

การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นใน โครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น
ที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน 1 วง และแบบวงแหวนหลายวง



นายศิริชัย อารีวานิช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

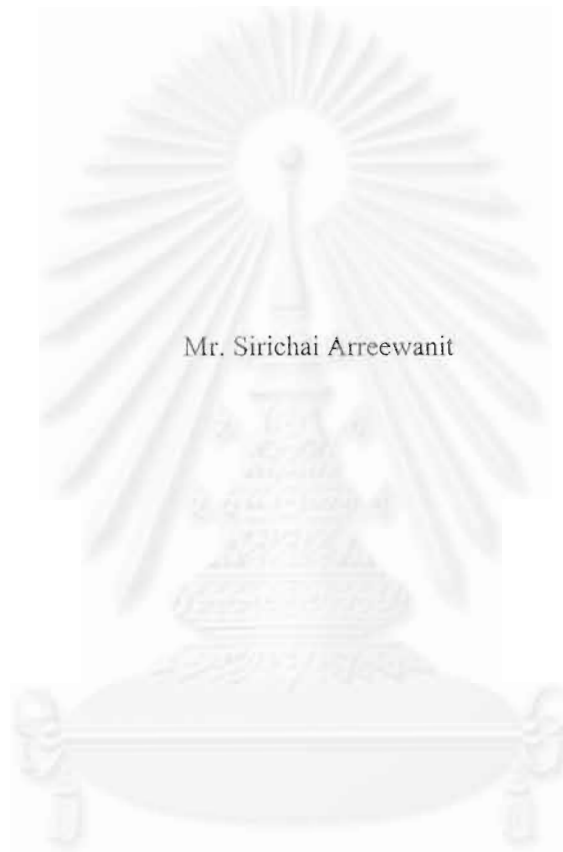
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-786-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION IN MULTI-WAVELENGTH
SINGLE-RING AND MULTI-RING NETWORKS



Mr. Sirichai Arreewanit

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 1999

ISDN 974-333-786-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลาย
ความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน 1 วง และแบบวงแหวนหลายวง

โดย นายศิริชัย อารีวานิช

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

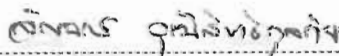
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพัฒน์มงคล)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร)

ศิริชัย อารีวานิช : การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปร่างวงแหวน 1 วง และแบบวงแหวนหลายวง (ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION IN MULTI-WAVELENGTH SINGLE-RING AND MULTI-RING NETWORKS) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. ลัญจนกร วุฒิสถิทธิกุลกิจ, 96 หน้า ISBN 974-333-786-5

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปร่างวงแหวน 1 วง และแบบวงแหวนหลายวง สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปร่างวงแหวน 1 วง ได้ใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์แบบ integer linear programming (ILP) เพื่อหาต้นทุนของโครงข่ายซึ่งวัดจากจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในการรองรับทราฟฟิกของโครงข่าย จากการทดสอบพบว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอสามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดได้ แต่จะใช้เวลาในการหาผลตอบค่อนข้างนาน โดยจะไม่สามารถหาผลตอบภายในเวลาที่เหมาะสมเมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่กว่า 16 โหนด นอกจากนี้เมื่อศึกษาถึงผลกระทบของการนำอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมาใช้ในโครงข่ายรูปร่างวงแหวน พบว่าทำให้ปัญหาการจัดสรรทรัพยากรของระบบมีความซับซ้อนน้อยลง เพราะไม่ต้องจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่เส้นทางในโครงข่าย และจากการทดสอบพบว่าสามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายรูปร่างวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ถึง 185 โหนดภายในเวลาที่เหมาะสมได้

ส่วนการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงมีข้อกำหนดในการออกแบบคือ ปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดสามารถแบ่งให้รองรับโดยวงแหวนมากกว่า 1 วงได้ โดยที่แต่ละส่วนของทราฟฟิกต้องส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยใช้วงแหวนเพียงวงเดียว วิทยานิพนธ์นี้เสนอแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ integer linear programming (ILP) ซึ่งสามารถหาผลตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ แต่จากการทดสอบพบว่าแบบจำลองดังกล่าวใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยค่อนข้างนานแม้ว่าโครงข่ายนั้นจะเป็นโครงข่ายขนาดเล็ก โดยจะไม่สามารถหาผลตอบภายในเวลาที่เหมาะสมเมื่อโครงข่ายมีขนาด 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยง ดังนั้นจึงนำเสนอการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี heuristic ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่สามารถใช้ในการออกแบบโครงข่ายขนาดใหญ่ได้ วิธีการแบบนี้จะไม่รับประกันว่าต้นทุนของโครงข่ายที่ได้จะเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเสมอ แต่โดยทั่วไปจะให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต่ำที่สุด อัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นได้นำไปศึกษาและเปรียบเทียบต้นทุนกับโครงข่ายแบบเมช พบว่าต้นทุนที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง จะมีค่าสูงกว่าต้นทุนที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายแบบเมชไม่มากนัก โดยทั่วไปจะมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 17% แสดงให้เห็นว่า วิธีการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต ศิริชัย อารีวานิช
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ลัญจนกร วุฒิสถิทธิกุลกิจ

4170541921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION / MULTI-WAVELENGTH RING NETWORKS / WAVELENGTH CONVERSION / WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING (WDM)

SIRICHAJ ARREEWANIT : ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION IN MULTI-WAVELENGTH SINGLE-RING AND MULTI-RING NETWORKS. THESIS ADVISOR : LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ, Ph.D. 96 pp. ISBN 974-333-786-5

This thesis presents routing and wavelength allocation techniques in multi-wavelength single-ring and multi-ring networks. For routing and wavelength allocation in single-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 number of wavelengths required for supporting a given traffic demand. It is shown that the proposed mathematical models offer optimal solution but the computational time becomes a problem for a network larger than 16 nodes. In addition, a study on the effect of having wavelength conversion in the system shows that the complexity of the network resource allocation is reduced. This is because wavelength allocation is no longer required. Based on the simulation results, it is found that the optimal resource allocation in the systems with wavelength conversion can be applied to ring networks of up to 185 nodes.

For the multi-ring network design, mathematical model formulations based on integer linear programming (ILP) and heuristic schemes are proposed on the condition that the traffic between any node pair can be distributed to flow over more than one ring, but any portion of the traffic must be restricted to flow within only one ring. The mathematical model formulations for multi-ring network design can guarantee optimal solution. However, the computational time of the mathematical modeling appears to be excessive even with a network as small as 8 nodes with 13 links. Accordingly, heuristic algorithms that can solve large network problems are introduced. These algorithms cannot guarantee optimal solution but, in general, they can achieve near optimal results. These developed algorithms are then used to perform cost comparisons between the multi-ring and mesh design approaches. It appears that the multi-ring network design approach requires less than 17% additional costs in comparison to the mesh design counterpart. Consequently, the multi-ring network design is considered suitable and effective for practical applications.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สื่อสาร
 ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต ศิริชัย ช่างงาม
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ คร.ลัญจกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณอย่างสูงสำหรับคุณสิทธิชัย ลีตานันท์นุกูล คุณเจริญชัย บวรธรรมรัตน์ คุณธัญพร เอี่ยมวสันต์และ คุณศรุต วานิชพันธุ์ ที่ช่วยให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นและ ให้ยืมใช้ฮัลกอริทึมสำหรับการเปรียบเทียบผล รวมทั้งเพื่อนๆ รุ่นพี่และรุ่นน้องในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าสื่อสารทุกคน ที่ให้คำแนะนำและกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้ บางส่วนได้รับมาจากโครงการศึกษากันกุฎิจึงขอขอบพระคุณ โครงการศึกษากันกุฎิมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาและทุกๆคนในครอบครัว ซึ่งสนับสนุน ในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.....	2
1.4 เป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ความรู้พื้นฐาน.....	5
2.1 โครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น.....	5
2.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลาย ความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน.....	8
2.3 การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	9
2.4 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลาย ความยาวคลื่น โดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง.....	9
2.5 Integer Linear Programming (ILP).....	12
3 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น ในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน.....	14
3.1 กล่าวนำ.....	14
3.2 การสร้างแบบจำลองของปัญหาด้วยคณิตศาสตร์.....	15
3.2.1 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์ แปลงผันความยาวคลื่น (No Wavelength Conversion : NWC).....	16

สารบัญ (ต่อ)

3.2.2	แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Conversion : WC).....	16
3.3	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	19
3.3.1	ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม (Uniform traffic).....	19
3.3.1.1	โครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่ (Odd-node ring).....	20
3.3.1.2	โครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่ (Even-node ring).....	23
3.3.2	ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม (Non-uniform traffic).....	25
3.3.3	เวลาที่ใช้ในการหาผลตอบจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	31
3.4	ผลการทดสอบที่ได้จากวิธี heuristic.....	33
4	แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น โดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง.....	36
4.1	กล่าวนำ.....	36
4.2	การสร้างแบบจำลองของปัญหาด้วยคณิตศาสตร์.....	37
4.2.1	แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (No Wavelength Conversion : NWC).....	38
4.2.2	แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Conversion : WC).....	40
4.3	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	42
4.3.1	ลักษณะการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง.....	42
4.3.2	ผลของจำนวนความยาวคลื่นที่ผลิตเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและต้นทุนของโครงข่าย.....	46
4.3.3	การเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายแบบเมช.....	48
4.3.4	ความซับซ้อนของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	50
4.3.4.1	ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	50

สารบัญ (ต่อ)

4.3.4.2	ผลของขนาดโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	51
4.4	แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กรณีที่มีการจำกัดวงแหวนและการวิเคราะห์.....	52
5	การออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี heuristic.....	59
5.1	กล่าวนำ.....	59
5.2	อัลกอริทึมสำหรับการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี heuristic.....	60
5.3	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	66
5.3.1	ประสิทธิภาพของอัลกอริทึม.....	68
5.3.2	ผลของปริมาณทราฟฟิกและจำนวนความยาวคลื่นที่มีผลต่อเฟลทช์ในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีต่อค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือก.....	74
5.3.3	ผลของจำนวนความยาวคลื่นที่มีผลต่อเฟลทช์ในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีต่อต้นทุนของโครงข่ายและการจัดสรรทรัพยากรในโครงข่าย.....	76
5.3.4	ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อต้นทุนของโครงข่าย.....	80
6	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	81
6.1	สรุปผลการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน.....	81
6.2	สรุปผลการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง.....	83
6.3	ข้อเสนอแนะ.....	86
	รายการอ้างอิง.....	87
	ภาคผนวก.....	89
	ประวัติผู้เขียน.....	96

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตัวอักษรย่อของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีต่างๆ.....	18
ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กรณีต่างๆ และเป็นกรณีที่กราฟฟิคของทุกคู่โหนดมีค่ามากกว่า 0.....	18
ตารางที่ 3.3 ค่าขอบเขตอุดมคติ (ideal bound) สำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็น จำนวนคี่และต้องการปริมาณกราฟฟิคแบบยูนิฟอร์ม ที่ค่า traffic volume = 1.....	20
ตารางที่ 3.4 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่ และต้องการปริมาณกราฟฟิคแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้แบบจำลองในกรณี NWC-ap.....	21
ตารางที่ 3.5 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่ และต้องการปริมาณกราฟฟิคแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้แบบจำลองในกรณี NWC-sp.....	22
ตารางที่ 3.6 ค่าขอบเขตอุดมคติ (ideal bound) สำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็น จำนวนคู่และต้องการปริมาณกราฟฟิคแบบยูนิฟอร์ม ที่ค่า traffic volume = 1.....	23
ตารางที่ 3.7 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่ และต้องการปริมาณกราฟฟิคแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้แบบจำลองในกรณี NWC-ap.....	24
ตารางที่ 3.8 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่ และต้องการปริมาณกราฟฟิคแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้แบบจำลองในกรณี NWC-sp.....	24
ตารางที่ 3.9 ปริมาณกราฟฟิคแบบ ไม่ยูนิฟอร์มสำหรับ โครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 7 โหนด.....	26
ตารางที่ 3.10 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 7 โหนดที่ต้องการปริมาณ กราฟฟิคแบบ ไม่ยูนิฟอร์มในตารางที่ 3.9 โดยใช้แบบจำลองในกรณีต่างๆ.....	26
ตารางที่ 3.11 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 7 โหนดที่ต้องการปริมาณ กราฟฟิคแบบ ไม่ยูนิฟอร์มรูปแบบต่างๆและกำหนดให้กราฟฟิคในปริมาณสูง มีค่าเท่ากับ 10 ช่องสัญญาณ โดยใช้แบบจำลองในกรณีต่างๆ.....	29

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 3.12 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่ และต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้อัลกอริทึม H3.....	34
ตารางที่ 3.13 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่ และต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้อัลกอริทึม H3.....	35
ตารางที่ 3.14 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่ และต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้อัลกอริทึม H4.....	35
ตารางที่ 4.1 จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลองกรณีที่ไม่มีและ มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และเป็นกรณีที่ทราฟฟิกของทุกคู่โหนด มีค่ามากกว่า 0	41
ตารางที่ 4.2 ปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่ค่า traffic volume = 1 ในโครงข่ายขนาด 6 โหนด.....	42
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของผลการออกแบบในลักษณะที่ 1	43
ตารางที่ 4.4 หมายเลขวงแหวนที่รองรับปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดจากผลการออกแบบ ในลักษณะที่ 1	44
ตารางที่ 4.5 รายละเอียดของผลการออกแบบในลักษณะที่ 2.....	45
ตารางที่ 4.6 หมายเลขวงแหวนที่รองรับปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดจากผลการออกแบบ ในลักษณะที่ 2	45
ตารางที่ 4.7 รายละเอียดของผลการออกแบบในลักษณะที่ 3.....	46
ตารางที่ 4.8 หมายเลขวงแหวนที่รองรับปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดจากผลการออกแบบ ในลักษณะที่ 3	46
ตารางที่ 4.9 ผลของค่า M และการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวน เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่าย.....	47
ตารางที่ 4.10 ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปรและ จำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	50
ตารางที่ 4.11 ผลของขนาดโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	52
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองระหว่างกรณีที่ ไม่มีการจำกัดวงแหวน (high complexity model) และกรณีที่มีการจำกัดวงแหวน (low complexity model) โดยทดสอบกับโครงข่ายขนาดต่างๆ.....	54

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองระหว่างกรณีที่ไม่มีการจำกัดวงแหวน (high complexity model) และกรณีที่มีการจำกัดวงแหวน (low complexity model) โดยทดสอบที่ M ค่าต่างๆ.....	56
ตารางที่ 4.14 ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายในกรณีที่มีการจำกัดวงแหวนที่จะเลือกในแบบจำลอง.....	57
ตารางที่ 5.1 ปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดในโครงข่าย (input traffic).....	66
ตารางที่ 5.2 รายละเอียดของวงแหวนแต่ละวงที่เลือก.....	67
ตารางที่ 5.3 ต้นทุนของโครงข่ายต่างๆ ในกรณีที่ค่า $M=1$ เปรียบเทียบกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช.....	70
ตารางที่ 5.4 ต้นทุนของโครงข่ายในกรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC) เปรียบเทียบกับต้นทุนในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC).....	80

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบการส่งสัญญาณข้อมูล 4 ช่องสัญญาณแบบจุดต่อจุด โดยใช้เทคโนโลยี WDM.....	5
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างของโนคในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ wavelength add/drop multiplexer (WADM).....	8
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของการจัดสรรความยาวคลื่น.....	8
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	9
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการวางวงแหวนในลักษณะที่ 1.....	10
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการวางวงแหวนในลักษณะที่ 2.....	10
รูปที่ 2.8 ผลการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นจากการใช้ integer linear programming.....	13
รูปที่ 2.9 ผลการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้ linear programming.....	13
รูปที่ 3.1 รูปแบบต่างๆของกราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม.....	27
รูปที่ 3.2 รูปแบบกราฟฟิกที่อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยให้ใช้ จำนวนความยาวคลื่นน้อยลง.....	30
รูปที่ 3.3 รูปแบบกราฟฟิกที่อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถช่วยให้ใช้ จำนวนความยาวคลื่นน้อยลง.....	30
รูปที่ 3.4 เวลาที่ใช้ในการหาผลตอบในกรณี NWC-ap.....	32
รูปที่ 3.5 เวลาที่ใช้ในการหาผลตอบในกรณี NWC-sp.....	32
รูปที่ 4.1 โครงข่ายตัวอย่างขนาด 6 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยง.....	42
รูปที่ 4.2 วงแหวนที่เลือกใช้จากผลการออกแบบในลักษณะที่ 1.....	43
รูปที่ 4.3 วงแหวนที่เลือกใช้จากผลการออกแบบในลักษณะที่ 2.....	44
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนของโครงข่ายกับจำนวนความยาวคลื่นที่มีลติเพลกซ์ ในเส้นใยแก้วนำแสง โดยเปรียบเทียบกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช.....	48
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบต้นทุนของ โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง (MR cost) กับต้นทุนของ โครงข่ายแบบเมช (Mesh cost).....	49
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบต้นทุนของ โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง กับต้นทุนของ โครงข่ายแบบเมช.....	55
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบต้นทุนของ โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช ที่ M=1, 2, 4 และ 8.....	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.1 แผนผังการทำงานของอัลกอริทึมสำหรับการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสง แบบหลายความยาวคลื่น โดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี heuristic.....	65
รูปที่ 5.2 โครงข่าย EURO-Core.....	66
รูปที่ 5.3 โครงข่ายตัวอย่างขนาด 7 โหนด 11 ข่ายเชื่อมโยง.....	68
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้จากการออกแบบ ด้วยวิธี heuristic (Heuristic cost) กับต้นทุนที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Math cost) ที่ $M=1, 2, 3$ และ 4	69
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกกับปริมาณกราฟฟิค ที่ค่า M เท่ากับ 1 และ 2.....	75
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า utilization กับปริมาณกราฟฟิค ที่ค่า M เท่ากับ 1 และ 2.....	76
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้กับจำนวนความยาวคลื่น ที่มีมัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง.....	78
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า utilization กับจำนวนความยาวคลื่นที่มีมัลติเพลกซ์ ในเส้นใยแก้วนำแสง.....	78
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนของโครงข่ายกับจำนวนความยาวคลื่นที่มีมัลติเพลกซ์ ในเส้นใยแก้วนำแสง โดยเปรียบเทียบกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช.....	79
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกกับจำนวนความยาวคลื่น ที่มีมัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง.....	79

บทที่ 1

บทนำ



1.1 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน ในกรณีที่มีและไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และศึกษาข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
2. ออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง และเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายกับต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช

1.2 ความเป็นมาและเหตุผล

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing : WDM) ได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลายท่าน [1-3] เพราะเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้พัฒนาและออกแบบโครงข่ายที่มีความจุสูงมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อรองรับการเติบโตอย่างรวดเร็วของการใช้งานทางด้านสื่อสารข้อมูลประเภทต่างๆ เช่น อินเทอร์เน็ต การประชุมสัมมนาทางโทรทัศน์ (video conference) การส่งข้อมูลผ่าน LAN เป็นต้น ระบบโครงข่ายแบบนี้มีจุดที่แตกต่างไปจากระบบโครงข่ายแบบเดิมตรงที่การส่งผ่านข้อมูลนั้นจะอยู่ในรูปของสัญญาณแสงทั้งหมดนับตั้งแต่ต้นทางจนถึงปลายทาง ดังนั้นจึงไม่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อยู่ระหว่างกลางเลย ซึ่งการส่งสัญญาณในลักษณะนี้ช่วยให้การรับส่งข้อมูลนั้นกระทำที่อัตราเร็วสูงมากๆ ได้ โครงข่ายที่มีการส่งข้อมูลในลักษณะนี้จึงมีชื่อเรียกว่า โครงข่ายสื่อสารด้วยแสงแบบเบ็ดเสร็จ (all-optical networks)

ในอดีตงานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การออกแบบโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมชเป็นหลัก [4-7] เพราะตามปกติการออกแบบในลักษณะนี้จะทำให้ใช้ทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก (ทรัพยากรในที่นี้คือจำนวนความยาวคลื่นและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง) หากแต่ปัญหาใหญ่ของวิธีนี้คือ ความซับซ้อนในการจัดสรรความยาวคลื่นที่เหมาะสม โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องคำนึงถึงผลกระทบของการที่อุปกรณ์บางส่วนในโครงข่ายไม่ทำงาน เช่น เส้นใยแก้วนำแสงบางเส้นถูกตัด

ขาด ด้วยเหตุนี้จึงได้มีผู้เสนอแนวทางการออกแบบที่แตกต่างออกไป [8,9] ได้เสนอวิธีการที่อาศัยโครงสร้างของโครงข่ายรูปวงแหวนเป็นพื้นฐานในการออกแบบ (โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง) ซึ่งในบทความดังกล่าวได้ชี้ให้เห็นถึงข้อดีสำคัญหลายประการของการออกแบบในลักษณะนี้

1. เนื่องจากโครงสร้างของโครงข่ายแบบวงแหวนเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและเป็นระเบียบชัดเจน ดังนั้นการควบคุมและการจัดการกับระบบซึ่งรวมไปถึงการรองรับทราฟฟิกจึงค่อนข้างง่ายกว่าโครงสร้างแบบอื่นๆ
2. เนื่องจากโครงสร้างแบบวงแหวนมีคุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งคือ ระหว่างคู่โหนดใดๆจะมีเส้นทางที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เกิดขึ้นได้เพียง 2 เส้นทาง ซึ่งสามารถนำคุณสมบัติข้อนี้มาใช้ประโยชน์ในการป้องกันทราฟฟิกภายในโครงข่ายจากผลกระทบที่เกิดจากการเสียหายของอุปกรณ์บางส่วน เช่น การที่สายเคเบิลขาดหรือสวิตช์ไม่ทำงานตามปกติ ได้ด้วยวิธีง่ายๆนั่นคือ การเลือกใช้อีกเส้นทางที่เหลืออยู่ในวงแหวนและสามารถใช้อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์เกือบทั้งหมดในการทำให้ระบบกลับมาทำงานได้ตามปกติ ซึ่งหมายความว่ากระบวนการเหล่านี้สามารถกระทำจนสำเร็จได้ด้วยเวลาอันสั้นและมีความแน่นอนสูง
3. อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในโครงข่ายรูปวงแหวนเป็นเพียงตัวมัลติเพลกซ์ (multiplexers) และตัวดีมัลติเพลกซ์ (demultiplexers) ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบโครงข่ายแบบเมชที่เป็น optical cross-connects

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่ากรออกแบบโครงข่ายโดยใช้โครงสร้างแบบโครงข่ายรูปวงแหวนเป็นพื้นฐานมีข้อดีหลายประการที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 1.1. ศึกษาบทความเกี่ยวกับเทคโนโลยีการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing : WDM)
 - 1.2. ศึกษาวิธีการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นแบบเมช
 - 1.3. ศึกษาวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวนเดี่ยว 1 วง
 - 1.4. ศึกษาวิธีการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น โดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

2. ศึกษาและออกแบบวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างรูปร่างวงแหวนเดี่ยว 1 วง และแบบวงแหวนหลายวง
 - 2.1. ออกแบบการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปร่างวงแหวนเดี่ยว 1 วง โดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ในกรณีที่มีและไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
 - 2.2. ทดสอบอัลกอริทึมในข้อ 2.1 กับโครงข่ายรูปร่างวงแหวนขนาดต่างๆ โดยใช้รูปแบบกราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มและไม่ยูนิฟอร์ม เพื่อศึกษาผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ผลของกราฟฟิกรูปแบบต่างๆ ที่มีต่อต้นทุนของโครงข่าย และพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลตอบของอัลกอริทึมนี้
 - 2.3. ทดสอบอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอใน [9] เพื่อศึกษาผลของจำนวนวงแหวนที่ใช้ในโครงข่ายที่มีต่อต้นทุนของโครงข่าย เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นต่อไป
 - 2.4. ออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่ใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง โดยปริมาณกราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดสามารถแบ่งให้รองรับโดยวงแหวนมากกว่า 1 วงได้ โดยที่แต่ละส่วนของกราฟฟิกต้องส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยใช้วงแหวนเพียงวงเดียว ซึ่งจะให้การหาผลตอบด้วยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และการหาผลตอบด้วยวิธี heuristic ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
 - 2.5. ทดสอบอัลกอริทึมในข้อ 2.4 และเปรียบเทียบต้นทุนที่ได้กับต้นทุนของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช รวมถึงปรับปรุงในส่วนที่บกพร่อง
3. รวบรวมและสรุปผลการวิจัยทั้งหมด เพื่อเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 เป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างรูปร่างวงแหวนเดี่ยว 1 วง โดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ในกรณีที่มีและไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ให้สามารถจัดสรรทรัพยากรได้อย่างประหยัดที่สุด
2. ศึกษาผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อต้นทุนของโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปร่างวงแหวน
3. ออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่ใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง โดยปริมาณกราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดสามารถแบ่งให้รองรับโดยวงแหวนมากกว่า 1 วงได้ โดยที่แต่ละส่วนของกราฟฟิกต้องส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง

โดยใช้วงแหวนเพียงวงเดียว ให้มีต้นทุนของโครงข่ายต่ำใกล้เคียงกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมชมากที่สุด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบโครงข่ายที่มีความจุสูงมากโดยใช้โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และสามารถป้องกันทรานส์ฟิสิกภายในโครงข่ายจากผลกระทบที่เกิดจากการเสียหายของอุปกรณ์บางส่วนได้อย่างรวดเร็วและมีความแน่นอนสูง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ทำให้ทราบถึงประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
3. ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของการหาผลตอบ โดยการให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์



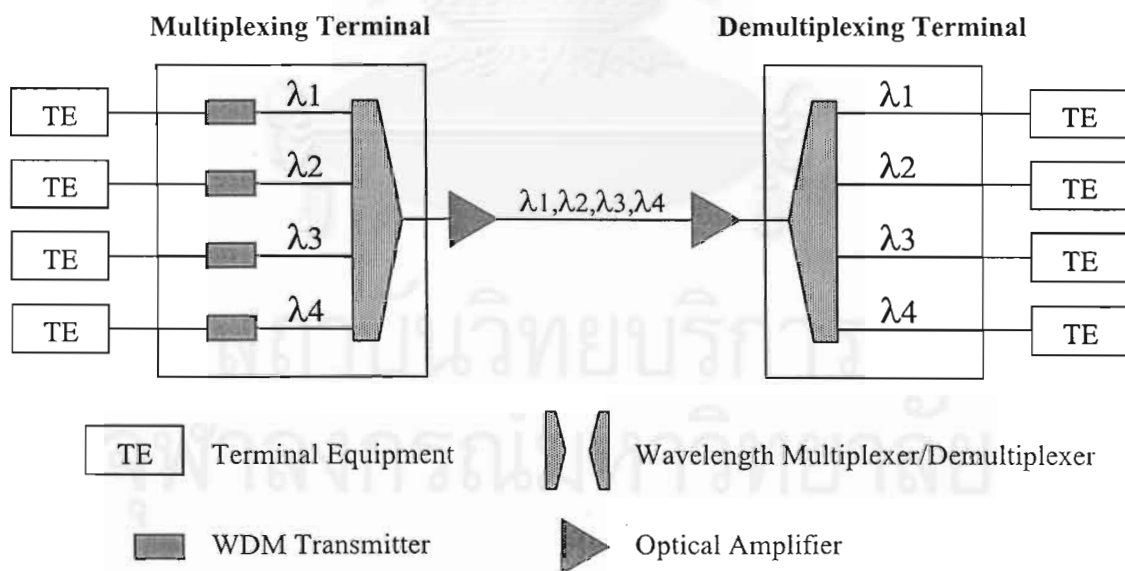
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

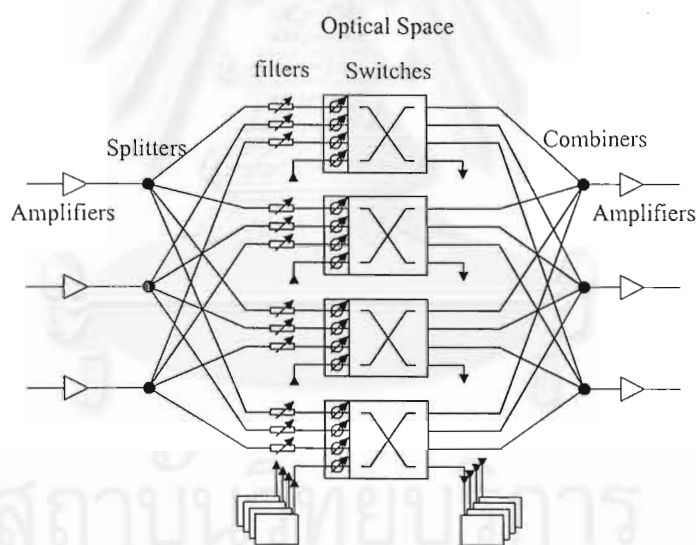
2.1 โครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing : WDM) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งข้อมูลด้วยแสงโดยใช้การรวมสัญญาณข้อมูลหลายๆสายข้อมูล (data stream) เข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น โดยแต่ละสายข้อมูลจะมีค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไป การรวมสัญญาณข้อมูลที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงจะใช้ตัวมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (wavelength multiplexer) และในการแยกสัญญาณข้อมูลกลับคืนมาจะใช้ตัวดีมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (wavelength demultiplexer) เทคโนโลยี WDM มีประโยชน์อย่างมากในการสื่อสารข้อมูลระยะไกล เนื่องจากการเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงจะช่วยเพิ่มความจุให้กับโครงข่ายอย่างมากโดยไม่ต้องวางเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยาก ล้นเปลืองเวลาและงบประมาณ รูปที่ 2.1 เป็นตัวอย่างการใช้เทคโนโลยี WDM ในการส่งสัญญาณข้อมูล 4 ช่องสัญญาณแบบจุดต่อจุด



รูปที่ 2.1 ระบบการส่งสัญญาณข้อมูล 4 ช่องสัญญาณแบบจุดต่อจุด โดยใช้เทคโนโลยี WDM [10]

รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของโนดในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่ได้มีการสร้างขึ้นจริงภายใต้โครงการวิจัยที่มีชื่อเรียกว่า RACE 2028 Multi-Wavelength Transport Network ซึ่งเป็นความร่วมมือกันระหว่างบริษัททางด้านสื่อสารกับมหาวิทยาลัย เช่น British Telecom, Ericsson Telecom, CNET, CSELT และ University of Essex [11,12] จากรูปจะเห็นว่าโนดมีเส้นใยแก้วนำแสงขาเข้าทั้งสิ้น 3 ขาและขาออกทั้งสิ้น 3 ขา โดยที่ขาเข้าแต่ละขาของโนดสามารถรับสัญญาณได้ทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะถูกนำมาขยายโดยใช้ตัวขยาย (amplifier) จากนั้นจะแบ่งสัญญาณเหล่านี้ออกเป็น 4 ส่วนเท่าๆกันโดยตัวแยก (splitter) และส่งต่อไปยังวงจรรอง (filter) เพื่อเลือกเฉพาะความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับสวิตช์แต่ละตัวต่อไป จากนั้นสวิตช์แต่ละตัวจะสวิตช์สัญญาณที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่งไปออกที่ขาออกของโนดตามต้องการ ส่วนทางด้านขาออกจะเห็นว่ามีการใช้ตัวขยายอีกครั้งเพื่อลดผลกระทบของการสูญเสียกำลังของสัญญาณภายในโนด โครงสร้างของโนดที่กล่าวมานี้สามารถนำมาสร้างโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปแบบต่างๆได้เช่นโครงข่ายรูปดาว (star network) โครงข่ายแบบเมช (mesh network) หรือโครงข่ายรูปวงแหวน (ring network)

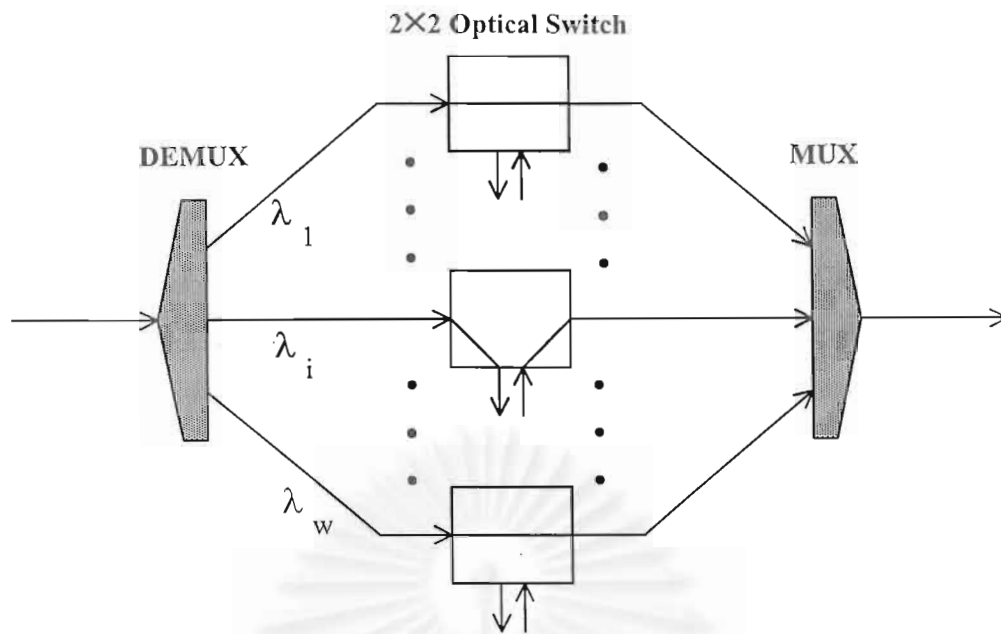


รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างของโนดในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น [11,12]

ส่วนประกอบที่สำคัญของโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น

1. เส้นใยแก้วนำแสง (Optical Fiber) เป็นสายนำสัญญาณที่ส่งข้อมูลด้วยอัตราที่สูงมาก และทนต่อสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี
2. แหล่งกำเนิดแสง (Optical Source) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสงเพื่อส่งเข้าไปใน โครงข่ายใยแก้วนำแสง ได้แก่ ไดโอดเปล่งแสง (light emitting diode :LED) หรือ เลเซอร์
3. ตัวตรวจวัดทางแสง (Optical Detector) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณแสง แล้วแปลงกลับให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น photodiode
4. ตัวมัลติเพลกซ์เชิงความยาวคลื่น (Wavelength Multiplexer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ รวมสัญญาณทางแสงหลายๆสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณเดียวกัน
5. ตัวดีมัลติเพลกซ์เชิงความยาวคลื่น (Wavelength Demultiplexer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ แยกสัญญาณทางแสงหลายๆสัญญาณที่รวมอยู่ด้วยกันออกจากกัน
6. เครื่องส่งแสง (Optical Transmitter) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อ (coupling) สัญญาณแสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงเพื่อส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง
7. ตัวขยาย (Amplifier) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ เพื่อให้สามารถส่งสัญญาณ ได้ไกลยิ่งขึ้น

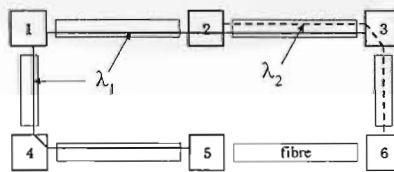
สำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวนซึ่งเป็นโครงสร้างแบบที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ กรณีที่เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้มีลักษณะเป็นเส้นใยแบบ 2 ทิศทาง (bidirectional fiber) คือ สามารถส่งผ่านข้อมูลได้ทั้งสองทิศทางคือ ทิศทางที่ใช้ในการส่งและรับข้อมูล นอกจากนี้จะมีโครงสร้างของโนดที่แตกต่างจากโครงสร้างของโนด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โครงสร้างของโนดในโครงข่ายรูปวงแหวนจะมีเส้นใยแก้วนำแสงขาเข้า 1 ขา และขาออก 1 ขา และจะใช้สวิตช์ทางแสงที่มีขนาด 2×2 (2×2 optical switch) ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าโครงสร้างของโนดที่แสดงในรูปที่ 2.2 รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของ wavelength add/drop multiplexer (WADM) ที่ใช้ในโนดของโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน [10] ซึ่งประกอบด้วย ตัวดีมัลติเพลกซ์ สวิตช์ทางแสงขนาด 2×2 (สวิตช์ 1 ตัวต่อความยาวคลื่น 1 ค่า) และตัวมัลติเพลกซ์ ในกรณีของสัญญาณข้อมูล λ_1 และ λ_w สัญญาณจะถูกส่งผ่าน WADM ไปยังโนดถัดไป สำหรับกรณีของสัญญาณข้อมูล λ_1 จะสิ้นสุดลงที่โนดปลายทางนี้ และสามารถส่งสัญญาณข้อมูลตัวใหม่ออกไปจากโนดได้โดยใช้ความยาวคลื่นค่าเดิม



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ wavelength add/drop multiplexer (WADM) [10]

2.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน

เพื่อให้เข้าใจปัญหาการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น พิจารณาตัวอย่างของโครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 6 โหนดในรูปที่ 2.4 สมมติว่าต้องการช่องสัญญาณทั้งสี่จำนวน 3 ช่องสัญญาณซึ่งเชื่อมต่อคู่โหนด (1,3) (2,6) และ (1,5) เข้าด้วยกัน สามารถกระทำได้ดังนี้

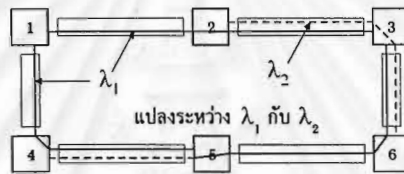


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของการจัดสรรความยาวคลื่น

คู่แรกระหว่างโหนด 1 และ 3 จะสร้างช่องสัญญาณโดยใช้ความยาวคลื่น λ_1 บนเส้นทางที่ผ่านโหนด 2 ส่วนคู่ที่สองระหว่างโหนด 2 และ 6 จำเป็นต้องใช้ความยาวคลื่น λ_2 และคู่สุดท้ายระหว่างโหนด 1 และ 5 สามารถใช้ความยาวคลื่น λ_1 ได้อีกโดยสร้างช่องสัญญาณผ่านโหนด 4 ในตัวอย่างนี้เพียงแสดงให้เห็นว่าการสร้างช่องสัญญาณระหว่างคู่โหนดนั้นสามารถทำได้หลายรูปแบบ การออกแบบโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพที่ดีนั้นมักจะต้องใช้จำนวนความยาวคลื่นให้น้อยที่สุดเพื่อลดต้นทุนของโครงข่าย

2.3 การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เมื่อนำอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (wavelength converter) มาเสริมขีดความสามารถของโหนด ทำให้แต่ละโหนดสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นของสัญญาณที่เข้ามาให้เป็นความยาวคลื่นใหม่สำหรับการส่งออกไปยังปลายทางได้ อุปกรณ์นี้ช่วยทำให้ปัญหาการจัดสรรความยาวคลื่นหมดไป เพราะไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดเส้นทางอีกต่อไป เพื่อให้เห็นถึงประโยชน์ของอุปกรณ์ชิ้นนี้ จะยกตัวอย่างที่กล่าวข้างต้นในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 สมมุติว่าต้องการสร้างช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งช่องระหว่างโหนด (3,4) จะเห็นว่าไม่สามารถใช้ความยาวคลื่น λ_1 หรือ λ_2 ได้เลย ดังนั้นจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นขึ้นอีก 1 ความยาวคลื่น (λ_3) รวมเป็น 3 ความยาวคลื่น แต่ถ้ามีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จะสามารถใช้เส้นทาง 3-6-5-4 โดยมีการแปลงความยาวคลื่นที่โหนด 5 (ดูรูปที่ 2.5 ประกอบ) ทำให้ใช้จำนวนความยาวคลื่นเพียง 2 ความยาวคลื่น



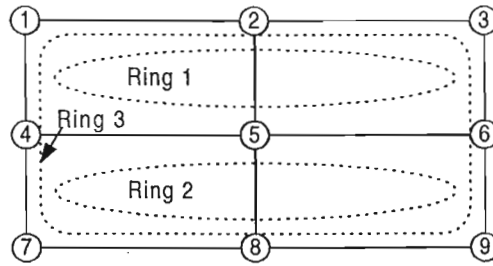
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ตัวอย่างดังกล่าวเป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งซึ่งแสดงถึงประโยชน์ของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ช่วยลดจำนวนความยาวคลื่นลงได้ แต่อุปกรณ์ดังกล่าวอาจไม่เป็นประโยชน์กับปริมาณทราฟฟิกรูปแบบอื่นๆเสมอไป ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่ายรูปวงแหวนต่อไป

2.4 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลาย

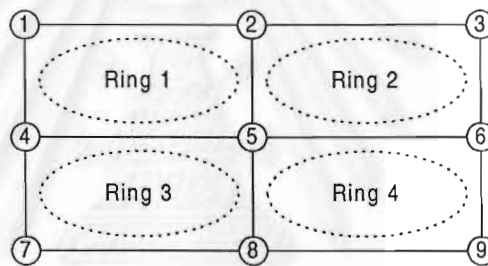
ความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

จากการศึกษาพบว่า การใช้โครงข่ายแบบวงแหวนเดี่ยว 1 วงไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากจะทำให้ใช้แบนด์วิดท์ของโครงข่ายด้วยประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำ จึงได้มีผู้เสนอการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น โดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนเดี่ยวหลายๆวง [8,9] แทนการใช้วงแหวนเดี่ยวเพียง 1 วง การออกแบบนี้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามลักษณะการใช้วงแหวนเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการ (traffic demands) ในโครงข่าย ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการวางวงแหวนในลักษณะที่ 1

ในลักษณะที่ 1 ปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนด ต้องรองรับได้โดยวงแหวนเพียง 1 วงเท่านั้น นั่นคือในระหว่างที่ส่งสัญญาณจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง จะไม่ยอมให้สัญญาณนั้นเดินทางข้ามไปยังวงแหวนอื่นได้ จากตัวอย่างการวางวงแหวนลักษณะที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าวงแหวน 3 วงจะถูกเลือกเพื่อให้ปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดสามารถรองรับได้โดยวงแหวนเพียง 1 วง และจะเห็นว่ากรวางวงแหวนในลักษณะนี้ต้องมีวงแหวนขนาดใหญ่รวมอยู่ด้วยเพื่อให้ทราฟฟิกของคู่โหนดที่อยู่ไกลกันสามารถรองรับได้โดยวงแหวนเพียงวงเดียว



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการวางวงแหวนในลักษณะที่ 2

ในลักษณะที่ 2 ปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนด สามารถรองรับได้โดยวงแหวนมากกว่า 1 วง นั่นคือ สัญญาณที่เดินทางจากต้นทางไปยังปลายทางสามารถเดินทางข้ามวงแหวนได้ จากตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นว่า วงแหวนที่เลือกจะเป็นเพียงวงแหวนขนาดเล็ก 4 วง การวางวงแหวนในลักษณะนี้มีข้อจำกัดน้อยกว่าการวางวงแหวนในลักษณะที่ 1 นั่นคือ ไม่จำเป็นต้องเลือกใช้วงแหวนขนาดใหญ่ เนื่องจากต้องการเพียงให้มีวงแหวนผ่านโหนดทุกโหนดเท่านั้น ก็จะทำให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของทุกคู่โหนดได้

พิจารณาตัวอย่างการส่งสัญญาณจากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 9 สำหรับการวางวงแหวนในลักษณะที่ 1 (รูปที่ 2.6) ใช้เพียงวงแหวนวงที่ 3 (Ring 3) ในการรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการ ส่วนการวางวงแหวนในลักษณะที่ 2 (รูปที่ 2.7) จะต้องใช้วงแหวนมากกว่า 1 วง นั่นคืออาจเลือกใช้วงแหวนที่ 1 และ 4 โดยมีการข้ามวงแหวนที่โหนดที่ 5 หรืออาจเลือกใช้วงแหวนที่ 1, 3 และ 4 โดยมีการข้ามวงแหวนที่โหนดที่ 4 และ 8 ตามลำดับ

การออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น โดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง ที่ได้นำเสนอไว้ [8,9] ใช้การวางวงแหวนในลักษณะที่ 1 จากการศึกษาบทความทั้งสองบทความข้างต้น ปรากฏว่าการออกแบบที่ได้นำเสนอไว้ยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในทางปฏิบัติได้ นั่นคือ [9] ออกแบบโดยอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ยังไม่สามารถหาผลตอบที่เหมาะสมที่สุดได้และวิธีการนี้มีปัญหาในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลตอบที่นานเกินไปสำหรับโครงข่ายขนาดใหญ่ ส่วนการออกแบบที่ได้นำเสนอใน [8] ให้ต้นทุนของโครงข่ายที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับารออกแบบโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช [13]

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น โดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงในลักษณะที่ 1 โดยมีการนำเสนอแนววิธีเพื่อช่วยให้สามารถออกแบบโครงข่ายดังกล่าวให้มีต้นทุนที่ต่ำลงได้ จากการศึกษากการวางวงแหวนในลักษณะที่ 1 พบว่า หากยอมให้ปริมาณกราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆสามารถรองรับได้โดยวงแหวนมากกว่า 1 วง โดยกระจายปริมาณกราฟฟิกระหว่างคู่โหนดนั้นๆเพื่อให้วงแหวนอื่นๆที่สามารถรองรับปริมาณกราฟฟิกระหว่างคู่โหนดนั้น ช่วยรองรับปริมาณกราฟฟิกบางส่วนได้ การส่งสัญญาณจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางจะยังคงใช้วงแหวนเพียงวงเดียวสำหรับปริมาณกราฟฟิกในบางส่วนๆ จะยกตัวอย่างการกระจายปริมาณกราฟฟิก โดยวิธีที่ได้นำเสนอนี้โดยใช้โครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.6 สมมติว่าปริมาณกราฟฟิกของคู่โหนด (1,6) เท่ากับ 5 ช่องสัญญาณ (connections) หากใช้ลักษณะการวางวงแหวนและการกระจายปริมาณกราฟฟิกในลักษณะที่ 1 จะต้องเลือกที่จะใช้วงแหวนวงใดเพียงวงเดียวระหว่างวงที่ 1 และ 3 เพื่อการรองรับปริมาณกราฟฟิกทั้ง 5 ช่องสัญญาณนั้น ส่วนในวิธีการที่ได้นำเสนอจะยอมให้ปริมาณกราฟฟิก 5 ช่องสัญญาณดังกล่าวสามารถกระจายให้กับวงแหวนมากกว่า 1 วงได้ นั่นคือสามารถแบ่งปริมาณกราฟฟิกออกเป็น 2 ส่วน เพื่อกระจายให้กับวงที่ 1 และ 3

จากตัวอย่างที่แสดงข้างต้นจะเห็นว่า วิธีการที่ได้นำเสนอนี้ทำให้มีเส้นทางให้เลือกใช้มากขึ้นกว่าในกรณีการวางวงแหวนในลักษณะที่ 1 ซึ่งทำให้ปัญหาที่พิจารณามีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น และวิธีการนี้มีแนวโน้มที่จะทำให้ใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้

วัตถุประสงค์ของการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงคือ การออกแบบให้มีต้นทุนของโครงข่ายที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงจะเริ่มจากการกำหนดโทโปโลยีของโครงข่ายมาให้ แล้วจึงวางวงแหวนในลักษณะที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้นจะมีข้อจำกัดในเรื่องของจำนวนความยาวคลื่นที่มากที่สุดที่สามารถมัลติเพลกซ์เข้าไปได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายรูปวงแหวนทุกวงต้องมีจำนวนความยาวคลื่นที่มากที่สุดที่สามารถมัลติเพลกซ์เข้าไปได้ (M) เป็น

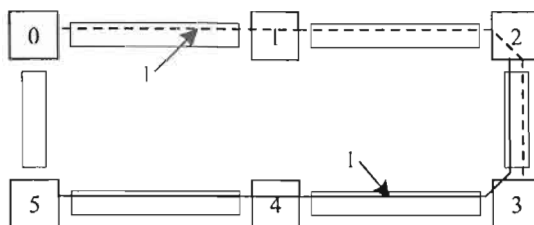
จำนวนที่เท่ากัน และมีข้อกำหนดในการทดสอบโครงข่ายคือ จะถือว่าทุกข่ายเชื่อมโยงมีความยาวเท่ากัน

จากลักษณะทางโครงสร้างของโครงข่ายรูปวงแหวน ทำให้ต้องวางเส้นใยแก้วนำแสงให้กับทุกข่ายเชื่อมโยง จะวางเฉพาะบางข่ายเชื่อมโยงไม่ได้ ดังนั้นต้นทุนของโครงข่ายรูปวงแหวนในวิทยานิพนธ์นี้จะเท่ากับ ผลคูณระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงมากที่สุด ค่าของ M และจำนวนข่ายเชื่อมโยง

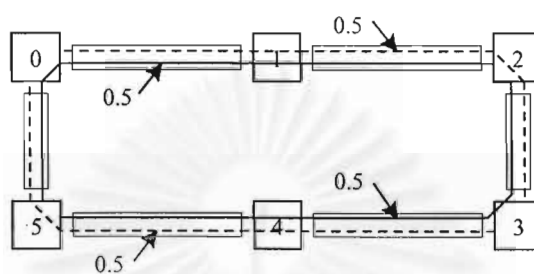
นอกจากนี้สำหรับปริมาณกราฟฟิกร์ที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ จะทดสอบปริมาณกราฟฟิกร์ที่มีลักษณะสถิต (static) นั่นคือจะถือว่าปริมาณกราฟฟิกร์ระหว่างคู่โหนดใดๆมีค่าคงที่

2.5 Integer Linear Programming (ILP)

วิทยานิพนธ์นี้ออกแบบวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างรูปวงแหวน 1 วง และแบบวงแหวนหลายวง พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จำนวนความยาวคลื่น และจำนวนช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องเป็นจำนวนเต็ม ดังนั้นการแปลงปัญหาให้อยู่ในรูปของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ integer linear programming ซึ่งจะมีความเหมาะสมกับปัญหามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ linear programming เนื่องจาก linear programming จะทำให้ค่าของพารามิเตอร์ซึ่งได้แก่ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จำนวนความยาวคลื่น และจำนวนช่องสัญญาณมีค่าเป็นทศนิยมได้ เมื่อค่าทศนิยมดังกล่าวรวมกันเป็นจำนวนเต็มได้พอดีจะทำให้ผลตอบที่ได้ไม่ใช่ผลตอบที่ถูกต้อง ยกตัวอย่างเช่น การสร้างช่องสัญญาณเพื่อรองรับปริมาณกราฟฟิกร์ระหว่างคู่โหนด (0,3) และ (2,5) ซึ่งต้องการกราฟฟิกร์โหนดละ 1 การเชื่อมต่อ ถ้าใช้ integer linear programming จะต้องใช้ความยาวคลื่นทั้งสิ้น 2 ความยาวคลื่นซึ่งเป็นผลตอบที่ถูกต้องดังรูปที่ 2.8 แต่ถ้าใช้ linear programming สำหรับแต่ละคู่โหนดอาจจะทำให้เกิดการสร้างช่องสัญญาณบนเส้นทางทั้งสองเส้นทางละ 0.5 ช่องสัญญาณ (ระหว่างโหนดคู่หนึ่งในโครงข่ายรูปวงแหวนจะมี 2 เส้นทางให้เลือกใช้) เป็นผลให้ใช้ความยาวคลื่นเพียง 1 ความยาวคลื่นเท่านั้นซึ่งเป็นผลตอบที่ไม่ถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ผลการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นจากการใช้ integer linear programming



รูปที่ 2.9 ผลการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้ linear programming

บทที่ 3

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นใน โครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน

3.1 กล่าวนำ

การออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง มีความจำเป็นต้องทราบลักษณะของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวน และจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้สำหรับรองรับปริมาณทราฟฟิกในโครงข่าย บทนี้นำเสนอวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวนซึ่งได้ปรับปรุงและดัดแปลงมาจาก [14] ซึ่งสามารถหาจำนวนความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้สำหรับรองรับปริมาณทราฟฟิกในโครงข่ายได้ โดยแปลงปัญหาการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายให้อยู่ในรูปของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า integer linear programming ซึ่งเป็นชุดอสมการเชิงเส้น โดยค่าของพารามิเตอร์และตัวแปรทุกตัวต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

การเลือกใช้เส้นทางในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่นำเสนอนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือแบบ alternative path และแบบ shortest path ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป นอกจากนี้จะมีการพิจารณาถึงการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเพื่อช่วยเพิ่มขีดความสามารถของโหนดด้วย

สำหรับการทดสอบและวิเคราะห์ผลจากการใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวน จะใช้ปริมาณทราฟฟิกรูปแบบต่างๆ โดยเปรียบเทียบผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้กับค่าขอบเขตอุดมคติ (ideal bound) รวมถึงการวิเคราะห์ลักษณะการเลือกใช้เส้นทางของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่ายและเวลาที่ใช้ในการหาผลตอบจากแบบจำลอง นอกจากนี้จะวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กับผลตอบที่ได้จากวิธีที่ได้นำเสนอใน [15] ซึ่งเป็นการหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนด้วยวิธี heuristic

3.2 การสร้างแบบจำลองของปัญหาด้วยคณิตศาสตร์

แบบจำลองที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ได้รับการพัฒนามาจาก [14] เพื่อให้เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา โดยกำหนดตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในแบบจำลองดังนี้

N	จำนวนโหนดในโครงข่าย
L	จำนวนข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย ซึ่งในกรณีของโครงข่ายรูปวงแหวน $L = N$
D	จำนวนคู่โหนดทั้งหมดซึ่งมีค่าเท่ากับ $N(N-1)/2$
M	จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในเส้นใยแก้วนำแสง
t_i	ปริมาณของทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่ i ซึ่งวัดในหน่วยของจำนวน ช่องสัญญาณการติดต่อ (connections)
$\delta_{i,j,l}$	มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ l เป็นส่วนหนึ่งในเส้นทางที่ j ของคู่โหนดที่ i ส่วนในกรณีอื่น ๆ มีค่าเป็น 0
$x_{i,j,k}^*$	จำนวนช่องสัญญาณระหว่างคู่โหนดที่ i เส้นทางที่ j โดยใช้ความยาวคลื่น ที่ k ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 (ใช้ในกรณีที่ไม้อุปกรณ์แปลงผัน ความยาวคลื่น)
$x_{i,j}^*$	จำนวนช่องสัญญาณระหว่างคู่โหนดที่ i โดยใช้เส้นทางที่ j (ใช้ในกรณีที่ ใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น)

* สำหรับโครงข่ายรูปวงแหวน ระหว่างโหนดคู่หนึ่งจะมีเพียง 2 เส้นทางเท่านั้นที่ใช้ในการเชื่อมต่อ ($j = 1, 2$) ดังนั้นจะกำหนดให้ $j = 1$ แทนเส้นทางที่สั้นกว่าหรืออาจจะกล่าวว่าเป็นเส้นทางที่มีจำนวน hop น้อยกว่า และ $j = 2$ แทนเส้นทางที่ยาวกว่า

N, D, M, t_i และ $\delta_{i,j,l}$ เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้กับแบบจำลอง ส่วน $x_{i,j,k}$ และ $x_{i,j}$ เป็นตัวแปรในแบบจำลอง โดยที่ค่าของพารามิเตอร์และตัวแปรทุกตัวในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ จะต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

จากค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆข้างต้น สามารถสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ทั้งในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นดังนี้

3.2.1 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

(No Wavelength Conversion : NWC)

objective function ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีนี้คือการหาค่ามากที่สุดของจำนวนช่องสัญญาณที่สามารถเกิดขึ้นได้ในโครงข่ายคือ

$$\text{Maximize : } \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^M x_{i,j,k} \quad (1)$$

โดยมี constraint ต่างๆดังนี้

1. จำนวนช่องสัญญาณระหว่างคู่โหนดที่ i ใดๆต้องเพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดนั้นได้ (minimum traffic demands)

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^M x_{i,j,k} \geq t_i \quad i=1,2,\dots,D \quad (2)$$

2. สำหรับแต่ละค่าความยาวคลื่นในแต่ละข่ายเชื่อมโยง จำนวนของช่องสัญญาณที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l และใช้ค่าความยาวคลื่นที่ k ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 (capacity constraint)

$$\sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^2 (x_{i,j,k}) \delta_{i,j,l} \leq 1 \quad k=1,2,\dots,M, \quad l=1,2,\dots,N \quad (3)$$

3. จำนวนช่องสัญญาณระหว่างคู่โหนดที่ i เส้นทางที่ j โดยใช้ความยาวคลื่นที่ k ต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์ (non-negativity constraint)

$$x_{i,j,k} \geq 0, \text{ integer}, \quad i=1,2,\dots,D, \quad j=1,2, \quad k=1,2,\dots,M \quad (4)$$

3.2.2 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

(Wavelength Conversion : WC)

สำหรับกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเพื่อเพิ่มขีดความสามารถของโหนดแบบจำลองจะเปลี่ยนไปโดยจะมีตัวแปรและ constraint เป็นจำนวนที่น้อยลง เนื่องจากไม่จำเป็นต้องจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดย objective function ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีนี้จะเป็นการหาค่ามากที่สุดของจำนวนช่องสัญญาณที่สามารถเกิดขึ้นได้ในโครงข่ายเหมือนกับกรณี NWC แต่จะใช้ตัวแปรต่างกันโดยไม่มีค่า M ใน objective function แต่ M จะปรากฏอยู่ใน capacity constraint

$$\text{Maximize : } \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^2 x_{i,j} \quad (5)$$

โดยมี constraint ต่างๆดังนี้

1. จำนวนช่องสัญญาณระหว่างคูโนดที่ i ใดๆต้องเพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกระหว่างคูโนดนั้นได้ (minimum traffic demands)

$$\sum_{j=1}^2 x_{i,j} \geq t_i \quad i=1,2,\dots,D \quad (6)$$

2. สำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง จำนวนของช่องสัญญาณที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในเส้นใยแก้วนำแสง (capacity constraint)

$$\sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^2 (x_{i,j}) \delta_{i,j,l} \leq M \quad l=1,2,\dots,N \quad (7)$$

3. จำนวนช่องสัญญาณระหว่างคูโนดที่ i โดยใช้เส้นทางที่ j ต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์ (non-negativity constraint)

$$x_{i,j} \geq 0, \text{ integer}, i=1,2,\dots,D, j=1,2 \quad (8)$$

จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ทั้ง 2 กรณีที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น การหาผลตอบของ integer linear programming จะไม่ได้ค่าจำนวนความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการรองรับปริมาณทราฟฟิกที่โครงข่ายต้องการโดยตรง แต่ผลตอบที่ได้จะเป็นจำนวนช่องสัญญาณที่มากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับจำนวนความยาวคลื่นค่าหนึ่ง (M) นั่นคือในการหาจำนวนความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ต้องเริ่มจากการประมาณค่า M ที่มีค่าน้อย ๆ ค่าหนึ่งแล้วกำหนดให้กับแบบจำลอง จากนั้นจะหาผลตอบจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ก็จะทราบว่าค่า M ดังกล่าวสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่โครงข่ายต้องการได้หรือไม่

- ถ้าไม่สามารถหาผลตอบได้ จะเพิ่มค่า M ให้มากขึ้น จนกระทั่งได้ค่า M ค่าแรกที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของโครงข่ายได้ ค่า M ดังกล่าวจะเป็นจำนวนความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดที่ต้องการ
- ถ้าสามารถหาผลตอบได้ แสดงว่าจำนวนความยาวคลื่นดังกล่าวเพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกในโครงข่ายได้ แต่ค่า M ดังกล่าวอาจจะยังไม่ใช้จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกในโครงข่ายได้ นั่นคือจะต้องลดค่า M

ให้น้อยลง จนกระทั่งได้จำนวนความยาวคลื่นค่าแรกที่ไม่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกในโครงข่ายได้ จะได้ว่าค่า M ที่ไม่เพียงพอดังกล่าวบวกด้วย 1 จะเป็นจำนวนความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดที่ต้องการ

นอกจากนี้สำหรับโครงข่ายรูปวงแหวน ระหว่างโหนดหนึ่งจะมีเพียง 2 เส้นทางเท่านั้นที่สามารถใช้ในการเชื่อมต่อ จึงแบ่งวิธีการเลือกใช้เส้นทางในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ทั้ง 2 กรณี ออกเป็น 2 แบบคือ

1. แบบ alternative path (ap) เป็นวิธีที่ขอมให้แบบจำลองเลือกใช้เส้นทางได้ทั้ง 2 เส้นทาง ($j = 1, 2$) นั่นคือจำนวนเส้นทางทั้งหมดของทุกคู่โหนดในโครงข่ายจะเท่ากับ $2D$
2. แบบ shortest path (sp) เป็นวิธีที่ขอมให้แบบจำลองเลือกใช้เส้นทางที่สั้นกว่าเท่านั้น ($j = 1$) นั่นคือจำนวนเส้นทางทั้งหมดของทุกคู่โหนดในโครงข่ายจะเท่ากับ D

ตารางที่ 3.1 ตัวอักษรย่อของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีต่างๆ

Model	Alternative path	Shortest path
No wavelength conversion	NWC-ap	NWC-sp
Wavelength conversion	WC-ap	WC-sp

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กรณีต่างๆ และเป็นกรณีที่ทราฟฟิกของทุกคู่โหนดมีค่ามากกว่า 0

Model	Number of variables	Number of constraints
NWC-ap	$2MD$	$LM+D$
NWC-sp	MD	$LM+D$
WC-ap	$2D$	$L+D$
WC-sp	D	$L+D$

เพื่อความสะดวกในการกล่าวถึงแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีต่างๆ ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอักษรย่อของแบบจำลองในกรณีต่างๆ ตารางที่ 3.2 แสดงความซับซ้อนของแบบจำลองผ่านจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลองกรณีต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่า จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ในแบบจำลองกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

(NWC-ap และ NWC-sp) จะขึ้นอยู่กับจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่าย นั่นคือเมื่อโครงข่ายต้องการจำนวนความยาวคลื่นมากขึ้น ทำให้แบบจำลองมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากขึ้น ส่งผลให้แบบจำลองมีความซับซ้อนมากขึ้นด้วย ขณะที่จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC-ap และ WC-sp) จะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่าย

สำหรับวิธีการเลือกใช้เส้นทางที่แตกต่างกันในแบบจำลอง คือแบบ alternative path (ap) และแบบ shortest path (sp) จะส่งผลต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ในแบบจำลอง โดยจำนวน constraint จะไม่ขึ้นกับวิธีการเลือกใช้เส้นทาง การเลือกใช้เส้นทางที่แตกต่างกันเพียงแต่จะทำให้จำนวนตัวแปรในแบบจำลองไม่เท่ากัน โดยการเลือกใช้เส้นทางแบบ alternative path ซึ่งยอมให้แบบจำลองเลือกใช้เส้นทางได้ทั้ง 2 เส้นทาง จะทำให้แบบจำลองมีจำนวนตัวแปรมากกว่าแบบ shortest path อยู่ 2 เท่า เนื่องจากแบบ shortest path ยอมให้แบบจำลองเลือกใช้เส้นทางที่สั้นกว่าเท่านั้น

3.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

การหาผลตอบจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 3.2 สามารถกระทำได้โดยใช้อัลกอริทึมที่ใช้หาผลตอบจาก integer linear programming ทั่วไป โดยจะใช้ software CPLEX [16] และใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ Pentium II 333 MHz พร้อม RAM ขนาด 96 MB

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบและวิเคราะห์ผลจากการใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวน โดยใช้ปริมาณกราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มและไม่ยูนิฟอร์ม ผลการทดสอบพบว่าการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่และจำนวนคู่จะมีลักษณะแตกต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์โครงข่ายที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่และจำนวนคู่จะกระทำแยกกัน

จากการศึกษาพบว่า เวลาที่ใช้ในการหาผลตอบจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของปัญหาแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) โดยขนาดของปัญหาประกอบด้วย ขนาดโครงข่ายและจำนวนความยาวคลื่นที่โครงข่ายต้องการ ดังนั้นในบทนี้จะจำกัดเวลาในการหาผลตอบที่ 20 นาที เนื่องจากแม้ว่าจะใช้เวลาในการหาผลตอบที่นานกว่านี้มากเท่าใด ก็จะช่วยให้หาผลตอบจากปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

3.3.1 ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม (Uniform traffic)

ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มมีความหมายว่า แต่ละคู่โหนดในโครงข่ายมีความต้องการปริมาณทราฟฟิกที่เท่ากัน เช่นแต่ละคู่โหนดต้องการปริมาณทราฟฟิกคู่โหนดละ 1 ช่องสัญญาณ (traffic volume = 1) หรือแต่ละคู่โหนดต้องการปริมาณทราฟฟิกคู่โหนดละ 2 ช่องสัญญาณ (traffic volume = 2) ในบทนี้จะใช้ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่ traffic volume ค่าต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของ traffic volume ที่มีต่อผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้ และเวลาที่ใช้ในการหาผลตอบจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

3.3.1.1 โครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคี่ (Odd-node ring)

1. กรณีที่ไม่มีมีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC)

เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ จะเปรียบเทียบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กับค่าขอบเขตอุดมคติ ซึ่งได้มาจากค่าผลรวมของจำนวน hop ของเส้นทางที่สั้นที่สุดของแต่ละการเชื่อมต่อหารด้วยจำนวนข่ายเชื่อมโยง ตารางที่ 3.3 แสดงค่าขอบเขตอุดมคติสำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 3-29 โหนดที่มีปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่ค่า traffic volume = 1

ตารางที่ 3.3 ค่าขอบเขตอุดมคติ (ideal bound) สำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคี่และต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่ค่า traffic volume = 1

Number of nodes	3	5	7	9	11	13	15
Ideal bound	1	3	6	10	15	21	28
Number of nodes	17	19	21	23	25	27	29
Ideal bound	36	45	55	66	78	91	105

จากผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากแบบจำลองในกรณี NWC-ap ดังในตารางที่ 3.4 จะเห็นว่า ที่ค่า traffic volume = 1 ผลตอบที่ได้มีค่าเท่ากับค่าขอบเขตอุดมคติที่แสดงในตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองในกรณี NWC-ap สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคี่และต้องการปริมาณทราฟฟิกที่มีรูปแบบยูนิฟอร์มให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้ (มีการใช้งานทุกช่องสัญญาณในโครงข่าย) สำหรับในกรณี traffic volume ค่าอื่นๆเท่าที่จะสามารถหาผลตอบได้ภายในเวลาที่เหมาะสมก็จะเป็นการแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณี NWC-ap สามารถจัดสรรเส้นทางและ

ความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่ให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้สำหรับ traffic volume ค่าอื่นๆด้วย สำหรับการหาค่าขอบเขตอุดมคติในกรณี traffic volume ค่าอื่นๆนอกเหนือจากกรณีที่ traffic volume = 1 ที่ได้แสดงในตารางที่ 3.3 สามารถหาได้โดยการนำค่า traffic volume คูณเข้ากับค่าขอบเขตอุดมคติในตารางที่ 3.3

สำหรับผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากแบบจำลองในกรณี NWC-sp ดังในตารางที่ 3.5 จะเห็นว่ามีความเท่ากันกับผลตอบจากแบบจำลองในกรณี NWC-ap ดังแสดงในตารางที่ 3.4 แต่แบบจำลองในกรณี NWC-sp จะสามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นจากโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่กว่าและที่จำนวนความยาวคลื่นมากกว่าแบบจำลองในกรณี NWC-ap เนื่องจากแบบจำลองในกรณี NWC-ap จะมีเส้นทางให้เลือกใช้มากกว่าจึงทำให้มีจำนวนตัวแปรมากกว่าแบบจำลองในกรณี NWC-sp ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยที่แบบจำลองในกรณี NWC-ap จะไม่สามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นภายในเวลาที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายขนาดใหญ่กว่า 15 โหนด ขณะที่แบบจำลองในกรณี NWC-sp จะสามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นภายในเวลาที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายขนาด 17 โหนดได้

ตารางที่ 3.4 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่และต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้แบบจำลองในกรณี NWC-ap

Traffic volume	Number of nodes							
	3	5	7	9	11	13	15	17
1	1	3	6	10	15	21	28	—
2	2	6	12	20	30	42	56	—
3	3	9	18	30	45	63	84	—
4	4	12	24	40	60	84	112	—
5	5	15	30	50	75	105	—	—
6	6	18	36	60	90	—	—	—
11	11	33	66	110	165	—	—	—
12	12	36	72	120	—	—	—	—
13	13	39	78	—	—	—	—	—
40	40	120	240	—	—	—	—	—
41	41	123	—	—	—	—	—	—

— หมายถึง ไม่สามารถหาผลตอบได้ภายในเวลา 20 นาที

ตารางที่ 3.5 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นจำนวนคี่และ
ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้แบบจำลองในกรณี NWC-sp

Traffic volume	Number of nodes								
	3	5	7	9	11	13	15	17	19
1	1	3	6	10	15	21	28	36	—
2	2	6	12	20	30	42	56	72	—
3	3	9	18	30	45	63	84	—	—
7	7	21	42	70	105	147	196	—	—
8	8	24	48	80	120	168	—	—	—
13	13	39	78	130	195	273	—	—	—
14	14	42	84	140	210	—	—	—	—
16	16	48	96	160	240	—	—	—	—
17	17	51	102	—	—	—	—	—	—
51	51	153	306	—	—	—	—	—	—
52	52	156	—	—	—	—	—	—	—

— หมายถึง ไม่สามารถหาผลตอบได้ภายในเวลา 20 นาที

2. กรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC)

เนื่องจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC-ap และ NWC-sp) สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นจำนวนคี่และต้องการปริมาณทราฟฟิกที่มีรูปแบบยูนิฟอร์มให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้ (มีการใช้งานทุกช่องสัญญาณในโครงข่าย) ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นจำนวนคี่และต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม แต่การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะช่วยให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint น้อยลง เนื่องจากในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะมีเพียงการจัดสรรเส้นทางในโครงข่ายโดยไม่ต้องจัดสรรความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย ทำให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC-ap และ WC-sp) สามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่มากและมีความต้องการจำนวนความยาวคลื่นมากๆ ได้

3.3.1.2 โครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่ (Even-node ring)

1. กรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC)

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าขอบเขตอุดมคติสำหรับ โครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 4-30 โหนดที่มี ปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่ค่า traffic volume = 1

ตารางที่ 3.6 ค่าขอบเขตอุดมคติ (ideal bound) สำหรับ โครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็น จำนวนคู่และต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่ค่า traffic volume = 1

Number of nodes	4	6	8	10	12	14	16
Ideal bound	2	4.5	8	12.5	18	24.5	32
Number of nodes	18	20	22	24	26	28	30
Ideal bound	40.5	50	60.5	72	84.5	98	112.5

จากผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากแบบจำลองในกรณี NWC-ap ดังในตารางที่ 3.7 จะเห็นว่า ที่ค่า traffic volume = 1 ผลตอบที่ได้จะมีค่ามากกว่าค่าขอบเขตอุดมคติที่แสดงในตารางที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองในกรณี NWC-ap ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นใน โครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่ให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้ (ไม่มีการใช้งานบางช่องสัญญาณในโครงข่าย) ในขณะที่ค่า traffic volume = 2 ผลตอบจำนวน ความยาวคลื่นที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าขอบเขตอุดมคติ ซึ่งได้จากการคูณค่าขอบเขตอุดมคติในกรณีที่ traffic volume = 1 ด้วย 2 นั่นคือแบบจำลองในกรณี NWC-ap สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นใน โครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่ในกรณีที่ traffic volume = 2 ให้ เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้ (มีการใช้งานทุกช่องสัญญาณในโครงข่าย) สำหรับในกรณี traffic volume ค่าอื่นๆเท่าที่จะสามารถหาผลตอบได้ภายในเวลาที่เหมาะสมก็แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณี NWC-ap สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่าย รูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่ให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้สำหรับกรณีที่ traffic volume มีค่าเป็นจำนวนคู่

สำหรับผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากแบบจำลองในกรณี NWC-sp ดังในตารางที่ 3.8 จะเห็นว่า มีค่าเท่ากับผลตอบจากแบบจำลองในกรณี NWC-ap ดังแสดงในตารางที่ 3.7 แต่แบบจำลองในกรณี NWC-sp สามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่มีค่ามากกว่าแบบจำลองในกรณี NWC-ap เนื่องจากแบบจำลองในกรณี NWC-sp มีจำนวนตัวแปรน้อยกว่าแบบจำลองในกรณี NWC-ap เช่นเดียวกับในกรณีของโครงข่ายที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่

ตารางที่ 3.7 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคู่และต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้แบบจำลองในกรณี NWC-ap

Traffic volume	Number of nodes							
	4	6	8	10	12	14	16	18
1	3	5	9	13	19	25	33	—
2	4	9	16	25	36	49	64	—
3	7	14	25	38	55	—	—	—
4	8	18	32	50	—	—	—	—
5	11	23	41	—	—	—	—	—
18	36	81	144	—	—	—	—	—
19	39	86	—	—	—	—	—	—

— หมายถึง ไม่สามารถหาผลตอบได้ภายในเวลา 20 นาที

ตารางที่ 3.8 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคู่และต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้แบบจำลองในกรณี NWC-sp

Traffic volume	Number of nodes							
	4	6	8	10	12	14	16	18
1	3	5	9	13	19	25	33	—
2	4	9	16	25	36	49	64	—
3	7	14	25	38	55	—	—	—
4	8	18	32	50	72	—	—	—
10	20	45	80	125	180	—	—	—
11	23	50	89	138	—	—	—	—
14	28	63	112	175	—	—	—	—
15	31	68	121	—	—	—	—	—
18	36	81	144	—	—	—	—	—
19	39	86	—	—	—	—	—	—

— หมายถึง ไม่สามารถหาผลตอบได้ภายในเวลา 20 นาที

2. กรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC)

เมื่อมีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะช่วยให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint น้อยลงเช่นเดียวกับในกรณีของโครงข่ายที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่ ซึ่งจะทำให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีนี้ (WC-ap และ WC-sp) สามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายที่มีขนาดถึง 145 โหนดได้ภายในเวลาที่ต่ำกว่า 3 นาที และผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้ (ไม่ได้แสดงผลการทดสอบ) มีค่าเท่ากับผลตอบที่ได้จากกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC-ap และ NWC-sp) จากผลการทดสอบดังกล่าวรวมถึงผลการทดสอบในกรณีที่โครงข่ายมีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ได้ช่วยให้โครงข่ายรูปวงแหวนที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มใช้จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยลง แต่จะช่วยให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint น้อยลงมาก

จากผลการทดสอบในกรณีที่แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ใช้การเลือกเส้นทางแบบ shortest path (NWC-sp และ WC-sp) ผลการทดสอบที่ได้มีค่าเท่ากับในกรณีที่แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ใช้การเลือกเส้นทางแบบ alternative path (NWC-ap และ WC-ap) ทั้งในกรณีที่โครงข่ายมีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่และจำนวนคู่ แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายรูปวงแหวนที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มจะสร้างช่องสัญญาณขึ้นบนเส้นทางที่สั้นกว่าเสมอและไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้การเลือกเส้นทางแบบ alternative path กับโครงข่ายรูปวงแหวนที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม

นอกจากนี้ผลการทดสอบที่ปรากฏในตารางที่ 3.4 3.5 3.7 และ 3.8 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องการในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่ค่า traffic volume = 1 (M) กับจำนวนโหนดในโครงข่าย (N) ดังนี้

- กรณีที่โครงข่ายมีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่: $M = (N^2-1)/8$
- กรณีที่โครงข่ายมีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่: $M = (N^2+8)/8$ เมื่อ N หาคด้วย 4 ลงตัว
และ $M = (N^2+4)/8$ เมื่อ N หาคด้วย 4 ไม่ลงตัว

3.3.2 ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม (Non-uniform traffic)

ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มหมายถึง ปริมาณทราฟฟิกที่ไม่ใช่ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม นั่นคือเมื่อมีโหนดใดๆที่มีปริมาณทราฟฟิกไม่เท่ากับโหนดอื่นๆ จะจัดว่าเป็นทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม เนื่องจากรูปแบบทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มมีอยู่มากมาย ทำให้ไม่สามารถที่จะทดสอบทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้งหมดได้ ในส่วนนี้จะทดสอบและวิเคราะห์ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากโครงข่ายรูปวงแหวนขนาดต่างๆที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม โดยทดสอบกับ

รูปแบบกราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มเพียงบางรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ลักษณะการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวน

การทดสอบเริ่มด้วยการหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นจากโครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 7 โหนดที่ต้องการปริมาณกราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มดังแสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ปริมาณกราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มสำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 7 โหนด

Node	0	1	2	3	4	5	6
0	-	4	12	6	2	1	0
1	4	-	2	8	6	2	1
2	12	2	-	1	4	1	2
3	6	8	1	-	0	2	1
4	2	6	4	0	-	3	9
5	1	2	1	2	3	-	3
6	0	1	2	1	9	3	-

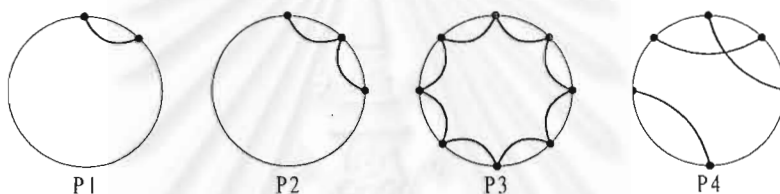
ตารางที่ 3.10 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 7 โหนดที่ต้องการปริมาณกราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มในตารางที่ 3.9 โดยใช้แบบจำลองในกรณีต่างๆ

Ideal bound	NWC-sp	NWC-ap	WC-sp	WC-ap
21	36	27	36	27

ลักษณะของปริมาณกราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจะมีบางคู่โหนดที่ต้องการปริมาณกราฟฟิกในปริมาณที่มากกว่าคู่โหนดอื่นเช่น คู่โหนด 0-2 คู่โหนด 4-6 และคู่โหนด 1-3 ดังแสดงในตารางที่ 3.9 ปริมาณกราฟฟิกในลักษณะนี้หากใช้การเลือกเส้นทางแบบ shortest path จะทำให้บางข่ายเชื่อมโยงต้องการช่องสัญญาณในปริมาณสูงซึ่งจะทำให้มีช่องสัญญาณเป็นจำนวนมากที่ไม่ได้ใช้งานในข่ายเชื่อมโยงอื่น นั่นคือจะทำให้ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้มีค่ามากกว่าค่าขอบเขตอุดมคติมาก ขณะที่การเลือกใช้เส้นทางแบบ alternative path จะทำให้ปริมาณกราฟฟิกของคู่โหนดที่มีค่ามากถูกแบ่งไปยังเส้นทางที่ยาวกว่าด้วย ทำให้ทุกๆ ข่ายเชื่อมโยงต้องการจำนวนช่องสัญญาณเท่าๆกัน นั่นคือผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าขอบเขตอุดมคติมากขึ้น ดังผลการทดสอบที่ได้แสดงในตารางที่ 3.10 จะเห็นว่าแบบจำลองในกรณี NWC-ap และ WC-ap ต้องการ

จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยกว่าแบบจำลองในกรณี NWC-sp และ WC-sp อยู่ 9 ความยาวคลื่น หรือน้อยกว่าอยู่ 25% ดังนั้นการเลือกใช้เส้นทางแบบ shortest path จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้จัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายรูปวงแหวนที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มที่ใช้ในการทดสอบนี้ สำหรับการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในการทดสอบนี้ไม่ช่วยให้ใช้ความยาวคลื่นเป็นจำนวนที่น้อยลงได้

เพื่อให้เห็นลักษณะการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ จะทดสอบโครงข่ายรูปวงแหวนที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มรูปแบบอื่นๆซึ่งจะสมมติรูปแบบของทราฟฟิกอย่างง่ายขึ้น โดยสมมติให้บางคู่โหนดในโครงข่ายต้องการทราฟฟิกในปริมาณสูงและปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดอื่นมีค่าเท่ากับ 0 รูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม 4 รูปแบบที่ใช้ในการทดสอบ โดยจะทดสอบกับโครงข่ายขนาด 4-16 โหนด



รูปที่ 3.1 รูปแบบต่างๆของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม

ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มในรูปแบบ P1 มีเพียงคู่โหนดเดียวเท่านั้นที่ต้องการทราฟฟิกในปริมาณสูง สำหรับรูปแบบทราฟฟิก P2 มีคู่โหนด 2 คู่โหนดที่ต้องการทราฟฟิกในปริมาณสูงโดยที่เส้นทางที่สั้นที่สุดของแต่ละคู่โหนดไม่ทับหรือเหลื่อมกัน รูปแบบทราฟฟิก P3 มีคู่โหนดมากกว่า 2 คู่โหนดที่ต้องการทราฟฟิกในปริมาณสูง โดยที่เส้นทางที่สั้นที่สุดของแต่ละคู่โหนดจะไม่ทับหรือเหลื่อมกัน ส่วนทราฟฟิกในรูปแบบ P4 มีคู่โหนด 3 คู่โหนดที่ต้องการทราฟฟิกในปริมาณสูง โดยมีเส้นทางที่สั้นที่สุดของคู่โหนดคู่หนึ่งที่ไม่ทับหรือเหลื่อมกับเส้นทางที่สั้นที่สุดของคู่โหนดอื่น

จากการทดสอบโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีขนาดตั้งแต่ 4 ถึง 16 โหนดที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มที่มีรูปแบบต่างๆดังในรูปที่ 3.1 คิวแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ทั้ง 4 กรณีคือ NWC-ap NWC-sp WC-ap และ WC-sp พบว่าลักษณะการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายขนาดต่างๆมีลักษณะเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงแสดงผลการทดสอบของโครงข่ายขนาด 7 โหนดเท่านั้นและกำหนดให้ทราฟฟิกในปริมาณสูงมีค่าเท่ากับ 10 ช่องสัญญาณ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.11

จากตารางที่ 3.11 จะเห็นว่าในกรณีของรูปแบบกราฟฟิก P1 การเลือกเส้นทางแบบ alternative path จะทำให้ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นมีค่าเท่ากับ 5 ขณะที่การเลือกเส้นทางแบบ shortest path จะทำให้ใช้จำนวนความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเนื่องจากไม่สามารถกระจายกราฟฟิกไปยังเส้นทางที่ยาวกว่าได้ สำหรับกรณีของรูปแบบกราฟฟิก P2 ไม่ว่าจะใช้การเลือกเส้นทางแบบใดก็จะได้ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นเท่ากับ 10 หมายความว่าสำหรับรูปแบบกราฟฟิก P2 การเลือกเส้นทางแบบ shortest path สามารถทำให้เกิดการใช้จำนวนความยาวคลื่นเท่ากับการเลือกเส้นทางแบบ alternative path ได้

ส่วนกรณีของรูปแบบกราฟฟิก P3 แม้ว่าจะมีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการกราฟฟิกในปริมาณสูงที่มากกว่าแต่ก็ยังให้ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่เท่ากับในกรณีของรูปแบบกราฟฟิก P2 เนื่องจากการเลือกใช้เส้นทางแบบ shortest path ในกรณีของรูปแบบกราฟฟิก P2 จะทำให้มีช่องสัญญาณที่ไม่ได้ใช้งานเหลืออยู่เป็นจำนวนมากเพียงพอสำหรับการรองรับปริมาณกราฟฟิกของคู่โหนดอื่นที่เพิ่มเข้ามา ดังเช่นในกรณีของรูปแบบกราฟฟิก P3 โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณแต่อย่างใด

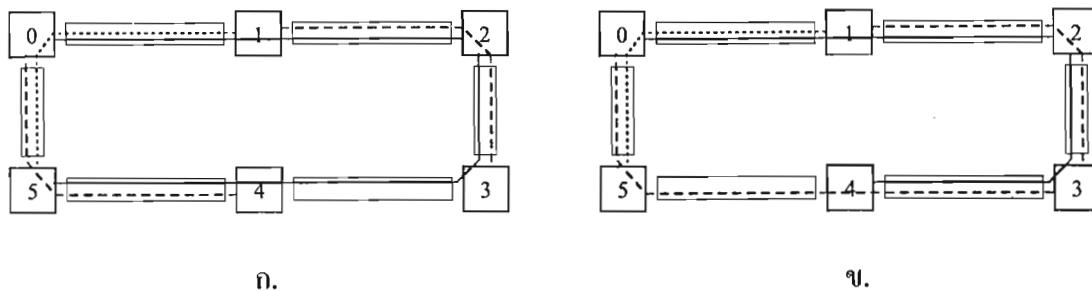
สำหรับในกรณีของรูปแบบกราฟฟิก P4 แม้ว่าจะต้องการปริมาณกราฟฟิกที่น้อยกว่าบางกรณีของรูปแบบกราฟฟิก P3 แต่ก็จะต้องใช้ความยาวคลื่นเป็นจำนวนที่มากกว่าดังในตารางที่ 3.11 จะเห็นว่ากรณีของรูปแบบกราฟฟิก P3 จะใช้จำนวนความยาวคลื่นเท่ากับ 10 ขณะที่กรณีของรูปแบบกราฟฟิก P4 จะใช้จำนวนความยาวคลื่นเท่ากับ 15 และ 20 ในกรณีที่ใช้การเลือกเส้นทางแบบ alternative path และ shortest path ตามลำดับ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการทับหรือเหลื่อมกันของเส้นทางที่สั้นที่สุดของคู่โหนดจะทำให้เกิดความไม่เหมาะสมที่จะเลือกใช้เส้นทางแบบ shortest path ซึ่งใช้ในกรณีของรูปแบบกราฟฟิก P3 เนื่องจากจะทำให้ข่ายเชื่อมโยงในส่วนที่ทับหรือเหลื่อมกันนั้นต้องการช่องสัญญาณเป็นจำนวนมากทำให้จำนวนความยาวคลื่นที่โครงข่ายต้องการมากขึ้นด้วย (20 ความยาวคลื่น) ดังนั้นในกรณีของรูปแบบกราฟฟิก P4 จึงต้องใช้การเลือกเส้นทางแบบ alternative path กับกราฟฟิกของคู่โหนดที่ทับหรือเหลื่อมกันนั้น ทำให้ไม่มีช่องสัญญาณเหลือให้กับกราฟฟิกของคู่โหนดอีกคู่หนึ่ง จึงต้องมีช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น ขณะที่รูปแบบกราฟฟิก P3 ไม่จำเป็นต้องเพิ่มช่องสัญญาณเมื่อมีกราฟฟิกของคู่โหนดอื่นเพิ่มเข้ามา

สำหรับการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในการทดสอบนี้ (WC-ap และ WC-sp) ไม่ช่วยให้ใช้ความยาวคลื่นเป็นจำนวนที่น้อยลงได้ดังผลการทดสอบที่ได้แสดงในตารางที่ 3.11

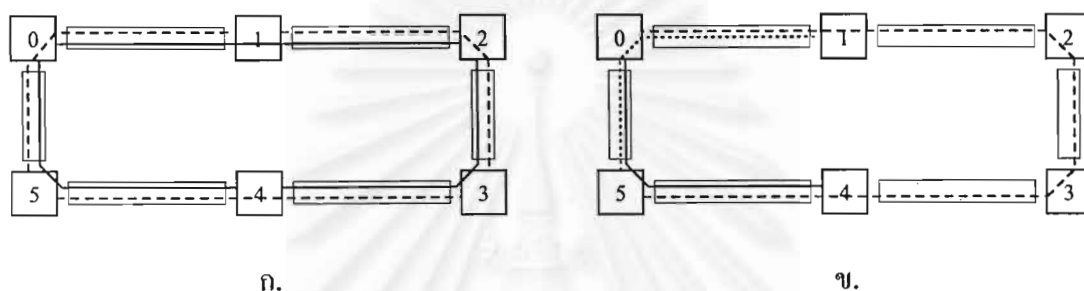
ตารางที่ 3.11 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 7 โหนดที่ต้องการปริมาณ
 ทรานฟิสิกแบบไม่ยูนิฟอร์มรูปแบบต่างๆ และกำหนดให้ทรานฟิสิกในปริมาณสูงมีค่าเท่ากับ
 10 ช่องสัญญาณ โดยใช้แบบจำลองในกรณีต่างๆ

Traffic patterns	Model			
	NWC-ap	NWC-sp	WC-ap	WC-sp
P1	5	10	5	10
P2	10	10	10	10
P3	10	10	10	10
P4	15	20	15	20

จากผลการทดสอบด้วยปริมาณทรานฟิสิกแบบยูนิฟอร์มและไม่ยูนิฟอร์มที่ได้กล่าวมาทั้งหมด จะเห็นว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ได้ช่วยให้โครงข่ายรูปวงแหวนใช้จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยลง แต่จากการศึกษาพบว่า มีทรานฟิสิกแบบไม่ยูนิฟอร์มบางรูปแบบที่อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยให้โครงข่ายรูปวงแหวนใช้จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยลงได้ ตัวอย่างของทรานฟิสิกแบบดังกล่าวได้แสดงในรูปที่ 3.2 ก. ซึ่งใช้โครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 6 โหนดที่ต้องการปริมาณทรานฟิสิกจำนวน 5 ช่องสัญญาณซึ่งเชื่อมต่อกับโหนด (0,2) (1,3) (2,5) (4,0) และ (5,1) ในการอธิบายถึงลักษณะของทรานฟิสิกแบบดังกล่าวจะกำหนดให้ ทรานฟิสิกระหว่างโหนดใดๆ ใช้เส้นทางตามเข็มนาฬิกาและเส้นทางที่เลื้อยกันมีลักษณะเส้นที่ต่างกัน (หมายถึงความยาวคลื่นที่ต่างกัน) จากรูปที่ 3.2 ก. เมื่อเริ่มจากโหนด 0 ไปเรื่อยๆ เส้นทางของโหนด 2 จะเลื้อยกันในลักษณะที่ทำให้ไม่สามารถใช้ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียวในการรองรับทรานฟิสิกของโหนด 2 ดังกล่าวได้เมื่อกำหนดให้ปริมาณทรานฟิสิกของแต่ละโหนดเท่ากับ 1 ช่องสัญญาณ ลักษณะการเลื้อยดังกล่าวจะเกิดขึ้นเรื่อยๆ (เริ่มจากโหนด (0,2) (1,3) (2,5) และ(4,0) ตามลำดับ) จนวนกลับมาที่โหนด 0 อีกครั้ง โดยเส้นทาง 2 เส้นทางที่ออกจากโหนด 0 จะต้องมีลักษณะเส้นที่ต่างกัน (หมายถึงความยาวคลื่นที่ต่างกัน) สุดท้ายจะต้องมีเส้นทางที่มีโหนด 0 เป็นโหนดอยู่ระหว่างทางด้วย (หมายถึงเส้นทางของโหนด (5,1)) ซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนความยาวคลื่น การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่ต้องการปริมาณทรานฟิสิกที่มีรูปแบบดังกล่าวหรือมีรูปแบบที่ใกล้เคียง (รูปที่ 3.2 ข.) จะช่วยให้โครงข่ายใช้จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยลงได้



รูปที่ 3.2 รูปแบบกราฟฟิกที่อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยให้ใช้
จำนวนความยาวคลื่นน้อยลง



รูปที่ 3.3 รูปแบบกราฟฟิกที่อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถช่วยให้ใช้
จำนวนความยาวคลื่นน้อยลง

สำหรับรูปแบบกราฟฟิกในรูปที่ 3.3 ก. และ 3.3 ข. อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะไม่ช่วยให้โครงข่ายรูปวงแหวนใช้จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยลง เนื่องจากลักษณะของเส้นทางไม่เป็นไปตามลักษณะที่ได้บรรยายไว้ข้างต้น โดยในรูปที่ 3.3 ก. เส้นทาง 2 เส้นทางที่ออกจากโหนด 0 มีลักษณะเส้นที่เหมือนกัน (ใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกัน) ทำให้เส้นทางของคู่โหนด (5,1) ใช้ความยาวคลื่นอีกค่าหนึ่งได้โดยไม่ต้องเพิ่มจำนวนความยาวคลื่น สำหรับรูปที่ 3.3 ข. เส้นทางของคู่โหนด (0,5) และ (4,0) จะเหมือนกันในลักษณะที่ทำให้สามารถใช้ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียวในการรองรับกราฟฟิกของคู่โหนด 2 คู่ดังกล่าวได้

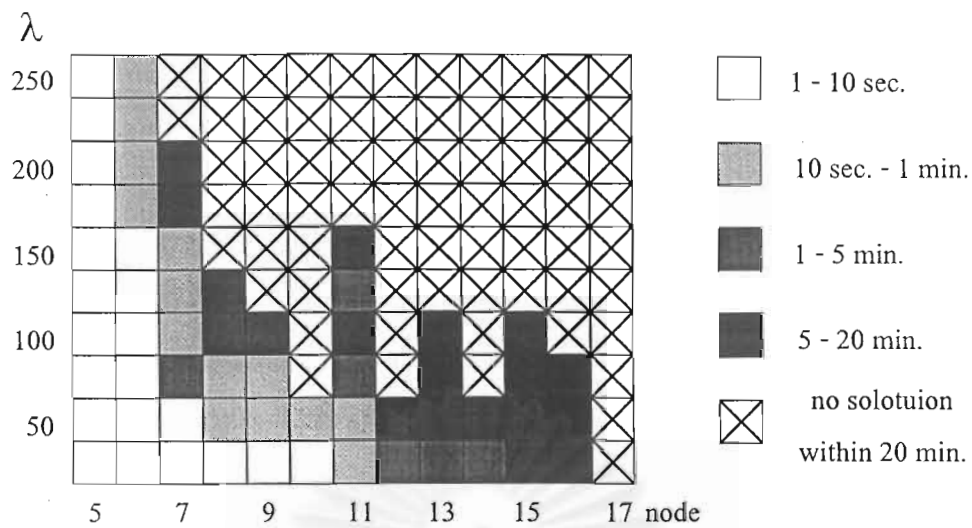
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3 เวลาที่ใช้ในการหาผลตอบจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

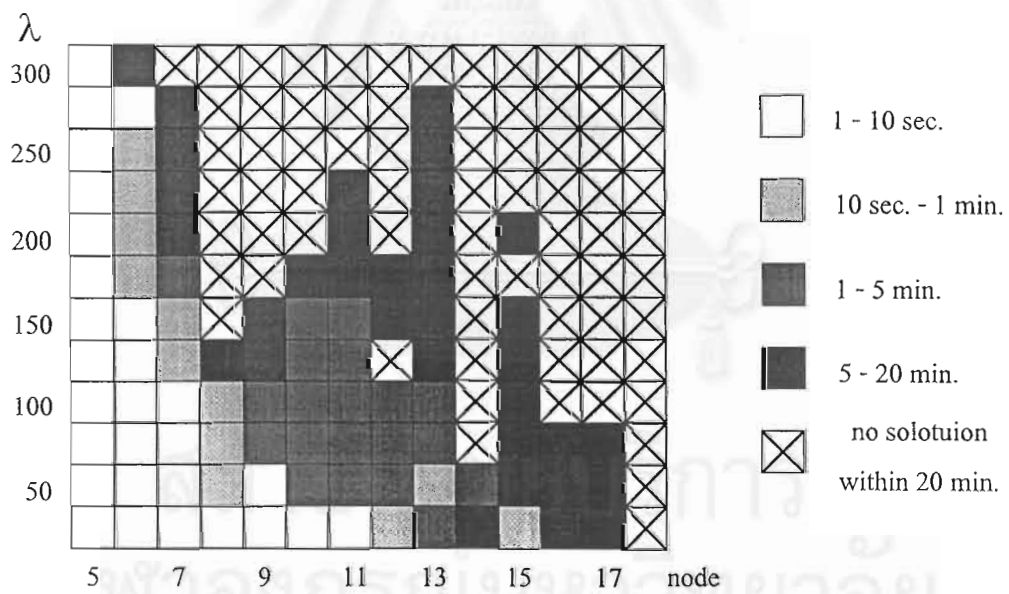
ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของเวลาที่ใช้ในการหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ โดยจะทดสอบกับโครงข่ายรูปวงแหวนขนาดต่างๆด้วยปริมาณกราฟฟิกรูปแบบต่างๆทั้งแบบยูนิฟอร์มและไม่ยูนิฟอร์ม ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 ซึ่งใช้การเลือกเส้นทางแบบ alternative path และแบบ shortest path ตามลำดับ จากผลการทดสอบจะเห็นว่า เวลาที่ใช้ในการหาผลตอบจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือ ขนาดของโครงข่าย (จำนวนโนด) และจำนวนความยาวคลื่นที่โครงข่ายต้องการสำหรับปัจจัยที่สำคัญประการแรกคือขนาดของโครงข่ายพบว่า เมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ต้องใช้เวลาค้นหาผลตอบนานขึ้น โดยในกรณีที่ใช้การเลือกเส้นทางแบบ alternative path จะไม่สามารถหาผลตอบได้ในเวลา 20 นาทีสำหรับโครงข่ายขนาด 17 โนด ขณะที่แบบจำลองในกรณีที่ใช้การเลือกเส้นทางแบบ shortest path สามารถหาผลตอบจากโครงข่ายขนาด 17 โนดได้ในเวลาที่ต่ำกว่า 20 นาที นอกจากนี้ขนาดของโครงข่ายที่เป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับเวลาที่ใช้ในการหาผลตอบจากแบบจำลองแล้ว ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ จำนวนความยาวคลื่นที่โครงข่ายต้องการ เมื่อโครงข่ายต้องการความยาวคลื่นเป็นจำนวนที่มากขึ้นก็จะทำให้ต้องใช้เวลาในการหาผลตอบนานขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาผลตอบระหว่างกรณีที่ใช้การเลือกเส้นทางแบบ alternative path และแบบ shortest path จะเห็นว่า แบบจำลองในกรณีที่ใช้การเลือกเส้นทางแบบ shortest path สามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่มีค่ามากกว่าในกรณีที่ใช้การเลือกเส้นทางแบบ alternative path ดังในรูปที่ 3.4 และ 3.5

สำหรับกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จะช่วยให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint น้อยลงมาก โดยสามารถหาผลตอบจากโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีขนาด 185 โนดที่ต้องการจำนวนความยาวคลื่นเท่ากับ 4278 ได้ภายในเวลาที่ต่ำกว่า 20 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 เวลาที่ใช้ในการหาผลตอบในกรณี NWC-ap



รูปที่ 3.5 เวลาที่ใช้ในการหาผลตอบในกรณี NWC-sp

3.4 ผลการทดสอบที่ได้จากวิธี heuristic [15]

เนื่องจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่ได้นำเสนอไปนั้น ไม่สามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีขนาดใหญ่กว่า 16 โหนดในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ภายในเวลาที่เหมาะสม จึงควรมีการนำเสนอวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนวิธีอื่นที่สามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นได้ภายในเวลาที่เหมาะสมและผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลตอบจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนาการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีขนาดใหญ่ต่อไป บทความ [15] (เป็นบทความที่แสดงในภาคผนวก) ได้นำเสนอวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นดังกล่าวโดยใช้วิธี heuristic ได้แก่ อัลกอริทึม H3 และอัลกอริทึม H4 ซึ่งเป็นอัลกอริทึมสำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่ไม่มีและมีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นตามลำดับ

ในหัวข้อนี้แสดงผลการทดสอบอัลกอริทึม H3 และ H4 โดยแสดงผลตอบจำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายที่มีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคี่และจำนวนคู่แยกจากกัน ตารางที่ 3.12 แสดงจำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคี่และต้องการปริมาณกราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้อัลกอริทึม H3 ซึ่งเป็นอัลกอริทึมแบบที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จะเห็นว่าผลตอบจำนวนความยาวคลื่นเมื่อค่า traffic volume = 1 มีค่าเท่ากับค่าขอบเขตอุดมคติในตารางที่ 3.3 ในกรณีที่ค่า traffic volume = 2, 3 และ 4 ผลตอบที่ได้มีค่าเท่ากับ 2 เท่า 3 เท่า และ 4 เท่าของค่าขอบเขตอุดมคติตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม H3 สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคี่ให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้ (มีการใช้งานทุกช่องสัญญาณในโครงข่าย)

สำหรับในกรณีที่โครงข่ายมีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคู่ ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากอัลกอริทึม H3 แสดงในตารางที่ 3.13 จะเห็นว่าที่ค่า traffic volume = 1 ผลตอบที่ได้มีค่ามากกว่าค่าขอบเขตอุดมคติที่แสดงในตารางที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม H3 ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคู่ให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้ (ไม่มีการใช้งานบางช่องสัญญาณในโครงข่าย) เช่นเดียวกับแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอ ในขณะที่ค่า traffic volume = 2 ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นบางค่านั้นคือที่โครงข่ายขนาด 4, 6 และ 8 โหนด มีค่าเท่ากับค่าขอบเขตอุดมคติซึ่งได้จากการคูณค่าขอบเขตอุดมคติในกรณีที่ traffic volume = 1 ด้วย 2 ส่วนผลตอบจากโครงข่ายที่มีขนาดตั้งแต่ 10 โหนดเป็นต้นไปจะมีค่ามากกว่าค่าขอบเขตอุดมคติเล็กน้อย (ไม่เกิน 4.2%) แสดงให้

เห็นว่าอัลกอริทึม H3 ยังมีจุดบกพร่องอยู่เล็กน้อยเมื่อใช้ในการหาผลตอบจากโครงข่ายที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่ที่มีขนาดตั้งแต่ 10 โหนดเป็นต้นไป

สำหรับในกรณีที่โครงข่ายมีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคู่และมีการใช้อุปกรณ์แปลงผัน ความยาวคลื่น (อัลกอริทึม H4) ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จะแสดงในตารางที่ 3.14 ซึ่งจะ เห็นว่า ที่ค่า traffic volume = 2 และ 4 ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้มีค่าเท่ากับค่าขอบเขต อุดมคติซึ่งจะได้จากการคูณค่าขอบเขตอุดมคติในกรณีที่ traffic volume = 1 ด้วย 2 และ 4 ตามลำดับ นั่นคืออัลกอริทึม H4 สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่ให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้ (มีการใช้งานทุกช่องสัญญาณใน โครงข่าย) สำหรับกรณีที่ traffic volume มีค่าเป็นจำนวนคู่

นอกจากนี้อัลกอริทึม H3 และ H4 สามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นจากโครงข่าย รูปวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ถึง 70 โหนดได้ภายในเวลาที่เหมาะสม และจากการทดสอบอัลกอริทึม H3 และ H4 ด้วยโครงข่ายรูปวงแหวนที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มซึ่งเป็นรูปแบบที่ได้ ทดสอบในหัวข้อ 3.3.2 ผลตอบความยาวคลื่นที่ได้มีค่าเท่ากับผลตอบจากแบบจำลอง เจริญคณิตศาสตร์ทั้งในกรณีที่ไม่มีและมีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC-ap และ WC- ap)

ตารางที่ 3.12 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคี่และ ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้อัลกอริทึม H3

Traffic volume	Number of nodes						
	3	5	7	9	11	13	15
1	1	3	6	10	15	21	28
2	2	6	12	20	30	42	56
3	3	9	18	30	45	63	84
4	4	12	24	40	60	84	112
Traffic volume	Number of nodes						
	17	19	21	23	25	27	29
1	36	45	55	66	78	91	105
2	72	90	110	132	156	182	210
3	108	135	165	198	234	273	315
4	144	180	220	264	312	364	420

ตารางที่ 3.13 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่และ
ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้อัลกอริทึม H3

Traffic volume	Number of nodes						
	4	6	8	10	12	14	16
1	3	5	9	13	19	26	35
2	4	9	16	26	37	51	66
3	7	14	25	38	56	76	101
4	8	18	32	51	74	102	132
Traffic volume	Number of nodes						
	18	20	22	24	26	28	30
1	42	52	63	75	88	101	116
2	84	104	126	150	174	202	232
3	126	156	186	225	262	303	348
4	168	207	252	300	348	404	464

ตารางที่ 3.14 จำนวนความยาวคลื่นของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคู่และ
ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มค่าต่างๆ โดยใช้อัลกอริทึม H4

Traffic volume	Number of nodes						
	4	6	8	10	12	14	16
1	3	5	9	13	19	25	33
2	4	9	16	25	36	49	64
3	7	14	25	38	55	74	97
4	8	18	32	50	72	98	128
Traffic volume	Number of nodes						
	18	20	22	24	26	28	30
1	41	51	61	73	85	99	113
2	81	100	121	144	169	196	225
3	122	151	182	217	254	295	338
4	162	200	242	288	338	392	450

บทที่ 4

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสง แบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

4.1 กล่าวนำ

การแก้ปัญหาด้วยการใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถให้ผลตอบที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดให้ได้ (optimal solution) ในบทนี้แนะนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง ซึ่งสามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขการแบ่งปริมาณทราฟฟิกที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ในกระบวนการหาผลตอบจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์จะพิจารณาขั้นตอนของการออกแบบโครงข่าย 3 ขั้นตอนพร้อมๆกัน ได้แก่

1. เลือกโครงข่ายรูปวงแหวนจากวงแหวนทั้งหมดที่เป็นไปได้มาจำนวนหนึ่ง และโครงข่ายรูปวงแหวนที่เลือกเหล่านั้นต้องสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของทุกๆคู่โหนดได้
2. จัดสรรปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดลงบนโครงข่ายรูปวงแหวนที่เลือกขึ้นมา
3. จัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายรูปวงแหวนเหล่านั้น

โดยจะจำลองปัญหาให้อยู่ในรูปของ integer linear programming ซึ่งจะเป็นชุดสมการและอสมการเชิงเส้น (constraints) ค่าของพารามิเตอร์และตัวแปรทุกตัวจะต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์ โดย objective function จะเป็นการหาต้นทุนที่ต่ำที่สุดของโครงข่าย

นอกจากนี้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีอยู่ 2 แบบคือ แบบที่ไม่ได้ใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและแบบที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเพื่อช่วยเพิ่มขีดความสามารถของโหนด การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น นอกจากจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถของโหนดแล้วยังทำให้ปัญหามีความซับซ้อนน้อยลงด้วย เนื่องจากไม่จำเป็นต้องจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ จะแสดงลักษณะการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบ และจะทดสอบแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กับโครงข่ายตัวอย่างขนาดต่างๆ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้และต้นทุนของโครงข่าย โดยจะเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช และ

มีการหาปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ นอกจากนี้จะวิเคราะห์ลักษณะของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กรณีที่มีการจำกัดวงแหวนในแบบจำลองด้วย

สำหรับการเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมฆ ซึ่งเป็นโครงข่ายที่สามารถออกแบบให้มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพมากได้ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ใช้การออกแบบโครงข่ายแบบเมฆที่ได้นำเสนอใน [17] ซึ่งมีการออกแบบอยู่ 2 ลักษณะคือ การออกแบบโดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ และการออกแบบด้วยวิธี heuristic การเปรียบเทียบต้นทุนในบทนี้จะใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายแบบเมฆซึ่งสามารถให้ผลตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้โปรแกรมที่ได้จากผู้เขียนวิทยานิพนธ์ [17] มาทดสอบ

4.2 การสร้างแบบจำลองของปัญหาด้วยคณิตศาสตร์

แบบจำลองที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ได้รับการพัฒนามาจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวนเดี่ยว 1 วง ให้เหมาะสมกับปัญหาที่จะพิจารณา โดยจะกำหนดตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในแบบจำลองดังนี้

N	จำนวนโหนดในโครงข่าย
D	จำนวนคู่โหนดทั้งหมดซึ่งมีค่าเท่ากับ $N(N-1)/2$
C	จำนวนวงแหวนทั้งหมดที่มีอยู่ในโครงข่าย
M	จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น
n_j	จำนวนโหนดหรือจำนวนข่ายเชื่อมโยงของวงแหวนวงที่ j
t_i	ปริมาณของทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่ i ซึ่งวัดในหน่วยของจำนวนช่องสัญญาณการติดต่อ (connections)
f_j	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมากที่สุดในวงแหวนวงที่ j
$r_{i,j}$	ปริมาณของทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่ i ที่รองรับโดยวงแหวนวงที่ j
$\delta_{i,k,l}$	มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ l เป็นส่วนหนึ่งในเส้นทางที่ k ของคู่โหนดที่ i ส่วนในกรณีอื่น ๆ มีค่าเป็น 0

- $x_{i,j,k,m}^*$ ปริมาณของทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่ i เส้นทางที่ k โดยใช้ความยาวคลื่นที่ m และรองรับโดยวงแหวนวงที่ j (ใช้ในกรณีที่ไม้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น)
- $x_{i,j,k}^*$ ปริมาณของทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่ i โดยใช้เส้นทางที่ k และรองรับโดยวงแหวนวงที่ j (ใช้ในกรณีที่ใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น)

* สำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนเส้นทางระหว่างโหนดหนึ่งจะมีเพียง 2 เส้นทางเท่านั้นที่ใช้ในการเชื่อมต่อ ($k = 1, 2$) ดังนั้นจะกำหนดให้ $k = 1$ แทนเส้นทางที่สั้นกว่าหรืออาจจะกล่าวว่าเป็นเส้นทางที่มีจำนวน hop น้อยกว่า และ $k = 2$ แทนเส้นทางที่ยาวกว่า

N, D, C, M, n_j, t_i และ $\delta_{i,k,l}$ เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้กับแบบจำลอง ส่วน $f_j, r_{i,j}, x_{i,j,k,m}$ และ $x_{i,j,k}$ เป็นตัวแปรในแบบจำลอง โดยที่ค่าของพารามิเตอร์และตัวแปรทุกตัวในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

จากค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆข้างต้น สามารถสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ทั้งในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นดังนี้

4.2.1 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

(No Wavelength Conversion : NWC)

objective function ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีนี้จะเป็นการหาต้นทุนที่ต่ำที่สุดของโครงข่ายคือ

$$\text{Minimize : } M \sum_{j=1}^C n_j f_j \quad (1)$$

โดยมี constraint ต่างๆดังนี้

1. สำหรับแต่ละคู่โหนดในโครงข่าย ปริมาณทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่ i สามารถรองรับโดยวงแหวนวงใดก็ได้ที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกนั้นได้ หรือปริมาณทราฟฟิกดังกล่าวอาจแบ่งให้รองรับโดยวงแหวนหลายๆวงก็ได้

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

2. เมื่อพิจารณาที่ละวงแหวน สำหรับแต่ละคูโนด ปริมาณกราฟฟิกระหว่าง คูโนดที่ i อาจจะใช้เส้นทางที่สั้นกว่าหรือยาวกว่าก็ได้ และใช้ความยาวคลื่นที่มีลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงค่าใดก็ได้

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^2 (x_{i,j,k,m}) = (r_{i,j}) \quad i=1,2,\dots,D, \quad j=1,2,\dots,C \quad (3)$$

3. เมื่อพิจารณาที่ละวงแหวน สำหรับแต่ละค่าความยาวคลื่นในแต่ละข่ายเชื่อมโยง ปริมาณกราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l และใช้ค่าความยาวคลื่นที่ m ต้องมีค่าไม่เกินจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมากที่สุดในวงแหวน ซึ่งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวจะหมายถึงจำนวนครั้งที่สามารถใช้ความยาวคลื่นค่าเดิมซ้ำได้นั่นเอง

$$f_j - \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^2 (x_{i,j,k,m}) \delta_{i,k,l} \geq 0 \quad l=1,2,\dots,n_j, \quad j=1,2,\dots,C, \quad m=1,2,\dots,M \quad (4)$$

4. จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมากที่สุดในวงแหวนวงที่ j ต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

$$f_j \geq 0, \quad \text{integer}, \quad j=1,2,\dots,C \quad (5)$$

5. ปริมาณของกราฟฟิกระหว่างคูโนดที่ i ที่รองรับโดยวงแหวนวงที่ j ต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

$$r_{i,j} \geq 0, \quad \text{integer}, \quad i=1,2,\dots,D, \quad j=1,2,\dots,C \quad (6)$$

6. ปริมาณของกราฟฟิกระหว่างคูโนดที่ i เส้นทางที่ k โดยใช้ความยาวคลื่นที่ m และรองรับโดยวงแหวนวงที่ j ต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

$$x_{i,j,k,m} \geq 0, \quad \text{integer}, \quad i=1,2,\dots,D, \quad j=1,2,\dots,C, \quad k=1,2, \quad m=1,2,\dots,M \quad (7)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

(Wavelength Conversion : WC)

สำหรับกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเพื่อเพิ่มขีดความสามารถของโหนดแบบจำลองจะเปลี่ยนไปโดยจะมีตัวแปรและ constraint เป็นจำนวนที่น้อยลง ทำให้ปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อยลง โดยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้จะมี objective function ซึ่งจะเป็นการหาต้นทุนที่ต่ำที่สุดของโครงข่ายคือ

$$\text{Minimize : } M \sum_{j=1}^C n_j f_j \quad (8)$$

โดยมี constraint ต่างๆดังนี้

1. สำหรับแต่ละคู่โหนดในโครงข่าย ปริมาณทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่ i สามารถรองรับโดยวงแหวนวงใดก็ได้ที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกนั้นได้ หรือปริมาณทราฟฟิกดังกล่าวอาจแบ่งให้รองรับโดยวงแหวนหลายๆวงก็ได้

$$\sum_{j=1}^C (r_{i,j}) = t_i \quad i = 1, 2, \dots, D \quad (9)$$

2. เมื่อพิจารณาที่ละวงแหวน สำหรับแต่ละคู่โหนด ปริมาณทราฟฟิกระหว่าง คู่โหนดที่ i อาจจะใช้เส้นทางที่สั้นกว่าหรือยาวกว่าก็ได้

$$\sum_{k=1}^2 (x_{i,j,k}) = (r_{i,j}) \quad i = 1, 2, \dots, D, \quad j = 1, 2, \dots, C \quad (10)$$

3. เมื่อพิจารณาที่ละวงแหวน สำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง ปริมาณทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l ต้องมีค่าไม่เกินค่าผลคูณระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมากที่สุดในวงแหวนกับจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพล็กซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น ซึ่งค่าผลคูณดังกล่าวจะหมายถึงค่าที่มากที่สุดของจำนวนการเชื่อมต่อที่สามารถเกิดขึ้นผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l ได้

$$M f_j - \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^2 (x_{i,j,k}) \delta_{i,k,l} \geq 0 \quad l = 1, 2, \dots, n_j, \quad j = 1, 2, \dots, C \quad (11)$$

4. จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมากที่สุดในวงแหวนวงที่ j ต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

$$f_j \geq 0, \quad \text{integer}, \quad j = 1, 2, \dots, C \quad (12)$$

5. ปริมาณของกราฟฟิกระหว่างคูโนดที่ i ที่รองรับโดยวงแหวนวงที่ j ต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

$$r_{i,j} \geq 0, \text{ integer}, i=1,2,\dots,D, j=1,2,\dots,C \quad (13)$$

6. ปริมาณของกราฟฟิกระหว่างคูโนดที่ i เส้นทางที่ k และรองรับโดยวงแหวนวงที่ j ต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

$$x_{i,j,k} \geq 0, \text{ integer}, i=1,2,\dots,D, j=1,2,\dots,C, k=1,2 \quad (14)$$

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนของแบบจำลองผ่านจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลองทั้ง 2 กรณีคือ กรณีที่มีและไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ซึ่งจะเห็นว่าในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC) จะทำให้แบบจำลองมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากกว่ากรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC) โดยจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ขึ้นอยู่กับจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง (M) ในกรณีที่ $M=1$ แบบจำลองทั้ง 2 แบบจะมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint เท่ากัน

ตารางที่ 4.1 จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลองกรณีที่ไม่มีและมีการใช้ อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และเป็นกรณีที่กราฟฟิกของทุกคูโนดมีค่ามากกว่า 0

Model	Number of variables	Number of constraints
NWC	$(2M+1) \sum_{j=1}^C \frac{n_j(n_j-1)}{2} + C$	$\frac{N(N-1)}{2} + \sum_{j=1}^C \frac{n_j(n_j-1)}{2} + M \sum_{j=1}^C n_j$
WC	$3 \sum_{j=1}^C \frac{n_j(n_j-1)}{2} + C$	$\frac{N(N-1)}{2} + \sum_{j=1}^C \frac{n_j(n_j-1)}{2} + \sum_{j=1}^C n_j$

‘NWC’ หมายถึงแบบจำลองที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

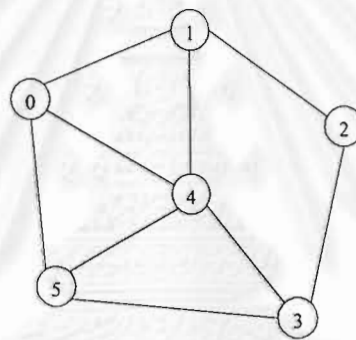
‘WC’ หมายถึงแบบจำลองที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

4.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

การหาผลตอบจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 4.2 สามารถกระทำได้โดยใช้อัลกอริทึมที่ใช้หาผลตอบจาก integer linear programming ทั่วไป โดยจะใช้ software CPLEX [16] และใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ Pentium II 333 MHz พร้อม RAM ขนาด 96 MB

4.3.1 ลักษณะการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

ในส่วนแรกนี้แสดงตัวอย่างการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงให้กับโครงข่ายตัวอย่างขนาด 6 โหนดและมีข่ายเชื่อมโยงทั้งสิ้น 9 ข่ายเชื่อมโยงดังรูปที่ 4.1 กำหนดให้โครงข่ายมีความต้องการปริมาณทราฟฟิกที่มีรูปแบบยูนิฟอร์ม จำนวนการเชื่อมต่อที่ต้องการโดยแต่ละคู่โหนดมีค่าเท่ากับ 1 (ค่า traffic volume = 1) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากับ 1 ($M=1$)

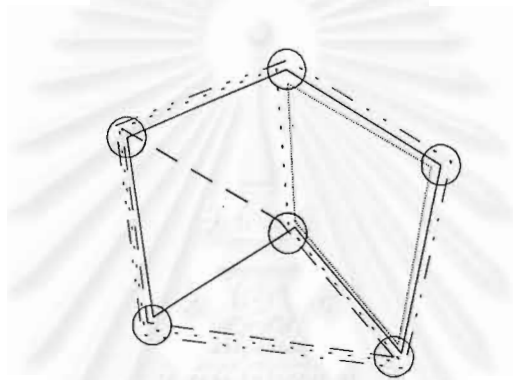


รูปที่ 4.1 โครงข่ายตัวอย่างขนาด 6 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยง

ตารางที่ 4.2 ปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่ค่า traffic volume = 1 ในโครงข่ายขนาด 6 โหนด

node	0	1	2	3	4	5
0	-	1	1	1	1	1
1	1	-	1	1	1	1
2	1	1	-	1	1	1
3	1	1	1	-	1	1
4	1	1	1	1	-	1
5	1	1	1	1	1	-

ในส่วนนี้จะเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบใน 2 ลักษณะ การออกแบบลักษณะแรกจะใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 4.2.1 สำหรับการออกแบบลักษณะที่ 2 จะเลือกใช้วงแหวนจำนวนน้อยๆ ผลการออกแบบในลักษณะที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงรายละเอียดของวงแหวน 5 วงที่เลือกด้วยวงแหวนวงที่ 1 เป็นวงแหวนขนาด 4 โหนด รองรับปริมาณทราฟฟิก 3 ช่องสัญญาณและใช้เส้นใยแก้วนำแสง 4 เส้น ซึ่งทำให้ต้นทุนของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 4 เนื่องจากกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากับ 1 และจะเห็นว่าต้นทุนรวมของโครงข่ายจากการออกแบบในลักษณะนี้มีค่าเท่ากับ 24 สำหรับตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดรองรับโดยวงแหวนวงใด



รูปที่ 4.2 วงแหวนที่เลือกใช้จากผลการออกแบบในลักษณะที่ 1

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของผลการออกแบบในลักษณะที่ 1

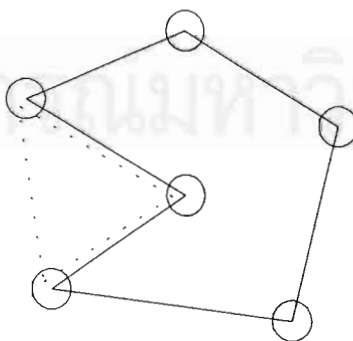
Ring	Number of nodes	Description	Traffic	Number of fibers (f)	Cost (M×f)
1	4	0-4-3-5	3	4	4
2	4	1-2-3-4	2	4	4
3	5	0-1-2-3-5	4	5	5
4	5	0-1-4-3-5	3	5	5
5	6	0-1-2-3-4-5	3	6	6
Total network cost					24

ตารางที่ 4.4 หมายเลขวงแหวนที่รองรับปริมาณกราฟฟิกของแต่ละคู่โนดจากผลการออกแบบ
ในลักษณะที่ 1

node	0	1	2	3	4	5
0	-	3	5	1	1	3
1	3	-	3	2	4	4
2	5	3	-	2	5	3
3	1	2	2	-	1	4
4	1	4	5	1	-	5
5	3	4	3	4	5	-

ผลการออกแบบลักษณะที่ 2 แสดงในรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.5 โดยมีทางเลือกใช้วงแหวน 2 วง จะเห็นว่าต้นทุนรวมของโครงข่ายมีค่าเท่ากับ 33 เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนรวมของโครงข่ายจากการออกแบบในลักษณะที่ 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24 จะเห็นว่าการออกแบบในลักษณะที่ 2 ซึ่งใช้วงแหวนจำนวนน้อยๆ จะทำให้ต้นทุนรวมของโครงข่ายมีค่าสูงขึ้น 37.5% และเมื่อพิจารณาผลการออกแบบในลักษณะที่ 2 พบข้อสังเกตว่าปริมาณกราฟฟิกส่วนใหญ่ (80%) รองรับโดยวงแหวนขนาดใหญ่เพียงวงเดียวคือ วงแหวนวงที่ 2 ขณะที่การออกแบบในลักษณะที่ 1 พบว่าปริมาณกราฟฟิกถูกกระจายไปยังวงแหวนแต่ละวงในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน จากการเปรียบเทียบดังกล่าว จะเห็นว่า การเลือกใช้วงแหวนเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการออกแบบโครงข่าย สำหรับตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าปริมาณกราฟฟิกของแต่ละคู่โนดรองรับโดยวงแหวนวงใด

นอกจากนี้ในทางตรงกันข้ามการออกแบบโดยใช้วงแหวนจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบโดยใช้วงแหวน 9 วง จากการทดสอบพบว่าจะทำให้ต้นทุนรวมของโครงข่ายมีค่าเท่ากับ 37 ซึ่งมีค่าสูงกว่าต้นทุนรวมของโครงข่ายจากการออกแบบในลักษณะที่ 1 อยู่ถึง 54.17%



รูปที่ 4.3 วงแหวนที่เลือกใช้จากผลการออกแบบในลักษณะที่ 2

ตารางที่ 4.5 รายละเอียดของผลการออกแบบในลักษณะที่ 2

Ring	Number of nodes	Description	Traffic	Number of fibers (f)	Cost (M×f)
1	3	0-4-5	3	3	3
2	6	0-1-2-3-5-4	12	30	30
Total network cost					33

ตารางที่ 4.6 หมายเลขวงแหวนที่รองรับปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดจากผลการออกแบบในลักษณะที่ 2

node	0	1	2	3	4	5
0	-	2	2	2	1	1
1	2	-	2	2	2	2
2	2	2	-	2	2	2
3	2	2	2	-	2	2
4	1	2	2	2	-	1
5	1	2	2	2	1	-

สำหรับผลการออกแบบโดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่แสดงในรูปที่ 4.2 ตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการออกแบบในอีกลักษณะหนึ่งคือการออกแบบในลักษณะที่ 3 ซึ่งเลือกใช้วงแหวนเช่นเดียวกับการออกแบบในลักษณะที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แต่รายละเอียดของผลการออกแบบและปริมาณทราฟฟิกที่วงแหวนแต่ละวงรองรับจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปซึ่งแสดงในตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 ตามลำดับโดยการกระจายปริมาณ ทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดให้กับวงแหวนจะกระทำในลักษณะสุ่ม จะเห็นว่าต้นทุนรวมของโครงข่ายมีค่าเท่ากับ 39 เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนรวมของโครงข่ายจากการออกแบบในลักษณะที่ 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24 จะเห็นว่าการออกแบบในลักษณะที่ 3 ซึ่งกระจายปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดให้กับวงแหวนในลักษณะสุ่ม จะทำให้ต้นทุนรวมของโครงข่ายมีค่าสูงขึ้น 62.5% แสดงให้เห็นว่า นอกจากการเลือกใช้วงแหวนซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการออกแบบโครงข่ายดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ยังมีปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อการออกแบบโครงข่าย นั่นคือการกระจายปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดให้กับวงแหวน

ตารางที่ 4.7 รายละเอียดของผลการออกแบบในลักษณะที่ 3

Ring	Number of nodes	Description	Traffic	Number of fibers (f)	Cost (M×f)
1	4	0-4-3-5	3	8	8
2	4	1-2-3-4	3	4	4
3	5	0-1-2-3-5	4	10	10
4	5	0-1-4-3-5	2	5	5
5	6	0-1-2-3-4-5	3	12	12
Total network cost					39

ตารางที่ 4.8 หมายเลขวงแหวนที่รองรับปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดจากผลการออกแบบในลักษณะที่ 3

node	0	1	2	3	4	5
0	-	5	3	3	5	1
1	5	-	2	4	2	3
2	3	2	-	3	2	5
3	3	4	3	-	4	1
4	5	2	2	4	-	1
5	1	3	5	1	1	-

4.3.2 ผลของจำนวนความยาวคลื่นที่มีลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและต้นทุนของโครงข่าย

ในส่วนนี้จะทดสอบแบบจำลองกับโครงข่ายตัวอย่างขนาด 6 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 กำหนดให้โครงข่ายมีความต้องการปริมาณทราฟฟิกที่มีรูปแบบยูนิฟอร์ม โดยจำนวนการเชื่อมต่อที่ต้องการโดยแต่ละคู่โหนดมีค่าเท่ากับ 2 (ค่า traffic volume = 2) และจะทดสอบที่ค่า $M=1, 2, 4, 8, 16$ และ 32 เนื่องจากการทดสอบที่ traffic volume ค่าต่างๆ พบว่าที่ค่า traffic volume = 2 สามารถวิเคราะห์ผลได้ชัดเจนและเหมาะสมที่สุดทั้งในด้านของเวลาที่ใช้ในการหาผลตอบและในด้านของค่า M ที่ใช้ในการทดสอบ นั่นคือจะสามารถทดสอบกับ M ที่มีค่าไม่น้อยจนเกินไป ตารางที่ 4.9 แสดงผลของค่า M และการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่าย จะเห็นว่าเมื่อ M มีค่ามากขึ้นจะทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่

ใช้ในโครงข่ายลดลง นั่นคือจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากับ 42 เส้น 22 เส้น 13 เส้น 9 เส้น 6 เส้น และ 6 เส้นเมื่อ M มีค่าเท่ากับ 1, 2, 4, 8, 16 และ 32 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า M ทำให้จำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้นมากขึ้น แต่จะสังเกตได้ว่าเมื่อ M มีค่ามากขึ้น 2 เท่า ยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่ M มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ไม่ได้ลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง แต่จะมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งเล็กน้อย นั่นคือจะใช้เส้นใยแก้วนำแสง 22 เส้น แทนที่จะใช้ 21 เส้น เนื่องจากแม้ว่าจำนวนช่องสัญญาณจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าแต่อาจจะไม่ได้เป็นช่องสัญญาณในเส้นทางที่ต้องการ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงเข้าไปอีก 1 เส้น สำหรับกรณีที่ $M=16$ และ 32 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายจะมีค่า 6 เส้นเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ $M=16$ โครงข่ายจะมีช่องสัญญาณพอดีหรืออาจจะมากจนเกินความต้องการ เมื่อมีการเพิ่มช่องสัญญาณให้กับโครงข่ายมากขึ้นไปอีก (เพิ่ม M เป็น 32) จึงไม่สามารถที่จะใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนที่น้อยกว่านี้ได้

นอกจากนี้การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่ายตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนี้ ไม่ได้ช่วยให้ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนที่น้อยลงดังแสดงในตารางที่ 4.9 แต่จะช่วยให้การหาผลตอบจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ใช้เวลาน้อยลงซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.3.4

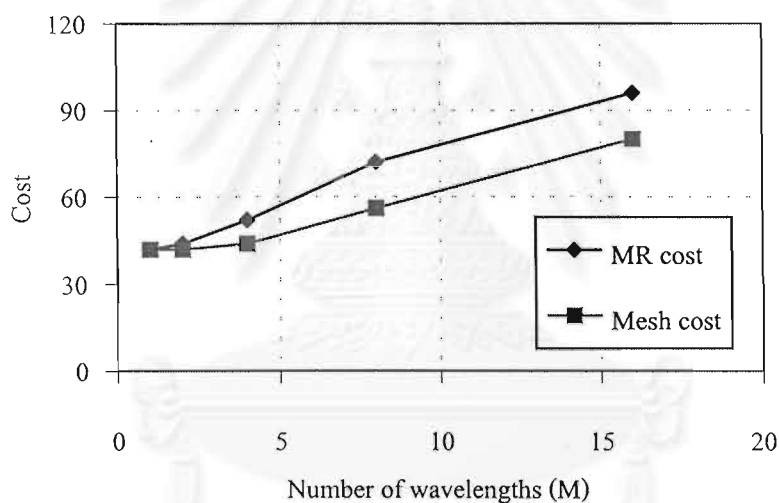
ตารางที่ 4.9 ผลของค่า M และการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่าย

M	Number of fibers	
	NWC	WC
1	42	42
2	22	22
4	13	13
8	9	9
16	6	6
32	6*	6

* หมายถึง เป็นผลตอบที่ได้เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมงแต่อาจจะไม่ใช่ผลตอบที่ดีที่สุด

รูปที่ 4.4 แสดงผลของ M ที่มีต่อดัชนีของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าดัชนีของโครงข่ายมีค่าสูงขึ้นเมื่อ M มีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ M เป็นการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณให้กับเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งจะทำให้ดัชนีต่อเส้นของเส้นใยแก้วนำแสงมี

ค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ในการเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงขึ้น 1 เส้นจะทำให้จำนวนช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกับ M นั่นคือเมื่อ M มีค่ามากขึ้นเท่าใด โอกาสที่จำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงถูกใช้งานไม่หมดก็มีมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนที่ได้กับต้นทุนจากโครงข่ายแบบเมชพบว่า สาเหตุสำคัญที่ทำให้ความแตกต่างระหว่างต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมชมีค่ามากขึ้นเมื่อ M มีค่ามากขึ้น เนื่องมาจากลักษณะทางโครงสร้างของโครงข่ายรูปวงแหวนนั่นคือจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะต้องเท่ากัน ดังนั้นการเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงในโครงข่ายรูปวงแหวนจะต้องเพิ่มให้กับทุกข่ายเชื่อมโยงในวงแหวน ขณะที่การเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงให้กับโครงข่ายแบบเมชสามารถเพิ่มเฉพาะข่ายเชื่อมโยงที่ต้องการเท่านั้น ด้วยเหตุนี้เมื่อ M มีค่ามากขึ้น จะทำให้ความแตกต่างระหว่างต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมชมีค่ามากขึ้น



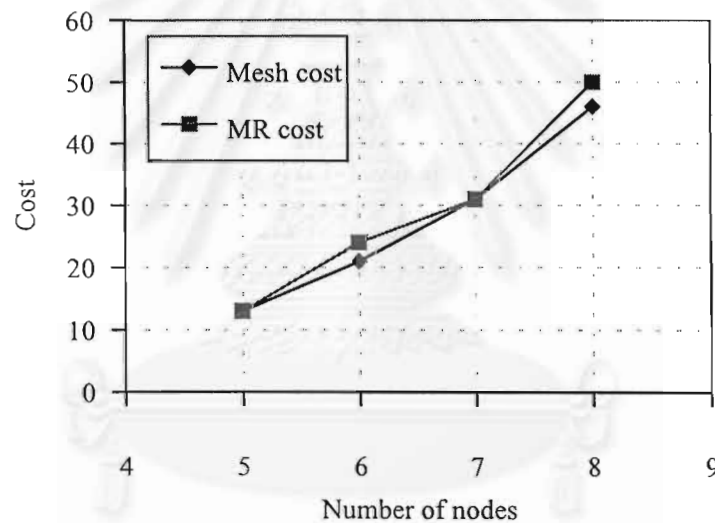
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนของโครงข่ายกับจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพล็กซ์

ในเส้นใยแก้วนำแสง โดยเปรียบเทียบกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช

4.3.3 การเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายแบบเมช

ในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายแบบเมช โดยจะทดสอบกับโครงข่ายตัวอย่างขนาด 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง, 6 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยง, 7 โหนด 11 ข่ายเชื่อมโยง และ 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยง ที่ค่า traffic volume = 1 และ $M=1$ สำหรับผลการเปรียบเทียบสำหรับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะได้แสดงในบทที่ 5 ต่อไป รูปที่ 4.5 เป็น

การเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบเมช ซึ่งจะเห็นว่าสำหรับโครงข่ายขนาด 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง และโครงข่ายขนาด 7 โหนด 11 ข่ายเชื่อมโยงแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอนี้สามารถออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงให้มีต้นทุนเท่ากับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมชได้ สำหรับโครงข่ายขนาด 6 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยงแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไม่สามารถออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงให้มีต้นทุนเท่ากับโครงข่ายแบบเมชได้ โดยต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบเมชจะเท่ากับ 21 ขณะที่ต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงมีค่าเท่ากับ 24 เนื่องจากในการจัดสรรเส้นทางให้กับคู่โหนดใดๆ ต้องใช้โครงข่ายรูปวงแหวนอย่างน้อย 1 โครงข่ายในการรองรับปริมาณทราฟฟิกระหว่างคู่โหนด ดังนั้นจึงมีโอกาที่เส้นใยแก้วนำแสงบางส่วนในโครงข่ายรูปวงแหวนจะไม่ถูกใช้งานเป็นเหตุให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าสูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ สำหรับโครงข่ายขนาด 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยงแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์จะมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากโดยต้นทุนที่แสดงในรูปที่ 4.5 เป็นต้นทุนที่ได้เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมงแต่อาจจะไม่ใช่ต้นทุนที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง (MR cost) กับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช (Mesh cost)

4.3.4 ความซับซ้อนของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ความซับซ้อนของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ จะวิเคราะห์ผ่านจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลอง โดยจะศึกษาถึงผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและขนาดของโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ดังนี้

4.3.4.1 ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ โดยจะทดสอบแบบจำลองกับโครงข่ายตัวอย่างที่ใช้ในหัวข้อ 4.3.2 ที่ค่า traffic volume = 2 และ $M=1, 2, 4, 8, 16$ และ 32 ตารางที่ 4.10 แสดงผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลอง โดยแสดงในรูปของจำนวนตัวแปร, N_v จำนวน constraint, N_c และเวลาที่ใช้ในการหาผลตอบจากแบบจำลอง

ตารางที่ 4.10 ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

M	NWC			WC		
	N_v	N_c	Computational time (seconds)	N_v	N_c	Computational time (seconds)
1	349	186	0.08	349	186	0.06
2	573	245	4.60	349	186	0.20
4	1021	363	348	349	186	0.67
8	1917	599	9593	349	186	0.61
16	3709	1071	1216	349	186	0.41
32	7293	2015	—	349	186	0.28

‘NWC’ หมายถึง แบบจำลองที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

‘WC’ หมายถึง แบบจำลองที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

— หมายถึง ไม่สามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.10 จะเห็นว่าในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเพื่อเพิ่มความ สามารถของโหนด จะช่วยให้จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มีค่าคงที่เท่ากับ 349 และ 186 ตามลำดับ โดยไม่ขึ้นกับค่า M ที่เปลี่ยนแปลงไป ขณะที่ในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผัน ความยาวคลื่น เมื่อ M มีค่ามากขึ้นจะทำให้จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ในแบบจำลองมีค่า มากขึ้น เนื่องจากมีจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องจัดสรรในโครงข่ายมากขึ้น ขณะที่ในกรณีที่มี การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ไม่จำเป็นที่จะต้องจัดสรรความยาวคลื่นดังที่ได้กล่าวไว้ใน บทที่ 2 ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.10 สำหรับกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผัน ความยาวคลื่น เมื่อ $M=1$ จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มีค่าเท่ากับ 349 และ 186 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มค่า M ให้มีค่าเท่ากับ 2 จะทำให้จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ในแบบจำลองมีค่ามาก ขึ้นก็จะมีค่าเท่ากับ 573 และ 245 ตามลำดับ และจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของ แบบจำลองจะเพิ่มมากขึ้นตามค่า M ที่มากขึ้นซึ่งเป็นไปตามสูตรที่แสดงในตารางที่ 4.1 และในกรณี ที่ $M=32$ แบบจำลองจะมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากจนไม่สามารถหาผลตอบได้ ภายในเวลา 12 ชั่วโมง สำหรับในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จะเห็นว่าสำหรับ ค่าของ M ทุกกรณีที่แสดงในตารางที่ 4.10 สามารถหาผลตอบได้ภายในเวลาที่ต่ำกว่า 1 วินาที

สังเกตว่าในกรณีที่ $M=1$ จำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ทั้งในกรณีที่ไม่มีการใช้และมีการ ใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น มีค่าเท่ากันคือ 349 และ 186 ตามลำดับ เนื่องจากในกรณีที่ $M=1$ ไม่จำเป็นต้องจัดสรรความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย

4.3.4.2 ผลของขนาดโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลอง

เชิงคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ผลของขนาดโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของ แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ จะทดสอบแบบจำลองกับโครงข่ายตัวอย่างที่ใช้ในหัวข้อ 4.3.3 ที่ค่า traffic volume = 1 และ $M=1$ ตารางที่ 4.11 เป็นการแสดงผลของขนาดโครงข่ายที่มีต่อจำนวน ตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์โดยจะแสดงจำนวนตัวแปร, N_v จำนวน constraint, N_c และเวลาที่ใช้ในการหาผลตอบจากแบบจำลอง โดยจะใช้แบบจำลอง เชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น เนื่องจากในกรณีที่ $M=1$ การ ใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะไม่มีผลต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ใน แบบจำลอง จากตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าสำหรับโครงข่ายขนาด 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง จำนวน ตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 139 และ 82 ตามลำดับซึ่งใช้เวลาน้อย มากในการหาผลตอบจากแบบจำลอง (ต่ำกว่า 1 วินาที) เมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ ตัวแปรและ constraint ที่ใช้ในแบบจำลองมีจำนวนมากขึ้นคือ $N_v = 349$, $N_c = 186$ สำหรับ

โครงข่ายขนาด 6 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโง และ $N_v = 897$, $N_c = 439$ สำหรับโครงข่ายขนาด 7 โหนด 11 ข่ายเชื่อมโง แต่ก็ยังสามารถหาผลตอบจากแบบจำลองได้ภายในเวลาที่น้อยมาก จากนั้นเมื่อโครงข่ายมีขนาด 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโง แบบจำลองจะมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากจนไม่สามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ($N_v = 1782$, $N_c = 834$)

ตารางที่ 11 ผลของขนาดโครงข่ายที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

Network	N_v	N_c	Computational time (seconds)
5 nodes 7 links	139	82	0.18
6 nodes 9 links	349	186	2.82
7 nodes 11 links	897	439	0.18
8 nodes 13 links	1782	834	—

— หมายถึง ไม่สามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมง

จากการวิเคราะห์ความซับซ้อนของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 4.3.4 จะเห็นว่าแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้นำเสนอไปนั้นจะมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากขึ้นตามขนาดของโครงข่ายที่ใหญ่ขึ้นและค่า M ที่สูงขึ้น ซึ่งไม่สามารถใช้ในการออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดมากกว่า 7 โหนดภายในเวลาที่เหมาะสมได้ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ให้มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint น้อยลงโดยจะจำกัดวงแหวนที่จะเลือกในแบบจำลอง เพื่อให้สามารถออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้

4.4 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กรณีที่มีการจำกัดวงแหวนและการวิเคราะห์

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้นำเสนอไปนั้น แต่ละโหนดสามารถเลือกวงแหวนวงใดก็ได้เพื่อใช้ในการรองรับปริมาณทราฟฟิกให้กับโหนดซึ่งการเลือกวงแหวนในลักษณะนี้จะทำให้แบบจำลองมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มาก ซึ่งส่งผลให้แบบจำลองมีความซับซ้อนมากด้วย (high complexity model) ดังที่ได้วิเคราะห์ในหัวข้อ 4.3.4 ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอวิธีการปรับปรุงแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ให้มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint น้อยลงโดยจะจำกัดวงแหวนที่จะเลือกในแบบจำลอง โดย

กำหนดให้แต่ละโหนดสามารถเลือกวงแหวนได้เพียง 1 วงเพื่อใช้ในการรองรับปริมาณทราฟฟิก (low complexity model) และวงแหวนดังกล่าวต้องมีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของโหนดนั้นได้ เนื่องจากวงแหวนขนาดเล็กใช้ทรัพยากรน้อยกว่าวงแหวนขนาดใหญ่ การจำกัดวงแหวนในลักษณะดังกล่าวนี้จะทำให้วงแหวนที่เลือกใช้มีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนโหนดในโครงข่ายเสมอ เนื่องจากวงแหวนที่เลือกโดยโหนดคู่หนึ่งอาจจะเป็นวงแหวนวงเดียวกับที่เลือกโดยโหนดอื่นได้ และลักษณะการแบ่งปริมาณทราฟฟิกของแต่ละโหนดที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากโหนดคู่หนึ่งอาจจะมีวงแหวนที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของโหนดนั้นได้มากกว่า 1 วง ซึ่งการจำกัดวงแหวนในลักษณะนี้อาจจะทำให้ผลตอบที่ได้ไม่ใช่ผลตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองระหว่างกรณีที่ไม่มีการจำกัดวงแหวน และกรณีที่มีการจำกัดวงแหวน โดยจะทดสอบแบบจำลองกับโครงข่ายตัวอย่างขนาดต่างๆที่ค่า traffic volume = 1 และ $M=1$ โดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จากตารางที่ 4.12 จะเห็นว่าการจำกัดวงแหวนช่วยให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีจำนวนตัวแปร, N_v และจำนวน constraint, N_c ที่น้อยลง ยกตัวอย่างกรณีของโครงข่ายตัวอย่างขนาด 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยง แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีการจำกัดวงแหวนจะมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มาก ($N_v = 1782$, $N_c = 834$) จนไม่สามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ขณะที่แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการจำกัดวงแหวนจะมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint น้อยลง ($N_v = 366$, $N_c = 211$) และสามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลาที่ต่ำกว่า 4 นาที อย่างไรก็ตามเมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น แบบจำลองก็จะมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากขึ้นจนไม่สามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดจากโครงข่ายขนาด 12 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยงได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ($N_v = 947$, $N_c = 515$)

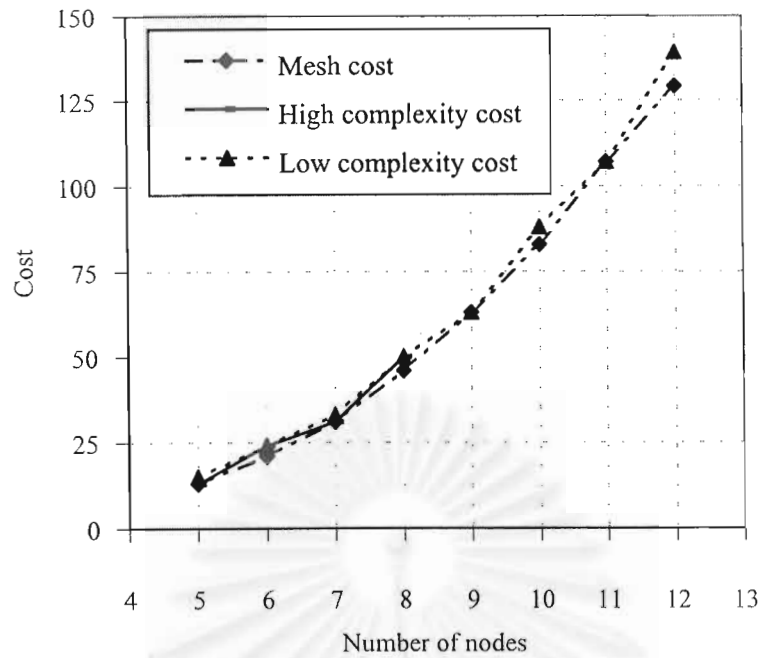
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองระหว่างกรณีที่ไม่มีการจำกัดวงแหวน (high complexity model) และกรณีที่มีการจำกัดวงแหวน (low complexity model) โดยทดสอบกับโครงข่ายขนาดต่างๆ

Network	High complexity model			Low complexity model		
	N_v	N_c	Computational time (seconds)	N_v	N_c	Computational time (seconds)
5 nodes 7 links	139	82	0.18	58	42	0.65
6 nodes 9 links	349	186	2.82	149	93	0.42
7 nodes 11 links	897	439	0.18	149	99	0.17
8 nodes 13 links	1782	834	—	366	211	202
9 nodes 15 links	3877	1729	—	366	218	0.52
10 nodes 17 links	7955	3428	—	646	357	2708
11 nodes 19 links	14573	6118	—	856	450	2.59
12 nodes 21 links	37298	15362	—	947	515	—

— หมายถึง ไม่สามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมง

รูปที่ 4.6 เป็นการแสดงต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงในกรณีที่มีการจำกัดวงแหวน (Low complexity cost) เปรียบเทียบกับต้นทุนในกรณีที่ไม่มีการจำกัดวงแหวน (High complexity cost) และต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช (Mesh cost) โดยใช้โครงข่ายขนาดต่างๆ เช่นเดียวกับที่ใช้ในตารางที่ 4.12 ที่ค่า traffic volume = 1 และ $M=1$ ในกรณีของโครงข่ายตัวอย่างที่มีขนาดต่ำกว่า 9 โหนด จะเห็นว่าต้นทุนที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการจำกัดวงแหวนจะมีค่าใกล้เคียงกับต้นทุนจากกรณีที่ไม่มีการจำกัดวงแหวนมาก โดยมีต้นทุนที่เท่ากัน ในกรณีของโครงข่ายขนาด 6 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยง และ 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยง และมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับโครงข่ายขนาด 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยงและ 7 โหนด 11 ข่ายเชื่อมโยง สำหรับโครงข่ายตัวอย่างที่มีขนาดมากกว่า 8 โหนด ต้นทุนของโครงข่ายที่ได้จากแบบจำลองในกรณีที่มีการจำกัดวงแหวนมีค่าเท่ากับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมชสำหรับโครงข่ายขนาด 9 โหนด 15 ข่ายเชื่อมโยงและ 11 โหนด 19 ข่ายเชื่อมโยง และมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยคือ 6.02% และ 7.75% สำหรับโครงข่ายขนาด 10 โหนด 17 ข่ายเชื่อมโยงและ 12 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยงตามลำดับ



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบต้นทุนของ โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับต้นทุนของ โครงข่ายแบบเมช

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นว่าการจำกัดวงแหวนจะช่วยลดจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของโครงข่ายที่ใหญ่ขึ้น ในส่วนนี้จะเปรียบเทียบจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองระหว่างกรณีที่ไม่มี การจำกัดวงแหวนและกรณีที่มีการจำกัดวงแหวน เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนความยาวคลื่นที่มีลติเพลกซ์ใน เส้นใยแก้วนำแสง โดยจะทดสอบแบบจำลองกับโครงข่ายตัวอย่างขนาด 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยง และกำหนดให้โครงข่ายมีความต้องการปริมาณทราฟฟิกที่มีรูปแบบไม่ยูนิฟอร์ม โดยมีปริมาณ ทราฟฟิกรวมเท่ากับ 34 ช่องสัญญาณ เนื่องจากการทดสอบที่ปริมาณ ทราฟฟิกรูปแบบต่างๆ พบว่าปริมาณทราฟฟิกรูปแบบดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ผลได้ชัดเจนและเหมาะสมที่สุดในด้าน ของเวลาที่ใช้ในการหาผลตอบ นอกจากนี้จะวิเคราะห์ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และจำนวนเส้นใยแก้ว นำแสงที่ใช้ในโครงข่ายเมื่อใช้แบบจำลองในกรณีที่มีการจำกัดวงแหวน

ตารางที่ 4.13 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลอง ระหว่างกรณีที่ไม่มี การจำกัดวงแหวนและกรณีที่มีการจำกัดวงแหวน โดยทดสอบที่ $M=1, 2, 4, 8$ และ 16 จะเห็นว่าการจำกัดวงแหวนจะช่วยให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีจำนวนตัวแปร, N_v และ จำนวน constraint, N_c ที่น้อยลง และสำหรับกรณี $M=1, 2, 4$ และ 8 สามารถหาผลตอบได้ภายใน

เวลาที่ต่ำกว่า 1 นาที ขณะที่แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีการจำกัดวงแหวนจะไม่สามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมง สำหรับ $M=4, 8$ และ 16

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองระหว่างกรณีที่ไม่มีการจำกัดวงแหวน (high complexity model) และกรณีที่มีการจำกัดวงแหวน (low complexity model) โดยทดสอบที่ M ค่าต่างๆ

M	High complexity model			Low complexity model		
	N_v	N_c	Computational time (seconds)	N_v	N_c	Computational time (seconds)
1	1782	827	45.63	270	157	0.55
2	2944	1052	553	442	207	13.08
4	5268	1502	—	784	307	9.45
8	9916	2402	—	1474	508	56.16
16	19212	4202	—	2850	907	—

— หมายถึง ไม่สามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.14 แสดงผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายในกรณีที่มีการจำกัดวงแหวนที่จะเลือกในแบบจำลอง โดยใช้โครงข่ายตัวอย่างและปริมาณกราฟฟิกเช่นเดียวกับที่ใช้ในตารางที่ 4.13 จากตารางที่ 4.14 จะเห็นว่าการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในกรณีที่ $M=1$ จะไม่มีผลต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลอง เนื่องจากจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint จะยังมีค่าเท่าเดิม แต่เมื่อ M มีค่ามากกว่า 1 การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะช่วยลดจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองลงได้ โดยค่า M ที่มากขึ้นจะไม่มีผลต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลอง และสามารถหาผลตอบได้ภายในเวลาที่ต่ำกว่า 2 วินาทีสำหรับค่าของ M ทุกกรณีที่แสดงในตาราง ขณะที่แบบจำลองในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมงในกรณี $M=16$ นอกจากนี้การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่ายตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนี้ไม่ได้ช่วยให้ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนที่น้อยลงดังแสดงในตารางที่ 4.14 ดังนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่มีประโยชน์สำหรับโครงข่ายตัวอย่างนี้

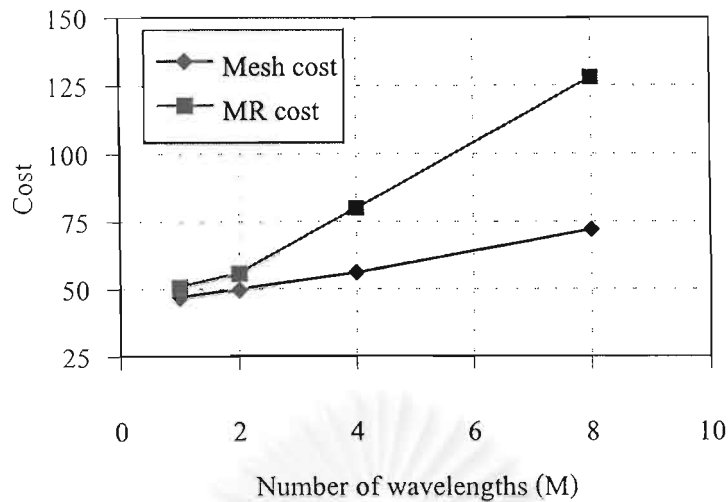
ตารางที่ 4.14 ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายในกรณีที่มีการจำกัดวงแหวนที่จะเลือกในแบบจำลอง

M	NWC				WC			
	N_v	N_c	Computational time (seconds)	Number of fibers	N_v	N_c	Computational time (seconds)	Number of fibers
1	270	157	0.55	51	270	157	1.12	51
2	442	207	13.08	28	270	157	1.10	28
4	784	307	9.45	20	270	157	0.40	20
8	1474	508	56.16	16	270	157	0.42	16
16	2850	907	—	16	270	157	0.14	16

— หมายถึง ไม่สามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมง

รูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงในกรณีที่มีการจำกัดวงแหวน (MR cost) กับต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบเมช (Mesh cost) ที่ค่า $M=1, 2, 4$ และ 8 โดยใช้โครงข่ายตัวอย่างและปริมาณกราฟฟิกเช่นเดียวกับที่ใช้ในตารางที่ 4.13 จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีการจำกัดวงแหวนสามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนที่ต่ำใกล้เคียงกับต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบเมช โดยมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยคือ 8.51% และ 12.00% สำหรับค่า $M=1$ และ 2 ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ M มีค่ามากขึ้นจะเห็นว่าความแตกต่างระหว่างต้นทุนของโครงข่ายทั้ง 2 แบบจะมีมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า M จะทำให้จำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้นมากขึ้นและลักษณะทางโครงสร้างของโครงข่ายรูปวงแหวนซึ่งจะต้องวางเส้นใยแก้วนำแสงให้กับวงแหวนทั้งวง จะวางเฉพาะบางสายเชื่อมโยงไม่ได้ จึงเป็นเหตุให้มีช่องสัญญาณเกิดขึ้นจำนวนมากและโอกาสที่ช่องสัญญาณจะไม่ได้ใช้งานก็จะมีมากขึ้นตามค่า M ที่มากขึ้น

สำหรับกรณีที่ $M=16$ แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช
ที่ $M=1, 2, 4$ และ 8

จากการวิเคราะห์ผลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งได้แก่ การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง ขนาดของโครงข่าย และการจำกัดวงแหวนที่จะเลือกในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ จะเห็นว่าในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้นำเสนอจะมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากขึ้นตามขนาดของโครงข่ายที่ใหญ่ขึ้นและค่า M ที่สูงขึ้น ซึ่งในกรณีที่ไม่มีการจำกัดวงแหวนจะไม่สามารถใช้ในการออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดมากกว่า 7 โหนดได้ภายในเวลาที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่มีการจำกัดวงแหวนเพื่อช่วยลดจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองสามารถออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าในกรณีที่ไม่มีการจำกัดวงแหวนได้ แต่ก็ยังไม่สามารถออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดมากกว่า 11 โหนดได้ภายในเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอวิธีการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงให้สามารถออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้การออกแบบด้วยวิธี heuristic ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 5

การออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่น โดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี heuristic

5.1 กล่าวนำ

เนื่องจากการออกแบบโครงข่ายโดยใช้การสร้างแบบจำลองของปัญหาด้วยคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 จะทำให้ปัญหามีความซับซ้อนมาก ซึ่งจะส่งผลให้ไม่สามารถออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้ในระยะเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากโดยทั่วไปเมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะทำให้มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีความซับซ้อนมากขึ้นด้วย

แนวทางหนึ่งที่สามารถลดความซับซ้อนของปัญหาลงเพื่อให้สามารถออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้คือ ใช้การออกแบบด้วยวิธี heuristic โดยจะพิจารณาปัญหาแยกเป็นส่วนๆ ในการพิจารณาปัญหาแยกเป็นส่วนๆ จะช่วยลดความซับซ้อนของปัญหาได้ แต่ก็อาจทำให้โครงข่ายที่ได้รับการออกแบบไม่ใช่โครงข่ายที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด

ในบทนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี heuristic และจะทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมดังกล่าวด้วยการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงให้กับโครงข่ายตัวอย่างขนาดเล็กและโครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีการใช้งานจริงซึ่งนำเสนอในบทความ [8,18,19] สำหรับโครงข่ายขนาดเล็กจะเปรียบเทียบกับต้นทุนที่ได้จากวิธี heuristic กับต้นทุนที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในบทที่ 4 สำหรับโครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีการใช้งานจริงจะทดสอบโครงข่ายดังกล่าวกับปริมาณกราฟฟิกรูปแบบต่างๆ ซึ่งจะเปรียบเทียบกับต้นทุนของโครงข่ายที่ได้กับต้นทุนโครงข่ายแบบเมชซึ่งเป็นโครงข่ายที่สามารถออกแบบให้มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพมากได้ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 โดยใช้การออกแบบโครงข่ายแบบเมชที่ได้นำเสนอใน [17] ซึ่งมีการออกแบบอยู่ 2 ลักษณะคือ การออกแบบโดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ และการออกแบบด้วยวิธี heuristic การเปรียบเทียบต้นทุนในบทนี้จะใช้การออกแบบโครงข่ายแบบเมชด้วยวิธี heuristic โดยใช้โปรแกรมที่ได้จากผู้เขียนวิทยานิพนธ์ [17] มาทดสอบ และมีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องได้แก่ จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง (M), ค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือก, จำนวนการเชื่อมต่อที่ต้องการโดยแต่ละคู่โหนด (traffic volume)

และ ค่า utilization นอกจากนี้จะมีการศึกษาถึงผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อต้นทุนของโครงข่ายด้วย

5.2 อัลกอริทึมสำหรับการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี heuristic

การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี heuristic จะพิจารณาปัญหาแยกเป็นส่วนๆ โดยพิจารณาปัญหาแยกเป็นส่วนๆดังนี้

1. เลือกโครงข่ายรูปวงแหวนจากวงแหวนทั้งหมดที่เป็นไปได้มาจำนวนหนึ่ง และโครงข่ายรูปวงแหวนที่เลือกเหล่านั้นต้องสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของทุกๆ โหนดได้
2. จัดสรรปริมาณทราฟฟิกของแต่ละโหนดลงบนโครงข่ายรูปวงแหวนที่เลือกขึ้นมา
3. จัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายรูปวงแหวนเหล่านั้น

สำหรับปัญหาการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายรูปวงแหวนจะจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายรูปวงแหวนทีละวง โดยใช้อัลกอริทึมที่ได้ออกแบบด้วยวิธี heuristic [15] ซึ่งได้นำเสนออัลกอริทึมในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเพื่อช่วยเพิ่มขีดความสามารถของ โหนดไว้ด้วย ดังนั้นอัลกอริทึมสำหรับการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น สามารถทำได้เพียงเปลี่ยนอัลกอริทึมสำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้เป็นแบบที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

อัลกอริทึมสำหรับการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี heuristic แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักโดยในส่วนแรก (ขั้นตอนที่ 1-6) จะแก้ปัญหาก็ได้แยกไว้ทั้ง 3 ปัญหาข้างต้นซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหาต้นทุนของโครงข่ายได้โดยต้นทุนที่ได้นี้จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการออกแบบในส่วนที่ 2 ในการคิดต้นทุนของโครงข่ายรูปวงแหวนจะต้องทราบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับอัลกอริทึมนี้ เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้จะมีจำนวนเท่ากับ $\lceil N_\lambda / M \rceil$ เมื่อ N_λ คือจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่าย สำหรับการออกแบบในส่วนที่ 2 (ขั้นตอนที่ 7-10) จะปรับผลของการออกแบบในส่วนที่ 1 ให้มีต้นทุนที่ต่ำลงโดยพยายามจัดสรรปริมาณทราฟฟิกของแต่ละโหนดเสียใหม่ให้ใช้เส้นใยแก้วนำแสงทุกๆเส้นอย่างคุ้มค่า ซึ่งอาจจะเป็นการกำจัดเส้นใยแก้วนำแสงที่มีค่า utilization ต่ำหรืออาจจะนำปริมาณทราฟฟิกจากวงแหวนวงอื่นมาเพิ่มให้กับวงแหวนเพื่อให้มี

ค่า utilization สูงขึ้น ต่อไปนี้จะเป็นการแสดงรายละเอียดของอัลกอริทึมทั้งหมด 10 ขั้นตอน แผนผังการทำงานของอัลกอริทึมแสดงในรูปที่ 5.1

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการสร้างโครงข่ายรูปวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากโครงสร้างของโครงข่ายที่กำหนดให้

ขั้นตอนที่ 2 เลือกวงแหวนที่จะมารองรับปริมาณทราฟฟิกให้กับคู่โหนด โดยจะเลือกวงแหวนที่มีเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับคู่โหนดนั้นๆ และเป็นวงแหวนวงที่มีขนาดเล็กที่สุดด้วย เนื่องจากวงแหวนขนาดใหญ่จะใช้ทรัพยากรมากกว่าวงแหวนขนาดเล็ก ถ้าหากวงแหวนที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวมีจำนวนมากกว่า 1 วงก็จะพิจารณาวงแหวนเหล่านั้นว่าวงแหวนวงใดสามารถรองรับเส้นทางที่สั้นที่สุดและเป็นวงแหวนวงที่มีขนาดเล็กที่สุดของคู่โหนดทุกคู่โหนดในโครงข่ายได้เป็นจำนวนที่มากที่สุดก็จะเลือกวงแหวนวงนั้นเพื่อให้โครงข่ายที่ได้รับการออกแบบใช้จำนวนวงแหวนน้อยที่สุด เนื่องจากการใช้วงแหวนจำนวนมากจะทำให้โครงข่ายมีต้นทุนสูง

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อเลือกวงแหวนให้กับคู่โหนดได้แล้ว จะจัดสรรปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดนั้นลงบนวงแหวนที่เลือกดังกล่าว โดยในขั้นตอนนี้ปริมาณทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆจะต้องรองรับโดยวงแหวนเพียงวงเดียวเท่านั้น

ขั้นตอนที่ 4 อาจจะมีการเพิ่มวงแหวนขึ้นอีก 1 วงสำหรับคู่โหนดนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มทางเลือกให้กับกระบวนการในอัลกอริทึมส่วนที่ 2 (ขั้นตอนที่ 7-10) เนื่องจากการออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดนั้นไม่จำเป็นที่ทุกๆคู่โหนดจะต้องเลือกวงแหวนที่มีเส้นทางที่สั้นที่สุดหรือเป็นวงแหวนขนาดเล็กที่สุด และจากการทดลองพบว่าการเพิ่มจำนวนวงแหวนที่มากเกินไปก็จะทำให้ไม่สามารถหาผลตอบที่ดีได้ในระยะเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นการจะเพิ่มวงแหวนให้กับคู่โหนดใดจะใช้การตัดสินใจแบบสุ่มโดยโอกาสที่จะเพิ่มหรือไม่เพิ่มวงแหวนจะมีความน่าจะเป็นเท่ากันคือ 0.5

ขั้นตอนที่ 5 กระบวนการในขั้นตอนที่ 2-4 กระทำกับคู่โหนดทีละคู่โหนดจนครบทุกคู่โหนดในโครงข่าย

ขั้นตอนที่ 6 จัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายรูปวงแหวนเหล่านั้นทีละวง โดยใช้อัลกอริทึมที่ได้นำเสนอใน [15] ต้นทุนของโครงข่ายที่ได้จะเป็นค่าเริ่มต้นสำหรับอัลกอริทึมในส่วนที่ 2 (ขั้นตอนที่ 7-10)

ขั้นตอนที่ 7 หลังจากผ่านกระบวนการออกแบบในส่วนแรก (ขั้นตอนที่ 1-6) วงแหวนจำนวนหนึ่งจะถูกเลือกขึ้นมาและต้นทุนของโครงข่ายที่ได้จากการใช้วงแหวนเหล่านั้นจะมีค่าที่

ค่อนข้างสูง เนื่องจากวงแหวนเหล่านั้นมีจำนวนที่มากเกินไปยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่แต่ละคู่โนดเลือกวงแหวนไม่ซ้ำวงกันเลย จะทำให้วงแหวนถูกเลือกอย่างน้อยเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคู่โนดทั้งหมดในโครงข่าย ดังนั้นต้องมีการปรับผลของการออกแบบในส่วนที่ 1 ให้มีต้นทุนที่ต่ำลงโดยพยายามจัดสรรปริมาณกราฟฟิกของแต่ละคู่โนดเสียใหม่ เพื่อให้วงแหวนที่ใช้มีจำนวนน้อยลง โดยใช้ต้นทุนที่ได้จากการออกแบบในส่วนที่ 1 เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับอัลกอริทึมในส่วนที่ 2 นี้

ขั้นตอนที่ 8 การจัดสรรปริมาณกราฟฟิกของแต่ละคู่โนดให้กับวงแหวนในขั้นตอนที่ 3 จะพิจารณาใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยพยายามย้ายปริมาณกราฟฟิกไปยังวงแหวนวงอื่นที่จะทำให้ต้นทุนของโครงข่ายต่ำลง โดยวงแหวนที่เลือกให้มารองรับปริมาณกราฟฟิกดังกล่าวจะเป็นวงแหวนที่เลือกโดยกระบวนการออกแบบในส่วนที่ 1 ส่วนการตัดสินใจว่าจะย้ายปริมาณกราฟฟิกไปยังวงแหวนวงใดจะใช้การตัดสินใจแบบสุ่มโดยที่วงแหวนแต่ละวงจะมีโอกาสในการถูกเลือกเท่ากัน นอกจากนี้การย้ายปริมาณกราฟฟิกของคู่โนดใดๆ ปริมาณกราฟฟิกดังกล่าวสามารถแบ่งให้รองรับโดยวงแหวนมากกว่า 1 วงได้ ดังนั้นจะมีการย้ายปริมาณกราฟฟิกเป็นส่วนๆ โดยมีหลักในการแบ่งปริมาณกราฟฟิกระหว่างคู่โนดใดๆดังนี้

เนื่องจากสำหรับวงแหวนวงหนึ่ง เส้นทางระหว่างคู่โนดใดๆจะมีเพียง 2 เส้นทางเท่านั้น ดังนั้นจะตั้งสมมติฐานว่า ปริมาณกราฟฟิกระหว่างคู่โนดคู่หนึ่งที่น่าจะใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่าควรจะมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น ($2 \times M$) หรือมีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่า $2 \times M$ ดังนั้นจะพยายามแบ่งปริมาณกราฟฟิกเป็นส่วนละ $2 \times M$ สำหรับกรณีที่แบ่งแล้วมีเศษเหลือซึ่งจะมีค่าน้อยกว่า $2 \times M$ จะมีวิธีที่จะจัดการกับเศษเหลือนี้อย่างกล่าว 2 วิธีดังนี้

1. ย้ายเศษเหลือนี้ออกมาทั้งหมดพร้อมกัน เพื่อให้ปริมาณกราฟฟิกที่เหลืออยู่มีค่าเป็น $2 \times M$ หรือจำนวนเท่าของ $2 \times M$ หรืออาจจะทำให้ไม่มีปริมาณกราฟฟิกเหลืออยู่เลย
2. แบ่งเศษเหลือนี้ออกมาเป็นส่วนย่อย เนื่องจากในบางกรณีเช่น กรณีที่วงแหวนวงหนึ่งรองรับปริมาณกราฟฟิกของหลายๆคู่โนด เมื่อรวมเศษเหลือจากหลายๆคู่โนดเข้าด้วยกันก็อาจจะทำให้มีค่าเท่ากับ $2 \times M$ หรือจำนวนเท่าของ $2 \times M$ ได้ สำหรับการแบ่งเศษเหลือนี้ออกเป็นส่วนย่อยจะแบ่งให้มีส่วนที่มีค่าเป็นจำนวนคี่มีจำนวนน้อยที่สุด เนื่องจากสำหรับวงแหวนวงหนึ่ง ระหว่างคู่โนดใดๆจะมีเส้นทางให้เลือกใช้ 2 เส้นทาง

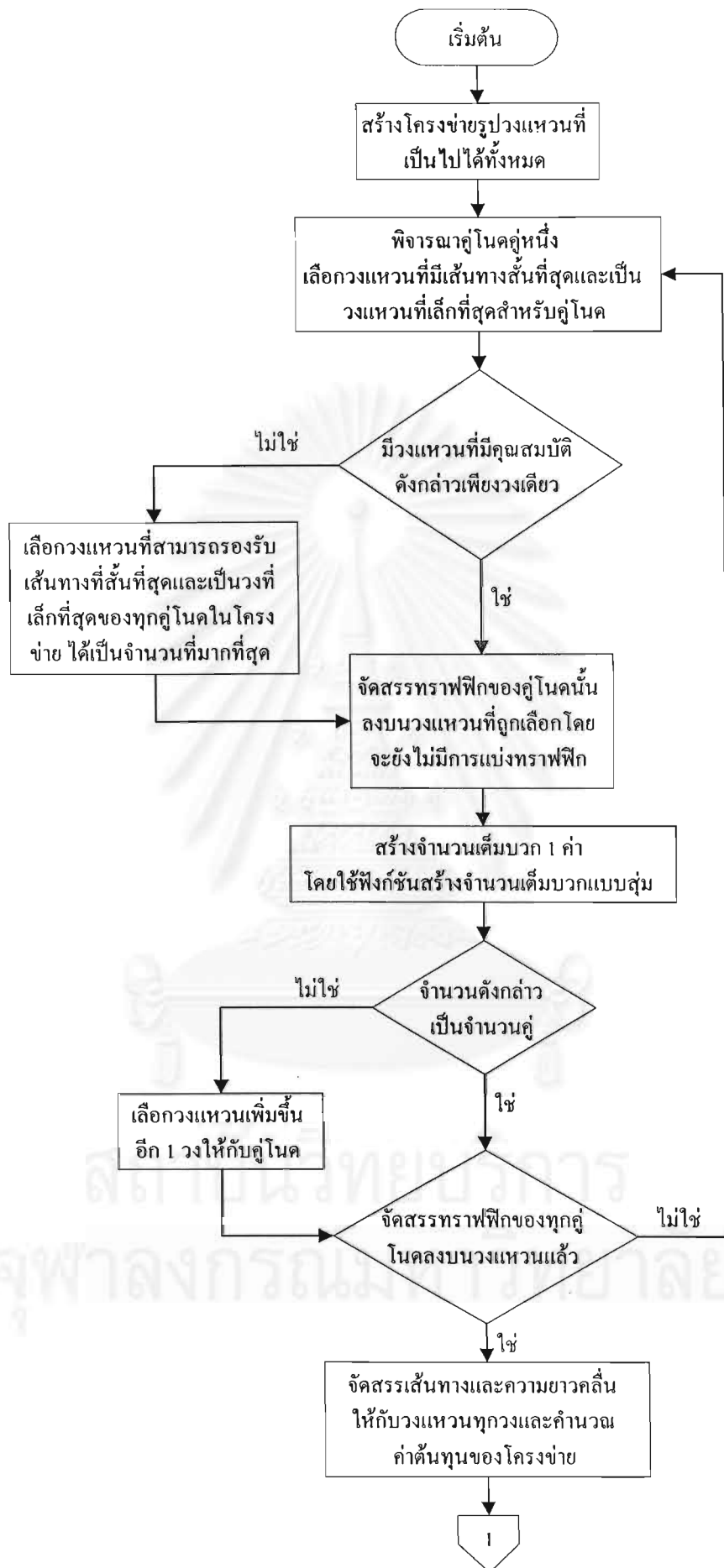
ดังนั้นกราฟฟิคที่จะย้ายควรมีปริมาณเป็นจำนวนคู่ เพื่อจัดสรรให้กับ
เส้นทางทั้ง 2 เส้นทางดังกล่าว

สำหรับการเลือกว่าจะใช้การจัดการกับเศษเหลือด้วยวิธีใด จะใช้การตัดสินใจ
แบบสุ่มโดยที่ทั้ง 2 วิธีจะมีโอกาสในการถูกเลือกเท่ากัน

ขั้นตอนที่ 9 หลังจากย้ายส่วนของกราฟฟิค 1 ส่วนในขั้นตอนที่ 8 แล้ว จะจัดสรรเส้นทางและ
ความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายรูปวงแหวนเหล่านั้นทุกวงโดยใช้อัลกอริทึมที่ได้นำ
เสนอใน [15] จากนั้นจะนำต้นทุนของโครงข่ายที่ได้ไปเปรียบเทียบกับต้นทุนก่อนที่จะ
ย้ายส่วนของกราฟฟิคดังกล่าว ถ้าหากต้นทุนของโครงข่ายที่ได้มีค่าต่ำลงหรือเท่าเดิมก็
จะยอมรับต้นทุนของโครงข่ายค่าใหม่นี้และยอมรับการย้ายส่วนของกราฟฟิคดังกล่าว
จากนั้นจะกลับไปย้ายส่วนของกราฟฟิคส่วนอื่นๆในขั้นตอนที่ 8 แต่ถ้าหากต้นทุนที่ได้
มีค่าสูงขึ้น จะไม่ยอมรับการย้ายส่วนของกราฟฟิคดังกล่าว และจะกลับไปย้ายส่วน
ของกราฟฟิคส่วนอื่นๆในขั้นตอนที่ 8

ขั้นตอนที่ 10 กระบวนการในขั้นตอนที่ 8 และ 9 จะกระทำกับทุกส่วนของกราฟฟิคระหว่างคู่โนด
จากนั้นจะไปพิจารณาคู่โนดอื่นในวงแหวนวงนั้นจนครบทุกคู่โนด แล้วจึงพิจารณา
วงแหวนวงอื่นที่มีการรองรับปริมาณกราฟฟิคจนครบทุกวง กระบวนการดังกล่าวนี้
จะกระทำซ้ำจนอัลกอริทึมไม่สามารถให้ต้นทุนที่ต่ำลงได้อีก ก็จะหยุดการทำงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 5.1 แผนผังการทำงานของอัลกอริทึมสำหรับการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี heuristic

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในส่วนแรกนี้เป็นการแสดงให้เห็นถึงภาพรวมของการใช้งานอัลกอริทึม ซึ่งแสดงลักษณะของข้อมูลที่ได้จากอัลกอริทึม โดยจะทดสอบอัลกอริทึมกับโครงข่าย EURO-Core [18] ซึ่งเป็นโครงข่ายขนาด 11 โหนดและมีขั้วเชื่อมต่อโยงทั้งสิ้น 25 ขั้วเชื่อมต่อโยงดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยกำหนดให้โครงข่ายมีความต้องการปริมาณกราฟฟิคที่มีรูปแบบยูนิฟอร์มโดยจำนวนการเชื่อมต่อที่ต้องการโดยแต่ละโหนดมีค่าเท่ากับ 1 ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากับ 2

ผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 5.2 แสดงรายละเอียดของวงแหวนแต่ละวงที่เลือก โดยแสดงจำนวนโหนดของวงแหวน ปริมาณกราฟฟิคที่วงแหวนรองรับ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในวงแหวน ต้นทุนของวงแหวนแต่ละวงและต้นทุนรวมของโครงข่ายรวมถึงค่า utilization ของโครงข่าย

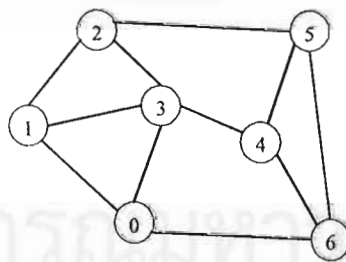
ตารางที่ 5.2 รายละเอียดของวงแหวนแต่ละวงที่เลือก

Ring	Number of nodes	Description	Traffic	Number of fibers (f)	Cost (MXf)
1	4	2-4-5-8	2	4	8
2	4	2-4-10-9	3	4	8
3	4	5-8-9-10	3	4	8
4	4	5-6-7-8	4	4	8
5	4	4-6-5-10	4	4	8
6	4	3-7-8-9	4	4	8
7	5	0-1-5-10-2	3	5	10
8	5	0-1-7-8-2	5	5	10
9	5	0-3-1-5-4	5	5	10
10	5	0-2-10-9-3	5	5	10
11	5	0-1-7-6-4	6	5	10
12	6	1-3-9-2-4-6	6	6	12
13	6	1-5-10-2-8-7	5	6	12
Total network cost					122
Network utilization (%)					74.59

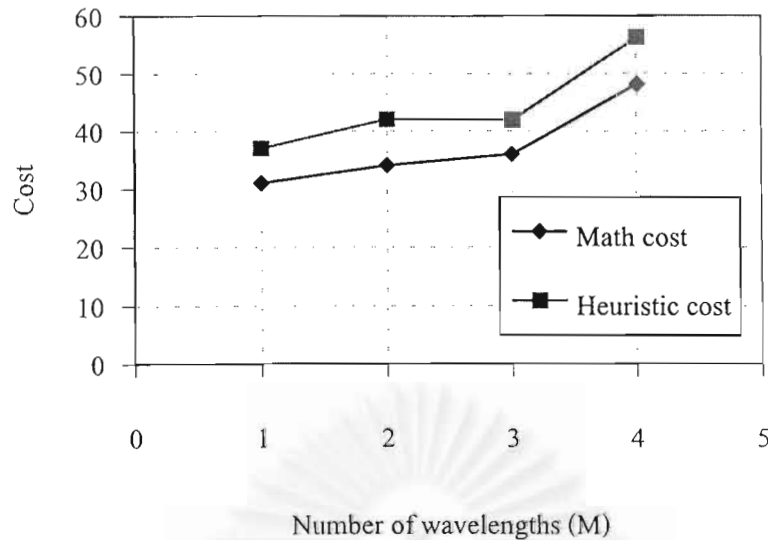
5.3.1 ประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

ในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี heuristic กับต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในบทที่ 4 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้เฉพาะโครงข่ายขนาดเล็กเท่านั้น สำหรับโครงข่ายขนาดใหญ่จะเปรียบเทียบกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช

รูปที่ 5.4 เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี heuristic กับต้นทุนที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ โดยจะทดสอบแบบจำลองกับโครงข่ายตัวอย่างขนาด 7 โหนด 11 ข่ายเชื่อมโยงดังแสดงในรูปที่ 5.3 กำหนดให้โครงข่ายมีความต้องการปริมาณทราฟฟิกที่มีรูปแบบยูนิฟอร์มที่ค่า traffic volume = 1 และจะทดสอบที่ค่า $M=1, 2, 3$ และ 4 จากรูปที่ 5.4 จะเห็นว่าการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี heuristic ไม่สามารถออกแบบโครงข่ายขนาดเล็กซึ่งมีความซับซ้อนไม่มากให้มีต้นทุนเท่ากับต้นทุนที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ โดยมีค่าสูงกว่าประมาณ 15-20% ทั้งนี้เนื่องจากอัลกอริทึมที่ใช้วิธี heuristic มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีความซับซ้อนมากเกินไปจะหาผลตอบจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ภายในเวลาที่เหมาะสมได้ อัลกอริทึมที่ใช้วิธี heuristic จะต้องทำให้ปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อยลงโดยการจำกัดจำนวนวงแหวนที่สามารถเลือกใช้ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดวงแหวนบางวงทิ้งไป ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องกระทำสำหรับการออกแบบโครงข่ายขนาดใหญ่ แต่วิธีการดังกล่าวจะทำให้การออกแบบโครงข่ายขนาดเล็กซึ่งมีความซับซ้อนไม่มากมีต้นทุนที่สูงกว่าต้นทุนที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ดังในรูปที่ 5.4 เนื่องจากวงแหวนที่จะช่วยให้มีต้นทุนต่ำเท่ากับต้นทุนที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ถูกกำจัดทิ้งไป



รูปที่ 5.3 โครงข่ายตัวอย่างขนาด 7 โหนด 11 ข่ายเชื่อมโยง



รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี heuristic (Heuristic cost) กับต้นทุนที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Math cost) ที่ $M=1, 2, 3$ และ 4

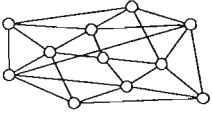
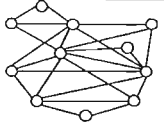

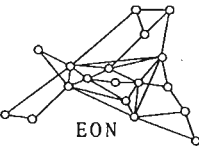
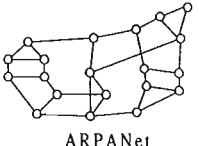
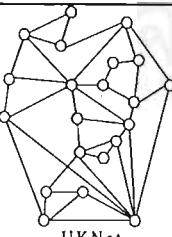
ในส่วนนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมกับโครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีการใช้งานจริง ได้แก่ EURO-Core, New Jersey, NSFNet, EON, ARPANet และ UKNet โดยจะเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช ในการทดสอบนี้กำหนดให้ $M=1$ สำหรับการหาต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช ในกรณีที่ค่า $M=1$ สามารถหาได้ด้วยวิธีง่ายๆ โดยการหาผลรวมของจำนวน hop ของเส้นทางที่สั้นที่สุดของทุกๆ โหนดในโครงข่าย จากนั้นนำค่าผลรวมที่ได้คูณกับค่า traffic volume ค่าที่ได้จะเป็นต้นทุนของโครงข่ายซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นต้นทุนที่ต่ำที่สุด ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดสอบโครงข่ายโดยกำหนดให้ค่า traffic volume = 1, 2, 3, 4 และ 8 ซึ่งแสดงต้นทุนของโครงข่ายที่ได้จากอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอนี้ (MR cost) เปรียบเทียบกับต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบเมช (Mesh cost) ซึ่งเป็นต้นทุนที่ต่ำที่สุด

ในกรณีที่ค่า traffic volume = 1 (ตารางที่ 5.3 ก.) จะเห็นว่าค่าร้อยละของผลต่างของต้นทุนจากโครงข่ายทั้งสองเทียบกับต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบเมช มีค่าที่ไม่สูงมากนักนั่นคือ 12.64% 13.54% 12.31% 16.96% 15.76% และ 15.78% สำหรับโครงข่าย EURO-Core, New Jersey, NSFNet, EON, ARPANet และ UKNet ตามลำดับ ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับที่น่าพอใจเนื่องจากมีค่าที่ใกล้เคียงกับต้นทุนที่ต่ำที่สุด สำหรับเหตุผลสำคัญที่ไม่สามารถทำให้ต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงมีค่าเท่ากับต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบเมช คือลักษณะทางโครงสร้างของโครงข่ายรูปวงแหวน นั่นคือ

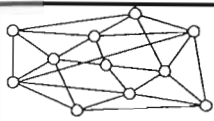
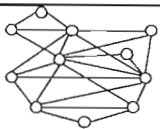

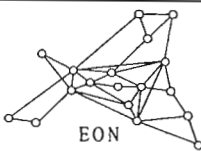
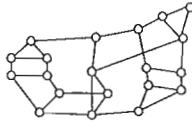
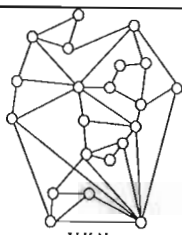
ไม่สามารถเลือกใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกสำหรับทุกคู่โหนดได้ เนื่องจากจะทำให้เส้นทางอีกด้านหนึ่งของวงแหวนซึ่งมักจะเป็นเส้นทางที่ยาวกว่าไม่ได้ใช้งานเป็นผลให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างไม่มีประสิทธิภาพและนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของต้นทุนของโครงข่าย

ตารางที่ 5.3 ต้นทุนของโครงข่ายต่างๆ ในกรณีที่มีค่า $M=1$ เปรียบเทียบกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช

ก. กรณีที่มีค่า traffic volume = 1 และ 2

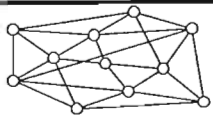
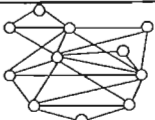

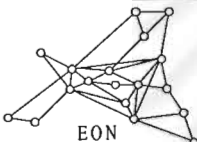

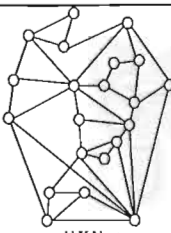
Network	Number of nodes	Number of links	Traffic volume = 1			Traffic volume = 2		
			MR cost	Mesh cost	$\frac{MR - Mesh}{Mesh} \times 100$	MR cost	Mesh cost	$\frac{MR - Mesh}{Mesh} \times 100$
 EURO-Core	11	25	98	87	12.64 %	181	174	4.02 %
 New Jersey	11	23	109	96	13.54 %	205	192	6.77 %
 NSFNet	14	21	219	195	12.31 %	411	390	5.38 %
 EON	18	35	393	336	16.96 %	763	672	13.54 %
 ARPANet	20	31	617	533	15.76 %	1187	1066	11.35 %
 UKNet	21	39	609	526	15.78 %	1152	1052	9.50 %

ข. กรณีที่ค่า traffic volume = 3 และ 4

Network	Number of nodes	Number of links	Traffic volume = 3			Traffic volume = 4		
			MR cost	Mesh cost	$\frac{MR - Mesh}{Mesh} \times 100$	MR cost	Mesh cost	$\frac{MR - Mesh}{Mesh} \times 100$
 EURO-Core	11	25	279	261	6.89 %	365	348	4.88 %
 New Jersey	11	23	316	288	9.72 %	410	384	6.77 %
 NSFNet	14	21	629	585	7.52 %	824	780	5.64 %
 EON	18	35	1170	1008	16.07 %	1533	1344	14.06 %
 ARPANet	20	31	1831	1599	14.51 %	2400	2132	12.57 %
 UKNet	21	39	1791	1578	13.49 %	2322	2104	10.36 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค. กรณีที่ค่า traffic volume = 8

Network	Number of nodes	Number of links	Traffic volume = 8		
			MR cost	Mesh cost	$\frac{\text{MR} - \text{Mesh}}{\text{Mesh}} \times 100$
 EURO-Core	11	25	733	696	5.31 %
 New Jersey	11	23	823	768	7.16 %
 NSFNet	14	21	1649	1560	5.70 %
 EON	18	35	3070	2688	14.21 %
 ARPANet	20	31	4830	4264	13.27 %
 UKNet	21	39	4667	4208	10.91 %

กรณีที่ค่า traffic volume = 2 (ตารางที่ 5.3 ค.) จะเห็นว่าต้นทุนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบเมชมากยิ่งขึ้นนั่นคือ 4.02% 6.77% 5.38% 13.54% 11.35% และ 9.50% สำหรับโครงข่าย EURO-Core, New Jersey, NSFNet, EON, ARPANet และ UKNet ตามลำดับ เนื่องจากในกรณีที่ค่า traffic volume = 2 จะมีการใช้เส้นทางอีกเส้นทางหนึ่งนอกเหนือจากเส้นทางที่สั้นที่สุด ในวงแหวนด้วยเป็นผลให้เกิดการใช้ทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าในกรณีที่ค่า traffic volume = 1

จากการพิจารณาดัชนีของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงในกรณีที่มีค่า traffic volume = 1, 2 และ 3 พบว่าในกรณีที่มีค่า traffic volume = 3 ดัชนีของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงควรมีค่าไม่มากกว่าผลรวมของดัชนีในกรณีที่มีค่า traffic volume = 1 และ 2 เนื่องจากโครงข่ายที่มีดัชนีเท่ากับค่าผลรวมดังกล่าวสามารถออกแบบได้โดยการนำผลการออกแบบจากกรณีที่มีค่า traffic volume = 1 และ 2 มารวมกัน สำหรับกรณีที่มีค่า traffic volume = 4 ดัชนีของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงควรมีค่าไม่มากกว่า 2 เท่าของดัชนีในกรณีที่มีค่า traffic volume = 2 ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับในกรณีที่มีค่า traffic volume = 3 และที่มีค่า traffic volume ค่าอื่นๆก็จะใช้หลักการพิจารณาดังกล่าวเช่นกัน

หากแต่เมื่อพิจารณาดัชนีของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงในกรณีที่มีค่า traffic volume = 3, 4 และ 8 ที่แสดงในตารางที่ 5.3 ข. และ 5.3 ค. จะเห็นว่าโดยส่วนใหญ่ดัชนีของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับหลักการพิจารณาที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นนั้นคือ ในกรณีที่มีค่า traffic volume = 3 ดัชนีที่ได้ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าผลรวมของดัชนีในกรณีที่มีค่า traffic volume = 1 และ 2 อยู่เล็กน้อย ในกรณีที่มีค่า traffic volume = 4 ดัชนีที่ได้ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 2 เท่าของดัชนีในกรณีที่มีค่า traffic volume = 2 อยู่เล็กน้อย และในกรณีที่มีค่า traffic volume = 8 ดัชนีที่ได้มีค่ามากกว่า 4 เท่าของดัชนีในกรณีที่มีค่า traffic volume = 2 อยู่เล็กน้อย จากตัวอย่างผลการทดสอบดังกล่าวเป็นการแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดและคุณสมบัติของอัลกอริทึมที่ใช้การออกแบบโดยวิธี heuristic ที่ได้นำเสนอ ซึ่งไม่สามารถให้ผลตอบที่ดีได้เสมอไปเมื่อ traffic volume มีค่ามากขึ้น เนื่องจากเมื่อ traffic volume มีค่ามากขึ้น ทำให้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากปริมาณกราฟที่อัลกอริทึมต้องจัดการมีมากขึ้นจนทำให้ผลตอบที่ได้อาจจะไม่ใช่ผลตอบที่ดีนัก

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของผลต่างของดัชนีของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงและโครงข่ายแบบเมชเทียบกับดัชนีที่ได้จากโครงข่ายแบบเมชพบว่า ในกรณีที่มีค่า traffic volume = 3 ค่าร้อยละดังกล่าวมีค่าอยู่ระหว่างค่าร้อยละของกรณีที่มีค่า traffic volume = 1 และ 2 สำหรับกรณีที่มีค่า traffic volume = 4 และ 8 ค่าร้อยละมีค่าใกล้เคียงกับค่าร้อยละของกรณีที่มีค่า traffic volume = 2 เนื่องจากดัชนีของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงในกรณีที่มีค่า traffic volume = 4 และ 8 มีค่าใกล้เคียงกับ 2 เท่าและ 4 เท่าของดัชนีในกรณีที่มีค่า traffic volume = 2 ตามลำดับ สำหรับดัชนีของโครงข่ายแบบเมชมีค่าเท่ากับผลคูณของดัชนีในกรณีที่มีค่า traffic volume = 1 กับค่า traffic volume และพบว่าค่าร้อยละของผลต่างในกรณีที่มีค่า traffic volume = 8 มีค่ามากกว่าค่าร้อยละของผลต่างในกรณีที่มีค่า traffic volume = 4 อยู่เล็กน้อยและค่าร้อยละของผลต่างในกรณีที่มีค่า traffic volume = 4 มีค่ามากกว่าค่าร้อยละของผลต่างในกรณีที่มีค่า traffic volume = 2 อยู่เล็กน้อยเช่นกัน (ในความเป็นจริงควรมีค่าเท่ากันได้) เนื่องจากเป็นข้อจำกัดและคุณสมบัติของอัลกอริทึมเมื่อปริมาณกราฟที่ต้องจัดการเพิ่มมากขึ้น

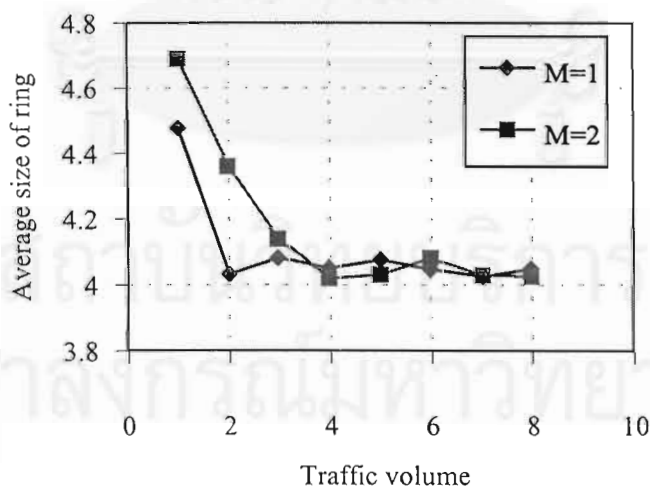
5.3.2 ผลของปริมาณกราฟฟิกและจำนวนความยาวคลื่นที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือก

เมื่อได้ทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมกับโครงข่ายต่างๆที่มีการใช้งานจริงแล้ว ในส่วนนี้จะวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยจะเริ่มด้วยการวิเคราะห์ผลของปริมาณกราฟฟิกและค่า M ที่มีต่อค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือก และมีการวิเคราะห์ค่า utilization เพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะการจัดสรรทรัพยากรในโครงข่ายซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือก ในการวิเคราะห์นี้จะใช้ผลที่ได้จากโครงข่าย EURO-Core ซึ่งจะทดสอบที่ค่า traffic volume ตั้งแต่ 1 ถึง 8 และค่า M เท่ากับ 1 และ 2 ในรูปที่ 5.5 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกกับปริมาณกราฟฟิก ที่ค่า M เท่ากับ 1 และ 2 สำหรับรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า utilization กับปริมาณกราฟฟิก ที่ค่า M เท่ากับ 1 และ 2

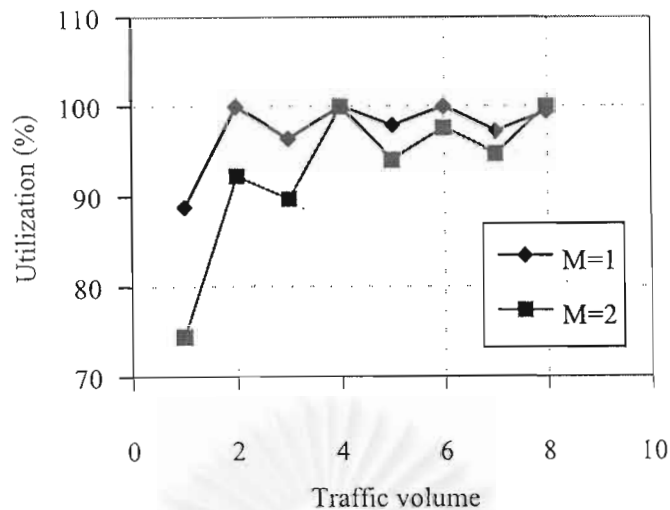
ในกรณีที่ค่า $M=1$ เมื่อพิจารณาที่ค่า traffic volume = 1 ขนาดวงแหวนเฉลี่ยจะมีขนาดใหญ่ เนื่องจากเมื่อพิจารณาวงแหวนวงหนึ่ง ปริมาณกราฟฟิก 1 การเชื่อมต่อจะไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าในวงแหวนวงนั้นได้ เนื่องจากเส้นทางที่เหลืออีกเส้นทางหนึ่งในวงแหวน (ซึ่งมักจะเป็นเส้นทางที่ยาวกว่า) จะไม่ได้ใช้งาน ดังนั้นอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอนี้พยายามจัดสรรปริมาณกราฟฟิกของคู่โหนดอื่นให้กับเส้นทางที่ยังไม่ได้ใช้งานนั้นหรืออาจจะพยายามไม่เลือกใช้งานวงแหวนวงนั้น โดยย้ายปริมาณกราฟฟิกไปยังวงแหวนวงอื่น นั่นคืออัลกอริทึมจะย้ายปริมาณกราฟฟิกจากวงแหวนที่มีขนาดเล็กไปยังเส้นทางที่ยังไม่ได้ใช้งานในวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ ทำให้วงแหวนที่มีขนาดเล็กถูกเลือกใช้น้อยลง ด้วยเหตุนี้ค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกในกรณีนี้จึงมีขนาดใหญ่ ส่วนเหตุผลที่อัลกอริทึมไม่ย้ายปริมาณกราฟฟิกจากวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ไปยังวงแหวนที่มีขนาดเล็กคือ วงแหวนขนาดใหญ่ที่เลือกมานั้นเป็นวงแหวนที่มีขนาดเล็กที่สุดสำหรับคู่โหนดคู่หนึ่ง ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะย้ายปริมาณกราฟฟิกไปยังวงแหวนที่มีขนาดเล็กกว่าได้อีก จากนั้นเมื่อค่า traffic volume = 2 สามารถทำให้มีการใช้เส้นทางอีกเส้นทางหนึ่งในวงแหวนซึ่งจะทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าในวงแหวนวงนั้นได้ ดังนั้นอัลกอริทึมจะเลือกใช้งานวงแหวนที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมากเนื่องจากวงแหวนที่มีขนาดเล็กมีต้นทุนต่ำกว่าวงแหวนขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้ค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกในกรณีนี้มีขนาดเล็กกว่าในกรณีที่ค่า traffic volume = 1 นอกจากนี้ในกรณีที่ค่า traffic volume = 2 ค่า utilization มีค่าสูงถึง 100% ซึ่งเป็นลักษณะของปริมาณกราฟฟิกที่สามารถใช้ทรัพยากรในวงแหวนได้อย่างคุ้มค่า ส่วนในกรณีที่ค่า traffic volume = 1 แม้ว่าอัลกอริทึมจะพยายามทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรในวงแหวนทุกวงอย่างคุ้มค่าแต่ก็อาจจะไม่สามารถที่จะทำได้กับวงแหวนทุกวง ดังนั้นค่า utilization ในกรณีนี้จึงมีค่าที่ไม่สูงเท่ากับในกรณีที่ค่า traffic volume = 2 นั่นคือจะมีค่าเพียง 89% ดังแสดงในรูปที่ 5.6 จากนั้นเมื่อ traffic volume มีค่ามากกว่า 2 ค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกมีค่าแตกต่างจากในกรณีที่ค่า traffic volume = 2

เพียงเล็กน้อย ยกตัวอย่างในกรณีที่ค่า traffic volume = 3 ซึ่งเป็นที่ทราบแล้วว่าในกรณีที่ค่า traffic volume = 2 จะทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าในวงแหวน สำหรับในกรณีที่ค่า traffic volume = 3 ปริมาณกราฟฟิกส่วนที่เกินอยู่ 1 นั้นจะมีลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีที่ค่า traffic volume = 1 นั่นคืออัลกอริทึมจะพยายามจัดสรรปริมาณกราฟฟิกของคูโนคนอื่นให้กับเส้นทางที่ยังไม่ได้ใช้งานหรืออาจจะพยายามย้ายปริมาณกราฟฟิกนั้นไปยังวงแหวนวงอื่นเพื่อทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าในวงแหวน ดังนั้นจึงมีโอกาสที่อัลกอริทึมจะย้ายปริมาณกราฟฟิกจากวงแหวนที่มีขนาดเล็กบางวงไปยังเส้นทางที่ยังไม่ได้ใช้งานในวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้ค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกในกรณีที่ค่า traffic volume = 3 มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าในกรณีที่ค่า traffic volume = 2 เล็กน้อย สำหรับค่า utilization ในกรณีที่ค่า traffic volume = 4, 6, 8 จะเห็นว่ามีค่าประมาณ 100% เช่นเดียวกับกรณีที่ค่า traffic volume = 2 สำหรับในกรณีที่ค่า traffic volume = 3, 5, 7 ค่า utilization มีค่าต่ำลงเล็กน้อยคือมีค่าประมาณ 97% เนื่องจากมีวงแหวนบางวงที่อัลกอริทึมไม่สามารถทำให้ใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าได้

สำหรับกรณีที่ค่า $M=2$ ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดวงแหวนเฉลี่ยกับปริมาณกราฟฟิกมีลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีที่ค่า $M=1$ แต่วงแหวนจะเริ่มมีขนาดเฉลี่ยที่ค่อนข้างคงที่เมื่อค่า traffic volume = 4 เนื่องจากปริมาณกราฟฟิก 4 การเชื่อมต่อจะเป็นปริมาณกราฟฟิกที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่าในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีค่า $M=2$ ในส่วนของค่า utilization ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกันนั่นคือจะเริ่มมีค่าประมาณ 100% ที่ค่า traffic volume = 4



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกกับปริมาณกราฟฟิกที่ค่า M เท่ากับ 1 และ 2



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า utilization กับปริมาณทราฟฟิก ที่ค่า M เท่ากับ 1 และ 2

5.3.3 ผลของจำนวนความยาวคลื่นที่มีดีเฟกชันในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีต่อต้นทุนของโครงข่าย และการจัดสรรทรัพยากรในโครงข่าย

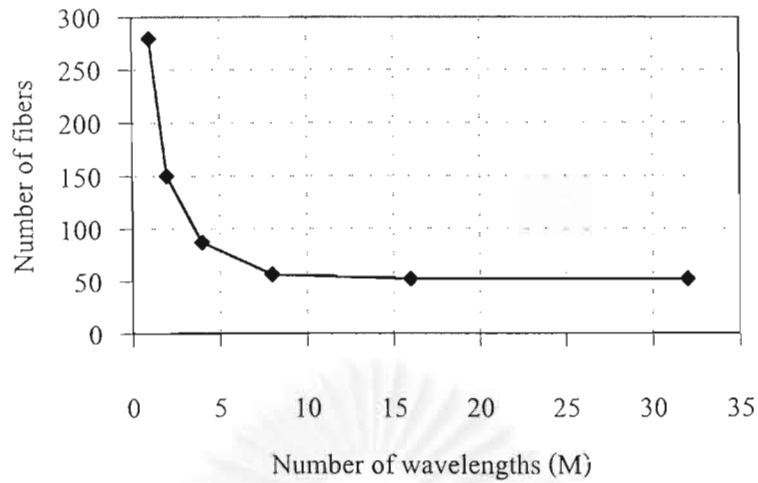
ในส่วนนี้จะวิเคราะห์ผลของ M ที่มีต่อต้นทุนของโครงข่ายและการจัดสรรทรัพยากรในโครงข่าย ในการวิเคราะห์นี้จะใช้ผลที่ได้จากโครงข่าย EURO-Core ซึ่งจะทดสอบด้วยทราฟฟิกที่มีรูปแบบยูนิฟอร์มที่ค่า traffic volume = 3 เนื่องจากในการทดสอบที่ traffic volume ค่าต่างๆ พบว่าที่ค่า traffic volume = 3 สามารถวิเคราะห์ผลได้ชัดเจนและเหมาะสมที่สุดในด้านของค่า M ที่ใช้ในการทดสอบ นั่นคือสามารถทดสอบกับ M ที่มีค่าไม่น้อยจนเกินไป ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.7, 5.8, 5.9 และ 5.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ ค่า utilization ต้นทุนของโครงข่ายที่ได้จากการออกแบบโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงซึ่งจะเปรียบเทียบกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช และค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกตามลำดับ โดยจะทดสอบที่ค่า $M = 1, 2, 4, 8, 16$ และ 32

รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้กับค่า M จะเห็นว่าเมื่อ M มีค่ามากขึ้นจะทำให้โครงข่ายใช้เส้นใยแก้วนำแสงน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า M เป็นการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณให้กับโครงข่ายโดยไม่ต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง นั่นคือเมื่อโครงข่ายมีความต้องการปริมาณทราฟฟิกคงที่ การเพิ่มขึ้นของค่า M ทำให้โครงข่ายใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนที่น้อยลง นอกจากนี้จะเห็นว่าในกรณีที่ $M=32$ โครงข่ายใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นจำนวนที่เท่ากับกรณีที่ $M=16$ นั่นคือในกรณีที่ $M=16$ จะทำให้โครงข่ายมีจำนวนช่องสัญญาณพอดี

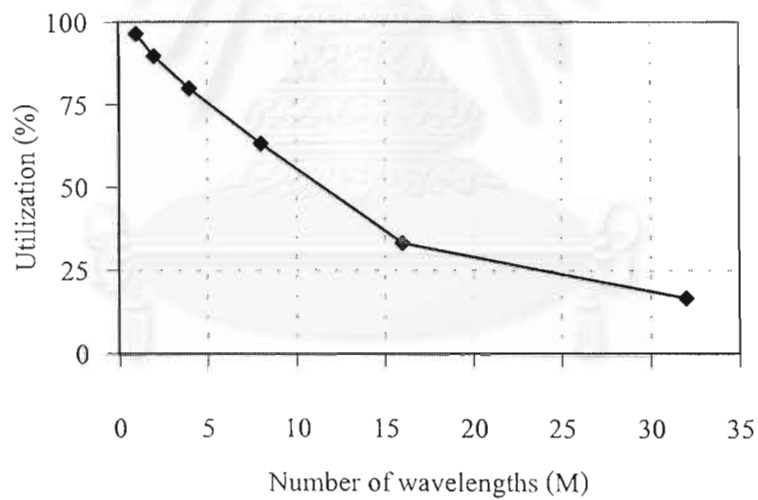
หรืออาจจะมากจนเกินความต้องการของโครงข่ายซึ่งจะเห็นได้จากค่า utilization ที่ต่ำลงมากในรูปที่ 5.8 ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มค่า M เป็น 32 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้จึงมีค่าเท่าเดิมและทำให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า

นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่า M จะมีผลต่อต้นทุนของโครงข่ายดังแสดงในรูปที่ 5.9 ซึ่งจะเห็นว่าต้นทุนของโครงข่ายมีค่าสูงขึ้นเมื่อ M มีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ M จะเป็นการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณให้กับเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งจะทำให้ต้นทุนต่อเส้นของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ในการเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงขึ้น 1 เส้นจะทำให้จำนวนช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกับ M นั่นคือเมื่อ M มีค่ามากขึ้นเท่าใด โอกาสที่จำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงถูกใช้งานไม่หมดมีมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าสูงขึ้นและจะทำให้ค่า utilization ต่ำลงด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.8 สำหรับสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความแตกต่างระหว่างต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมชมีค่ามากขึ้นเมื่อ M มีค่ามากขึ้น เนื่องมาจากลักษณะทางโครงสร้างของโครงข่ายรูปวงแหวนนั่นคือ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะต้องเท่ากัน ดังนั้นการเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงในโครงข่ายรูปวงแหวนต้องเพิ่มให้กับทุกข่ายเชื่อมโยงในวงแหวน ขณะที่การเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงให้กับโครงข่ายแบบเมชสามารถเพิ่มเฉพาะข่ายเชื่อมโยงที่ต้องการเท่านั้น ด้วยเหตุนี้เมื่อ M มีค่ามากขึ้น ทำให้ความแตกต่างระหว่างต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับ ต้นทุนของโครงข่ายแบบเมชมีค่ามากขึ้นดังในรูปที่ 5.9

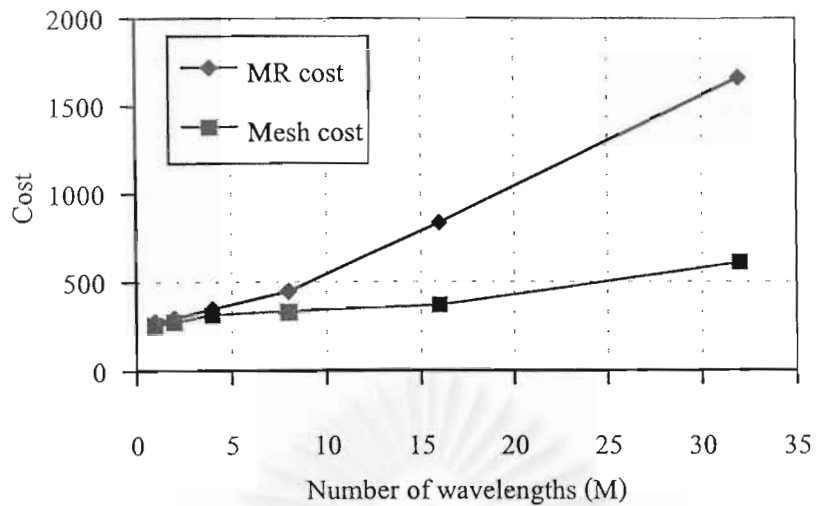
รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกกับค่า M จะเห็นว่าเมื่อ M มีค่ามากขึ้นจะทำให้ขนาดวงแหวนเฉลี่ยใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ M ทำให้มีจำนวนช่องสัญญาณในวงแหวนที่ไม่ได้ใช้งานมากขึ้นเป็นผลให้วงแหวนแต่ละวงมีโอกาสที่จะเกิดการใช้ทรัพยากรอย่างไม่คุ้มค่ามากขึ้น ดังนั้นอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอนี้พยายามจัดสรรปริมาณทราฟฟิกของคุโนดอื่นให้กับช่องสัญญาณที่ยังไม่ได้ใช้งานนั้นหรืออาจจะพยายามไม่เลือกใช้งานวงแหวนนั้นโดยย้ายปริมาณทราฟฟิกไปยังวงแหวนวงอื่น นั่นคืออัลกอริทึมจะย้ายปริมาณทราฟฟิกจากวงแหวนที่มีขนาดเล็กไปยังช่องสัญญาณที่ยังไม่ได้ใช้งานในวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ ทำให้วงแหวนที่มีขนาดเล็กถูกเลือกใช้น้อยลง ด้วยเหตุนี้ค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกจึงมีขนาดใหญ่ ส่วนเหตุผลที่อัลกอริทึมไม่ย้ายปริมาณทราฟฟิกจากวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ไปยังวงแหวนที่มีขนาดเล็กคือวงแหวนขนาดใหญ่ที่เลือกมานั้นเป็นวงแหวนที่มีขนาดเล็กที่สุดสำหรับคุโนดคู่่นั้น ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะย้ายปริมาณทราฟฟิกไปยังวงแหวนที่มีขนาดเล็กกว่าได้อีก



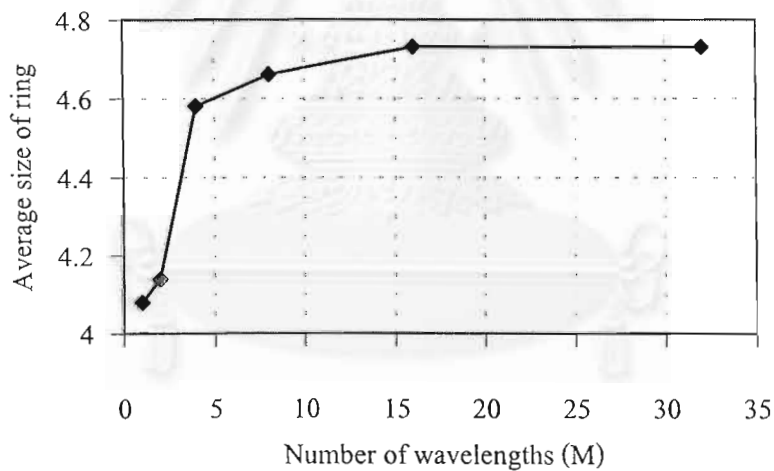
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้กับจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า utilization กับจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนของโครงข่ายกับจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์
ในเส้นใยแก้วนำแสง โดยเปรียบเทียบกับต้นทุนของโครงข่ายแบบเมช



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกกับจำนวนความยาวคลื่น
ที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง

5.3.4 ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อต้นทุนของโครงข่าย

ในส่วนนี้จะวิเคราะห์ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง จากบทที่ 3 ซึ่งได้วิเคราะห์ผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนความยาวคลื่นที่โครงข่ายรูปวงแหวนต้องการ สรุปได้ว่าการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะช่วยลดจำนวนความยาวคลื่นที่โครงข่ายรูปวงแหวนต้องการสำหรับกราฟฟิกบางรูปแบบเท่านั้น ดังนั้นการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงจึงไม่น่าที่จะช่วยให้ต้นทุนของโครงข่ายลดลงได้มากนัก ตารางที่ 5.4 แสดงต้นทุนของโครงข่ายในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเปรียบเทียบกับต้นทุนในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ซึ่งเป็นต้นทุนที่ได้จากการทดสอบกับโครงข่าย EURO-Core เมื่อกำหนดให้ปริมาณกราฟฟิกระหว่างคู่โหนดใดๆมีรูปแบบยูนิฟอร์มที่ค่า traffic volume = 3 และทดสอบที่ค่า M=1, 2, 4, 8, 16 และ 32 ซึ่งจะเห็นว่าการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะช่วยให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นั่นคือ 0.36% 2.67% 4.60% 7.14% 0% และ 0% สำหรับค่า M=1, 2, 4, 8, 16 และ 32 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.4 ต้นทุนของโครงข่ายในกรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WC) เปรียบเทียบกับต้นทุนในกรณีที่ไม่ใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (NWC)

M	Cost		$\frac{NWC - WC}{NWC} \times 100$
	NWC	WC	
1	279	278	0.36%
2	300	292	2.67%
4	348	332	4.60%
8	448	416	7.14%
16	832	832	0%
32	1664	1664	0%

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้วนำแสง แบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน

จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลจากการใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนในบทที่ 3 โดยใช้ปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มและไม่ยูนิฟอร์ม สามารถสรุปได้ดังนี้

ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม (Uniform traffic)

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณี NWC-ap และ NWC-sp สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นจำนวนคี่ที่น้อยกว่า 18 โหนดและต้องการปริมาณทราฟฟิกที่มีรูปแบบยูนิฟอร์มให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้ (มีการใช้งานทุกช่องสัญญาณในโครงข่าย) และไม่มีข้อจำกัดที่จะต้องใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่ายดังกล่าว เนื่องจากผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากกรณี NWC-ap และ NWC-sp มีค่าเท่ากันและมีค่าเท่ากับค่าขอบเขตอุดมคติ

สำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นจำนวนคู่ แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณี NWC-ap และ NWC-sp ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในกรณีที่ traffic volume = 1 ให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้ (ไม่มีการใช้งานบางช่องสัญญาณในโครงข่าย) แต่ในกรณีที่ traffic volume = 2 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในกรณี NWC-ap และ NWC-sp สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นจำนวนคู่ที่น้อยกว่า 18 โหนดให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้ (มีการใช้งานทุกช่องสัญญาณในโครงข่าย) เนื่องจากที่ค่า traffic volume = 1 ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้มีค่ามากกว่าค่าขอบเขตอุดมคติ ขณะที่ค่า traffic volume = 2 ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้มีค่าเท่ากับค่าขอบเขตอุดมคติ

สำหรับการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ไม่ช่วยให้โครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นจำนวนคู่ในกรณีที่ traffic volume = 1 ใช้จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยลง แต่จะช่วยให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint น้อยลง

นอกจากนี้ ผลการทดสอบโครงข่ายรูปวงแหวนทั้งในกรณีที่มีจำนวน โหนดเป็นจำนวนคี่และจำนวนคู่ สรุปได้ว่าโครงข่ายรูปวงแหวนที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มจะสร้างช่องสัญญาณขึ้นบนเส้นทางที่สั้นกว่าเสมอและไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้เส้นทางแบบ alternative path กับโครงข่ายรูปวงแหวนที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม เนื่องจากผลตอบจำนวนความยาวคลื่นในกรณีที่แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ใช้การเลือกเส้นทางแบบ alternative path (NWC-ap และ WC-ap) มีค่าเท่ากับผลตอบในกรณีที่แบบจำลองใช้การเลือกเส้นทางแบบ shortest path (NWC-sp และ WC-sp) เสมอ นอกจากนี้การเลือกใช้เส้นทางแบบ alternative path จะทำให้แบบจำลองมีจำนวนตัวแปรมากกว่าด้วย

สำหรับความซับซ้อนของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งพิจารณาผ่านจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint พบว่าในกรณีที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะทำให้แบบจำลองมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากโดยไม่สามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นได้ภายในเวลาที่เหมาะสมจากโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่กว่า 16 โหนดและ 17 โหนดสำหรับการเลือกเส้นทางแบบ alternative path และ shortest path ตามลำดับ ส่วนกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะไม่ช่วยให้โครงข่ายรูปวงแหวนที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มใช้จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยลงแต่ช่วยให้แบบจำลองมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint น้อยลงโดยสามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นภายในเวลาที่เหมาะสมจากโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ถึง 185 โหนดได้

ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม (Non-uniform traffic)

ผลการทดสอบพบว่าวิธีการเลือกเส้นทางในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีผลต่อจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่ายรูปวงแหวนที่ต้องการปริมาณทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มแบบต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มในรูปแบบ P1 และ P4 มีความเหมาะสมที่จะใช้การเลือกเส้นทางแบบ alternative path สำหรับรูปแบบทราฟฟิก P2 และ P3 จะให้ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นเท่าเดิมไม่ว่าจะใช้การเลือกเส้นทางแบบใด จากการศึกษาพบว่า สำหรับรูปแบบทราฟฟิก P2 ไม่ว่าปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดใดๆจะแบ่งให้กับเส้นทางทั้ง 2 เส้นทางในโครงข่ายรูปวงแหวนอย่างเท่าๆกันหรือบังคับให้ใช้เพียงเส้นทางที่สั้นกว่าเท่านั้น ก็จะให้ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่เท่ากัน แต่ในกรณีของรูปแบบทราฟฟิก P3 หากบังคับให้ปริมาณทราฟฟิกของทุกคู่โหนดแบ่งให้กับเส้นทางทั้ง 2 เส้นทางในโครงข่ายรูปวงแหวนอย่างเท่าๆกัน จะทำให้ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นมีค่ามากกว่ากรณีที่บังคับให้ใช้เพียงเส้นทางที่สั้นกว่าเท่านั้น

ในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ได้ช่วยให้ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มในรูปแบบ P1, P2, P3 และ P4 มีผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่น้อยลง

นอกจากนี้ ผลการทดสอบด้วยปริมาณกราฟฟิกรูปแบบยูนิฟอร์มและไม่ยูนิฟอร์มที่ได้ทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่าสำหรับรูปแบบกราฟฟิกส่วนใหญ่ อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ได้ช่วยให้โครงข่ายรูปร่างวงแหวนใช้จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยลง แต่จะมีกราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มบางรูปแบบที่อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยให้โครงข่ายรูปร่างวงแหวนใช้จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยลงได้ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.2 ของบทที่ 3

ผลการทดสอบที่ได้จากวิธี heuristic [15]

จากผลการทดสอบอัลกอริทึมที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปร่างวงแหวนโดยใช้วิธี heuristic ซึ่งได้นำเสนอในบทความ [15] ได้แก่ อัลกอริทึม H3 และอัลกอริทึม H4 ซึ่งเป็นอัลกอริทึมสำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปร่างวงแหวนที่ไม่มีและมีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นตามลำดับ พบว่าอัลกอริทึม H3 และ H4 สามารถใช้ในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปร่างวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ถึง 70 โหนดภายในเวลาที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในกรณีที่โครงข่ายมีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคี่ อัลกอริทึม H3 สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้ (มีการใช้งานทุกช่องสัญญาณในโครงข่าย) สำหรับในกรณีที่โครงข่ายมีจำนวนโหนดเป็นจำนวนคู่ตั้งแต่ 10 โหนดขึ้นไป ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นในกรณีที่ traffic volume = 2 มีค่ามากกว่าค่าขอบเขตอุดมคติเล็กน้อย (ต่ำกว่า 4.2%) แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม H3 ยังมีจุดบกพร่องอยู่เล็กน้อย แต่ในกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (อัลกอริทึม H4) สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในกรณีที่ traffic volume = 2 ให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุดได้

6.2 สรุปผลการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นโดยใช้โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขการแบ่งปริมาณกราฟฟิกที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 แต่แบบจำลองดังกล่าวมีความซับซ้อนมาก (ซึ่งพิจารณาผ่านจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint) ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงคือ การเลือกใช้วงแหวนและการกระจายปริมาณกราฟฟิกของแต่ละโหนดให้กับวงแหวน สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ได้แก่ ค่า M ขนาดของโครงข่ายและการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยที่เมื่อค่า M มากขึ้นจะทำให้แบบจำลองมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากขึ้น เนื่องจากมีความยาวคลื่นให้จัดสรรมากขึ้นนั่นเอง โดยที่แบบจำลองไม่สามารถหาผลตอบความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายขนาด 6 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยง

ที่ค่า $M=32$ และ traffic volume = 2 ได้ภายใน 12 ชั่วโมง นอกจากนี้ขนาดของโครงข่ายที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้แบบจำลองมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากขึ้นด้วย โดยที่แบบจำลองไม่สามารถหาผลตอบความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายขนาด 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยงที่ค่า $M=1$ และ traffic volume = 1 ได้ภายใน 12 ชั่วโมง สำหรับกรณีที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะช่วยให้แบบจำลองในกรณีที่ M มากกว่า 1 มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint น้อยลง เนื่องจากอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะช่วยให้ไม่ต้องจัดสรรความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย สำหรับในกรณีที่ $M=1$ การใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะไม่มีผลต่อจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ที่ใช้ในแบบจำลอง เนื่องจากมีเพียงความยาวคลื่นเดียวในโครงข่าย

นอกจากนี้ผลการทดสอบพบว่า ต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีค่าเท่ากับต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบเมฆในโครงข่ายขนาด 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยงและ 7 โหนด 11 ข่ายเชื่อมโยง สำหรับโครงข่ายขนาด 6 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยงมีต้นทุนที่สูงกว่าเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อ M มีค่ามากขึ้น จะทำให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าสูงขึ้น ขณะที่จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้จะลดลง

สำหรับการจำกัดวงแหวนที่จะเลือกในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์จะทำให้แบบจำลองมีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint น้อยลงและสามารถหาผลตอบจากโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ โดยต้นทุนที่ได้อาจจะไม่ใช่ต้นทุนที่ต่ำที่สุดแต่ก็มีค่าที่ไม่สูงมากนัก ผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองในกรณีนี้สามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นจากโครงข่ายขนาด 11 โหนด 19 ข่ายเชื่อมโยงได้ภายใน 12 ชั่วโมงขณะที่แบบจำลองในกรณีที่ไม่มีจำกัดวงแหวนไม่สามารถหาผลตอบจากโครงข่ายขนาด 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยงได้ภายใน 12 ชั่วโมง และจากการทดสอบโครงข่ายขนาด 8 โหนด 13 ข่ายเชื่อมโยงโดยใช้กราฟฟิคที่มีรูปแบบไม่ยูนิฟอร์ม สามารถหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ค่า $M=8$ ได้ขณะที่แบบจำลองในกรณีที่ไม่มีจำกัดวงแหวนจะหาผลตอบได้จนถึงค่า $M=2$ เท่านั้น สำหรับต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้จากแบบจำลองในกรณีที่มีการจำกัดวงแหวนมีค่าสูงกว่าต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบเมฆเพียงเล็กน้อย

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง มีจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint มากขึ้นตามขนาดของโครงข่ายและค่า M ทำให้ไม่สามารถหาผลตอบจากโครงข่ายขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นในบทที่ 5 จึงได้มีการนำเสนอวิธีการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงให้สามารถออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้การออกแบบด้วยวิธี heuristic จากผลการทดสอบกับโครงข่ายที่มีการใช้งานจริงได้แก่ EURO-Core, New Jersey, NSFNet, EON, ARPANet และ UKNet โดยการเปรียบเทียบต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงกับโครงข่ายแบบเมฆ พบว่าต้นทุนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงมีค่ามากกว่าต้นทุนของโครงข่ายแบบเมฆเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ความแตกต่างของต้นทุนจาก

โครงข่ายทั้ง 2 แบบนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกราฟฟิคด้วย และได้พบข้อจำกัดและคุณสมบัติของ อัลกอริทึมที่ใช้การออกแบบโดยวิธี heuristic ที่ได้นำเสนอ คือไม่สามารถให้ผลตอบที่ดีได้เสมอไป เมื่อปริมาณกราฟฟิคเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้จากการทดสอบกับโครงข่ายตัวอย่างขนาดเล็กพบว่า อัลกอริทึมที่ใช้การออกแบบด้วยวิธี heuristic ดังกล่าวไม่เหมาะที่จะใช้ในการออกแบบให้กับ โครงข่ายขนาดเล็ก เนื่องจากไม่สามารถออกแบบโครงข่ายที่มีขนาด 7 โหนด 11 ข่ายเชื่อมโยงให้มี ต้นทุนต่ำเท่ากับต้นทุนที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ได้

ในการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง มีการเลือกวงแหวนขนาดต่างๆจำนวนหนึ่งเพื่อใช้ในการรองรับปริมาณกราฟฟิคของทุกคู่โหนด ค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ ค่า traffic volume และค่า M ในกรณีที่ $M=1$ ขนาดวงแหวนเฉลี่ยมีขนาดใหญ่เมื่อค่า traffic volume = 1 และมีขนาดเล็กลงเมื่อ traffic volume = 2 จากนั้นขนาดวงแหวนเฉลี่ยจะมีค่าที่ค่อนข้างคงที่แม้ว่า traffic volume จะมีค่ามากขึ้นก็ตาม เนื่องจาก traffic volume = 2 เป็นปริมาณกราฟฟิคที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่าในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีค่า $M=1$ สำหรับกรณีที่ $M=2$ ขนาดวงแหวนเฉลี่ยมีขนาดใหญ่เมื่อค่า traffic volume = 1 โดยมีขนาดเล็กลงเมื่อ traffic volume มีค่ามากขึ้น และจะเริ่มมีขนาดเฉลี่ยที่ค่อนข้างคงที่เมื่อค่า traffic volume = 4 เนื่องจาก traffic volume = 4 เป็นปริมาณกราฟฟิคที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่าในโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีค่า $M=2$

นอกจากนี้ผลการทดสอบพบว่าค่า M มีผลต่อต้นทุนของโครงข่ายและการจัดสรรทรัพยากรในโครงข่าย โดยค่า M ที่มากขึ้นจะทำให้ต้นทุนของโครงข่ายสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ M จะเป็นการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณให้กับเส้นใยแก้วนำแสง ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงจะทำให้จำนวนช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับค่า M ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของต้นทุนของโครงข่าย สำหรับผลของ M ที่มีต่อการจัดสรรทรัพยากรในโครงข่ายจะเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ ในลักษณะแรกคือ เมื่อ M มีค่ามากขึ้นจะทำให้ขนาดวงแหวนเฉลี่ยใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ M ทำให้มีจำนวนช่องสัญญาณในวงแหวนที่ไม่ได้ใช้งานมากขึ้น อัลกอริทึมที่ได้นำเสนอนี้จะพยายามย้ายปริมาณกราฟฟิคจากวงแหวนที่มีขนาดเล็กไปยังช่องสัญญาณที่ยังไม่ได้ใช้งานในวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้ค่าเฉลี่ยของขนาดวงแหวนที่เลือกมีขนาดใหญ่ สำหรับผลของ M ที่มีต่อการจัดสรรทรัพยากรในลักษณะที่ 2 คือเมื่อ M มีค่ามากขึ้นจะทำให้โครงข่ายใช้เส้นใยแก้วนำแสงน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า M เป็นการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณให้กับโครงข่ายโดยไม่ต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง

สำหรับการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงจะช่วยให้ ต้นทุนของโครงข่ายลดลงได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

6.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรจะมีการออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง โดยยอมให้เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายรูปวงแหวนทุกวงไม่จำเป็นต้องมีจำนวนความยาวคลื่นที่มากที่สุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์เข้าไปได้เป็นจำนวนที่เท่ากัน ซึ่งอาจจะช่วยให้ต้นทุนของโครงข่ายลดลงได้
2. ควรจะมีการศึกษาโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเพียงบางโนดในโครงข่าย
3. ควรจะมีการออกแบบโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง โดยไม่ยอมให้มีการแบ่งปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนดให้รองรับโดยวงแหวนมากกว่า 1 วงได้ เพื่อใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบกับกรออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้
4. ในอนาคต เมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ให้มีความเร็วสูงเพียงพอที่จะหาผลตอบจำนวนความยาวคลื่นจากโครงข่ายขนาดใหญ่โดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ได้ภายในเวลาที่ไม่ยาวนานจนเกินไป จะทำให้สามารถออกแบบโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีขนาดใหญ่ให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดได้

รายการอ้างอิง

1. Kaminow, I. P., et al. A Wideband All-Optical WDM Network. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 14 (1996): 780-799.
2. Garrett, L. D., et al. The MONET New Jersey Network Demonstration. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 16 (Sept 1998): 1199-1219.
3. Chbat, M. W., et al. Toward Wide-Scale All Optical Transparent Networking: The ACTS Optical Pan-European Network (OPEN) Project. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 16 (Sept 1998): 1226-1244.
4. Wuttistittikulkiij, L.; and O'Mahony, M.J. Use of Spare Wavelengths for Traffic Restoration in Multi-Wavelength Transport Network. IEEE Proceedings of ICC'96 (June 1996): 1778-1782.
5. Nagatsu, N.; Okamoto, S.; and Sato, K. Optical Path Cross-Connect System Scale Evaluation Using Path Accommodation Design for Restricted Wavelength Multiplexing. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 14 (June 1996): 893-902.
6. Wauters, N.; and Demeester, P. Design of the Optical Path Layer in Multiwavelength Cross-connected Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 14 (June 1996): 881-892.
7. Baroni, S.; and Bayvel, P. Wavelength Requirements in Arbitrarily Connected Wavelength-Routed Optical Networks. Journal of Lightwave Technology 15 (February 1997): 242-251.
8. Wuttisittikulkiij, L.; and O'Mahony, M.J. Design of a WDM Network using a Multiple Ring Approach. IEEE Proceedings of GLOBECOM'97 (November 1997): 551-555.
9. Wuttisittikulkiij, L. An Algorithm for the Design of a Multi-Wavelength All-Optical Transport Network using a Multiple Ring Approach. Proceedings of 20th Electrical Engineering Conference (1997): 219-222.
10. Mukherjee, B. Optical Communication Networks. United States of America: McGraw-Hill, 1997.

11. Hill, G. R., et.al. A Transport Network Layer Based on Optical Network Elements. IEEE Journal of Lightwave Technology 11 (May/June 1993): 667-679.
12. ถัญญกร วุฒิสัทกุลกิจ, ศิริชัย อารีวานิช, เทวินทร์ อัสวคำเกิงเดช และชัยพร เอี่ยมวสันต์. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรความยาวคลื่นในโครงข่ายรูปวงแหวนแบบหลายความยาวคลื่น. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22 ธันวาคม 2542: 437-440.
13. Iamvasant, T.; Baworntummarat, C.; and Wuttisittikulkij, L. A Comparative Study of Mesh and Multi-ring Designs for Survivable WDM Network. Proceedings of Network 2000 (May 2000).
14. Wuttisittikulkij, L.; and O'Mahony, M.J. Design of an Efficient and Practical Algorithm for Wavelength Assignment in Multi-Wavelength Ring Transport Network. IEEE Proceedings of GLOBECOM'97 (November 1997): 571-575.
15. Wuttisittikulkij, L.; Leelanunnukul, S.; Arreewanit, S.; and Prapinmongkolkarn, P. Routing and Wavelength Allocation in Multi-wavelength All-optical Ring Networks. Proceedings of ICC'99 (June 1999): 2018-2022.
16. <http://www.cplex.com/>
17. เจริญชัย บวรธรรมรัตน์. การออกแบบโครงข่าย WDM ที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อมีความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
18. Boroni, S.; Bayvel, P.; and Gibbens, R. J. On the number of Wavelengths in Arbitrarily-Connected Wavelength-Routed Optical Networks. OSA Trends in Optics and Photonics Series (TOPS): Optical Network and Their Applications 20 (July 1998): 195-204.
19. Xiong, Y.; and Mason, L. Restoration Strategies and Spare Capacity Requirements in Self-Healing ATM Networks. Proceedings of INFOCOM'97 (1997): 353-360.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ในรายงานการประชุมวิชาการ 1999 IEEE International Conference on Communication (ICC'99) ในหัวข้อการประชุม Multimedia and Wireless : Building Blocks for the New Economy หัวข้อย่อย WDM Routing and Performance Management ในบทความชื่อ "Routing and Wavelength Allocation in Multi-wavelength All-optical Ring Networks" ซึ่งเป็น 1 ใน 375 บทความที่ได้รับการคัดเลือกจาก บทความทั้งสิ้น 850 บทความจากทั่วโลก การประชุมวิชาการดังกล่าวได้ถูกจัดขึ้น ณ แวนคูเวอร์คอนเวนชันเซ็นเตอร์ เมืองแวนคูเวอร์ ประเทศแคนาดา เมื่อวันที่ 6-10 มิถุนายน 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Routing and Wavelength Allocation in Multi-wavelength All-optical Ring Networks

Lunchakorn Wuttisittikulkij, Sithichai Leelanunnukul, Sirichai Arreewanit, and Prasit Prapinmongkolkarn

Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University
Phayathai Road, Bangkok, Thailand.

Tel. (662) 218-6512, Fax. (662) 251-8991, E-mail: lunch@ee.eng.chula.ac.th

ABSTRACT -- This paper addresses the issues of routing and wavelength allocation in multi-wavelength all-optical ring networks with and without wavelength conversion capabilities. A mathematical modeling based on integer linear programming and several heuristic approaches are investigated. It is shown that optimal routing and wavelength allocation in the systems with wavelength conversion can be achieved almost effortlessly for ring networks of up to 70 nodes using the mathematical modeling. However, if no wavelength conversion is permitted, the computational time of the mathematical modeling becomes excessive even with a network as small as 7-10 nodes. Accordingly, heuristic techniques are proposed and their performance is extensively evaluated on various traffic scenarios. In addition, this study includes an investigation of the use of wavelength conversion for improving network resource utilization in ring network structures.

I. INTRODUCTION

All-optical networks based on wavelength division multiplexing and wavelength routing techniques are currently considered a promising approach for the realization of future broadband transport networks. Many research activities currently pay considerable attention to this new type of network. In the US alone, there are a number of large consortia associated with all-optical networks, for instance MONET (Multiple-Wavelength Optical Networking) [1], AON (All-Optical Networks) [2] and ONTC (The Optical Network Technology Consortium) [3]. Within Europe, the major research and development in this area is currently under comprehensive study by a number of ACTS (Advanced Communications Technologies and Services) projects, for example OPEN (Optical Pan European Network) [4]. In Japan, NTT is at the forefront in this area.

A basic element of such networks is the optical cross-connect node, which can be interconnected to form any arbitrary network topology such as a ring or mesh. Currently, the mesh network design attracts much attention and is the focus for many networking studies on topics such as wavelength allocation and protection [5-11]. The key advantage of the mesh network is that, owing to its high connectivity, it can utilize network resources in the most efficient manner for both normal and failure conditions, allowing minimization of the network capacity requirements. Ring networks, on the other hand, may not be as efficient but they do offer other interesting features, such as simple control and resource management, easy protection from link and node failures, and automatic, fast and reliable restoration. The restoration advantage of the ring is particularly important in modern communication networks where the demands for reliable services are increasing. In addition, the efficiency of network utilization in large networks can be significantly improved by using a multiple ring network design approach [12,13]. Therefore, the ring-based design approach is indeed attractive and is considered a viable alternative to the mesh-based design. There is a more descriptive discussion on this issue in [12].

Since ring structures pose different property from mesh structures, many issues related to the network design need careful

investigations in order to exploit their unique property. In this paper, the issues of routing and wavelength allocation in ring structures are comprehensively examined. The main objective is to find techniques that are able to achieve optimal solutions while keeping the computational time requirement down to a reasonable level using commonly available personal computers. These techniques are then extensively used to determine whether wavelength conversion is an essential or useful element in multi-wavelength ring networks.

II. ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION PROBLEM

The problem of routing and wavelength allocation can be explained by means of an example. Consider a ring network of 6 nodes shown in Figure 1. Assume that three connections are to be established, namely (1,3) (2,4) and (1,5). The first connection is assigned λ_1 along the physical route 1-2-3. The second connection between nodes 2 and 4 cannot be assigned λ_1 , hence another wavelength is required and λ_2 is chosen in this example. The last connection can reuse λ_1 again and it is established along the route 1-6-5. In this example two wavelengths are required.

If each node is equipped with wavelength conversion capabilities, signals can be converted from one wavelength to another at the node. Consider the situation in Figure 1. Suppose that a new connection is to be established between nodes 3 and 6. It appears that no free bandwidth on the same wavelength (λ_1 , or λ_2) exists along either route, hence an extra wavelength is required. However, if conversion is permitted, the connection can be routed through nodes 4 and 5 with the assistance of wavelength conversion at node 5, as shown in Figure 2. Although wavelength conversion in principle appears to be useful, it is important to evaluate its advantage in a quantitative manner and this is a key topic discussed in this paper.

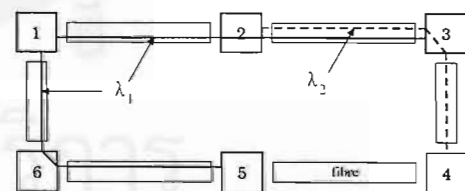


Figure 1 : An example of routing and wavelength allocation

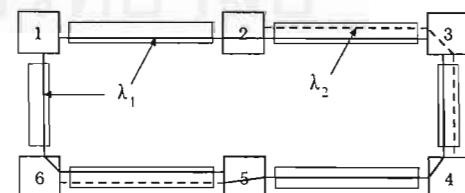


Figure 2 : An example of wavelength conversion

III. A MATHEMATICAL MODEL

This section describes a mathematical model for solving the routing and wavelength allocation problem. The model is derived from reference [13,14] to suit the problem being considered. The problem is first formulated as a set of linear equalities and inequalities, which can then be solved by using integer linear programming. This model provides optimal and exact solutions, but its execution time requirement could be a major concern.

A. Ring networks with no wavelength conversion

Let N denote the total number of nodes in the network, L the number of links, D the number of source-destination (s-d) node pairs, *i.e.*, $N(N-1)/2$. Note that $N = L$ in the ring structure. Each link consists of a pair of fibers, one in each direction. The traffic requirement can be expressed as a D -dimensional column vector $T = (t_i)$, where t_i is the number of traffic connections to be set up between node pair i . Let P denote the total number of different routes available for all node pairs. For the ring structures, only 2 alternate routes exist between any node pair, thus the total number of routes, P , is $2D$. Let $A = (a_{ij})$ be the $P \times D$ route s-d pair incidence matrix, *i.e.*,

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if route } i \text{ is between s-d pair } j \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$B = (b_{ij})$ be the $P \times L$ route-link incidence matrix, *i.e.*,

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if link } j \text{ is on route } i, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

The outcomes of route and wavelength assignments can be expressed as a $P \times M$ route-wavelength matrix where M is the number of wavelengths; and this matrix is denoted as $X = (x_{ij})$ where x_{ij} represents the number of connections set up along physical route i and on wavelength j . Let Y denote as a P -dimensional column vector where element y_i represents the number of connections set up along physical route i , *i.e.*

$$y_i = \sum_{j=1}^M x_{ij}$$

The problem of routing and wavelength allocation can be expressed as:

$$\begin{array}{l} \text{Maximize} \quad \sum_{i=1}^P y_i \\ \text{subject to} \\ \text{minimum traffic demands} \quad A^T Y \geq T \\ \text{capacity constraint} \quad B^T X \leq \mathbf{1}_{L \times M} \\ \text{non-negativity constraint} \\ x_{ij} \geq 0, \text{ integer, } i = 1, \dots, P \text{ and } j = 1, \dots, M \end{array}$$

Note: $\mathbf{1}_{L \times M}$ is an $L \times M$ matrix whose elements are all 1s.

B. Ring networks with wavelength conversion

For the systems with wavelength conversion capabilities, wavelength allocation is no longer needed; only route assignment is required. Let $Z = (z_i)$ be a $P \times 1$ matrix where z_i is the number of connections set up along route i . The problem of route assignment can be expressed as:

$$\begin{array}{l} \text{Maximize} \quad \sum_{i=1}^P z_i \\ \text{subject to} \\ \text{minimum traffic demands} \quad A^T Z \geq T \\ \text{capacity constraint} \quad B^T Z \leq M \mathbf{1}_{L \times 1} \\ \text{non-negativity constraint} \\ z_i \geq 0, \text{ integer, } i = 1, \dots, P \end{array}$$

These formulations of routing and wavelength allocation problems belong to the integer linear programming problems. The exact and optimal solution can now be solved by using known algorithms. Notice however that the objective of this formula is not minimizing the number of wavelengths required, but instead it maximizes the carried traffic for a given value of M . As a result, the minimal number of wavelengths may not be obtained in a single run. Usually, a few number of runs is needed. In the first run, an estimated value of M is used. If M is too small, there will not be a possible solution that could support the minimum traffic demand while still satisfying the capacity constraint. Hence, an increase of network capacities is required, and this is achieved by increasing the value of M , say by one. The problem is then solved again. This procedure is repeated until the smallest value of M , that results in a feasible solution, is found. The differences in complexity of both formulae can be compared in terms of the number of variables and constraints and they are summarized in Table 1.

TABLE 1: PROBLEM COMPLEXITY

Wavelength conversion	Variables	Constraints
Yes	P	$L+D$
No	MP	$LM + D$

IV. HEURISTIC ALGORITHMS

This section describes four heuristic algorithms for routing and wavelength allocation in ring networks with and without wavelength conversion. It is assumed that nodes are numbered in an increasing order in a clockwise direction, as in Figure 1.

A. Algorithms H1 and H2

Algorithms H1 and H2 are very simple. Algorithm H1 is designed for the systems without wavelength conversion capabilities, and it operates in a similar fashion as Method 1 described in [15]. Each connection always chooses the lower hop count route. If a node pair is directly opposite, the route chosen is in the clockwise direction starting from the lower node number. See Figure 1 as an example, the connection between nodes 1 and 3 will be set up on the route 1-2-3, not 3-4-5-6-1 and the connection between nodes 1 and 4 will be established on the route 1-2-3-4, not 4-5-6-1. Connections are sequentially set up one at a time, descending to their route hop count lengths respectively. A connection with the highest hop count is established first, and then followed by those requiring lower hop counts. For the choice of wavelength number, the first wavelength that has free capacity along the entire route is selected, assuming that all wavelength channels are numbered $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$.

Algorithm H2 is designed for the systems with wavelength conversion capabilities. This algorithm is exactly the same as H1, except that no wavelength assignment is performed. Notice that H2 is very easy to implement. What it needs is only a fixed routing table.

B. Algorithms H3 and H4

As algorithms H1 and H2 employ very simple mechanisms, it is expected that they may not perform well under all traffic conditions. Therefore, more efficient and robust techniques based on an iterative improvement scheme are developed and referred to as H3 and H4. Both H3 and H4 algorithms use the route and wavelength allocation outcomes obtained from H1 and H2 respectively as a starting point, and attempt to improve them by rearranging some connections in such a way that causes new allocations to become more efficient. The fundamental concept of these algorithms is concerned with certain links that are heavily loaded and rearranging some connections so that traffic loading on all links is more balanced.

An algorithm flowchart is shown in Figure 3, and a procedure of this rearranging algorithm is described in the following :

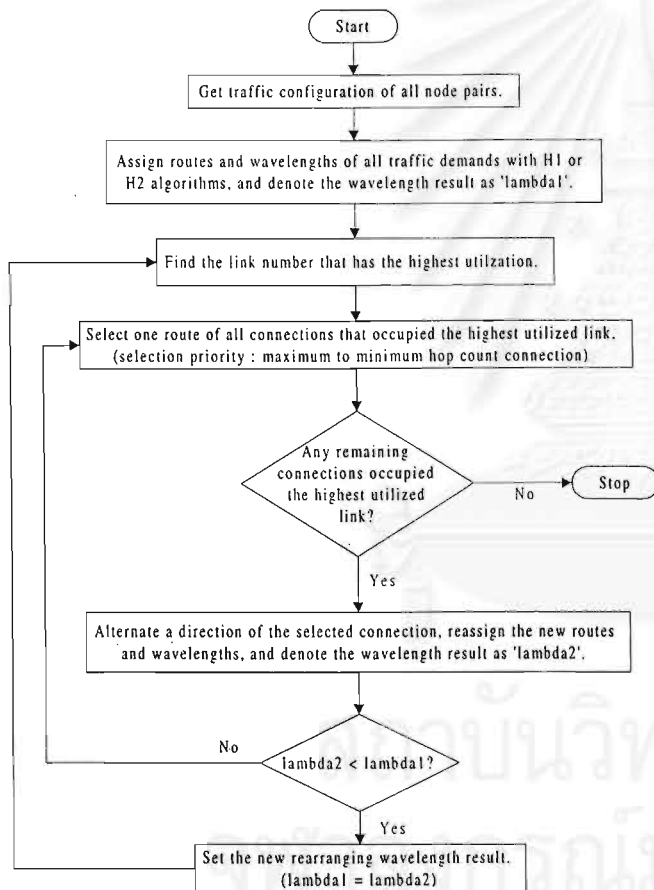


Figure 3 : A flowchart describing algorithms H3 and H4

1. Get a traffic configuration of each node pair, *i.e.* a source node, a destination node, and the number of connections between them.
2. Set up optical paths by assigning routes and wavelengths for all traffic demands using algorithm H1 in the NWC (no wavelength conversion) case or algorithm H2 in the WC (wavelength

conversion) case. The number of wavelengths required at this stage is denoted as 'lambda1'.

3. Find the link that the maximum wavelength number (λ_M) is occupied. If there is more than one such a link, select the link that has the highest utilization.
4. Choose an optical path that established through the link selected in step 3, based on the following rules. The optical path that has the highest hop count is chosen first. If there exists more than one such an optical path, select the path that the source node has the smallest node number.
5. Re-route the optical path in the opposite direction. Reassign routes and wavelengths for all traffic demands again. The number of wavelengths required at this stage is denoted as 'lambda2'
6. If ($\lambda_2 < \lambda_1$), then $\lambda_1 = \lambda_2$, and go to step 3. If not, it means an alternated configuration in step 5 can not decrease the number of wavelengths, so alternate back a direction of that selected route in step 4, and go back step 4 to select a next optical path to process in step 5-6.
7. If all optical paths, that route through the highest utilized link, have already been selected to alternate their directions, but no any route can decrease the wavelength result, stop the algorithm.

V. RESULTS AND DISCUSSION

For the Integer Linear Programming (ILP) approach, two routing schemes are used: the first scheme uses only the lower hop count route, referred to as the *shorter route*, and the second scheme allows both routes (clockwise and counterclockwise direction), referred to as the *alternative route*.

A. Uniform Traffic

For uniform traffic, there is exactly one connection between each node pair.

No wavelength conversion (NWC)

(a) Odd-node ring

In this case, the results accomplished from all algorithms, H1, H3 and integer linear programming with both shorter route scheme (ILP-sr), and alternative route scheme (ILP-ar), are all identical and they are also the same as the theoretical bound, as shown in Table 2. This means that capacities of all links are fully utilized. Note: the theoretical bound, λ_{ideal} , is defined as the summation of the lower hop count required by each connection divided by the number of links. In terms of processing time requirements, heuristic algorithms can complete the resource allocation swiftly for the ring networks as large as 70 nodes, whereas the ILP technique requires prohibitive processing time when the number of nodes is greater than 11. If comparing the processing time requirements of the two ILP techniques, it is clear that ILP-ar requires more processing time than ILP-sr, because more choices of the routes are allowed, hence greater number of variables and longer time.

TABLE 2 : NUMBER OF WAVELENGTHS FOR UNIFORM TRAFFIC (ODD-NODE).

Node	3	5	7	9	11	13	15
λ	1	3	6	10	15	21	28
Node	17	19	21	23	25	27	29
λ	36	45	55	66	78	91	105

(b) Even-node ring

In the case of even-node, see Table 3, all results are different from the theoretical bound, implying that some links are partially utilized. As in the odd-node case, the ILP technique can only be applied to small sizes of networks, *i.e.* no more than 10 nodes. Since the results of ILP-ar and ILP-sr are equal, it indicates that all connections are established on the shorter routes. Considering only the results for networks of 4, 6, 8 and 10 nodes, algorithm H3 is able to achieve optimal solutions. For larger networks, the algorithm H3 performs well, as evident in the ring of 30 nodes that the result is different from λ_{ideal} only by 2.2%. This algorithm is in some cases better than Method II described in [15].

Wavelength conversion (WC)

(a) Odd-node ring

As all results in the case of NWC are equal to λ_{ideal} , it means that wavelength converters will not be useful for this traffic pattern.

(b) Even-node Ring

When wavelength conversion is permitted, only route allocation is required, so the complexity and computational time is reduced. The ILP technique can achieve the route allocation instantly and it is particularly fast for the shorter route scheme. Therefore, computational time is not a problem in this traffic scenario. The results of ILP-sr, ILP-ar and H4 are found to be identical and very close to λ_{ideal} , see Table 4. It implies that all connections are set up on their shorter routes. In contrast, the performance of algorithm H2 is rather poor; in most cases more wavelengths are required. For example, in the case of 30 nodes, additional 7 wavelengths are needed, equivalent to 6% extra capacity required. If comparing the results in Tables 3 and 4, it can be seen that wavelength conversion is not needed in small rings, but such devices will provide slight advantages in larger rings. For example, in the case of 30 nodes, only 2 wavelengths can be reduced, *i.e.* less than 2% capacity saving.

B. Non-uniform Traffic

For non-uniform traffic, traffic patterns can vary considerably. It is not possible to examine all the possibilities. Therefore, the conclusion drawn in this paper is based on extensive tests on various traffic patterns. For discussion purposes, a sample of 7-node network problem is given here. Traffic matrix used for this network is summarized in Table 5 and the results of all algorithms are shown in Table 6.

TABLE 3 : NUMBER OF WAVELENGTHS REQUIRED OF ALL METHODS FOR UNIFORM TRAFFIC, NWC, AND EVEN-NODE.

Node	Ideal	H1	H3	ILP-sr	ILP-ar
4	2	3	3	3	3
6	4.5	6	5	5	5
8	8	10	9	9	9
10	12.5	15	13	13	13
12	18	21	19	-	-
14	24.5	28	26	-	-
16	32	36	35	-	-
18	40.5	45	43	-	-
20	50	55	52	-	-
22	60.5	66	63	-	-
24	72	79	75	-	-
26	84.5	91	88	-	-
28	98	105	101	-	-
30	112.5	120	115	-	-

Note that "-" means no result is obtained after a long period of time.

TABLE 4 : NUMBER OF WAVELENGTHS REQUIRED FOR A UNIFORM TRAFFIC, WC, AND EVEN-NODE.

Node	Ideal	H2	H4	ILP-sr	ILP-ar
4	2	3	3	3	3
6	4.5	6	5	5	5
8	8	10	9	9	9
10	12.5	15	13	13	13
12	18	21	19	19	19
14	24.5	28	25	25	25
16	32	36	33	33	33
18	40.5	45	41	41	41
20	50	55	51	51	51
22	60.5	66	61	61	61
24	72	78	73	73	73
26	84.5	91	85	85	85
28	98	105	99	99	99
30	112.5	120	113	113	113

TABLE 5 : A TRAFFIC MATRIX FOR IN A 7-NODE RING.

Node	1	2	3	4	5	6	7
1	-	4	12	6	2	1	0
2		-	2	8	6	2	1
3			-	1	4	1	2
4				-	0	2	1
5					-	3	9
6						-	3
7							-

TABLE 6 : NUMBER OF WAVELENGTHS REQUIRED FROM ALL METHODS OF NON-UNIFORM TRAFFIC IN TABLE 5.

Ideal	No wavelength conversion				Wavelength conversion			
	H1	H3	ILP-sr	ILP-ar	H2	H4	ILP-sr	ILP-ar
21	36	27	36	27	36	27	36	27

In non-uniform traffic, it is likely that some links in the ring will be heavily loaded, while the other are rarely used. If only the shorter routes are used for establishing connections, the number of wavelengths will typically be much greater than the theoretical bound. When alternative routes are allowed, some connections on the highly loaded links can be rearranged on the longer routes so that traffic loading on all links is more equally distributed. This is evident from the experimental results in Table 6. There is a large difference between the results of ILP-sr and ILP-ar, *i.e.* 9 wavelengths equivalent to 25% capacity reduction.

As algorithms H1 and H2 do not utilize the alternate route, they also suffer the same problem as ILP-sr. Therefore, these two algorithms are not applicable to non-uniform traffic conditions. In contrast, algorithms H3 and H4 are more effective; the results obtained are the same as that of ILP-ar. In order to evaluate the performance of H3 and H4, a variety of traffic patterns modified from Table 5 are tested on the same 7-node network. Traffic patterns are varied by swapping figures in Table 5 round in a random manner. A large number of samples, over a hundred samples, are conducted. For WC, algorithm H4 produces identical results to that of ILP-ar in most cases. For those that are different, the differences are very small, less than 5%. For NWC, not all samples can be compared because in some traffic patterns the ILP-ar cannot find the solutions within a reasonable period of time. Therefore, the comparison between the ILP-ar and algorithm H3 are based on only those samples that can be completed by the ILP-ar. The results show that algorithm H3 is effective, because the number of wavelengths determined by both techniques is identical in most cases.

C. Execution Time Requirements of the ILP techniques

This section compares the actual computational time requirements of the ILP techniques for NWC and WC. Various ring network

configurations are tested on a large number of different non-uniform traffic patterns. The execution time results presented here are selected from test samples and they are summarized in Figures 4-6. From the results, the computational time requirements depend mainly on two factors, namely the number of nodes and the number of wavelengths. The greater the number of nodes, the longer the computational time. For NWC, when the number of nodes is greater than 10, no solution can be found within 20 minutes. In contrast, for WC, the ILP technique can be applied to networks as large as 70 nodes, before the computational time becomes a problem. These results highlight one advantage of wavelength conversion in ring networks, *i.e.* simplifying the problem of resource allocation. Another factor that impacts the processing time is the number of available wavelengths. The greater the number of wavelengths the longer the computational time. However, this factor is less important. For example, in the WC the solution can be achieved even with a few thousand wavelengths for small networks. When comparing between the shorter and alternate routes of the NWC systems, as expected, the ar case takes longer time than that of sr to find the solutions.

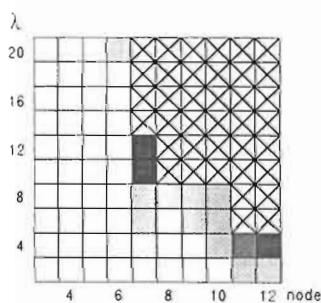


FIGURE 4: NWC-AR TIME

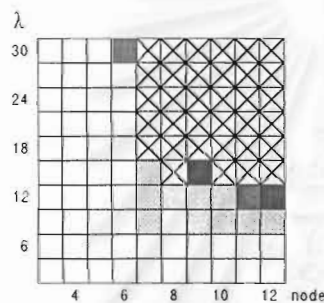


FIGURE 5: NWC-SR TIME

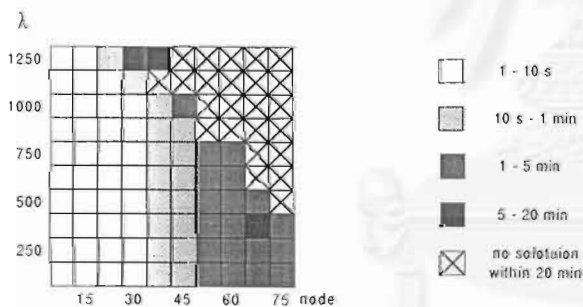


FIGURE 6: WC-AR TIME

VI. CONCLUSION

The problem of routing and wavelength allocation in multi-wavelength ring networks has been intensively investigated. Designing an efficient algorithm for routing and wavelength allocation in ring networks of practical sizes is not a difficult task. For the systems with wavelength conversion, it is possible to find an optimal solution to the problem using the mathematical modeling approach for networks of smaller than 70 nodes. However, if no conversion is permitted, the problem becomes too complex and no solution can be found even with a network as small as 7-10 nodes, because of the excessive computational time requirements. In this case, heuristic approaches are found to be useful. Algorithms H3

and H4 are robust and effective for various traffic conditions. Good and satisfactory outcomes can be accomplished within a reasonable time even with large network problems. Algorithm H4, in particular, appears to be very promising, as the results of all tests so far, under both uniform and non-uniform traffic conditions, are very efficient. It is also found that in such networks wavelength conversion does not appear to be useful as no significant improvement of network resource utilization is observed and in some cases no advantage is gained at all. Accordingly, it is concluded that wavelength conversion is not an essential element in ring networks, if it is only to be used for enhancing the efficiency of network resource utilization.

VI. ACKNOWLEDGEMENT

This work is supported in part by Siskonkuti Chulalongkorn University and TRF.

VII. REFERENCES

- [1] R. E. Wagner, R. C. Allerness, A. A. M. Saleh and M. S. Goodman, "MONET: Multi Wavelength Optical Networking," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 1341-1348, June 1996.
- [2] I. P. Kaminow, C. R. Doerr, C. Dragone, T. Koch, U. Koren, A. A. M. Saleh, A. J. Kirby, C. M. Ozveren, B. Schofield, R. E. Thomas, R. A. Barry, D. M. Castagnozzi, V. W. S. Chan, B. R. Hemmenway, Jr., D. Marquis, S. A. Parikh, M. L. Stevens, E. A. Swanson, S. G. Finn, and R. G. Gallager, "A Wideband All-Optical WDM Network," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 780-799, 1996.
- [3] G.-K. Chang, G. Ellinas, J. K. Gancklin, M. Z. Iqbal, and C. A. Brackett, "Multi Wavelength Reconfigurable WDM/ATM/SONET Network Testbed," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 1320-1340, June 1996.
- [4] A. Jourdan, L. Berthelon, P. Bouno, F. Bruyere, M. Chbat, C. Coeurjolly, J. Y. Emery, P. Gavignet, E. Grard, C. Janz, A. Noury, G. Soulage, and T. Zami, "Fully Reconfigurable WDM Optical Crossconnect: Feasibility Validation and Preparation of Prototype Crossconnect for ACTS "OPEN" Field Trials," *Proc. ECOC'97*, pp. 55-58, 1997.
- [5] L. Wuttisittikulij and M. J. O'Mahony, "Use of Spare Wavelengths for Traffic Restoration in Multi-Wavelength Transport Network," in *Proc. ICC'96*, pp. 1778, 1996.
- [6] 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.
- [7] N. Wauters and P. Demeester, "Design of the Optical Path Layer in Multiwavelength Cross-connected Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, June 1996.
- [8] L. Wuttisittikulij and M. J. O'Mahony, "Use of the Genetic Algorithm for Solving the Wavelength Assignment Problem," *Proc. ICONIP'97*, Otago, Dunedin, New Zealand, November 1997.
- [9] I. Chlamtac, A. Farago, and T. Zhang, "Lightpath (Wavelength) Routing in Large WDM Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 909-913, June 1996.
- [10] D. Banerjee and B. Mukherjee, "A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large wavelength-Routed Optical Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 903-908, June 1996.
- [11] Rajiv Ramaswami and Kumar N. Sivarajan, "Design of Logical Topologies for Wavelength-Routed Optical Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 840-851, June, 1996.
- [12] L. Wuttisittikulij and M. J. O'Mahony, "Design of a WDM Network using a Multiple Ring Approach," *IEEE Proceedings of GLOBECOM'97*, pp. 551-555, Phoenix, AZ, November 1997.
- [13] L. Wuttisittikulij and M. J. O'Mahony, "An Algorithm for the Design of a Survivable Multi-Wavelength Network Using a Multiple Ring Approach," *Proc. ECOC'97*, poster session, pp. 131-134, Edinburgh, September 1997.
- [14] R. Ramaswami and K. Sivarajan, "Optimal Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks," in *Proc. INFOCOM'94*, (Toronto, Canada), June 1994.
- [15] L. Wuttisittikulij and M. J. O'Mahony, "Design of an Efficient and Practical Algorithm for Wavelength Assignment in Multi-Wavelength Ring Transport Network," *Proc. GLOBECOM'97*, pp. 571-575, Phoenix, AZ, November 1997.

ประวัติผู้เขียน

นายศิริชัย อารีวานิช เกิดวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย