสรรให้ลดลงด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะจำนวนช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นทำให้วงแหวนแต่ละวงมีช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้งานเหลือมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงต่ำส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้สูง ดังนั้นกราฟฟิกของคู่โหนดซึ่งสามารถรองรับช่องสัญญาณที่เหลือดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม ก็จะเลือกที่จะรองรับกราฟฟิกในวงแหวนที่มีช่องสัญญาณที่เหลือเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงให้สูงที่สุดทำให้วงแหวนบางวงมีจำนวนกราฟฟิกที่รองรับมากขึ้นซึ่งก็ส่งผลให้จำนวนวงแหวนที่ใช้รองรับ กราฟฟิกลดลงเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งผลสรุปดังกล่าวนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แต่ส่วนที่แตกต่างกันคือ ที่ค่าบางค่าของ M ไม่จำเป็นต้องใช้วงแหวนขนาดใหญ่ในการรองรับกราฟฟิกของคู่โหนดที่อยู่ใกล้กันเหมือนการออกแบบในลักษณะที่ 1 ในบทที่ 3 ยกตัวอย่างเช่น กรณี NWC ที่ค่า M เท่ากับ 2 ในตารางที่ 4.2 (ก) สามารถแสดงรายละเอียดของวงแหวนและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นผลเฉลยของแบบจำลองได้ดังในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของวงแหวนและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายกรณี NWC ที่ค่า M=2

Ring	Number of nodes	Description of Ring	Number of fibers per link	Number of fibers
1	4	0-1-3-2-0	1	4
2	5	0-1-3-4-2-0	-	-
3	4	0-1-4-2-0	-	-
4	5	0-1-4-3-2-0	-	-
5	4	1-3-2-4-1	1	4
6	3	1-3-4-1	-	-
7	3	2-3-4-2	-	-
Total fiber				8

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าโครงข่ายจะใช้วงแหวนเพียง 2 วง คือวงที่ 1 และ 5 ในการรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่ายโดยใช้โหนดที่ 2 เป็นตัวส่งผ่านทราฟฟิกของคู่โหนด (0,4) จากวงที่ 1 ไปยังวงที่ 5 ซึ่งถ้าเป็นการออกแบบในลักษณะที่ 1 ในบทที่ 3 จะใช้วงที่ 1 และ 4 ซึ่งวงที่ 4 จะมีขนาดใหญ่ที่สุด ทั้งนี้เพื่อสามารถรองรับทราฟฟิกของคู่โหนดที่อยู่ไกลกันได้ด้วยวงแหวนเพียงวงเดียวจึงต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า 1 เส้นซึ่งถ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วมากกว่าถึง 12.5% เมื่อเทียบกับการออกแบบในลักษณะที่ 2 แต่จะเห็นว่าการออกแบบในลักษณะที่ 2 จะต้องเพิ่มสวิตช์ที่โหนดที่ 2 เพื่อใช้ในการส่งผ่านทราฟฟิกจากวงแหวนหนึ่งไปยังวงแหวนอีกวงหนึ่ง ซึ่งรายละเอียดในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.4 โดยเส้นทึบแสดงช่องสัญญาณที่รองรับโดยวงแหวนที่ 1 ส่วนเส้นจางแสดงช่องสัญญาณที่รองรับโดยวงแหวนที่ 5



รูปที่ 4.4 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่าย $5N_7L$ ที่ค่า $M=2$

ส่วนกรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย จากตารางที่ 4.2 (ข) จะเห็นว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ 18.75%, 20% และ 20% ที่ค่า M เท่ากับ 2, 4 และ 5 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสำหรับโครงข่ายที่ใช้ในการทดสอบนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่มีผลในการลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในกรณีที่โครงข่ายไม่มีการป้องกันความเสียหาย ส่วนโครงข่ายที่มีการป้องกันความเสียหาย อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมีผลในการลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ประมาณ 19-20% สำหรับค่าบางค่าของ M ที่ใช้ในการทดสอบเท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่มีและไม่มี การป้องกันโครงข่ายจะพบว่ากรณี NWC จะต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มเพื่อรองรับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายถึง 100% ของกรณี No protection สำหรับค่าทุกค่าของ M ส่วนในกรณี WC จะต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มประมาณ 60-100% ดังนั้นสรุปได้ว่าโครงข่ายที่มีการป้องกันความเสียหาย กรณี WC โครงข่ายจะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มในเปอร์เซ็นต์ที่น้อยกว่ากรณี NWC

4.3.2 การจัดสรรเส้นทางของโครงข่าย

ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์เกี่ยวกับการจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการซึ่งการจัดสรรเส้นทางดังกล่าวจะส่งผลให้สามารถใช้โครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงในการรองรับเส้นทางทั้งหมดที่ได้จัดสรรด้วยจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุด ในการทดสอบนั้นจะใช้โครงข่ายตัวอย่างขนาด 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง และใช้ทราฟฟิกแบบยูนิฟอর্মเท่ากับ 1 ช่องสัญญาณ ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 ซึ่งการที่เราเลือกใช้โครงข่ายตัวอย่างและค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังกล่าว เนื่องจากสามารถที่จะหาผลเฉลยได้ในเวลาที่เหมาะสม โดยการทดสอบจะทำการจำกัดจำนวนเส้นทางที่ใช้ในแบบจำลองด้วยจำนวนเส้นทางต่อคู่โหนด (Number of routes per node pair) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 6 ทั้งนี้เนื่องจากโครงข่ายที่ทดสอบมีเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดของคู่โหนดหนึ่งในโครงข่ายถึง 6 เส้นทาง ดังนั้นค่า Number of routes per node pair จึงมีค่าถึง 6 โดยถ้า Number of routes per node pair มีค่าเป็น 1 หมายถึง เลือกใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดในคู่โหนดแต่ละคู่เท่านั้น และ ถ้ามีค่าเป็น 2, 3, 4, 5 และ 6 หมายถึงคู่โหนดแต่ละคู่สามารถเลือกใช้เส้นทางที่ยาวกว่าได้ตามลำดับ โดยการทดสอบจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี คือกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC) และกรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC) ซึ่งทั้งสองกรณีจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 โครงข่าย คือโครงข่ายที่มีและไม่มีการป้องกันข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย

ก่อนที่จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลเฉลยจะขออนุญาตพารามิเตอร์ 2 ตัวซึ่งใช้พิจารณาในการวิเคราะห์ คือ

1. ระยะทางเฉลี่ยต่อการต่อ (Average distance per connection) ซึ่งวัดเป็นจำนวน Hop หรือจำนวนข่ายเชื่อมโยงโดยเฉลี่ยที่ช่องสัญญาณหนึ่งการต่อใช้ในการเดินทางจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง
2. เส้นทางเฉลี่ยที่สั้นที่สุด (Average shortest path) คือ เส้นทางที่สั้นที่สุดเฉลี่ยของทุกๆคู่โหนดในโครงข่าย ซึ่งวัดเป็นจำนวน Hop เฉลี่ยต่อคู่โหนด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับ จำนวนเส้นทางต่อคู่โหนดของ
 โครงข่ายที่มีและไม่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 (ก)
 กรณี NWC และ (ข) กรณี WC

(ก)

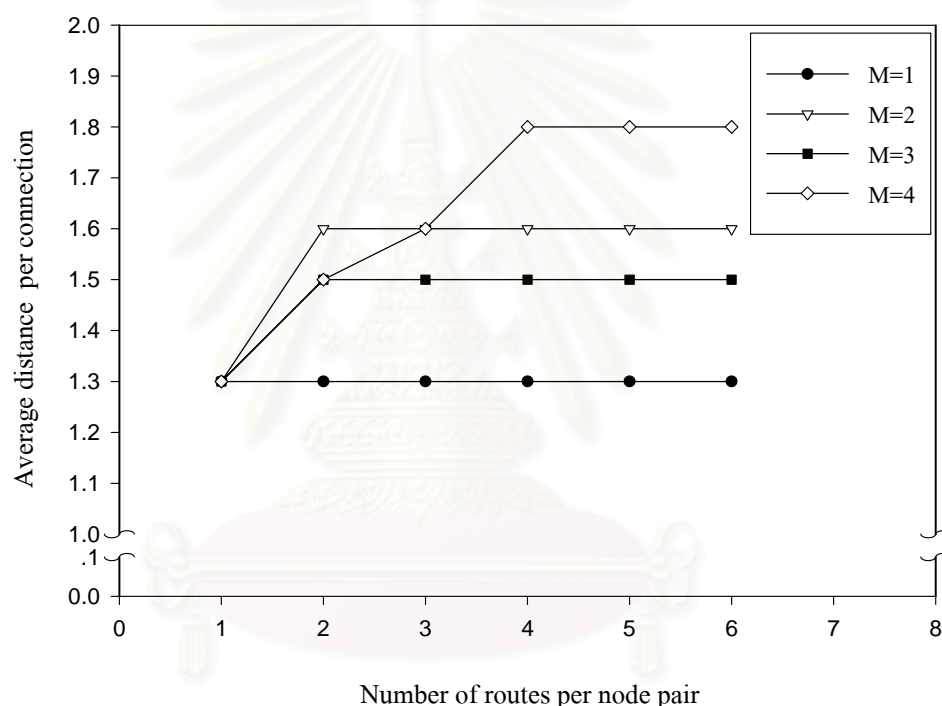
Number of routes per node pair	No protection				Protection			
	M=1	M=2	M=3	M=4	M=1	M=2	M=3	M=4
1	17	10	10	9	30	18	14	14
2	13	8	5	5	26	16	10	10
3	13	8	5	5	26	16	10	10
4	13	8	5	5	26	16	10	10
5	13	8	5	5	26	16	10	10
6	13	8	5	5	26	16	10	10

(ข)

Number of routes per node pair	No protection				protection			
	M=1	M=2	M=3	M=4	M=1	M=2	M=3	M=4
1	17	10	10	9	30	15	11	10
2	13	8	5	5	26	13	10	8
3	13	8	5	5	26	13	10	8
4	13	8	5	5	26	13	10	8
5	13	8	5	5	26	13	10	8
6	13	8	5	5	26	13	10	8

(ก) กรณีที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC)

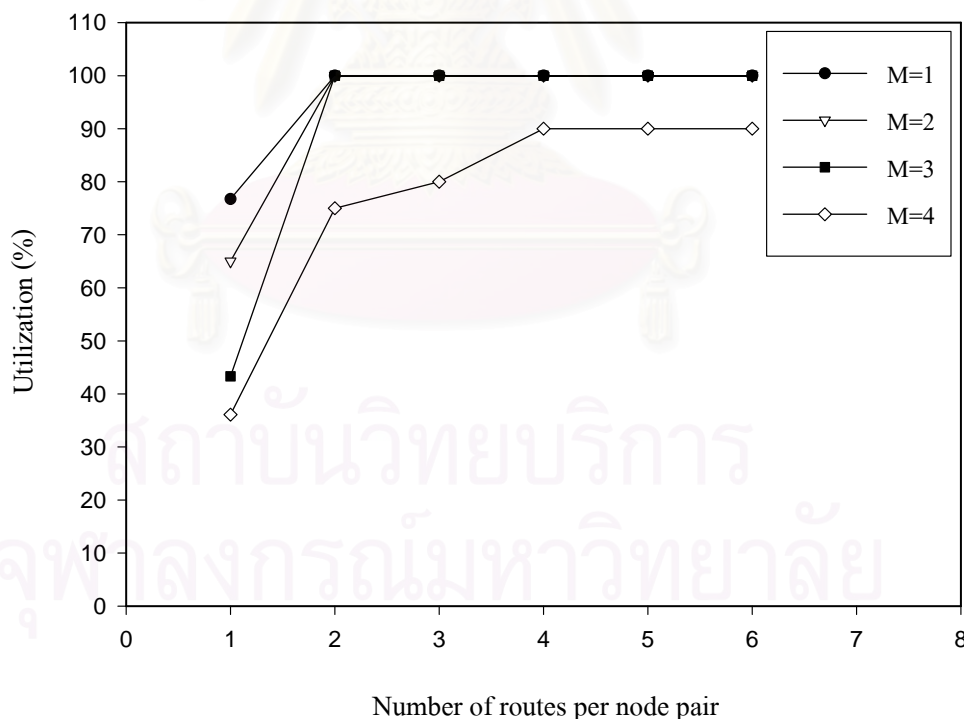
จากตารางที่ 4.4 (ก) กรณีที่โครงข่ายไม่มีการป้องกันความเสียหายจะเห็นว่าที่ค่า Number of routes per node pair เป็น 1 โครงข่ายจะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับ 17, 10, 10 และ 9 เส้น ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มค่า Number of routes per node pair เป็น 2 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจะลดลงจากเดิมคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 23.5%, 20%, 50% และ 44.44% ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 ตามลำดับ และจะคงที่ตลอดถึงแม้จะเพิ่มค่า Number of routes per node pair สูงกว่านี้ก็ตาม



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average distance per connection กับ Number of routes per node pair ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 สำหรับโครงข่าย 5N_7L ที่ไม่มีการป้องกันความเสียหาย

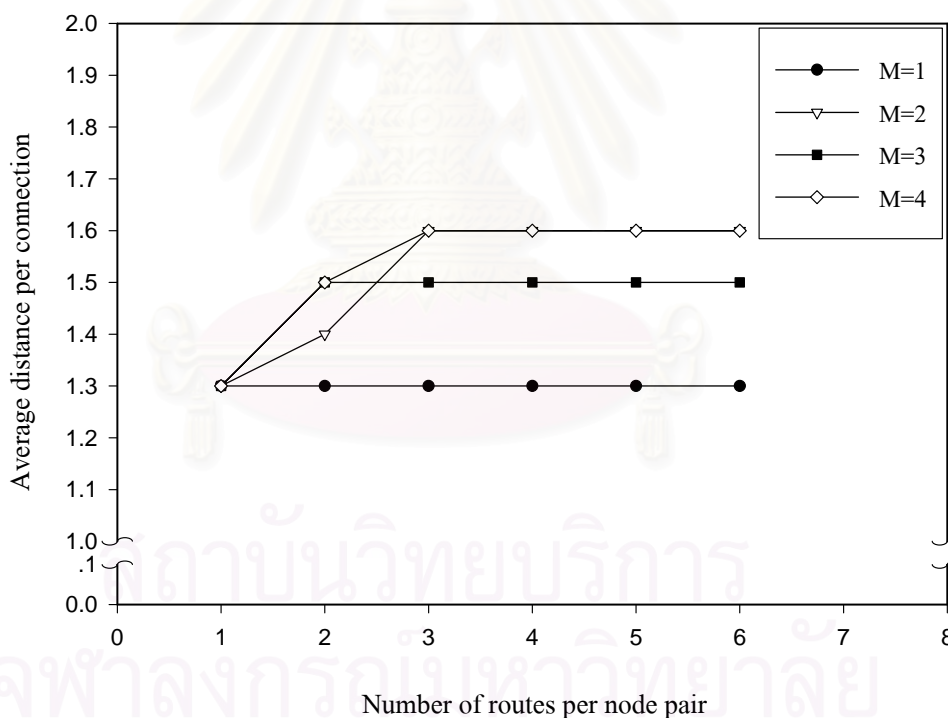
เมื่อพิจารณาถึงระยะทางเฉลี่ยต่อการต่อ (Average distance per connection) ดังในรูปที่ 4.5 จะพบว่าที่ค่า M เท่ากับ 1 นั้น ค่า Average distance per connection จะมีค่าคงที่ตลอดค่า Number of routes per node pair ที่เปลี่ยนไปและมีค่าเท่ากับเส้นทางเฉลี่ยที่สั้นที่สุด (Average shortest path) ของโครงข่าย 5N_7L คือ 1.3 แต่เมื่อกลับไปดูในตารางที่ 4.4 (ก) จะเห็นว่าที่ค่า Number of routes per node pair เป็น 1 จะไม่สามารถทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุด แต่พอมีค่าเป็น 2 กลับได้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุด ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากในคู่โหนดบางคู่ของโครงข่ายจะมี

เส้นทางที่สั้นที่สุดที่เท่ากันอยู่ถึง 2 และ 3 เส้นทาง ดังนั้นเส้นทางที่สั้นที่สุดที่ค่า Number of routes per node pair เท่ากับ 1 ซึ่งกำหนดให้แบบจำลองเลือกใช้อาจไม่ใช่เส้นทางที่เหมาะสม ดังนั้นเมื่อค่า Number of routes per node pair เป็น 2 คู่โหนดบางคู่ก็จะเลือกเส้นทางที่เหมาะสมกว่าซึ่งก็ยังคงเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดนั่นเองจึงทำให้ค่า Average distance per connection คงที่ตลอดที่ค่า 1.3 และเมื่อพิจารณาที่ค่า M เท่ากับ 2, 3 และ 4 จะเห็นว่าที่ค่า Number of routes per node pair ตั้งแต่ 2 ขึ้นไป นั้นค่า Average distance per connection จะมากกว่า 1.3 หมายความว่าโครงข่ายจะเลือกเส้นทางที่ยาวขึ้นเพื่อใช้ช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นบางส่วนของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งเส้นทางที่สั้นไม่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการใช้เส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นว่าที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 3 นั้นที่ค่า Number of routes per node pair ตั้งแต่ 2 ขึ้นไปสามารถทำให้ Utilization สูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ค่า M เท่ากับ 4 นั้น Utilization จะไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าค่า M เพิ่มขึ้นโครงข่ายจะต้องใช้เส้นทางที่ยาวขึ้นก็ตาม แต่ก็มีค่า Average distance per connection ไม่เกิน 2.6 ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางระหว่างเส้นทางเฉลี่ยที่สั้นที่สุดและยาวที่สุดของโครงข่ายซึ่งเท่ากับ 1.3 และ 3.9 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโครงข่ายยังคงเลือกใช้เส้นทางโดยเฉลี่ยในคู่โหนดแต่ละคู่ที่สั้นในการรองรับทราฟฟิก



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Utilization กับ Number of routes per node pair ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 สำหรับโครงข่าย 5N_7L ที่ไม่มีการป้องกันความเสียหาย

เมื่อพิจารณาถึงโครงข่ายที่มีการป้องกันข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายดังแสดงในตารางที่ 4.4 (ก) ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 จะเห็นว่าเมื่อค่า Number of routes per node pair เป็น 1 โครงข่ายจะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับ 30, 18, 14 และ 14 เส้น ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มค่า Number of routes per node pair เป็น 2 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจะลดลงจากเดิมคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 13.33%, 11.11%, 28.57% และ 28.57% ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 ตามลำดับ และจะคงที่ตลอดถึงแม้จะเพิ่มค่า Number of routes per node pair สูงกว่านี้ก็ตาม รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Average distance per connection กับ Number of routes per node pair ของโครงข่ายที่มีการป้องกันความเสียหาย พบว่าที่ค่า M เท่ากับ 1 จะเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดคือมีค่า Average distance per connection เท่ากับ 1.3 และที่ค่า M เท่ากับ 2, 3 และ 4 จะมีค่า Average distance per connection มากกว่า 1.3 ซึ่งหมายความว่า จะใช้เส้นทางที่ยาวขึ้นเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์เส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั่นเอง ซึ่งข้อสรุปดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีการป้องกันความเสียหาย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Average distance per connection กับ Number of routes per node pair ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 4 สำหรับโครงข่าย 5N_7L ที่มีการป้องกันข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย

(ข) กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC)

กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นดังแสดงในตารางที่ 4.4 (ข) ไม่ว่าจะเป็นโครงข่ายที่มีหรือไม่มีการป้องกัน โครงข่ายก็ตาม ผลของการจัดสรรเส้นทางจะมีข้อสรุปเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มียุอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นทุกประการ

จากที่กล่าวมาในทุกกรณีจะเห็นว่าที่ค่า M เท่ากับ 1 โครงข่ายจะเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ค่า M เท่ากับ 1 ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยเส้นทางที่สั้นที่สุดของโครงข่ายขนาดต่างๆ เมื่อทำการใช้แบบจำลองทดสอบที่กราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มสำหรับโครงข่ายที่มีและไม่มี การป้องกันความเสียหายจะเห็นว่าค่า Average distance per connection จะเท่ากับ Average shortest path of network ในทุกโครงข่าย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ค่า M เท่ากับ 1 นั้นการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด จะทำให้โครงข่ายใช้เส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุด เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้เส้นทางสั้นที่สุด นั้นจะทำให้ความหนาแน่นของกราฟฟิกโดยเฉลี่ยในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายนั้นต่ำที่สุดซึ่งส่งผลให้ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของวงแหวนที่รองรับกราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายนั้นต่ำที่สุดด้วย

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าระหว่าง Average shortest path of network กับ Average distance per connection ของโครงข่ายขนาดต่างกัน 5 โครงข่าย ที่ค่า M เท่ากับ 1 สำหรับกราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม เท่ากับ 1

Network	4N_5L	5N_7L	6N_9L	7N_9L	7N_11L
Average shortest path of network	1.167	1.3	1.4	1.667	1.476
Average distance per connection	1.167	1.3	1.4	1.667	1.476

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.3 ความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะวิเคราะห์ผ่านจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลอง โดยจะศึกษาถึงผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและขนาดของโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

4.3.3.1 ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปร จำนวน constraint และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะทดสอบแบบจำลองกับโครงข่ายตัวอย่างที่ใช้ในหัวข้อที่ 4.3.1 ที่ค่าทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มเท่ากับ 1 ช่องสัญญาณ และค่า M เท่ากับ 1 ถึง 6 โดยตารางที่ 4.6 แสดงผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวน constraint (Nc) จำนวนตัวแปร (Nv) และเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจากแบบจำลอง

ตารางที่ 4.6 ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายกรณี (ก) ไม่มีการป้องกันโครงข่าย (No protection) และ (ข) มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสี้ยว

(ก)

M	No protection											
	Low complexity model						High complexity model					
	NWC			WC			NWC			WC		
	Nc	Nv	Time (sec)	Nc	Nv	Time (sec)	Nc	Nv	Time (sec)	Nc	Nv	Time (sec)
1	17	59	0.02	17	59	0.01	181	631	0.14	181	631	0.17
2	24	111	0.13	17	59	0.02	352	1255	6.84	181	631	0.41
3	31	163	0.13	17	59	0.01	523	1879	4.13	181	631	0.37
4	38	215	0.67	17	59	0.02	694	2503	72.36	181	631	0.41
5	45	267	1.14	17	59	0.03	865	3127	69.23	181	631	0.34
6	52	319	2.78	17	59	0.01	1036	3751	236.8	181	631	0.32

(๗)

M	Protection					
	NWC			WC		
	Nc	Nv	Time(s ec)	Nc	Nv	Time(s ec)
1	629	918	0.31	629	918	0.35
2	1248	1822	87.67	629	918	0.49
3	1867	2726	19.87	629	918	2.07
4	2486	3630	18.32	629	918	0.9
5	3105	4534	ครึ่งวัน	629	918	6.58
6	3724	5438	-	629	918	0.64

- หมายถึงไม่สามารถหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้ในเวลา 1 วัน

ตารางที่ 4.6 (ก) แสดงถึงจำนวนตัวแปร (Nv) และจำนวน constraint (Nc) ของโครงข่ายที่ไม่มีกำบังการป้องกันความเสียหาย กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC) และไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC) ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 6 จะเห็นว่าจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint ของแบบจำลองกรณี WC จะมีค่าคงที่ตลอดทุกค่า M คือมี $Nc = 17$ และ $Nv = 59$ สำหรับแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำ และมี $Nc = 181$ และ $Nv = 631$ สำหรับแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองนี้ไม่จำเป็นต้องจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางแต่ละเส้นแต่จะอาศัยการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ link by link basis จะเห็นว่ากรณี WC นั้นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำจะมีจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรน้อยกว่าแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงประมาณ 10 เท่า และใช้เวลาในการหาผลเฉลยประมาณ 1 วินาทีสำหรับค่าทุกค่าของ M ที่ทำการทดสอบไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำหรือแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงก็ตาม ส่วนกรณี NWC ไม่ว่าจะเป็แบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำหรือสูง เมื่อค่า M เพิ่มขึ้นจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint ก็จะเพิ่มขึ้นตามค่าของ M เนื่องจากต้องมีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางแต่ละเส้นให้มีความยาวคลื่นเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยจะสูงขึ้นตามค่าของ M คือ เมื่อ $M = 1$ จะใช้เวลา 0.14 วินาที และเมื่อ $M = 6$ จะใช้เวลาคำนวณ 236.8 วินาที สำหรับแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงแต่แบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำถึงแม้ค่า M จะสูงขึ้นเวลาที่ใช้ก็ยังคงใช้เวลาประมาณ 1 วินาที

เมื่อเปรียบเทียบความซับซ้อนในด้านเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยระหว่างแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำและแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง จะเห็นว่ากรณี WC เวลาที่ใช้ไม่แตกต่างกัน

และใช้เวลาน้อย คือใช้เวลาประมาณ 1 วินาที ส่วนกรณี NWC นั้นเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยก็จะเพิ่มขึ้นตาม ยกตัวอย่างเช่น ที่ M เท่ากับ 1 แบบจำลองทั้ง 2 แบบจะใช้เวลาประมาณ 1 วินาที แต่เมื่อค่า M เพิ่มขึ้นเป็น 6 เวลาที่ใช้สำหรับแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำคือ 2 วินาที ในขณะที่แบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงจะใช้เวลาถึง 236 วินาที ดังนั้นสรุปได้ว่าแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำให้ผลเฉลยทางด้านเวลาที่เร็วกว่าแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกรณี NWC ที่ค่า M สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยก็ยังคงหาได้ภายในเวลาที่กำหนดนั้นคือไม่เกิน 1 วัน ทั้งนี้เนื่องจากโครงข่ายที่ใช้เป็นโครงข่ายขนาด 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง และ มีวงแหวนที่ใช้ในการเลือกเพียง 7 วง ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยจึงทำให้ที่ค่า M ที่ต่างกันเวลาที่ใช้ในการคำนวณก็ยังคงไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อพิจารณาถึงกรณีที่โครงข่ายมีการคำนึงถึงการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย โดยมีการวางเส้นใยแก้วนำแสงสำรองให้กับวงแหวนแต่ละวงของโครงข่ายเพื่อสามารถรองรับความเสียหายที่เกิดขึ้นทุก ๆ เหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย ตารางที่ 4.6 (ข) แสดงจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint ที่ค่า M เท่ากับ 1 ถึง 6 ของแบบจำลอง จะเห็นว่าในกรณี WC จำนวนตัวแปร และจำนวน constraint จะมีค่าคงที่ตลอดทุกค่า M คือมี $N_c = 629$ และ $N_v = 918$ โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่า M ที่เปลี่ยนไป ส่วนในกรณี NWC จำนวนตัวแปร และจำนวน constraint จะเพิ่มขึ้นตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าข้อสรุปดังกล่าวไม่ว่าจะเป็นกรณี WC และ NWC ต่างก็มีลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองของโครงข่ายที่ไม่มีการป้องกันความเสียหาย แต่ต่างกันที่แบบจำลองที่มีการป้องกันโครงข่ายจะใช้จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่มากกว่า เนื่องจากต้องเพิ่มจำนวนตัวแปรและ constraint ในส่วนของการจัดสรรเส้นทางสำรองและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพื่อรองรับความเสียหายที่เกิดขึ้นในเหตุการณ์ทุกๆ เหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจะเห็นว่ากรณี NWC ที่ค่า M เท่ากับ 6 แบบจำลองจะมีจำนวนตัวแปรและ constraint มากจนไม่สามารถหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 1 วัน แต่ในกรณี WC จะเห็นว่าสำหรับค่าทุกค่าของ M ที่ทดสอบสามารถหาผลเฉลยได้ภายในเวลาไม่เกิน 10 วินาที

4.3.3.2 ผลของขนาดโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปร จำนวน constraint และ เวลาที่ใช้ในการ

หาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ผลของขนาดโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะทดสอบแบบจำลองกับโครงข่ายตัวอย่างขนาด 4 โหนด 5 ข่ายเชื่อมโยง (4N_5L), 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง (5N_7L), 6 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยง (6N_9L), 7 โหนด 11 ข่ายเชื่อมโยง (7N_11L), 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยง (8N_13L), 11 โหนด 15 ข่ายเชื่อมโยง (11N_15L)

และ 12 โหนด 17 ข่ายเชื่อมต่อ (12N_17L) ที่ค่าทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มเท่ากับ 1 และค่า M เท่ากับ 1 โดยตารางที่ 4.7 แสดงผลของขนาดโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะแสดงจำนวนตัวแปร (Nv), จำนวน constraint (Nc) และเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองโดยจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงผันความยาวคลื่น เนื่องจากที่ M เท่ากับ 1 การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะไม่มีผลต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลอง

ตารางที่ 4.7 พิจารณากรณีที่ไม่มีกรป้องกันโครงข่ายมีแบบจำลองอยู่ 2 แบบด้วยกันคือแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำ และแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง ซึ่งจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint ของแบบจำลองทั้งสองนั้นต่างก็เพิ่มขึ้นตามขนาดของโครงข่าย แต่เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำจะใช้เวลาไม่เกิน 20 วินาทีสำหรับโครงข่ายขนาดที่มีขนาดต่ำกว่า 12 โหนด 17 ข่ายเชื่อมต่อ ซึ่งจะเห็นว่าใช้เวลาน้อยกว่าแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากกว่า ทำให้ที่โครงข่ายขนาด 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมต่อขึ้นไปแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงไม่สามารถหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 1 วัน ในขณะที่แบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำสามารถหาผลเฉลยกับโครงข่ายที่มีขนาดถึง 11 โหนด 15 ข่ายเชื่อมต่อภายในเวลาไม่เกิน 20 วินาที จากข้อสรุปดังกล่าวจึงสามารถนำแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำไปใช้ในการออกแบบโครงข่ายขนาดไม่เกิน 11 โหนด 15 ข่ายเชื่อมต่อได้ในเวลาที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.7 ผลของขนาดของโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Network	No protection						Protection		
	Low complexity model			High complexity model			Nc	Nv	Time(se c)
	Nc	Nv	Time(se c)	Nc	Nv	Time(se c)			
4N_5L	11	22	0.15	55	100	0.1	155	163	0.07
5N_7L	17	59	0.05	181	631	0.14	629	918	0.31
6N_9L	24	135	0.18	492	2,893	6.11	1,849	3,791	22.3
7N_11L	32	307	0.07	1,344	14,283	10.01	5,281	16,974	47.47
8N_13L	41	595	15.21	2,945	45,957	-	11,498	51,863	-
11N_15L	71	1,299	16.25	8,460	139,371	-	27,080	154,038	-
12N_17L	84	2629	-	19,150	54,581	-	63,265	579,901	-

- หมายถึงไม่สามารถหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้ในเวลา 1 วัน

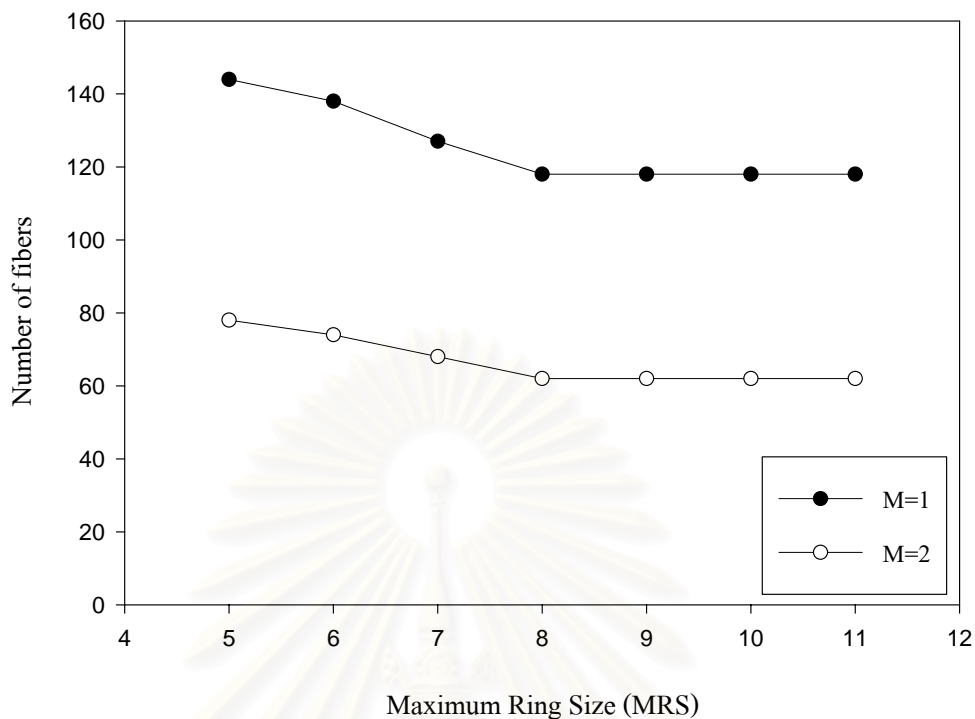
เมื่อพิจารณาถึงแบบจำลองกรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint จะสูงกว่าของแบบจำลองที่ไม่มีการป้องกันความเสียหาย ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจึงมากกว่าในทุกโครงข่ายแต่ก็ยังคงสามารถหาผลเฉลยของโครงข่ายตั้งแต่ขนาด 5 โนด 7 ข่ายเชื่อมโยงถึง ขนาด 7 โนด 11 ข่ายเชื่อมโยงภายในเวลา 1 นาที ส่วนโครงข่ายขนาดตั้งแต่ 8 โนด 13 ข่ายเชื่อมโยงขึ้นไปไม่สามารถหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 1 วัน

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าขนาดโครงข่ายมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำกรณีโครงข่ายที่ไม่มีการป้องกันความเสียหายน้อยมาก ดังนั้นหัวข้อต่อไปที่จะกล่าวถึงคือ ผลของขนาดวงแหวนที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งจะใช้แบบจำลองดังกล่าวในการทดสอบกับโครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีจำนวนวงแหวนที่ใช้พิจารณาในการเลือกหลายวงและหลายขนาด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของวงแหวนกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายต่อไป

4.4.3 ขนาดของวงแหวนที่มีผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

หัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ผลของขนาดวงแหวนที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายโดยจะทดสอบกับโครงข่ายขนาด 11 โนด 15 ข่ายเชื่อมโยง มีทราฟฟิกเป็นยูนิฟอর্মเท่ากับ 1 ที่ค่า M เท่ากับ 1 และ 2 การที่เลือกใช้โครงข่ายดังกล่าวเนื่องจากเป็นโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ที่มีจำนวนวงแหวนมากมายหลายขนาดและสามารถหาผลเฉลยได้ภายในเวลาที่เหมาะสม ในการทดสอบนั้นจะใช้การจำกัดขนาดวงแหวนด้วยขนาดวงแหวนสูงสุด (Maximum Ring Size: MRS) ที่แบบจำลองสามารถเลือกใช้ได้ โดยจะเพิ่ม MRS จาก 5 โนด ไปถึง 11 โนด การที่ต้องเริ่มจำกัดขนาดของวงแหวนตั้งแต่ 5 โนดนั้นเนื่องจากขนาดวงแหวนที่ต่ำกว่า 5 โนดไม่สามารถรับทราฟฟิกในบางคู่โหนดได้ หรือไม่ครอบคลุมทุกคู่โหนดนั่นเอง รูปที่ 4.8 แสดงผลของการจำกัดขนาดของวงแหวนที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกับการจำกัดขนาดวงแหวนด้วยค่า MRS ของโครงข่ายขนาด 11 โหนด 15 ข่ายเชื่อมโยง

รูปที่ 4.8 แสดงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่า MRS ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า กรณีที่ค่า $M=1$ เมื่อเพิ่มค่า MRS จาก 5 โหนดไปยัง 8 โหนด สามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ 26 เส้นหรือประมาณ 18.1% และเมื่อเพิ่มค่า MRS ขึ้นอีก จะเห็นว่าขนาดของวงแหวน 9 โหนดขึ้นไปไม่ส่งผลทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายลดลงได้ ทั้งนี้เนื่องจากวงแหวนขนาดใหญ่กว่า 8 โหนดนั้นการใช้ประโยชน์จากเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายจะต่ำเนื่องจากวงแหวนขนาดใหญ่กว่า 8 โหนด ยากต่อการรองรับทราฟฟิกได้อย่างเต็มที่ที่ทำให้ข่ายเชื่อมโยงบางข่ายของวงแหวนอาจจะไม่ถูกใช้งานหรือใช้งานได้น้อยนั่นเอง ส่วนกรณีที่ค่า $M=2$ นั้นจะมีลักษณะความสัมพันธ์ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกับขนาดของวงแหวนเช่นเดียวกับที่ค่า $M=1$ แต่ต่างกันที่จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้จะต่ำกว่าเนื่องจากช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสงนั่นเอง

จากผลสรุปที่ได้นั้นทำให้ทราบได้ว่าโครงข่ายแบบหลายวงแหวนที่มีการกระจายทราฟฟิกในลักษณะที่ 2 นั้น วงแหวนขนาดใหญ่ไม่ส่งผลทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลง แต่อย่างไรก็ตามในการออกแบบในลักษณะที่ 1 ก็ยังคงจำเป็นต้องใช้วงแหวนขนาดใหญ่ในการรองรับการเชื่อมโยงในช่องสัญญาณแต่ละช่องของกลุ่มโหนดที่อยู่ใกล้กันด้วยวงแหวนเพียงวงเดียว จึงทำให้

จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้กับโครงข่ายที่มีความต้องการทราฟฟิกลักษณะเดียวกันนั้นมากกว่าการออกแบบในลักษณะที่ 2 ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4.1



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

เปรียบเทียบต้นทุนสำหรับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง และแบบเมช

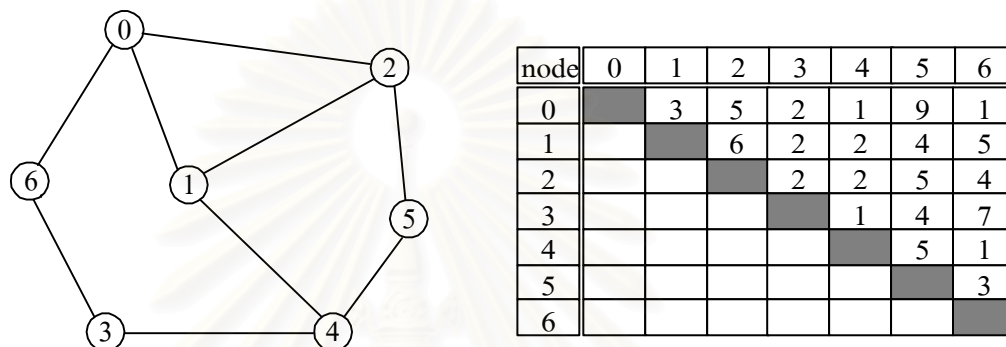
5.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงการเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง กับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมชในแง่ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนช่องสัญญาณที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่ายทั้งในสถานะการทำงานปกติและในสถานะเมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายจากข้อผิดพลาด โดยในส่วนแรก จะทำการเปรียบเทียบต้นทุนของการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิกที่ต่างกัน 3 แบบ จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบต้นทุนที่ใช้ระหว่างโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงทั้ง 3 แบบดังกล่าวกับโครงข่ายแบบเมชที่มีการป้องกันโครงข่ายแบบต้นทุนต่ำที่สุด (Minimal Cost: MC) [13] การที่เลือกใช้โครงข่ายแบบเมชดังกล่าวในการเปรียบเทียบก็เนื่องมาจากวิธี MC ให้ต้นทุนของโครงข่ายที่ต่ำที่สุดสำหรับโครงข่ายแบบเมช ทำให้สามารถทราบได้ว่าโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงทั้ง 3 แบบนั้นมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดเมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายแบบเมชดังกล่าว และส่วนสุดท้ายของบทนี้จะทำการเปรียบเทียบโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมชในแง่ของความซับซ้อนในการจัดการและควบคุมโครงข่าย อีกทั้งยังแสดงการเปรียบเทียบข้อจำกัดทางด้านเวลาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงที่มีเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิก 3 แบบ กับ โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมชด้วย

ก่อนอื่นจะขอกล่าวถึงนิยามของต้นทุนในเชิงของจำนวนช่องสัญญาณรวมของโครงข่าย ซึ่งจำนวนช่องสัญญาณรวมจะหมายถึง ผลคูณของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการกับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสง (M)

$$\text{Total channel} = \text{Total number of fibers required} \times M \quad (5.1)$$

ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อ CPLEX 6.6 [18] เพื่อคำนวณหาต้นทุนและจำนวนสายใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายทั้งหมด โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลดังกล่าวคือ เครื่อง PC Intel Pentium 667 MHz ซึ่งมี RAM ขนาด 128 MB โดยการทดสอบในแต่ละส่วนของบทนี้นั้นจะใช้โครงข่ายขนาด 7 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยง ที่มีความต้องการทราฟฟิกเป็นแบบนอนยูนิฟอร์มซึ่งรูปที่ 5.1 แสดงโทโปโลยีและปริมาณ ทราฟฟิกแบบนอนยูนิฟอร์มสำหรับโครงข่าย 7 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยง



รูปที่ 5.1 โทโปโลยีและปริมาณทราฟฟิกของโครงข่ายที่ใช้ทดสอบ

5.2 เปรียบเทียบต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิก 3 รูปแบบ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบระหว่างโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง ซึ่งมีเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิกที่แตกต่างกัน 3 แบบด้วยกัน คือ

1. ทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆ ต้องส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางด้วยวงแหวนเพียงวงเดียวเท่านั้น ซึ่งมีข้อกำหนดในการกระจายทราฟฟิกอยู่ 2 แบบ คือ
 - ทราฟฟิกทั้งหมดของคู่โหนดแต่ละคู่สามารถเลือกรองรับด้วยวงแหวนที่ครอบคลุมคู่โหนดนั้นได้เพียงวงเดียว เรียกได้ว่าเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ไม่มีกระจายทราฟฟิก (Non-Distribution Multi-Ring: NDMR) ซึ่งอ้างอิงจาก [19]
 - ทราฟฟิกทั้งหมดของคู่โหนดแต่ละคู่สามารถแบ่งให้รองรับโดยวงแหวนที่ครอบคลุมคู่โหนดนั้นได้มากกว่าหนึ่งวง เรียกได้ว่าเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีการกระจายทราฟฟิก (Distribution Multi-Ring: DMR) ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

2. ทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆสามารถรองรับด้วยวงแหวนมากกว่าหนึ่งวง เรียกว่าเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่สามารถส่งผ่านทราฟฟิกจากวงแหวนหนึ่งไปยังอีกวงแหวนหนึ่งที่อยู่ติดกันได้ (Inter-ring connection Multi-Ring: IMR) ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

โดยการเปรียบเทียบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงทั้ง 3 แบบที่ได้กล่าวมานั้นจะพิจารณาทั้งในกรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีกำบังโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย และกรณีที่โครงข่ายมีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยผลเฉลยของต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง และจำนวนช่องสัญญาณรวมของโครงข่ายจะถูกแสดงดัง ตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงรวมของโครงข่ายที่ค่า $M=1, 2, 4$ และ 8 สำหรับกรณี (ก) NWC และ (ข) WC

(ก)

M	No protection			Protection		
	NDMR	DMR	IMR	NDMR	DMR	IMR
1	137	122	119	269 (96.35%)	244 (100%)	238 (100%)
2	71	62	60	137 (92.62%)	124 (100%)	120 (100%)
4	37	32	32	73 (97.3%)	64 (100%)	60 (87.5%)
8	19	17	17	38 (100%)	34 (100%)	32 (88.4%)

(ข)

M	No protection			Protection		
	NDMR	DMR	IMR	NDMR	DMR	IMR
1	137	122	119	269 (96.35%)	244 (100%)	238 (100%)
2	71	62	60	137 (92.62%)	122 (96.77%)	119 (98.33%)
4	37	32	32	71 (91.89%)	62 (93.75%)	60 (87.5%)
8	19	17	17	37 (94.74%)	32 (88.24%)	32 (88.4%)

หมายเหตุ เปรอร์เซ็นต์ที่แสดงหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องใช้เมื่อเทียบกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในกรณีที่ไม่มีกำบังโครงข่าย

ตารางที่ 5.2 จำนวนช่องสัญญาณรวมของโครงข่ายที่ค่า M=1, 2, 4 และ 8 สำหรับกรณี (ก) NWC และ (ข) WC

(ก)

M	No protection			Protection		
	NDMR	DMR	IMR	NDMR	DMR	IMR
1	137	122	119	269	244	238
2	142	124	120	274	248	240
4	148	128	128	292	256	240
8	152	136	136	304	272	256

(ข)

M	No protection			Protection		
	NDMR	DMR	IMR	NDMR	DMR	IMR
1	137	122	119	269	244	238
2	142	124	120	274	244	238
4	148	128	128	284	248	240
8	152	136	136	296	256	256

ตารางที่ 5.1 (ก) และ (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงรวม กับค่า M ของโครงข่ายแบบหลายวงแหวนที่มีการกระจายทราฟฟิกที่ต่างกัน 3 วิธี คือ NDMR, DMR และ IMR ในกรณีที่โครงข่ายไม่มีและมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นตามลำดับ จะเห็นว่ากรณีที่ไม่มี การป้องกัน โครงข่ายสำหรับ โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงทั้ง 3 วิธีนั้น อุปกรณ์แปลงผันความยาว คลื่นไม่ส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลงสำหรับค่าทุกค่าของ M ที่ทำการทดสอบ และเมื่อ เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในแต่ละแบบจะเห็นว่าวิธี NDMR จะใช้จำนวนเส้นใย แก้วนำแสงมากที่สุดถัดมาก็เป็นวิธี DMR และ IMR ตามลำดับ นั่นคือ วิธี DMR จะใช้เส้นใยแก้วนำ แสงน้อยกว่าวิธี NDMR ประมาณ 11.76-15.63% สำหรับค่าทุกค่าของ M ที่ทดสอบ ส่วนวิธี IMR จะใช้เส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่าวิธี NDMR ประมาณ 11.76-18.33% และวิธี IMR จะใช้จำนวนเส้น ใยแก้วนำแสงน้อยกว่าวิธี DMR ประมาณ 1.68-3.33% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากรณีที่ไม่มี การป้องกัน โครงข่ายนั้นวิธี DMR และ IMR สามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ประมาณ 11-18% เมื่อ เทียบกับวิธี NDMR ส่วนวิธี IMR จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่าวิธี DMR ประมาณ 1.68-3.33% ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ที่น้อยมากจึงสรุปได้ว่าวิธี IMR ไม่สามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำ

แสงได้เมื่อเทียบกับวิธี DMR ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากโครงข่ายที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็กและลักษณะของกราฟฟิกที่ไม่เหมาะสมจึงไม่เห็นถึงความแตกต่างเท่าที่ควร

จากที่กล่าวมาพบว่าสาเหตุที่ทำให้วิธี NDMR ใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าวิธี DMR และ IMR ประมาณ 11-18% สำหรับค่าทุกค่าของ M เนื่องจาก constraint ของวิธี NDMR นั้นกำหนดให้กราฟฟิกของกลุ่มใดหนึ่งต้องอยู่ในวงแหวนเพียงวงเดียวทำให้มีความยืดหยุ่นในการกระจายกราฟฟิกน้อยซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรของโครงข่ายต่ำกว่าของวิธี DMR และ IMR นั่นเอง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าวิธี NDMR จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าวิธี DMR และ IMR แต่การจัดการและควบคุมโครงข่ายจะทำได้ง่ายกว่าวิธี DMR และ IMR ซึ่งความซับซ้อนในการจัดการและควบคุมโครงข่ายสำหรับวิธี NDMR, DMR และ IMR จะได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.4

เมื่อพิจารณากรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสำหรับโครงข่ายที่มีการกระจายกราฟฟิกทั้ง 3 วิธีนั้น อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ส่งผลต่อการลดลงของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเลย ที่สรุปเช่นนี้เนื่องจากอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วไม่เกิน 6% ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ที่น้อยมากจึงสามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ส่งผลต่อการลดลงของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายไม่ว่าจะใช้วิธีการกระจายกราฟฟิกวิธีใดก็ตาม และเมื่อเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในแต่ละแบบจะเห็นว่าวิธี NDMR จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากที่สุดถัดมาก็เป็นวิธี DMR และ IMR ตามลำดับ ซึ่งข้อสรุปดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่าย แต่ต่างกันตรงที่ต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มในการป้องกันโครงข่ายประมาณ 88.24-100% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่าย

จากที่กล่าวมาในตารางที่ 5.1 (ก) และ (ข) จะเห็นว่าถึงแม้ว่าค่า M ที่สูงขึ้นจะช่วยประหยัดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายก็ตาม แต่การเพิ่มค่า M สูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้จำนวนช่องสัญญาณรวมในเส้นใยแก้วนำแสงสูงขึ้น ดังในตารางที่ 5.2 (ก) และ (ข) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของช่องสัญญาณเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้เส้นใยแก้วนำแสงต่ำลงเนื่องจากมีช่องสัญญาณที่เหลือใช้เป็นจำนวนมากนั่นเอง ทำให้ต้นทุนในเชิงของเส้นใยแก้วนำแสงควรจะต้องพิจารณาทั้งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ซึ่งจะบ่งบอกต้นทุนของโครงข่ายได้ดีกว่าการพิจารณาเพียงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพียงอย่างเดียว ดังนั้นในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงต้นทุนของโครงข่าย (Network cost) ในแง่ของจำนวนช่องสัญญาณรวมหรือผลคูณระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์แทนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงรวมที่ใช้ในโครงข่าย

ต่อไปจะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะในการเลือกวงแหวนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงเนื่องจากการเลือกวงแหวนเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการเป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการออกแบบโครงข่ายแบบหลายวงแหวนดังนั้นการเลือกวงแหวนมีผลต่อต้นทุนของโครงข่ายโดยตรงในส่วนนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงคุณลักษณะในการเลือกวงแหวนของโครงข่ายแบบหลายวงแหวนที่มีการกระจายทราฟฟิกที่แตกต่างกันคือวิธี IMR, DMR และ NDMR โดยการอธิบายคุณลักษณะในการเลือกวงแหวนจะใช้ผลการทดสอบของโครงข่ายในรูปแบบที่ 5.1 ซึ่งรายละเอียดของวงแหวนที่เลือกเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการสำหรับวิธี IMR, DMR และ NDMR ในกรณี WC ที่ค่า M เท่ากับ 2 และ 8 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 คุณลักษณะการเลือกวงแหวนของโครงข่ายแบบหลายวงแหวนกรณี WC (ก) M=2 และ (ข) M=8

(ก)

Ring	Number of nodes	Description	NDMR			DMR			IMR	
			Traffic	Number of fibers	Cost	Traffic	Number of fibers	Cost	Number of fibers	Cost
1	5	0-1-4-3-6-0	10	25	50	3	5	10	10	20
2	6	0-2-1-4-3-6-0	-	-	-	12	18	36	6	12
3	6	0-2-5-4-3-6-0	35	60	120	14	30	60	60	120
4	7	0-1-2-5-4-3-6-0	-	-	-	17	28	56	-	-
5	5	0-1-4-5-2-0	19	35	70	9	20	40	15	30
6	3	0-1-2-0	6	9	18	9	9	18	12	24
7	4	1-2-5-4-1	5	8	16	10	12	24	16	32
Total cost					274		244		238	

(ข)

Ring	Number of nodes	Description	NDMR			DMR			IMR	
			Traffic	Number of fibers	Cost	Traffic	Number of fibers	Cost	Number of fibers	Cost
1	5	0-1-4-3-6-0	-	-	-	-	-	-	-	-
2	6	0-2-1-4-3-6-0	10	6	48	14	6	48	6	48
3	6	0-2-5-4-3-6-0	47	21	168	22	12	96	12	96
4	7	0-1-2-5-4-3-6-0	-	-	-	15	7	56	7	56
5	5	0-1-4-5-2-0	17	10	80	-	-	-	-	-
6	3	0-1-2-0	-	-	-	11	3	24	3	24
7	4	1-2-5-4-1	-	-	-	13	4	32	4	32
Total cost					296		256		256	

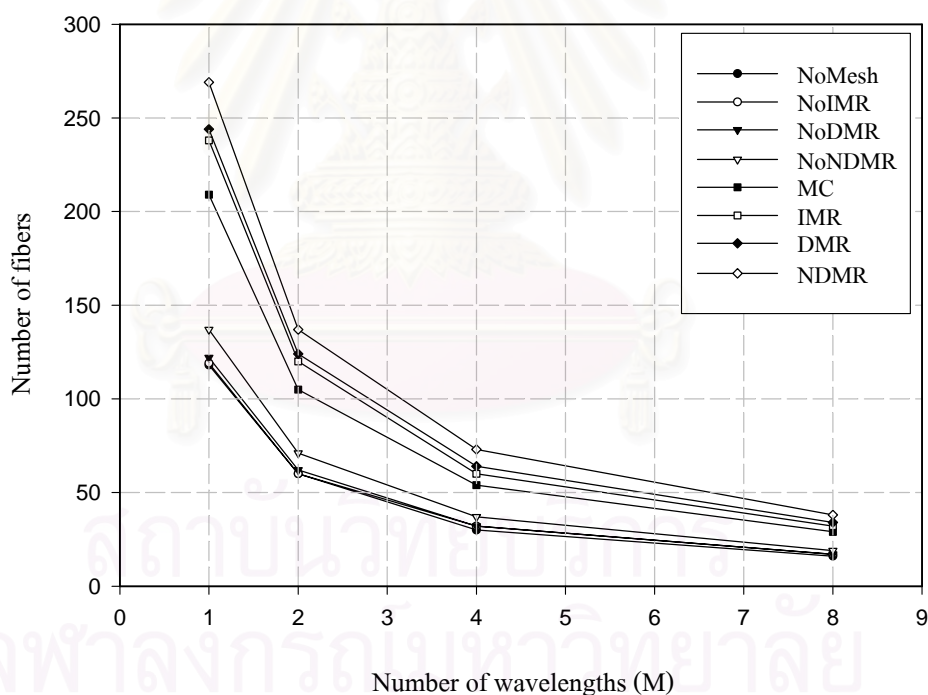
จากตารางที่ 5.3 (ก) จะเห็นว่าโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ถูกออกแบบโดยวิธี NDMR จะเลือกวงแหวนจำนวน 5 วงเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิก สังเกตได้ว่าปริมาณทราฟฟิกจะกระจายในวงแหวนแต่ละวงอย่างไม่สม่ำเสมอ วงแหวนบางวงอาจจะต้องแบกรับปริมาณทราฟฟิกจำนวนมาก ซึ่งจากตารางจะเห็นว่าปริมาณทราฟฟิกส่วนใหญ่จะถูกรองรับด้วย Ring 3 เป็นผลทำให้ต้นทุนของวงแหวนนี้สูงมากเมื่อเทียบกับวงแหวนอื่น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะ Constraint ที่บังคับให้ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของคู่โหนดแต่ละคู่ต้องเลือกวงแหวนวงเดียวเพื่อรองรับทราฟฟิก ดังนั้นถ้าคู่โหนดใดมีปริมาณทราฟฟิกจำนวนมากจะทำให้วงแหวนที่รองรับคู่โหนดดังกล่าวจะต้องรับภาระในการรองรับทราฟฟิกที่สูงตามไปด้วย ส่วนโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ถูกออกแบบโดยวิธี DMR ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของคู่โหนดแต่ละคู่สามารถรองรับด้วยวงแหวนที่ครอบคลุมคู่โหนดนั้นได้มากกว่าหนึ่งวงแหวน จึงทำให้จำนวนวงแหวนที่เลือกสำหรับการออกแบบด้วยวิธีนี้จะมีจำนวนมากกว่าวิธี NDMR นั่นคือจะเลือกวงแหวนถึง 7 วงเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิก โดยการกระจายทราฟฟิกในวงแหวนที่เลือกจะกระจายอย่างสม่ำเสมอในแต่ละวงแหวน ดังนั้นจะเห็นว่าวิธีนี้จะไม่เป็นการผลักภาระในการรองรับทราฟฟิกให้กับวงแหวนวงใดวงหนึ่งมากเกินไปทำให้ต้นทุนที่ใช้ในวงแหวนแต่ละวงไม่ต่างกันมากเหมือนกับวิธี NDMR อีกทั้งวิธี DMR ยังสามารถกระจายทราฟฟิกเพื่อใช้เส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธี NDMR ดังในตารางจะเห็นว่าถ้าใช้วิธี DMR ในการออกแบบจะสามารถประหยัดต้นทุนได้ถึง 11% และเมื่อพิจารณาวิธี IMR จะเห็นว่ามีความยืดหยุ่นในการกระจายทราฟฟิกมากกว่าวิธี DMR เนื่องจากในทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกของคู่โหนดแต่ละคู่สามารถรองรับหรือส่งผ่านด้วยวงแหวนอย่างน้อยหนึ่งวง ด้วยเงื่อนไขนี้จึงทำให้ไม่สามารถบอกปริมาณทราฟฟิกที่รองรับในแต่ละวงแหวนเหมือนกับวิธี NDMR และ DMR ที่แสดงในตารางได้

จากตารางที่ 5.3 (ข) เมื่อจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 8 จะเห็นว่าจำนวนวงแหวนที่เลือกสำหรับวิธี DMR ยังคงมากกว่าวิธี NDMR อีกทั้งการกระจายทราฟฟิกในวงแหวนที่เลือกก็ยังสม่ำเสมอกว่าเช่นเดียวกับที่ค่า M เท่ากับ 2 ส่วนวิธี IMR จะมีผลเฉลยของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและวงแหวนเช่นเดียวกับวิธี DMR ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มค่า M จะทำให้ constraint ที่ใช้ในการส่งผ่านทราฟฟิกระหว่างวงแหวนที่อยู่ติดกันสำหรับวิธี IMR นั้นไม่ส่งผลทำให้ต้นทุนที่ได้ต่ำกว่าวิธี DMR ถึงแม้ว่าผลเฉลยที่ได้ของวิธี IMR ทราฟฟิกของคู่โหนดบางคู่อาจมีการส่งผ่านด้วยวงแหวนมากกว่าหนึ่งวงก็ตาม ดังนั้นในการออกแบบที่ค่า M สูงๆ สำหรับโครงข่ายที่ทดสอบควรจะใช้วิธี DMR แทน IMR ดีกว่าเนื่องจากมีความซับซ้อนในการกระจายทราฟฟิกน้อยกว่า อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดมีเพียง Add-Drop Multiplexer อีกทั้งยังใช้เวลาในการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เร็วกว่าวิธี IMR ซึ่งรายละเอียดของเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจะได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.4

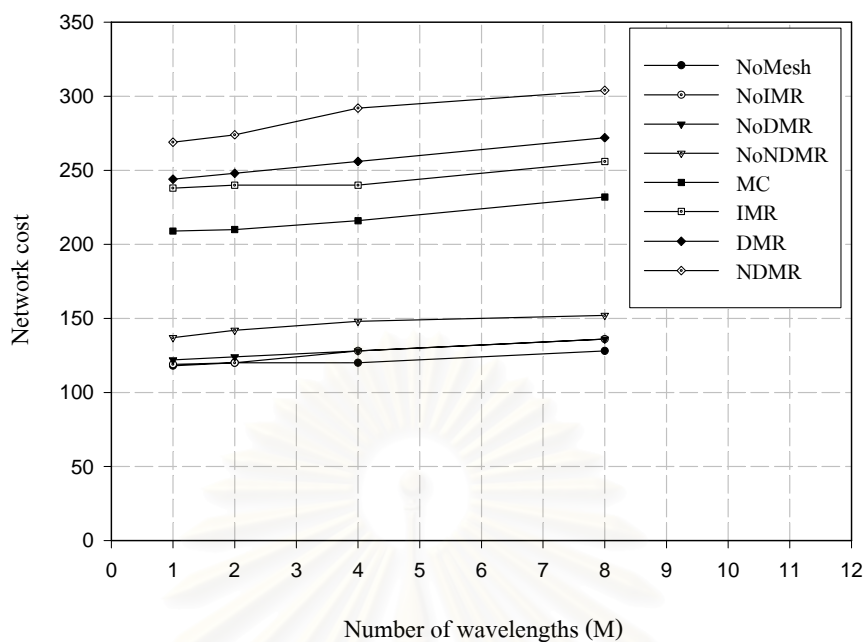
อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 5.3 จะเห็นว่า การเพิ่มค่า M ให้สูงขึ้นจะส่งผลทำให้จำนวนวงแหวนที่เลือกใช้ลดลงไม่ว่าจะเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงแบบใดก็ตาม แต่ต่างกันตรงที่จำนวนวงแหวนที่เลือกจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิกด้วย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า คุณลักษณะการเลือกวงแหวนจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิกที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง และจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง

5.3 เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและต้นทุนที่ต้องการระหว่างโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช

ในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและต้นทุนที่ต้องการระหว่างโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช ในการวิเคราะห์จะพิจารณาเฉพาะกรณี NWC เท่านั้น เนื่องจากอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่มีผลต่อการลดลงของต้นทุนในแบบจำลองทุกแบบที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายแบบเมช



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนของ โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับ โครงข่ายแบบเมช

จากรูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง และต้นทุนของ โครงข่ายตามลำดับระหว่าง โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับ โครงข่ายแบบเมช ซึ่งใช้ค่า M เท่ากับ 1, 2, 4 และ 8 โดยในกราฟที่แสดงนั้น NoMesh, NoNDMR, NoDMR และ NoIMR หมายถึง โครงข่ายแบบเมชและ โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีการกระจายทรอปิก 3 แบบตามลำดับ สำหรับกรณีที่โครงข่ายไม่มีการป้องกันความเสียหาย (No protection) ส่วนที่ไม่มีคำว่า No อยู่ ข้างหน้าจะหมายถึงกรณีที่โครงข่ายมีการป้องกันข้อผิดพลาด ซึ่งจากรูปกราฟทั้ง 2 รูป สามารถเรียงลำดับของวิธีที่ใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและต้นทุนของโครงข่ายจากน้อยไปหามาก คือ NoMesh, NoIMR, NoDMR และ NoNDMR ตามลำดับสำหรับกรณีที่ไม่มี การป้องกันโครงข่าย จะเห็นว่าวิธี NoIMR, NoDMR และ NoNDMR ต้องการต้นทุนในการสร้างโครงข่ายมากกว่า NoMesh ประมาณ 0%-6.67%, 3.33%-6.67% และ 16.1%-23.33% ตามลำดับสำหรับค่าทุกค่าของ M ที่ทำการทดสอบ

ส่วนกรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข้อผิดพลาดนั้นวิธี MC ใช้ต้นทุนในการสร้างโครงข่ายน้อยที่สุด ถัดมาก็เป็นวิธี IMR, DMR และ NDMR ตามลำดับ จะเห็นว่าวิธี IMR, DMR และ NDMR ต้องใช้ต้นทุนมากกว่า MC ประมาณ 10.34%-14.29%, 14.71%-18.52% และ 28.71%-35.19% ตามลำดับสำหรับทุกค่า M ที่ทำการทดสอบ

สาเหตุที่โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงต้องใช้ต้นทุนในการสร้างโครงข่ายที่สูงกว่าเมชมี อยู่ 3 ประการด้วยกันคือ

ประการแรก โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมชจะมีเส้นทางสำรองเพื่อรองรับทราฟฟิกที่ได้รับเสียหายได้หลายเส้นทางในขณะที่โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงนั้นจะมีเส้นทางสำรองเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น นั่นคือเส้นทางที่ตรงข้ามกับขั้วเชื่อมโยงที่เสียหายของวงแหวน ซึ่งเหตุผลนี้ทำให้โครงข่ายแบบเมชสามารถจะใช้ช่องสัญญาณความยาวคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงสำรองได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงจึงทำให้โครงข่ายแบบเมชต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อรองรับทราฟฟิกในสถานะปกติและสถานะเมื่อเกิดความเสียหายน้อยกว่าโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

ประการที่สอง เนื่องจากโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงจะใช้ Add/Drop Multiplexer ทำหน้าที่ในโหนดแต่ละโหนดของวงแหวนซึ่งเป็นข้อกำหนดทางโครงสร้างของวงแหวนซึ่งการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในขั้วเชื่อมโยงแต่ละขั้วของวงแหวนต้องมีจำนวนเท่ากัน ข้อกำหนดดังกล่าวทำให้เส้นใยแก้วนำแสงในขั้วเชื่อมโยงบางขั้วของวงแหวนอาจไม่ถูกใช้รองรับทราฟฟิกทำให้ประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงต่ำกว่าของโครงข่ายแบบเมชซึ่งมีประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงในขั้วเชื่อมโยงแต่ละขั้วที่สูงกว่า

ประการที่สาม เนื่องจากโครงข่ายแบบเมชที่ใช้ในการทดสอบนี้ เมื่อมีความเสียหายที่ขั้วเชื่อมโยงหนึ่งเกิดขึ้นทราฟฟิกที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายดังกล่าวสามารถเปลี่ยนเส้นทางได้ขณะที่โครงข่ายแบบวงแหวนนั้นเส้นทางที่ไม่ได้รับผลกระทบจะใช้เส้นทางเดิมได้เท่านั้นเพราะมีเพียงเส้นทางเดียวจึงทำให้ต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงน้อยกว่าโครงข่ายแบบเมช

ดังนั้นจากโครงข่ายทดสอบ จะเห็นว่าการใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งได้แก่วิธี IMR และ DMR สำหรับกรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่ายจะให้ต้นทุนที่ทัดเทียมกับโครงข่ายแบบเมช นั่นคือมีต้นทุนสูงกว่าเมชไม่เกิน 7 % ส่วนกรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากขั้วเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายจะให้ต้นทุนที่สูงกว่าวิธี MC ไม่เกิน 19 % ซึ่งถือว่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความซับซ้อนในการจัดการและควบคุมสำหรับโครงข่ายแบบเมชที่ใช้วิธีป้องกันโครงข่ายแบบ MC

5.4 เปรียบเทียบความซับซ้อนของกลไกในการรองรับทราฟฟิกและเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยระหว่างโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายแบบเมช

ในส่วนนี้จะทำการพิจารณาถึงกลไกในการรองรับทราฟฟิกสำหรับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีการกระจายทราฟฟิกทั้ง 3 วิธีสามารถเรียงลำดับจากวิธีที่มีความซับซ้อนน้อยไปยังวิธีที่มีความซับซ้อนมากได้ดังนี้ คือ วิธี NDMR, DMR และ IMR ตามลำดับ โดยสามารถอธิบายความซับซ้อนของแต่ละวิธีดังนี้

วิธี NDMR

วิธีนี้มีการจัดการทางด้านทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่ง่ายเนื่องจากปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของคู่โหนดจะรองรับด้วยวงแหวนที่ครอบคลุมคู่โหนดนั้นเพียงวงเดียวทำให้การดำเนินการใดๆในคู่โหนดแต่ละคู่ขึ้นอยู่กับวงแหวนเพียงวงเดียวเท่านั้น โดยไม่ต้องติดต่อกับวงแหวนวงอื่นๆเช่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดเป็นต้น ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นโหนดของโครงข่ายจะใช้เพียง Add/Drop Multiplexer แต่มีข้อเสียคือ มีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรโครงข่ายอันได้แก่เส้นใยแก้วนำแสงและช่องสัญญาณความยาวคลื่นที่ต่ำและภาระในการรองรับทราฟฟิกของวงแหวนแต่ละวงนั้นไม่สมดุลกัน อีกทั้งยังต้องใช้วงแหวนขนาดใหญ่ในการรองรับทราฟฟิกของคู่โหนดที่อยู่ไกลกันซึ่งเป็นที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่าวงแหวนขนาดใหญ่นั้นมีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรที่ต่ำ

วิธี DMR

วิธีนี้มีการจัดการทางด้านทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่ซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของคู่โหนดคู่หนึ่งจะรองรับด้วยวงแหวนที่ครอบคลุมคู่โหนดนั้นได้หลายวงทำให้การดำเนินการใดๆในคู่โหนดแต่ละคู่จะขึ้นอยู่กับวงแหวนที่รองรับทราฟฟิกของคู่โหนดนั้นซึ่งอาจมีมากกว่าหนึ่งวงจึงต้องมีการติดต่อกับวงแหวนวงอื่นๆที่รองรับทราฟฟิกของคู่โหนดดังกล่าว ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นโหนดของโครงข่ายยังคงใช้ Add/Drop Multiplexer เช่นเดียวกับวิธี NDMR แต่ภาระในการรองรับทราฟฟิกของวงแหวนแต่ละวงจะสมดุลกว่าวิธี NDMR ดังนั้นวงแหวนแต่ละวงจึงไม่ต้องแบกรับทราฟฟิกมากเกินไป ส่วนข้อเสียของวิธีนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับวิธี NDMR คือ ต้องใช้วงแหวนขนาดใหญ่ที่มีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรโครงข่ายที่ต่ำเพื่อรองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่อยู่ไกลกัน

วิธี IMR

ส่วนวิธี IMR นั้นจะมีความยืดหยุ่นในการกระจายทราฟฟิกมากกว่าวิธี DMR เนื่องจาก ทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกของคู่โหนดแต่ละคู่สามารถส่งผ่านด้วยวงแหวนอย่างน้อยหนึ่งวง ทำให้ ทราฟฟิกที่มีการส่งผ่านด้วยวงแหวนมากกว่าหนึ่งวงที่ตำแหน่งของโหนดที่มีการส่งผ่านระหว่างวงแหวนที่ต่างกันจะต้องมีสวิตช์เพื่อใช้ในการส่งผ่านจากวงแหวนหนึ่งไปยังวงแหวนหนึ่งด้วย ซึ่งเป็นผลทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นโหนดจะต้องมี Add/Drop Multiplexer และสวิตช์สำหรับโหนดที่มีการส่งผ่านระหว่างวงแหวน 2 วง ดังนั้นการจัดการทางด้านทราฟฟิกจะซับซ้อนกว่า 2 แบบแรก เนื่องจากทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกต้องขึ้นอยู่กับควบคุมและจัดการของวงแหวนอย่างน้อยหนึ่งวงหรือมากกว่า แต่ก็มีข้อดีตรงที่ไม่จำเป็นต้องใช้วงแหวนขนาดใหญ่ในการส่งผ่านทราฟฟิกเหมือน 2 แบบแรกเพียงแต่เลือกวงแหวนให้ครอบคลุมทุกคู่โหนดที่มีปริมาณทราฟฟิกมากกว่าศูนย์และ

เลือกใช้โนดที่จะทำหน้าที่ส่งผ่านระหว่างวงแหวนเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกของคูโนดที่อยู่ไกลกันได้ ดังนั้นวิธี IMR จึงสามารถกำหนดขนาดของวงแหวนที่ใช้งานได้

เมื่อพิจารณาถึงการป้องกันโครงข่ายจากข้อผิดพลาดเพียง 3 วิธี ได้แก่วิธี NDMR, DMR และ IMR สามารถที่จะป้องกันความเสียหายได้อย่างรวดเร็ว และง่ายเนื่องจากการเปลี่ยนไปใช้เส้นทางสำรองของทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ที่ข้อผิดพลาดเพียง หนึ่งเสียหายจะกระทำอย่างอิสระภายในวงแหวนที่รองรับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบดังกล่าว โดยไม่ขึ้นอยู่กับวงแหวนวงอื่นๆเลย ซึ่งข้อดีของโครงข่ายแบบวงแหวนในส่วนนี้นั้นเองที่ทำให้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงมีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้แทนโครงข่ายแบบเมช แม้ว่าต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงจะสูงกว่าโครงข่ายแบบเมชก็ตาม แต่ถ้าพิจารณาถึงโครงข่ายที่คำนึงถึงการป้องกันความเสียหายด้วยแล้ว โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงน่าสนใจมากกว่าโครงข่ายแบบเมช ตัวอย่างเช่น ทางด้านความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์ โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงจะใช้ Add/Drop Multiplexer ที่ง่ายสำหรับการสวิตช์ทราฟฟิกที่มีความเร็วสูง ในขณะที่โครงข่ายแบบเมชต้องใช้ Optical Cross Connects (OXC) s) ที่มีความซับซ้อนมากกว่า Add/Drop Multiplexer และมีการตอบสนองต่อความเสียหายที่ช้ากว่า ทำให้เวลาในการสวิตช์เพื่อเปลี่ยนไปใช้เส้นทางสำรองทำได้ช้าเป็นเหตุให้ข้อมูลอาจสูญหายเป็นจำนวนมาก ส่วนในด้านการควบคุมและจัดการโครงข่ายของวงแหวนแต่ละวงจะทำงานอย่างเป็นอิสระต่อกันดังนั้นการควบคุมและจัดการในโครงข่ายแบบวงแหวนสามารถทำได้โดยง่าย

ส่วนสุดท้ายที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้คือ การเปรียบเทียบข้อจำกัดทางด้านเวลาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงที่มีเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิก 3 รูปแบบ กับ โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช โดยรูปที่ 5.4 ได้ทำการสรุปเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากโครงข่ายและทราฟฟิกที่ใช้ในการทดสอบซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.1

WC case								
M	NoMesh	NoDMR	NoNDMR	NoIMR	MC	DMR	NDMR	IMR
1								
2								
4								
8								

(ก)

NWC case								
M	NoMesh	NoDMR	NoNDMR	NoIMR	MC	DMR	NDMR	IMR
1								
2								
4								
8								

(ข)



รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงกับโครงสร้างแบบเมช (ก) กรณี WC และ (ข) กรณี NWC

จากรูปที่ 5.4 (ก) จะเห็นว่า กรณี WC เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า M ที่เพิ่มขึ้นและจะใช้เวลาไม่เกิน 10 นาทีในการหาผลเฉลยไม่ว่าจะเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงหรือแบบเมชที่มีการป้องกันโครงข่ายก็ตาม ส่วนกรณี NWC ในรูปที่ 5.4 (ข) นั้น เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจะแปรผันตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาในการหาผลเฉลยอีกตัวหนึ่งนั่นคือ เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับ

เทคนิคในการจัดการโครงข่ายที่ใช้โครงข่ายแบบเมฆหรือแบบวงแหวนหลายวง ถ้าเป็นโครงข่ายแบบเมฆ เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจะใช้เวลาไม่เกิน 10 นาทีสำหรับค่าทุกค่าของ M ไม่ว่าจะเป็นโครงข่ายที่มีหรือไม่มีการป้องกันความเสียหายก็ตาม แต่ถ้าเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจะนานกว่าโครงข่ายแบบเมฆ ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงจะมีจำนวนตัวแปร และจำนวน constraint ที่มากกว่าโครงข่ายแบบเมฆ ยกตัวอย่างเช่น ที่ค่า M เท่ากับ 1 กรณีที่มีการคำนึงถึงการป้องกันโครงข่าย จะเห็นว่าโครงข่ายแบบเมฆจะมีจำนวนตัวแปรและ จำนวน constraint เท่ากับ 722 และ 291 ตามลำดับสำหรับวิธี MC ในขณะที่โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงจะมีจำนวนตัวแปรและ จำนวน constraint เท่ากับ 714 และ 757 ตามลำดับสำหรับวิธี DMR หรือ NDMR ส่วนวิธี IMR มีจำนวนตัวแปรและ จำนวน constraint เท่ากับ 2633 และ 1538 ตามลำดับ จะเห็นว่าโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงทั้ง 3 วิธีดังกล่าวมีจำนวนตัวแปรและ จำนวน constraint ที่มากกว่าโครงข่ายแบบเมฆทั้งสิ้น

เมื่อพิจารณาโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงทั้ง 3 วิธี จากรูปที่ 5.4 สามารถเรียงลำดับของวิธีที่ใช้เวลาในการหาผลเฉลยจากน้อยไปหามากได้ดังนี้คือ DMR, NDMR และ IMR ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากวิธี IMR มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากกว่า วิธี DMR และ NDMR และเมื่อเปรียบเทียบเวลาในการหาผลเฉลยระหว่าง DMR กับ NDMR จะเห็นว่า NDMR ใช้เวลานานกว่าวิธี DMR ทั้งๆที่ทั้ง 2 วิธี ต่างก็มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่เท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ค่า M เท่ากับ 8 วิธี DMR จะใช้เวลาในการหาผลเฉลยประมาณ 16 ชั่วโมง ในขณะที่วิธี NDMR ใช้เวลาถึง 1 วันก็ยังไม่ได้ผลเฉลยที่ดีที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก constraint ที่มีเงื่อนไขของการกระจายกราฟฟิกของวิธี NDMR ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยนั่นเอง

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาถึงโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงซึ่งสามารถป้องกันโครงข่ายจากข้อผิดพลาดเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายได้ โดยแบ่งโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงออกเป็น 2 แบบตามเงื่อนไขการกระจายทรานซิปได้แก่ การออกแบบลักษณะที่ 1 และ การออกแบบลักษณะที่ 2 ซึ่งการออกแบบทั้ง 2 แบบดังกล่าวใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Integer Linear Programming (ILP) ในการจำลองโครงข่ายเพื่อจัดสรรวงแหวน เส้นทางและความยาวคลื่นให้สามารถรองรับทรานซิปทั้งหมดของโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายขึ้น โดยใช้ต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่น้อยที่สุดได้

การออกแบบในลักษณะที่ 1 เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [12] ให้สามารถป้องกันความเสียหายจากข้อผิดพลาดเชื่อมโยงหนึ่งได้ ซึ่งสามารถแบ่งแบบจำลองที่ได้ทำการพัฒนาออกเป็น 2 วิธี คือ

1. วิธี optimized spare fiber assignment เป็นวิธีการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกทำการหาเส้นใยแก้วนำแสงทำงานที่รองรับทรานซิปของโครงข่ายในสภาวะปกติก่อนซึ่งโครงข่ายดังกล่าวอาจจะมีการใช้งานจริงอยู่ขณะนั้นก็ได้ จากนั้นจึงนำวงแหวน เส้นทางและความยาวคลื่นที่ได้จัดสรรให้กับโครงข่ายในสภาวะปกติที่ได้จากขั้นตอนแรกมาใช้เพื่อทำการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ใช้รองรับทรานซิปในแต่ละวงแหวนเมื่อเกิดความเสียหายที่ข้อผิดพลาดเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายขึ้นในขั้นตอนที่สอง จะเห็นว่าทั้งสองขั้นตอนจะทำแยกกันอย่างอิสระ
2. วิธี jointly optimized working and spare fiber assignment เป็นวิธีการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดของโครงข่ายทั้งที่เป็นเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองได้พร้อมๆกัน โดยไม่จำเป็นต้องกำหนดวงแหวน เส้นทาง และความยาวคลื่นของโครงข่ายที่ทำงานในสภาวะปกติมาให้เหมือนวิธี optimized spare fiber assignment

จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นทั้ง 2 วิธี ในการทดสอบหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 4 โหนด 3 วงแหวน (4N_3R) และโครงข่าย 7 โหนด 7 วงแหวน (7N_7R) ต้องการ สามารถสรุปผลการทดสอบในแง่ของความซับซ้อน (complexity) ของ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ว่า ไม่ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสร้างขึ้นจากวิธี optimized spare fiber assignment หรือ jointly optimized working and spare fiber assignment แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายกรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC) จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบจำลองของโครงข่ายกรณีที่ไม่มียุอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC) เพราะจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรทั้งหมดที่ใช้สร้างแบบจำลองของโครงข่ายกรณี WC ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง (M) ในทางตรงกันข้ามจำนวน constraint และ จำนวนตัวแปรของโครงข่ายกรณี NWC จะเพิ่มขึ้นตามค่า M ของเส้นใยแก้วนำแสง เพราะฉะนั้นเมื่อพิจารณาในเชิงของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายกรณี NWC จึงใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานกว่าแบบจำลองโครงข่ายกรณี WC และจากผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยวิธี jointly optimized working and spare fiber assignment มีความซับซ้อนมากกว่าวิธี optimized spare fiber assignment เพราะฉะนั้นวิธี jointly optimized working and spare fiber assignment จึงใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานกว่าวิธี optimized spare fiber assignment แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงต้นทุนในแง่ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่าย วิธี jointly optimized working and spare fiber assignment ที่มีการป้องกันโครงข่ายทั้ง 2 แบบคือ Path protection และ Line protection สำหรับการสำรองความจุแบบ Share Wavelength จะสามารถประหยัดต้นทุนที่ใช้ในการสร้างโครงข่ายมากกว่าวิธี optimized spare fiber assignment แต่สำหรับการสำรองความจุแบบ Share Fiber ต้นทุนที่ได้จากวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment และวิธี optimized spare fiber assignment จะเท่ากัน อีกทั้งต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงสำรองเป็นจำนวนเท่ากับเส้นใยแก้วนำแสงทำงานในแต่ละวงแหวนที่ได้จัดสรรให้กับโครงข่าย เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงสำรองต้องสามารถรองรับทราฟฟิกกรณีที่เลวร้ายที่สุด นั่นคือ กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกหนาแน่นที่สุดเกิดความเสียหาย

เมื่อพิจารณาแบบจำลองกรณี NWC ที่มีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection ไม่ว่าจะ เป็นวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment หรือ optimized spare fiber assignment ก็ตาม จะเห็นว่า ถ้าเส้นทางสำรองสามารถใช้ความยาวคลื่นค่าอื่นได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกับเส้นทางในสภาวะการทำงานปกติ ผลที่ได้สำหรับค่าทุกค่าของ M จะมีค่าเท่ากับกรณี WC ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สำหรับโครงข่ายที่ใช้ในการทดสอบนั้นการใช้ตู้เครื่องรับ-ส่งที่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้จะให้ผลเฉลยเท่ากับกรณีที่โครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นให้กับโหนดทุกโหนดในแง่ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่าย

ส่วนการออกแบบในลักษณะที่ 2 วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 กรณี คือกรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่ายและกรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย สำหรับแบบจำลองกรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่ายสามารถแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 แบบคือ แบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำและแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง โดยแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำสามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมกับโครงข่ายที่มีขนาดถึง 11 โหนด 15 ข่ายเชื่อมโยงได้ในเวลาไม่เกินนาที ในขณะที่แบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงไม่สามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมกับโครงข่ายที่มีขนาดตั้งแต่ 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยงขึ้นไปได้ภายใน 1 วัน ส่วนแบบจำลองกรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายไม่สามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมกับโครงข่ายที่มีขนาดตั้งแต่ 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยงขึ้นไปได้ภายใน 1 วันเช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาถึงการจัดเส้นทางสำหรับการออกแบบในลักษณะที่ 2 จะเห็นว่า ที่ค่า M เท่ากับ 1 โครงข่ายจะเลือกใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด เนื่องจากการใช้เส้นทางสั้นที่สุดนั้นจะทำให้ความหนาแน่นของกราฟฟิกโดยเฉลี่ยในข่ายเชื่อมโยงแต่ละขายนั้นต่ำที่สุด ซึ่งส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของวงแหวนที่รองรับกราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงแต่ละขายนั้นต่ำที่สุดด้วย และเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นการเลือกเส้นทางที่สั้นอาจไม่ส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุดดังนั้นคู่โหนดบางคู่จะต้องใช้เส้นทางที่ยาวขึ้นเพื่อรองรับช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาผลของจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสง (M) ที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนวงแหวนที่ได้จัดสรรให้กับโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงทั้ง 2 แบบ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ว่า เมื่อ M เพิ่มขึ้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้จะลดลงเนื่องจากจำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้นเพิ่มขึ้นซึ่งก็จะส่งผลให้จำนวนวงแหวนที่จัดสรรให้ลดลงด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะจำนวนช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นทำให้วงแหวนแต่ละวงมีช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้งานเหลือมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงต่ำ ส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้สูง ดังนั้นกราฟฟิกของคู่โหนดที่สามารถรองรับด้วยช่องสัญญาณที่เหลือดังกล่าวได้จะใช้ช่องสัญญาณในส่วนนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสงให้สูงที่สุดซึ่งก็จะทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายต่ำที่สุด ทำให้วงแหวนบางวงที่มีช่องสัญญาณเหลือมากจึงรองรับกราฟฟิกได้มากขึ้น จำนวนวงแหวนที่ใช้รองรับกราฟฟิกจึงลดลงเมื่อค่าของ M เพิ่มขึ้นนั่นเอง

ส่วนผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายแบบหลายวงแหวนทั้ง 2 แบบ สามารถสรุปได้ในลักษณะเดียวกันคือ กรณีที่ไม่มีการป้องกันโครงข่ายอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลง แต่กรณีที่มีการ

ป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลงได้ในบางค่า M สำหรับการสำรองความจุแบบ Share Wavelength เท่านั้น ยกเว้นกรณีกราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มเท่ากับ 1 สำหรับโครงข่ายแบบวงแหวนขนาด 4 โหนด การใช้ อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นกับวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection ที่มีการสำรองความจุแบบ Share Fiber จะสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้

ในการเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงที่มีการกระจายกราฟฟิกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบกับโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมฆในบทที่ 5 สามารถเรียงลำดับวิธีที่ใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุดไปหามากที่สุดคือ Mesh, IMR, DMR และ NDMR ตามลำดับ และสามารถเรียงลำดับตามความซับซ้อนในการจัดการและควบคุมโครงข่ายจากซับซ้อนน้อยไปหามากคือ NDMR, DMR, IMR และ Mesh ตามลำดับ จะเห็นว่าถึงแม้วิธี NDMR จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากที่สุด แต่การจัดการและควบคุมโครงข่ายจะมีความซับซ้อนน้อยที่สุด หมายความว่าจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง และการจัดการและควบคุมโครงข่ายต่างก็ trade off กันไปตามวิธีที่ใช้ นั่นคือ วิธีใดให้ต้นทุนโครงข่ายต่ำก็จะมีการจัดการและควบคุมโครงข่ายที่ซับซ้อนสูงทดแทนกันไป ส่วนวิธีใดให้ต้นทุนโครงข่ายสูงก็จะมีการจัดการและควบคุมโครงข่ายที่ซับซ้อนน้อยนั่นเอง

จากผลการทดสอบกรณีที่โครงข่ายมีการป้องกันข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายสามารถเรียงลำดับของวิธีที่ใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและต้นทุนของโครงข่ายจากน้อยไปหามากคือ NoMesh, NoIMR, NoDMR และ NoNDMR ตามลำดับสำหรับกรณีที่ไม่มีวิธีการป้องกันโครงข่าย จะเห็นว่าวิธี NoIMR, NoDMR และ NoNDMR ต้องการต้นทุนในการสร้างโครงข่ายมากกว่า NoMesh ประมาณ 0%-6.67%, 3.33%-6.67% และ 16.1%-23.33% ตามลำดับสำหรับค่าทุกค่าของ M ที่ทำการทดสอบ ส่วนกรณีที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหายนั้นวิธี MC ใช้ต้นทุนในการสร้างโครงข่ายน้อยที่สุด ถัดมาก็เป็นวิธี IMR, DMR และ NDMR ตามลำดับ จะเห็นว่าวิธี IMR, DMR และ NDMR ต้องใช้ต้นทุนมากกว่า MC ประมาณ 10.34%-14.29%, 14.71%-18.52% และ 28.71%-35.19% ตามลำดับสำหรับค่าทุกค่าของ M ที่ทำการทดสอบ

จากผลที่ได้จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของต้นทุนระหว่างโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับแบบเมฆจะสูงขึ้นเมื่อโครงข่ายมีการคำนึงถึงการป้องกันโครงข่ายจากเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย และจะเห็นว่าการใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งได้แก่วิธี IMR และ DMR จะให้ต้นทุนที่สูงกว่าวิธี MC ไม่เกิน 15% และ 19 % ตามลำดับ ซึ่งถือว่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความซับซ้อนในการจัดการและควบคุมสำหรับโครงข่ายแบบเมฆที่ใช้วิธีป้องกันโครงข่ายแบบ MC

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในขั้นต่อไปที่น่าสนใจ

1. งานวิจัยที่น่าสนใจเกี่ยวกับการออกแบบโครงข่ายแบบหลายวงแหวน อีกด้านหนึ่ง นอกเหนือจากงานวิจัยที่ได้นำเสนอไว้คือ งานวิจัยเกี่ยวกับลักษณะการวางข่ายเชื่อมโยงเพื่อ เชื่อมต่อโหนดของโครงข่าย โดยจะศึกษาด้านของลักษณะการวางข่ายเชื่อมโยงแบบใดจึงจะ สามารถใช้โครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงในการรองรับความต้องการทราฟฟิกทั้งหมดของ โครงข่ายได้โดยใช้ต้นทุนต่ำที่สุด ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการออกแบบโครงข่าย
2. งานวิจัยที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งก็คือ การศึกษาถึงการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง ซึ่งยอมใช้จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงของวงแหวน แต่ละวงไม่จำเป็นต้องเท่ากัน ซึ่งอาจช่วยลดต้นทุนของโครงข่ายได้ต่ำกว่าการออกแบบที่ได้ นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์นี้
3. เนื่องจากการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีเงื่อนไขการกระจายทราฟฟิกสำหรับการ ออกแบบในลักษณะที่ 2 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ เพียงการป้องกันโครงข่ายแบบ Line protection เท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยต่อไปควรจะมีการ ออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการป้องกันโครงข่ายแบบ Path protection เพื่อ เปรียบเทียบต้นทุนกับวิธีที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. I. P. Kaminow, et al., "A Wideband All-Optical WDM Network," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, pp. 780-799, 1996.
2. L. D. Garrett, et al., "The MONET New Jersey Network Demonstration," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 16, pp. 1199-1219, Sept. 1998.
3. N. Nagatsu, S. Okamoto and K. Sato, "Optical Path Accommodation Design Considering Failure Restoration with Minimum Cross-connect System Scale," *in Proc. NOMS'96*, pp. 213-224, 1996.
4. N. Nagatsu, A. Watanabe, S. Okamoto and K. Sato, "Large Scale Photonic Transport Network Design based on Optical Paths," *IEEE Proceedings of GLOBECOM'96*, pp. 321-327, 1996.
5. N. Nagatsu, S. Okamoto and K. Sato, "Optical Path Cross-connect System Scale Evaluation using Path Accommodation Design for restricted Wavelength Multiplexing," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, pp. 893-902, June 1996.
6. N. Nagatsu, A. Watanabe, S. Okamoto and K. Sato, "Optical Path Cross-Connect Node Architectures for Photonic Transport Network," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, pp. 1410-1422, June 1996.
7. L. Wuttisittikulkij and M.J. O'Mahony, "Design of a WDM Network using a Multiple Ring Approach," *IEEE Proceedings of GLOBECOM'97*, pp. 551-555, Nov 1997.
8. L. Wuttisittikulkij, "An Algorithm for the Design of a Multi-Wavelength All-Optical Transport Network using a Multiple Ring Approach," *Proceedings of 20th Electrical Engineering Conference*, pp. 219-222, 1997.
9. B. Van Caenegem, N. Wauters and P. Demeester, "Spare capacity assignment for different restoration strategies in mesh survivable networks," *Communications, 1997. ICC '97 Montreal, Towards the Knowledge Millennium. 1997 IEEE International Conference on*, pp 288 –292, 1997
10. L. Wuttisittikulkij and M.J. O'Mahony, "Design of an Efficient and Practical Algorithm for Wavelength Assignment in Multi-wavelength Ring Transport Networks," *IEEE Proceedings of GLOBECOM'97*, pp. 571-575, Nov. 1997.

11. X. Yizhi, Z. Qingji, C. Yang and Zhou Yuxun, "Wavelength requirements in wavelength-routed ring networks," Communications, 1999. APCC/OECC '99. Fifth Asia-Pacific Conference on ... and Fourth Optoelectronics and Communications Conference, 1999, pp. 15 –18, vol.1
12. ศิริชัย อารีวานิช. การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน 1 วงและแบบวงแหวนหลายวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
13. เจริญชัย บวรธรรมรัตน์. การออกแบบโครงข่าย WDM ที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อมีความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
14. N. Nagatsu, A. Watanabe, S. Okamoto and K. Sato, "Architectural Analysis of Multiple Fiber Ring Networks Employing Optical Paths," *Journal of Lighthwave Technology*, Vol. 15, pp. 1794-1804, Oct. 1997.
15. B. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Wavelength Conversion in WDM Networking," *IEEE JSAC*,16(7), 1998, pp. 1061-1073.
16. L. Wuttisittikulkij and M.J. O'Mahony, "Multiwavelength Self-healing Ring Transparent Networks," *IEEE Proceedings of GLOBECOM'95*, pp. 45-49, Nov. 1995.
17. ธัญพร เอี่ยมวสันต์. การออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ฮิวริสติกอัล กอริทึม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
18. <http://www.cplex.com/>
19. วสันต์ ตีระศิริกุล. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวงที่สามารถปกป้องความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพรชัย ชนาคนสาคร เกิดวันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปี 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ. 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย