การประยุกต์การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายใยแก้วนำแสงระบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนให้กับโครงสร้างแบบเมช

นายสิทธิชัย ลีลานันท์นุกูล

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-904-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19146322

APPLYING ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION OF A MULTI-WAVELENGTH ALL-OPTICAL RING-TOPOLOGY NETWORK TO A MESH-TOPOLOGY NETWORK

Mr.Sithichai Leelanunnukul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 1999
ISBN 974-334-904-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายใยแก้วนำแสงระบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนให้กับโครงสร้างแบบเมช
โดย	นายสิทธิชัย ลีลานันท์นุกูล
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ)

..... กรรมการ
(ดร.สุพจน์ เธียรวุฒิ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สิทธิชัย ลีลานันท์นุกูล : การประยุกต์การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายใยแก้วนำแสงระบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนให้กับโครงสร้างแบบเมช. (APPLYING ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION OF A MULTI-WAVELENGTH ALL-OPTICAL RING-TOPOLOGY NETWORK TO A MESH-TOPOLOGY NETWORK) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ศ.ดร.ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ, 129 หน้า. ISBN 974-334-904-9.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการออกแบบการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นภายในโครงข่ายใยแก้วนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนเดี่ยวและวงแหวนหลายวง ในกรณีโครงข่ายวงแหวนเดี่ยว ต้นทุนของโครงข่ายวัดจากจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้สำหรับรองรับทราฟฟิกของระบบ งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นออกเป็น 3 วิธีตามอันดับในการจัดสรรวิถีแสงของทราฟฟิก ได้แก่ วิธีการสุ่ม วิธีจัดสรรให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดก่อน และวิธีจัดสรรให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดก่อน จากการทดสอบพบว่าวิธีจัดสรรให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดก่อนมีสมรรถนะที่ดีที่สุดโดยใช้จำนวนความยาวคลื่นในแต่ละกิ่งเชื่อมของวงแหวนน้อยที่สุด ทั้งนี้วิถีแสงบนโครงข่ายวงแหวนสามารถเลือกเส้นทางส่งผ่านได้สองเส้นทางคือ ทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา การกำหนดให้ทุกวิถีแสงใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเสมอไม่ใช่วิธีที่เหมาะสม เพราะในบางกรณีเส้นทางที่ยาวกว่าช่วยหลีกเลี่ยงกิ่งเชื่อมที่มีวิถีแสงคับคั่งและทำให้ทุกกิ่งเชื่อมมีปริมาณการครอบครองความยาวคลื่นของวิถีแสงใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาประโยชน์ของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ซึ่งพบว่าโดยทั่วไปสามารถช่วยลดจำนวนความยาวคลื่นได้เพียงเล็กน้อย

ในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง ได้แบ่งการออกแบบเป็น 2 วิธีคือ วิธีที่ทราฟฟิกในคู่โนดเดียวกันถูกส่งผ่านวงแหวนวงเดียวกัน และวิธีที่ทราฟฟิกในคู่โนดเดียวกันสามารถส่งผ่านวงแหวนที่แตกต่างกัน เทคนิคที่ใช้ในการออกแบบได้แก่ exhaustive search, genetic algorithm และ heuristic algorithm วิธี exhaustive search ให้ผลตอบที่ดีที่สุด แต่ใช้ได้กับโครงข่ายที่มีขนาดเล็กมากไม่เกิน 5 โนด ส่วนวิธี genetic algorithm สามารถใช้แก้ปัญหาที่มีขนาดไม่ใหญ่มากได้ โดยใช้ได้ดีกับการออกแบบระบบที่ทราฟฟิกในคู่โนดเดียวกันถูกส่งผ่านวงแหวนวงเดียวกัน สำหรับวิธี heuristic algorithm ที่พัฒนาขึ้นใช้ได้ดีกับโครงข่ายที่ทราฟฟิกในคู่โนดเดียวกันสามารถส่งผ่านวงแหวนที่แตกต่างกัน วิธีนี้มีข้อดีคือสามารถหาผลตอบที่ดีพอควรภายในเวลาที่สั้นกว่าวิธีอื่น จึงเหมาะสมกับการนำมาใช้ออกแบบโครงข่ายขนาดใหญ่ได้ นอกจากนี้ยังได้ทดสอบและเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยโครงสร้างวงแหวนหลายวงกับวิธีการออกแบบโครงข่ายแบบเมช ผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าวิธีการแบบวงแหวนหลายวงโดยส่วนใหญ่มีต้นทุนที่มากกว่าแบบเมชไม่มากนัก

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต สิทธิชัย ลีลานันท์นุกูล
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ
ปีการศึกษา 2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4070460621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING / ROUTING / WAVELENGTH ALLOCATION / MULTI-RING / WAVELENGTH CONVERSION

SITHICHAI LEELANUNNUKUL : THESIS TITLE. (APPLYING ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION OF A MULTI-WAVELENGTH ALL-OPTICAL RING-TOPOLOGY NETWORK TO A MESH-TOPOLOGY NETWORK) THESIS ADVISOR: DR.LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ, THESIS COADVISOR : PROF. DR.PRASIT PRAPINMONGKOLKARN, 129 pp. ISBN 974-334-904-9.

This thesis proposes a design of routing and wavelength allocation in all-optical multi-wavelength networks, both single-ring and multi-ring topologies. In case of the single ring, the network cost is measured by the total number of wavelengths required to satisfy a given traffic demand. Three wavelength allocation techniques have been developed and they are classified according to the sequence in which lightpaths are assigned, namely random, shortest path first, and longest path first. It is found that the "longest path first" scheme offers superior performance, as it requires the least number of wavelengths in each link of the ring. In general, in the ring structure lightpath can be established in 2 directions, *i.e.* clockwise and counterclockwise. It is shown that assigning the shorter routes to lightpaths is not always appropriate. In some cases, the longer routes can be used to avoid congestion on some links and hence resulting in evenly high link utilization of all links. In addition, a study of applying wavelength conversion to enhance the system performance has been conducted. It appears that having conversion is considered not beneficial, as very small wavelength resource savings are observed.

For the multi-ring networks, two design approaches are investigated. In the first approach, all traffic between a node pair must be transferred over the same ring, whereas in the second approach these traffic are allowed to be distributed over different rings. Three optimization techniques, namely exhaustive search, genetic algorithm and heuristic algorithm, are applied. The exhaustive search provides optimal results, but it is useful for very small networks, no larger than 5 nodes. The genetic algorithm is applicable to medium networks and particularly suitable for the first design approach. The heuristic algorithm is specifically designed for the second approach. Its key advantage lies in the low complexity, making it a useful technique for large scale network design. In addition, the cost comparison between the multi-ring design scheme and the mesh design counterpart is carried out. Based on the initial results, it is shown that cost differences are not substantial.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งของ อ. ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ศ. ดร.ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด และ เนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากกองทุน Telecommunication Consortium จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาเอก เพื่อน ๆ และ รุ่นน้องในห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าสื่อสารทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ด้วยดี ขอขอบคุณอย่างสูง นายศิริชัย อารีวานิช, นส.ธัญพร เอี่ยมวสันต์, นายเจริญชัย บวรธรรมรัตน์ ซึ่งอยู่ในกลุ่มวิจัยเดียวกันที่ให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำ ตลอดการวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินรวมทั้งครอบครัวซึ่งคอยเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 4

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

2 ส่วนประกอบและคุณลักษณะของโครงข่ายใยแก้วนำแสงระบบ WDM 6

2.1 กล่าวนำ 6

2.2 ส่วนประกอบของโครงข่ายใยแก้วนำแสงระบบ WDM 6

2.3 การแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงที่โนดใด ๆ ระหว่างเส้นทาง 9

2.4 การป้องกันโครงข่ายล่ม 11

3 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายแบบวงแหวน 13

3.1 เงื่อนไขเริ่มต้นของโครงข่ายแบบวงแหวน 14

3.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุด 16

3.3 ตัวอย่างการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุด 18

3.4 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน 26

3.5 ตัวอย่างการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน 29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6 ผลของอันดับในการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสง 38
3.6.1 เมื่อโนดไม่มีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสง 39
3.6.2 เมื่อโนดมีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสง 44
3.6.3 เวลาที่ใช้ในการจัดสรรความยาวคลื่น 46
3.7 ผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุด 48
3.7.1 ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม 50
3.7.2 ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม 57
3.8 ผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน 63
3.8.1 ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม 63
3.8.2 ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม 72

4 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายแบบเมชในรูปแบบวงแหวนหลายวง 79
4.1 แนวความคิดพื้นฐาน 79
4.1.1 โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช 79
4.1.2 โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน 79
4.1.3 มูลเหตุในการแปลงโครงข่ายแบบเมชเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง 79
4.2 การแปลงโครงข่ายแบบเมชเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง 83
4.3 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี exhaustive search 89
4.4 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี genetic algorithm 90
4.4.1 กระบวนการ genetic algorithm 90
4.4.2 การจัดสรรวงแหวนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วย GA 94
4.5 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm 98
4.6 ผลจากขนาดและดัชนีการต่อถึงกันของโครงข่าย 101
4.7 ผลการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี exhaustive search 103
4.7.1 ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม 104
4.7.2 ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม 106
4.7.2.1 ไม่กระจายทราฟฟิก 106
4.7.2.2 กระจายทราฟฟิก 107

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.8 ผลการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี genetic algorithm 109
4.8.1 ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการ GA 110
4.8.1.1 วิธีการคำนวณค่าความเหมาะสม 110
4.8.1.2 จำนวนครั้งของการลองและขนาดของประชากร 112
4.8.1.3 จำนวนโครงสร้างเริ่มต้น 114
4.8.2 ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม 115
4.8.3 ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม 116
4.9 ผลการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm 118

5 สรุปและข้อเสนอแนะ 121
5.1 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายแบบวงแหวน 121
5.1.1 ผลของอันดับในการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสง 121
5.1.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุด 122
5.1.3 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน 122
5.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายแบบเมชในรูปแบบวงแหวนหลายวง 123
5.2.1 ผลจากขนาดและดัชนีการต่อถึงกันของโครงข่าย 124
5.2.2 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี exhaustive search 124
5.2.3 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี genetic algorithm 124
5.2.4 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm 125
5.3 ข้อเสนอแนะ 126

รายการอ้างอิง 127
ประวัติผู้เขียน 129

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 คู่โนดและเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดของวงแหวนขนาด 6 โนด 15
ตารางที่ 3.2 เส้นทางทุกคู่โนดของวงแหวนขนาด 5 โนดด้วยวิธีการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด 17
ตารางที่ 3.3 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC โดยจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดก่อน 23
ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มของวงแหวนขนาด 5 โนด 24
ตารางที่ 3.5 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, SP, NWC 25
ตารางที่ 3.6 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, SP, WC 26
ตารางที่ 3.7 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 6 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC 29
ตารางที่ 3.8 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 6 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, AP, NWC 31
ตารางที่ 3.9 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 6 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, WC 32
ตารางที่ 3.10 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 6 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, AP, WC 33
ตารางที่ 3.11 เส้นทางและความยาวคลื่นที่ถูกจัดสรรระหว่างกระบวนการจัดสรรเส้นทางวิธี AP ของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, NWC 34
ตารางที่ 3.12 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, AP, NWC 35
ตารางที่ 3.13 เส้นทางและความยาวคลื่นที่ถูกจัดสรรระหว่างกระบวนการจัดสรรเส้นทางวิธี AP ของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, WC 36
ตารางที่ 3.14 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, AP, WC 37
ตารางที่ 3.15 การเปรียบเทียบผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธีของวงแหวนขนาด 3-100 คู่โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC 39

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 3.16 ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธีของวงแหวนขนาด 3-100 คู่โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, WC 45
ตารางที่ 3.17 การคำนวณผลรวมจำนวนฮ็อพของทุกวิถีแสง 49
ตารางที่ 3.18 การเปรียบเทียบผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นและเวลาที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างแบบ NWC และ WC 50
ตารางที่ 3.19 การเปรียบเทียบผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นและเวลาที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีการกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอนระหว่างแบบ NWC และ WC 64
ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 4.8 102
ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างชุดของวงแหวนที่แต่ละคู่โนดเลือกของโครงข่าย N(4,6) ในรูปที่ 4.8 105
ตารางที่ 4.3 ทราฟฟิกทดสอบแบบไม่ยูนิฟอร์มของโครงข่ายขนาด 4 โนด 106
ตารางที่ 4.4 ทราฟฟิกทดสอบแบบไม่ยูนิฟอร์มของโครงข่ายขนาด 5 โนด 106
ตารางที่ 4.5 ทราฟฟิกทดสอบแบบไม่ยูนิฟอร์มของโครงข่ายขนาด 6 โนด 107
ตารางที่ 4.6 ผลตอบของโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 4.8 ด้วยทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มและไม่มีการกระจายทราฟฟิก 107
ตารางที่ 4.7 ผลตอบของโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 4.8 ด้วยทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มและมีการกระจายทราฟฟิก 108
ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบวิธีการคำนวณค่าความเหมาะสมที่มีผลต่อความจุ 111
ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการลองที่มีผลต่อความจุ 113
ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบขนาดของประชากรที่มีผลต่อความจุ 113
ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบจำนวนโครงสร้างเริ่มต้นในประชากรรุ่นแรกที่มีผลต่อความจุ 114
ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์และความจุของโครงข่ายทดสอบที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม 115
ตารางที่ 4.13 ทราฟฟิกทดสอบแบบไม่ยูนิฟอร์มของโครงข่าย EuroCore และ New Jersey 116
ตารางที่ 4.14 ทราฟฟิกทดสอบแบบไม่ยูนิฟอร์มของโครงข่าย NSFNet 117
ตารางที่ 4.15 พารามิเตอร์และความจุของโครงข่ายทดสอบที่มีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มและไม่มีการกระจายทราฟฟิก 117

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.16 พารามิเตอร์และความจุของโครงข่ายทดสอบที่มีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มและมีการกระจายทราฟฟิก 118
ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบความจุของโครงข่ายทดสอบแบบวงแหวนหลายวงของวิธี GA และ HA 119
ตารางที่ 4.18 การเปรียบเทียบความจุของโครงข่ายทดสอบแบบวงแหวนหลายวงและเมช 119

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ประเภทของสวิตช์ 7
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างของโนดในโครงข่ายระบบ WDM แบบ WXC 8
รูปที่ 2.3 โนดที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 9
รูปที่ 2.4 โนดที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 9
รูปที่ 2.5 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของทราฟฟิกระหว่างโนด A-B และ C-D 10
รูปที่ 2.6 ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 10
รูปที่ 2.7 การป้องกันโครงข่ายของ dual-fiber ring ด้วยการสวิตช์ 11
รูปที่ 3.1 การอ้างอิงโนดและกิ่งเชื่อมของวงแหวนขนาด 6 โนด 14
รูปที่ 3.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP; NWC โดยจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดก่อน 19
รูปที่ 3.3 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC โดยจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดก่อน 21
รูปที่ 3.4 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, WC โดยจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดก่อน 22
รูปที่ 3.5 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน 28
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธี Rnd, SPF, LPF 42
รูปที่ 3.7 ผลของการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธี SPF และ LPF ของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC 44
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างผลของการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธี SPF และ LPF ของวงแหวนขนาด 5 โนดที่มีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม 46
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนความยาวคลื่นของวิธี SP/LPF เมื่อทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม 54
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นของวิธี SP/LPF เมื่อทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม 56
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มที่มีบางคู่โนดมีทราฟฟิกมากกว่าปกติ 57
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 59

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.13 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร SP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 60
รูปที่ 3.14 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร SP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 61
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของของการจัดสรร SP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 62
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของของการจัดสรร SP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 62
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนความยาวคลื่นของวิธี AP/LPF เมื่อทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม 67
รูปที่ 3.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนความยาวคลื่นที่ลดลงของวิธี AP/LPF เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี SP/LPF และทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม 68
รูปที่ 3.19 กราฟแสดงจำนวนครั้งของการจัดสรรของวิธี AP/LPF เมื่อทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม 70
รูปที่ 3.20 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการจัดสรรของวิธี AP/LPFเมื่อทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม 71
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร AP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 73
รูปที่ 3.22 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร AP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 73
รูปที่ 3.23 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร AP/LPF ที่ลดลงจากวิธี SP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 74
รูปที่ 3.24 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร AP/LPF ที่ลดลงจากวิธี SP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 74
รูปที่ 3.25 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของของการจัดสรร AP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 76
รูปที่ 3.26 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของของการจัดสรร AP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 76

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.27 กราฟแสดงจำนวนครั้งของการจัดสรรวิธี AP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 78
รูปที่ 3.28 กราฟแสดงจำนวนครั้งของการจัดสรรวิธี AP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ 78
รูปที่ 4.1 สวิตช์ภายในโนดที่มีจุดตัดของทราฟฟิกของโครงข่ายแบบเมช 80
รูปที่ 4.2 ช่องสัญญาณทราฟฟิก ณ โนดที่มีจุดตัดของทราฟฟิกจากวงแหวนหลายวง 81
รูปที่ 4.3 โครงข่ายแบบเมชที่ไม่สามารถจัดให้เป็นแบบวงแหวนหลายวงได้ทั้งหมด 82
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง 83
รูปที่ 4.5 วงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดของโครงข่ายในรูปที่ 4.4 84
รูปที่ 4.6 แผนภาพการทำงานของกระบวนการ GA 91
รูปที่ 4.7 แผนภาพการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm 100
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างของโครงข่ายขนาดเล็ก 101
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างของโครงข่ายจริงที่ใช้ในการทดสอบ 110

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงระยะเวลาไม่นานมานี้ การส่งข้อมูลทางแสงเป็นเทคโนโลยีที่สามารถส่งข้อมูลในระยะทางไกล ๆ ผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งมีผลกระทบต่อสัญญาณข้อมูลน้อยกว่าระบบที่ใช้การส่งข้อมูลทางไฟฟ้า โดยเฉพาะการทนต่อสัญญาณรบกวนที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะเดียวกันความต้องการส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายเพื่อใช้งานด้านการสื่อสารข้อมูลประเภทต่าง ๆ มีการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะข้อมูลที่เป็นแบบมัลติมีเดีย (multimedia) และแบบเวลาจริง (real time) ซึ่งต้องการคุณภาพการบริการ (Quality of Service) สูงพอในระดับหนึ่งที่ยอมรับได้ ส่งผลให้เกิดความต้องการแบนด์วิดท์ขนาดใหญ่มาก จำเป็นจะต้องมีระบบสื่อสารที่ใช้อุปกรณ์ทางแสงทั้งหมดและสามารถส่งข้อมูลขนาดใหญ่ผ่านโครงข่ายที่มีความจุสูงมาก เช่น SONET, ATM ฯลฯ ระหว่างพื้นที่ในบริเวณกว้างได้ ปริมาณทราฟฟิกขนาดใหญ่นี้ทำให้ต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากขึ้นรวมทั้งสวิตช์มีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น จึงต้องมีการเพิ่มความจุของเส้นใยแก้วนำแสงมากขึ้นจากเดิมอีกโดยการทำให้แต่ละเส้นใยแก้วนำแสงมีจำนวนช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น

วิธีการมัลติเพล็กซ์ (multiplexing) ต่าง ๆ ถูกนำมาใช้เพิ่มความจุของเส้นใยแก้วนำแสงโดยการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้นและทำการมัลติเพล็กซ์ข้อมูลจำนวนหลายช่องสัญญาณเหล่านี้รวมกันแล้วส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน เมื่อผู้รับได้รับสัญญาณที่ถูกมัลติเพล็กซ์นั้นก็จะดีมัลติเพล็กซ์ (demultiplexing) แยกช่องสัญญาณเดิมหลายช่องสัญญาณเหล่านั้นกลับคืนออกมา วิธีการมัลติเพล็กซ์ที่รู้จักกันโดยทั่วไปมีหลายวิธีได้แก่ TDM (Time Division Multiplexing), FDM (Frequency Division Multiplexing) เป็นต้น ระบบ TDM สามารถมัลติเพล็กซ์สัญญาณใน electrical domain เท่านั้น ในขณะที่ระบบ FDM หรืออีกนัยหนึ่งในระบบที่ทำงานด้วยแสงคือ WDM (Wavelength Division Multiplexing) สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ทั้งใน electrical domain และ optical domain [1] ดังนั้น ระบบมัลติเพล็กซ์แบบ WDM ซึ่งเป็นระบบที่รวมสัญญาณข้อมูลหลาย ๆ ความยาวคลื่นหรือรวมสัญญาณแสงหลาย ๆ สีเข้าด้วยกันแล้วส่งออกไปในเส้นใยแก้วนำแสงเดียวจึงถูกนำมาใช้เพื่อช่วยลดปริมาณเส้นใยแก้วนำแสงและขนาดของสวิตช์ของโครงข่าย นอกจากนี้ อุปกรณ์ภายในโครงข่ายที่ส่งสัญญาณด้วยความเร็วสูงและมีความจุสูงจึงควรทำงานในรูปของสัญญาณแสงทั้งหมดโดยไม่มีส่วนประกอบใดที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเรียกโครงข่ายในลักษณะนี้ว่า all-optical network โดยจะกล่าวถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงข่ายใยแก้วนำแสงในบทถัดไป

ในโครงข่ายความจุสูงที่สามารถส่งข้อมูลขนาดใหญ่ในเวลาอันสั้น เช่น การส่งข้อมูลถึงกันระหว่างจังหวัดใหญ่ ๆ ในประเทศมักจะมีจำนวนโนดไม่มากนักเมื่อเทียบกับการเชื่อมต่อถึงกันของโครงข่ายขนาดเล็กจำนวนมาก โครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีจำนวนโนดน้อยนี้โดยมากเชื่อมต่อถึงกันเป็นแบบวงแหวนเพราะเป็นโครงสร้างที่สามารถติดต่อถึงกันได้หมดทุกคู่โนดและสามารถแก้ไขปัญหาเมื่อระบบทำงานไม่ถูกต้องได้ดี เนื่องจากไม่มีความซับซ้อน มีเพียง 2 ทิศทางที่เป็นไปได้เท่านั้น คือ ทิศตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา ทำให้มีการจัดการระบบที่ง่ายกว่า ทั้งนี้ การส่งผ่านสัญญาณข้อมูลเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายแบบวงแหวนใช้เพียง MUX/DEMUX ไม่จำเป็นต้องใช้ optical cross-connect switch ซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าและมีต้นทุนที่สูงกว่า นอกจากนี้ ในกรณีที่อุปกรณ์ที่โนดใดโนดหนึ่งไม่ทำงานหรือเส้นใยแก้วนำแสงระหว่างกิ่งเชื่อม (link) ใดกิ่งหนึ่งถูกตัดขาด โครงสร้างแบบวงแหวนสามารถที่จะกลับเส้นทางเป็นอีกทิศทางที่ไม่ให้ผ่านกิ่งเชื่อมนั้นได้ทันที ในขณะที่โครงสร้างแบบเมชจะต้องมีการหาเส้นทางใหม่ ถึงแม้ว่าจะมีเส้นทางใหม่ให้เลือกมากกว่า (มีความยืดหยุ่นของเส้นทางที่เป็นไปได้มากกว่า) แต่ต้องเสียเวลาในการคำนวณด้วยซอฟท์แวร์เพื่อหาเส้นทางของทราฟฟิกทั้งหมดภายในโครงข่ายที่มีปัญหาใหม่และต้องใช้เวลานานในการหาเส้นทางที่ดีที่สุดของแต่ละทราฟฟิกของทุกคู่โนด (ทราฟฟิกในคู่โนดเดียวกันไม่จำเป็นต้องถูกส่งผ่านเส้นทางเดียวกัน) ซึ่งต่างกับโครงสร้างแบบวงแหวนที่ใช้อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ก็สามารถแก้ไขระบบโดยการกลับทิศทางการส่งได้เลยและใช้เวลาน้อยกว่ามาก เวลาที่ใช้จะยิ่งแตกต่างกันเมื่อโครงข่ายมีจำนวนโนดหรือขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้น โครงสร้างแบบวงแหวนจึงช่วยทำให้โครงข่ายมีเสถียรภาพและมีความไว้ใจได้มากยิ่งขึ้น

ข้อมูลที่ถูกส่งระหว่างคู่โนดผ่านเส้นใยแก้วนำแสงจากต้นทางถึงปลายทางเรียกว่าช่องสัญญาณทราฟฟิก (traffic channel) ซึ่งองค์ประกอบของวิถีแสง (Light Path) ในช่องสัญญาณทราฟฟิกนั้น ได้แก่ เส้นทางและความยาวคลื่นที่วิถีแสงนั้นครอบครองโดยเป็นไปตามที่ถูกกำหนดไว้ ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านแต่ละโนดระหว่างเส้นทางจะมีสวิตช์คอยเปลี่ยนเส้นทางของข้อมูลให้ไปยังปลายทางที่ต้องการ การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่โครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและแบบที่โครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ถ้าโนดใด ๆ ระหว่างเส้นทางของแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกมีอุปกรณ์สำหรับแปลงผันความยาวคลื่นอยู่ วิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกไม่จำเป็นต้องใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดเส้นทาง ในทางตรงกันข้าม ถ้าโนดใด ๆ ระหว่างเส้นทางไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นอยู่ วิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกต้องใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดเส้นทาง จึงเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการจัดสรรทรัพยากรของโครงข่ายนี้ ในขณะที่การจัดสรรความยาวคลื่นของโครงข่ายที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ค่อยมีความสำคัญจึงเน้นหนักในส่วนของการจัดสรรเส้นทางเท่านั้น การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับแต่ละช่อง

สัญญาณทราฟฟิกของวงแหวนอย่างมีประสิทธิภาพ ต้องทำให้จำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดที่รองรับได้ในแต่ละกิ่งเชื่อมของวงแหวนถูกครอบครองโดยวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกเป็นจำนวนใกล้เคียงกันที่สุดในแต่ละกิ่งเชื่อม อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ที่สนับสนุนระบบ WDM และสามารถแปลงผันความยาวคลื่นได้มีค่าต้นทุนที่สูง สัญญาณถูกลดทอนลงและมีการประวิงเวลาเกิดขึ้น รวมทั้งมีความซับซ้อนมากกว่าทั้งในการออกแบบและดูแลระบบ ดังนั้น จึงต้องมีการออกแบบระบบเพื่อให้ใช้จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถรองรับได้ในแต่ละกิ่งเชื่อมของโครงข่ายอย่างคุ้มค่าที่สุด

ผลจากข้อดีของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนดังที่กล่าวมาแล้วนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในการจัดสรรทรัพยากรในโครงข่ายแบบเมชโดยแปลงให้อยู่ในรูปแบบของการจัดสรรทรัพยากรในโครงข่ายแบบวงแหวนหลาย ๆ วงซึ่งประกอบรวมกันเป็นโครงสร้างแบบเมช วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการจัดสรรทรัพยากรภายในโครงข่ายแบบวงแหวนในทางกายภาพหลาย ๆ วงโดยทำให้มีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นของโครงข่ายในแต่ละกิ่งเชื่อมอย่างคุ้มค่าที่สุด อย่างไรก็ตาม การแปลงโครงสร้างแบบเมชเป็นวงแหวนหลายวง อาจจะไม่สามารถกระทำได้หมดทั้งโครงข่าย ถ้าโครงข่ายมีโนดที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายย่อยข้างเคียงด้วยกิ่งเชื่อมเดียว (เป็นกิ่งที่ยื่นออกมาโดด ๆ) หรือ เป็นโครงข่ายย่อยมากกว่า 1 โครงข่ายที่ต่อถึงกันด้วยกิ่งเชื่อมเพียงกิ่งเดียว

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อนำไปใช้ออกแบบการจัดสรรทรัพยากรให้กับโครงข่ายที่มีการส่งข้อมูลในรูปของสัญญาณแสงทั้งหมด (All-optical Network) รวมถึงโครงข่ายที่มีการใช้ระบบ WDM (Wavelength Division Multiplexing) ซึ่งเป็นระบบที่รวมช่องสัญญาณหลายความยาวคลื่นส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกัน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการเปลี่ยนรูปลักษณ์ของโครงข่ายแบบเมชโดยทั่วไปให้เป็นโครงข่ายที่ประกอบด้วยโครงสร้างแบบวงแหวนหลาย ๆ วงซ้อนกันแทน อันเนื่องมาจากประสิทธิภาพในด้านการจัดการระบบที่ดีกว่าของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน โดยพิจารณาการจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละเส้นทางระหว่างแต่ละคู่โนดเพื่อให้มีการใช้ทรัพยากรคือความยาวคลื่นของโครงข่ายอย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่จะเป็นไปได้ นอกจากนี้ ยังพิจารณาถึงผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทางด้วยว่ามีความสามารถในการลดจำนวนความยาวคลื่นได้มากน้อยเพียงใด

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 เป้าหมายของวิทยานิพนธ์

1. จัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นภายในวงแหวนเดี่ยว 1 วง ซึ่งในแต่ละคู่โนดมีเพียง 2 ทิศทางเท่านั้นให้มีประสิทธิภาพที่ดี โดยผลตอบคือจำนวนความยาวคลื่นภายในวงแหวนเดี่ยวที่ต้องใช้ต่อหนึ่งกิ่งเชื่อมที่มีค่าน้อยที่สุด
2. แปลงโครงข่ายแบบเมชให้อยู่ในรูปลักษณ์ของวงแหวนหลายวง ซึ่งในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนแต่ละวงที่รวมกันเป็นโครงสร้างแบบเมชนั้น ใช้ผลตอบที่ได้จากการศึกษาในข้อที่ 1 มาใช้ ผลตอบที่ได้คือค่าความจุซึ่งเป็นผลรวมของจำนวนความยาวคลื่นรวมในทุกกิ่งเชื่อมของทุกวงแหวนรวมกันและเปรียบเทียบผลตอบที่ได้กับผลที่ได้จากการจัดสรรโครงข่ายแบบเมชโดยตรง

1.3.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. โดยทั่วไป ค่าผลตอบที่ต้องการคือต้นทุนของโครงข่ายซึ่งอาจจะหมายถึงความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง, ราคาของสวิตช์ หรือ อุปกรณ์อื่น ๆ ซึ่งเป็นต้นทุนที่ไม่สามารถทราบค่าแน่นอน แต่จำนวนความยาวคลื่นนั้นเป็นค่าที่สามารถบ่งบอกแนวโน้มโดยรวมของต้นทุนได้ เช่น โครงข่ายที่ใช้จำนวนความยาวคลื่นมาก ต้องมีขนาดของสวิตช์ (กรณีโครงข่ายแบบเมช), หรือ MUX/DEMUX ที่ใหญ่กว่า และใช้ปริมาณเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า ทำให้ปริมาณต้นทุนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น ผลตอบจึงอยู่ในรูปของจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่าย
2. พิจารณาทราฟฟิกทั้งแบบยูนิฟอร์มที่มีปริมาณความต้องการทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดเท่ากันหมด และแบบไม่ยูนิฟอร์มที่มีปริมาณทราฟฟิกในแต่ละคู่โนดไม่เท่ากัน
3. พิจารณาผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในแต่ละโนดว่าสามารถลดจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้ได้มากน้อยเพียงใด

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

แบ่งการศึกษาและการหาผลตอบตามเป้าหมาย 2 ข้อที่กล่าวมาแล้วดังนี้

1. ศึกษาและคิดค้นวิธีการต่าง ๆ ที่ทำให้ผลตอบที่ได้ของโครงข่ายมีประสิทธิภาพที่สุด และเขียนเป็นอัลกอริทึมของการหาผลตอบ
2. ทดสอบอัลกอริทึมในแต่ละวิธีว่าอัลกอริทึมไหนดีที่สุด โดยการเขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบ
3. ทดสอบโปรแกรมกับโครงข่ายตัวอย่าง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. นำผลที่ได้จากเป้าหมายในข้อที่ 2 ไปเปรียบเทียบกับวิธีการที่จัดสรรทรัพยากรของโครงข่ายแบบเมชโดยตรง
5. สรุปผล และ เขียนรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ศึกษาและเรียนรู้ส่วนประกอบและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ all-optical network รวมทั้งวิธีการหาค่าผลตอบในการแก้ปัญหาแบบต่าง ๆ
2. นำไปออกแบบโครงข่ายความเร็วสูงกับงานจริงในอนาคตได้
3. ทำให้การจัดการโครงข่ายในการใช้งานของโครงข่ายแบบเมชสะดวกขึ้นจากการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน
4. นำหลักการที่ได้ไปประยุกต์ใช้หาผลตอบในการจัดสรรทรัพยากรกับระบบอื่น ๆ เช่น การจราจร การจองตั๋ว หรือ การลงทะเบียนเรียนรายวิชา เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ส่วนประกอบและคุณลักษณะของโครงข่ายใยแก้วนำแสงระบบ WDM

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบัน ความต้องการในการส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายในบริเวณกว้างทั่วโลกมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ระบบที่มีความจุสูงและสามารถรองรับการส่งและรับข้อมูลปริมาณมากในเวลาอันรวดเร็วถูกพัฒนาขึ้นไปตามลำดับ ระบบโครงข่ายที่มีทุกอุปกรณ์ทำงานอยู่ในรูปของแสงทั้งหมดช่วยลดปัญหาจากการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและช่วยให้สามารถส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแก้วนำแสงไปในระยะทางไกลโดยมีการลดทอนของสัญญาณน้อยมากและมีความไว้ใจได้ของข้อมูลสูงหรือมีอัตราบิตผิดพลาดต่ำ ความเร็วในการส่งข้อมูลมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นในระดับที่มีหน่วยเป็น Tb/s [2] ระบบมัลติเพล็กซ์แบบหลายความยาวคลื่นช่วยเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณในการส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงทำให้สามารถส่งพร้อมกันหลายช่องสัญญาณด้วยความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างงานวิจัยทั่วโลกของโครงข่ายที่ทำงานในรูปแบบของแสงทั้งหมด เช่น ใน USA ประกอบด้วยโครงข่าย MONET (Multiple-wavelength Optical Networking) [3], AON (All-Optical Networks) [4], ONTC (The Optical Network Technology Consortium) [5] หรือ ในยุโรป เช่น โครงข่าย OPEN (Optical Pan European Network) ซึ่งเป็นโครงการหนึ่งของ ACTS (Advanced Communications Technologies and Services) [6] นอกจากนี้ ในญี่ปุ่นก็มีโครงข่าย NTT เป็นต้น

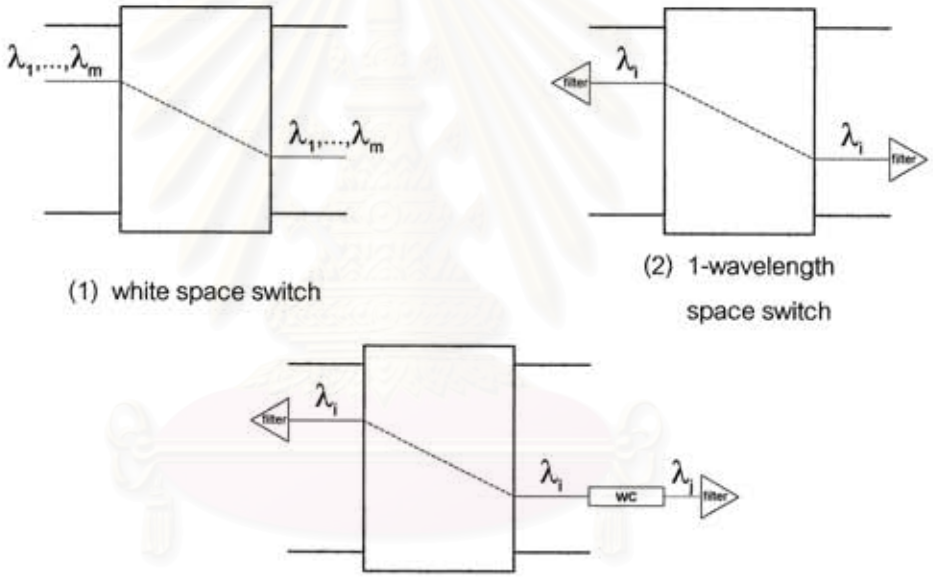
2.2 ส่วนประกอบของโครงข่ายใยแก้วนำแสงระบบ WDM

โครงข่ายใยแก้วนำแสงมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้

1. Optical Fiber เป็นเส้นใยแก้วที่ใช้สำหรับนำสัญญาณแสงที่ทนต่อสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี
2. Optical Source เนื่องจากเป็นโครงข่ายที่มีตัวนำเป็นแสง ดังนั้น จึงต้องมีการแปลงสัญญาณข้อมูลเดิมที่เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าให้กลายเป็นสัญญาณแสงสำหรับส่งผ่านเข้าไปในโครงข่าย อุปกรณ์เหล่านี้ได้แก่ LEDs (Light Emitting Diodes) หรือ LASER เป็นต้น
3. Optical Detector เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณแสงแล้วแปลงกลับเป็นสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าเดิม เช่น photodiodes

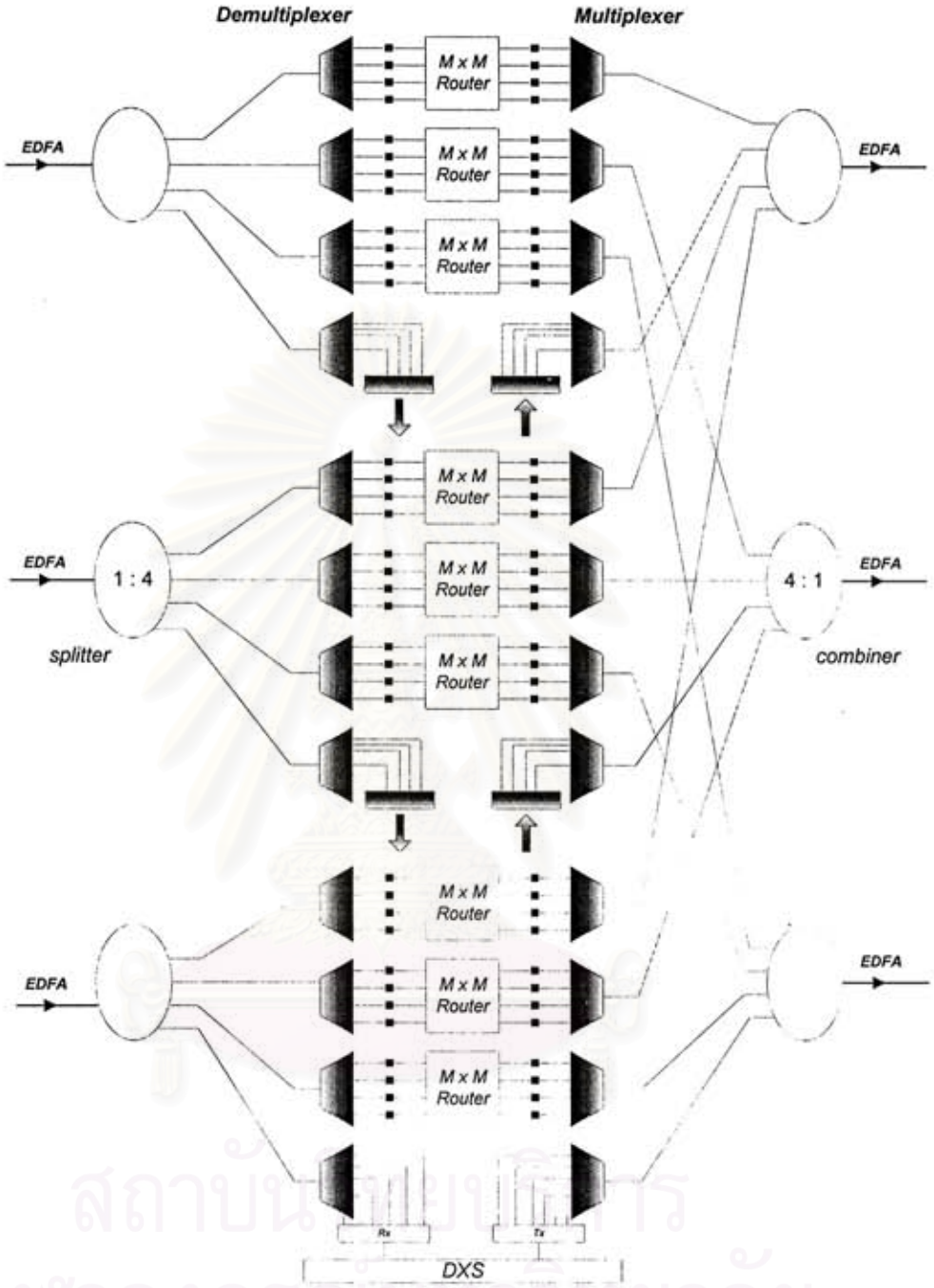
4. MUX/DEMUX เป็นอุปกรณ์ที่รวม/แยกระหว่างสัญญาณแสงสีหลายช่องสัญญาณกับสัญญาณแสงขาวที่ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสง
5. Optical Transmitter เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ (coupling) สัญญาณแสงที่ได้จาก optical source ส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง
6. Amplifier เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและสร้างสัญญาณแสงเดิมที่ถูกลดทอนขึ้นมาใหม่ เพื่อให้สามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากยิ่งขึ้นโดยที่เกิดการผิดพลาดของข้อมูลน้อยที่สุด หรือ มี BER (Bit Error Rate) ต่ำที่สุด

เมื่อข้อมูลที่ถูกส่งจากต้นทางไปยังปลายทางไม่ได้มีเพียงผู้ส่งและผู้รับเดียว จึงต้องมีอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งคือสวิตช์ (cross-connect switch) ที่คอยจัดการข้อมูลให้ส่งไปในทิศทางที่ต้องการ โดยทั่วไปสวิตช์ในแต่ละโนดจะแบ่งได้ 3 รูปแบบ [7] ดังในรูปที่ 2.1 คือ



รูปที่ 2.1 ประเภทของสวิตช์

1. เป็น space switch ธรรมดา มีเพียงการเปลี่ยนเส้นทางแต่ไม่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่น
2. เป็น space switch ของแต่ละความยาวคลื่น คล้ายกับแบบที่ 1 แต่สัญญาณด้านเข้าและด้านออกมีเพียงความยาวคลื่นเดียว
3. เป็นสวิตช์ที่เปลี่ยนเส้นทางและความยาวคลื่นของสัญญาณในคราวเดียวกัน เป็นแบบที่สามารถเปลี่ยนได้ทั้งเส้นทางและความยาวคลื่น แต่จะมีความซับซ้อนมากกว่า

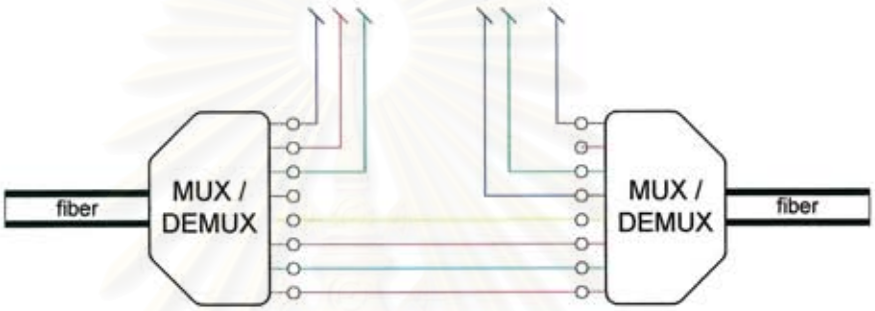


รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างของโนดในโครงข่ายระบบ WDM แบบ WXC

รูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างโครงสร้างเรียกว่า wavelength crossconnect (WXC) [8] ของโนดในโครงข่ายแบบ WDM จำนวน M ความยาวคลื่นต่อหนึ่งเส้นใยแก้วนำแสงและมีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง N เส้นต่อหนึ่งโนด สัญญาณจากเส้นใยแก้วนำแสงถูกขยายด้วย Erbium-doped fiber amplifier (EDFA) และถูกแยกออกด้วยตัวแยก (splitter) เป็นจำนวน N ส่วน โดยใช้ star

coupler จากนั้น ผ่านเข้าสู่ตัวดีมัลติเพล็กซ์ (demultiplexer) เพื่อแยกสัญญาณแสงขาวออกเป็นแต่ละความยาวคลื่น แสงแต่ละสีที่ได้ถูกส่งผ่าน WXC เพื่อแปลงไปเป็นความยาวคลื่นที่ต้องการ ในกรณีที่ไม่มี WXC สัญญาณแสงสีอาจถูกส่งผ่านสวิตช์ที่แปลงเส้นทางแบบธรรมดาก่อนแล้วเข้าสู่ตัวแปลงผันความยาวคลื่น เมื่อมีการแปลงเส้นทางและความยาวคลื่นเรียบร้อยแล้ว สัญญาณแสงสีจะถูกรวมโดยตัวมัลติเพล็กซ์และส่งเข้าตัวรวม (combiner) ซึ่งรวมสัญญาณแสงขาวจากแต่ละเส้นใยแก้วนำแสงพร้อมกับขยายความเข้มของสัญญาณแสงที่รวมแล้วก่อนส่งต่อไป

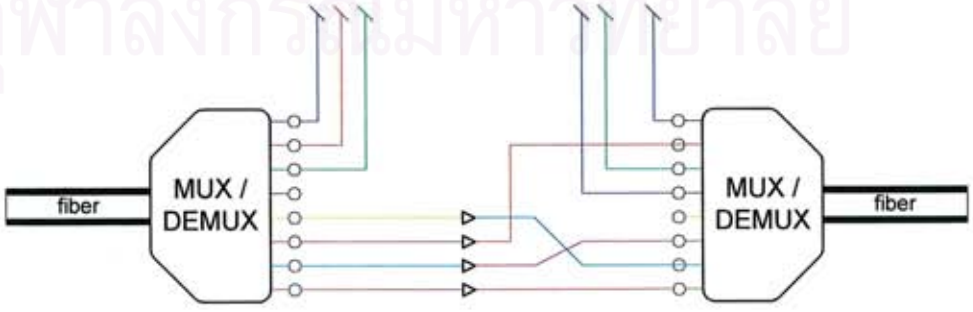
2.3 การแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงที่โนดใด ๆ ระหว่างเส้นทาง



รูปที่ 2.3 โนดที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

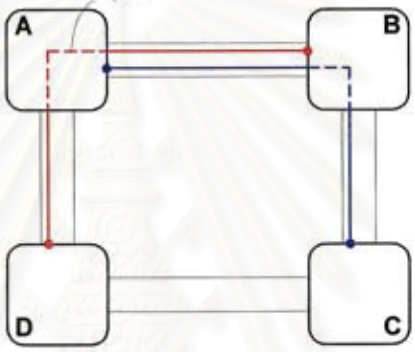
ระบบมัลติเพล็กซ์ WDM ทำให้สามารถรวมสัญญาณข้อมูลในรูปของแสงหลาย ๆ ความยาวคลื่นเป็นลำแสงเดียวแล้วส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสง สัญญาณข้อมูลที่เป็นแสงของแต่ละช่องสัญญาณเลือกใช้ค่าความยาวคลื่นหนึ่งสำหรับส่งผ่านกิ่งเชื่อมใด ๆ ระหว่างโนดสองโนด โดยทั่วไป สัญญาณข้อมูลที่เป็นแสงมักจะใช้ค่าความยาวคลื่นเดียวกันตลอดเส้นทางจากโนดต้นทางจนถึงโนดปลายทางดังรูปที่ 2.3 ด้วยวิธีนี้ โนดใด ๆ ที่อยู่ระหว่างเส้นทางไม่จำเป็นจะต้องมีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงนั้นจากค่าความยาวคลื่นหนึ่งไปเป็นอีกค่าความยาวคลื่นหนึ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



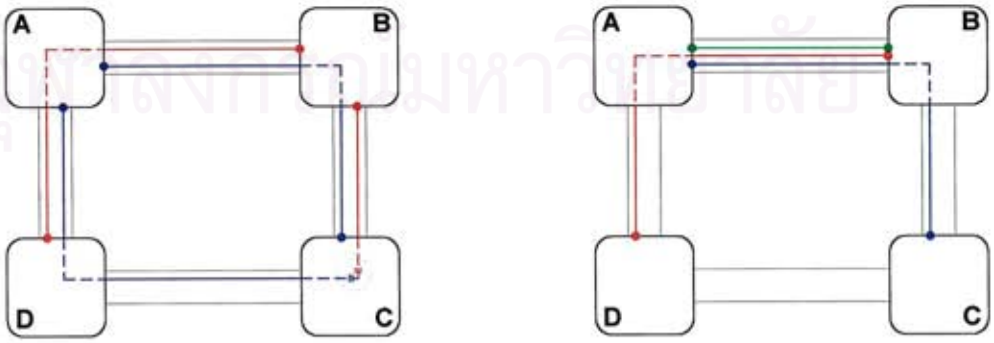
รูปที่ 2.4 โนดที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ถ้าทุกโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์ที่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นได้ โนดที่อยู่ระหว่างเส้นทางสามารถแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงใด ๆ จากค่าความยาวคลื่นหนึ่งไปเป็นอีกค่าความยาวคลื่นหนึ่งได้ดังรูปที่ 2.4 ผลของการแปลงผันความยาวคลื่นทำให้จำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้ภายในโครงข่ายลดลงได้ ตัวอย่างเช่น วงแหวนขนาด 4 โนด สมมติให้มีทราฟฟิกระหว่างโนด A และ C จำนวน 1 ช่องสัญญาณ และระหว่างโนด B และ D จำนวน 1 ช่องสัญญาณ กำหนดให้ทราฟฟิกระหว่างโนด A-C ใช้ความยาวคลื่นที่ 1 (สีน้ำเงิน) โดยใช้เส้นทางผ่านโนด B และกำหนดให้ทราฟฟิกระหว่างโนด B-D ใช้ความยาวคลื่นที่ 2 (สีแดง) โดยใช้เส้นทางผ่านโนด A (อาจจะใช้เส้นทางผ่านโนด C ก็ได้ แต่ไม่ว่าจะใช้ทิศทางใดจำเป็นจะต้องใช้ค่าความยาวคลื่นใหม่เพราะความยาวคลื่นสีน้ำเงินได้ถูกใช้ไปแล้ว) ดังนั้น โครงข่ายนี้ต้องใช้จำนวนความยาวคลื่นรวมทั้งหมด 2 ความยาวคลื่น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของทราฟฟิกระหว่างโนด A-B และ C-D

ถ้ามีทราฟฟิกเพิ่มขึ้นอีก 1 ช่องสัญญาณ คือ ระหว่างโนด A และ B จะพบว่ากรณีที่โนดมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ เส้นทางที่ต่อถึงกันโดยตรง (A-B) ถูกใช้ทั้ง 2 ความยาวคลื่นไปแล้ว แต่สามารถใช้อีกเส้นทางหนึ่งคือ A-D-C-B โดยใช้ความยาวคลื่นสีน้ำเงินระหว่าง A-D และ D-C และใช้ความยาวคลื่นสีแดงระหว่าง C-B ในกรณีนี้ จะต้องมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นระหว่างความยาวคลื่นสีแดงและสีน้ำเงินที่โนด C โดยใช้เพียง 2 ความยาวคลื่นเหมือนเดิม ดังรูปที่ 2.6(1)



(1) wavelength conversion (2) no wavelength conversion

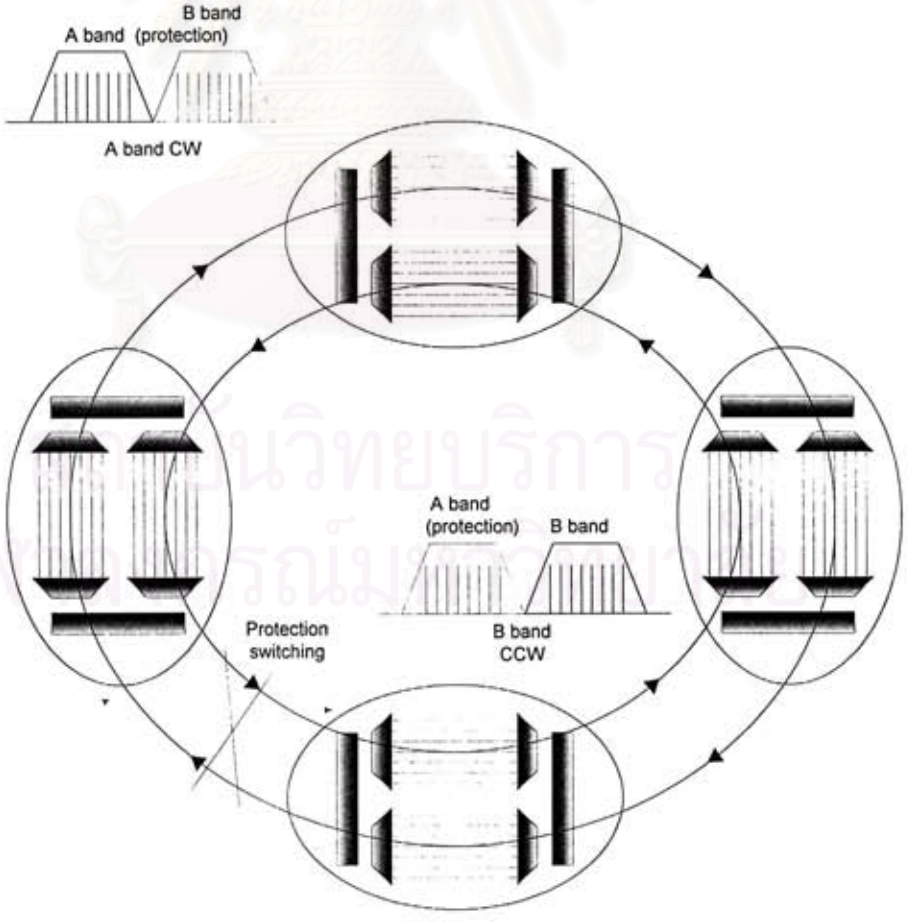
รูปที่ 2.6 ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

แต่ในกรณีที่โนดไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น จะไม่สามารถใช้ 2 ความยาวคลื่นเดิมที่มีอยู่ได้ ดังนั้น จึงต้องเพิ่มความยาวคลื่นใหม่อีก (สีเขียว) รวมทั้งหมดเป็น 3 ความยาวคลื่น ดังรูปที่ 2.6(2) แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าสามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้

อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่สนับสนุนระบบ WDM และสามารถแปลงผันความยาวคลื่นได้จะทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น สัญญาณถูกลดทอนลงรวมทั้งมีการประวิงเวลาเกิดขึ้น และมีความซับซ้อนมากกว่าทั้งในการออกแบบและดูแลระบบ ดังนั้น จึงต้องออกแบบระบบเพื่อให้สามารถใช้จำนวนความยาวคลื่นที่มีอยู่อย่างคุ้มค่าที่สุด

2.4 การป้องกันโครงข่ายล่ม

โครงข่ายแบบ all-optical เป็นโครงข่ายที่มีความจุสูง ในกรณีที่อุปกรณ์เพียงบางส่วนไม่ทำงาน ก่อให้เกิดผลกระทบค่อนข้างสูง ดังนั้น จึงต้องมีการป้องกันโครงข่ายให้พ้นจากสภาวะที่ไม่สามารถใช้งานได้ โดยทั่วไป มักใช้การเตรียมแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเพื่อให้สามารถสลับการทำงานระหว่างส่วนที่ทำงานจริงในเวลาปกติและส่วนที่สำรองไว้ในยามฉุกเฉิน



รูปที่ 2.7 การป้องกันโครงข่ายของ dual-fiber ring ด้วยการสวิตช์ [9]

จากรูปที่ 2.7 วงแหวนประกอบด้วยเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้น แต่ละเส้นเป็นการส่งในทิศทางเดียว คือ เส้นหนึ่งส่งในทิศตามเข็มนาฬิกาใช้ความถี่ย่าน A band และอีกเส้นหนึ่งส่งในทิศทวนเข็มนาฬิกาใช้ความถี่ย่าน B band ดังนั้น โครงข่ายนี้จึงสามารถส่งแบบสองทาง (duplex) ได้ เมื่อเส้นใยแก้วนำแสงถูกตัดหรือขาดแสดงดังในรูปที่ 2.7 สวิตช์สำหรับป้องกันการล่มของโครงข่ายจะต่อถึงกันระหว่างวงแหวนทั้งสองวงทั้งด้านหัวและท้าย (แสดงเป็นเส้นประ) ทำให้โครงข่ายยังคงสามารถใช้การได้แม้ว่ามีกิ่งเชื่อมหนึ่งถูกตัดขาด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

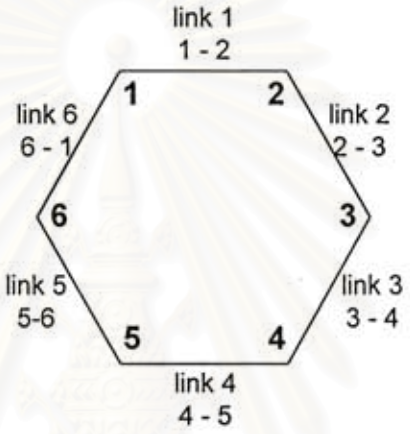
บทที่ 3
การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายแบบวงแหวน

บทนี้กล่าวถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกทั้งหมดภายในโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนที่ใช้ระบบ WDM โดยจัดสรรให้มีการใช้ความยาวคลื่นที่มีอยู่ในแต่ละกิ่งเชื่อม (link) ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ในระบบ WDM ข้อมูลสามารถถูกส่งได้มากกว่าหนึ่งความยาวคลื่นต่อหนึ่งกิ่งเชื่อมและเรียกแต่ละความยาวคลื่นสำหรับรองรับทราฟฟิกในแต่ละกิ่งเชื่อมว่าช่องสัญญาณ แต่ละกิ่งเชื่อมประกอบด้วยจำนวนช่องสัญญาณซึ่งเท่ากับจำนวนความยาวคลื่นที่สามารถรองรับทราฟฟิกจำนวนหนึ่ง ทราฟฟิกที่จะกล่าวถึงต่อไปมีหน่วยเป็นจำนวนช่องสัญญาณโดยเรียกแต่ละช่องสัญญาณที่เป็นทราฟฟิกนี้ว่าช่องสัญญาณทราฟฟิก โดยทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ครอบครองกิ่งเชื่อมเดียวกันมีค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันหรือครอบครองช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน ผลตอบที่ได้จากการจัดสรรทรัพยากรความยาวคลื่นภายในโครงข่ายแบบวงแหวนคือการแจกแจงความยาวคลื่นที่ได้รับการจัดสรรของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกและสรุปเป็นจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่จำเป็นในวงแหวนนั้น การแจกแจงความยาวคลื่นในแต่ละกิ่งเชื่อมว่าจัดสรรให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกใดบ้างนั้นคือการกำหนดว่าช่องสัญญาณทราฟฟิกหนึ่งใช้เส้นทางที่ผ่านกิ่งเชื่อมใดบ้างและได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นค่าใดในแต่ละกิ่งเชื่อมระหว่างเส้นทางนั้น โดยทุกกิ่งเชื่อมมีความยาวคลื่นสำหรับรองรับทราฟฟิกทั้งหมดเป็นจำนวน M ความยาวคลื่น และประกอบด้วยค่าความยาวคลื่น $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \ldots, \lambda_M$

ในโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน จำนวนช่องสัญญาณหรือความยาวคลื่นที่สามารถรองรับได้ในแต่ละกิ่งเชื่อมควรมีจำนวนเท่ากัน เพราะโดยทั่วไป MUX/DEMUX ที่โนดมักจะมีจำนวนทางเข้าออกระหว่างขาเข้าและขาออกเป็นจำนวนเท่ากัน ดังนั้น ผลตอบที่เป็นจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดจึงมีค่าจำนวน M ความยาวคลื่น ถึงแม้ว่าจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ครอบครองความยาวคลื่นในแต่ละกิ่งเชื่อมภายหลังการจัดสรรความยาวคลื่นอาจมีไม่เท่ากันเพราะมีช่องสัญญาณสำหรับ λ_M ในบางกิ่งเชื่อมที่ได้เตรียมไว้เป็นความยาวคลื่นค่าสุดท้ายไม่ถูกครอบครองจากช่องสัญญาณทราฟฟิก ด้วยเหตุนี้ บางความยาวคลื่นของกิ่งเชื่อมใดที่จัดเตรียมไว้และยังคงเหลือว่างอยู่โดยไม่ถูกครอบครองจากช่องสัญญาณทราฟฟิกจึงทำให้การใช้ประโยชน์ของความยาวคลื่นมีประสิทธิภาพไม่เต็มที่ ดังนั้น วิธีการจัดสรรทรัพยากรภายในวงแหวนอย่างมีประสิทธิภาพจึงถูกนำเสนอเพื่อให้โครงข่ายทั้งหมดใช้จำนวนความยาวคลื่นที่น้อยแต่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ต้องการภายในโครงข่ายได้

3.1 เงื่อนไขเริ่มต้นของโครงข่ายแบบวงแหวน

โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนขนาด N โนด มีจำนวนกิ่งเชื่อมทั้งหมด N กิ่งเชื่อม เพื่อให้สั้นและง่ายต่อการอ้างอิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ลำดับของโนดจะถูกเรียงลำดับวนตามเข็มนาฬิกาจากโนด 1 จนกระทั่งถึงโนด N นอกจากนี้ แต่ละกิ่งเชื่อมของวงแหวนจะถูกเขียนโดยแทนกิ่งเชื่อม 1-2 ด้วยกิ่งเชื่อม 1, แทนกิ่งเชื่อม 2-3 ด้วยกิ่งเชื่อม 2, ... , และแทนกิ่งเชื่อม N - 1 ด้วยกิ่งเชื่อม N ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นวงแหวนขนาด 6 โนด



รูปที่ 3.1 การอ้างอิงโนดและกิ่งเชื่อมของวงแหวนขนาด 6 โนด

โนดสองโนดระหว่างต้นทางและปลายทาง ต่อไปจะเรียกว่าคู่โนด เช่น คู่โนด 1-3 หมายถึงคู่โนดที่อยู่ระหว่างโนด 1 และโนด 3 โดยลำดับของโนดตัวแรกที่ถูกอ้างอิงมีค่าน้อยกว่าเสมอไม่ว่าข้อมูลจะถูกส่งไปในทิศทางใดก็ตาม โครงข่ายแบบวงแหวนมีจำนวนคู่โนดที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ ${}^{N}C_{2} = \frac{N(N-1)}{2}$ คู่โนด (เลือก 2 โนดจากทั้งหมด N โนด) ระยะห่างระหว่างคู่โนดถูกนับเป็นจำนวนฮ็อพ (hop) ซึ่งไม่ใช่ระยะทาง เนื่องจากได้กำหนดจำนวนโนดทั้งหมดภายในโครงข่ายแทนขนาดของโครงข่าย ดังนั้น เพื่อให้ง่ายต่อการแสดงผลตอบที่ได้เปรียบเทียบกับขนาดของโครงข่าย จึงเปรียบเสมือนให้แต่ละโนดที่เชื่อมต่อถึงกันมีระยะห่างเท่ากัน ตารางที่ 3.1 แสดงการแจกแจงคู่โนดและเส้นทางทั้งสองทิศทางของทุกคู่โนดของโครง ข่ายวงแหวนขนาด 6 โนด ซึ่งมีจำนวนคู่โนดทั้งหมดเท่ากับ 6x(6-1)/2 = 15 คู่โนด โดยแสดงเส้นทางของวิถีแสงจากโนดต้นทางถึงโนดปลายทางในทิศตามเข็มนาฬิกาและตัวเลขในวงเล็บแทนเลขกิ่งเชื่อม นอกจากนี้ยังแสดงจำนวนฮ็อพที่วิถีแสงนั้นผ่านด้วยโดยตัวเลขแรกคือจำนวนฮ็อพของเส้นทางที่สั้นที่สุดและตัวเลขในวงเล็บเป็นจำนวนฮ็อพของเส้นทางที่อยู่ทางด้านตรงกันข้าม

ตารางที่ 3.1 คู่โนดและเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดของวงแหวนขนาด 6 โนด

ลำดับคู่โนด	คู่โนด	จำนวนฮ็อพ	เส้นทางที่เป็นไปได้ของแต่ละคู่โนด
1	1 – 2	1 (5)	1-2 (1) , 2-3-4-5-6-1 (2,3,4,5,6)
2	1 – 3	2 (4)	1-2-3 (1,2) , 3-4-5-6-1 (3,4,5,6)
3	1 – 4	3 (3)	1-2-3-4 (1,2,3) , 4-5-6-1 (4,5,6)
4	1 – 5	2 (4)	5-6-1 (5,6) , 1-2-3-4-5 (1,2,3,4)
5	1 – 6	1 (5)	6-1 (6) , 1-2-3-4-5-6 (1,2,3,4,5)
6	2 – 3	1 (5)	2-3 (2) , 3-4-5-6-1-2 (3,4,5,6,1)
7	2 – 4	2 (4)	2-3-4 (2,3) , 4-5-6-1-2 (4,5,6,1)
8	2 – 5	3 (3)	2-3-4-5 (2,3,4) , 5-6-1-2 (5,6,1)
9	2 – 6	2 (4)	6-1-2 (6,1) , 2-3-4-5-6 (2,3,4,5)
10	3 – 4	1 (5)	3-4 (3) , 4-5-6-1-2-3 (4,5,6,1,2)
11	3 – 5	2 (4)	3-4-5 (3,4) , 5-6-1-2-3 (5,6,1,2)
12	3 – 6	3 (3)	3-4-5-6 (3,4,5) , 6-1-2-3 (6,1,2)
13	4 – 5	1 (5)	4-5 (4) , 5-6-1-2-3-4 (5,6,1,2,3)
14	4 - 6	2 (4)	4-5-6 (4,5) , 6-1-2-3-4 (6,1,2,3)
15	5 – 6	1 (5)	5-6 (5) , 6-1-2-3-4-5 (6,1,2,3,4)

ทราฟฟิกระหว่างคู่โนดในโครงข่ายมีหน่วยเป็นจำนวนช่องสัญญาณไม่ใช่อัตราบิต ดังตัวอย่างเช่น ข้อมูลจากโนด A ไปยังโนด B ต้องการอัตราเร็วในการส่ง 4 Gb/s โดยที่แต่ละช่องสัญญาณของโครงข่ายสามารถส่งข้อมูลในแต่ละกิ่งเชื่อมได้ 2 Gb/s คู่โนด A-B จะมีทราฟฟิกเป็นจำนวน 2 ช่องสัญญาณ เป็นต้น ทราฟฟิกที่ถูกส่งใน 1 ทิศทางคิดเป็น 1 ช่องสัญญาณ ดังนั้น ถ้าต้องการส่งทราฟฟิก 2 ช่องสัญญาณพร้อมกันทั้ง 2 ทิศทาง จึงคิดเป็นจำนวน 4 ช่องสัญญาณ

ในการจัดสรรทรัพยากรของโครงข่าย all-optical network จะคำนึงถึงต้นทุนของโครงข่ายโดยทำให้ใช้งานได้อย่างคุ้มค่าที่สุด ต้นทุนของโครงข่ายขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง, ขนาดของสวิตช์, MUX/DEMUX, opto-switch หรือ อุปกรณ์อื่น ๆ ซึ่งเป็นต้นทุนที่ไม่สามารถทราบค่าแน่นอนได้ ดังนั้น จำนวนความยาวคลื่นที่ถูกจัดสรรในแต่ละกิ่งเชื่อมจึงถูกใช้แทนต้นทุนของโครงข่ายเพื่อให้ง่ายในการหาต้นทุนโดยรวมของโครงข่าย เนื่องจากโครงข่ายที่ใช้จำนวนความยาวคลื่นมาก จะต้องมีขนาดของสวิตช์ (กรณีโครงข่ายแบบเมช), หรือ MUX/DEMUX ที่ใหญ่กว่า และใช้ปริมาณเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า ทำให้ปริมาณต้นทุนที่สนใจมีค่าเพิ่มขึ้น

วิทยานิพนธ์ในบทนี้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ว่ามีผลกระทบต่อผลตอบซึ่งเป็นจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้ภายในโครงข่ายอย่างไร ดังนี้

1. เส้นทาง – การเลือกเส้นทางของวิถีแสงแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกมีผลอย่างไร เส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดหรือไม่
2. อันดับของวิถีแสงในการจัดสรรความยาวคลื่น – วิถีแสงของเส้นทางแบบใดที่ควรจะได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นก่อน วิถีแสงที่ยาวที่สุดหรือสั้นที่สุดที่ควรจะได้รับการจัดสรรเป็นอันดับแรก เป็นต้น
3. การแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงระหว่างเส้นทาง – โนดที่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงใด ๆ สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้หรือไม่ มากน้อยเพียงไร
4. ทราฟฟิกของทุกคู่โนด – แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม (uniform traffic) และ ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม (non-uniform traffic)

3.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุด

ในการจัดสรรเส้นทางให้กับแต่ละคู่โนด ส่วนใหญ่มักจะใช้ shortest path routing ที่หาเส้นทางที่ใช้ระยะทางสั้นที่สุด (เช่น หน่วยเป็น km) หรือ least number of hops path routing ที่หาเส้นทางที่ผ่านจำนวน intermediate node น้อยที่สุด [7] เนื่องจากได้กำหนดระยะห่างระหว่างโนดเป็นจำนวนฮ็อพ ดังนั้นจึงใช้วิธี least number of hops path routing ในการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด และ เขียนแทนการกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดว่า SP (Shortest Path) เส้นทางระหว่างต้นทางถึงปลายทางที่สั้นกว่าทำให้ใช้ทรัพยากรน้อยกว่าและประหยัดต้นทุนได้มากกว่าเพราะเส้นทางที่ยาวกว่าทำให้เปลืองความยาวคลื่นและเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า สำหรับเส้นทางจากโนดต้นทางถึงโนดปลายทางของโครงข่ายแบบวงแหวน มีเพียงสองทิศทางเท่านั้น คือ ทิศตามเข็มนาฬิกาและทิศทวนเข็มนาฬิกา

ในแต่ละกิ่งเชื่อมซึ่งบางวิถีแสงใช้เส้นทางผ่านกิ่งเชื่อมนั้นร่วมกันจะต้องถูกกำหนดค่าความยาวคลื่นที่ต้องใช้ในแต่ละวิถีแสงแตกต่างกันโดยไม่ใช้ค่าความยาวคลื่นซ้ำกันโดยเด็ดขาด เช่น ในกรณีวงแหวนขนาด 4 โนด มีจำนวนวิถีแสงที่เป็นไปได้ทั้งหมดจำนวน 6 วิถี คือ จากโนด 1 ไปยังโนด 2, โนด 1 ไปยัง โนด 3, โนด 1 ไปยังโนด 4, โนด 2 ไปยังโนด 3, โนด 2 ไปยังโนด 4 และโนด 3 ไปยังโนด 4 จะสังเกตได้ว่าวิถีแสง 1-3 ประกอบด้วยกิ่งเชื่อม 1-2 และกิ่งเชื่อม 2-3 ดังนั้นวิถีแสง 1-3 และ วิถีแสง 1-2 ที่ผ่านกิ่งเชื่อม 1-2 เหมือนกันต้องใช้ค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันโดยห้ามใช้ค่าความยาวคลื่นซ้ำกันเป็นอันขาด

ในกรณีที่วงแหวนมีจำนวนโนดเป็นจำนวนคี่ เส้นทางที่ผ่านเป็นจำนวนฮ็อพที่น้อยที่สุดมีเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น เพราะวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นจำนวนคี่ไม่มีโอกาสที่ทั้งสองทิศทางมีจำนวนฮ็อพเท่ากันไม่ว่าจะเป็นเส้นทางระหว่างคู่โนดใดก็ตาม ตารางที่ 3.2 แสดงเส้นทางทุกคู่โนดของวงแหวนขนาด 5 โนด ซึ่งมีจำนวนโนดเป็นเลขคี่ด้วยวิธีการกำหนดเส้นทางที่แน่นอนและเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด

ตารางที่ 3.2 เส้นทางทุกคู่โนดของวงแหวนขนาด 5 โนดด้วยวิธีการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด

ลำดับคู่โนด	คู่โนด	จำนวนฮ็อพ	เส้นทางที่เป็นไปได้ของแต่ละคู่โนด
1	1 – 2	1	1-2 (1)
2	1 – 3	2	1-2-3 (1,2)
3	1 – 4	2	4-5-1 (4,5)
4	1 – 5	1	5-1 (5)
5	2 – 3	1	2-3 (2)
6	2 – 4	2	2-3-4 (2,3)
7	2 – 5	2	5-1-2 (5,1)
8	3 – 4	1	3-4 (3)
9	3 – 5	2	3-4-5 (3,4)
10	4 – 5	1	4-5 (4)
รวม	-	15	-

เมื่อเส้นทางของทุกคู่โนดถูกจัดสรรเรียบร้อยแล้ว ยังขาดการจัดสรรความยาวคลื่นซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่มีผลกับจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้ในโครงข่ายซึ่งเป็นผลตอบที่ต้องการ เนื่องจากวงแหวนขนาด 5 โนดมีจำนวนคู่โนดที่เป็นไปได้ทั้งหมด 10 คู่โนด เมื่อต้องจัดสรรความยาวคลื่นของทราฟฟิกแต่ละช่องสัญญาณในแต่ละคู่โนด จึงเกิดปัญหาของอันดับในการจัดสรรความยาวคลื่นว่าวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกใดของคู่โนดใดควรจะมีโอกาสได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นก่อน โดยตั้งสมมติฐานของการจัดอันดับของวิถีแสงในการจัดสรรความยาวคลื่นไว้ 3 แบบ คือ

1. เรียงอันดับการจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงโดยการสุ่ม (Rnd – Random)

   วิธีนี้ไม่มีแบบแผนที่แน่นอนว่าวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกใดจะได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นก่อนและใช้เวลาของเครื่องเป็นส่วนประกอบของ seed ในกระบวนการสุ่ม

2. จัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดก่อน (SPF – Shortest Path First)
   วิธีนี้ศึกษาว่าถ้าวิถีแสงที่สั้นกว่าได้สิทธิ์ในการจัดสรรความยาวคลื่นก่อนจะมีผลต่อจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้ภายในโครงข่ายอย่างไรบ้าง
3. จัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดก่อน (LPF – Longest Path First)
   ในทางกลับกันกับวิธีที่ 2 คือ ให้วิถีแสงที่ยาวกว่าได้สิทธิ์ในการจัดสรรความยาวคลื่นก่อน

ในกรณีที่วงแหวนมีจำนวนโนดเป็นจำนวนคู่ อาจมีบางคู่โนดที่เส้นทางทั้งสองทิศทางมีจำนวนฮ็อพน้อยที่สุดเท่ากัน คือ เป็นคู่โนดที่อยู่ตรงกันข้ามกัน ดังตัวอย่างกรณีวงแหวนขนาด 6 โนดในตารางที่ 3.1 ซึ่งเส้นทางระหว่างคู่โนด 1-4 {(1-2-3-4),(4-5-6-1)}, 2-5 {(2-3-4-5),(5-6-1-2)}, 3-6 {(3-4-5-6),(6-1-2-3)} มีจำนวน 3 ฮ็อพเท่ากันทั้งสองทิศทาง เพื่อให้ง่ายในการจัดสรรความยาวคลื่นโดยไม่ต้องคำนึงถึงการจัดสรรเส้นทางอีกจึงกำหนดให้เลือกใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดในแนวตามเข็มนาฬิกาจากเลขลำดับคู่โนดน้อยไปยังเลขลำดับคู่โนดที่มากกว่า (เส้นทางแรกที่แสดงในตาราง)

ในการศึกษาหาจำนวนความยาวคลื่นภายในโครงข่ายแบบวงแหวนยังคำนึงถึงการเดินทางของสัญญาณแสงจากต้นทางถึงปลายทางโดยแบ่งตามความต่อเนื่องของค่าความยาวคลื่นของวิถีแสงใด ๆ ตลอดเส้นทางออกเป็น 2 แบบ คือ

1. แบบไม่มีการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทาง
   (no wavelength conversion – NWC)
2. แบบมีการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทาง (wavelength conversion – WC)

นอกจากนี้ ยังศึกษาถึงผลของทราฟฟิกภายในแหวนโดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

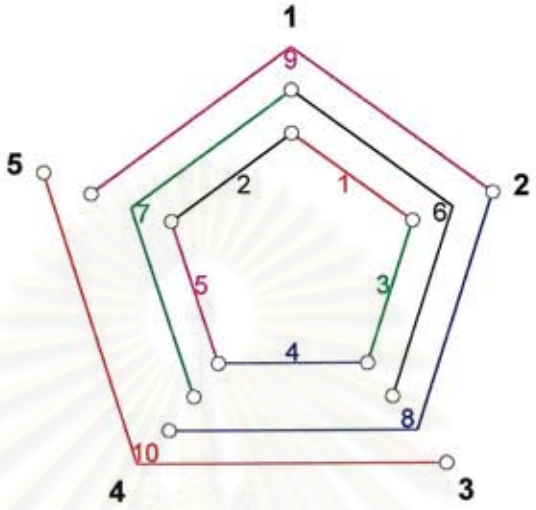
1. ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม เป็นทราฟฟิกที่ทุกคู่โนดต้องการปริมาณทราฟฟิกจำนวน 1 ช่องสัญญาณเท่ากันหมด
2. ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม เป็นทราฟฟิกที่ทุกคู่โนดต้องการปริมาณช่องสัญญาณทราฟฟิกไม่เท่ากัน โดยศึกษาถึงผลกระทบของวงแหวนที่มีทราฟฟิกในบางคู่โนดต้องการจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกมากกว่าปกติ

3.3 ตัวอย่างการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุด

ตัวอย่างที่ 1 : วงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC

- จัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดก่อน (SPF)

ในกรณีนี้ทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม ดังนั้น ทุกคู่โนดต้องการทราฟฟิก 1 ช่องสัญญาณ และจัดสรรความยาวคลื่นแบบ NWC ซึ่งวิถีแสงของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดเส้นทาง จากตารางที่ 3.2 จำนวนฮ็อพรวมทั้งหมดของทุกคู่โนดตั้งแต่คู่โนดที่ 1 ถึง 10 คือ 1+2+2+1+1+2+2+1+2+1 = 15 ฮ็อพ



รูปที่ 3.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC โดยจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดก่อน

จากรูปที่ 3.2 แต่ละชั้นของรูป 5 เหลี่ยมแทนแต่ละความยาวคลื่น พบว่าต้องใช้จำนวนความยาวคลื่นทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น อันดับคู่โนดหรือช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นตั้งแต่ 1 ถึง 10 ถูกแสดงไว้ข้างวิถีแสงโดยแยกให้เห็นเด่นชัดด้วยสีแตกต่างกัน การจัดสรรความยาวคลื่นโดยให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดได้รับการจัดสรรก่อนสามารถจัดสรรความยาวคลื่นให้กับทุกคู่โนดได้ตามลำดับคู่โนดโดยเรียงตามจำนวนฮ็อพจากน้อยที่สุดไปมากที่สุดดังต่อไปนี้

(1) คู่โนด 1-2 ใช้เส้นทาง 1-2 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 1-2

(2) คู่โนด 1-5 ใช้เส้นทาง 5-1 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 5-1

(3) คู่โนด 2-3 ใช้เส้นทาง 2-3 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 2-3

(4) คู่โนด 3-4 ใช้เส้นทาง 3-4 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 3-4

(5) คู่โนด 4-5 ใช้เส้นทาง 4-5 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 4-5

(6) คู่โนด 1-3 ใช้เส้นทาง 1-2-3 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 2 ของกิ่งเชื่อม 1-2 และกิ่งเชื่อม 2-3 เนื่องจากความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 1-2 และความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 2-3 ถูกจัดสรรให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกอื่นก่อนหน้านี้ไปแล้ว

(7) คู่โนด 1-4 ใช้เส้นทาง 4-5-1 ในทำนองเดียวกันกับคู่โนด 1-3 ถูกจัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 2 ของกิ่งเชื่อม 4-5 และกิ่งเชื่อม 5-1

(8) คู่โนด 2-4 ใช้เส้นทาง 2-3-4 พบว่าในกิ่งเชื่อม 2-3 ความยาวคลื่นที่ 1,2 ถูกจัดสรรให้กับคู่โนด 2-3 และคู่โนด 1-3 ไปแล้วตามลำดับ ถึงแม้ว่าในกิ่งเชื่อม 3-4 จะมีเพียงความยาวคลื่นที่ 1 ที่ถูกจัดสรรให้กับคู่โนด 3-4 โดยความยาวคลื่นที่ 2 ยังไม่ได้ถูกจัดสรรก็ตาม เนื่องจากเป็นกรณี NWC ซึ่งต้องใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดเส้นทาง ดังนั้นคู่โนดนี้จึงถูกจัดสรรให้ใช้ความยาวคลื่นที่ 3 ของกิ่งเชื่อม 2-3 และกิ่งเชื่อม 3-4

(9) คู่โนด 2-5 ใช้เส้นทาง 5-1-2 ถูกจัดสรรให้ใช้ความยาวคลื่นที่ 3 ของกิ่งเชื่อม 5-1 และกิ่งเชื่อม 1-2 เพราะความยาวคลื่นที่ 1,2 ของทั้ง 2 กิ่งเชื่อม ถูกจัดสรรให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกอื่นไปก่อนหน้านี้แล้ว

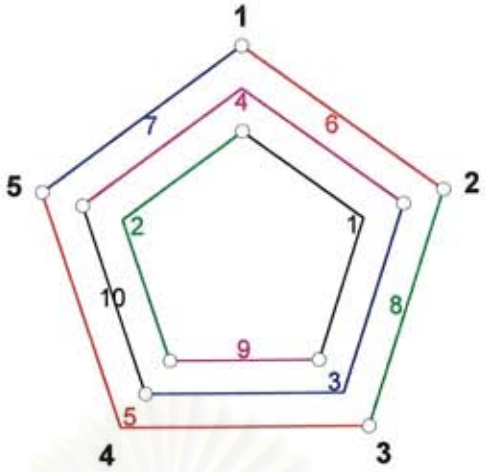
(10) คู่โนด 3-5 ใช้เส้นทาง 3-4-5 จะพบว่าความยาวคลื่นที่ 1,3 ของกิ่งเชื่อม 3-4 ถูกใช้ไปแล้วและความยาวคลื่นที่ 2 ยังว่างอยู่ ในขณะเดียวกัน ความยาวคลื่นที่ 1,2 ของกิ่งเชื่อม 4-5 ถูกใช้ไปแล้วและความยาวคลื่นที่ 3 ยังว่างอยู่ ในกรณี NWC ไม่สามารถจัดสรรให้กิ่งเชื่อม 3-4 ใช้ความยาวคลื่นที่ 2 และกิ่งเชื่อม 4-5 ใช้ความยาวคลื่นที่ 3 ดังนั้น จึงต้องจัดสรรความยาวคลื่นใหม่โดยให้คู่โนด 3-5 ใช้ความยาวคลื่นที่ 4 ของกิ่งเชื่อม 3-4 และกิ่งเชื่อม 4-5

จากรูปที่ 3.2 ความยาวคลื่นที่ 1 (ชั้นในสุด) ถูกจัดสรรให้กับทุกกิ่งเชื่อมในวงแหวนโดยเป็นการประกอบกันของวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกทุกคู่โนดที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ และความยาวคลื่นถัดออกไปที่เหลือถูกจัดสรรให้กับวิถีแสงของทราฟฟิกที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ ตามลำดับ วิถีแสงที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ จะเหลื่อมซ้อนกันอยู่เพราะแต่ละวิถีแสงต้องใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดเส้นทาง จึงมีบางความยาวคลื่นไม่ได้ถูกใช้ครบทุกกิ่งเชื่อม ทำให้โครงข่ายมีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นอย่างไม่มีประสิทธิภาพ โดยช่องสัญญาณทราฟฟิกในความยาวคลื่นที่ 2 และ 3 ไม่ได้ถูกใช้ความยาวคลื่นละ 1 ช่องสัญญาณ และความยาวคลื่นที่ 4 ไม่ได้ถูกใช้ถึง 3 ช่องสัญญาณ รวมทั้งหมดมีความยาวคลื่นที่ไม่ได้ถูกครอบครองโดยทราฟฟิกเป็นจำนวน 5 ช่องสัญญาณ เนื่องจากวงแหวนประกอบด้วย 5 กิ่งเชื่อมและสามารถรองรับทราฟฟิกได้ทั้งหมดจำนวน 4 ความยาวคลื่น คิดเป็นจำนวน 20 ช่องสัญญาณ แต่ไม่ได้ถูกใช้ประโยชน์ 5 ช่องสัญญาณ ดังนั้น โครงข่ายมีการใช้ประโยชน์เพียง (20-5)/20x100% = 75%

- จัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดก่อน (LPF)

วิธีนี้ต่างกับวิธีจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดก่อนเพียงอันดับของคู่โนดในการจัดสรรความยาวคลื่นเท่านั้น โดยมีอันดับคู่โนดเรียงตามจำนวนฮ็อพจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดดังต่อไปนี้

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC โดยจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดก่อน

(1) คู่โนด 1-3 ใช้เส้นทาง 1-2-3 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 1-2 และกิ่งเชื่อม 2-3

(2) คู่โนด 1-4 ใช้เส้นทาง 4-5-1 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 4-5 และกิ่งเชื่อม 5-1

(3) คู่โนด 2-4 ใช้เส้นทาง 2-3-4 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 2 ของกิ่งเชื่อม 2-3 และกิ่งเชื่อม 3-4 เพราะความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 2-3 ถูกจัดสรรให้กับคู่โนด 1-3 ไปแล้ว จึงต้องเลือกค่าความยาวคลื่นลำดับถัดไปซึ่งยังว่างอยู่ตลอดเส้นทางทั้งกิ่งเชื่อม 2-3 และกิ่งเชื่อม 3-4 ถึงแม้ว่าความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 3-4 จะยังไม่ได้ถูกจัดสรรไว้ก็ตาม เนื่องจากเป็นการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ NWC

(4) คู่โนด 2-5 ใช้เส้นทาง 5-1-2 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 2 ของกิ่งเชื่อม 5-1 และกิ่งเชื่อม 1-2

(5) คู่โนด 3-5 ใช้เส้นทาง 1-2-3 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 3 ของกิ่งเชื่อม 3-4 และกิ่งเชื่อม 4-5 เพราะเป็นค่าความยาวคลื่นแรกที่ยังว่างอยู่ทั้งกิ่งเชื่อม 3-4 และกิ่งเชื่อม 4-5

(6) คู่โนด 1-2 ใช้เส้นทาง 1-2 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 3 ของกิ่งเชื่อม 1-2

(7) คู่โนด 1-5 ใช้เส้นทาง 5-1 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 3 ของกิ่งเชื่อม 5-1

(8) คู่โนด 2-3 ใช้เส้นทาง 2-3 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 3 ของกิ่งเชื่อม 2-3

(9) คู่โนด 3-4 ใช้เส้นทาง 3-4 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 3-4 ที่ยังว่างอยู่

(10) คู่โนด 4-5 ใช้เส้นทาง 4-5 จัดสรรให้กับความยาวคลื่นที่ 2 ของกิ่งเชื่อม 4-5 ที่ยังว่างอยู่

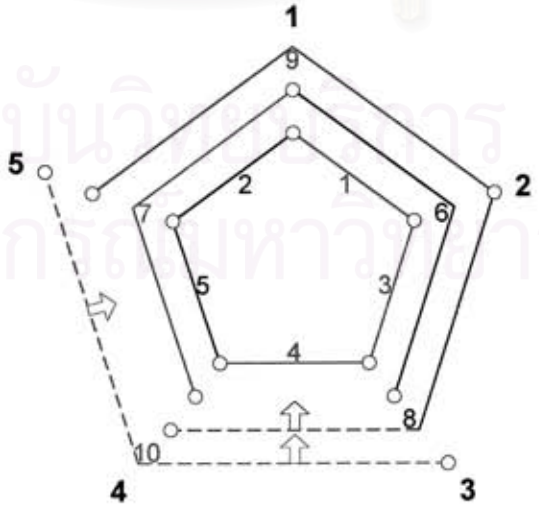
จากการจัดสรรความยาวคลื่นในทำนองเดียวกันกับกรณีจัดสรรให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดก่อนดังรูปที่ 3.3 จะพบว่าใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 3 ความยาวคลื่นและทุกความยาวคลื่นถูกจัดสรรครบทุกกิ่งเชื่อม โดยโครงข่ายมีการใช้ประโยชน์ครบ 3 ความยาวคลื่นทั้ง 5 กิ่งเชื่อม คิดเป็นจำนวน 15 ช่องสัญญาณหรือมีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่น 100% การจัดสรรให้วิถีแสงที่มีจำนวนฮ็อพมากกว่าก่อนทำให้พวกมันซ้อนเหลื่อมกันเอง แต่เมื่อวิถีแสงที่สั้นกว่าถูกจัดสรรทีหลังทำให้พวกมันสามารถไปเติมเต็มความยาวคลื่นในบางกิ่งเชื่อมที่ยังว่างอยู่ได้ ดังนั้น การจัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสงที่ยาวที่สุดก่อนทำให้ใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า

ตัวอย่างที่ 2 : วงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, WC

ในการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ WC จะอนุมานว่าทุกโนดสามารถแปลงผันค่าความยาวคลื่นของวิถีแสงแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกได้ จึงจัดสรรความยาวคลื่นโดยไม่จำกัดว่าต้องให้มีการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทางน้อยที่สุด

- จัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดก่อน (SPF)

ในกรณีนี้ทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม ดังนั้น ทุกคู่โนดต้องการทราฟฟิก 1 ช่องสัญญาณ และจัดสรรความยาวคลื่นแบบ WC ซึ่งวิถีแสงของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกไม่จำเป็นต้องใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดเส้นทางและอาจมีการแปลงผันค่าความยาวคลื่นได้ระหว่างต้นทางจนถึงปลายทาง



รูปที่ 3.4 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, WC โดยจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดก่อน

วิถีแสงของแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกทั้ง 10 คู่โนดถูกจัดสรรความยาวคลื่นคล้ายกับกรณี NWC มาก แตกต่างกันเพียงคู่โนดที่ถูกจัดสรรเป็นอันดับที่ 8 คือคู่โนด 2-4 ซึ่งใช้เส้นทางผ่านกิ่งเชื่อม 2-3 และกิ่งเชื่อม 3-4 โดยสามารถจัดสรรความยาวคลื่นที่ 3 ให้กับกิ่งเชื่อม 2-3 และความยาวคลื่นที่ 2 ให้กับกิ่งเชื่อม 3-4 ดังนั้น ที่โนด 3 จึงมีการแปลงผันค่าความยาวคลื่นของช่องสัญญาณทราฟฟิกนี้ นอกจากนี้ คู่โนดที่ถูกจัดสรรเป็นอันดับที่ 10 คือคู่โนด 3-5 ซึ่งใช้เส้นทางผ่านกิ่งเชื่อม 3-4 และกิ่งเชื่อม 4-5 จะสามารถใช้ค่าความยาวคลื่นที่ 3 ได้ ทำให้ใช้จำนวนความยาวคลื่นรวม 3 ความยาวคลื่นเท่านั้น

- จัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดก่อน (LPF)

เนื่องจากการแสดงรูปวงแหวนที่มีการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทางดังรูปที่ 3.4 โดยเฉพาะถ้าโครงข่ายมีขนาดใหญ่และมีการแปลงผันความยาวคลื่นเป็นจำนวนมากทำให้ไม่สะดวกในการแสดงเป็นรูปภาพ ดังนั้น ในตัวอย่างถัดไปไม่ว่าจะเป็นแบบ NWC หรือ WC จะแสดงเป็นตารางโดยเรียงแทนช่องสัญญาณทราฟฟิกที่จองความยาวคลื่นนั้นด้วยตัวเลขลำดับคู่โนด ตัวอย่างผลการจัดสรรของวงแหวนขนาด 5 โนด (ตัวเลขในวงเล็บหลังคู่โนดคือลำดับของคู่โนดนั้น) โดยอ้างอิงลำดับคู่โนดเรียงตามลำดับ 1-2 (1), 1-3 (2), 1-4 (3), 1-5 (4), 2-3 (5), 2-4 (6), 2-5 (7), 3-4 (8), 3-5 (9), 4-5 (10) แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC โดยจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดก่อน

	λ_1	λ_2	λ_3
link 1-2 (1)	1-3 (2) [1]	2-5 (7) [4]	1-2 (1) [6]
link 2-3 (2)	1-3 (2) [1]	2-4 (6) [3]	2-3 (5) [8]
link 3-4 (3)	2-4 (6) [3]	3-5 (9) [5]	3-4 (8) [9]
link 4-5 (4)	1-4 (3) [2]	3-5 (9) [5]	4-5 (10) [10]
link 5-1 (5)	1-4 (3) [2]	2-5 (7) [4]	1-5 (4) [7]

จากตารางที่ 3.3 วงแหวนใช้จำนวนความยาวคลื่นทั้งหมด 3 ความยาวคลื่น ตัวเลขด้านบนแสดงข้างหลังหมายเลขคู่โนดบ่งบอกอันดับที่ได้รับการจัดสรร ทุกคู่โนดถูกจัดสรรความยาวคลื่นโดยเริ่มจากคู่โนดที่มีจำนวน 2 ฮ็อพก่อนแล้วต่อด้วยคู่โนดที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ คือ ตั้งแต่คู่โนด 1-3, 1-4, 2-4, 2-5, 3-5 และ 1-2, 1-5, 2-3, 3-4, 4-5 ตามลำดับ จะ

สังเกตได้ว่าคู่โนด 2-4 ถูกจัดสรรให้ใช้ความยาวคลื่นที่ 2 ในกิ่งเชื่อม 2-3 และใช้ความยาวคลื่นที่ 1 ในกิ่งเชื่อม 3-4 โดยไม่จัดสรรให้ใช้ความยาวคลื่นเดียวกันคือความยาวคลื่นที่ 2 ทั้งหมด ทั้งที่แบบ NWC สามารถจัดสรรให้ใช้ 3 ความยาวคลื่นได้เช่นเดียวกันโดยไม่จำเป็นต้องมีการแปลงผันความยาวคลื่นเลย เพราะการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ WC จะไม่จำกัดให้มีจำนวนครั้งของการแปลงผันความยาวคลื่นน้อยที่สุด โดยอนุมานว่าทุกโนดมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นอยู่แล้ว ดังนั้น ในการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ WC ไม่ว่าช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนดใดจะถูกจัดสรรก่อนหรือหลังก็ตาม (ไม่ว่าจะเป็นวิธีที่ให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดหรือสั้นที่สุดลงก่อน) ไม่มีผลต่อจำนวนความยาวคลื่นของโครงข่าย เพราะไม่ได้ให้ความสำคัญกับค่าความยาวคลื่นที่ใช้ในแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิก หากแต่เพียงนับจำนวนวิถีแสงที่ผ่านกิ่งเชื่อมนั้นซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดสรรเส้นทางของแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกเท่านั้น

จากตัวอย่างของทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มจะพบว่าวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดได้รับการจัดสรรก่อนให้ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่ไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น ตัวอย่างถัดจากนี้ไปจะใช้วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดได้รับการจัดสรรก่อนเสมอ

ตัวอย่างที่ 3 : วงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม, SP, NWC

ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม คือ ทราฟฟิกที่มีลักษณะตรงกันข้ามกับทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม โดยไม่มีการจำกัดปริมาณช่องสัญญาณทราฟฟิกในแต่ละคู่โนด

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มของวงแหวนขนาด 5 โนด

โนดที่	1	2	3	4	5
1	-	1	3	2	2
2		-	2	3	0
3			-	1	1
4				-	0
5					-

ตารางที่ 3.4 แสดงตัวอย่างของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มที่มีปริมาณความต้องการทราฟฟิกตั้งแต่ 0-3 ช่องสัญญาณ โดยตัวเลขในตารางคือทราฟฟิกที่มีหน่วยเป็นจำนวนช่องสัญญาณระหว่างคู่โนดนั้น เช่น คู่โนด 1-2 ต้องการ 1 ช่องสัญญาณทราฟฟิก, คู่โนด 1-3 ต้องการ 3 ช่องสัญญาณทราฟฟิก หรือ คู่โนด 2-5 ไม่มีทราฟฟิกหรือไม่มีการส่งข้อมูลระหว่างคู่โนดนี้ เป็นต้น

ตารางที่ 3.5 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, SP, NWC

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8
link 1-2 (1)	1-3 (2) [1]	1-3 (2) [2]	1-3 (2) [3]	1-2 (1) [10]				
link 2-3 (2)	1-3 (2) [1]	1-3 (2) [2]	1-3 (2) [3]	2-4 (6) [6]	2-4 (6) [7]	2-4 (6) [8]	2-3 (5) [13]	2-3 (5) [14]
link 3-4 (3)	3-4 (8) [15]		3-5 (9) [9]	2-4 (6) [6]	2-4 (6) [7]	2-4 (6) [8]		
link 4-5 (4)	1-4 (3) [4]	1-4 (3) [5]	3-5 (9) [9]					
link 5-1 (5)	1-4 (3) [4]	1-4 (3) [5]	1-5 (4) [11]	1-5 (4) [12]				

การจัดสรรความยาวคลื่นให้กับแต่ละช่องสัญญาณของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มมีกระบวนการคล้ายกับแบบยูนิฟอร์ม อันดับของการจัดสรรความยาวคลื่นขึ้นกับความยาวเป็นจำนวนฮ็อพของช่องสัญญาณทราฟฟิกโดยเรียงจากจำนวนฮ็อพมากที่สุดจนถึงจำนวนฮ็อพน้อยที่สุดเช่นกัน ในกรณีที่เส้นทางของช่องสัญญาณมีจำนวนฮ็อพเท่ากันให้ลำดับคู่โนดที่น้อยกว่าได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นก่อนเช่นเดียวกันกับในแบบยูนิฟอร์ม และทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนดนั้นจะถูกจัดสรรในคราวเดียวกันทั้งหมด จากตัวอย่างนี้ซึ่งเป็น SP, NWC จะได้ผลตอบเป็นจำนวน 8 ความยาวคลื่นและแสดงผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นดังตารางที่ 3.5 โดยตัวเลขที่แสดงในตารางภายในวงเล็บแทนลำดับของคู่โนดนั้น ๆ จะสังเกตได้ว่ามีบางคู่โนดครอบครองความยาวคลื่นมากกว่า 1 ความยาวคลื่นเนื่องจากมีความต้องการปริมาณทราฟฟิกมากกว่า 1 ช่องสัญญาณ เช่น คู่โนด 1-3 (2) ครอบครองกิ่งเชื่อม 1-2 และ 2-3 ตั้งแต่ความยาวคลื่นที่ 1-3 เพราะต้องการทราฟฟิกเป็นจำนวน 3 ช่องสัญญาณ เป็นต้น

ตัวอย่างที่ 4 : วงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม, SP, WC

ตัวอย่างนี้เพิ่มความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทาง (WC) โดยมีปริมาณความต้องการทราฟฟิกเช่นเดียวกันกับในตัวอย่างที่ 3 ผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นแสดงไว้ดังตารางที่ 3.6 โดยได้ผลตอบจำนวน 8 ความยาวคลื่นเช่นเดียวกันกับแบบ NWC จะสังเกตได้ว่าตารางของการจัดสรรความยาวคลื่นไม่มีช่องโหว่ระหว่างความยาวคลื่นในแต่ละกิ่งเชื่อมเลย เพราะแบบ WC ไม่ถูกจำกัดให้วิถีแสงของแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกต้องใช้ความยาวคลื่นเดียวกันหรือต้องอยู่ในคอลัมน์เดียวกันของตารางตลอดเส้นทาง อย่างไรก็ตามความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทางไม่สามารถช่วยลดจำนวนความยาวคลื่นได้ในตัวอย่างนี้

ตารางที่ 3.6 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, SP, WC

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8
link 1-2 (1)	1-3 (2) [1]	1-3 (2) [2]	1-3 (2) [3]	1-2 (1) [10]				
link 2-3 (2)	1-3 (2) [1]	1-3 (2) [2]	1-3 (2) [3]	2-4 (6) [6]	2-4 (6) [7]	2-4 (6) [8]	2-3 (5) [13]	2-3 (5) [14]
link 3-4 (3)	2-4 (6) [6]	2-4 (6) [7]	2-4 (6) [8]	3-5 (9) [9]	3-4 (8) [15]			
link 4-5 (4)	1-4 (3) [4]	1-4 (3) [5]	3-5 (9) [9]					
link 5-1 (5)	1-4 (3) [4]	1-4 (3) [5]	1-5 (4) [11]	1-5 (4) [12]				

จากผลการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยการจัดสรรเส้นทางแบบ SP ในตารางที่ 3.5 และ 3.6 ซึ่งเป็นผลจากการจัดสรรในโครงข่ายแบบ NWC และ WC ตามลำดับ พบว่ามีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นที่ไม่มีประสิทธิภาพคือมีการใช้ประโยชน์เพียง 60 % เท่านั้น ด้วยเหตุนี้การจัดสรรเส้นทางด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอนจึงถูกเสนอเพื่อแก้ไขปัญหานี้

3.4 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน

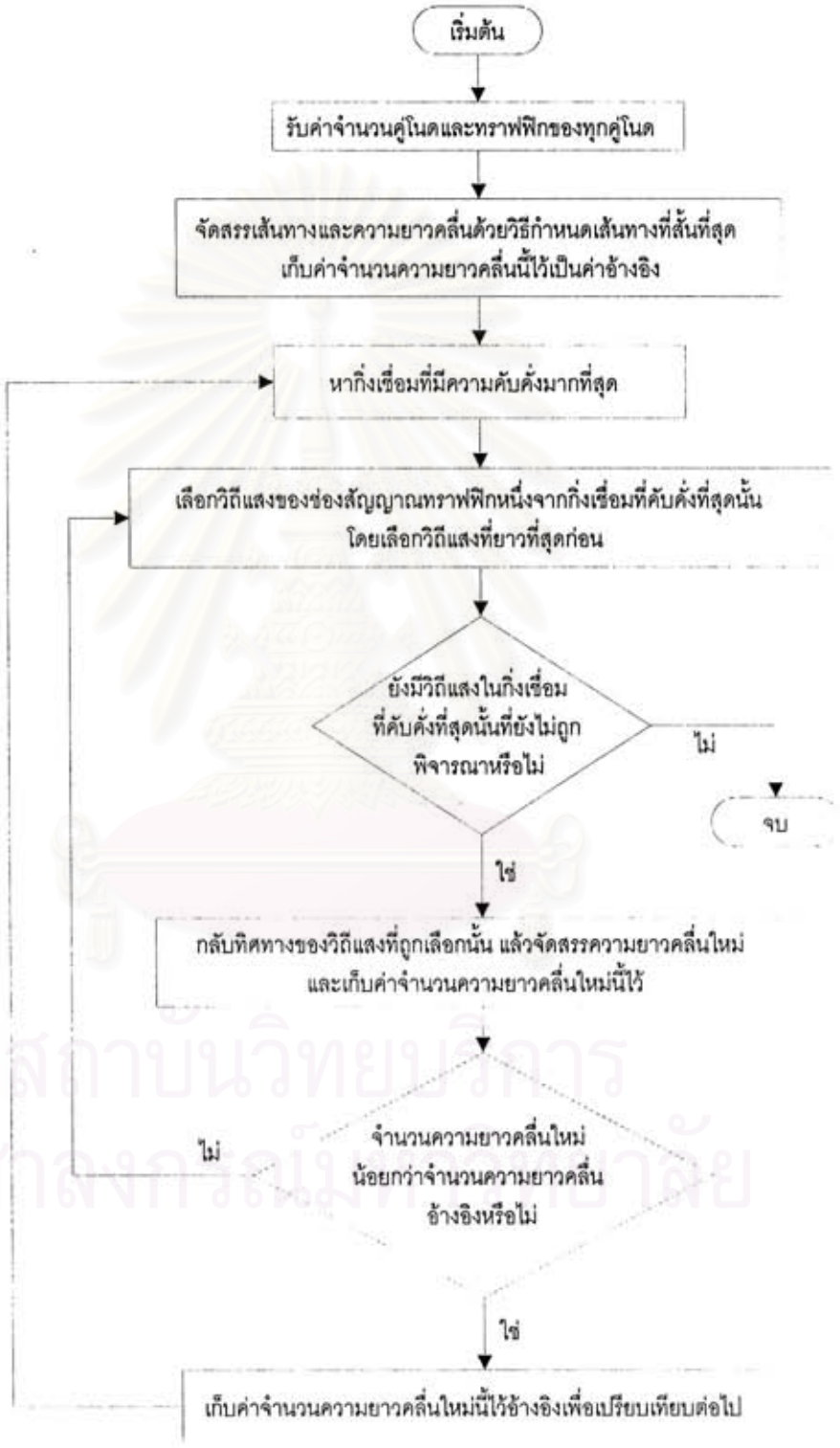
การหาจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้ภายในโครงข่ายด้วยวิธีการกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดทำให้เส้นทางถูกกำหนดตายตัว ถึงแม้ว่าระยะทางเป็นจำนวนฮ็อพที่สั้นที่สุดจะทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรน้อยกว่าก็ตาม แต่ในกรณีที่เส้นทางที่สั้นที่สุดของทุกวิถีแสงไปคับคั่งอยู่ที่กิ่งเชื่อมใดมากเป็นพิเศษ คือ จำนวนวิถีแสงที่ผ่านแต่ละกิ่งเชื่อมแตกต่างกันมาก จำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้จะเพิ่มขึ้นอย่างมากในกิ่งเชื่อมที่คับคั่งนั้น ในขณะเดียวกันที่กิ่งเชื่อมอื่นยังมีช่องสัญญาณที่ว่างอยู่ทำให้มีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น วิธีการจัดสรรเส้นทางโดยกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอนจึงถูกนำมาแก้ไขปัญหาดังกล่าว

วิธีการจัดสรรเส้นทางด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน (AP – Alternative Path) เพราะสามารถเลือกใช้เส้นทางในทิศใดก็ได้ทั้งทิศตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกาโดยไม่กำหนดว่าทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกต้องใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด เพียงแต่อนุโลมให้มีการใช้เส้นทางอีกเส้นทางหนึ่งของวงแหวนที่ไม่ใช่เส้นทางที่สั้นที่สุดได้ตามความจำเป็น หลักการของวิธีนี้คือการสลับเส้นทางบางวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกในกิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดของวงแหวนให้ใช้เส้นทางที่ไม่ใช่เส้นทางที่สั้นที่สุดแทนเพื่อลดจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. รับค่าจำนวนคู่โนดและปริมาณทราฟฟิกเป็นจำนวนช่องสัญญาณของทุกคู่โนด

2. จัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดก่อนโดยจัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสงของเส้นทางที่สั้นที่สุดที่มีจำนวนฮ็อพมากที่สุดเหล่านั้นก่อน (LPF) ในกรณีที่วิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกมีเส้นทางที่สั้นที่สุดเท่ากันทั้งสองทิศทางให้ใช้เส้นทางในทิศตามเข็มนาฬิกาจากโนดที่มีเลขลำดับน้อยกว่าไปยังโนดที่เลขลำดับมากกว่าเป็นหลัก จากนั้นเก็บค่าจำนวนความยาวคลื่นเริ่มต้นนี้ไว้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับจำนวนความยาวคลื่นที่ได้หลังจากการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่
3. หากิ่งเชื่อมที่มีจำนวนวิถีแสงผ่านคับคั่งมากที่สุด โดยพิจารณาจากกิ่งเชื่อมที่มีการครอบครองค่าความยาวคลื่นสุดท้ายโดยวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิก แม้ว่ากิ่งเชื่อมเหล่านั้นมีความยาวคลื่นค่าอื่นที่ยังว่างอยู่ก็ตาม ในกรณีที่มีกิ่งเชื่อมที่มีการครอบครองค่าความยาวคลื่นสุดท้ายมากกว่า 1 กิ่งเชื่อม ให้กำหนดกิ่งเชื่อมเหล่านั้นที่มีความยาวคลื่นค่าอื่นที่ยังว่างอยู่น้อยที่สุดเป็นกิ่งเชื่อมที่มีจำนวนวิถีแสงผ่านคับคั่งที่สุด
4. เลือกวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกหนึ่งวิถีซึ่งถูกส่งผ่านกิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดนั้นและยังไม่เคยถูกเลือกเพื่อนำไปสลับเส้นทาง โดยวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ยาวที่สุดมีโอกาสถูกเลือกก่อนวิถีแสงอื่นที่สั้นกว่า สาเหตุที่กำหนดให้ช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ยาวที่สุดมีโอกาสถูกเลือกก่อนเพราะเส้นทางที่ยาวเมื่อถูกสลับเส้นทางแล้วจะเป็นเส้นทางที่สั้น เป็นไปตามจุดประสงค์ของการจัดสรรเส้นทางที่ยังคงให้ช่องสัญญาณทราฟฟิกเลือกเส้นทางที่มีจำนวนฮ็อพน้อยถึงแม้ว่าจะไม่ใช่เส้นทางที่สั้นที่สุดแล้วก็ตาม
5. สลับเส้นทางของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ถูกเลือก แล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ด้วยเส้นทางที่ถูกกำหนดใหม่ของช่องสัญญาณทราฟฟิกนั้น ทั้งนี้ ใช้วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LPF โดยได้ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นใหม่ที่ได้หลังจากการจัดสรร
6. เปรียบเทียบค่าจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่นี้ว่าน้อยกว่าค่าจำนวนความยาวคลื่นอ้างอิงที่เก็บไว้ก่อนหน้าการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่หรือไม่ ถ้าน้อยกว่าให้ไปขั้นตอนที่ 7 แต่ถ้าเท่าเดิมหรือมากกว่าให้ไปขั้นตอนที่ 4 เพื่อเลือกช่องสัญญาณทราฟฟิกอื่นที่ครอบครองกิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดนั้นนำมาสลับเส้นทางใหม่ ในกรณีที่ไม่มีช่องสัญญาณทราฟฟิกใดในกิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดนั้นถูกสลับเส้นทางแล้วสามารถลดจำนวนความยาวคลื่นลงได้อีก ค่าจำนวนความยาวคลื่นอ้างอิงที่เก็บไว้คือ ผลตอบของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นแบบ AP และสิ้นสุดกระบวนการ
7. เก็บค่าจำนวนความยาวคลื่นใหม่นี้เป็นค่าอ้างอิงที่ใช้เปรียบเทียบกับค่าจำนวนความยาวคลื่นจากการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ครั้งต่อไป จากนั้นกลับไปขั้นตอนที่ 4 เพื่อหากิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดใหม่ เพราะค่าความยาวคลื่นที่ถูกครอบครองโดยทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกเปลี่ยนแปลงไปจากการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ในขั้นตอนที่ 5 ทำให้ต้องหากิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดใหม่

รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพอัลกอริทึมของการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน อนึ่ง รายละเอียดและเหตุผลที่มาของอัลกอริทึมจะถูกอธิบายโดยละเอียดในรูปแบบของตัวอย่างเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.5 แผนภาพการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน

3.5 ตัวอย่างการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน

ตัวอย่างที่ 1 : วงแหวนขนาด 6 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม, AP, NWC

การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน เริ่มต้นด้วยการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดก่อน ผลของการจัดสรรของวงแหวนขนาด 6 โนดที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มโดยไม่มีการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทาง ให้ผลแสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 6 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
link 1-2 (1)	1-4 (3) [1]	2-6 (9) [7]	1-3 (2) [4]	1-2 (1) [10]		
link 2-3 (2)	1-4 (3) [1]	2-5 (8) [2]	1-3 (2) [4]	2-4 (7) [6]	2-3 (6) [12]	
link 3-4 (3)	1-4 (3) [1]	2-5 (8) [2]	3-6 (12) [3]	2-4 (7) [6]	3-5 (11) [8]	3-4 (10) [13]
link 4-5 (4)	4-5 (13) [14]	2-5 (8) [2]	3-6 (12) [3]	4-6 (14) [9]	3-5 (11) [8]	
link 5-6 (5)	1-5 (4) [5]	5-6 (15) [15]	3-6 (12) [3]	4-6 (14) [9]		
link 6-1 (6)	1-5 (4) [5]	2-6 (9) [7]	1-6 (5) [11]			

จากการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุด ต้องใช้ความยาวคลื่นทั้งหมดเป็นจำนวน 6 ความยาวคลื่น และพบว่ากิ่งเชื่อม 3-4 (3) มีความคับคั่งมากที่สุด โดยมีวิถีแสงของจำนวน 6 ช่องสัญญาณทราฟฟิกผ่าน ได้แก่ ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 1-4, 2-5, 3-6 ที่มีจำนวน 3 ฮ็อพ ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 2-4, 3-5 ที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ และช่องสัญญาณทราฟฟิกสุดท้ายเป็นของคู่โนด 3-4 ที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ โดยที่แต่ละวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกใช้ความยาวคลื่นที่ 1-6 ตามลำดับ เนื่องจากวิถีแสงที่มีจำนวนฮ็อพมากกว่าจะได้รับโอกาสในการจัดสรรก่อน ดังนั้น ค่าความยาวคลื่นที่ได้รับการจัดสรรจึงอยู่ในอันดับต้น ๆ ดังปรากฏในตารางที่ 3.7

ในกระบวนการหากิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งที่สุด มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ละเลยกิ่งเชื่อมที่ไม่มีวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกครอบครองความยาวคลื่นค่าสุดท้าย (λ_M)

2. พิจารณากิ่งเชื่อมที่มีวิถีแสงที่ครอบครองความยาวคลื่นสุดท้ายและเลือกกิ่งเชื่อมที่มีปริมาณการครอบครองความยาวคลื่นจากวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกจำนวนมากที่สุด หรือ เลือกกิ่งเชื่อมที่มีจำนวนช่องสัญญาณที่ยังว่างอยู่น้อยที่สุด
3. ในกรณีที่มีกิ่งเชื่อมตรงตามเงื่อนไขบังคับตามข้อที่ 1 และ 2 มากกว่า 1 กิ่งเชื่อม เลือกกิ่งเชื่อมที่มีเลขลำดับน้อยกว่า

พิจารณาตารางการจัดสรรความยาวคลื่นที่ 3.7 จากกระบวนการหากิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งที่สุด พบว่ากิ่งเชื่อม 3-4 (3) มีความคับคั่งของวิถีแสงมากที่สุดเนื่องจากมีวิถีแสงที่ครอบครองความยาวคลื่นที่ 6 และมีวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกเลือกใช้เส้นทางที่ผ่านกิ่งเชื่อมนี้เป็นจำนวนมากที่สุดจำนวน 6 ช่องสัญญาณ ขั้นตอนต่อไปของอัลกอริทึมนี้คือเลือกวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่สามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางให้ไม่ผ่านกิ่งเชื่อมนี้แล้วทำให้จำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้ทั้งหมดลดลง ด้วยคุณสมบัติของวงแหวนที่มีเพียงสองเส้นทางระหว่างคู่โนดใด ๆ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเส้นทางของวิถีแสงในที่นี้จึงหมายถึงการสลับเส้นทางไปยังเส้นทางที่อยู่ในด้านตรงกันข้าม ถึงแม้ว่าเส้นทางที่ถูกสลับเส้นทางจะมีความยาวเท่ากับหรือมากกว่าเดิมซึ่งในกรณีที่สลับเส้นทางแล้ววิถีแสงมีจำนวนฮ็อพมากกว่าเดิมจะทำให้ต้องเสียพื้นที่ในการจัดสรรความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นและอาจจะเป็นเหตุให้เปลืองความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น แต่จากตารางที่ 3.7 พบว่ามีพื้นที่หรือช่องสัญญาณที่ยังไม่ได้ถูกจัดสรรให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกใด ๆ อยู่เป็นจำนวนหนึ่งซึ่งถือเป็นส่วนที่ยังไม่มีการใช้ประโยชน์ ดังนั้น เพื่อลดความคับคั่งจากการจัดสรรเส้นทางด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดซึ่งไม่มีความยืดหยุ่นในการเลือกใช้เส้นทาง จึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางให้สามารถหลบเลี่ยงกิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งของวิถีแสงมากซึ่งช่วยให้ลดจำนวนความยาวคลื่นลงได้ โดยวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่มีจำนวนฮ็อพมากกว่าจะได้รับการพิจารณาเพื่อสลับเส้นทางก่อน ด้วยเหตุผลที่ว่าวิถีแสงที่มีจำนวนฮ็อพมากจะมีจำนวนฮ็อพที่น้อยเมื่อถูกสลับเส้นทางระหว่างต้นทางกับปลายทาง

ในตัวอย่างนี้ ทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์มซึ่งทุกคู่โนดต้องการหนึ่งช่องสัญญาณทราฟฟิก และการอ้างถึงช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนดใด ๆ นั้นค่อนข้างยาว ดังนั้นต่อไปจะอ้างถึงด้วยคำว่า คู่โนด เท่านั้น พิจารณาวิถีแสงที่จะสลับเส้นทางเรียงตามจำนวนฮ็อพจากมากไปน้อย โดยเลือกวิถีแสงแรกที่มีจำนวน 3 ฮ็อพเพื่อสลับเส้นทาง คือ คู่โนด 1-4 (3) จากนั้นจัดสรรความยาวคลื่นใหม่โดยคู่โนด 1-4 ใช้เส้นทางใหม่ที่ถูกกลับทิศแล้ว ปรากฏว่าใช้ 6 ความยาวคลื่นเหมือนเดิม เป็นอันว่าการสลับเส้นทางของคู่โนด 1-4 ไม่สามารถช่วยลดจำนวนความยาวคลื่นลง จึงเปลี่ยนเส้นทางของคู่โนด 1-4 กลับเป็นอย่างเดิมเหมือนกับเมื่อก่อนถูกทำการสลับเส้นทาง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องเลือกวิถีแสงถัดไปซึ่งในตัวอย่างนี้มีจำนวน 3 ฮ็อพเช่นกัน คือ คู่โนด 2-5 โดยสลับเส้นทางของ

ช่องสัญญาณทราฟฟิกนี้และจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ ปรากฏว่าใช้จำนวน 5 ความยาวคลื่นซึ่งลดลงจากเดิม ดังตารางที่ 3.8 จะสังเกตได้ว่าตารางที่ 3.8 นี้มีการจัดสรรเส้นทางที่แตกต่างกับตารางที่ 3.7 เฉพาะคู่โนด 2-5 (8) เท่านั้น ในขณะที่ความยาวคลื่นที่ได้รับการจัดสรรของวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกอื่นอาจจะแตกต่างจากเดิมเป็นผลจากช่องว่างที่เหลือหลังจากการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับคู่โนด 2-5 ที่ถูกสลับเส้นทางเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

ตารางที่ 3.8 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 6 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, AP, NWC

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
link 1-2 (1)	1-4 (3) [1]	2-5 (8) [2]	1-3 (2) [4]	2-6 (9) [7]	1-2 (1) [10]
link 2-3 (2)	1-4 (3) [1]	2-4 (7) [6]	1-3 (2) [4]	2-3 (6) [12]	
link 3-4 (3)	1-4 (3) [1]	2-4 (7) [6]	3-6 (12) [3]	3-5 (11) [8]	3-4 (10) [13]
link 4-5 (4)	4-5 (13) [14]		3-6 (12) [3]	3-5 (11) [8]	4-6 (14) [9]
link 5-6 (5)	1-5 (4) [5]	2-5 (8) [2]	3-6 (12) [3]	5-6 (15) [15]	4-6 (14) [9]
link 6-1 (6)	1-5 (4) [5]	2-5 (8) [2]	1-6 (5) [11]	2-6 (9) [7]	

เมื่อจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่ได้จากการสลับเส้นทางของคู่โนด 2-5 ลดลง โดยแสดงวิถีแสงในตารางที่กลับเส้นทางแล้วสามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้เป็นแรงเงา ตารางการจัดสรรเดิม (ตารางที่ 3.7) ถูกละทิ้งไปและพิจารณาตารางใหม่ที่ได้แทนเพื่อค้นหาวิถีแสงที่สามารถสลับเส้นทางแล้วทำให้จำนวนความยาวคลื่นลดลงต่อไป จากตารางการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่ได้ใหม่ (ตารางที่ 3.8) หากิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งของวิถีแสงมากที่สุด โดยมีกิ่งเชื่อม 1-2 (1), กิ่งเชื่อม 3-4 (3), กิ่งเชื่อม 4-5 (4) และกิ่งเชื่อม 5-6 (5) ซึ่งครอบครองความยาวคลื่นที่ 5 ซึ่งเป็นความยาวคลื่นสุดท้าย แต่กิ่งเชื่อม 4-5 (4) ถูกครอบครองเพียงจำนวน 4 ช่องสัญญาณทราฟฟิกเท่านั้น และเมื่อมีมากกว่า 1 กิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งสูงสุดเท่ากัน จะเลือกกิ่งเชื่อมที่มีเลขลำดับน้อยที่สุด ในที่นี้คือ กิ่งเชื่อม 1-2 (1) อย่างไรก็ตาม หลังจากเลือกช่องสัญญาณโดยเรียงตามจำนวนฮ็อพของวิถีแสงในกิ่งเชื่อม 1-2 และสลับเส้นทางของวิถีแสงนั้นแล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ โดยเลือกช่องสัญญาณทราฟฟิกคู่โนด 1-4 (3), 2-5 (8), 1-3 (2), 2-6 (9), 1-2 (1) ตามลำดับ ปรากฏว่าไม่มีวิถีแสงของคู่โนดใดที่ถูกสลับเส้นทางแล้วสามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้อีกเลย ดังนั้น จึงได้ผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 6 โนดแบบ AP, NWC, unform traffic ดังตารางที่ 3.8 และใช้ทั้งหมดจำนวน 5 ความยาวคลื่น

ตัวอย่างที่ 2 : วงแหวนขนาด 6 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, AP, WC

ตัวอย่างนี้แตกต่างจากตัวอย่างก่อนหน้าโดยเพิ่มความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของช่องสัญญาณระหว่างเส้นทาง (WC) เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางแบบวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอนต้องจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดเสียก่อน ดังนั้น ผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นแบบ SP แสดงดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 6 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, WC

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
link 1-2 (1)	1-4 (3) [1]	1-3 (2) [4]	2-6 (9) [7]	1-2 (1) [10]		
link 2-3 (2)	1-4 (3) [1]	2-5 (8) [2]	1-3 (2) [4]	2-4 (7) [6]	2-3 (6) [12]	
link 3-4 (3)	1-4 (3) [1]	2-5 (8) [2]	3-6 (12) [3]	2-4 (7) [6]	3-5 (11) [8]	3-4 (10) [13]
link 4-5 (4)	2-5 (8) [2]	3-6 (12) [3]	3-5 (11) [8]	4-6 (14) [9]	4-5 (13) [14]	
link 5-6 (5)	3-6 (12) [3]	1-5 (4) [5]	4-6 (14) [9]	5-6 (15) [15]		
link 6-1 (6)	1-5 (4) [5]	2-6 (9) [7]	1-6 (5) [11]			

ผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดที่ได้จากแบบ WC แตกต่างจากแบบ NWC โดยแต่ละวิถีแสงไม่จำเป็นต้องได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละกิ่งเชื่อมตามเส้นทางที่มันผ่านด้วยความยาวคลื่นค่าเดียวกัน ตัวอย่างนี้ใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 6 ความยาวคลื่นเท่ากันกับแบบ NWC

จากตารางผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีเส้นทางที่สั้นที่สุด (ตารางที่ 3.9) หากิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งของวิถีแสงมากที่สุดได้คือกิ่งเชื่อม 3-4 (3) จะสังเกตได้ว่าในกระบวนการหากิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งที่สุดในแบบ WC เปรียบเสมือนการนับจำนวนวิถีแสงที่ครอบครองของแต่ละกิ่งเชื่อมแล้วเลือกกิ่งเชื่อมที่มีจำนวนวิถีแสงครอบครองมากที่สุด เพราะตารางการจัดสรรความยาวคลื่นในแบบ WC ไม่มีช่องว่างคั่นอยู่ระหว่างค่าความยาวคลื่นแรกจนถึงค่าความยาวคลื่นสุดท้าย โดยกิ่งเชื่อม 3-4 ที่ได้นี้ประกอบด้วยวิถีแสงที่มีจำนวน 3 ฮ็อพ คือ คู่โนด 1-4 (3), 2-5 (8), 3-6 (12) วิถีแสงที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ คือ 2-4 (7), 3-5 (11) และวิถีแสงที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ คือ 3-4 (10) เลือกวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่จะสลับเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นใหม่โดยเริ่มจากคู่โนด 1-4 (3) ผลที่ได้คือใช้จำนวน 6 ความยาวคลื่นเหมือนเดิม ดังนั้น จึงสลับเส้นทางของคู่โนด 2-5 (8) เป็นลำดับต่อไป ปรากฏว่าสามารถลดเหลือจำนวน 5 ความยาวคลื่น ดังแสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 6 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, AP, WC

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
link 1-2 (1)	1-4 (3) [1]	2-5 (8) [2]	1-3 (2) [4]	2-6 (9) [7]	1-2 (1) [10]
link 2-3 (2)	1-4 (3) [1]	1-3 (2) [4]	2-4 (7) [6]	2-3 (6) [12]	
link 3-4 (3)	1-4 (3) [1]	3-6 (12) [3]	2-4 (7) [6]	3-5 (11) [8]	3-4 (10) [13]
link 4-5 (4)	3-6 (12) [3]	3-5 (11) [8]	4-6 (14) [9]	4-5 (13) [14]	
link 5-6 (5)	2-5 (8) [2]	3-6 (12) [3]	1-5 (4) [5]	4-6 (14) [9]	5-6 (15) [15]
link 6-1 (6)	2-5 (8) [2]	1-5 (4) [5]	2-6 (9) [7]	1-6 (5) [11]	

จากตารางที่ 3.10 ซึ่งเป็นตารางการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่หลังจากการสลับเส้นทางของคู่โนด 2-5 (8) ซึ่งแสดงเป็นแรเงาในตาราง หากิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งของวิถีแสงมากที่สุดได้คือ กิ่งเชื่อม 1-2 (1) โดยกิ่งเชื่อมนี้ประกอบด้วยวิถีแสงที่มีจำนวน 3 ฮ็อพ คือ คู่โนด 1-4 (3), 2-5 (8) วิถีแสงที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ คือ 1-3 (2), 2-6 (9) และ วิถีแสงที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ คือ 1-2 (1) เลือกวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกเพื่อสลับเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นใหม่โดยเรียงจากวิถีแสงที่มีจำนวนฮ็อพมากกว่าไปน้อยกว่า พบว่าไม่สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้อีก ดังนั้น ผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 6 โนดที่มีทราฟฟิกแบบยูนฟอร์ม, AP, WC แสดงดังตารางที่ 3.10 และใช้จำนวนความยาวคลื่นทั้งหมด 5 ความยาวคลื่น

ตัวอย่างที่ 3 : วงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม, AP, NWC

กำหนดให้ตัวอย่างของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มนี้มีปริมาณความต้องการทราฟฟิกตามตารางที่ 3.4 ซึ่งเป็นปริมาณความต้องการทราฟฟิกเช่นเดียวกันกับตัวอย่างที่ใช้วิธีการกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดในหัวข้อ 3.3 เพื่อเปรียบเทียบการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวิธีการกำหนดเส้นทางที่แตกต่างกัน ในทำนองเดียวกันกับการจัดสรรเส้นทางด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอนของตัวอย่างก่อนหน้า ต้องมีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดก่อน ซึ่งได้ผลตามตารางที่ 3.5 และใช้จำนวน 8 ความยาวคลื่นดังแสดงในหัวข้อก่อนหน้าและเลือกกิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งของวิถีแสงมากที่สุดได้คือ กิ่งเชื่อม 2-3 (2) ซึ่งประกอบด้วยวิถีแสงที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ คือ ช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ 1-3 ของคู่โนด 1-3 (2), ช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ 1-3 ของคู่โนด 2-4 (6) และ วิถีแสงที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ คือ ช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ 1,2 ของคู่โนด 2-3 (5) เลือกสลับเส้นทางวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกหนึ่งของคู่โนด 1-3 (2) และจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ได้ผลดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 เส้นทางและความยาวคลื่นที่ถูกจัดสรรระหว่างกระบวนการจัดสรรเส้นทางวิธี AP ของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, NWC

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
link 1-2 (1)	1-3 (2) [2]	1-3 (2) [3]	1-2 (1) [10]				
link 2-3 (2)	1-3 (2) [2]	1-3 (2) [3]	2-4 (6) [6]	2-4 (6) [7]	2-4 (6) [8]	2-3 (5) [13]	2-3 (5) [14]
link 3-4 (3)	1-3 (2) [1]	3-4 (8) [15]	2-4 (6) [6]	2-4 (6) [7]	2-4 (6) [8]	3-5 (9) [9]	
link 4-5 (4)	1-3 (2) [1]	1-4 (3) [4]	1-4 (3) [5]			3-5 (9) [9]	
link 5-1 (5)	1-3 (2) [1]	1-4 (3) [4]	1-4 (3) [5]	1-5 (4) [11]	1-5 (4) [12]		

จากตารางที่ 3.11 จำนวนความยาวคลื่นลดลงเหลือ 7 ความยาวคลื่น โดยวิถีแสงที่แสดงเป็นแรเงาคือวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ถูกเลือกเพื่อสลับเส้นทางแล้วสามารถลดจำนวนความยาวคลื่นลงได้ภายหลังจากการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ ดังนั้น จึงพิจารณาตารางการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ที่ได้นี้แทน โดยกิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งของวิถีแสงมากที่สุด คือ กิ่งเชื่อม 2-3 (2) เช่นเดิม และประกอบด้วยวิถีแสงที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ คือ ช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ 1,2 ของคู่โนด 1-3 (2), ช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ 1-3 ของคู่โนด 2-4 (6) และวิถีแสงที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ คือ ช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ 1,2 ของคู่โนด 2-3 (5) โดยขณะนี้มี 1 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 1-3 (2) ที่ใช้เส้นทางด้านตรงกันข้าม จากนั้น พิจารณากิ่งเชื่อม 2-3 (2) เลือกสลับเส้นทางช่องสัญญาณทราฟฟิกหนึ่งของคู่โนด 1-3 (2) ซึ่งครอบครองความยาวคลื่นที่ 1 ของกิ่งเชื่อม 1-2 (1) และ 2-3 (2) อยู่ แล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ ได้ผลเป็นจำนวน 7 ความยาวคลื่นเท่าเดิม ดังนั้น เลือกสลับเส้นทางอีกช่องสัญญาณทราฟฟิกหนึ่งของคู่โนด 1-3 (2) ซึ่งครอบครองความยาวคลื่นที่ 2 อยู่ แล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ได้ผลเป็นจำนวน 7 ความยาวคลื่นเช่นเดียวกัน เมื่อเส้นทางในด้านตรงกันข้ามของคู่โนด 1-3 (2) ยกเว้นช่องสัญญาณทราฟฟิกแรกสุดที่สลับเส้นทางไปแล้ว ไม่สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้ ลำดับต่อไปจึงเลือกสลับเส้นทางของช่องสัญญาณทราฟฟิกหนึ่งของคู่โนด 2-4 (6) ซึ่งครอบครองความยาวคลื่นที่ 3 อยู่ ได้ผลตอบดังตารางที่ 3.12 และใช้จำนวนความยาวคลื่นลดลงเหลือ 6 ความยาวคลื่น

ตารางที่ 3.12 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, AP, NWC

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
link 1-2 (1)	1-3 (2) [3]	2-4 (6) [2]	1-3 (2) [4]	1-2 (1) [10]		
link 2-3 (2)	1-3 (2) [3]	2-4 (6) [7]	1-3 (2) [4]	2-4 (6) [8]	2-3 (5) [13]	2-3 (5) [14]
link 3-4 (3)	1-3 (2) [1]	2-4 (6) [7]	3-4 (8) [15]	2-4 (6) [8]	3-5 (9) [9]	
link 4-5 (4)	1-3 (2) [1]	2-4 (6) [2]	1-4 (3) [5]	1-4 (3) [6]	3-5 (9) [9]	
link 5-1 (5)	1-3 (2) [1]	2-4 (6) [2]	1-4 (3) [5]	1-4 (3) [6]	1-5 (4) [11]	1-5 (4) [12]

พิจารณาตารางที่ 3.12 อันดับความยาวคลื่นของช่องสัญญาณทราฟฟิกหนึ่งที่ยังไม่ได้สลับเส้นทางของคู่โนด 1-3 (2) ย้ายจากความยาวคลื่นที่ 2 ไปเป็นความยาวคลื่นที่ 3 เป็นผลมาจากอัลกอริทึมที่ใช้ในการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับทุกช่องสัญญาณทราฟฟิก มีลำดับของการจัดสรรความยาวคลื่นเรียงตามจำนวนฮ็อพของวิถีแสงและในกรณีที่มีจำนวนฮ็อพเท่ากันจะเรียงตามลำดับของคู่โนด (ตัวเลขในวงเล็บ) ดังนั้น ในการจัดสรรความยาวคลื่นครั้งนี้ มีลำดับการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ถูกสลับเส้นทางของคู่โนด 1-3 (2) ก่อนและต่อด้วยวิถีแสงที่ถูกสลับเส้นทางของคู่โนด 2-4 (6) เพราะทั้งสองวิถีแสงมีจำนวน 3 ฮ็อพ โดยวิถีแสงคู่โนด 1-3 (2) ครอบครองความยาวคลื่นที่ 1 และวิถีแสงคู่โนด 2-4 (6) ครอบครองความยาวคลื่นที่ 2 จากนั้นจึงต่อด้วยวิถีแสงอื่นที่มีจำนวนฮ็อพลดหลั่นลงมา

ภายหลังจากที่ได้ผลของการจัดสรรความยาวคลื่นจากการสลับเส้นทางของวิถีแสงคู่โนด 2-4 (6) ดังแสดงในตารางที่ 3.12 แล้ว พบว่ากิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งของวิถีแสงมากที่สุดคือ กิ่งเชื่อม 2-3 (2) ซึ่งประกอบด้วยวิถีแสงที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ คือ 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 1-3 (2), 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 2-4 (6) และวิถีแสงที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ คือ 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 2-3 (5) อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะเลือกและสลับเส้นทางวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกใดในกิ่งเชื่อมนี้แล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ ปรากฏว่าไม่มีวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกในคู่โนดใดที่สลับเส้นทางแล้วสามารถลดจำนวนความยาวคลื่นลงได้ ดังนั้นการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของตัวอย่างนี้ให้ผลตอบดังตารางที่ 3.12 และใช้จำนวน 6 ความยาวคลื่น โดยมีจำนวน 2 วิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกคือในคู่โนด 1-3 (2) และ 2-4 (6) ที่ถูกสลับเส้นทางแล้วสามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้

I19146322

ตัวอย่างที่ 4 : วงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม, AP, WC

จากปริมาณทราฟฟิกเช่นเดียวกันกับในตัวอย่างที่ 3 นำผลจากการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธีการกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุด (ตารางที่ 3.6) มาพิจารณา พบว่ากิ่งเชื่อม 2-3 (2) มีความคับคั่งของวิถีแสงมากที่สุดเป็นจำนวน 8 วิถีแสง ประกอบด้วยวิถีแสงที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ คือ 3 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 1-3 (2), 3 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 2-4 (6) และวิถีแสงที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ คือ 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 2-3 (5) เลือกวิถีแสงที่จะสลับเส้นทางโดยเริ่มจากช่องสัญญาณทราฟฟิกหนึ่งของคู่โนด 1-3 (2) ได้ผลดังตารางที่ 3.13 โดยใช้จำนวน 7 ความยาวคลื่น อนึ่ง วิถีแสงที่แสดงเป็นแรเงาในตารางหมายถึงวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ถูกเลือกเพื่อสลับเส้นทางแล้วทำให้จำนวนความยาวคลื่นลดลงภายหลังจากการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่

ตารางที่ 3.13 เส้นทางและความยาวคลื่นที่ถูกจัดสรรระหว่างกระบวนการจัดสรรเส้นทางวิธี AP ของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, WC

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
link 1-2 (1)	1-3 (2) [2]	1-3 (2) [3]	1-2 (1) [10]				
link 2-3 (2)	1-3 (2) [2]	1-3 (2) [3]	2-4 (6) [6]	2-4 (6) [7]	2-4 (6) [8]	2-3 (5) [13]	2-3 (5) [14]
link 3-4 (3)	1-3 (2) [1]	2-4 (6) [6]	2-4 (6) [7]	2-4 (6) [8]	3-5 (9) [9]	3-4 (8) [15]	
link 4-5 (4)	1-3 (2) [1]	1-4 (3) [4]	1-4 (3) [5]	3-5 (9) [9]			
link 5-1 (5)	1-3 (2) [1]	1-4 (3) [4]	1-4 (3) [5]	1-5 (4) [11]	1-5 (4) [12]		

พิจารณาตารางที่ 3.13 กิ่งเชื่อม 2-3 (2) มีความคับคั่งของวิถีแสงมากที่สุด ประกอบด้วยวิถีแสงที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ คือ 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 1-3 (2), 3 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 2-4 (6) และวิถีแสงที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ คือ 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 2-3 (5) เลือกสลับเส้นทางช่องสัญญาณทราฟฟิกหนึ่งของคู่โนด 1-3 (2) แล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ ปรากฏว่าใช้จำนวน 7 ความยาวคลื่นเท่าเดิมและอีกช่องสัญญาณทราฟฟิกหนึ่งของคู่โนด 1-3 (2) ก็ไม่สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้เช่นกัน (เช่นเดียวกันกับในตัวอย่างที่ 3) ลำดับต่อไป ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 2-4 (6) จึงถูกเลือกเพื่อสลับเส้นทางแล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ ได้ผลดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจากตารางที่ 3.4, AP, WC

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
link 1-2 (1)	2-4 (6) [2]	1-3 (2) [3]	1-3 (2) [4]	1-2 (1) [10]		
link 2-3 (2)	1-3 (2) [3]	1-3 (2) [4]	2-4 (6) [7]	2-4 (6) [8]	2-3 (5) [13]	2-3 (5) [14]
link 3-4 (3)	1-3 (2) [1]	2-4 (6) [7]	2-4 (6) [8]	3-5 (9) [9]	3-4 (8) [15]	
link 4-5 (4)	1-3 (2) [1]	2-4 (6) [2]	1-4 (3) [5]	1-4 (3) [6]	3-5 (9) [9]	
link 5-1 (5)	1-3 (2) [1]	2-4 (6) [2]	1-4 (3) [5]	1-4 (3) [6]	1-5 (4) [11]	1-5 (4) [12]

จากตารางที่ 3.14 จำนวนความยาวคลื่นลดลงเหลือ 6 ความยาวคลื่น จะสังเกตได้ว่ามีการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทางเป็นจำนวนมาก โดยมีอันดับการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 1-3 (2) ที่สลับเส้นทางก่อนและต่อด้วยช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 2-4 (6) ซึ่งมีจำนวน 3 ฮ็อพ จากนั้น จึงจัดสรรให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกอื่นที่มีจำนวน 2 และ 1 ฮ็อพ ตามลำดับต่อไป

พิจารณาตารางที่ 3.14 เลือกกิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งของวิถีแสงมากที่สุด ในที่นี้เลือกกิ่งเชื่อม 2-3 (2) ซึ่งประกอบด้วยวิถีแสงที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ คือ 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 1-3 (2), 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 2-4 (6) และวิถีแสงที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ คือ 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 2-3 (5) อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะสลับเส้นทางของวิถีแสงใด ๆ ที่ครอบครองกิ่งเชื่อมนี้แล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ ก็ไม่ได้ทำให้จำนวนความยาวคลื่นลดลงแต่อย่างใด ดังนั้น ผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของตัวอย่างนี้ซึ่งมีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มและเป็นแบบ AP, WC ได้ผลดังตารางที่ 3.14 และใช้จำนวน 6 ความยาวคลื่นเท่ากับแบบ NWC ในตัวอย่างที่ 3 อย่างไรก็ตาม การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นแบบ NWC หรือ WC ใช้วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LPF เหมือนกัน ดังนั้น อันดับวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกในการจัดสรรทั้งสองแบบจึงเหมือนกันเสมอทุกกรณีทราฟฟิก

จากตัวอย่างข้างต้นทั้งหมดในหัวข้อ 3.4 และ 3.5 เป็นตัวอย่างของโครงข่ายที่มีขนาดเล็กเพื่อให้สะดวกในการอธิบายวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น ทั้งแบบที่มีการจัดสรรเส้นทางแบบ SP และ AP โดยละเอียดพร้อมกับแสดงผลอย่างคร่าว ๆ เป็นรูปภาพหรือตาราง โดยคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญคือความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่น (WC, NWC) และประเภทของทราฟฟิก (ยูนิฟอร์ม, ไม่ยูนิฟอร์ม) อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะถูกทดสอบและกล่าวถึงต่อไป

3.6 ผลของอันดับในการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสง

ในการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับแต่ละวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกเป็นจำนวนมากที่ต้องการส่งผ่านภายในวงแหวนนั้น อันดับของการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกหรือการกำหนดว่าจะจัดสรรความยาวคลื่นให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกใดก่อนหรือหลังอาจจะมีผลต่อการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรซึ่งเป็นจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดที่ทุกกิ่งเชื่อมสามารถรองรับได้ ทั้งนี้ อาจทำให้สิ้นเปลืองจำนวนความยาวคลื่นต่อกิ่งเชื่อมมากเกินความจำเป็นและมีบางช่องสัญญาณที่เตรียมไว้ยังคงว่างอยู่เป็นสาเหตุให้การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร จึงทำการทดสอบโดยแบ่งลักษณะของการเรียงอันดับวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่จะจัดสรรความยาวคลื่นออกเป็น 3 วิธี คือ

1. การสุ่ม (Rnd - Random) วิถีแสงของแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกได้รับอันดับของการจัดสรรความยาวคลื่นจากการสุ่ม เนื่องจากผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธีการสุ่มอันดับของวิถีแสงนั้นมีค่าไม่แน่นอน จึงทำการหาผลตอบของวงแหวนขนาด 3-100 โนดเป็นจำนวน 100 ครั้ง โดยแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นที่น้อยที่สุด มากที่สุด และที่เป็นค่าเฉลี่ยของวงแหวนทุกขนาด

2. การจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดก่อน (SPF - Shortest Path First) วิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่มีจำนวนฮ็อพน้อยกว่าได้รับสิทธิ์ในการจัดสรรความยาวคลื่นก่อน

3. การจัดสรรความยาวคลื่นให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดก่อน (LPF – Longest Path First) วิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่มีจำนวนฮ็อพมากกว่าได้รับสิทธิ์ในการจัดสรรความยาวคลื่นก่อน

นอกจากวิธีการเรียงอันดับของช่องสัญญาณทราฟฟิกเพื่อจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธีแล้ว ยังแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ผลของอันดับของการจัดสรรความยาวคลื่นเมื่อโนดไม่มีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงระหว่างเส้นทางได้ (NWC) และเมื่อโนดมีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงระหว่างเส้นทางได้ (WC) ดังนั้นเพื่อศึกษาถึงผลของอันดับของวิถีแสงในการจัดสรรความยาวคลื่นและเพื่อให้ง่ายต่อการทดสอบทั้งแบบ NWC และ WC จึงจัดสรรความยาวคลื่นด้วยทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม และแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกเลือกใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด (SP) โดยเส้นทางที่สั้นที่สุดในหัวข้อนี้สำหรับบางช่องสัญญาณทราฟฟิกซึ่งมีเส้นทางทั้ง 2 ทิศทางที่มีจำนวนฮ็อพเท่ากันจะใช้เส้นทางเฉพาะในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจากโนดที่มีเลขลำดับน้อยกว่าเพื่อให้ทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกมีเพียงเส้นทางเดียวทำให้ไม่ต้องคำนึงการจัดสรรเส้นทางอีก

ในการเปรียบเทียบผลของอันดับในการเลือกวิถีแสงเพื่อจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธี คือ Rnd, SPF, และ LPF จะเปรียบเทียบผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นจากการจัดสรรความยาว

คลื่นด้วยเส้นทางดังที่กล่าวมาแล้วภายในโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนด้วยทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม ซึ่งแต่ละคู่โนดต้องการปริมาณทราฟฟิกเป็นจำนวน 1 ช่องสัญญาณเท่ากันหมด และทดสอบกับโครงข่ายที่มีขนาดนับเป็นจำนวนโนดตั้งแต่ 3 โนดถึง 100 โนด

3.6.1 เมื่อโนดไม่มีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสง

ตารางที่ 3.15 การเปรียบเทียบผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธีของวงแหวนขนาด 3-100 คู่โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC

จำนวนโนด	ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่น				
	วิธี Rnd			วิธี SPF	วิธี LPF
	Rnd_Min	Rnd_Max	Rnd_Avg		
3	1	1	1.00	1	1
4	3	3	3.00	3	3
5	3	4	3.46	4	3
6	6	7	6.06	6	6
7	6	9	7.15	7	6
8	10	12	10.31	11	10
9	10	13	11.86	12	10
10	15	17	15.68	16	15
11	17	20	17.84	18	15
12	21	25	22.18	22	21
13	23	27	24.96	25	21
14	28	33	29.78	32	28
15	31	35	32.94	34	28
16	37	41	38.66	42	36
17	40	45	42.22	45	36
18	46	51	48.73	52	45
19	50	56	52.98	53	45
20	57	62	59.73	67	55
21	62	67	64.17	69	55
22	69	74	71.45	80	66
23	74	80	76.71	79	66
24	81	89	85.13	91	79
25	88	93	90.38	98	78

ตารางที่ 3.15 (ต่อ)

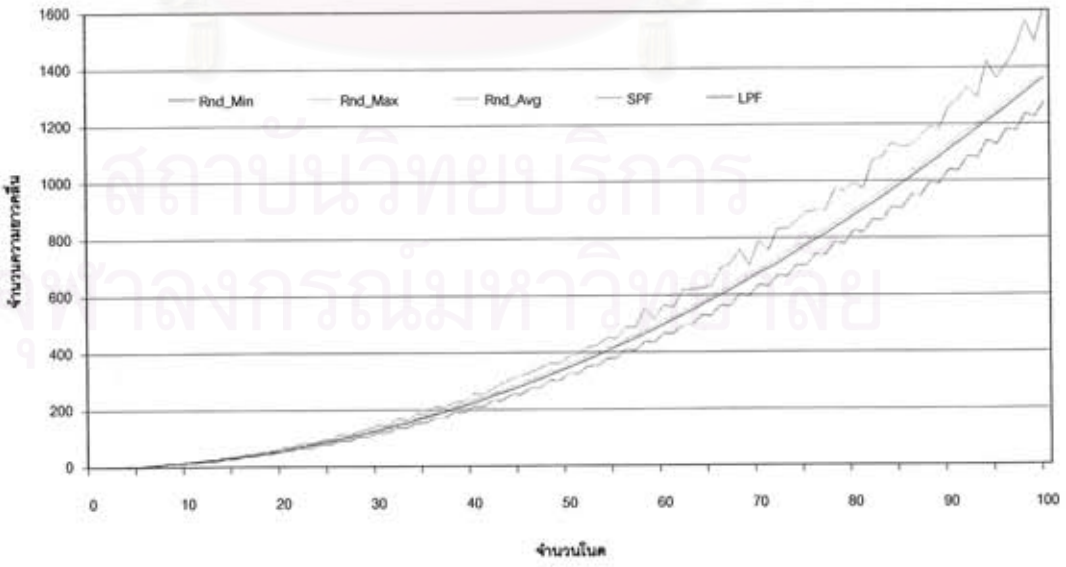
จำนวนโนด	ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่น				
	วิธี Rnd			วิธี SPF	วิธี LPF
	Rnd_Min	Rnd_Max	Rnd_Avg		
26	96	102	98.96	112	91
27	102	108	104.92	111	91
28	111	119	114.37	124	105
29	118	125	120.86	132	105
30	128	134	130.65	145	120
31	135	142	137.74	144	120
32	145	152	148.15	168	136
33	152	159	155.63	164	136
34	164	171	166.95	186	153
35	172	178	174.83	184	153
36	182	190	186.21	212	172
37	191	201	194.97	204	171
38	203	211	207.25	227	191
39	212	219	215.69	227	190
40	223	233	228.52	257	212
41	234	245	238.56	253	210
42	248	256	252.01	273	232
43	258	266	261.50	290	231
44	271	281	275.63	310	254
45	282	291	286.18	318	253
46	295	305	300.15	331	277
47	307	318	311.47	346	276
48	322	333	326.21	362	303
49	334	343	338.34	362	300
50	348	361	353.52	385	327
51	361	371	365.98	395	325
52	375	390	381.90	417	352
53	390	401	394.60	424	351
54	405	417	410.72	450	378
55	420	429	424.36	448	378

ตารางที่ 3.15 (ต่อ)

จำนวนโนด	ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่น				
	วิธี Rnd			วิธี SPF	วิธี LPF
	Rnd_Min	Rnd_Max	Rnd_Avg		
56	435	446	441.15	489	410
57	449	460	455.25	486	406
58	466	480	473.18	553	438
59	481	493	487.06	517	435
60	499	512	505.15	564	466
61	515	526	519.81	556	465
62	531	544	538.80	616	497
63	548	561	554.12	619	496
64	567	580	573.30	622	529
65	583	594	589.20	633	528
66	602	617	608.45	693	565
67	618	631	624.56	708	561
68	638	655	645.56	758	603
69	657	669	662.29	705	595
70	677	690	683.08	790	635
71	693	707	700.76	756	630
72	712	730	722.00	831	668
73	733	749	739.79	833	666
74	754	773	762.27	862	705
75	776	787	780.49	891	703
76	795	812	802.70	895	744
77	814	828	821.57	898	741
78	838	855	844.73	970	785
79	857	871	863.94	967	780
80	881	899	887.76	995	826
81	902	915	908.02	973	820
82	923	939	931.43	1074	865
83	944	960	952.27	1084	861
84	968	987	977.07	1134	908
85	992	1006	997.38	1120	903

ตารางที่ 3.15 (ต่อ)

จำนวนโนด	ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่น				
	วิธี Rnd			วิธี SPF	วิธี LPF
	Rnd_Min	Rnd_Max	Rnd_Avg		
86	1015	1033	1023.80	1124	948
87	1039	1052	1044.79	1157	946
88	1062	1081	1070.63	1189	995
89	1086	1101	1093.14	1184	990
90	1113	1130	1119.08	1263	1040
91	1136	1152	1141.83	1286	1035
92	1160	1179	1168.89	1331	1088
93	1186	1198	1191.62	1295	1081
94	1210	1226	1218.15	1419	1143
95	1236	1251	1242.35	1361	1128
96	1260	1281	1269.76	1409	1180
97	1288	1304	1294.49	1464	1176
98	1313	1332	1323.18	1562	1236
99	1341	1355	1347.68	1490	1225
100	1364	1387	1376.17	1614	1280



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธี Rnd, SPF, LPF

จากตารางที่ 3.15 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธี พบว่าไม่มีผลตอบจากวงแหวนขนาดใดเลยที่จัดสรรความยาวคลื่นแบบ LPF แล้วให้ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นที่มากกว่าหรือได้ผลที่แย่กว่าจากการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธี Rnd หรือ SPF ดังนั้น วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LPF ให้ผลตอบได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ง่ายในการสรุปถึงวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุด จึงแสดงเป็นกราฟรูปที่ 3.6 เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของผลตอบจากการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธี

ผลของแต่ละวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นเป็นดังนี้

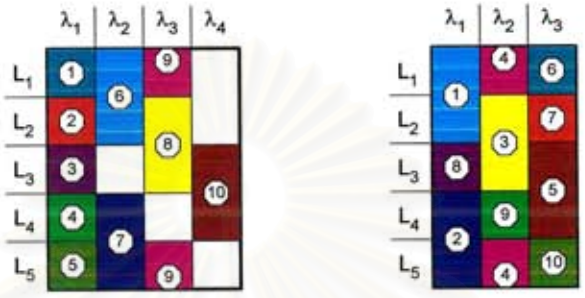
1. วิธี Rnd - เป็นวิธีที่ไม่มีการควบคุมอันดับก่อนหลังของวิถีแสงที่จะได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นและ seed ที่ใช้ในการสุ่มเป็นฟังก์ชันของเวลา จึงทำให้การทดสอบในแต่ละครั้งได้ผลตอบที่ไม่แน่นอน ดังนั้น จำเป็นต้องมีการทำซ้ำหลาย ๆ ครั้งจนกว่าจะได้ผลเป็นที่น่าพอใจและเลือกผลตอบครั้งที่ดีที่สุดหรือใช้จำนวนความยาวคลื่นน้อยที่สุด ทำให้เสียเวลามากกว่าวิธีอื่นซึ่งทดสอบโครงข่ายแต่ละขนาดเพียงครั้งเดียว นอกจากนี้ ผลตอบที่น้อยที่สุด (Rnd_Min ในกราฟรูปที่ 3.6) จากการทดสอบ 100 ครั้งของแต่ละขนาดของโครงข่ายมีค่าระหว่างผลที่ได้จากวิธี SPF และ LPF

2. วิธี SPF - เป็นวิธีที่มีการกำหนดอันดับก่อนหลังของวิถีแสงที่จะได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นโดยกำหนดให้วิถีแสงที่มีจำนวนฮ็อพน้อยกว่าได้รับการจัดสรรก่อน ซึ่งผลตอบดังแสดงในตารางที่ 3.14 หรือกราฟรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าผลตอบที่ได้จากวิธีนี้มีค่าไม่เหมาะสมที่สุดถึงแม้ว่ามีการควบคุมอันดับของวิถีแสงในการจัดสรรแล้วก็ตาม ทั้งนี้ผลที่ได้ต้องใช้จำนวนความยาวคลื่นมากกว่าการจัดสรรโดยวิธีอื่น โดยเฉพาะเมื่อโครงข่ายมีขนาดมากกว่า 20 โนด อย่างไรก็ตาม ไม่จำเป็นเสมอไปที่ผลตอบในบางโครงข่ายที่จัดสรรความยาวคลื่นแบบ SPF แล้วต้องให้ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น เพราะผลตอบในบางครั้งจากทั้งหมด 100 ครั้งของวิธี Rnd ให้ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นมากกว่าหรือได้ผลที่แย่กว่าการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ SPF เสียอีก รูปที่ 3.7 แสดงถึงสาเหตุที่ทำให้การจัดสรรความยาวคลื่นวิธี SPF ต้องใช้จำนวนความยาวคลื่นในวงแหวนมากเกินความจำเป็น และจะกล่าวถึงต่อไปโดยการเปรียบเทียบกับวิธี LPF

3. วิธี LPF - เป็นวิธีที่มีการกำหนดอันดับก่อนหลังของช่องสัญญาณที่จะได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นโดยกำหนดให้ช่องสัญญาณที่มีจำนวนฮ็อพมากกว่าได้รับการจัดสรรก่อน ทุกค่าผลตอบที่ได้จากวิธีนี้ให้ค่าที่ดีที่สุดคือใช้จำนวนความยาวคลื่นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 2 วิธีที่กล่าวมาแล้ว ทำให้สามารถประหยัดทรัพยากรความยาวคลื่นได้มากกว่า

พิจารณารูปที่ 3.7 ซึ่งเปรียบเทียบผลของการจัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกันของวงแหวนขนาด 5 โนดที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มและใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยวิธี SPF และ LPF โดย

รูปที่ 3.7(1) และ 3.7(2) เป็นผลของการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธี SPF และ LPF ตามลำดับ ค่า L_1 ถึง L_5 แสดงลำดับของกิ่งเชื่อม และ λ_1 ถึง λ_4 คือลำดับของความยาวคลื่น ตัวเลขภายในวงกลมบอกอันดับของวิถีแสงในการจัดสรรความยาวคลื่น ในกรณีนี้ซึ่งเป็นวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC จะพบว่าการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ SPF ใช้ความยาวคลื่นรวม 4 ความยาวคลื่น ในขณะที่แบบ LPF ใช้เพียง 3 ความยาวคลื่น



รูปที่ 3.7 ผลของการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธี SPF และ LPF ของวงแหวนขนาด 5 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC

วิธี SPF จัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสงที่สั้นที่สุดคือวิถีแสงที่มีจำนวน 1 ฮ็อพก่อน ดังจะเห็นได้ว่าวิถีแสงที่มีจำนวน 1 ฮ็อพถูกจัดสรรเรียงกันและใช้ความยาวคลื่น λ_1 ทั้งหมดแล้วจึงต่อด้วยวิถีแสงที่มีจำนวน 2 ฮ็อพ ซึ่งถูกจัดสรรเหลื่อมล้ำกันอย่างไม่ลงตัวเพิ่มอีกจำนวน 3 ความยาวคลื่น ในขณะที่วิธี LPF จัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสงที่มีจำนวน 2 ฮ็อพก่อนซึ่งใช้จำนวน 3 ความยาวคลื่นโดยเหลือช่องว่างประปรายแล้วจึงจัดสรรให้กับวิถีแสงที่มีจำนวน 1 ฮ็อพ ทำให้วิถีแสงที่สั้นกว่าสามารถแซมช่องว่างและเป็นส่วนเติมเต็มให้การจัดสรรความยาวคลื่นมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้น วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับทุกวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกในโครงข่ายแบบ NWC ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ วิธี LPF

3.6.2 เมื่อโนดมีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสง

ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรรความยาวคลื่นในแบบ WC ทั้ง 3 วิธีให้ผลตอบที่เท่ากันหมดทุกวิธีดังแสดงผลในตารางที่ 3.16 เนื่องจากโครงข่ายแบบ WC ไม่ถูกเงื่อนไขบังคับให้วิถีแสงแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกต้องใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดเส้นทางจากต้นทางไปยังปลายทาง การจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละกิ่งเชื่อมให้กับวิถีแสงที่มีเส้นทางผ่าน จึงเลือกใช้ค่าความยาวคลื่นที่ยังว่างอยู่ถัดไปเรื่อย ๆ โดยที่ไม่ทำให้เกิดช่องว่างจากการรักษาค่า

ความยาวคลื่นเดียวกันของแต่ละวิถีแสงไว้เหมือนกับในกรณีของ NWC (ในแต่ละกิ่งเชื่อมของการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ WC ตั้งแต่ความยาวคลื่นแรกจนถึงความยาวคลื่นสุดท้าย ไม่มีช่องสัญญาณของความยาวคลื่นค่าใดเลยที่ว่างหรือไม่ได้ถูกครอบครองโดยวิถีแสง) ดังนั้น เมื่อโนดมีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทางของทุกวิถีแสงใด ๆ (WC) ทำให้ความสำคัญของอันดับในการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสงหมดไป ไม่ว่าจะใช้การจัดสรรความยาวคลื่นวิธีใดจะได้ผลตอบเท่ากันเสมอ ดังแสดงในตารางที่ 3.16 ซึ่ง N คือ จำนวนโนด และ M คือ จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้

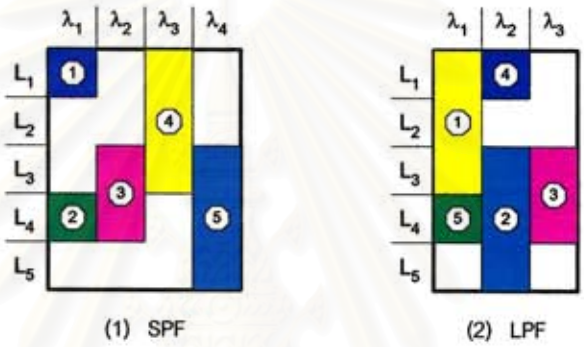
ตารางที่ 3.16 ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธีของวงแหวนขนาด 3-100 คู่โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, WC

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
M	1	3	3	6	6	10	10	15	15	21	21	28	28	36
N	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
M	36	45	45	55	55	66	66	78	78	91	91	105	105	120
N	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
M	120	136	136	153	153	171	171	190	190	210	210	231	231	253
N	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
M	253	276	276	300	300	325	325	351	351	378	378	406	406	435
N	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
M	435	465	465	496	496	528	528	561	561	595	595	630	630	666
N	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
M	666	703	703	741	741	780	780	820	820	861	861	903	903	946
N	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
M	946	990	990	1035	1035	1081	1081	1128	1128	1176	1176	1225	1225	1275

จากผลตอบของการจัดสรรความยาวคลื่นทั้งแบบ NWC และ WC ข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยการจัดสรรให้กับวิถีแสงที่มีจำนวนฮ็อพมากที่สุดก่อน (LPF) ในโครงข่ายที่ไม่มีการแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงระหว่างเส้นทาง (NWC) มีประสิทธิภาพมากที่สุด และ วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นในโครงข่ายที่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงระหว่างเส้นทางได้ (WC) ไม่มีต่อผลตอบที่เป็นจำนวนความยาวคลื่นที่ได้ อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบหาผลตอบของการจัดสรรความยาวคลื่นในรายละเอียดที่ไม่ได้ต้องการผลเพียงจำนวนความยาวคลื่น จึงเลือกใช้วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LPF เป็นบรรทัดฐานเพื่อให้เป็นไปใน

ลักษณะที่สอดคล้องกันทั้งแบบ NWC และ WC นอกจากนี้ จะกล่าวถึงกรณีที่ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นในตารางที่ 3.15 ที่ได้จากแบบ NWC และตารางที่ 3.16 ที่ได้จากแบบ WC ในวงแหวนบางขนาดให้ค่าผลตอบไม่เท่ากันในหัวข้อต่อจากนี้ไป

ในหัวข้อนี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อแสดงการเปรียบเทียบวิธีในการจัดสรรความยาวคลื่นโดยไม่ได้ให้ความสำคัญกับการจัดสรรเส้นทาง ดังนั้น จึงได้ยกตัวอย่างของการจัดสรรด้วยทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มรวมทั้งกำหนดให้ใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด อย่างไรก็ตาม ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มจะมีผลต่อวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นเช่นเดียวกันกับแบบยูนิฟอร์มหรือไม่ พิจารณารูปที่ 3.8 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลของการจัดสรรความยาวคลื่นของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มด้วยวิธี SPF และ LPF (เนื่องจากวิธี Rnd เป็นวิธีการที่ให้ผลไม่แน่นอนจึงไม่แสดงไว้ในที่นี้)



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างผลของการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธี SPF และ LPF ของวงแหวนขนาด 5 โนดที่มีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม

จะสังเกตได้ว่า ถ้าทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มมีลักษณะดังกล่าว วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ SPF ต้องใช้จำนวนความยาวคลื่นมากกว่าแบบ LPF เปรียบเสมือนกับการจัดสรรพื้นที่ใด ๆ ก็ตาม ควรให้ความสำคัญกับสิ่งของที่มีขนาดใหญ่ก่อนไม่ว่าจะมีสิ่งของจำนวนเท่าใด เพราะถ้าจัดสรรพื้นที่ให้กับสิ่งของที่มีขนาดเล็กก่อน จะเป็นไปได้ว่าสิ่งของที่มีขนาดเล็กจำนวนหลาย ๆ ชิ้นที่ถูกวางอยู่ในตำแหน่งกระจัดกระจายกันหรือไม่ลงตัวไปขวางการวางสิ่งของชิ้นถัดไปที่มีขนาดใหญ่ทำให้ไม่สามารถบรรจุสิ่งของทุกชิ้นลงได้เต็มหรือใกล้เคียงกับความจุสูงสุด

3.6.3 เวลาที่ใช้ในการจัดสรรความยาวคลื่น

ในการหาผลตอบของการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธี ใช้ PC เครื่องเดียวกันทั้งแบบ NWC, WC และเครื่องที่ใช้มีคุณสมบัติคร่าว ๆ ดังนี้ คือ PC Pentium-II, 400-MHz, 128 Mb RAM โดยเวลาที่ใช้ในการจัดสรรความยาวคลื่นเป็นปัจจัยหนึ่งในการตัดสินใจว่าวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบใดมีประสิทธิภาพสมควรที่จะนำไปใช้ต่อไป

3.6.3.1 NWC

วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสงที่มีจำนวนฮ็อพน้อยที่สุดก่อน (SPF) ใช้เวลารวมทั้งหมดจากการทดสอบกับวงแหวนตั้งแต่ขนาด 3 ถึง 100 โนดคือ 7:09 นาที และวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสงที่มีจำนวนฮ็อพมากที่สุดก่อน (LPF) ใช้เวลารวมทั้งหมด 5:22 นาที อย่างไรก็ตาม วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยการเรียงอันดับของวิถีแสงในการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยการสุ่ม (Rnd) จากการทดสอบทั้งหมด 100 ครั้ง พบว่า ครั้งที่ใช้เวลารวมทั้งหมดน้อยที่สุดและมากที่สุดคือ 3:55 นาที และ 4:09 นาที ตามลำดับและเวลารวมทั้งหมดเฉลี่ยทั้ง 100 ครั้ง คือ 3:57 นาที ซึ่งนับว่าค่อนข้างใกล้เคียงกันในแต่ละครั้งของการทดสอบ

จากเวลารวมทั้งหมดที่ใช้ข้างต้น สามารถแยกอธิบายในแต่ละวิธีได้ดังนี้

- วิธี Rnd - ใช้เวลาในการทดสอบน้อยที่สุด

วิธีนี้มีกระบวนการเริ่มต้นแตกต่างจากวิธีอื่น คือ ต้องมีการเรียงลำดับอันดับของวิถีแสงที่จะได้รับการจัดสรรโดยการสุ่มในคราวเดียวก่อน จากนั้นจึงจัดสรรความยาวคลื่นทีละวิถีแสงจนครบ ถึงแม้ว่าวิธีนี้ใช้เวลาในการทดสอบตั้งแต่วงแหวนขนาด 3-100 โนดน้อยที่สุด ในทางตรงกันข้าม ต้องมีการทดสอบเป็นจำนวนครั้งมากพอจนกว่าจะได้ผลตอบที่น้อยที่สุดเป็นที่น่าพอใจ ดังนั้น จึงเป็นวิธีที่ไม่ควรเลือกใช้มากที่สุดในแง่ของเวลา

- วิธี SPF - ใช้เวลาในการทดสอบมากที่สุด

วิธีนี้ไม่ได้เริ่มต้นด้วยการสุ่มอันดับของวิถีแสงก่อน กระบวนการจัดสรรเริ่มต้นด้วยการหาจำนวนฮ็อพสูงสุด (Max_Hop) จากแต่ละเส้นทางของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกทั้งหมดที่รอรับการจัดสรรความยาวคลื่น จากนั้นไล่วงรอบตั้งแต่จำนวนฮ็อพเท่ากับ 1 จนถึง Max_Hop โดยในวงรอบของแต่ละค่าจำนวนฮ็อพมีการวนทุกคู่โนดตั้งแต่คู่โนดแรกจนกระทั่งคู่โนดสุดท้าย โดยเปรียบเทียบจำนวนฮ็อพในแต่ละวงรอบกับจำนวนฮ็อพของคู่โนดนั้นจากต้นทางไปยังปลายทางตามเส้นทางที่กำหนด ถ้ามีค่าไม่เท่ากันก็ผ่านไปยังคู่โนดถัดไป แต่ถ้ามีค่าเท่ากันก็ทำการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกคู่โนดนั้น ทำลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ จนเสร็จ จากค่าเวลาที่วัดได้ วิธีนี้ใช้เวลานานที่สุดและผลตอบที่ได้ไม่เป็นที่น่าพอใจ จึงเป็นวิธีที่ไม่สมควรใช้ในการจัดสรรความความยาวคลื่นเช่นกัน

- วิธี LPF

คล้ายกับวิธี SPF ต่างกันเพียงลำดับของจำนวนฮ็อพโดยเริ่มจากจำนวนฮ็อพเท่ากับ Max_Hop จนกระทั่งลดเหลือ 1 วิธีนี้ใช้เวลาอยู่ระหว่างวิธี Rnd (การทดสอบ 1 ครั้ง) และ SPF แต่ให้ผลตอบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ถึงแม้ว่าวิธี SPF และ LPF จะมี

ลักษณะการทำงานของกระบวนการคล้ายกัน จำนวนความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การจัดสรรความยาวคลื่นในกรณี NWC ใช้เวลาเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน ดังนั้นวิธี SPF จึงใช้เวลามากกว่าวิธี LPF

3.6.3.2 WC

วิธี SPF ใช้เวลาในการทดสอบกับวงแหวนตั้งแต่ขนาด 3 ถึง 100 โนดรวมทั้งหมดคือ 1:37 นาที และ วิธี LPF ใช้เวลารวมทั้งหมด 1:36 นาที ในขณะเดียวกัน วิธี Rnd จากการทดสอบทั้งหมด 100 ครั้ง พบว่า ครั้งที่ใช้เวลารวมทั้งหมดน้อยที่สุดและมากที่สุดคือ 1:45 นาที และ 2:19 นาที ตามลำดับและเวลารวมทั้งหมดเฉลี่ยทั้ง 100 ครั้ง คือ 1:48 นาที โดยสามารถสรุปแยกเป็นรายวิธีได้ดังนี้

- วิธี Rnd

ในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องทดสอบวิธีนี้เป็นจำนวนหลาย ๆ ครั้งเพราะแม้ว่าผลตอบทุกครั้งมีการจัดสรรความยาวคลื่นไม่เหมือนกันเพราะอันดับของวิถีแสงในการจัดสรรไม่เหมือนกัน แต่ให้ค่าจำนวนความยาวคลื่นที่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ใช้เวลานานกว่าวิธีอื่นเล็กน้อย

- วิธี SPF และ LPF

ใช้เวลาเกือบเท่ากันทุกขนาดของวงแหวนที่ทำการทดสอบและน้อยกว่าวิธี Rnd เล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ระหว่างโครงข่ายแบบ NWC และแบบ WC จะสังเกตได้ว่าแบบ NWC ใช้เวลามากกว่าโดยเฉพาะเมื่อขนาดของโครงข่ายเพิ่มขึ้น อนึ่ง เวลาที่ได้วัดจาก PC ที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Linux ซึ่งเป็น platform แบบ multi-user, multi-tasking ดังนั้น เวลาที่วัดได้อาจจะคลาดเคลื่อนเล็กน้อย โดยขึ้นอยู่กับโหลดของเครื่องในขณะนั้นด้วย

3.7 ผลของการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุด

การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในหัวข้อนี้เป็นการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธีจัดสรรความยาวคลื่นให้กับช่องสัญญาณที่มีจำนวนฮ็อพมากที่สุดก่อน (LPF) และการจัดสรรเส้นทางด้วยเส้นทางที่สั้นที่สุดหรือด้วยเส้นทางที่สั้นกว่าในกรณีของวงแหวน (SP) เส้นทางที่สั้นที่สุดของโครงข่ายแบบวงแหวนในที่นี้หมายความถึงการเลือกเส้นทางหนึ่งในสองภายในวงแหวนระหว่างโนดต้นทางและปลายทางที่มีหน่วยเป็นจำนวนฮ็อพน้อยกว่า ในกรณีที่คู่โนดมีเส้นทางทั้งสองทิศทางเป็นจำนวนฮ็อพเท่ากันโดยเฉพาะคู่โนดที่อยู่ตรงกันข้ามกันในวงแหวนที่มีจำนวนคู่โนดเป็นเลข

คู่ ให้เลือกใช้เส้นทางในแนวตามเข็มนาฬิกาจากโนดที่มีเลขลำดับน้อยกว่าไปยังโนดที่มีเลขลำดับมากกว่าเพื่อจำกัดให้เหลือเพียงเส้นทางเดียวทำให้ง่ายต่อการหาผลตอบโดยไม่ต้องคำนึงถึงการจัดสรรเส้นทางอีก

ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยการกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดได้จากการทดสอบทราฟฟิกทั้งแบบยูนิฟอร์มและแบบไม่ยูนิฟอร์ม รวมถึงความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่น NWC และ WC ด้วย ค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติ (M_{ideal}) ถูกกำหนดขึ้นเพื่อเปรียบเทียบผลตอบที่ได้ว่ามีประสิทธิภาพดีพอเพียงใดโดยตั้งสมมติฐานว่าทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดและทุกกิ่งเชื่อมมีการใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่โดยไม่มีความยาวคลื่นในกิ่งเชื่อมใดเหลือว่างอยู่ซึ่งอาจเป็นไปไม่ได้จริงในทางปฏิบัติ ค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติคือค่าจำนวนความยาวคลื่นที่เกิดจากการรวมจำนวนฮ็อพของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกโดยที่ทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดแล้วหารด้วยจำนวนกิ่งเชื่อมหรือจำนวนโนด อนึ่ง ในโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนมีจำนวนกิ่งเชื่อมเท่ากับจำนวนโนด

ตัวอย่างเช่น วงแหวนขนาด 5 โนดมีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มในตารางที่ 3.4 สามารถหาผลรวมจำนวนฮ็อพของทุกวิถีแสงในโครงข่ายได้ดังแสดงในตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.17 การคำนวณผลรวมจำนวนฮ็อพของทุกวิถีแสง

ลำดับคู่โนด	คู่โนด	จำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิก	จำนวนฮ็อพ (เส้นทาง SP)	ผลรวมจำนวนฮ็อพ
1	1 – 2	1	1	1 x 1 = 1
2	1 – 3	3	2	3 x 2 = 6
3	1 – 4	2	2	2 x 2 = 4
4	1 – 5	2	1	2 x 1 = 2
5	2 – 3	2	1	2 x 1 = 2
6	2 – 4	3	2	3 x 2 = 6
7	2 – 5	0	2	0 x 2 = 0
8	3 – 4	1	1	1 x 1 = 1
9	3 – 5	1	2	1 x 2 = 2
10	4 - 5	0	1	0 x 1 = 0
รวม		15	-	24

ค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติสามารถหาได้จากสมการ (3.1) ดังต่อไปนี้

$$M_{ideal} = \frac{\sum_{i=1}^{i=P}(h_i t_i)}{N} \qquad (3.1)$$

เมื่อ N = จำนวนโนด, $P = \frac{N(N-1)}{2}$ = จำนวนคู่โนดทั้งหมด

h_i = จำนวนฮ็อพของเส้นทางแบบ SP ของคู่โนด i

t_i = จำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด i

ผลรวมจำนวนฮ็อพทั้งหมดของวิถีแสงของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกซึ่งใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดในตัวอย่างนี้ คือ 24 จากนั้นหารด้วยจำนวนกิ่งเชื่อมคือ 5 ได้ค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติเท่ากับ 24/5 = 4.8 ความยาวคลื่น จำนวนความยาวคลื่นอุดมคตินี้อาจจะมีค่าเป็นเลขทศนิยมจากการหารไม่ลงตัว ในขณะที่ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก ดังนั้นค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติจึงเป็นค่าจำนวนความยาวคลื่นที่ต่ำที่สุดที่อาจจะเป็นไปได้ (lower bound) กล่าวคือ ไม่สามารถมีผลตอบที่ต่ำไปกว่าค่านี้ได้อีก โดยใช้สำหรับอ้างอิงหรือเปรียบเทียบจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นวิธีต่าง ๆ เท่านั้น

3.7.1 ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม

ตารางที่ 3.18 การเปรียบเทียบผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นและเวลาที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างแบบ NWC และ WC

จำนวนโนด	ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่น			% การใช้ประโยชน์		เวลาที่ใช้ (วินาที)	
	ideal	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
3	1.0	1	1	100.00%	100.00%	0	0
4	2.0	3	3	66.67%	66.67%	0	0
5	3.0	3	3	100.00%	100.00%	1	0
6	4.5	6	6	75.00%	75.00%	0	0
7	6.0	6	6	100.00%	100.00%	0	0
8	8.0	10	10	80.00%	80.00%	0	0
9	10.0	10	10	100.00%	100.00%	0	0
10	12.5	15	15	83.33%	83.33%	0	0
11	15.0	15	15	100.00%	100.00%	0	0
12	18.0	21	21	85.71%	85.71%	0	0
13	21.0	21	21	100.00%	100.00%	0	0
14	24.5	28	28	87.50%	87.50%	0	0

ตารางที่ 3.18 (ต่อ)

จำนวนโนด	ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่น			% การใช้ประโยชน์		เวลาที่ใช้ (วินาที)	
	Ideal	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
15	28.0	28	28	100.00%	100.00%	0	0
16	32.0	36	36	88.89%	88.89%	0	0
17	36.0	36	36	100.00%	100.00%	0	0
18	40.5	45	45	90.00%	90.00%	0	0
19	45.0	45	45	100.00%	100.00%	0	0
20	50.0	55	55	90.91%	90.91%	0	0
21	55.0	55	55	100.00%	100.00%	0	0
22	60.5	66	66	91.67%	91.67%	0	0
23	66.0	66	66	100.00%	100.00%	0	0
24	72.0	79	78	91.14%	92.31%	0	0
25	78.0	78	78	100.00%	100.00%	0	0
26	84.5	91	91	92.86%	92.86%	0	0
27	91.0	91	91	100.00%	100.00%	0	0
28	98.0	105	105	93.33%	93.33%	0	0
29	105.0	105	105	100.00%	100.00%	0	0
30	112.5	120	120	93.75%	93.75%	0	0
31	120.0	120	120	100.00%	100.00%	0	0
32	128.0	136	136	94.12%	94.12%	0	0
33	136.0	136	136	100.00%	100.00%	0	0
34	144.5	153	153	94.44%	94.44%	1	0
35	153.0	153	153	100.00%	100.00%	0	0
36	162.0	172	171	94.19%	94.74%	0	0
37	171.0	171	171	100.00%	100.00%	0	0
38	180.5	191	190	94.50%	95.00%	0	0
39	190.0	190	190	100.00%	100.00%	0	0
40	200.0	212	210	94.34%	95.24%	1	1
41	210.0	210	210	100.00%	100.00%	0	0
42	220.5	232	231	95.04%	95.45%	0	0
43	231.0	231	231	100.00%	100.00%	1	0
44	242.0	254	253	95.28%	95.65%	0	0
45	253.0	253	253	100.00%	100.00%	0	0

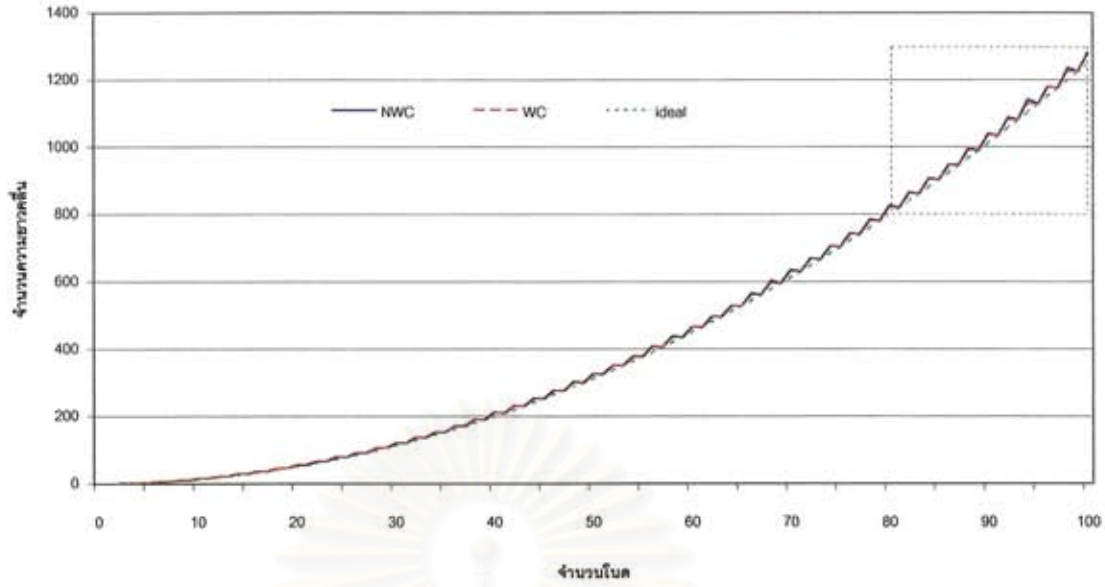
ตารางที่ 3.18 (ต่อ)

จำนวนโนด	ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่น			% การใช้ประโยชน์		เวลาที่ใช้ (วินาที)	
	Ideal	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
46	264.5	277	276	95.49%	95.83%	1	0
47	276.0	276	276	100.00%	100.00%	0	0
48	288.0	303	300	95.05%	96.00%	1	0
49	300.0	300	300	100.00%	100.00%	0	0
50	312.5	327	325	95.57%	96.15%	1	0
51	325.0	325	325	100.00%	100.00%	1	0
52	338.0	352	351	96.02%	96.30%	1	1
53	351.0	351	351	100.00%	100.00%	0	0
54	364.5	378	378	96.43%	96.43%	1	0
55	378.0	378	378	100.00%	100.00%	1	1
56	392.0	410	406	95.61%	96.55%	1	0
57	406.0	406	406	100.00%	100.00%	2	0
58	420.5	438	435	96.00%	96.67%	1	1
59	435.0	435	435	100.00%	100.00%	1	0
60	450.0	466	465	96.57%	96.77%	2	1
61	465.0	465	465	100.00%	100.00%	2	0
62	480.5	497	496	96.68%	96.88%	2	1
63	496.0	496	496	100.00%	100.00%	1	0
64	512.0	529	528	96.79%	96.97%	3	1
65	528.0	528	528	100.00%	100.00%	2	1
66	544.5	565	561	96.37%	97.06%	2	0
67	561.0	561	561	100.00%	100.00%	3	1
68	578.0	603	595	95.85%	97.14%	3	1
69	595.0	595	595	100.00%	100.00%	3	1
70	612.5	635	630	96.46%	97.22%	3	1
71	630.0	630	630	100.00%	100.00%	4	1
72	648.0	668	666	97.01%	97.30%	3	1
73	666.0	666	666	100.00%	100.00%	4	1
74	684.5	705	703	97.09%	97.37%	5	2
75	703.0	703	703	100.00%	100.00%	5	1
76	722.0	744	741	97.04%	97.44%	5	1

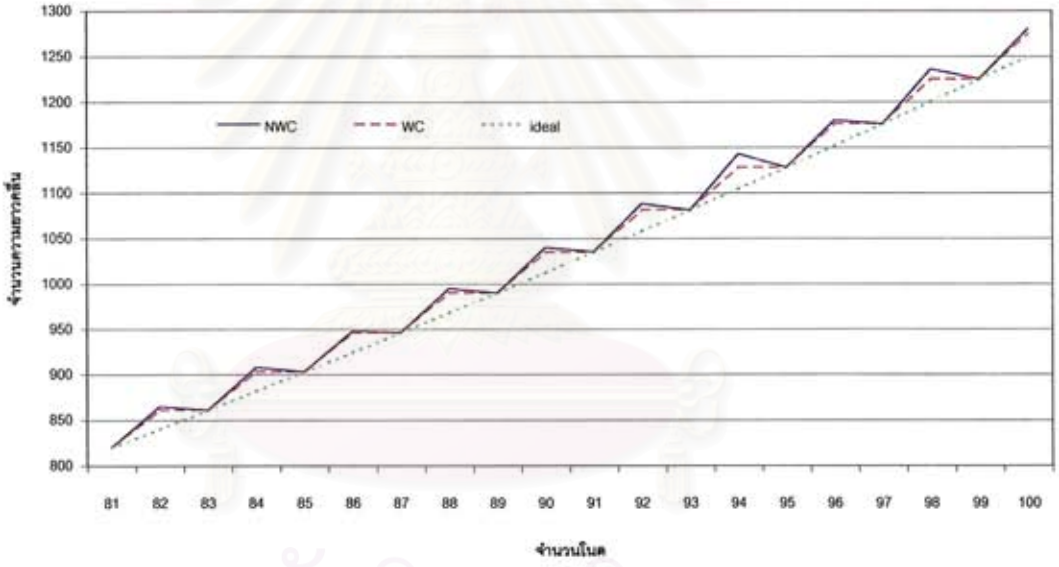
ตารางที่ 3.18 (ต่อ)

จำนวนโนด	ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่น			% การใช้ประโยชน์		เวลาที่ใช้ (วินาที)	
	Ideal	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
77	741.0	741	741	100.00%	100.00%	5	2
78	760.5	785	780	96.88%	97.50%	6	2
79	780.0	780	780	100.00%	100.00%	5	1
80	800.0	826	820	96.85%	97.56%	7	2
81	820.0	820	820	100.00%	100.00%	6	2
82	840.5	865	861	97.17%	97.62%	8	2
83	861.0	861	861	100.00%	100.00%	7	2
84	882.0	908	903	97.14%	97.67%	8	2
85	903.0	903	903	100.00%	100.00%	9	3
86	924.5	948	946	97.52%	97.73%	9	2
87	946.0	946	946	100.00%	100.00%	9	3
88	968.0	995	990	97.29%	97.78%	10	3
89	990.0	990	990	100.00%	100.00%	11	3
90	1012.5	1040	1035	97.36%	97.83%	11	3
91	1035.0	1035	1035	100.00%	100.00%	12	4
92	1058.0	1088	1081	97.24%	97.87%	13	3
93	1081.0	1081	1081	100.00%	100.00%	13	4
94	1104.5	1143	1128	96.63%	97.92%	14	4
95	1128.0	1128	1128	100.00%	100.00%	14	4
96	1152.0	1180	1176	97.63%	97.96%	16	4
97	1176.0	1176	1176	100.00%	100.00%	16	5
98	1200.5	1236	1225	97.13%	98.00%	17	5
99	1225.0	1225	1225	100.00%	100.00%	18	5
100	1250.0	1280	1275	97.66%	98.04%	20	5

ผลที่ได้เป็นจำนวนความยาวคลื่นจากวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ SP และการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LPF ของวงแหวนขนาด 3-100 โนด แสดงได้ดังตารางที่ 3.18 และกราฟรูปที่ 3.9 โดยตารางที่ 3.18 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ NWC, WC และค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติ รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 2 แบบดังกล่าวด้วย



(1) เมื่อวงแหวนมีขนาด 3-100 โนด



(2) เมื่อวงแหวนมีขนาด 81-100 โนด (ส่วนที่เป็นกรอบเส้นประในรูปที่ (1))

รูปที่ 3.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนความยาวคลื่นของวิธี SP/LPF เมื่อมีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม

ค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติ (M_{ideal}) ของวงแหวนที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มมีค่าดังนี้

วงแหวนโนดคู่ : $M_{ideal} = \frac{N^2 - 1}{8}$

วงแหวนโนดคี่ : $M_{ideal} = \frac{N^2}{8}$

ในวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคี่ การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนมีการใช้ประโยชน์ของความยาวคลื่นในแต่ละกิ่งเชื่อมเต็ม 100 % เพราะ ค่าจำนวนความยาวคลื่นจากแบบ NWC, WC เท่ากับค่าอุดมคติ (M_{ideal}) ซึ่งเป็นค่าจำนวนความยาวคลื่นที่ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม ในวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคู่ การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นใช้จำนวนความยาวคลื่นเรียงตามลำดับ คือ $M_{ideal} \leq M_{WC} \leq M_{NWC}$

กราฟรูปที่ 3.9 แสดงลักษณะแนวโน้มของการใช้จำนวนความยาวคลื่นเมื่อขนาดของโครงข่ายเป็นจำนวนโนดเพิ่มขึ้น จะพบว่า เส้นกราฟของ NWC, WC, ideal เพิ่มขึ้นในลักษณะเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่อขนาดของวงแหวนเพิ่มขึ้น และเส้นกราฟทั้ง 3 เส้นอยู่ใกล้กันมาก (แตกต่างกันเฉพาะวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคู่) แต่ผลจากตารางที่ 3.18 หรือกราฟรูปที่ 3.9(2) แสดงว่าความแตกต่างของจำนวนความยาวคลื่นในโนดคู่ระหว่าง NWC, WC, ideal เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งคือผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้น โดยวงแหวนขนาดใหญ่ให้ผลเป็นจำนวนความยาวคลื่นในแบบ NWC และ WC มากกว่าค่าอุดมคติประมาณ 2-3 %

เมื่อสังเกตผลที่ได้จากตารางที่ 3.18 หรือกราฟรูปที่ 3.9(2) ผลจำนวนความยาวคลื่นที่ได้จากวงแหวนที่มีจำนวนโนดคู่ในบางกรณีกลับมีค่ามากกว่าผลจากขนาดของวงแหวนถัดไปที่มีจำนวนโนดคี่ซึ่งมีจำนวนวิถีแสงทั้งหมดมากกว่าเสียอีก ดังนั้น วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ SP จึงไม่ใช่วิธีที่ดีนักถึงแม้ว่าค่าจำนวนความยาวคลื่นจากแบบ NWC, WC และ ideal จากกราฟมีค่าใกล้เคียงกันจนไม่แตกต่างกันมาก แต่หนึ่งความยาวคลื่นในวงแหวนขนาดใหญ่ เช่น 100 โนด มีความจุเท่ากับหนึ่งช่องสัญญาณของทั้ง 100 กิ่งเชื่อมซึ่งสามารถจัดสรรให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกรวมเป็นจำนวน 100 ฮ็อพได้ ดังนั้น ถ้าการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นไม่ดีพอ ทำให้การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นไม่มีประสิทธิภาพและเปลืองความยาวคลื่นโดยไม่จำเป็น จึงต้องพยายามให้จำนวนความยาวคลื่นใกล้เคียงกับค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงกำหนดค่าที่ใช้วัดปริมาณการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นเท่ากับอัตราส่วนของปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับการจัดสรรจริง กับ ปริมาณช่องสัญญาณในวงแหวนขนาด N โนดที่มีจำนวน M ความยาวคลื่น โดยคิดค่าออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่น

$$\%utilization = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{t_i} h_{ij}}{NM} * 100\% \qquad (3.2)$$

เมื่อ N = จำนวนโนด, M = จำนวนความยาวคลื่นที่วงแหวนนั้นสามารถรองรับได้

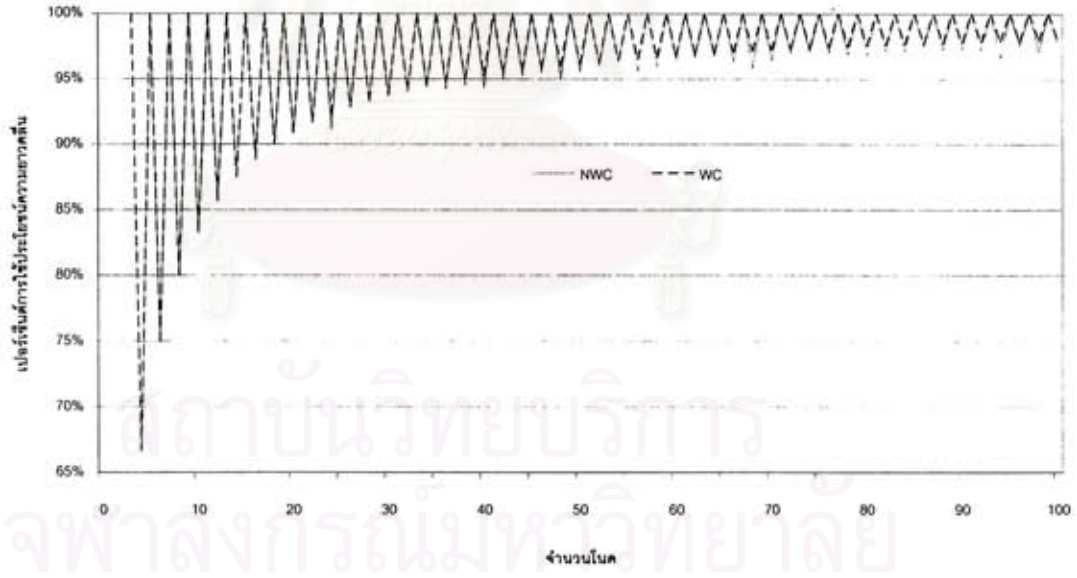
t_i = จำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด i

h_{ij} = จำนวนฮ็อพของเส้นทางที่เลือกใช้ของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ j คู่โนด i

สมการนี้ใช้ได้กับกรณีทั่วไป ทั้งทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มและไม่ยูนิฟอร์ม

ตัวอย่างเช่น วงแหวนขนาด 6 โนด, ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม, SP, NWC ได้ผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นดังตารางที่ 3.7 ในกรณีนี้ $N = 6$, $M = 6$ = ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นที่ได้ และ ปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับการจัดสรรจริงทั้งหมด = 27 (ผลรวมจำนวนฮ็อพของเส้นทางที่สั้นที่สุดทั้งหมดของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิก หรือ นับจำนวนช่องที่ไม่ว่างในตารางที่ 3.7 ทั้งหมด) ดังนั้น %การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่น = [27/(6x6)]x100% = 75%

กราฟรูปที่ 3.10 แสดงเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นของวงแหวนที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม วงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคี่ทั้งแบบ NWC และ WC มีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่น 100% คือไม่มีความยาวคลื่นใดในกิ่งเชื่อมใดที่ยังเหลือว่างอยู่เลย ช่องสัญญาณที่วงแหวนสามารถรองรับได้ถูกจัดสรรให้กับทราฟฟิกที่ต้องการภายในโครงข่ายทั้งหมดได้เต็มความจุ ดังนั้น ในกรณีของวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคี่ จะได้ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นทั้งแบบ NWC, WC เท่ากับค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติ ในขณะที่ในโนดคู่มีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นไม่ครบ 100 % และผลตอบจำนวนความยาวคลื่นมีค่าไม่เท่ากับค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติ นอกจากนี้ โครงข่ายแบบ WC ที่มีจำนวนโนดคู่และจัดสรรเส้นทางแบบ SP มีเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นมากกว่าแบบ NWC เล็กน้อย



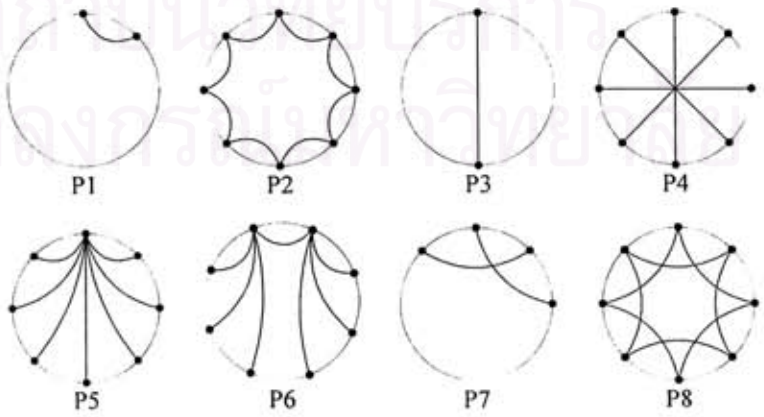
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นของวิธี SP/LPF เมื่อทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม

ในแง่ของเวลาที่ใช้ในการคำนวณกับโครงข่ายที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม จากตารางที่ 3.18 พบว่า ขนาดของโครงข่ายเพิ่มขึ้นทำให้เวลาที่ใช้เพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เพราะเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้นจำนวนวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกทั้งหมดจะเป็นฟังก์ชันกำลังสองของ

จำนวนโนด และในกระบวนการจัดสรรความยาวคลื่นต้องจัดสรรให้ทีละวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิก ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการจัดสรรจึงเป็นฟังก์ชันกำลังสองของจำนวนโนดของวงแหวนเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การจัดสรรความยาวคลื่นแบบ NWC เมื่อเปรียบเทียบกับ WC นั้น ใช้เวลามากกว่าโดยเฉพาะเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้น ความแตกต่างของเวลาที่ใช้ยิ่งเพิ่มมากขึ้น เพราะแบบ NWC ต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของความยาวคลื่นของช่องสัญญาณระหว่างเส้นทางซึ่งเวลาที่ใช้แปรผันตามจำนวนความยาวคลื่นด้วย ในขณะที่แบบ WC สิ้นเปลืองเวลาในการคำนวณน้อยกว่าเพราะเวลาในการจัดสรรไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนความยาวคลื่น อนึ่ง เวลาที่แสดงในตารางที่ 3.18 ในบางขนาดของวงแหวนที่แสดงค่าเป็น 0 วินาที ไม่ได้หมายความว่าไม่ได้ใช้เวลาในการคำนวณเลย เพียงแต่ใช้เวลาไม่ถึง 1 วินาที เพราะเวลาที่แสดงได้มาจากการนำเวลาที่คำนวณเสร็จลบด้วยเวลาเริ่มต้นซึ่งมีหน่วยเล็กที่สุดเป็นวินาที

3.7.2 ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม

ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มเป็นทราฟฟิกที่แต่ละคู่โนดจากต้นทางจนถึงปลายทางต้องการปริมาณทราฟฟิกไม่เท่ากันหรือมีทราฟฟิกเป็นจำนวนช่องสัญญาณไม่เท่ากัน ในการหาผลตอบของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มสามารถยกตัวอย่างทราฟฟิกประเภทนี้ได้หลากหลายมากมาย อย่างไรก็ตาม เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นดังที่เสนอ จึงแบ่งทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มเป็นหลายรูปแบบต่างลักษณะกันโดยมีจุดหมายหลักคือ ศึกษาถึงผลกระทบต่อจำนวนความยาวคลื่นจากรูปแบบของทราฟฟิกที่มีความต้องการจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกในบางคู่โนดมากกว่าคู่โนดอื่นมาก ๆ และเรียกทราฟฟิกของคู่โนดที่ต้องการทราฟฟิกมากกว่าปกตินี้ว่า peak traffic และเรียกทราฟฟิกของคู่โนดที่มีทราฟฟิกแบบปกติว่า background traffic



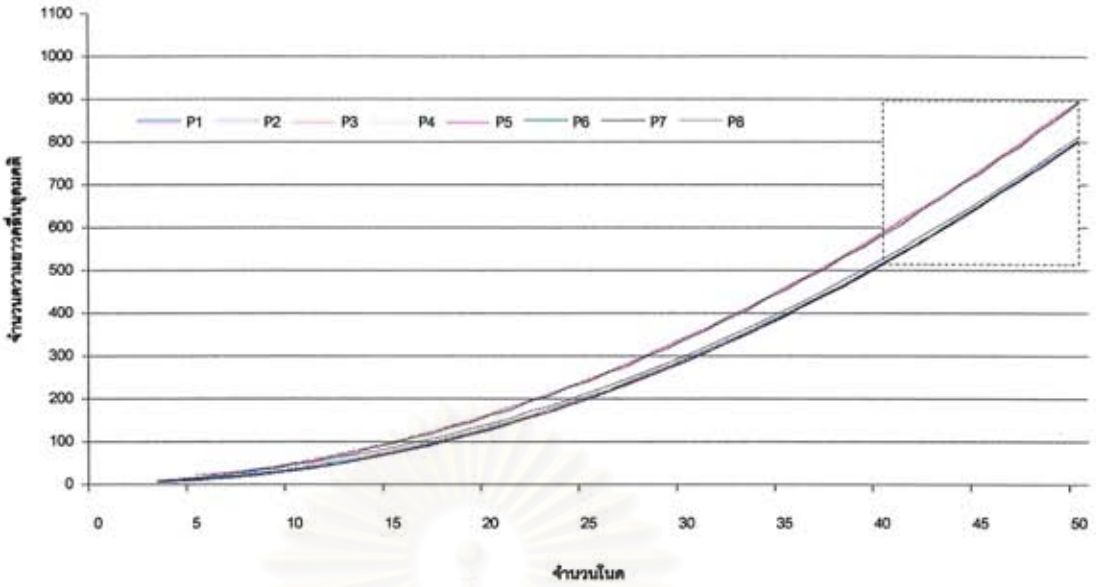
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มที่มีบางคู่โนดมีทราฟฟิกมากกว่าปกติ

การทดสอบกับทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มแบ่งออกเป็น 8 รูปแบบที่มีลักษณะแตกต่างกัน ในแต่ละรูปแบบประกอบด้วย peak traffic และ background traffic ถูกนำเสนอดังในรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นตัวอย่างของวงแหวนขนาด 8 โนด โดยเส้นที่เชื่อมต่อกันระหว่างบางคู่โนดภายในวงแหวน คือ peak traffic และคู่โนดที่เหลือนอกจากนั้น (ไม่ได้แสดงไว้ในรูป) เป็น background traffic

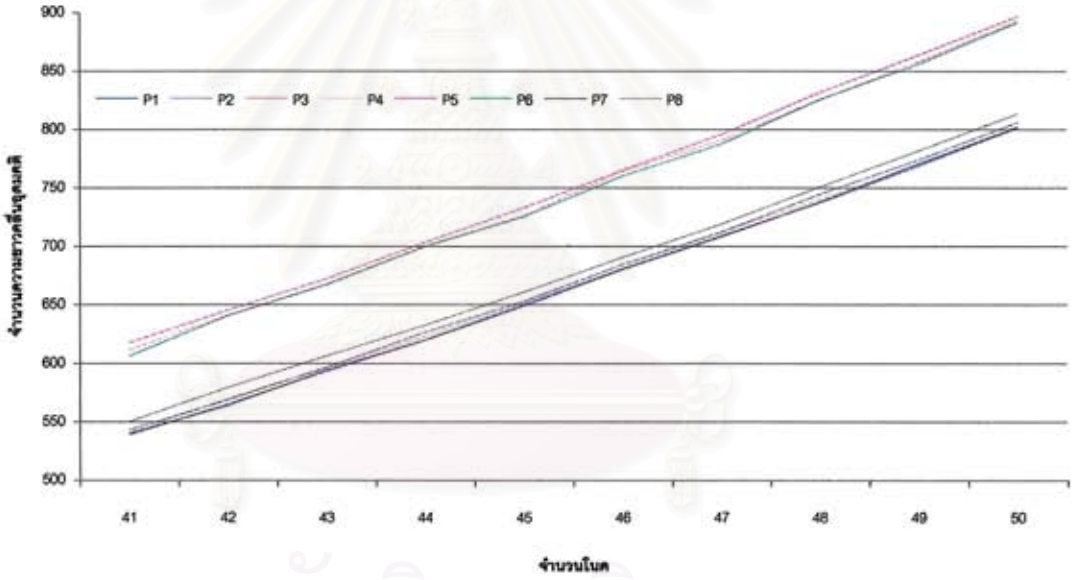
กำหนดให้ N คือจำนวนคู่โนด และ $\lceil X \rceil$ คือค่าจำนวนเต็มที่น้อยที่สุดที่มีค่ามากกว่า X

1. P1 มี peak traffic เป็นจำนวน 1 คู่โนดระหว่างโนดที่อยู่ชิดติดกัน (จำนวนฮ็อพ = 1)
2. P2 มี peak traffic ระหว่างคู่โนดที่อยู่ชิดกันเป็นจำนวน N คู่โนด
3. P3 มี peak traffic เป็นจำนวน 1 คู่โนดระหว่างโนดที่อยู่ตรงกันข้ามกัน (จำนวนฮ็อพ = $\left\lceil \frac{(N-1)}{2} \right\rceil$)
4. P4 มี peak traffic ระหว่างคู่โนดที่อยู่ตรงกันข้ามกันเป็นจำนวน $\left\lceil \frac{(N-1)}{2} \right\rceil$ คู่โนด
5. P5 มี peak traffic ระหว่างคู่โนดหนึ่งกับทุกคู่โนดที่เหลือ ดังนั้น peak traffic ของแต่ละคู่โนดมีจำนวนฮ็อพไม่เท่ากัน และมี peak traffic เป็นจำนวน $N-1$ คู่โนด ทราฟฟิกรูปแบบนี้เปรียบเสมือนมีโนดหนึ่งเป็น server ซึ่งโนดอื่นมีการส่งทราฟฟิกเป็นจำนวนมากกับโนดนี้
6. P6 แบ่งวงแหวนออกเป็น 2 ด้าน แต่ละด้านมี peak traffic ระหว่างคู่โนดหลักหนึ่งกับคู่โนดที่เหลือในด้านนั้น และมี peak traffic ระหว่างคู่โนดหลักทั้ง 2 ด้าน ดังนั้น มี peak traffic ทั้งหมด $N-1$ และ $N-2$ คู่โนด เมื่อ N เป็นเลขคู่และเลขคี่ตามลำดับ ทราฟฟิกรูปแบบนี้คล้ายกับ P5 แต่มี 2 server และมีทราฟฟิกระหว่าง server เป็นจำนวนมากด้วย
7. P7 มี peak traffic เป็นจำนวน 2 คู่โนดระหว่างโนดที่อยู่ห่างกัน 2 ฮ็อพ ซึ่ง peak traffic ทั้ง 2 คู่โนดนี้มีการเหลื่อมซ้อนกัน
8. P8 มี peak traffic ระหว่างคู่โนดที่อยู่ห่างกัน 2 ฮ็อพและเหลื่อมซ้อนกัน รวมทั้งหมดเป็นจำนวน N คู่โนด รูปแบบ P8 นี้คล้ายกับรูปแบบ P2 แต่ต่างกันที่จำนวนฮ็อพของแต่ละคู่โนด

การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนกับทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ (P1, P2, P3, ... , P8) ถูกทดสอบตามขนาดของวงแหวนตั้งแต่ 3 ถึง 50 โนด โดยกำหนดให้คู่โนดที่มี peak traffic ต้องการทราฟฟิกเป็นจำนวน 10 ช่องสัญญาณทราฟฟิก และ background traffic ของคู่โนดที่เหลือต้องการทราฟฟิกเป็นจำนวนช่องสัญญาณซึ่งได้มาจากการสุ่มระหว่าง 0-5 ช่องสัญญาณทราฟฟิก นอกจากนี้ ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบในแต่ละขนาดของโครงข่ายได้รับการทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 5 ตัวอย่างซึ่งมี background traffic ในแต่ละตัวอย่างแตกต่างกันในขณะที่ peak traffic ยังคงลักษณะเช่นเดิม ดังนั้น ผลตอบจากการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของทราฟฟิกภายในวงแหวนที่อ้างถึงต่อไปจะเป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 5 ตัวอย่าง



(1) เมื่อวงแหวนมีขนาด 3-100 โนด



(2) เมื่อวงแหวนมีขนาด 41-50 โนด (ส่วนที่เป็นกรอบเส้นประในรูปที่ (1))

รูปที่ 3.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ

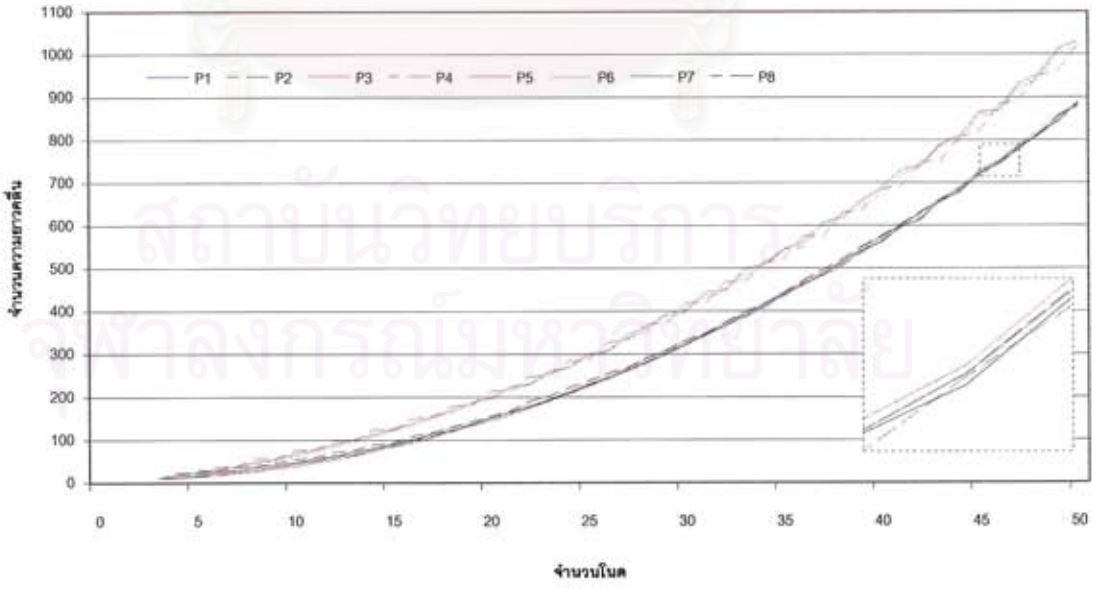
ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบประกอบด้วยคู่โนดที่มี peak traffic ภายในวงแหวนที่แตกต่างกันโดยอาจมีจำนวนคู่โนดที่มี peak traffic ไม่เท่ากันหรือมีจำนวนฮ็อพของคู่โนดดังกล่าวไม่เท่ากันซึ่งทำให้ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของทุกรูปแบบมีค่าไม่เท่ากัน กราฟรูปที่ 3.12 บ่งชี้คุณลักษณะของทราฟฟิกทุกรูปแบบโดยแสดงความแตกต่างกันของค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติเฉลี่ยของทราฟฟิกทั้ง 8 รูปแบบ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มได้ดังนี้

1. กลุ่มที่มีจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติต่ำ ประกอบด้วย 4 รูปแบบทราฟฟิกเรียงจากน้อยที่สุดไปมากที่สุด คือ P1, P7, P3, P2 โดย P1, P3 มี peak traffic จำนวน 1 คู่โนดและมีจำนวน 1 ฮ็อพ และ ครึ่งหนึ่งของวงแหวน ตามลำดับ ในขณะที่ P7 มี peak traffic จำนวน 2 คู่โนดแต่มีจำนวน 2 ฮ็อพจึงทำให้มีค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติไม่สูงมาก อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่า P2 มี peak traffic จำนวน N คู่โนด แต่มีจำนวนฮ็อพแค่ 1 ฮ็อพ จึงมีค่าอยู่ในกลุ่มนี้ด้วย

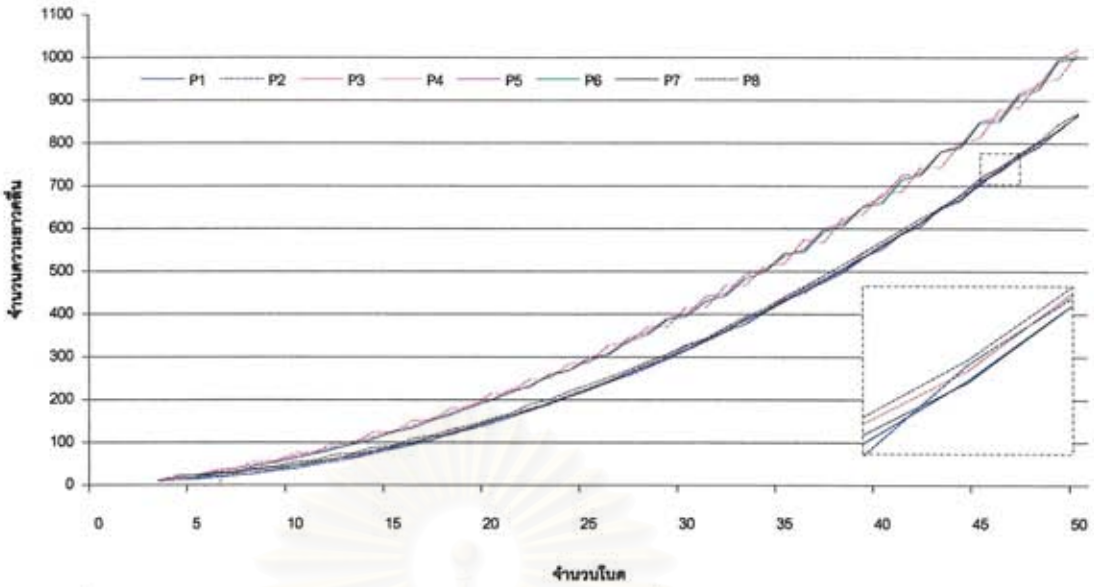
2. P8 มีจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติอยู่ระหว่างกลุ่มที่ 1 และ 3 เมื่อวงแหวนมีขนาดตั้งแต่ 20 โนดขึ้นไป มีแนวโน้มโดยรวมใกล้เคียงกับกลุ่มที่ 1 โดยค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติมีค่าลดลงจนใกล้เคียงกับกลุ่มที่ 1 แต่ในวงแหวนที่มีขนาดเล็ก ค่าที่ได้ของ P8 อยู่ระหว่างกลุ่มที่ 1 และ 3 รูปแบบ P8 มีลักษณะคล้ายกับ P2 แต่คู่โนดที่ต้องการ peak traffic ของ P8 มีจำนวน 2 ฮ็อพและซ้อนเหลื่อมกันจนครบทั้งวงทำให้มีผลกับวงแหวนขนาดเล็กเพราะ peak traffic จำนวน N คู่โนดจัดว่าเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับจำนวนคู่โนดทั้งหมดของวงแหวน

3. กลุ่มที่มีจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติสูง ประกอบด้วย 3 รูปแบบทราฟฟิก คือ P6, P4, P5 เรียงจากน้อยที่สุดไปมากที่สุด ซึ่งทั้งหมดมีจำนวนคู่โนดที่มี peak traffic ประมาณ N คู่โนดแต่คู่โนดเหล่านี้มีจำนวนฮ็อพมาก จึงมีค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติในปริมาณที่สูงกว่า

กราฟรูปที่ 3.12 รวมถึงกราฟอื่น ๆ ที่จะกล่าวถึงต่อไปในส่วนผลของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม พบว่าเส้นกราฟของ P7 และ P8 ไม่ได้เริ่มต้นที่จำนวนคู่โนดเท่ากับ 3 เพราะ P7 ต้องการจำนวนโนดอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 4 และ P8 เริ่มต้นที่จำนวนคู่โนดเท่ากับ 5 เพราะวงแหวนขนาด 4 โนดของ P8 เหมือนกับ P4 และไม่ได้มี N คู่โนดที่ต้องการ peak traffic ตามที่กล่าวไว้

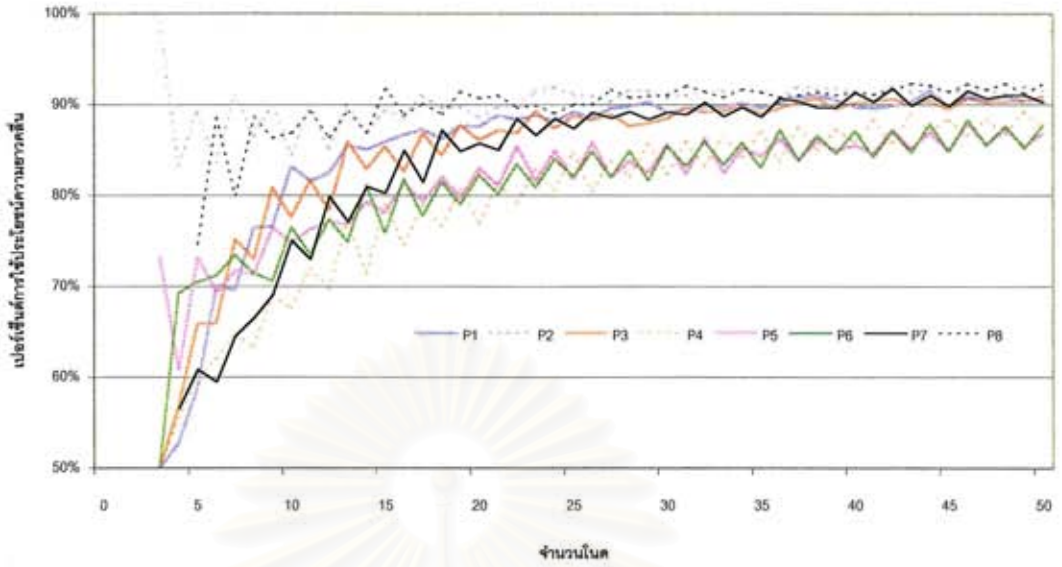


รูปที่ 3.13 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร SP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ

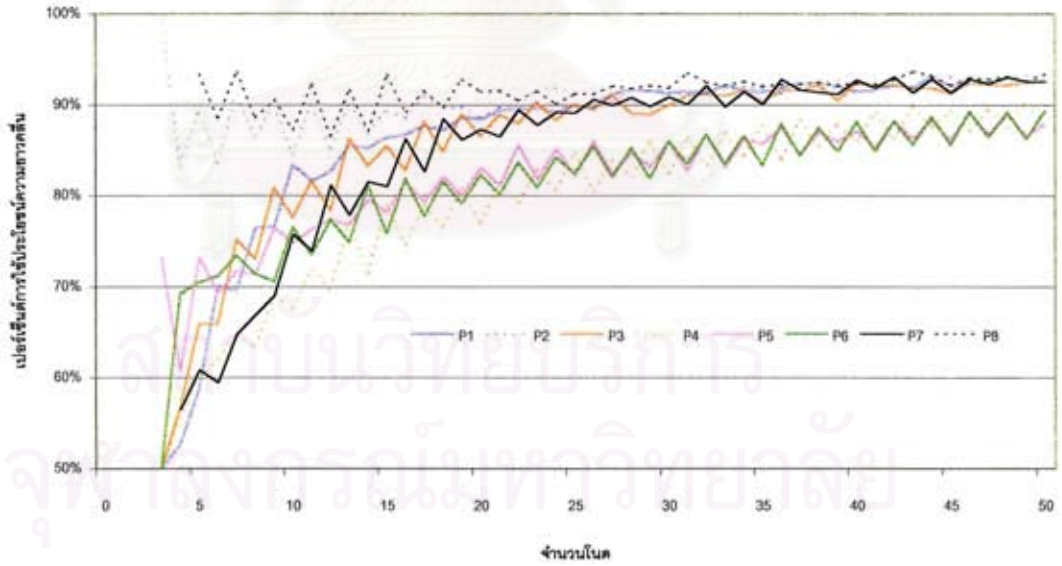


รูปที่ 3.14 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร SP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ

ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นเฉลี่ยที่ได้จากกระบวนการจัดสรรเส้นทางแบบ SP และจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LPF ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม 8 รูปแบบทั้งแบบ NWC และ WC แสดงดังกราฟรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบระหว่างแบบ NWC และ WC พบว่า แนวโน้มจำนวนความยาวคลื่นของทั้งสองมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก เมื่อวงแหวนมีจำนวนโนดเป็นเลขคี่ ผลตอบที่ได้มักจะมีค่าต่ำกว่าวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคู่ในลักษณะเดียวกันกับทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม ทั้งนี้ เป็นผลจากการจัดสรรเส้นทางโดยวิธี SP ซึ่งกำหนดว่าถ้าจำนวนฮ็อพของเส้นทางภายในวงแหวนทั้งสองเส้นทางมีค่าเท่ากัน ให้เลือกเส้นทางจากต้นทางไปยังปลายทางในทิศตามเข็มนาฬิกาจากโนดที่มีเลขลำดับน้อยกว่า จึงทำให้ไม่มีโอกาสในการเลือกอีกเส้นทางหนึ่งซึ่งเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยเช่นกัน และทำให้ผลตอบที่ได้ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร นอกจากนี้ ผลตอบที่ได้ในแต่ละขนาดของวงแหวนจากแบบ NWC มีค่าใกล้เคียงกับแบบ WC มาก โดยแบบ NWC มีค่ามากกว่าแบบ WC เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลตอบที่ได้จากทั้งแบบ NWC และ WC กับจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติ พบว่ามีความแตกต่างกันเมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ค่อนข้างมากโดยเฉพาะวงแหวนที่มีขนาดเล็ก ความแตกต่างนี้ลดลงเมื่อวงแหวนมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยในวงแหวนขนาด 100 โนด แบบ NWC มีค่าต่างจากค่าอุดมคติประมาณ 9-15% และแบบ WC มีค่าต่างจากค่าอุดมคติประมาณ 7-14% ขึ้นกับรูปแบบของทราฟฟิก



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของของการจัดสรร SP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของของการจัดสรร SP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ

การเปรียบเทียบค่าจำนวนความยาวคลื่นทั้งแบบ NWC, WC และค่าอุดมคติโดยการแสดงเป็นกราฟไม่สามารถเห็นความแตกต่างได้ชัดเจน เพราะกราฟแต่ละเส้นในแต่ละรูปแบบของทราฟฟิกมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้น การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยค่าเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นแทนจำนวนความยาวคลื่นสามารถสังเกตได้ชัดเจนกว่า พิจารณารูปที่ 3.15 และ 3.16 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นเฉลี่ยของการจัดสรร SP/LPF แบบ NWC และ WC ตามลำดับ แบบ WC มีเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นมากกว่าเล็กน้อยประมาณ 1-3% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ NWC นอกจากนี้ พบว่ารูปแบบทราฟฟิกที่มีจำนวนคู่โนดที่ต้องการ peak traffic เป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับจำนวนคู่โนดทั้งหมดของวงแหวนหรือคู่โนดที่ต้องการ peak traffic มีจำนวนฮ็อพมากทำให้การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นไม่มีประสิทธิภาพโดยเฉพาะรูปแบบทราฟฟิกที่มีจำนวนฮ็อพต่างกันเป็นจำนวนมาก เช่น P4, P5, P6 อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า P8 และ P2 มีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นมากกว่ารูปแบบ P1, P3 และ P7 โดยที่ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นทั้งแบบ NWC และ WC มีค่าใกล้เคียงกันมากทั้ง 5 รูปแบบ เพราะ P2 และ P8 มีจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกรวมของทุกคู่โนดมากกว่า ดังสังเกตได้จากค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติที่มีค่าสูงกว่า P1, P3 และ P7 ดังนั้น ในกรณีการจัดสรรเส้นทางแบบ SP รูปแบบทราฟฟิกใดมีจำนวนคู่โนดที่ต้องการ peak traffic น้อย (P1, P3 และ P7) ต้องใช้จำนวนความยาวคลื่นในการรองรับทราฟฟิกสูงเมื่อเทียบกับจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติและทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในด้านของเวลาที่ใช้ในการคำนวณของทุกขนาดของวงแหวนและรูปแบบทราฟฟิก พบว่าใช้เวลาในการคำนวณแต่ละวงแหวนน้อยมากโดยไม่เกิน 2 วินาที เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางแบบ SP มีการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยเส้นทางที่กำหนดดังกล่าวเพียงครั้งเดียวเท่านั้น

3.8 ผลของการจัดสรรความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน

3.8.1 ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม

ผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอนกับโครงข่ายที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.19 โดยกำหนดสัญลักษณ์ในตารางดังนี้

N = จำนวนโนด , ideal = จำนวนความยาวคลื่นอุดมคติ

%utilization = เปอร์เซ็นต์ของการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่น

allocate = จำนวนครั้งที่มีการจัดสรรความยาวคลื่น

reduce = จำนวนความยาวคลื่นที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธี SP

ตารางที่ 3.19 การเปรียบเทียบผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นและเวลาที่ใช้ของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีการกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอนระหว่างแบบ NWC และ WC

N	จำนวนความยาวคลื่น			%utilization		allocate		reduce		เวลา (hr:min:sec)	
	ideal	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
3	1.0	1	1	100.00%	100.00%	2	2	0	0	0:00:00	0:00:00
4	2.0	3	3	66.67%	66.67%	4	4	0	0	0:00:00	0:00:00
5	3.0	3	3	100.00%	100.00%	4	4	0	0	0:00:00	0:00:00
6	4.5	5	5	90.00%	90.00%	8	8	1	1	0:00:00	0:00:00
7	6.0	6	6	100.00%	100.00%	7	7	0	0	0:00:00	0:00:00
8	8.0	9	9	88.89%	88.89%	12	12	1	1	0:00:00	0:00:00
9	10.0	10	10	100.00%	100.00%	11	11	0	0	0:00:00	0:00:00
10	12.5	13	13	96.15%	96.15%	19	19	2	2	0:00:00	0:00:00
11	15.0	15	15	100.00%	100.00%	16	16	0	0	0:00:00	0:00:00
12	18.0	19	19	94.74%	94.74%	26	25	2	2	0:00:00	0:00:00
13	21.0	21	21	100.00%	100.00%	22	22	0	0	0:00:00	0:00:00
14	24.5	26	25	94.23%	98.00%	33	35	2	3	0:00:00	0:00:00
15	28.0	28	28	100.00%	100.00%	29	29	0	0	0:00:00	0:00:00
16	32.0	35	33	91.43%	96.97%	38	43	1	3	0:00:01	0:00:00
17	36.0	36	36	100.00%	100.00%	37	37	0	0	0:00:00	0:00:00
18	40.5	42	41	96.69%	98.78%	62	56	3	4	0:00:00	0:00:00
19	45.0	45	45	100.00%	100.00%	46	46	0	0	0:00:00	0:00:00
20	50.0	52	51	96.54%	98.04%	83	66	3	4	0:00:01	0:00:00
21	55.0	55	55	100.00%	100.00%	56	56	0	0	0:00:01	0:00:00
22	60.5	63	61	96.03%	99.18%	80	82	3	5	0:00:01	0:00:01
23	66.0	66	66	100.00%	100.00%	67	67	0	0	0:00:01	0:00:00
24	72.0	75	73	96.22%	98.63%	114	94	4	5	0:00:02	0:00:01
25	78.0	78	78	100.00%	100.00%	79	79	0	0	0:00:02	0:00:01
26	84.5	88	85	96.28%	99.41%	145	113	3	6	0:00:03	0:00:01
27	91.0	91	91	100.00%	100.00%	92	92	0	0	0:00:03	0:00:01
28	98.0	101	99	97.31%	98.99%	177	127	4	6	0:00:07	0:00:02
29	105.0	105	105	100.00%	100.00%	106	106	0	0	0:00:05	0:00:01
30	112.5	116	113	96.98%	99.56%	145	149	4	7	0:00:07	0:00:03
31	120.0	120	120	100.00%	100.00%	121	121	0	0	0:00:07	0:00:03
32	128.0	133	129	96.38%	99.22%	213	165	3	7	0:00:15	0:00:04

ตารางที่ 3.19 (ต่อ)

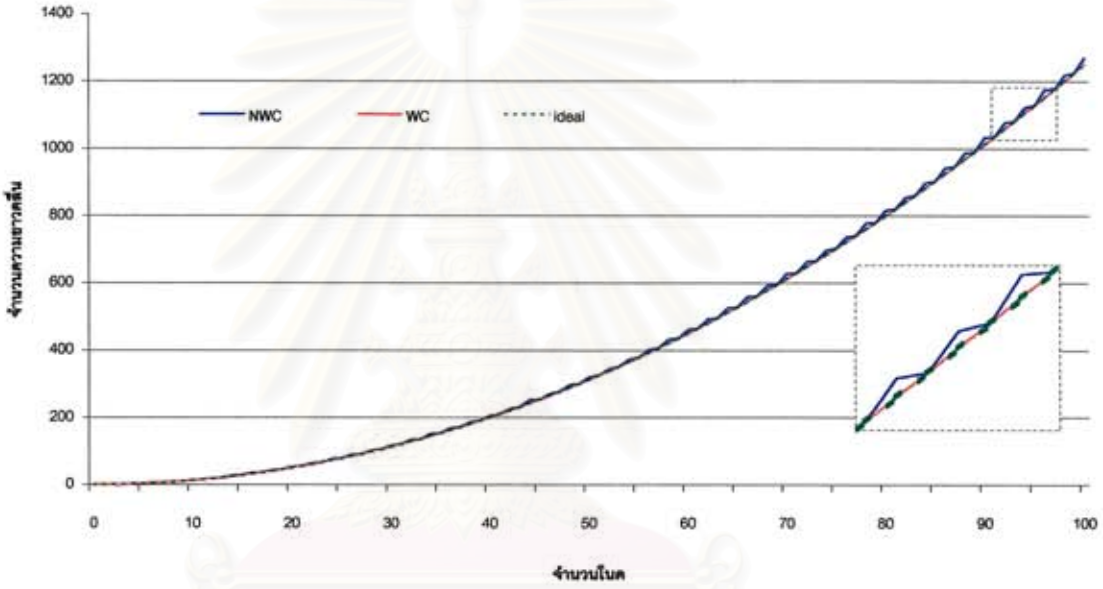
N	จำนวนความยาวคลื่น			%utilization		allocate		reduce		เวลา (hr:min:sec)	
	ideal	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
33	136.0	136	136	100.00%	100.00%	137	137	0	0	0:00:11	0:00:03
34	144.5	151	145	95.70%	99.66%	169	190	2	8	0:00:16	0:00:06
35	153.0	153	153	100.00%	100.00%	154	154	0	0	0:00:16	0:00:06
36	162.0	168	163	96.43%	99.39%	199	208	3	8	0:00:25	0:00:08
37	171.0	171	171	100.00%	100.00%	172	172	0	0	0:00:23	0:00:08
38	180.5	186	181	97.07%	99.72%	251	236	5	9	0:00:39	0:00:12
39	190.0	190	190	100.00%	100.00%	191	191	0	0	0:00:34	0:00:11
40	200.0	205	201	97.68%	99.50%	344	256	6	9	0:01:10	0:00:16
41	210.0	210	210	100.00%	100.00%	211	211	0	0	0:00:48	0:00:15
42	220.5	225	221	98.36%	99.77%	585	287	7	10	0:02:31	0:00:23
43	231.0	231	231	100.00%	100.00%	232	232	0	0	0:01:07	0:00:21
44	242.0	252	243	96.21%	99.59%	459	309	2	10	0:02:28	0:00:31
45	253.0	253	253	100.00%	100.00%	254	254	0	0	0:01:31	0:00:41
46	264.5	270	265	98.17%	99.81%	598	343	7	11	0:04:00	0:00:42
47	276.0	276	276	100.00%	100.00%	277	277	0	0	0:02:03	0:00:38
48	288.0	296	289	97.42%	99.65%	551	367	4	11	0:04:32	0:00:55
49	300.0	300	300	100.00%	100.00%	301	301	0	0	0:02:44	0:00:51
50	312.5	320	313	97.91%	99.84%	814	404	6	12	0:08:12	0:01:28
51	325.0	325	325	100.00%	100.00%	326	326	0	0	0:03:35	0:01:06
52	338.0	343	339	98.81%	99.71%	997	430	9	12	0:12:09	0:01:35
53	351.0	351	351	100.00%	100.00%	352	352	0	0	0:04:40	0:01:34
54	364.5	373	365	97.86%	99.86%	796	470	5	13	0:11:42	0:02:14
55	378.0	378	378	100.00%	100.00%	379	379	0	0	0:06:05	0:01:49
56	392.0	401	393	97.87%	99.75%	823	498	7	13	0:14:27	0:02:38
57	406.0	406	406	100.00%	100.00%	407	407	0	0	0:07:44	0:02:19
58	420.5	432	421	97.47%	99.88%	881	541	6	14	0:18:26	0:03:20
59	435.0	435	435	100.00%	100.00%	436	436	0	0	0:09:49	0:02:55
60	450.0	461	451	97.81%	99.78%	1201	571	5	14	0:29:46	0:04:09
61	465.0	465	465	100.00%	100.00%	466	466	0	0	0:12:22	0:03:40
62	480.5	492	481	97.79%	99.90%	1112	617	5	15	0:32:21	0:05:14
63	496.0	496	496	100.00%	100.00%	497	497	0	0	0:15:28	0:04:34

ตารางที่ 3.19 (ต่อ)

N	จำนวนความยาวคลื่น			%utilization		allocate		reduce		เวลา (hr:min:sec)	
	ideal	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
64	512.0	525	513	97.66%	99.81%	1226	649	4	15	0:41:44	0:06:25
65	528.0	528	528	100.00%	100.00%	529	529	0	0	0:19:11	0:05:39
66	544.5	559	545	97.43%	99.91%	753	698	5	16	0:30:12	0:08:01
67	561.0	561	561	100.00%	100.00%	562	562	0	0	0:23:41	0:06:59
68	578.0	591	579	97.97%	99.83%	1591	732	8	16	1:13:21	0:09:42
69	595.0	595	595	100.00%	100.00%	596	596	0	0	0:29:02	0:08:28
70	612.5	628	613	97.58%	99.92%	1001	784	5	17	0:53:03	0:11:58
71	630.0	630	630	100.00%	100.00%	631	631	0	0	0:35:43	0:10:18
72	648.0	662	649	97.97%	99.85%	1402	820	5	17	1:25:21	0:14:21
73	666.0	666	666	100.00%	100.00%	667	667	0	0	0:42:58	0:12:28
74	684.5	697	685	98.37%	99.93%	2148	875	7	18	2:31:23	0:17:27
75	703.0	703	703	100.00%	100.00%	704	704	0	0	0:51:55	0:15:07
76	722.0	736	723	98.24%	99.86%	2135	913	8	18	2:50:05	0:20:45
77	741.0	741	741	100.00%	100.00%	742	742	0	0	1:02:16	0:18:02
78	760.5	777	761	97.93%	99.93%	1455	971	6	19	2:11:34	0:25:23
79	780.0	780	780	100.00%	100.00%	781	781	0	0	1:14:40	0:21:31
80	800.0	816	801	98.21%	99.88%	2791	1011	9	19	4:49:55	0:29:41
81	820.0	820	820	100.00%	100.00%	821	821	0	0	1:28:29	0:25:27
82	840.5	854	841	98.53%	99.94%	2426	1072	11	20	4:41:35	0:35:16
83	861.0	861	861	100.00%	100.00%	862	862	0	0	1:45:12	0:30:10
84	882.0	897	883	98.48%	99.89%	3047	1114	10	20	6:39:49	0:41:21
85	903.0	903	903	100.00%	100.00%	904	904	0	0	2:04:08	0:35:30
86	924.5	941	925	98.31%	99.95%	2135	1178	7	21	5:14:29	0:49:55
87	946.0	946	946	100.00%	100.00%	947	947	0	0	2:25:56	0:41:41
88	968.0	986	969	98.24%	99.90%	2320	1222	9	21	6:23:33	0:56:53
89	990.0	990	990	100.00%	100.00%	991	991	0	0	2:50:59	0:49:03
90	1012.5	1032	1013	98.19%	99.95%	2658	1289	6	22	8:12:02	1:07:45
91	1035.0	1035	1035	100.00%	100.00%	1036	1036	0	0	3:20:57	0:58:13
92	1058.0	1076	1059	98.44%	99.91%	3721	1335	12	22	12:51:23	1:18:50
93	1081.0	1081	1081	100.00%	100.00%	1082	1082	0	0	3:53:24	1:07:11
94	1104.5	1121	1105	98.65%	99.95%	3976	1405	10	23	15:14:57	1:31:54

ตารางที่ 3.19 (ต่อ)

N	จำนวนความยาวคลื่น			%utilization		allocate		reduce		เวลา (hr:min:sec)	
	ideal	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
95	1128.0	1128	1128	100.00%	100.00%	1129	1129	0	0	4:30:25	1:17:38
96	1152.0	1174	1153	98.18%	99.91%	2541	1453	6	23	10:49:38	1:45:15
97	1176.0	1176	1176	100.00%	100.00%	1177	1177	0	0	5:15:13	1:28:55
98	1200.5	1218	1201	98.69%	99.96%	4704	1526	13	24	22:18:59	2:02:10
99	1225.0	1225	1225	100.00%	100.00%	1226	1226	0	0	6:01:47	1:44:34
100	1250.0	1269	1251	98.61%	99.92%	4565	1576	11	24	23:57:39	2:19:02



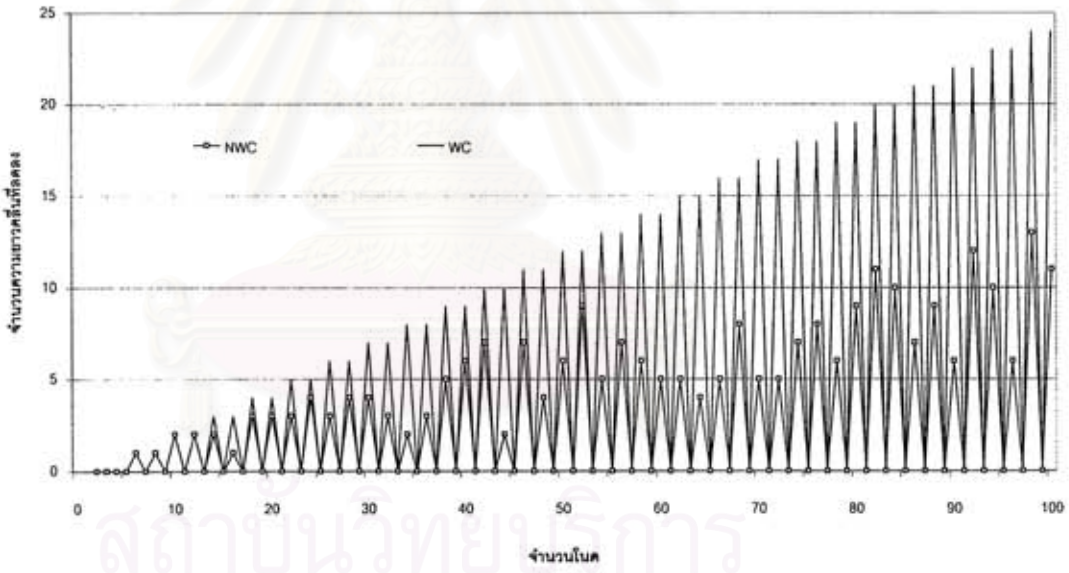
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนความยาวคลื่นของวิธี AP/LPF เมื่อทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม

จำนวนความยาวคลื่นของทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มจากวิธีจัดสรรเส้นทางแบบ SP และ AP สามารถเปรียบเทียบผลได้ดังนี้

1. ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคี่ทั้งแบบ NWC, WC ยังคงมีค่าเท่ากันทั้ง 2 วิธี และมีค่าเท่ากับจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติ ทั้งนี้ วิธี AP สำหรับกรณีนี้ไม่มีประโยชน์และทำให้เสียเวลาเพิ่มขึ้นอีกโดยเป็นที่ทราบอยู่แล้วว่าผลตอบต้องมีค่าเท่าเดิมและใช้เส้นทางแบบ SP ทุกช่องสัญญาณเช่นเดิมเพราะผลที่ได้จากวิธี SP มีเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นสูงสุด 100 % และมีค่าเท่ากับจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ว่าจำนวนความยาวคลื่นไม่มีทางน้อยกว่านี้ไปได้อีก

2. ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคู่ มีค่าเรียงตามลำดับเช่นเดียวกันกับวิธี SP ได้ดังนี้ คือ $M_{ideal} \leq M_{WC} \leq M_{NWC}$ แต่ความแตกต่างกับค่า M_{ideal} ลดน้อยลงเมื่อเทียบกับวิธี SP นอกจากนี้ ผลตอบที่ได้จากวิธี AP ในแบบ WC มีค่าเกือบเท่ากับค่า M_{ideal} เป็นอย่างมาก โดยในวงแหวนจำนวนโนดคู่ที่หารด้วย 4 ลงตัวมีค่าผลตอบต่างจากค่า M_{ideal} 1 ความยาวคลื่น และที่หารด้วย 4 ไม่ลงตัวมีค่าผลตอบต่างจากค่า M_{ideal} เพียง 0.5 ความยาวคลื่นเท่านั้น

3. ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นด้วยวิธี AP ดังแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 3.17 ยังคงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้น และ กราฟทั้ง 3 เส้นประกอบด้วยผลจาก NWC, WC และ ideal มีค่าใกล้เคียงกันมากเช่นเดียวกันกับการจัดสรรเส้นทางแบบ SP นอกจากนี้ กราฟรูปที่ 3.18 แสดงถึงการลดลงของจำนวนความยาวคลื่นของวิธี AP เปรียบเทียบกับวิธี SP โดยแบบ WC สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้มากกว่า



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนความยาวคลื่นที่ลดลงของวิธี AP/LPF เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี SP/LPF เมื่อทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม

4. การลดลงของจำนวนความยาวคลื่นด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ AP ในวงแหวนโนดคู่ช่วยประหยัดจำนวนความยาวคลื่นได้โดยเฉพาะเมื่อวงแหวนมีขนาดใหญ่ โดยแบบ WC สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นลงจนเกือบเข้าใกล้ค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติ ในขณะที่แบบ NWC สามารถลดลงได้พอสมควร จากกราฟรูปที่ 3.18 พบว่าเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้น การลด

ลงของจำนวนความยาวคลื่นทั้งแบบ NWC และ WC มีมากขึ้นด้วย ทำให้ประหยัดทรัพยากรได้มากขึ้นเพราะหนึ่งความยาวคลื่นในวงแหวนที่มีจำนวนโนดหรือมีจำนวนกิ่งเชื่อมมากสามารถรองรับทราฟฟิกได้ในปริมาณที่มาก ดังนั้น ความยาวคลื่นจำนวนหนึ่งความยาวคลื่นที่ลดลงในวงแหวนขนาดใหญ่สามารถประหยัดทรัพยากรได้มากกว่าความยาวคลื่นจำนวนหนึ่งความยาวคลื่นที่ลดลงในวงแหวนขนาดเล็ก

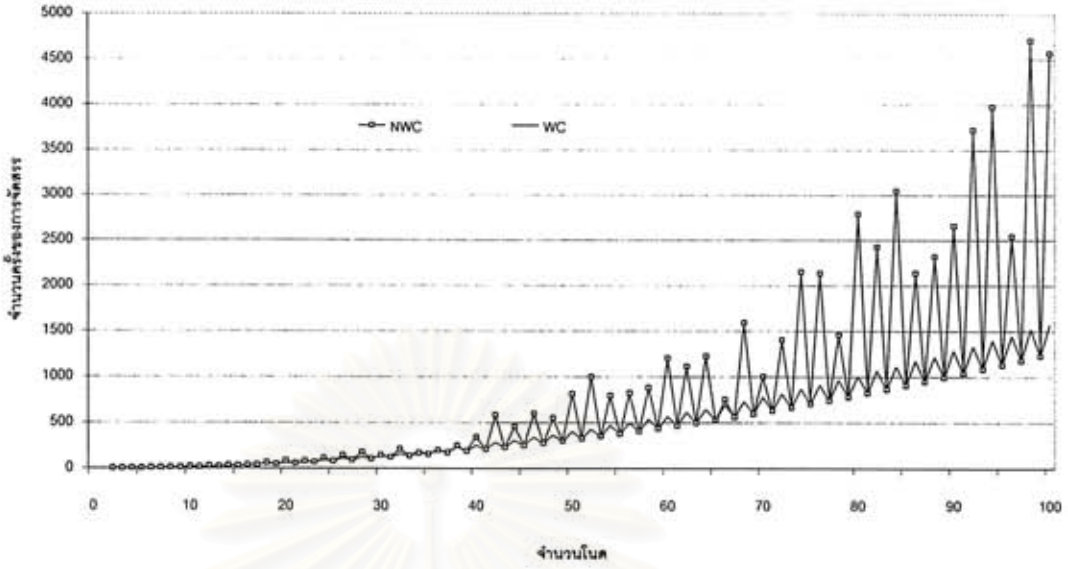
5. ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่น M จากการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในวงแหวนเดี่ยวขนาด N โนดที่จัดสรรความยาวคลื่นแบบ WC และมีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม สามารถสรุปจากตารางที่ 3.19 ได้ดังนี้

1. จำนวนโนดเป็นเลขคี่ : $M = \frac{(N^2 - 1)}{8}$
2. จำนวนโนดเป็นเลขคู่ที่หารด้วย 4 ลงตัว : $M = \frac{(N^2 + 8)}{8}$
3. จำนวนโนดเป็นเลขคู่ที่หารด้วย 4 ไม่ลงตัว : $M = \frac{(N^2 + 4)}{8}$

อย่างไรก็ตาม ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นทางคณิตศาสตร์ในการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ NWC ไม่อาจสรุปได้เพราะอัลกอริทึมที่ใช้เป็นแบบ heuristic และยังไม่พบคุณลักษณะเป็นที่แน่นอนของการรักษาความต่อเนื่องของความยาวคลื่นระหว่างเส้นทางของวิถีแสงว่ามีแนวโน้มที่แน่นอนอย่างไร

ตามที่กล่าวมาแล้วว่าวิธี AP เป็นการนำผลที่ได้จากวิธี SP มาเลือกวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกหนึ่งจากกิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งมากที่สุดและลองสลับเส้นทางแล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่เพื่อตรวจสอบว่ามีการสลับเส้นทางของช่องสัญญาณทราฟฟิกใดที่สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้หรือไม่ กราฟรูปที่ 3.19 แสดงถึงจำนวนครั้งของการวนวงรอบในกระบวนการจัดสรรเส้นทางวิธี AP ว่ามีการจัดสรรความยาวคลื่นเป็นจำนวนกี่ครั้งจนกว่าจะได้ผลตอบสุดท้าย (การลองปรับเปลี่ยนเส้นทางช่องสัญญาณทราฟฟิกทุกครั้งต้องจัดสรรความยาวคลื่นใหม่เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่เก็บเป็นค่าอ้างอิงก่อนหน้าทุกครั้ง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงจำนวนครั้งของการจัดสรรของวิธี AP/LPF เมื่อทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม

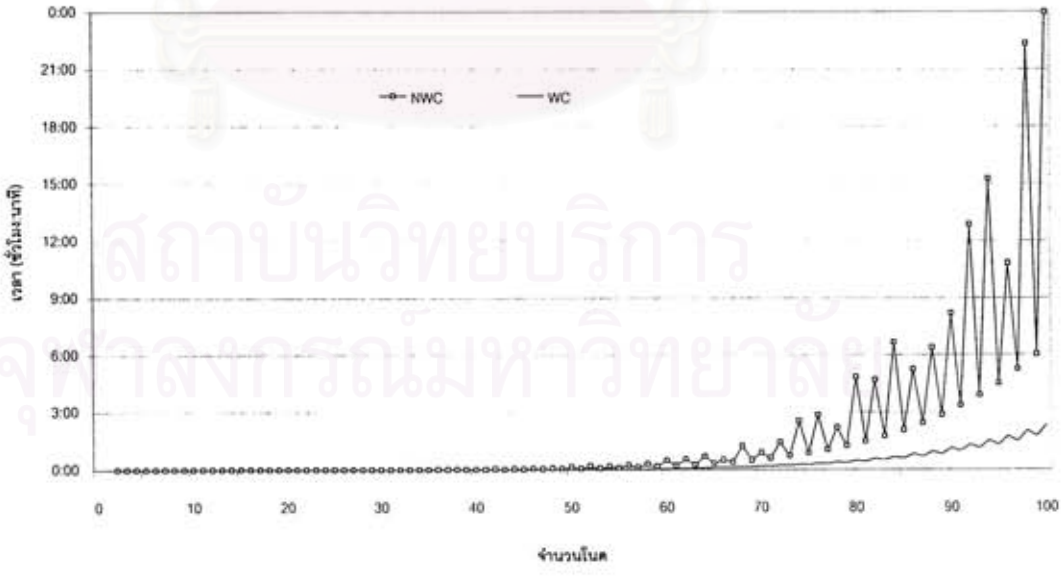
จากกราฟ จำนวนครั้งของการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้น ในกรณีของวงแหวนโนดคี่มีจำนวนครั้งของการจัดสรรแบบ NWC และ WC เท่ากัน เพราะจากผลที่ได้ด้วยวิธี SP ลองเลือกช่องสัญญาณทราฟฟิกและเปลี่ยนเส้นทางแล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกในกิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งที่สุดทั้ง 2 แบบ ไม่สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้อีกเลย จำนวนครั้งของการจัดสรรของวงแหวนโนดคี่คือจำนวนวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ครอบครองทุกความยาวคลื่นของกิ่งเชื่อมที่ถูกพิจารณาว่ามีความคับคั่งมากที่สุดบวกกับหนึ่งของการจัดสรรความยาวคลื่นครั้งแรกด้วยวิธี SP ดังนั้น ในโครงข่ายที่จัดสรรเส้นทางด้วยวิธี SP แล้วสามารถใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นได้เต็มพิกัด อาจมีการตรวจสอบว่ามีเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นสูงสุดหรือไม่เพื่อจะได้ไม่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี AP ทำให้มีการจัดสรรเพียงครั้งเดียวและไม่ต้องสิ้นเปลืองเวลาเพิ่มขึ้น

ส่วนในกรณีวงแหวนโนดคู่ ดังผลที่ได้แสดงไว้แล้วว่าวิธี AP ทำให้จำนวนความยาวคลื่นมีค่าลดลง ดังนั้น จำนวนครั้งของการจัดสรรไม่สามารถบอกได้แน่นอนเพราะเมื่อใดที่การเปลี่ยนเส้นทางแล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นลงได้ ก็จะหากิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดใหม่และเลือกช่องสัญญาณทราฟฟิกเพื่อจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ต่อไปเรื่อย ๆ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าแบบ WC สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้มากกว่า ในทางตรงกันข้าม กลับมีจำนวนครั้งของการจัดสรรน้อยกว่าและน้อยกว่ามากขึ้นเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุจากการที่แบบ WC สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่หลังจากเลือกช่องสัญญาณทราฟฟิกในกิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งที่สุดไปเพียงไม่กี่ช่องสัญญาณซึ่งต่างจากแบบ NWC

ที่ลดจำนวนความยาวคลื่นได้ยากกว่าและทำให้โดยรวมแล้วแบบ NWC ต้องมีจำนวนครั้งในการจัดสรรมากกว่าโดยที่ในแต่ละครั้งของการเลือกช่องสัญญาณทราฟฟิกและสลับเส้นทางแล้วจัดสรรความยาวคลื่นใหม่นั้นมักจะให้ค่าจำนวนความยาวคลื่นเท่ากับค่าอ้างอิงหรืออาจมีค่ามากกว่าค่าจำนวนความยาวคลื่นอ้างอิงเสียอีก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการจัดสรรเส้นทางด้วยวิธี AP ในโครงข่ายแบบ NWC ลดจำนวนความยาวคลื่นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี SP ได้ยากกว่าแบบ WC

จำนวนครั้งของการจัดสรรความยาวคลื่นของการจัดสรรเส้นทางแบบ AP ไม่แน่นอน แม้ว่าจำนวนครั้งในวงแหวนโนดคี่เพิ่มขึ้นตามจำนวนความยาวคลื่นเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้นเพราะจำนวนความยาวคลื่นไม่ลดลงเมื่อเทียบกับวิธี SP แต่จำนวนครั้งของการจัดสรรในวงแหวนโนดคู่ไม่สามารถคาดเดาได้เพราะไม่ทราบเลยว่าการกลับเส้นทางวิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกใดสามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้หรือไม่และสิ้นสุดการจัดสรรเมื่อไร รวมถึงเวลาในการคำนวณก็แตกต่างไปไม่แน่นอนเช่นกัน

นอกจากนี้ จำนวนครั้งของการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ภายหลังจากการเลือกและกลับเส้นทางของช่องสัญญาณทราฟฟิกนั้นก่อนที่จะสิ้นสุดกระบวนการจัดสรรเส้นทางแบบ AP ต้องมีจำนวนครั้งที่สูญเปล่าจากการจัดสรรความยาวคลื่นของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกในกิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดนั้นเป็นจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ครอบครองกิ่งเชื่อมนั้นเสียก่อน ซึ่งอาจเป็นข้อเสียที่ทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการผลตอบมากขึ้นโดยเฉพาะในกรณีที่วงแหวนมีขนาดใหญ่ (มีจำนวนโนดมาก) เพราะวงแหวนขนาดใหญ่ต้องการจำนวนความยาวคลื่นมากขึ้นตามไปด้วย



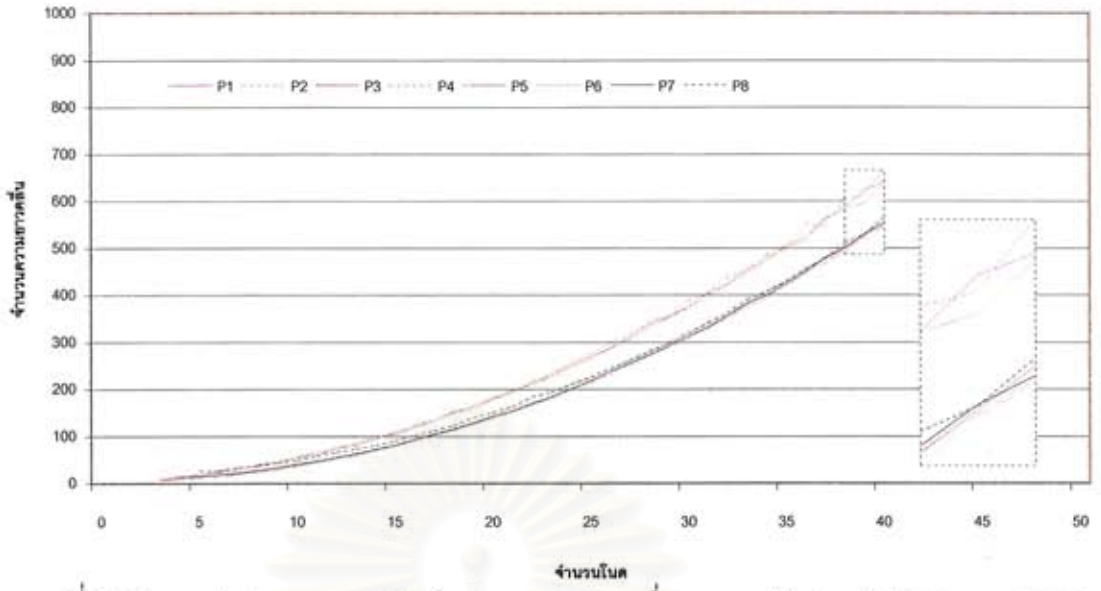
รูปที่ 3.20 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการจัดสรรของวิธี AP/LPF เมื่อทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม

กราฟรูปที่ 3.20 แสดงเวลาที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นแบบ AP/LPF เวลาที่ใช้ในการจัดสรรแปรผันตามจำนวนครั้งของการจัดสรรดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.19 นอกจากนี้ ในแต่ละครั้งของการเปลี่ยนเส้นทางเพื่อจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ของแบบ NWC ต้องใช้เวลามากกว่าแบบ WC โดยเฉพาะเมื่อโนดมีขนาดใหญ่ ดังนั้น เวลาโดยรวมที่ใช้ในการหาผลตอบแบบ WC จึงน้อยกว่า เช่น ตัวอย่างในวงแหวนขนาด 100 โนดใช้เวลาน้อยกว่า 3 ชั่วโมง ในขณะที่แบบ NWC ใช้เวลามากถึง 24 ชั่วโมง แม้ว่าวิธีนี้จะให้ผลตอบจำนวนความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการจัดสรรเส้นทางด้วยวิธี SP หากแต่เวลาในการคำนวณก็เป็นอุปสรรคสำคัญของการหาผลตอบ ซึ่งเวลา 1 นาทีสามารถหาผลตอบได้ภายในขนาด 40 และ 50 โนดในการกำหนดการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ NWC และ WC ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ในโครงข่ายแบบ all-optical เป็นโครงข่ายของการส่งข้อมูลที่มีความจุสูงมาก แต่ละโนดมักมีหน้าที่เปรียบเสมือนทางเข้าออกของโครงข่ายย่อยส่วนตัวของมันเองแล้วจึงเชื่อมต่อโนดขนาดใหญ่เหล่านี้เข้าด้วยกันเป็น backbone (ในหัวข้อนี้ ต่อเชื่อมกันเป็นวงแหวน) ซึ่งโนดขนาดใหญ่เหล่านี้มีจำนวนไม่มากนัก ดังนั้น การจัดสรรเส้นทางแบบ AP จึงสามารถใช้ในการออกแบบได้ดีกับวงแหวนไม่เกิน 50 โนด สำหรับทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มซึ่งแต่ละคู่โนดต้องการหนึ่งช่องสัญญาณทราฟฟิก

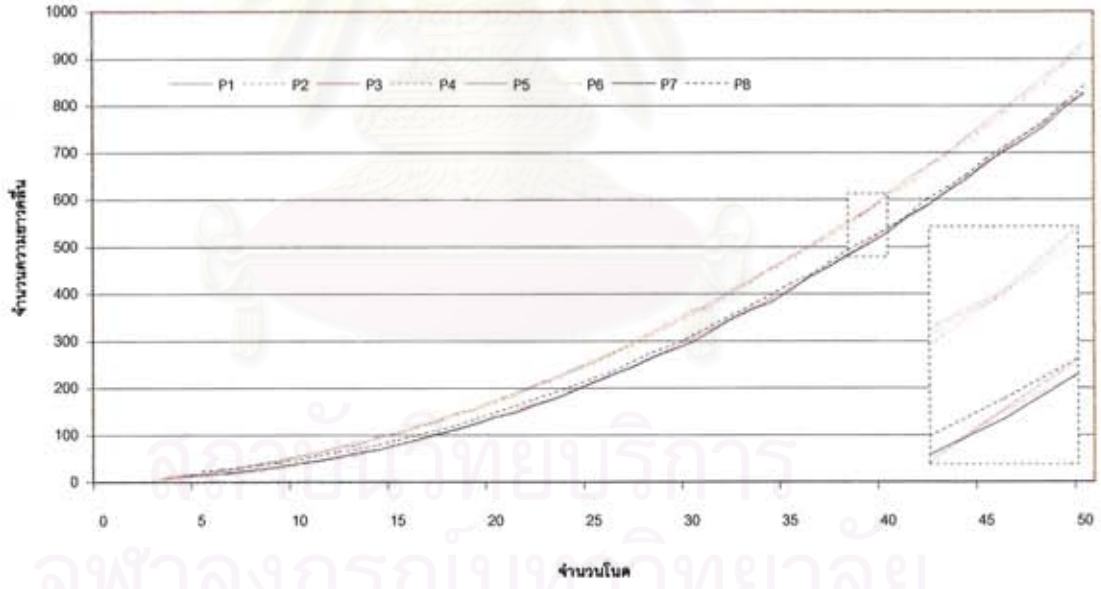
3.8.2 ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม

การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในหัวข้อนี้ใช้ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม 8 รูปแบบตามรูปที่ 3.11 โดยแต่ละขนาดของวงแหวนและรูปแบบทราฟฟิกมีปริมาณความต้องการทราฟฟิกเหมือนกันกับในหัวข้อ 3.7.2 ดังนั้น จำนวนความยาวคลื่นอุดมคติเฉลี่ยจึงมีค่าเหมือนกัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเวลาในการคำนวณของการจัดสรรเส้นทางแบบ AP โดยเฉพาะในรูปแบบทราฟฟิก P4, P5, P6 เมื่อช่องสัญญาณมีการคงความต่อเนื่องของความยาวคลื่น (NWC) ใช้เวลาค่อนข้างนาน จึงลดปริมาณการทดสอบเหลือเพียง 40 โนดเพื่อให้ได้รับผลตอบในเวลาจำกัด

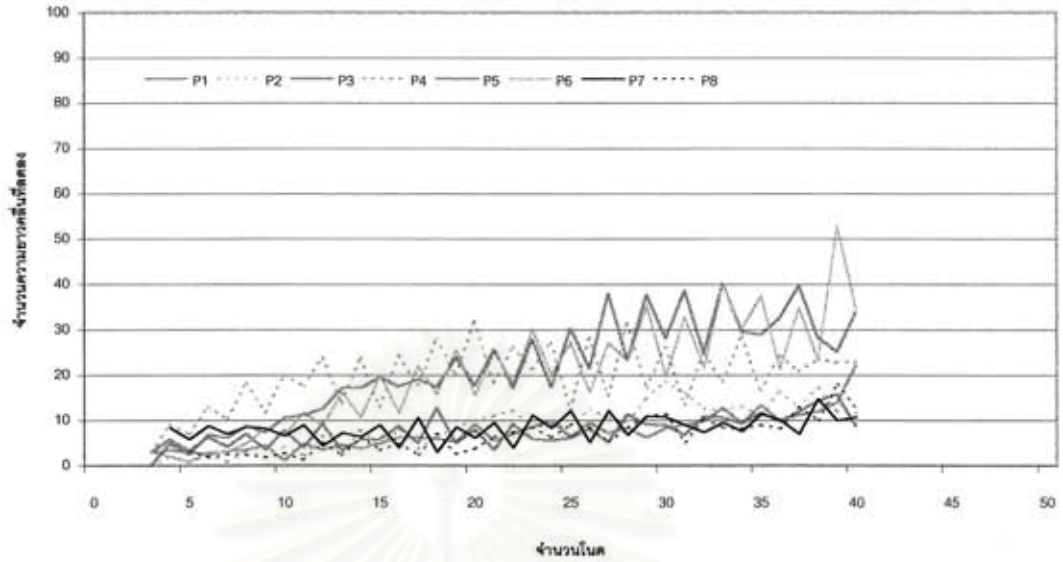
ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นเฉลี่ยจากการจัดสรรเส้นทางแบบ AP แสดงดังกราฟรูปที่ 3.21 และ 3.22 ซึ่งเป็นแบบ NWC และ WC ตามลำดับ กราฟทั้งสองรูปมีค่าต่างจากค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติน้อยลงเมื่อเทียบกับการจัดสรรเส้นทางแบบ SP โดยที่วงแหวนขนาด 40 โนดแบบ NWC ต่างกันประมาณ 5-13% และวงแหวนขนาด 50 โนดแบบ WC ต่างกันประมาณ 2-4% ขึ้นกับรูปแบบของทราฟฟิกซึ่งรูปแบบ P4, P5, P6 ให้ผลตอบต่างจากค่าอุดมคติมาก นอกจากนี้ กราฟทั้งสองมีลักษณะเรียบขึ้นเมื่อเทียบกับการจัดสรรเส้นทางแบบ SP ซึ่งวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคู่มักจะได้ผลตอบไม่มีประสิทธิภาพ การจัดสรรเส้นทางแบบ AP ช่วยเพิ่มโอกาสในการเลือกอีกเส้นทางหนึ่งในทิศทวนเข็มนาฬิกาจากโนดที่มีเลขลำดับน้อยกว่าซึ่งเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดของคู่โนดในวงแหวนโนดคู่ที่อยู่ตรงกันข้ามกันด้วยเช่นกัน



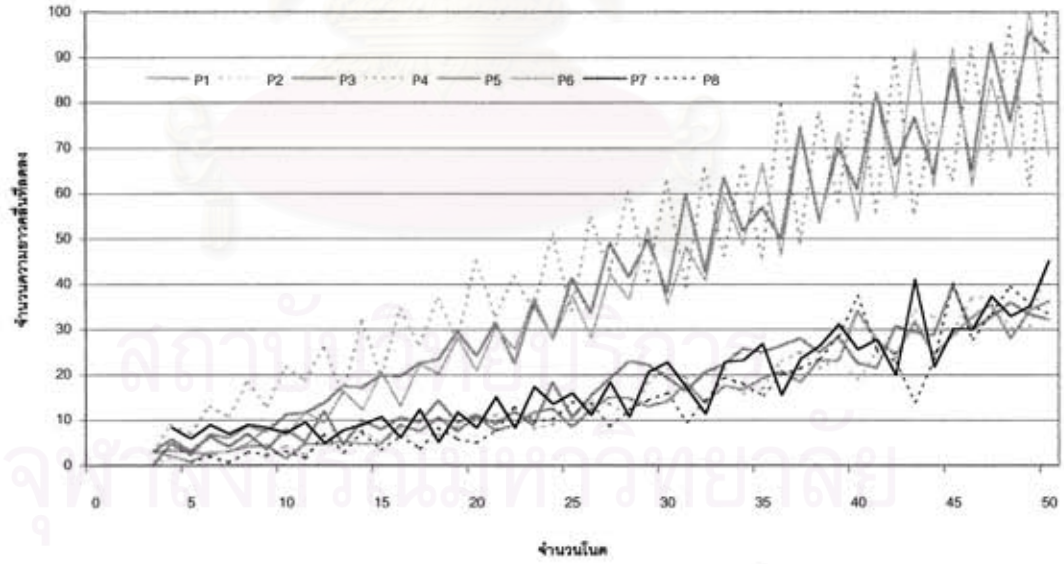
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร AP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ



รูปที่ 3.22 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร AP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ



รูปที่ 3.23 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร AP/LPF ที่ลดลงจากวิธี SP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ

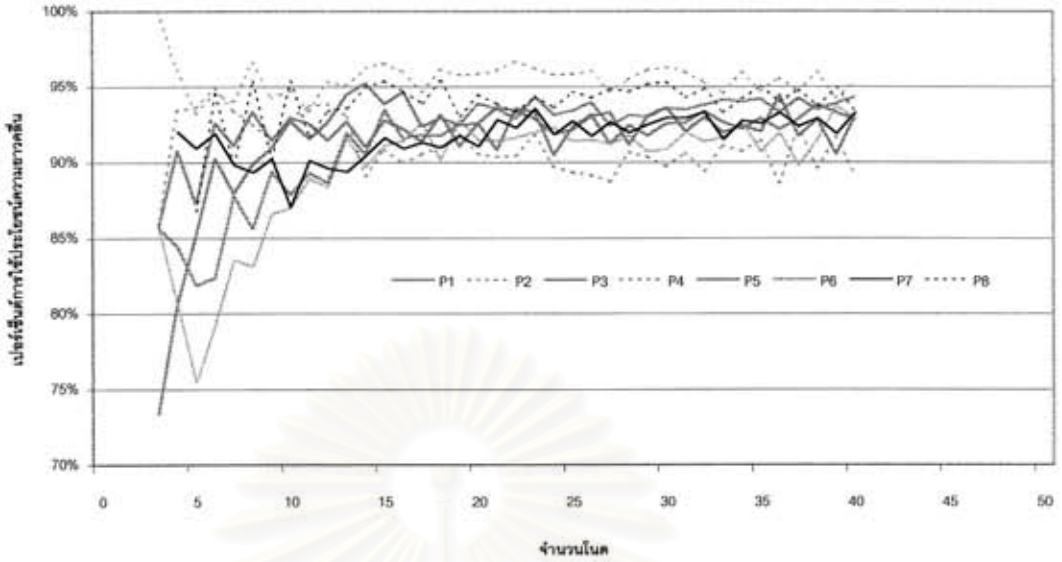


รูปที่ 3.24 กราฟแสดงผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรร AP/LPF ที่ลดลงจากวิธี SP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ

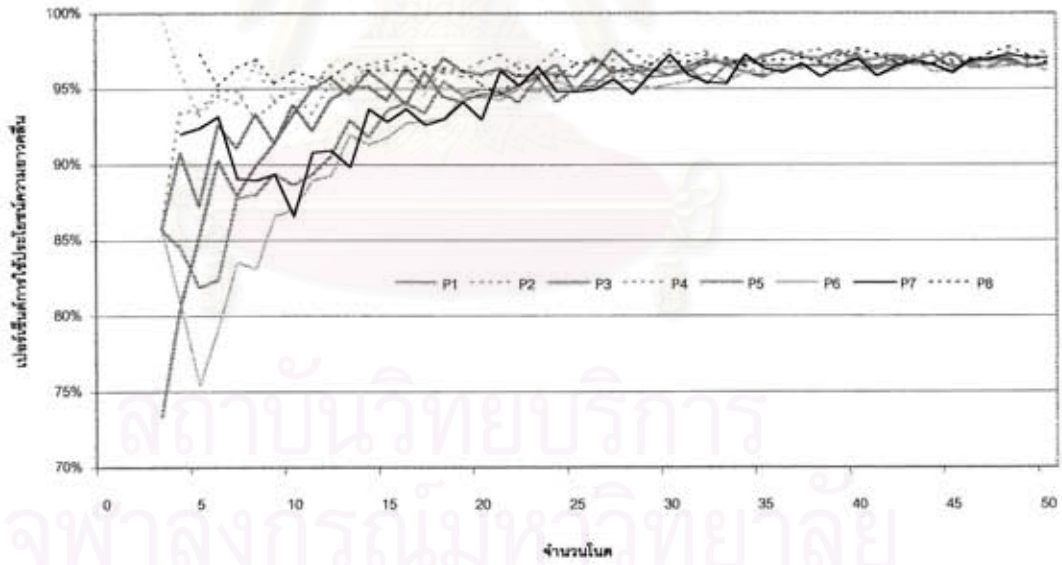
กราฟรูปที่ 3.23 และ 3.24 แสดงการลดลงของจำนวนความยาวคลื่นของการจัดสรรเส้นทางวิธี AP ทั้งแบบ NWC และ WC เปรียบเทียบกับการจัดสรรเส้นทางด้วยวิธี SP กราฟทั้งสองรูปเป็นรอยหยักโดยเฉพาะแบบ WC เพราะวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคู่ได้รับการจัดสรรเส้นทางอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแบบ NWC และ WC พบว่าแบบ WC สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นลงได้มากจนมีค่าเข้าใกล้ค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติ ในขณะที่จำนวนความยาวคลื่นในแบบ NWC ลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของแบบ WC นอกจากนี้ รูปแบบทราฟฟิก P4, P5, P6 ซึ่งมีจำนวนฮ็อพของคู่โนดที่มี peak traffic ค่อนข้างมากมีจำนวนความยาวคลื่นที่ลดลงมากกว่าทราฟฟิกรูปแบบอื่น เพราะเส้นทางที่กลับทิศของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่มีจำนวนฮ็อพมากมีจำนวนฮ็อพน้อยกว่าการกลับเส้นทางของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่มีจำนวนฮ็อพน้อยกว่า กล่าวโดยสรุป วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ AP มีข้อดีในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโครงข่ายวงแหวนที่มีลักษณะเป็นโนดคู่ มีการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทาง และ ช่องสัญญาณทราฟฟิกมีจำนวนฮ็อพมากเป็นส่วนใหญ่

นอกจากการเปรียบเทียบผลจากจำนวนความยาวคลื่นแล้ว เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นเป็นอีกค่าหนึ่งซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น พิจารณารูปที่ 3.25 และ 3.26 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากแบบ NWC และ WC ตามลำดับ การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นของการจัดสรรเส้นทางแบบ AP เพิ่มขึ้นจากการจัดสรรเส้นทางแบบ SP ซึ่งเป็นผลจากจำนวนความยาวคลื่นที่ลดลง ในแต่รูปแบบของทราฟฟิกโดยเฉพาะในแบบ WC มีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นใกล้เคียงกันมากขึ้นเพราะไม่ถูกกำหนดให้ใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด ทราฟฟิกทั้ง 8 รูปแบบล้วนเป็นทราฟฟิกที่มีบางคู่โนดต้องการช่องสัญญาณทราฟฟิกมากกว่าปกติซึ่งทำให้เกิดความต้องการบางกิ่งเชื่อมสูงเป็นพิเศษและการจัดสรรเส้นทางแบบ SP ไม่สามารถปรับเส้นทางเลี่ยงกิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งสูงนั้นได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.25 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของของการจัดสรร AP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ



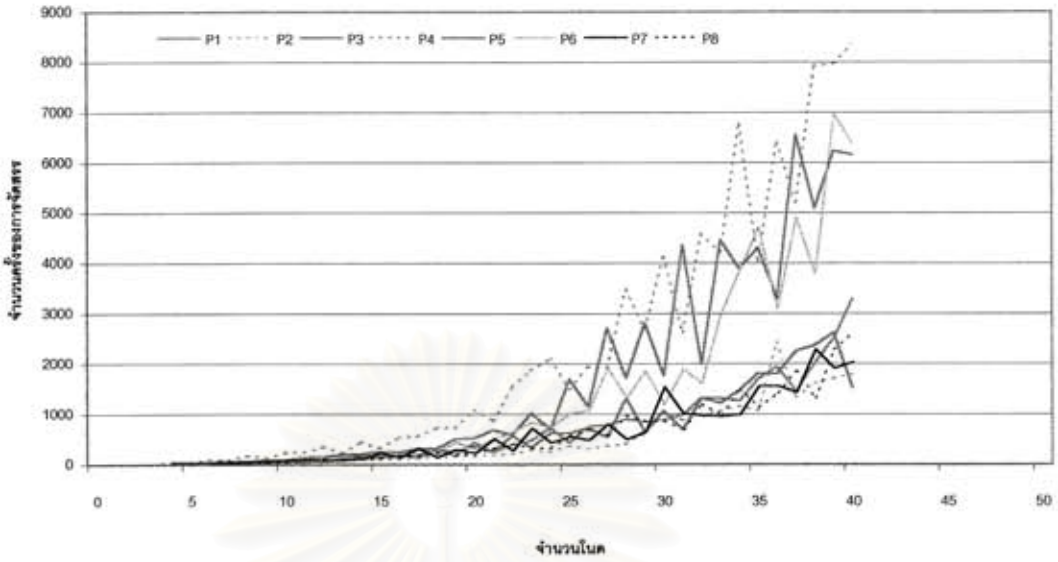
รูปที่ 3.26 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของของการจัดสรร AP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

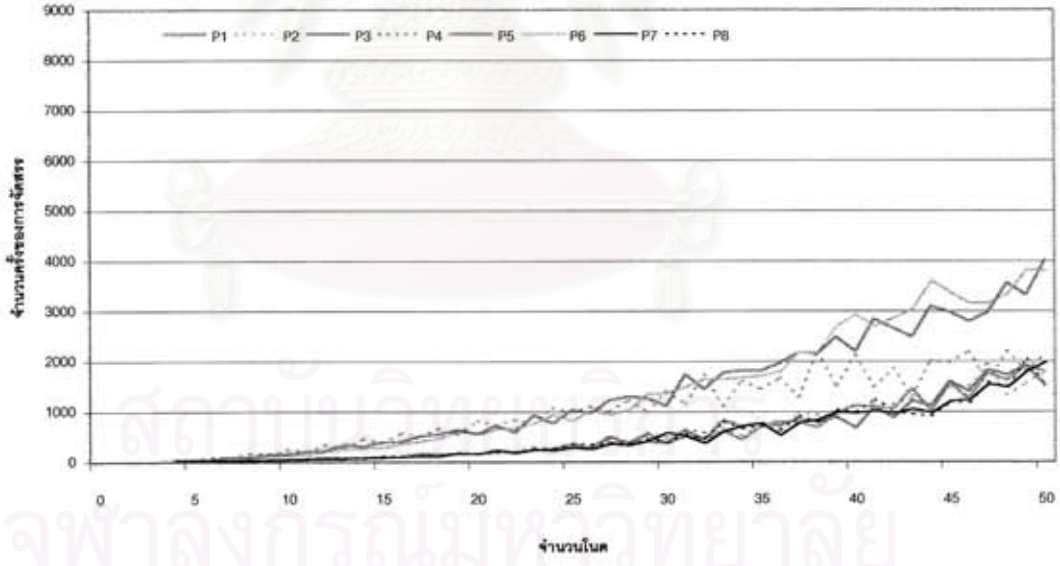
แม้ว่าการจัดสรรเส้นทางด้วยวิธี AP ของรูปแบบทราฟฟิก P4, P5, P6 สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้มาก แต่การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นไม่ได้สูงขึ้นมาก แสดงว่า ทราฟฟิกทั้งสามรูปแบบเหล่านี้ไม่สามารถจัดสรรให้เข้ากับโครงข่ายแบบวงแหวนอย่างเหมาะสมที่สุดซึ่งควรจะมีการต่อถึงกันโดยตรงเพิ่มขึ้นระหว่างคู่โนดที่ต้องการทราฟฟิกในปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับคู่โนดอื่น หรือ อาจแก้ไขโดยการเพิ่มช่องสัญญาณทราฟฟิกที่มีจำนวนฮ็อพไม่มากเข้าไปในโครงข่ายแล้วจำนวนความยาวคลื่นยังคงเท่าเดิมอยู่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่น

วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ AP มีจุดเด่นในการลดจำนวนความยาวคลื่น หากแต่เวลาที่ใช้ก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน การจัดสรรเส้นทางด้วยวิธี SP ต้องการการจัดสรรความยาวคลื่นในครั้งเดียวเพราะเส้นทางถูกกำหนดไว้หมดแล้ว ในขณะที่การจัดสรรเส้นทางด้วยวิธี AP ต้องการการจัดสรรความยาวคลื่นทุกครั้งที่มีการจัดสรรเส้นทางของช่องสัญญาณทราฟฟิกใหม่ จนกว่าไม่มีการจัดสรรเส้นทางอื่นที่เหมาะสมกว่า ดังนั้น เวลาที่ใช้จึงขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของการจัดสรรความยาวคลื่น จากกราฟรูปที่ 3.27 และ 3.28 ในทำนองเดียวกับการจัดสรรทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม จำนวนครั้งของการจัดสรรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้นเพราะจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกและจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ จำนวนครั้งของการจัดสรรแบบ NWC มีมากกว่าแบบ WC ประมาณเท่าตัว โดยที่รูปแบบทราฟฟิก P4, P5, P6 มีจำนวนครั้งของการจัดสรรมากกว่ารูปแบบอื่น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทดสอบของการจัดสรรเส้นทางแบบ AP ขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของการจัดสรรเป็นหลัก รวมทั้งแบบ NWC ใช้เวลาในการจัดสรรโครงข่ายเดียวกันมากกว่าแบบ WC อยู่แล้ว ดังนั้น การจัดสรรเส้นทางวิธี AP แบบ NWC จึงใช้เวลามากกว่าแบบ WC มาก โดยทราฟฟิกรูปแบบ P4, P5, P6 ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมงสำหรับหนึ่งโครงข่ายที่มีขนาด 40 โนด ในขณะที่แบบ WC ใช้เวลาประมาณ 15 นาทีเท่านั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.27 กราฟแสดงจำนวนครั้งของการจัดสรรวิธี AP/LPF แบบ NWC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ



รูปที่ 3.28 กราฟแสดงจำนวนครั้งของการจัดสรรวิธี AP/LPF แบบ WC ของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มทั้ง 8 รูปแบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายแบบเมช ในรูปแบบวงแหวนหลายวง

4.1 แนวความคิดพื้นฐาน

4.1.1 โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช

โครงข่ายโดยทั่วไปมักต่อถึงกันด้วยโครงสร้างแบบเมช มีการต่อถึงกันระหว่างโนดเป็นจำนวนมาก ทำให้มีหลากหลายเส้นทางในการติดต่อถึงกันของแต่ละคู่โนด ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ทั้งเส้นทางที่สั้นที่สุดหรือเส้นทางอื่นที่ยาวกว่าแต่อาจจะมีความคับคั่งน้อยกว่า เมื่อมีเส้นทางที่ต่อถึงกันระหว่างคู่โนดเป็นจำนวนมาก จึงมีจุดตัดของทราฟฟิกในแต่ละคู่โนดมากตามไปด้วย ทำให้ต้องสวิตช์เส้นทางด้วย cross-connect switch ซึ่งโครงข่ายที่ทำงานด้วยแสงทั้งหมดนี้ต้องใช้สวิตช์ที่ทำงานในรูปแบบของแสง (photonic switch) เพื่อจัดการให้วิถีแสงของแต่ละทราฟฟิกไปยังปลายทางที่ต้องการ

4.1.2 โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน

โครงข่ายส่งข้อมูลที่มีความจุสูงใช้สำหรับส่งข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ มีขนาดของโครงข่ายหรือมีจำนวนโนดไม่มากและส่งผ่านระยะทางค่อนข้างไกล มักต่อถึงกันเป็นแบบวงแหวน แต่ละโนดของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนมีการเชื่อมต่อระหว่าง 2 โนดข้างเคียงและมี 2 เส้นทางในการติดต่อถึงกันของแต่ละคู่โนด คือ ทิศตามเข็มนาฬิกา และ ทิศทวนเข็มนาฬิกา เนื่องจากมีแค่ 2 ทางเลือกของเส้นทางภายในโครงข่าย แต่ละโนดจึงมีอุปกรณ์เพียงแค่ตัวมัลติเพล็กซ์ (multiplexer) และตัวดีมัลติเพล็กซ์ (demultiplexer) เพื่อเชื่อมต่อรวม/แยกแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกระหว่างโนดโดยไม่จำเป็นต้องใช้ cross-connect switch

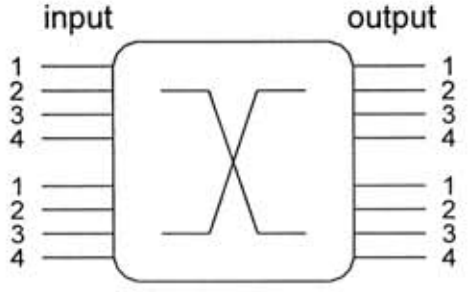
4.1.3 มูลเหตุในการแปลงโครงข่ายแบบเมชเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

แม้ว่าโครงข่ายแบบเมชมีความยืดหยุ่นในด้านทางเลือกของเส้นทางและมีความคล่องตัวของทราฟฟิกสูง แต่ก็ทำให้มีต้นทุนสูงเป็นเงาตามตัวจากราคาของสวิตช์แสงและต้นทุนจะมากยิ่งขึ้นถ้าโครงข่ายมีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของทราฟฟิกระหว่างเส้นทางหรือมีการเตรียมโครงข่ายสำรองสำหรับป้องกันโครงข่ายล่มในกรณีที่อุปกรณ์บางส่วนไม่ทำงานหรือทำงานผิดพลาด ในกรณีที่โครงข่ายล่ม เช่น การเชื่อมโยงขาดหรืออุปกรณ์ในโนดหนึ่งไม่สามารถใช้การได้ชั่วคราว โครงข่ายแบบเมชสามารถเลือกเส้นทางใหม่ของข่ายเชื่อมโยงที่มีปัญหาได้หลายเส้นทาง ในกระบวนการเหล่านี้ใช้ซอฟท์แวร์ช่วยในการเก็บฐานข้อมูลหรือส่งคำสั่งควบคุม ณ เวลา

ใด ๆ และคำนวณหาเส้นทางที่เหมาะสมของทราฟฟิกภายในข่ายเชื่อมโยงที่ใช้การไม่ได้หรือหาเส้นทางของทราฟฟิกใหม่หมดทั้งโครงข่าย ทั้งนี้ ต้องใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่ง (ขึ้นกับวิธีที่ใช้คำนวณ) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ไม่สามารถแก้ไขระบบที่ล่มให้กลับทำงานได้ตามปกติในเวลาอันรวดเร็วเมื่อต้องมีการจัดสรรเส้นทางใหม่อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ความเสียหายที่เกิดจากการทำงานที่ผิดพลาดของซอฟท์แวร์มีมากยิ่งกว่าการที่ฮาร์ดแวร์บางส่วนไม่ทำงานเสียอีกรวมทั้งใช้เวลาในการหาจุดบกพร่องและแก้ไขนานกว่าด้วย [10,11]

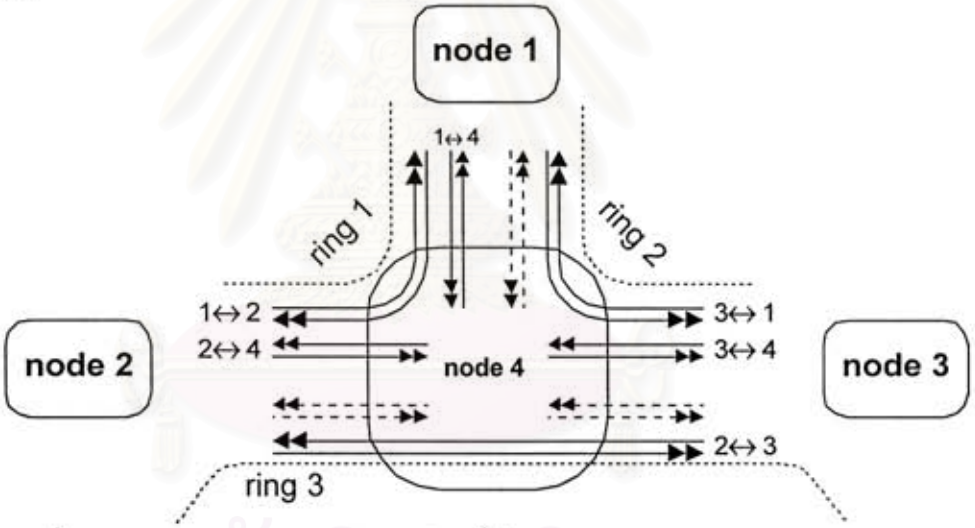
อย่างไรก็ตาม โครงข่ายแบบวงแหวนมีเส้นทางระหว่างคู่โนดที่ไม่ซับซ้อน จึงง่ายต่อการควบคุมและดูแลระบบ นอกจากนี้ เมื่อมีกิ่งเชื่อมหนึ่งขาดหรือโนดใดไม่ทำงานโดยที่มีโครงข่ายสำรอง โครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนสามารถเปลี่ยนเส้นทางของทราฟฟิกไปยังทิศตรงกันข้ามโดยอัตโนมัติ เพราะเมื่อเส้นทางหนึ่งของวงแหวนใช้การไม่ได้จึงเหลือเพียงเส้นทางเดียวในทิศตรงกันข้ามเท่านั้น ทำให้ระบบสามารถจัดการแก้ไขได้ทันท่วงที โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งซอฟท์แวร์ในการจัดการ ดังนั้น โครงข่ายแบบวงแหวนจึงเป็นทางเลือกของโครงข่ายที่ต้องการความไว้ใจได้สูงและมีความซับซ้อนไม่มาก

โครงข่ายสำหรับการใช้งานจริงต้องสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในเวลาปกติและเมื่อโครงข่ายมีปัญหา นอกจากนี้ ควรจะสามารถรองรับทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่ายโดยมีการเตรียมทรัพยากรของโครงข่ายด้วยความจุที่มีขนาดน้อยที่สุดเพื่อให้มีการใช้ประโยชน์ทรัพยากรได้เต็มความจุ แม้ว่าโครงข่ายแบบวงแหวนมีความไว้ใจได้สูงและไม่ซับซ้อน แต่วงแหวนเพียงวงเดียวต้องการความจุของโครงข่ายเพิ่มขึ้นมาก (ต้องใช้จำนวนความยาวคลื่นมาก) เมื่อเทียบกับโครงข่ายแบบเมช เพราะปริมาณเส้นทางที่จำกัดโดยเฉพาะในกรณีที่วงแหวนมีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม จากคุณสมบัติที่ดีในด้านการจัดการและการแก้ไขระบบเมื่อมีปัญหารวมทั้งความไม่ซับซ้อนของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนและเส้นทางที่มีทางเลือกมากกว่าของโครงข่ายแบบเมช จึงได้นำการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนมาประยุกต์ใช้จัดสรรกับโครงข่ายแบบเมช โดยกำเนิดโครงข่ายใหม่ทางกายภาพในรูปแบบของวงแหวนหลายวงซ้อนกันแทนรูปแบบเมชซึ่งทำให้สะดวกในการจัดการและไม่ต้องใช้สวิตช์ในการส่งทราฟฟิกในขณะที่ต้องการความจุและต้นทุนของโครงข่ายเพิ่มขึ้นในปริมาณที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 4.1 สวิตช์ภายในโนดที่มีจุดตัดของทราฟฟิกของโครงข่ายแบบเมช

ในโครงข่ายแบบเมช โนดหนึ่ง ๆ มีการเชื่อมโยงกับหลายโนดข้างเคียง ดังนั้น จึงมีจำนวนจุดตัดของทราฟฟิกที่โนดนั้นเป็นจำนวนมาก จำเป็นต้องใช้สวิตช์เพื่อจัดการส่งวิถีแสงของแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกนั้นผ่านโนดใด ๆ ไปยังโนดปลายทางของมันตามเส้นทางที่กำหนดไว้ได้ เมื่อระบบมีการส่งข้อมูลระหว่างคู่โนดทั้งสองทาง สวิตช์สำหรับแปลงเส้นทางจึงมีจำนวนพอร์ทเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าสำหรับทราฟฟิกขาไปและขากลับ รูปที่ 4.1 แสดงสวิตช์ของโครงข่ายขนาด 4 โนด ซึ่งใช้ในการสลับเส้นทางของทราฟฟิกจากโนดต่าง ๆ โดยแต่ละพอร์ทของฝั่งขาเข้าคือสัญญาณแสงหนึ่งความยาวคลื่นของแต่ละโนด ดังนั้น จำนวนสวิตช์จึงขึ้นอยู่กับจำนวนความยาวคลื่นที่รองรับได้ในเส้นใยแก้วนำแสงด้วย อย่างไรก็ตาม เพื่อไม่ให้รูปมีความยุ่งเหยิงมาก รูปที่ 4.1 จึงไม่ได้ครอบคลุมถึงส่วนของ add/drop (de)multiplexer (ADM) ซึ่งใช้ในการรวม/แยกสัญญาณแต่ละแสงสีกับสัญญาณแสงขาวที่ถูกเชื่อมต่อ (couple) ผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง ในกรณีที่โครงข่ายมีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทางของวิถีแสง ตัวแปลงผันความยาวคลื่นมักต่อกับพอร์ทด้านขาออกของสวิตช์เพื่อแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงก่อนรวมสัญญาณแสงแต่ละสีด้านขาออกเข้าสู่ตัวมัลติเพล็กซ์และส่งออกทางเส้นใยแก้วนำแสงต่อไป



รูปที่ 4.2 ช่องสัญญาณทราฟฟิก ณ โนดที่มีจุดตัดของทราฟฟิกจากวงแหวนหลายวง

เมื่อโครงข่ายแบบเมชถูกแปลงเป็นวงแหวนหลายวงที่ซ้อนกัน รูปที่ 4.2 เป็นโครงข่ายย่อยหนึ่งซึ่งแสดงลักษณะของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ถูกส่งผ่านโนดที่มีจุดตัดของทราฟฟิกจากวงแหวนหลายวง จากรูป โนด 4 มีวงแหวนผ่าน 3 วง คือ วงแหวน 1, 2 และ 3 ทุกกิ่งเชื่อมที่ต่อกับโนด 4 มีวงแหวนสองวงผ่านโดยซ้อนอยู่ในกิ่งเชื่อมเดียวกันนั้น เช่น วงแหวน 1 และ 2 ผ่านกิ่งเชื่อม 1-4 ทั้งสองวง เป็นต้น ทราฟฟิกที่มีเส้นทางผ่านโนด 1-4-2 ใช้เส้นทางผ่านวงแหวน 1, ทราฟฟิกที่มีเส้นทางผ่านโนด 1-4-3 ใช้เส้นทางผ่านวงแหวน 2, และทราฟฟิกที่มีเส้นทางผ่านโนด 2-4-3 ใช้เส้นทางผ่านวงแหวน 3 อย่างไรก็ตาม ทราฟฟิกที่ส่งจากโนด 4 หรือมีปลายทางที่โนด 4 ถูกส่งผ่านกิ่งเชื่อมที่ต่อถึงกันกับโนด 4 อาจใช้เส้นทางผ่านวงแหวนใดก็ได้จากทั้งหมด 2 วง โดยเส้นประดัง

แสดงในรูปที่ 4.2 หมายถึงทราฟฟิกที่อาจถูกส่งผ่านไปกับวงแหวนอีกวงหนึ่ง ทราฟฟิกที่ผ่านโนด 4 ถูกส่งตามเส้นทางผ่านวงแหวนที่ได้รับการกำหนดไว้ จึงไม่ต้องการสวิตช์ในการแปลงเส้นทาง ทำให้ต้นทุนของโครงข่ายลดลง ในรูปของกรณีของวงแหวนหลายวงนี้ ไม่ได้แสดงส่วนของ ADM เช่นเดียวกันกับรูปของโครงข่ายแบบเมชเพื่อไม่ให้รูปมีความซับซ้อนมากนัก อุปกรณ์ ADM ถูกต่ออยู่ตรงส่วนปลายก่อนเข้าหรือออกจากโนด 4 เพื่อรวม/แยกระหว่างสัญญาณแสงสีและสัญญาณแสงขาว (สัญญาณที่ถูกรวมและส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสง) ถ้าโครงข่ายมีความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่น สัญญาณแสงจากสวิตช์ด้านขาออกถูกส่งผ่านตัวแปลงผันความยาวคลื่นและส่งสัญญาณแสงที่ถูกแปลงผันความยาวคลื่นแล้วเข้าสู่ตัวมัลติเพล็กซ์เพื่อส่งออกทางเส้นใยแก้วนำแสงต่อไป

เส้นทางที่เป็นไปได้ของแต่ละคู่โนดในโครงข่ายแบบเมชมีจำนวนไม่แน่นอนและมีอย่างน้อยหนึ่งเส้นทางระหว่างคู่โนดเสมอ ดังนั้น โครงข่ายแบบเมชที่บางคู่โนดที่มีจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพียงหนึ่งเส้นทางเท่านั้นประกอบอยู่ไม่สามารถแปลงให้อยู่ในรูปแบบของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงทางกายภาพได้ทั้งหมดเพราะวงแหวนของทุกคู่โนดต้องการเส้นทางสองทิศทางเสมอ ลักษณะโครงข่ายในประเภทนี้คือมีบางคู่โนดที่ยื่นออกไปเป็นกิ่งหรือเป็นโครงข่ายที่เชื่อมต่อกันระหว่างโครงข่ายย่อยด้วยกิ่งเดียว ดังรูปที่ 4.3

(1) แบบที่มีกิ่งเดียวยื่นออกมา (2) โครงข่ายย่อยที่ต่อถึงกันด้วยกิ่งเดียว

รูปที่ 4.3 โครงข่ายแบบเมชที่ไม่สามารถจัดให้เป็นแบบวงแหวนหลายวงได้ทั้งหมด

บทนี้เสนอวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายแบบเมชโดยจัดการใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของวงแหวนหลายวงเพื่อศึกษาว่าความจุของโครงข่ายที่เป็นแบบวงแหวนหลายวงมีความจุเพิ่มขึ้นเท่าใดโดยให้มีการใช้ความจุเพียงพอกับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดอย่างคุ้มค่าที่สุดและมีต้นทุนต่ำที่สุดโดยใช้เวลาในการคำนวณหาผลตอบที่เหมาะสม ค่าของต้นทุนแปรผันตามความจุของโครงข่ายซึ่งความจุของโครงข่ายถูกกำหนดให้มีค่าเป็นผลรวมจำนวนความยาวคลื่นรวมทุกกิ่งเชื่อมของทุกวงแหวน ดังสมการที่ (4.1)

$$C = \sum_{i=1}^{R} N_i M_i \qquad (4.1)$$

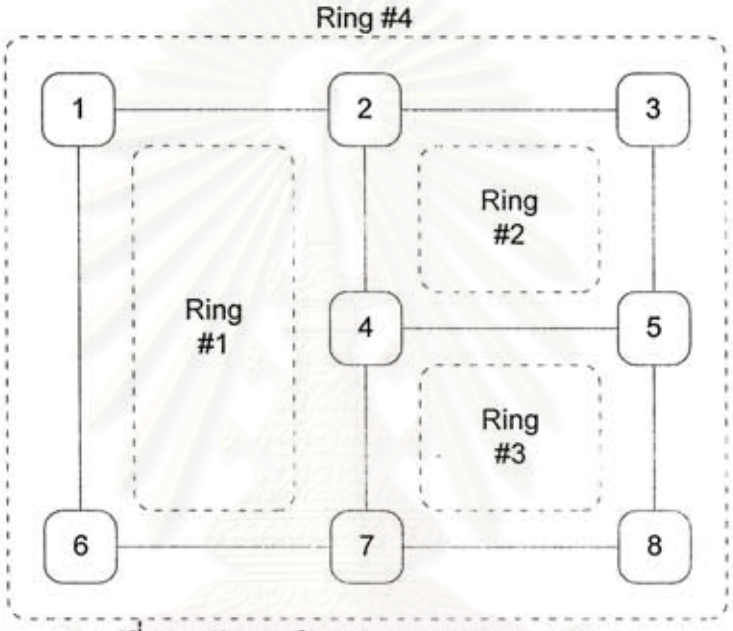
เมื่อ C คือ ความจุของโครงข่าย ใช้วัดปริมาณต้นทุนของโครงข่าย

R คือ จำนวนวงแหวนของโครงข่าย

N_i คือ จำนวนโนดหรือจำนวนกิ่งเชื่อมของวงแหวน i

M_i คือ จำนวนความยาวคลื่นของวงแหวน i

4.2 การแปลงโครงข่ายแบบเมชเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

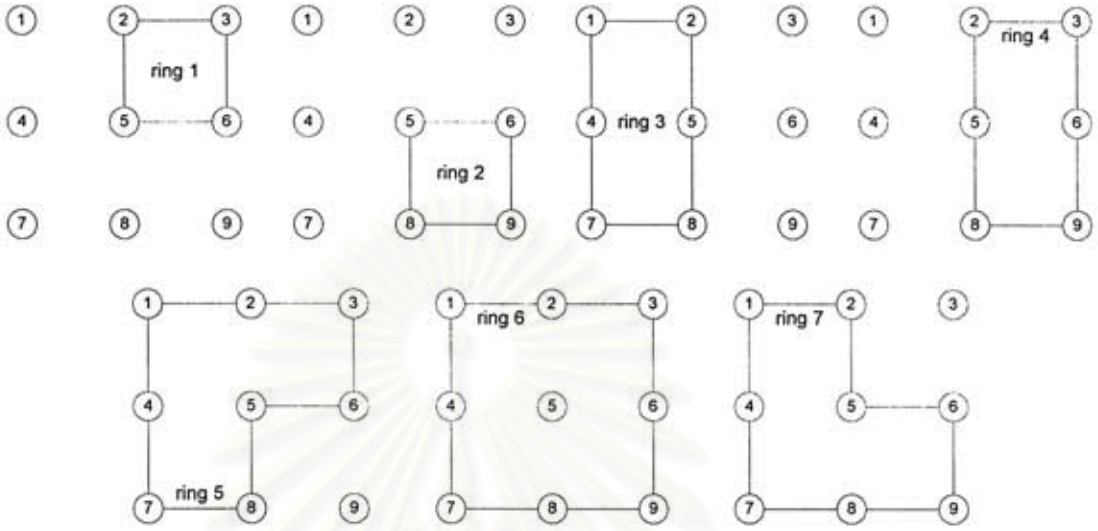


รูปที่ 4.4 ตัวอย่างโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง

รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างของโครงข่ายแบบเมชขนาด 9 โนด ประกอบด้วยวงแหวนจำนวน 4 วง ในกรณีที่อนุญาตให้ทราฟฟิกสามารถส่งผ่านข้ามวงแหวนได้ ทราฟฟิกจากโนด 3 ไปยังโนด 6 อาจใช้เส้นทางผ่านวงแหวน 2 แล้วเปลี่ยนเป็นวงแหวน 3 ที่โนด 2 หรือ 4 ซึ่งเป็นโนดร่วมระหว่างวงแหวน 2 และ 3 นอกจากนี้ ยังอาจสามารถส่งผ่านเส้นทางจากวงแหวน 2 ต่อด้วยวงแหวน 3 และ 1 ตามลำดับ ในขณะที่กรณีไม่อนุญาตให้ส่งทราฟฟิกข้ามวงแหวน ช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด 3-6 ต้องใช้เส้นทางผ่านวงแหวน 4 ซึ่งผ่านทั้งโนด 3 และ 6 อนึ่ง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแนวทางในการแปลงโดยกำหนดให้เส้นทางของแต่ละคู่โนดไม่มีการข้ามวงแหวนกันเท่านั้น

การจัดสรรเส้นทางของโครงข่ายแบบเมชซึ่งมีจำนวนเส้นทางในแต่ละคู่โนดเป็นจำนวนมาก ต้องหาเส้นทางระหว่างคู่โนดที่เป็นไปได้ทั้งหมดของทุกคู่โนดก่อน แล้วจึงจัดสรรเส้นทางให้คู่โนดใด ๆ ตามความเหมาะสมต่อไป ในทำนองเดียวกัน การแปลงโครงข่ายแบบเมชเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงต้องหาวงแหวนที่เป็นไปได้ในโครงข่ายทั้งหมดเสียก่อนเช่นกัน จากนั้นจึง

ตรวจดูว่าทุกเส้นทางของช่องสัญญาณทราฟฟิกใดสามารถผ่านวงแหวนใดได้บ้างหรือว่าไม่มีวงแหวนใดที่สามารถครอบคลุมเส้นทางนั้นได้ ตัวอย่างของโครงข่ายแบบเมชขนาด 9 โนดในรูปที่ 4.4 สามารถหาวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดของโครงข่ายในรูปที่ 4.4

หน้าถัดไปแสดงผลที่ได้จากโครงข่ายตัวอย่าง เมตริกซ์ในส่วนของ "traffic-topology" ซึกทแยงบนแสดงรูปลักษณ์ของโครงข่ายโดยมีค่าเป็น 1 เมื่อมีการต่อถึงกันโดยตรงระหว่างโนดในแนวแถว-คอลัมน์นั้นและมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่มีการต่อถึงกันโดยตรง ส่วนซึกทแยงล่างแสดงปริมาณช่องสัญญาณทราฟฟิกระหว่างคู่โนดนั้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 หมดทุกคู่โนดถ้าทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม ส่วนต่อจากนั้นแสดงวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่ายจำนวน 7 วงเรียงตามขนาดของวงแหวนจากวงที่มีขนาดเล็กสุดไปใหญ่สุดดังในรูปที่ 4.5 ส่วนที่เหลือแสดงเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดของทุกคู่โนดเรียงตามเส้นทางที่สั้นที่สุดไปยาวที่สุดโดยโครงข่ายขนาด 9 โนดมีจำนวนคู่โนดทั้งหมด 36 คู่โนดและบอกว่าเส้นทางใดผ่านวงแหวนใดบ้าง

สำหรับโครงข่ายแบบเมชที่แปลงเป็นรูปแบบวงแหวนหลายวง ในแต่ละคู่โนดมีเส้นทางระหว่างกันได้มากกว่าหนึ่งเส้นทาง แต่ละเส้นทางของแต่ละคู่โนดถูกตรวจสอบว่าสามารถผ่านวงแหวนใดได้บ้าง โดยบางเส้นทางอาจไม่สามารถผ่านวงแหวนใดได้เลย เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดในแต่ละคู่โนด จะสังเกตได้ว่าวงแหวนที่ครอบคลุมเส้นทางใดระหว่างคู่โนดนั้นจะต้องครอบคลุมอีกเส้นทางหนึ่งของคู่โนดนั้นเสมอ (วงแหวนเดียวกันครอบคลุมทั้งสองเส้นทาง) โดยถ้านำทั้งสองเส้นทางมาต่อเชื่อมกันก็จะกลายเป็นวงแหวนนั้นโดยปริยาย ดังตัวอย่างเช่น วงแหวน 3 (1-2-5-8-7-4-1) ของคู่โนด 1-2 ครอบคลุมทั้งเส้นทาง 1-2 และ 1-4-7-8-5-2 ซึ่งเมื่อนำทั้งสองเส้นทางมาต่อกันจะรวมกลายเป็นวงแหวน 3 ลักษณะเช่นนี้ตรงกับเจตนารมณ์ที่ต้องการนำข้อดีของวงแหวนซึ่งมีเพียงสองทิศทางมาประยุกต์ใช้

```
file : traf9.dat, nwc
     : n = 9
     : paths = 36

traffic-topology :
   0   1   0   1   0   0   0   0   0
   1   0   1   0   1   0   0   0   0
   1   1   0   0   0   1   0   0   0
   1   1   1   0   0   0   1   0   0
   1   1   1   1   0   1   0   1   0
   1   1   1   1   1   0   0   0   1
   1   1   1   1   1   1   0   1   0
   1   1   1   1   1   1   1   0   1
   1   1   1   1   1   1   1   1   0
rings :
 1:  2  3  6  5  2
 2:  5  6  9  8  5
 3:  1  2  5  8  7  4  1
 4:  2  3  6  9  8  5  2
 5:  1  2  3  6  5  8  7  4  1
 6:  1  2  3  6  9  8  7  4  1
 7:  1  2  5  6  9  8  7  4  1

PairNo 1 (1->2) :
   Route 1:  1  2  pass Rings :  3  5  6  7
   Route 2:  1  4  7  8  5  2  pass Rings :  3
   Route 3:  1  4  7  8  5  6  3  2  pass Rings :  5
   Route 4:  1  4  7  8  9  6  3  2  pass Rings :  6
   Route 5:  1  4  7  8  9  6  5  2  pass Rings :  7

PairNo 2 (1->3) :
   Route 1:  1  2  3  pass Rings :  5  6
   Route 2:  1  2  5  6  3  pass Rings :
   Route 3:  1  2  5  8  9  6  3  pass Rings :
   Route 4:  1  4  7  8  5  2  3  pass Rings :
   Route 5:  1  4  7  8  5  6  3  pass Rings :  5
   Route 6:  1  4  7  8  9  6  3  pass Rings :  6
   Route 7:  1  4  7  8  9  6  5  2  3  pass Rings :

PairNo 3 (1->4) :
   Route 1:  1  4  pass Rings :  3  5  6  7
   Route 2:  1  2  5  8  7  4  pass Rings :  3
   Route 3:  1  2  3  6  5  8  7  4  pass Rings :  5
   Route 4:  1  2  3  6  9  8  7  4  pass Rings :  6
   Route 5:  1  2  5  6  9  8  7  4  pass Rings :  7

PairNo 4 (1->5) :
   Route 1:  1  2  5  pass Rings :  3  7
   Route 2:  1  2  3  6  5  pass Rings :  5
   Route 3:  1  4  7  8  5  pass Rings :  3  5
   Route 4:  1  2  3  6  9  8  5  pass Rings :
   Route 5:  1  4  7  8  9  6  5  pass Rings :  7
   Route 6:  1  4  7  8  9  6  3  2  5  pass Rings :

PairNo 5 (1->6) :
   Route 1:  1  2  3  6  pass Rings :  5  6
   Route 2:  1  2  5  6  pass Rings :  7
   Route 3:  1  2  5  8  9  6  pass Rings :
   Route 4:  1  4  7  8  5  6  pass Rings :  5
   Route 5:  1  4  7  8  9  6  pass Rings :  6  7
   Route 6:  1  4  7  8  5  2  3  6  pass Rings :

PairNo 6 (1->7) :
   Route 1:  1  4  7  pass Rings :  3  5  6  7
   Route 2:  1  2  5  8  7  pass Rings :  3
   Route 3:  1  2  3  6  5  8  7  pass Rings :  5
   Route 4:  1  2  3  6  9  8  7  pass Rings :  6
   Route 5:  1  2  5  6  9  8  7  pass Rings :  7

PairNo 7 (1->8) :
   Route 1:  1  2  5  8  pass Rings :  3
   Route 2:  1  4  7  8  pass Rings :  3  5  6  7
   Route 3:  1  2  3  6  5  8  pass Rings :  5
   Route 4:  1  2  3  6  9  8  pass Rings :  6
   Route 5:  1  2  5  6  9  8  pass Rings :  7

PairNo 8 (1->9) :
   Route 1:  1  2  3  6  9  pass Rings :  6
   Route 2:  1  2  5  6  9  pass Rings :  7
   Route 3:  1  2  5  8  9  pass Rings :
   Route 4:  1  4  7  8  9  pass Rings :  6  7
   Route 5:  1  2  3  6  5  8  9  pass Rings :
   Route 6:  1  4  7  8  5  6  9  pass Rings :
   Route 7:  1  4  7  8  5  2  3  6  9  pass Rings :

PairNo 9 (2->3) :
   Route 1:  2  3  pass Rings :  1  4  5  6
   Route 2:  2  5  6  3  pass Rings :  1
   Route 3:  2  5  8  9  6  3  pass Rings :  4
   Route 4:  2  1  4  7  8  5  6  3  pass Rings :  5
   Route 5:  2  1  4  7  8  9  6  3  pass Rings :  6

PairNo 10 (2->4) :
   Route 1:  2  1  4  pass Rings :  3  5  6  7
   Route 2:  2  5  8  7  4  pass Rings :  3
   Route 3:  2  3  6  5  8  7  4  pass Rings :  5
   Route 4:  2  3  6  9  8  7  4  pass Rings :  6
   Route 5:  2  5  6  9  8  7  4  pass Rings :  7

PairNo 11 (2->5) :
   Route 1:  2  5  pass Rings :  1  3  4  7
   Route 2:  2  3  6  5  pass Rings :  1  5
   Route 3:  2  1  4  7  8  5  pass Rings :  3  5
   Route 4:  2  3  6  9  8  5  pass Rings :  4
   Route 5:  2  1  4  7  8  9  6  5  pass Rings :  7

PairNo 12 (2->6) :
   Route 1:  2  3  6  pass Rings :  1  4  5  6
   Route 2:  2  5  6  pass Rings :  1  7
   Route 3:  2  5  8  9  6  pass Rings :  4
   Route 4:  2  1  4  7  8  5  6  pass Rings :  5
   Route 5:  2  1  4  7  8  9  6  pass Rings :  6  7

PairNo 13 (2->7) :
   Route 1:  2  1  4  7  pass Rings :  3  5  6  7
   Route 2:  2  5  8  7  pass Rings :  3
   Route 3:  2  3  6  5  8  7  pass Rings :  5
   Route 4:  2  3  6  9  8  7  pass Rings :  6
   Route 5:  2  5  6  9  8  7  pass Rings :  7

PairNo 14 (2->8) : fuck
   Route 1:  2  5  8  pass Rings :  3  4
   Route 2:  2  1  4  7  8  pass Rings :  3  5  6  7
   Route 3:  2  3  6  5  8  pass Rings :  5
   Route 4:  2  3  6  9  8  pass Rings :  4  6
   Route 5:  2  5  6  9  8  pass Rings :  7

PairNo 15 (2->9) :
   Route 1:  2  3  6  9  pass Rings :  4  6
   Route 2:  2  5  6  9  pass Rings :  7
   Route 3:  2  5  8  9  pass Rings :  4
   Route 4:  2  1  4  7  8  9  pass Rings :  6  7
   Route 5:  2  3  6  5  8  9  pass Rings :
   Route 6:  2  1  4  7  8  5  6  9  pass Rings :

PairNo 16 (3->4) :
   Route 1:  3  2  1  4  pass Rings :  5  6
   Route 2:  3  2  5  8  7  4  pass Rings :
   Route 3:  3  6  5  2  1  4  pass Rings :
   Route 4:  3  6  5  8  7  4  pass Rings :  5
   Route 5:  3  6  9  8  7  4  pass Rings :  6
   Route 6:  3  2  5  6  9  8  7  4  pass Rings :
   Route 7:  3  6  9  8  5  2  1  4  pass Rings :
```

```
PairNo 17 (3->5) :
   Route 1:  3  2  5  pass Rings :  1  4
   Route 2:  3  6  5  pass Rings :  1  5
   Route 3:  3  6  9  8  5  pass Rings :  4
   Route 4:  3  2  1  4  7  8  5  pass Rings :  5
   Route 5:  3  2  1  4  7  8  9  6  5  pass Rings :
   Route 6:  3  6  9  8  7  4  1  2  5  pass Rings :

PairNo 18 (3->6) :
   Route 1:  3  6  pass Rings :  1  4  5  6
   Route 2:  3  2  5  6  pass Rings :  1
   Route 3:  3  2  5  8  9  6  pass Rings :  4
   Route 4:  3  2  1  4  7  8  5  6  pass Rings :  5
   Route 5:  3  2  1  4  7  8  9  6  pass Rings :  6

PairNo 19 (3->7) :
   Route 1:  3  2  1  4  7  pass Rings :  5  6
   Route 2:  3  2  5  8  7  pass Rings :
   Route 3:  3  6  5  8  7  pass Rings :  5
   Route 4:  3  6  9  8  7  pass Rings :  6
   Route 5:  3  2  5  6  9  8  7  pass Rings :
   Route 6:  3  6  5  2  1  4  7  pass Rings :
   Route 7:  3  6  9  8  5  2  1  4  7  pass Rings :

PairNo 20 (3->8) :
   Route 1:  3  2  5  8  pass Rings :  4
   Route 2:  3  6  5  8  pass Rings :  5
   Route 3:  3  6  9  8  pass Rings :  4  6
   Route 4:  3  2  1  4  7  8  pass Rings :  5  6
   Route 5:  3  2  5  6  9  8  pass Rings :
   Route 6:  3  6  5  2  1  4  7  8  pass Rings :

PairNo 21 (3->9) :
   Route 1:  3  6  9  pass Rings :  4  6
   Route 2:  3  2  5  6  9  pass Rings :
   Route 3:  3  2  5  8  9  pass Rings :  4
   Route 4:  3  6  5  8  9  pass Rings :
   Route 5:  3  2  1  4  7  8  9  pass Rings :  6
   Route 6:  3  2  1  4  7  8  5  6  9  pass Rings :
   Route 7:  3  6  5  2  1  4  7  8  9  pass Rings :

PairNo 22 (4->5) :
   Route 1:  4  1  2  5  pass Rings :  3  7
   Route 2:  4  7  8  5  pass Rings :  3  5
   Route 3:  4  1  2  3  6  5  pass Rings :  5
   Route 4:  4  7  8  9  6  5  pass Rings :  7
   Route 5:  4  1  2  3  6  9  8  5  pass Rings :
   Route 6:  4  7  8  9  6  3  2  5  pass Rings :


PairNo 23 (4->6) :
   Route 1:  4  1  2  3  6  pass Rings :  5  6
   Route 2:  4  1  2  5  6  pass Rings :  7
   Route 3:  4  7  8  5  6  pass Rings :  5
   Route 4:  4  7  8  9  6  pass Rings :  6  7
   Route 5:  4  1  2  5  8  9  6  pass Rings :
   Route 6:  4  7  8  5  2  3  6  pass Rings :

PairNo 24 (4->7) :
   Route 1:  4  7  pass Rings :  3  5  6  7
   Route 2:  4  1  2  5  8  7  pass Rings :  3
   Route 3:  4  1  2  3  6  5  8  7  pass Rings :  5
   Route 4:  4  1  2  3  6  9  8  7  pass Rings :  6
   Route 5:  4  1  2  5  6  9  8  7  pass Rings :  7

PairNo 25 (4->8) :
   Route 1:  4  7  8  pass Rings :  3  5  6  7
   Route 2:  4  1  2  5  8  pass Rings :  3
   Route 3:  4  1  2  3  6  5  8  pass Rings :  5
   Route 4:  4  1  2  3  6  9  8  pass Rings :  6
   Route 5:  4  1  2  5  6  9  8  pass Rings :  7

PairNo 26 (4->9) :
   Route 1:  4  7  8  9  pass Rings :  6  7
   Route 2:  4  1  2  3  6  9  pass Rings :  6
   Route 3:  4  1  2  5  6  9  pass Rings :  7
   Route 4:  4  1  2  5  8  9  pass Rings :
   Route 5:  4  7  8  5  6  9  pass Rings :
   Route 6:  4  1  2  3  6  5  8  9  pass Rings :
   Route 7:  4  7  8  5  2  3  6  9  pass Rings :

PairNo 27 (5->6) :
   Route 1:  5  6  pass Rings :  1  2  5  7
   Route 2:  5  2  3  6  pass Rings :  1  4
   Route 3:  5  8  9  6  pass Rings :  2  4
   Route 4:  5  2  1  4  7  8  9  6  pass Rings :  7
   Route 5:  5  8  7  4  1  2  3  6  pass Rings :  5

PairNo 28 (5->7) :
   Route 1:  5  8  7  pass Rings :  3  5
   Route 2:  5  2  1  4  7  pass Rings :  3  7
   Route 3:  5  6  9  8  7  pass Rings :  7
   Route 4:  5  2  3  6  9  8  7  pass Rings :
   Route 5:  5  6  3  2  1  4  7  pass Rings :  5
   Route 6:  5  8  9  6  3  2  1  4  7  pass Rings :

PairNo 29 (5->8) :
   Route 1:  5  8  pass Rings :  2  3  4  5
   Route 2:  5  6  9  8  pass Rings :  2  7
   Route 3:  5  2  1  4  7  8  pass Rings :  3  7
   Route 4:  5  2  3  6  9  8  pass Rings :  4
   Route 5:  5  6  3  2  1  4  7  8  pass Rings :  5

PairNo 30 (5->9) :
   Route 1:  5  6  9  pass Rings :  2  7
   Route 2:  5  8  9  pass Rings :  2  4
   Route 3:  5  2  3  6  9  pass Rings :  4
   Route 4:  5  2  1  4  7  8  9  pass Rings :  7
   Route 5:  5  6  3  2  1  4  7  8  9  pass Rings :
   Route 6:  5  8  7  4  1  2  3  6  9  pass Rings :

PairNo 31 (6->7) :
   Route 1:  6  5  8  7  pass Rings :  5
   Route 2:  6  9  8  7  pass Rings :  6  7
   Route 3:  6  3  2  1  4  7  pass Rings :  5  6
   Route 4:  6  3  2  5  8  7  pass Rings :
   Route 5:  6  5  2  1  4  7  pass Rings :  7
   Route 6:  6  9  8  5  2  1  4  7  pass Rings :

PairNo 32 (6->8) :
   Route 1:  6  5  8  pass Rings :  2  5
   Route 2:  6  9  8  pass Rings :  2  4  6  7
   Route 3:  6  3  2  5  8  pass Rings :  4
   Route 4:  6  3  2  1  4  7  8  pass Rings :  5  6
   Route 5:  6  5  2  1  4  7  8  pass Rings :  7

PairNo 33 (6->9) :
   Route 1:  6  9  pass Rings :  2  4  6  7
   Route 2:  6  5  8  9  pass Rings :  2
   Route 3:  6  3  2  5  8  9  pass Rings :  4
   Route 4:  6  3  2  1  4  7  8  9  pass Rings :  6
   Route 5:  6  5  2  1  4  7  8  9  pass Rings :  7

PairNo 34 (7->8) :
   Route 1:  7  8  pass Rings :  3  5  6  7
   Route 2:  7  4  1  2  5  8  pass Rings :  3
   Route 3:  7  4  1  2  3  6  5  8  pass Rings :  5
   Route 4:  7  4  1  2  3  6  9  8  pass Rings :  6
   Route 5:  7  4  1  2  5  6  9  8  pass Rings :  7

PairNo 35 (7->9) :
   Route 1:  7  8  9  pass Rings :  6  7
   Route 2:  7  8  5  6  9  pass Rings :
   Route 3:  7  4  1  2  3  6  9  pass Rings :  6
   Route 4:  7  4  1  2  5  6  9  pass Rings :  7
   Route 5:  7  4  1  2  5  8  9  pass Rings :
   Route 6:  7  8  5  2  3  6  9  pass Rings :
   Route 7:  7  4  1  2  3  6  5  8  9  pass Rings :

PairNo 36 (8->9) :
   Route 1:  8  9  pass Rings :  2  4  6  7
   Route 2:  8  5  6  9  pass Rings :  2
   Route 3:  8  5  2  3  6  9  pass Rings :  4
   Route 4:  8  7  4  1  2  3  6  9  pass Rings :  6
   Route 5:  8  7  4  1  2  5  6  9  pass Rings :  7
```

การแปลงโครงข่ายแบบเมชให้เป็นแบบวงแหวนหลายวงมีปัญหาหลักคือการจัดสรรวงแหวนให้กับแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิก โดยมีตัวแปรอื่นที่ศึกษาเช่นเดียวกันกับกรณีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของวงแหวนเดี่ยวในบทที่ 3 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกในแต่ละคู่โนดของแต่ละวงแหวนใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน (AP) และจัดสรรความยาวคลื่นโดยให้วิถีแสงของช่องสัญญาณทราฟฟิกที่มีจำนวนฮ็อพมากที่สุดได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นก่อนเสมอ (LPF) เพราะวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นดังกล่าวเป็นวิธีที่ทำให้ใช้จำนวนความยาวคลื่นภายในโครงข่ายวงแหวนเดี่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

การจัดสรรวงแหวนให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

1. ไม่กระจายทราฟฟิก - ทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนดเดียวกันใช้วงแหวนเดียวกัน
2. กระจายทราฟฟิก - แต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนดเดียวกันสามารถกระจายไปยังวงแหวนใดก็ได้ที่ครอบคลุมเส้นทางระหว่างคู่โนดนั้นโดยไม่จำเป็นต้องใช้วงแหวนเดียวกัน

ภายหลังจากการรวบรวมข้อมูลว่าทุกเส้นทางของทุกคู่โนดมีวงแหวนใดผ่านบ้างแล้ว ในการจัดสรรวงแหวนให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนดใด ๆ จึงต้องตรวจสอบว่าในแต่ละคู่โนดมีวงแหวนที่ครอบคลุมเส้นทางที่ผ่านคู่โนดนั้นได้เป็นจำนวนกี่วง ดังตัวอย่างในคู่โนดที่ 1 (จากโนด 1 ไปยังโนด 2) มีทั้งหมด 5 เส้นทาง โดยสามารถเลือกผ่านวงแหวนได้ 4 วงคือ วงแหวนที่ 3,5,6,7 คู่โนดนี้จึงมีวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4 วิธี แม้ว่าทุกวงแหวนจะมีเส้นทางที่เป็นไปได้สองทิศทาง แต่เส้นทางที่ผ่านวงแหวนทั้งหมดจะถูกนับเป็น 4 วิธี เพราะการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของทุกวงแหวนนั้นใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบไม่จำกัดให้ใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด ดังนั้น เส้นทางที่ยาวกว่าของแต่ละคู่โนดจึงถูกพิจารณาในกระบวนการจัดสรรความยาวคลื่นของวงแหวนเดี่ยวแต่ละวงอยู่แล้ว

วงแหวนทั้งหมดของแต่ละคู่โนดมีการเรียงลำดับตามความสำคัญของเลขอันดับของวงแหวนเพื่อให้โปรแกรมที่ใช้ในการจัดสรรวงแหวนสามารถอ้างอิงได้ ดังนี้

1. เรียงตามจำนวนฮ็อพของเส้นทางจากเส้นทางที่สั้นที่สุดก่อน
2. ถ้าเส้นทางมีจำนวนฮ็อพเท่ากัน ให้เรียงตามขนาดของวงแหวน

ทั้งนี้ เลขอันดับของวงแหวนไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของวงแหวนเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นทางเป็นหลัก หากแต่ถ้าเส้นทางเดียวกันมีวงแหวนหลายวงผ่าน ให้วงแหวนที่มีขนาดเล็กกว่ามีความสำคัญมากกว่า โดยวงแหวนที่เรียงตามลำดับความสำคัญของแต่ละคู่โนดแล้วของโครงข่ายตัวอย่างขนาด 9 โนดดังรูปที่ 4.4 ถูกแสดงในหน้าถัดไป

```
file : traf9.dat, nwc
     : n = 9
     : paths = 36

PairNo 1 (1->2) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 5
   3.  Route 1, Ring 6
   4.  Route 1, Ring 7

PairNo 2 (1->3) :
   1.  Route 1, Ring 5
   2.  Route 1, Ring 6

PairNo 3 (1->4) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 5
   3.  Route 1, Ring 6
   4.  Route 1, Ring 7

PairNo 4 (1->5) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 7
   3.  Route 2, Ring 5

PairNo 5 (1->6) :
   1.  Route 1, Ring 5
   2.  Route 1, Ring 6
   3.  Route 2, Ring 7

PairNo 6 (1->7) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 5
   3.  Route 1, Ring 6
   4.  Route 1, Ring 7

PairNo 7 (1->8) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 2, Ring 5
   3.  Route 2, Ring 6
   4.  Route 2, Ring 7

PairNo 8 (1->9) :
   1.  Route 1, Ring 6
   2.  Route 2, Ring 7

PairNo 9 (2->3) :
   1.  Route 1, Ring 1
   2.  Route 1, Ring 4
   3.  Route 1, Ring 5
   4.  Route 1, Ring 6

PairNo 10 (2->4) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 5
   3.  Route 1, Ring 6
   4.  Route 1, Ring 7

PairNo 11 (2->5) :
   1.  Route 1, Ring 1
   2.  Route 1, Ring 3
   3.  Route 1, Ring 4
   4.  Route 1, Ring 7
   5.  Route 2, Ring 5

PairNo 12 (2->6) :
   1.  Route 1, Ring 1
   2.  Route 1, Ring 4
   3.  Route 1, Ring 5
   4.  Route 1, Ring 6
   5.  Route 2, Ring 7

PairNo 13 (2->7) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 5
   3.  Route 1, Ring 6
   4.  Route 1, Ring 7

PairNo 14 (2->8) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 4
   3.  Route 2, Ring 5
   4.  Route 2, Ring 6
   5.  Route 2, Ring 7

PairNo 15 (2->9) :
   1.  Route 1, Ring 4
   2.  Route 1, Ring 6
   3.  Route 2, Ring 7

PairNo 16 (3->4) :
   1.  Route 1, Ring 5
   2.  Route 1, Ring 6

PairNo 17 (3->5) :
   1.  Route 1, Ring 1
   2.  Route 1, Ring 4
   3.  Route 2, Ring 5

PairNo 18 (3->6) :
   1.  Route 1, Ring 1
   2.  Route 1, Ring 4
   3.  Route 1, Ring 5
   4.  Route 1, Ring 6

PairNo 19 (3->7) :
   1.  Route 1, Ring 5
   2.  Route 1, Ring 6

PairNo 20 (3->8) :
   1.  Route 1, Ring 4
   2.  Route 2, Ring 5
   3.  Route 3, Ring 6

PairNo 21 (3->9) :
   1.  Route 1, Ring 4
   2.  Route 1, Ring 6

PairNo 22 (4->5) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 7
   3.  Route 2, Ring 5

PairNo 23 (4->6) :
   1.  Route 1, Ring 5
   2.  Route 1, Ring 6
   3.  Route 2, Ring 7

PairNo 24 (4->7) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 5
   3.  Route 1, Ring 6
   4.  Route 1, Ring 7

PairNo 25 (4->8) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 5
   3.  Route 1, Ring 6
   4.  Route 1, Ring 7

PairNo 26 (4->9) :
   1.  Route 1, Ring 6
   2.  Route 1, Ring 7

PairNo 27 (5->6) :
   1.  Route 1, Ring 1
   2.  Route 1, Ring 2
   3.  Route 1, Ring 5
   4.  Route 1, Ring 7
   5.  Route 2, Ring 4

PairNo 28 (5->7) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 5
   3.  Route 2, Ring 7

PairNo 29 (5->8) :
   1.  Route 1, Ring 2
   2.  Route 1, Ring 3
   3.  Route 1, Ring 4
   4.  Route 1, Ring 5
   5.  Route 2, Ring 7

PairNo 30 (5->9) :
   1.  Route 1, Ring 2
   2.  Route 1, Ring 7
   3.  Route 2, Ring 4

PairNo 31 (6->7) :
   1.  Route 1, Ring 5
   2.  Route 2, Ring 6
   3.  Route 2, Ring 7

PairNo 32 (6->8) :
   1.  Route 1, Ring 2
   2.  Route 1, Ring 5
   3.  Route 2, Ring 4
   4.  Route 2, Ring 6
   5.  Route 2, Ring 7

PairNo 33 (6->9) :
   1.  Route 1, Ring 2
   2.  Route 1, Ring 4
   3.  Route 1, Ring 6
   4.  Route 1, Ring 7

PairNo 34 (7->8) :
   1.  Route 1, Ring 3
   2.  Route 1, Ring 5
   3.  Route 1, Ring 6
   4.  Route 1, Ring 7

PairNo 35 (7->9) :
   1.  Route 1, Ring 6
   2.  Route 1, Ring 7

PairNo 36 (8->9) :
   1.  Route 1, Ring 2
   2.  Route 1, Ring 4
   3.  Route 1, Ring 6
   4.  Route 1, Ring 7
```

เมื่อสังเกตเลขอันดับของวงแหวนจากน้อยไปมากของแต่ละคู่โนด พบว่ามักจะเรียงลำดับตามขนาดของวงแหวนจากน้อยไปมาก แต่มีบางคู่โนดที่ไม่เป็นไปตามนั้น เช่น คู่โนดที่ 27 ระหว่างโนด 5-6 วงแหวนในอันดับที่ 5 คือ วงแหวน 4 (2-3-6-9-8-5-2) ซึ่งมีขนาด 6 โนดเล็กกว่าวงแหวนในอันดับที่ 4 คือ วงแหวน 7 (1-2-5-6-9-8-7-4-1) ที่มีขนาด 8 โนด ทั้งนี้ เส้นทางที่ 2 ของคู่โนด 27 (5-2-3-6) ซึ่งผ่านวงแหวน 4 ในด้านที่สั้นกว่า มีจำนวน 3 ฮ็อพ ในขณะที่เส้นทางที่ 1 ของคู่โนด 27 (5-6) มีจำนวน 1 ฮ็อพ ดังนั้น จึงกำหนดให้วงแหวน 7 มีความสำคัญมากกว่าแม้ว่าจะมีขนาดของวงแหวนมากกว่าก็ตาม

ผลตอบของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของทุกวงแหวนมีค่าเป็นความจุของโครงข่ายดังในสมการ (4.1) วิธีการจัดสรรวงแหวนให้กับแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกที่นำเสนอได้แก่ วิธี exhaustive search, genetic algorithm และ heuristic algorithm จะถูกกล่าวถึงต่อไป

4.3 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี exhaustive search

$$y_i = f(X_i) = f(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, ..., x_{ni}) \quad (4.2)$$

สมการ (4.2) แสดงค่าของฟังก์ชัน y_i จากอินพุต X_i ในแต่ละกรณี i อินพุต X_i ประกอบด้วย n สมาชิก คือ $x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \ldots, x_{ni}$ วิธีการ exhaustive search เป็นวิธีการหาผลตอบโดยรวบรวมอินพุต X_i ทุกกรณีที่เป็นไปได้ทั้งหมดมาหาค่าของฟังก์ชันแล้วเลือกกรณี X_i ที่ให้ค่าของฟังก์ชัน y_i ที่ดีที่สุดเป็นผลตอบ

เมื่อทราบว่าแต่ละคู่โนดสามารถเลือกส่งทราฟฟิกผ่านวงแหวนเป็นจำนวนทั้งหมดกี่วงและส่งผ่านวงแหวนใดได้บ้างแล้ว ในการจัดสรรวงแหวนให้กับทุกช่องสัญญาณทราฟฟิก สามารถแบ่งออกตามความสัมพันธ์ระหว่างช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนดกับวงแหวนที่เลือกดังที่กล่าวมาแล้ว คือ

1. ไม่กระจายทราฟฟิก

วิธีนี้มีจำนวนอินพุตทั้งหมดไม่มากนักเมื่อเทียบกับแบบกระจายทราฟฟิก โดยในแต่ละอินพุต X_i มีจำนวนตัวแปรสมาชิก P เท่ากับจำนวนคู่โนดทั้งหมดของโครงข่ายลบด้วยจำนวนคู่โนดที่ไม่ต้องการทราฟฟิก เช่น โครงข่ายขนาด 9 โนดและมี 2 คู่โนดที่ไม่ต้องการทราฟฟิก มีจำนวน P = 36-2 = 34 สมาชิกของ X_i คือ $x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \ldots, x_{34i}$ นอกจากนี้ จำนวนกรณีของ X_i ทั้งหมดเท่ากับ $\prod_{j=1}^{P} R_j$ เมื่อ R_j คือ จำนวนวงแหวนที่ครอบคลุมเส้นทางที่ผ่านคู่โนด j

2. กระจายทราฟฟิก

วิธีนี้แต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกมีความเป็นอิสระในการเลือกวงแหวนของตนเอง โดยแต่ละอินพุต X_i มีจำนวนตัวแปรสมาชิกเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกของทุกคู่โนดรวมกัน ดังนั้น $P = \sum_{k=1}^{N(N-1)/2} T_k$ เมื่อ N คือ จำนวนโนด และ T_k คือ จำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนด k นอกจากนี้ จำนวนกรณีของ X_i ทั้งหมดเท่ากับ $\prod_{k=1}^{N(N-1)/2} R_k^{T_k}$ เมื่อ R_k คือ จำนวนวงแหวนที่ครอบคลุมเส้นทางที่ผ่านคู่โนด k

วิธีการจัดสรรวงแหวนให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกแบบ exhaustive search นี้ทำให้สามารถหาผลตอบได้โดยไม่ต้องมีความรู้ว่าการจัดสรรวงแหวนแบบใดให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกลักษณะใดมีผลอย่างไรกับความจุโดยรวมของโครงข่าย วิธีนี้เป็นการหาผลตอบจากทุกกรณีของการจัดสรรวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมด ดังนั้น ผลตอบเป็นความจุของโครงข่ายที่ได้จึงเป็นผลตอบที่ดีที่สุดหรือมีค่าน้อยที่สุดซึ่งสามารถรองรับทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่ายได้ แต่ถ้าโครงข่ายแบบเมชนี้มีขนาดใหญ่และมีปริมาณทราฟฟิกมาก จำนวนกรณีของอินพุตหรือชุดเส้นทางและวงแหวนที่เป็นไปได้ของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกจะมีจำนวนมากมายมหาศาลจนไม่สามารถหาคำตอบได้ภายในเวลาที่เหมาะสมและต้องใช้วิธีอื่นที่ใช้เวลาไม่มากนักและให้ผลลัพธ์ที่ดีได้แทน

4.4 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี genetic algorithm

4.4.1 กระบวนการ genetic algorithm

กระบวนการ genetic algorithm (GA) เป็นกระบวนการทำให้เหมาะที่สุด (optimization) ในการแก้ไขปัญหาโดยการทำซ้ำจนกว่าจะค้นพบผลตอบที่ดีที่สุดตามที่ต้องการ คิดค้นโดย Goldberg [12] โดยจำลองแบบมาจากการถ่ายทอดพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตซึ่งมีโครโมโซมเป็นโครงสร้างในนิวเคลียสของเซลล์ ภายในโครโมโซมประกอบด้วยหน่วยพันธุกรรมที่เล็กที่สุดคือ ยีน (gene) มีหน้าที่ในการแสดงลักษณะทางพันธุกรรมและกำหนดคุณลักษณะของสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ

กำหนดให้ "ประชากร" $P(t) = \{x_1(t),x_2(t),x_3(t),\ldots,x_N(t)\}$ โดย x คือ "โครงสร้าง" หรือ "โครโมโซม" ที่เป็นตัวแสดงลักษณะและให้ค่าผลตอบของ objective function f(x) และ P(t) คือกลุ่มของโครงสร้างทั้งหมดที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มหรือประชากร ทุก ๆ โครงสร้าง x_i ของประชากร P ในกระบวนการ GA คือ เวกเตอร์ในรูปแบบ binary string หรือ bit string ที่มีความยาว L (โครโมโซมที่ประกอบด้วยยีนจำนวนหนึ่ง) และเป็นเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่แทนในฟังก์ชัน f(x) โดยที่ GA จะไม่สนใจความหมายของเวกเตอร์โครงสร้างที่แทนในฟังก์ชัน f(x) ทุกโครงสร้างของ P(t) จะถูกคำนวณค่าของฟังก์ชันและคัดเลือกกลุ่มประชากรใหม่โดยการแปลงลักษณะโครงสร้างของประชากรรุ่นเดิม ลักษณะการแปลงโครงสร้างจากกลุ่มประชากรเดิมให้เป็นกลุ่มประชากรใหม่นี้ขึ้นอยู่กับค่าของฟังก์ชันของโครงสร้างเดิมที่ได้คำนวณไว้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ประชากรรุ่นใหม่มีลักษณะโครงสร้างที่หลากหลาย แตกต่างไปจากเดิมและสามารถให้ค่าของฟังก์ชันโดยรวมที่ดีกว่าหรือใกล้เคียงกับรุ่นเดิมได้ กลุ่มประชากรในแต่ละครั้งที่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่จะเรียกว่า รุ่นของประชากร หรือ generation กระบวนการ GA จะสิ้นสุดลงเมื่อค่าเฉลี่ยของค่าของฟังก์ชันที่ได้ของโครงสร้างในกลุ่มประชากรใหม่มีค่าใกล้เคียงกันมากกับของกลุ่มประชากรเดิม หรือ กลุ่มประชากรรุ่นใหม่มีลักษณะโครงสร้างที่ใกล้เคียงกันกับรุ่นเดิมมาก

การทำงานของ GA สามารถแสดงตามแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.6 แผนภาพการทำงานของกระบวนการ GA

กระบวนการ GA มีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของแผนภาพดังต่อไปนี้

1. Representation

เป็นการแปลงปัญหาที่ต้องการหาผลตอบให้อยู่ในรูปแบบที่จะแก้ไขปัญหาด้วย GA โดยแบ่งการแทนสเปซการค้นหา (search space) ของปัญหาได้ 3 ระดับ คือ

1.1 ระดับล่างสุด มีโครงสร้างแบบ packed ทำให้มีสเปซการค้นหาและประสิทธิภาพของการใช้เวลามากที่สุดในการจัดการกับโครงสร้างของประชากร โดยทั่วไป ผู้ใช้จะไม่ได้ติดต่อกับระดับนี้โดยตรง (โปรแกรมที่ใช้จะจัดการในส่วนนี้)

1.2 การแทนค่าในรูปแบบสายอักขระคือการแทนโครงสร้างทางพันธุกรรมหรือโครโมโซมด้วยสายอักขระที่ลงท้ายด้วย null เช่น "1011011" ระดับนี้ใช้กับผู้ใช้โดยตรง โดยมากใช้กับปัญหาที่ไม่เป็นเชิงตัวเลข

1.3 การแทนค่าในรูปแบบของค่าจำนวนจริง (floating point) เหมาะสำหรับการแก้ปัญหาที่เป็นเชิงตัวเลข แทนโครงสร้างทางพันธุกรรมด้วยเวกเตอร์ของเลขจำนวนจริง โดยกำหนดช่วงของค่าจำนวนจริงและความละเอียดในการแบ่งช่วงเหล่านั้น

2. Initialization

เป็นการเริ่มต้นประชากร P(0) จากโครงสร้างที่เป็นไปได้ทั้งหมดในสเปซการค้นหา โดยต้องกำหนดขนาดของประชากรก่อนว่ามีขนาดเท่าใดหรือมีสมาชิกของโครงสร้างเป็นจำนวนเท่าใด ซึ่งมีวิธีการเลือกกลุ่มของโครงสร้างประชากรเริ่มต้น 2 วิธี คือ

2.1 โดยการสุ่ม ด้วย seed ค่าใด ๆ วิธีนี้ไม่เจาะจงว่ากลุ่มของโครงสร้างของประชากรเริ่มต้นมีลักษณะเป็นอย่างไร มีข้อดีคือประชากรเริ่มต้นมีความหลากหลายซึ่งทำให้โครงสร้างที่ถูกเลือกมีความคละเคล้าหรือทั่วถึงมากกว่า แต่เสียเวลาที่ใช้ในการหาผลตอบที่ต้องการนานมากกว่า โดยทั่วไป มักกำหนดกลุ่มของประชากรเริ่มต้นด้วยวิธีนี้ถ้าสเปซการค้นหามีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป

2.2 โดยการกำหนดประชากรเริ่มต้นด้วยตนเองทั้งหมดหรือเป็นบางส่วน โดยเลือกโครงสร้างเริ่มต้นที่มีแนวโน้มว่ามีสมรรถนะสูงหรือให้ค่าของฟังก์ชันที่ดีได้และเรียกโครงสร้างเหล่านี้ว่า super individuals ผู้กำหนดจะต้องผ่านการศึกษาปัญหานั้น ๆ มากพอสมควรจนสามารถคาดหมายได้ว่าโครงสร้างที่มีลักษณะใดสามารถให้ค่าผลตอบของฟังก์ชันที่ดีได้ นอกจากนี้ กลุ่มของประชากรเริ่มต้นที่กำหนดเองควรจะประกอบด้วยโครงสร้างประชากรหลาย ๆ ลักษณะด้วยกัน เพื่อให้มีลักษณะของโครงสร้างที่ไม่ใกล้เคียงกันมากนัก เพราะโครงสร้างที่ใกล้เคียงกันจะทำให้การค้นหากระจุกตัวอยู่ในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ในการกำหนดกลุ่มของประชากรวิธีนี้ ไม่จำเป็นต้องกำหนดประชากรเริ่มต้นเองทั้งหมดแต่อาจจะมีการกำหนดเพียงบางส่วนและส่วนที่เหลือได้มาโดยการสุ่ม ข้อดีของวิธีนี้คือให้ผลตอบที่ต้องการในเวลาที่สั้นกว่า (มีจำนวนรุ่นของประชากรน้อยกว่า) แต่ผลตอบที่ได้อาจไม่ดีเท่าที่ควรถ้าโครงสร้างของประชากรเริ่มต้นโดยรวมที่กำหนดไว้มีลักษณะคล้ายใกล้เคียงกันมาก หรือ ไม่มีคุณภาพพอในการให้ค่าของฟังก์ชันที่ดีได้

3. Evaluation

เป็นการคำนวณค่าของฟังก์ชันของทุกเวกเตอร์โครงสร้าง (คำนวณสมรรถนะของโครงสร้าง) ดังตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการหาค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชัน f การคำนวณค่าคือการ

แทนค่าเวกเตอร์ของโครงสร้างในฟังก์ชัน f(x) และเก็บค่า $f(x_1)$, $f(x_2)$, $f(x_3)$, ..., $f(x_N)$ ทั้งกลุ่มของโครงสร้างหรือประชากรไว้ ค่าของฟังก์ชันที่คำนวณได้จะถูกเรียกว่าค่าความเหมาะสม (fitness) โดยค่าความเหมาะสมของโครงสร้างทั้งหมดที่ได้จะถูกนำไปใช้ในขั้นตอน Selection

4. Selection

เป็นการคัดเลือกประชากรรุ่นใหม่โดยเลือกจากประชากรรุ่นปัจจุบัน หรือเป็นการเลือกประชากรที่มีคุณภาพเพื่อเป็นต้นแบบไว้สำหรับให้กำเนิดบุตรต่อไป โครงสร้างที่จะเป็นสมาชิกของประชากร P(t+1) ถูกเลือกมาจากประชากร P(t) โดยการสุ่มใน "กระบวนการเลือก" ซึ่งจำนวนครั้งที่คาดหวังว่าโครงสร้างใด ๆ จะถูกเลือกแปรผันตามสมรรถนะของโครงสร้างหรือค่าความเหมาะสมที่ได้จากโครงสร้างนั้นเทียบกับประชากรหรือโครงสร้างอื่นที่เหลือ กล่าวคือ ถ้า x_j มีสมรรถนะเฉลี่ยเป็นสองเท่าของโครงสร้างอื่นทั้งหมดใน P(t) แล้ว x_j จะมีโอกาสถูกเลือกเป็นสองเท่าเพื่อเป็นสมาชิกใหม่ของประชากร P(t+1) หรือเป็นลูกของประชากร P(t)

ตัวอย่างของอัลกอริทึมที่ใช้ในกระบวนการเลือกมีดังนี้

4.1 proportional selection อัลกอริทึมนี้จำกัดจำนวนลูกของโครงสร้างใด ๆ ให้อยู่ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของจำนวนลูกที่ได้คาดหวังไว้ หลักการคือการจัดสรรจำนวนฟันเฟืองของวงล้อให้กับทุกโครงสร้างโดยขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะสมสัมพัทธ์ของโครงสร้างนั้น ๆ ดังนั้น ในการหมุนวงล้อหนึ่งครั้งจะสามารถบอกจำนวนลูกที่กำหนดให้กับทุกโครงสร้างได้ ตัวชี้ที่ใช้ในการเลือกจะถูกสับเปลี่ยนตำแหน่งโดยการสุ่มและโครงสร้างที่ถูกเลือกจะเป็นสมาชิกของประชากรใหม่

4.2 ranking algorithm จัดอันดับความน่าจะเป็นในการเลือกโครงสร้างให้แปรผันตามดัชนี (index) ของมันในกลุ่มประชากร ค่าดัชนีจะแปรผันตามความเหมาะสมของโครงสร้างนั้น โดยดัชนีของโครงสร้างที่มีความเหมาะสมมากที่สุดมีค่าเท่ากับขนาดของประชากร - 1 และ ดัชนีของโครงสร้างที่มีความเหมาะสมน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0 อัลกอริทึมนี้ช่วยป้องกันปัญหาการลู่เข้าที่เร็วเกินไปโดยป้องกันไม่ให้ super individuals ครอบครองประชากรทั้งหมดภายในไม่กี่รุ่นของประชากร แต่ก็มีข้อเสียคือทำให้มีการพัฒนาโครงสร้างในแต่ละรุ่นช้ากว่าอัลกอริทึม proportional selection

5. Recombination

การเปลี่ยนแปลงลักษณะของประชากรทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างแบบอื่นเพื่อใช้ในการค้นหาได้ ดังนั้น หลังจากกระบวนการเลือกแล้วจึงมีการแปลงลักษณะโครงสร้างของประชากรโดยมีตัวปฏิบัติการในการแปลงลักษณะของประชากรที่สำคัญ คือ

5.1 Mutation

เป็นการทำให้โครงสร้างที่เป็นสมาชิกของประชากรรุ่นใหม่ มีลักษณะโครงสร้างที่ผิดเปลี่ยนไปจากเดิมหรือกลายพันธุ์ ทุกตำแหน่งของบิตสตริง (bit string) มีโอกาสที่จะถูกทำ mutation เท่ากัน คือ มีการกำหนดช่วงห่างของระยะการเข้าถึง เรียกว่า mutation rate เมื่อตำแหน่งใดได้รับการทำ mutation ก็จะถูกสลับค่าของบิตนั้นจาก 0 เป็น 1 หรือ จาก 1 เป็น 0 ทำให้โครงสร้างของประชากรเปลี่ยนแปลงไป

5.2 crossover

เป็นการแลกเปลี่ยนและถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของโครงสร้างในประชากรรุ่นใหม่ โครงสร้างจำนวน 2 โครงสร้างในประชากรใหม่มีการแลกเปลี่ยนบิตสตริงบางส่วนของโครงสร้างซึ่งกันและกันโดยจุดที่มีการ crossover ถูกเลือกโดยการสุ่มที่ crossover rate ตามที่กำหนดไว้และเรียกจุดนี้ว่าจุด crossover ดังตัวอย่างการ crossover แบบที่มีจุด crossover เพียงจุดเดียว เช่น

x_1 = 100:01010 และ x_2 = 010:10100

สมมติว่าจุด crossover ถูกเลือกตามที่แสดงโดยเครื่องหมาย ":" ดังนั้น โครงสร้างหลังจากการ crossover จะเป็น

y_1 = 100:10100 และ y_2 = 010:01010

การ crossover ช่วยเพิ่มโครงสร้างในการค้นหาให้หลากหลายยิ่งขึ้น ดังเช่น x_1 และ y_1 ที่แทนรูปแบบของโครงสร้าง 100##### เมื่อคำนวณค่าของโครงสร้างใหม่ y_1 จะได้ผลตอบที่เป็นตัวแทนของรูปแบบนี้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การ crossover ช่วยกำเนิดตัวแทนของโครงสร้างรูปแบบใหม่ ๆ จากประชากรทั้งกลุ่ม เช่น y_2 ที่มีรูปแบบของ #1001### เพิ่มขึ้น ถ้ารูปแบบใหม่ลักษณะนี้ให้ผลตอบที่ดีขึ้น การคำนวณค่า y_2 จะช่วยเพิ่มการค้นหารูปแบบนี้ในสเปซได้มากขึ้น

4.4.2 การจัดสรรวงแหวนของโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วย GA

การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วย GA จะต้องแปลงปัญหาให้อยู่ในรูปแบบที่ GA เข้าใจได้ เช่นเดียวกันกับวิธีการแบบ exhaustive search ดังที่กล่าวมาแล้ว คือ แต่ละคู่โนดของโครงข่ายจะถูกหาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดโดยเรียงตามลำดับจากเส้นทางที่มีจำนวนฮ็อพน้อยที่สุดไปเส้นทางที่มีจำนวนฮ็อพมากที่สุด จากเส้นทางทั้งหมดของแต่ละคู่โนดที่ได้ นำมาหาวงแหวนที่เส้นทางเหล่านั้นสามารถผ่านได้ ผลลัพธ์ที่ได้คือรายการและจำนวนของวงแหวนที่สามารถครอบคลุมเส้นทางที่สามารถต่อถึงกันได้ของทุกคู่โนดใด ๆ ซึ่งจำนวนวงแหวนที่ได้ของแต่ละคู่โนดอาจจะมีจำนวนไม่เท่ากัน

อย่างไรก็ตาม ในการหาผลตอบด้วย GA โปรแกรมของกระบวนการ GA และ โปรแกรมที่ใช้ในการจัดสรรวงแหวนให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกและจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นภายในแต่ละวงแหวนทำงานเป็นอิสระต่อกัน โดยโปรแกรม GA มีหน้าที่ในการส่งค่าโครงสร้างอินพุตให้กับโปรแกรมที่ใช้จัดสรร จากนั้น โปรแกรมที่ใช้จัดสรรรับค่าโครงสร้างอินพุตนั้นแล้วคำนวณผลลัพธ์ (ในกรณีนี้ คือ ความจุของโครงข่าย) ซึ่ง GA รู้จักผลลัพธ์นี้ว่าเป็นค่าความเหมาะสม (fitness) จากนั้น ส่งกลับค่าความเหมาะสมที่คำนวณได้ให้กับโปรแกรม GA โปรแกรม GA รับค่าความเหมาะสมนั้นและดำเนินการตามกระบวนการของมันดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.4.1 แล้วส่งค่าโครงสร้างอินพุตใหม่มาให้โปรแกรมที่ใช้จัดสรร เป็นอย่างนี้ต่อไปเรื่อย ๆ จนสิ้นสุดกระบวนการ GA ดังนั้น อาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าโปรแกรมที่ใช้จัดสรรมีหน้าที่เป็นฟังก์ชันหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณค่าความเหมาะสมให้กับโปรแกรม GA

โปรแกรม GA ไม่สามารถเข้าใจความหมายได้ว่าคู่โนดใดจะใช้เส้นทางที่ผ่านวงแหวนใด คือ ไม่รู้ว่าปัญหาที่จะหาผลตอบจริงคืออะไร แต่สิ่งที่ GA เข้าใจ คือ บิตสตริงซึ่งแทนลักษณะของโครงสร้าง (หรือโครโมโซม) และค่าความเหมาะสมที่คำนวณได้จากโครงสร้างนั้น ๆ แต่ละโครงสร้างประกอบด้วยยีนต่าง ๆ ที่ถูกต่อเรียงกันเป็นแถวยาวตั้งแต่ยีนแรกจนกระทั่งยีนสุดท้าย สำหรับการหาผลตอบของปัญหานี้ ยีนบ่งบอกถึงเลขอันดับของวงแหวนที่ทราฟฟิกถูกส่งผ่าน เนื่องจากโครงสร้างอยู่ในรูปแบบของบิตสตริง ดังนั้น แต่ละยีนซึ่งเป็นสมาชิกของโครงสร้างจึงอยู่ในรูปแบบของบิตสตริงด้วยเช่นกัน

ในการเข้ารหัส (coding) เพื่อผสานปัญหาให้เข้ากับยีนในรูปแบบบิตสตริงของกระบวนการ GA นั้น เริ่มจากการนำจำนวนวงแหวนที่เป็นไปได้ของแต่ละยีนมาแปลงเป็นเลขฐาน 2 เพื่อให้เป็นบิตสตริง ดังนั้น แต่ละวงแหวนมีความกว้างของยีน = $\lceil \log_2 R_i \rceil$ บิต เมื่อ R_i = จำนวนวงแหวนที่ครอบคลุมเส้นทางที่เป็นไปได้ระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทางของคู่โนดที่ i เช่น คู่โนดหนึ่งมีจำนวนวงแหวนที่ครอบคลุมเส้นทางระหว่างคู่โนดนั้นเป็นจำนวน 5 วงแหวน จะมีความกว้างของยีนเท่ากับ 3 บิต และ มีเลขอันดับของวงแหวนคือ 000 (0), 001 (1), 010 (2), 011 (3), 100 (4) เป็นต้น โดยเลขอันดับน้อยสุด (0) คือวงแหวนที่ครอบคลุมเส้นทางที่สั้นที่สุดและมีขนาดของวงแหวนเล็กที่สุด (Shortest Path / Shortest Ring, SP/SR) ส่วนเลขอันดับมากสุด (4) คือวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถครอบคลุมเส้นทางที่ยาวที่สุดที่ผ่านระหว่างคู่โนดนั้นได้ อย่างไรก็ตาม อาจเป็นไปได้ที่เลขอันดับของวงแหวนที่ติดกันมีขนาดของวงแหวนเท่ากัน

แต่ละยีนซึ่งบ่งบอกอันดับของวงแหวนมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอการเลือกวงแหวนของช่องสัญญาณทราฟฟิก ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

1. ไม่กระจายทราฟฟิก - แต่ละยีนบ่งบอกเลขอันดับของวงแหวนของแต่ละคู่โนด

   ทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนดเดียวกันถูกส่งผ่านวงแหวนวงเดียวกันหมด แต่ละยีนเป็นของแต่ละคู่โนดที่มีทราฟฟิกผ่าน (คู่โนดที่ไม่ต้องการทราฟฟิกไม่ถูกพิจารณา) และมีจำนวนยีนทั้งหมดเท่ากับจำนวนคู่โนดทั้งหมดที่ต้องการทราฟฟิก

2. กระจายทราฟฟิก – แต่ละยีนบ่งบอกเลขอันดับของวงแหวนของแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิก

   ทราฟฟิกจำนวนหลายช่องสัญญาณของคู่โนดเดียวกันสามารถกระจายไปยังวงแหวนต่าง ๆ ที่ครอบคลุมเส้นทางระหว่างคู่โนดนั้น แต่ละยีนหมายถึงช่องสัญญาณทราฟฟิกแต่ละช่องสัญญาณของทุกคู่โนด จำนวนยีนทั้งหมดจึงเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกรวมทุกคู่โนด

เลขอันดับของวงแหวนที่เป็นอินพุตของแต่ละยีนให้กับ GA เกิดจากการเรียงลำดับความสำคัญของวงแหวนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2 เนื่องจากยีนขนาด n บิต สามารถแปรค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 2^n-1 ซึ่งต่างจากในหัวข้อ 4.2 ที่อ้างอิงเริ่มจาก 1 ดังนั้น ค่าอันดับของวงแหวนในกระบวนการ GA จึงมีค่าลดลงหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอันดับของวงแหวนในหัวข้อ 4.2 ภายหลังจากการแปลงยีนให้อยู่ในรูปแบบของบิตสตริงแล้ว ต้องสร้างและเก็บรายการแสดงการแปลงระหว่างอันดับของวงแหวนในกระบวนการ GA ว่าคือวงแหวนใดในโครงข่ายที่เราได้กำหนดไว้ เพราะ GA เข้าใจความหมายว่าช่องสัญญาณทราฟฟิกเลือกวงแหวนใดด้วยเลขอันดับของวงแหวน แต่โปรแกรมที่ใช้ในการจัดสรรต้องเข้าใจว่าเลขอันดับของวงแหวนที่ GA อ้างถึงคือวงแหวนใดในโครงข่ายเพื่อใช้ในการจัดการช่องสัญญาณทราฟฟิกให้เข้ากับวงแหวนดังกล่าวได้อย่างถูกต้องและสามารถคำนวณค่าความเหมาะสมของโครงสร้างอินพุตที่ GA ส่งมาให้ รวมทั้งใช้สำหรับถอดรหัสของโครงสร้างที่เป็นผลตอบภายหลังจากจบกระบวนการ GA กลับไปว่าช่องสัญญาณทราฟฟิกใดเลือกใช้วงแหวนใด

โครงสร้างในรูปแบบของบิตสตริงเกิดจากการนำยีนในรูปแบบของบิตสตริงทุกตัวมาต่อเรียงกันเป็นแถวยาวจนครบทุกยีน ซึ่งความยาวของโครงสร้างสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ไม่กระจายทราฟฟิก

   ความยาวเป็นบิตของโครงสร้างคือผลรวมของความกว้างเป็นบิตของทุกยีนรวมกัน เท่ากับ $\sum_{i=1}^{P}\lceil \log_2 R_i \rceil$ บิต โดย P คือ จำนวนคู่โนดทั้งหมดที่มีทราฟฟิกผ่าน

2. กระจายทราฟฟิก

   ความยาวเป็นบิตของโครงสร้างเท่ากับ $\sum_{i=1}^{N(N-1)/2} T_i \lceil \log_2 R_i \rceil$

ในส่วนของการเริ่มต้นประชากรรุ่นแรก ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 วิธี คือ แบบสุ่มโครงสร้างมาทั้งหมดโดย seed ค่าหนึ่ง และแบบกำหนดโครงสร้างเริ่มต้นเองบางส่วน โดยแบบกำหนดเองบางส่วนยังได้แบ่งออกเป็นแบบที่มีโครงสร้างเริ่มต้น super individual เพียงโครงสร้างเดียว คือ โครงสร้างที่มีบิตสตริงเป็น 0 หมดทุกบิต คือ ทุกคู่โนดในกรณีไม่กระจายทราฟฟิกและทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกในกรณีกระจายทราฟฟิกใช้วงแหวนอันดับ 0 ซึ่งเป็นวงแหวนที่มีขนาดเล็กที่สุดและครอบคลุมเส้นทางที่สั้นที่สุด (SP/SR) ระหว่างคู่โนดนั้น อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้ที่วงแหวนแบบ SP/SR ไม่จำเป็นต้องมีเลขอันดับของวงแหวนเป็น 0 เสมอไป เนื่องจากในแต่ละคู่โนดหรือช่องสัญญาณทราฟฟิกอาจมีวงแหวนที่เป็นแบบ SP/SR มากกว่าหนึ่งวง ดังนั้น จึงมีความคิดในการนำบิตสตริงที่เป็น combination ที่เกิดจากการประสมกันของเลขอันดับวงแหวนแบบ SP/SR เหล่านี้ของทุกคู่โนดในกรณีไม่กระจายทราฟฟิกและทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกในกรณีกระจายทราฟฟิก มาเป็น super individual สำหรับโครงสร้างเริ่มต้นของประชากร โดยได้มีการศึกษาถึงผลของจำนวน super individual ว่ามีผลต่อเวลาที่ใช้หรือค่าของผลตอบที่ได้อย่างไร

ค่าความเหมาะสมที่ได้ของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นนี้คือ ความจุ ซึ่งมีหน่วยเป็นจำนวนความยาวคลื่นของแต่ละกิ่งเชื่อมของทุกวงแหวนมารวมกัน โดยมีจุดหมายคือให้ความจุที่เป็นผลตอบมีค่าน้อยที่สุดเพราะความจุที่มีค่าน้อยทำให้ต้นทุนน้อยตามไปด้วย ในการคำนวณค่าความเหมาะสมอาจมีปัญหาในกรณีที่โปรแกรม GA ส่งบิตสตริงที่ประกอบด้วยยีนบางตัวซึ่งอยู่นอกเหนือจากเลขลำดับของวงแหวนอันเป็นผลมาจากการปัดเศษเพื่อหาความกว้างของยีนที่มีหน่วยเป็นบิต ดังตัวอย่างเช่น คู่โนดหนึ่งมีวงแหวนที่ผ่าน 5 วง มีความกว้างของยีน $\log_2 8 = 3$ บิต ซึ่งแปรค่าอันดับวงแหวนได้จาก 0-7 แต่คู่โนดนี้มีวงแหวนที่ผ่านเพียง 5 วงเท่านั้น ถ้าโปรแกรม GA ส่งโครงสร้างอินพุตโดยที่ยีนนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 5-7 ก็จะไม่สามารถหาค่าความเหมาะสมได้ เพื่อแก้ไขปัญหานี้ จึงแบ่งการคำนวณค่าความเหมาะสมออกเป็น 2 วิธีคือ

1. ส่งกลับค่าของความเหมาะสมที่มีค่าสูงมากที่สุด (INT_MAX) เนื่องจากผลตอบที่ต้องการเป็นค่าความจุที่น้อยที่สุด ดังนั้น จึงให้ส่งกลับค่าที่สูงที่สุด เพื่อไม่ให้เป็นค่าที่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบที่ต้องการ
2. ทำให้มีการใช้เลขอันดับของวงแหวนครบตามจำนวน เช่น ในกรณีที่มีวงแหวนผ่านเพียง 5 วง ซึ่งสามารถบรรจุวงแหวนเพิ่มได้อีก 3 วง เพื่อให้ครบ $2^3=8$ วง โดยการนำวงแหวนที่ถูกกำหนดเลขอันดับไปแล้วกลับมาเรียงเพื่อรับเลขอันดับของวงแหวนเพิ่ม กล่าวคือ มีบางวงแหวนที่มีเลขอันดับของวงแหวนมากกว่า 1 เลขอันดับ ในทางปฏิบัติ จะให้โอกาสวงแหวนแบบ SP/SR ได้มีโอกาสรับเลขอันดับเพิ่มก่อนวงแหวนอื่นที่มีขนาดใหญ่กว่า วิธีการนี้อิงตามหลักการที่ว่าเส้นทางสั้นที่สุดหรือวงแหวนที่มีขนาดเล็กที่สุดย่อมสิ้นเปลืองทรัพยากรน้อยกว่าจึงกำหนดให้มีโอกาสถูกเลือกมากกว่า แต่ตามที่ได้กำหนดไว้แล้วว่าเลขอันดับ

ของวงแหวนเรียงตามขนาดของวงแหวน จึงกำหนดเลขอันดับของวงแหวนใหม่ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ถ้าคู่โนดนั้นมีวงแหวนผ่าน 5 วง โดยที่มีขนาดของวงแหวนเป็น 3,4,5,6,7 โนด ตามลำดับ ซึ่งเดิมวงแหวนเลขอันดับ 0 (อันดับแรก) คือวงแหวนที่มี 3 โนด และ วงแหวนเลขอันดับ 4 (อันดับสุดท้าย) คือวงแหวนที่มี 7 โนด ในกรณีนี้มีวงแหวนเหลือพอให้เติมอีก 3 วง จึงกำหนดให้วงแหวนที่มี 3,4,5 โนด (3 อันดับแรก) มีโอกาสได้เลขอันดับวงแหวนเพิ่ม และกำหนดใหม่ดังนี้ วงแหวนเลขอันดับ 0 และ 1 คือวงแหวนที่มี 3 โนด, วงแหวนเลขอันดับ 2,3 คือ วงแหวนที่มี 4 โนด, วงแหวนเลขอันดับ 4,5 คือวงแหวนที่มี 5 โนด, วงแหวนเลขอันดับ 6 คือวงแหวนที่มี 6 โนด และ วงแหวนเลขอันดับ 7 คือวงแหวนที่มี 7 โนด เป็นต้น

ในการหาผลตอบของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยกระบวนการ GA ยังมีค่าพารามิเตอร์อื่นบางตัวที่อาจมีผลต่อค่าผลตอบรวมทั้งเวลาที่ใช้ เช่น ขนาดของประชากร, จำนวนครั้งรวมของการคำนวณค่าความเหมาะสมซึ่งเพิ่มเติมจากที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์เหล่านี้และจะกล่าวถึงต่อไป

4.5 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm

การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี exhaustive search และ genetic algorithm ใช้วิธีการคำนวณโดยมีอินพุตเป็นชุดของวงแหวนของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิก เมื่อได้ผลจากการคำนวณแล้ว นำค่าที่ได้นั้นมาพิจารณาว่าเป็นผลตอบที่ดีที่สุดแล้วหรือยัง ในขณะที่การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm (HA) แตกต่างจากสองวิธีดังกล่าวข้างต้น เพราะอินพุตของการคำนวณไม่ใช่ชุดอันดับของวงแหวนของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิก แต่เป็นการทดลองปรับเปลี่ยนการเลือกวงแหวนของบางช่องสัญญาณทราฟฟิกภายในวงแหวนที่ยังมีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นอย่างไม่มีประสิทธิภาพ การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธีนี้จะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่มีการกระจายทราฟฟิกเท่านั้น เพราะอัลกอริทึมถูกออกแบบโดยเจตนาเพื่อชดเชยข้อเสียของสองวิธีก่อนหน้าซึ่งต้องใช้เวลานานมากกับกรณีที่มีการกระจายทราฟฟิก อัลกอริทึมนี้จึงกำหนดให้มีการเปลี่ยนทางเลือกของวงแหวนทีละช่องสัญญาณทราฟฟิกซึ่งเหมาะสมกับกรณีที่มีการกระจายทราฟฟิก

ขั้นตอนในการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm มีดังนี้

1. จัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นพร้อมทั้งคำนวณค่าความจุของโครงข่ายโดยจัดสรรวงแหวนให้ทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกเลือกเลขอันดับของวงแหวนเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดและใช้วงแหวนที่มีขนาดเล็กที่สุดที่ผ่านเส้นทางที่สั้นที่สุดนั้น (SP/SR) โดยอันดับของวงแหวนนี้อ้างอิงตามที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.2

2. เรียงลำดับทุกวงแหวนที่มีทราฟฟิกส่งผ่านจากผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่ได้ เพื่อรอพิจารณาในการเลือกช่องสัญญาณทราฟฟิกที่จะถูกปรับเปลี่ยนไปยังวงแหวนอื่น โดยเรียงจากวงแหวนที่มีปริมาณช่องสัญญาณว่างต่อกิ่งเชื่อมมากที่สุดไปน้อยที่สุด

3. ในแต่ละวงแหวนที่ถูกพิจารณา (ก่อนหลังตามลำดับที่หาได้ในขั้นตอนที่ 2) หากิ่งเชื่อมที่มีความคับคั่งมากที่สุด เลือกช่องสัญญาณทราฟฟิกใด ๆ ที่มีเส้นทางผ่านกิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดเพื่อปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณทราฟฟิกนั้นไปยังวงแหวนใหม่ โดยเลือกช่องสัญญาณทราฟฟิกที่มีจำนวนฮ็อพมากที่สุดก่อน

4. จากช่องสัญญาณทราฟฟิกที่เลือกไว้ในขั้นตอนที่ 3 จัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นใหม่โดยที่ช่องสัญญาณทราฟฟิกนั้นเลือกส่งผ่านวงแหวนใหม่ โดยกำหนดให้วงแหวนใหม่นั้นถูกทดลองเปลี่ยนเรียงตามเลขอันดับวงแหวนของคู่โนดนั้นจากน้อยไปมาก ซึ่งมีจุดประสงค์คือ ให้วงแหวนใหม่ที่ครอบคลุมเส้นทางที่สั้นและเป็นวงแหวนที่มีขนาดเล็กมีโอกาสถูกเลือกก่อน

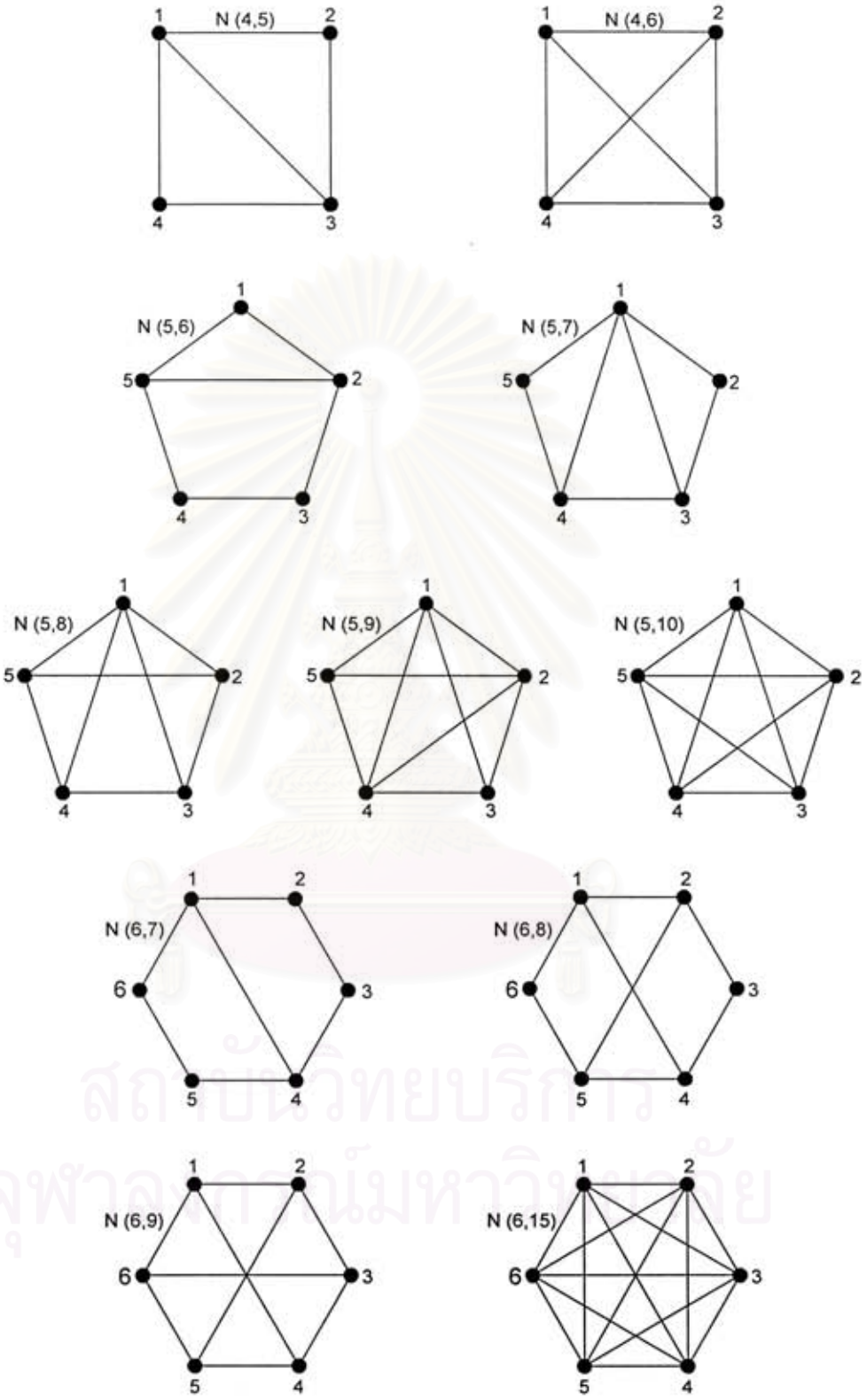
5. ถ้าผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นจากการย้ายช่องสัญญาณทราฟฟิกนั้นไปยังวงแหวนใหม่ใด ๆ ที่ถูกเลือก แล้วสามารถลดปริมาณความจุจากเดิมได้ เก็บค่าความจุใหม่นี้เป็นค่าอ้างอิงค่าใหม่และกลับไปขั้นตอนที่ 2 แต่ถ้าไม่สามารถลดความจุได้ ให้ลองเลือกวงแหวนใหม่เพื่อทดลองจัดสรรครั้งต่อไป และถ้าทุกวงแหวนใหม่ที่เป็นไปได้ของช่องสัญญาณทราฟฟิกนั้นไม่สามารถลดความจุได้เลย กลับไปขั้นตอนที่ 3 เพื่อเลือกช่องสัญญาณทราฟฟิกใหม่

6. อัลกอริทึมสิ้นสุดลง เมื่อกระทำตามกระบวนการจนครบหมดทุกวงแหวนใหม่ที่เป็นไปได้ในขั้นตอนที่ 4, ครบทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกของกิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดของแต่ละวงแหวนในขั้นตอนที่ 3, ครบทุกวงแหวนที่เลือกไว้ในขั้นตอนที่ 2 แล้วไม่สามารถลดความจุลงได้เลย กล่าวโดยสรุปคือ ทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกที่อยู่ในกิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดของทุกวงแหวน ไม่สามารถหาวงแหวนใหม่แล้วสามารถลดค่าความจุลงได้

รูปที่ 4.7 แสดงแผนภาพการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm โดยผลตอบเป็นความจุจากการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm จะถูกเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธี genetic algorithm และ ผลที่ได้จากการจัดสรรแบบเมชโดยตรงต่อไป

รูปที่ 4.7 แผนภาพการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm

4.6 ผลจากขนาดและดัชนีการต่อถึงกันของโครงข่าย



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างของโครงข่ายขนาดเล็ก

ทดสอบผลกระทบจากขนาดของโครงข่ายและดัชนีการต่อถึงกันของโครงข่าย โดยสร้างโครงข่ายทดสอบในรูปแบบ N(จำนวนโนด,จำนวนกิ่งเชื่อม) ดังรูปที่ 4.8 กำหนดให้โครงข่ายทั้งหมดเป็นแบบ NWC มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มและทราฟฟิกในคู่โนดเดียวกันเลือกส่งผ่านวงแหวนเดียวกัน โดยแสดงจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิก จำนวนวงแหวนที่ครอบคลุมโครงข่าย จำนวนอินพุตหรือจำนวนชุดความเป็นไปได้ของการเลือกวงแหวนในทุกคู่โนดทั้งหมด และ ความจุซึ่งเป็นผลตอบจากกรณีที่ทุกคู่โนดเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดและเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กที่สุดที่ครอบคลุมเส้นทางที่สั้นที่สุด (วงแหวนในอันดับที่ 1 ตามที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.2) ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 4.8

โครงข่าย	จำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิก	จำนวนวงแหวน	จำนวนอินพุต	ความจุ (SP/SR)
N(4, 5)	6	3	4.8×10^{1}	10
N(4, 6)	6	7	1.6×10^{4}	9
N(5, 6)	10	3	3.8×10^{2}	20
N(5, 7)	10	6	3.2×10^{4}	22
N(5, 8)	10	13	1.3×10^{9}	20
N(5, 9)	10	22	1.8×10^{11}	19
N(5,10)	10	37	6.3×10^{13}	18
N(6, 7)	15	3	3.1×10^{3}	32
N(6, 8)	15	7	6.5×10^{8}	42
N(6, 9)	15	15	5.3×10^{14}	40
N(6,15)	15	197	5.1×10^{31}	30

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเพิ่มจำนวนการเชื่อมโยงทีละกิ่งเชื่อมในโครงข่ายเดิม วงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดมีจำนวนเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงมาก เช่น โครงข่ายขนาด 5 โนด ที่มีจำนวนการเชื่อมโยง 5, 6, 7, 8, 9, 10 กิ่งเชื่อม มีจำนวนวงแหวนที่เป็นไปได้เท่ากับ 1, 3, 6, 13, 22, 37 ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าโครงข่ายมีจำนวนกิ่งเชื่อมเท่ากันแต่มีขนาดของโครงข่าย (จำนวนโนด) ที่แตกต่างกัน โครงข่ายที่มีขนาดเล็กกว่ามีจำนวนวงแหวนที่เป็นไปได้มากกว่า เพราะ โครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงที่มีขนาดใหญ่ต้องมีกิ่งเชื่อมในการทำให้แต่ละคู่โนดมีวงแหวนอย่างน้อยหนึ่งวงครอบคลุมเส้นทางระหว่างคู่โนดนั้น มากกว่าที่จะเพิ่มทางเลือกของเส้นทางให้กับทราฟฟิกเช่นเดียวกันกับในโครงข่ายที่มีขนาดเล็กกว่า

ถ้าแต่ละคู่โนดมีวงแหวนให้เลือกเป็นจำนวนมาก ทำให้จำนวนชุดของการเลือกวงแหวนของทุกคู่โนดที่จะเป็นอินพุตในการคำนวณความจุของโครงข่ายมีจำนวนมากมายจนกระทั่งไม่สามารถคำนวณครบทุกกรณีของอินพุตได้ในทางปฏิบัติ แม้ว่าวงแหวนครอบคลุมเส้นทางระหว่างคู่โนดที่มีจำนวนมากช่วยเพิ่มโอกาสในการลดปริมาณความจุเพราะมีวงแหวนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นด้วย แต่ความเป็นไปได้ในการค้นหาอินพุตที่ให้ผลตอบที่ดีที่สุดนั้นกลับลดลงอย่างมากเพราะอินพุตที่เป็นไปได้ทั้งหมดจำนวนมหาศาลทำให้ไม่สามารถหาผลตอบได้ในเวลาจำกัด ดังตัวอย่างของโครงข่ายที่ต่อถึงกันหมด (fully-meshed) N(4,6), N(5,10), N(6,15), N(7,21), N(8,28) มีวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมด 7, 37, 197, 1172, 8018 วง ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม โครงข่ายที่มีจำนวนโนดเท่ากันแต่มีจำนวนกิ่งเชื่อมมากกว่า มีแนวโน้มช่วยลดความจุลงได้ โดยเฉพาะเมื่อโครงข่ายมีขนาดตั้งแต่ 6 โนดขึ้นไป ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับว่ากิ่งเชื่อมที่เพิ่มขึ้นนั้นใช้ต่อถึงกันระหว่างคู่โนดใดด้วย

เนื่องจากโครงข่ายที่แตกต่างกันมีจำนวนโนดและจำนวนกิ่งเชื่อมไม่เท่ากัน ดัชนีการต่อถึงกันของโครงข่ายเป็นค่าวัดความหนาแน่นของปริมาณการเชื่อมโยงกันภายในโครงข่ายหรืออีกนัยหนึ่งคือในแต่ละโนดมีปริมาณการต่อถึงกันหรือเชื่อมโยงกับโนดข้างเคียงเป็นจำนวนเท่าไร โดยกำหนดให้เป็นจำนวนกิ่งเชื่อมต่อโนด แสดงดังสมการที่ (4.3)

$$c = \frac{L}{N} \tag{4.3}$$

เมื่อ c คือ ดัชนีการต่อถึงกัน, L คือ จำนวนกิ่งเชื่อม, N คือ จำนวนโนด

ค่าดัชนีการต่อถึงกันทำให้สามารถประมาณจำนวนวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับอีกโครงข่ายที่มีค่าดัชนีการต่อถึงกันใกล้เคียงกันซึ่งเป็นการประมาณอย่างคร่าว ๆ เท่านั้น อย่างไรก็ตาม โครงข่ายที่มีจำนวนโนดและจำนวนกิ่งเชื่อมเท่ากันอาจไม่ใช่โครงข่ายเดียวกัน เพราะจำนวนกิ่งเชื่อมที่เท่ากันไม่ได้หมายความว่าต้องมีการต่อถึงกันระหว่างคู่โนดเหมือนกันทั้งหมด ดังนั้น ดัชนีการต่อถึงกันจึงเป็นเพียงค่าในการอ้างถึงและเปรียบเทียบความหนาแน่นในการต่อถึงกันภายในโครงข่ายของโครงข่ายที่แตกต่างกัน

4.7 ผลการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี exhaustive search

วิธี exhaustive search เป็นวิธีการจัดสรรวงแหวนซึ่งรวบรวมอินพุตหรือชุดของวงแหวนทุกคู่โนดที่เป็นไปได้ทั้งหมดทุกกรณีมาคำนวณ แล้วเลือกกรณีที่ทำให้ได้ผลตอบเป็นความจุมีค่าน้อยที่สุด โดยทำการทดสอบทั้งทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มและไม่ยูนิฟอร์ม ในกรณีของทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มถูกแบ่งออกเป็นแบบไม่กระจายทราฟฟิกและแบบกระจายทราฟฟิก นอกจากนี้ ความสามารถในการแปลงความยาวคลื่นของโครงข่ายเป็นสิ่งที่ถูกนำมาพิจารณาในการทดสอบกับทุกโครงข่ายด้วย

โครงข่ายที่ถูกทดสอบด้วยวิธีการจัดสรรวงแหวนแบบ exhaustive search นี้ นำมาจากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 4.8 ทั้งนี้ ไม่อาจทำการทดสอบได้ครบทุกโครงข่ายเพราะบางโครงข่ายมีจำนวนชุดทางเลือกของวงแหวนในทุกคู่โนดเป็นจำนวนมากซึ่งไม่สามารถคำนวณหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ในเวลาที่เหมาะสม จึงเลือกมาเฉพาะบางโครงข่าย คือ โครงข่าย N(4,5), N(4,6), N(5,6), N(5,7) และ N(6,7)

4.7.1 ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม

การจัดสรรวงแหวนให้กับโครงข่ายที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม ใช้การจัดสรรวงแหวนให้กับคู่โนดแบบไม่กระจายทราฟฟิกหรือทราฟฟิกของคู่โนดเดียวกันถูกส่งผ่านวงแหวนเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ไม่มีการทดสอบเกี่ยวกับการจัดสรรวงแหวนแบบกระจายทราฟฟิกซึ่งทราฟฟิกของคู่โนดเดียวกันสามารถกระจายทราฟฟิกผ่านหลายวงแหวนได้ เนื่องจากเป็นทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม ทุกคู่โนดต้องการหนึ่งช่องสัญญาณทราฟฟิก ดังนั้น ไม่ว่าจะจัดสรรวงแหวนให้กับคู่โนดแบบไม่กระจายทราฟฟิกหรือแบบกระจายทราฟฟิกก็ให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกัน

ผลของการจัดสรรวงแหวนให้กับโครงข่ายทดสอบต่าง ๆ ด้วยทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มเป็นดังนี้

1. โครงข่าย N(4,5) ประกอบด้วย

   วงแหวน 1 : 1-2-3-1

   วงแหวน 2 : 1-3-4-1

   วงแหวน 3 : 1-2-3-4-1

   คู่โนดที่ 1 (1-2) ผ่านวงแหวน 1, 3 (2 วง)

   คู่โนดที่ 2 (1-3) ผ่านวงแหวน 1, 2, 3 (3 วง)

   คู่โนดที่ 3 (1-4) ผ่านวงแหวน 2, 3 (2 วง)

   คู่โนดที่ 4 (2-3) ผ่านวงแหวน 1, 3 (2 วง)

   คู่โนดที่ 5 (2-4) ผ่านวงแหวน 3 (1 วง)

   คู่โนดที่ 6 (3-4) ผ่านวงแหวน 2, 3 (2 วง)

   เนื่องจากทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม ทุกคู่โนดต้องการหนึ่งช่องสัญญาณทราฟฟิก ดังนั้น พิจารณาการเลือกวงแหวนของทุกคู่โนด ซึ่งชุดการเลือกวงแหวนของทุกคู่โนดทั้งหมด(อินพุต)เท่ากับ 2x3x2x2x1x2 = 48 กรณี

   จากการคำนวณอินพุต 48 กรณี ได้ผลตอบเป็นค่าความจุเท่ากับ 10 หมดทุกกรณี ทั้งแบบ NWC และ WC ดังนั้น ไม่ว่าแต่ละคู่โนดจะเลือกใช้วงแหวนใดก็ได้รับผลตอบเท่ากัน

2. โครงข่าย N(4,6)

โครงข่ายนี้ประกอบด้วยวงแหวนจำนวน 7 วง คือ

1. 1-2-3-1 2. 1-2-4-1 3. 1-3-4-1 4. 2-3-4-2

5. 1-2-3-4-1 6. 1-2-4-3-1 7. 1-3-2-4-1

ผลตอบที่ได้จากโครงข่ายแบบ NWC มีค่าความจุน้อยที่สุดเท่ากับ 8 โดยมีอินพุตที่ให้ผลตอบที่ดีที่สุดนี้จำนวน 12 กรณี จากจำนวนอินพุตทั้งหมด 15625 กรณี โดยยกตัวอย่างมา 1 กรณี ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างชุดของวงแหวนที่แต่ละคู่โนดเลือกของโครงข่าย N(4,6) ในรูปที่ 4.8

โนดที่	1	2	3	4
1	-	5	6	5
2		-	5	6
3			-	5
4				-

จากตารางที่ 4.2 พบว่าโครงข่ายใช้วงแหวนเพียง 2 วงเท่านั้น คือ วงแหวนที่ 5 และ 6 โดยแต่ละวงแหวนใช้ 1 ความยาวคลื่น ทั้งสองวงมีจำนวน 4 กิ่งเชื่อม ดังนั้น ผลตอบเป็นความจุจึงมีค่าเท่ากับ 4+4=8

ผลตอบที่ได้จากโครงข่ายแบบ WC คล้ายกับแบบ NWC มาก คือ ให้ค่าความจุที่น้อยที่สุดเท่ากับ 8 และมีอินพุตที่ให้ค่าความจุเท่ากับ 8 จำนวน 12 กรณีที่เหมือนกันกับแบบ NWC แม้ว่าผลตอบจากโครงข่ายแบบ NWC และ WC ที่ต้องการนำไปใช้มีลักษณะเหมือนกัน ไม่ได้หมายความว่าอินพุตในแต่ละกรณีนอกเหนือจากทั้ง 12 กรณีที่ดีที่สุด จะให้ค่าความจุที่เท่ากันเสมอไป

3. โครงข่าย N(5,6)

จำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิก=10, จำนวนวงแหวน=3, จำนวนอินพุต=384

โครงข่ายแบบ NWC ให้ค่าความจุน้อยที่สุดเท่ากับ 14 (2 กรณี) ในขณะที่แบบ WC ให้ค่าความจุน้อยที่สุดเท่ากับ 14 (3 กรณี)

4. โครงข่าย N(5,7)

จำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิก=10, จำนวนวงแหวน=6, จำนวนอินพุต=32400

โครงข่ายแบบ NWC ให้ค่าความจุน้อยที่สุดเท่ากับ 13 (4 กรณี) ในขณะที่แบบ WC ให้ค่าความจุน้อยที่สุดเท่ากับ 13 (4 กรณี)

5. โครงข่าย N(6,7)

จำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิก=15, จำนวนวงแหวน=3, จำนวนอินพุต=3072

โครงข่ายแบบ NWC ให้ค่าความจุน้อยที่สุดเท่ากับ 28 (17 กรณี) ในขณะที่แบบ WC ให้ค่าความจุน้อยที่สุดเท่ากับ 28 (17 กรณี)

4.7.2 ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม

4.7.2.1 ไม่กระจายทราฟฟิก

ในการทดสอบกับทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม กำหนดให้แต่ละขนาดของโครงข่ายมีทราฟฟิกดังตารางที่ 4.3, 4.4, 4.5 ซึ่งเป็นทราฟฟิกของโครงข่ายขนาด 4, 5, 6 โนด ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ทราฟฟิกทดสอบแบบไม่ยูนิฟอร์มของโครงข่ายขนาด 4 โนด

โนดที่	1	2	3	4
1	-	2	1	3
2		-	1	2
3			-	0
4				-

ตารางที่ 4.4 ทราฟฟิกทดสอบแบบไม่ยูนิฟอร์มของโครงข่ายขนาด 5 โนด

โนดที่	1	2	3	4	5
1	-	0	1	0	2
2		-	1	2	3
3			-	3	1
4				-	2
5					-

จากทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มในตารางที่ 4.3 คู่โนดทั้งหมดที่พิจารณามีจำนวน 5 คู่โนด เพราะคู่โนด 4-5 ไม่ต้องการทราฟฟิก ดังนั้น จึงพิจารณาเพียง 5 คู่โนดเท่านั้นซึ่งต่างจากกรณี ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม ในตัวอย่างของโครงข่าย N(4,5) นี้ มีจำนวนอินพุตทั้งหมดเท่ากับ 2x3x2x2x1=24 กรณี ผลตอบที่ได้จากการทดสอบทั้งโครงข่ายแบบ NWC และ WC มีค่าความจุที่น้อยที่สุดเท่ากับ 15 (4 กรณี)

ตารางที่ 4.5 ทราฟฟิกทดสอบแบบไม่ยูนิฟอร์มของโครงข่ายขนาด 6 โนด

โนดที่	1	2	3	4	5	6
1	-	2	2	0	0	3
2		-	1	3	2	1
3			-	1	2	2
4				-	1	0
5					-	1
6						-

ตารางที่ 4.6 ผลตอบของโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 4.8 ด้วยทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม และไม่มีการกระจายทราฟฟิก

โครงข่ายตัวอย่าง	จำนวนวงแหวน	จำนวนคู่โนดที่พิจารณา	จำนวนอินพุต	ความจุ (จำนวนกรณี)	
				NWC	WC
N(4,5)	3	5	24	15 (4)	15 (4)
N(4,6)	7	5	3125	12 (2)	12 (2)
N(5,6)	3	8	192	24 (1)	24 (1)
N(5,7)	6	8	2160	24 (1)	24 (1)
N(6,7)	3	12	256	44 (4)	44 (4)

ผลของโครงข่ายตัวอย่างทั้งหมดสามารถแสดงดังตารางที่ 4.6 จำนวนคู่โนดที่พิจารณาไม่ใช่จำนวนคู่โนดทั้งหมดเพราะไม่พิจารณาบางคู่โนดที่ไม่ต้องการทราฟฟิก ดังนั้น ถ้าทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มที่มีบางคู่โนดไม่ต้องการทราฟฟิก จำนวนคู่โนดที่พิจารณาลดลงและทำให้จำนวนอินพุตลดลงตามไปด้วย ในโครงข่ายขนาดเล็กแบบ WC ไม่สามารถลดปริมาณความจุลงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ NWC ดังนั้น จึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์แปลงความยาวคลื่นในโครงข่ายที่มีขนาดเล็ก

4.7.2.2 กระจายทราฟฟิก

ในการจัดสรรวงแหวนให้กับคู่โนดแบบไม่กระจายทราฟฟิก กำหนดให้ทุกคู่โนดเลือกวงแหวนวงเดียวกันให้กับทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกของคู่โนดนั้น ในขณะที่แบบกระจายทราฟฟิก กำหนดให้ทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกไม่ว่าคู่โนดใดมีอิสระในการเลือกวงแหวน ดังนั้น จำนวนสมาชิกของอินพุตในแบบกระจายทราฟฟิกจึงเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกทั้งหมด

โครงข่ายตัวอย่าง N(4,5) ซึ่งมีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มดังตารางที่ 4.3 มีจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิก 2+1+3+1+2+0=9 ช่องสัญญาณ และประกอบด้วย

วงแหวน 1 : 1-2-3-1

วงแหวน 2 : 1-3-4-1

วงแหวน 3 : 1-2-3-4-1

คู่โนดที่ 1 (1-2) ผ่านวงแหวน 1, 3 (2 วง) จำนวน 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิก

คู่โนดที่ 2 (1-3) ผ่านวงแหวน 1, 2, 3 (3 วง) จำนวน 1 ช่องสัญญาณทราฟฟิก

คู่โนดที่ 3 (1-4) ผ่านวงแหวน 2, 3 (2 วง) จำนวน 3 ช่องสัญญาณทราฟฟิก

คู่โนดที่ 4 (2-3) ผ่านวงแหวน 1, 3 (2 วง) จำนวน 1 ช่องสัญญาณทราฟฟิก

คู่โนดที่ 5 (2-4) ผ่านวงแหวน 3 (1 วง) จำนวน 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิก

คู่โนดที่ 6 (3-4) ผ่านวงแหวน 2, 3 (2 วง) จำนวน 0 ช่องสัญญาณทราฟฟิก

ดังนั้น มีชุดการเลือกวงแหวนของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกทั้งหมด (จำนวนอินพุต) เท่ากับ $2^2x3^1x2^3x2^1x1^2x2^0 = 192$ กรณี ผลตอบเป็นความจุที่น้อยที่สุดของทั้งโครงข่ายแบบ NWC และ WC เท่ากับ 14 โดยยกตัวอย่างของการจัดสรรวงแหวนกรณีหนึ่งที่ทำให้ความจุมีค่าน้อยที่สุด ดังนี้

คู่โนดที่ 1 (1-2) จำนวน 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิก : $P_1[1]=1$, $P_1[2]=3$ (คู่โนดที่ 1: ทราฟฟิกช่องสัญญาณที่ 1 เลือกวงแหวน 1 และ ช่องสัญญาณที่ 2 เลือกวงแหวน 3)

คู่โนดที่ 2 (1-3) จำนวน 1 ช่องสัญญาณทราฟฟิก : $P_2[1]=1$

คู่โนดที่ 3 (1-4) จำนวน 3 ช่องสัญญาณทราฟฟิก : $P_3[1]=2$, $P_3[2]=2$, $P_3[3]=3$

คู่โนดที่ 4 (2-3) จำนวน 1 ช่องสัญญาณทราฟฟิก : $P_4[1]=1$

คู่โนดที่ 5 (2-4) จำนวน 2 ช่องสัญญาณทราฟฟิก : $P_5[1]=3$, $P_5[2]=3$

คู่โนดที่ 6 (3-4) ไม่ต้องการทราฟฟิก

ตารางที่ 4.7 ผลตอบของโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 4.8 ด้วยทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มและมีการกระจายทราฟฟิก

โครงข่ายตัวอย่าง	จำนวนวงแหวน	จำนวนทราฟฟิก	จำนวนอินพุต	ความจุ (จำนวนกรณี)	
				NWC	WC
N(4,5)	3	9	$1.92x10^2$	14 (33)	14 (33)
N(4,6)	7	9	$1.95x10^6$	10 (9)	10 (9)
N(5,6)	3	15	$5.53x10^4$	23 (103)	23 (103)
N(5,7)	6	15	$6.22x10^5$	24 (85)	24 (85)
N(6,7)	3	21	$1.64x10^4$	44 (117)	44 (117)

ผลของโครงข่ายทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 4.7 โดยทั่วไป โครงข่ายที่มีขนาดเท่ากันและมีปริมาณทราฟฟิกเท่ากันแต่มีปริมาณการต่อถึงกันมากกว่ามักจะมีทางเลือกของวงแหวนมากกว่า ทำให้มีโอกาสได้รับผลตอบค่าความจุที่น้อยกว่าได้ ดังเช่นในกรณี N(4,5) และ N(4,6) อย่างไรก็ตาม การที่ N(5,7) มีค่าความจุที่มากกว่า N(5,6) ทั้งที่มีปริมาณการต่อถึงกันมากกว่า เป็นเพราะ N(5,7) ไม่ได้เกิดจากการเพิ่มหนึ่งกิ่งเชื่อมเข้ากับ N(5,6) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 อีกทั้งทราฟฟิกเป็นแบบไม่ยูนิฟอร์มจึงมีโอกาสที่ N(5,7) จะใช้ความจุมากกว่าได้

ผลตอบที่ได้จากการกระจายทราฟฟิกโดยส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าแบบไม่กระจายทราฟฟิก แต่เนื่องจากโครงข่ายมีขนาดเล็กจึงยังไม่อาจสรุปได้ว่าการกระจายทราฟฟิกมีผลมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้ ความสามารถในการแปลงความยาวคลื่นของช่องสัญญาณทราฟฟิกระหว่างเส้นทาง (WC) ไม่มีผลในการลดค่าความจุลงได้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโครงข่ายมีขนาดเล็กโดยตามที่สรุปไว้ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นภายในวงแหวนเดียวนั้น โครงข่ายแบบ WC สามารถช่วยลดความจุอย่างเด่นชัดได้เมื่อขนาดของวงแหวนมีค่ามากกว่า 20 โนดขึ้นไป

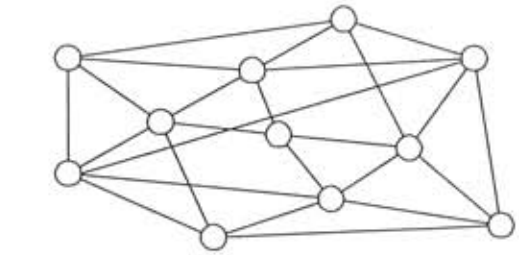
ในด้านเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เนื่องจากโครงข่ายทั้งห้าตัวอย่างเป็นโครงข่ายขนาดเล็ก จึงอาจอนุมานได้ว่าการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในแต่ละครั้งใช้เวลาเกือบเท่ากัน ดังนั้น เวลาที่ใช้ทั้งหมดจึงขึ้นอยู่กับจำนวนชุดทางเลือกของวงแหวนในแต่ละคู่โนดหรือในแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกโดยตรง เช่น โครงข่าย N(4,6) ใช้เวลาคำนวณประมาณ 34 นาที เมื่อเทียบกับแบบไม่กระจายทราฟฟิกแล้ว ใช้เวลาน้อยกว่า 10 วินาที

4.8 ผลการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี genetic algorithm

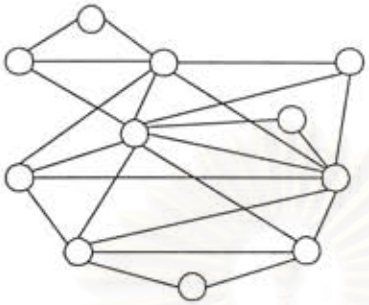
การจัดสรรวงแหวนให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงด้วยวิธี exhaustive search จำกัดการแก้ไขปัญหาโดยหาผลตอบได้เฉพาะโครงข่ายขนาดเล็ก วิธีการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี GA ช่วยลดปริมาณอินพุตทั้งหมดในการคำนวณโดยสุ่มเลือกโครงสร้างอินพุตเป็นบางส่วนมาคำนวณแทน

ตัวอย่างของโครงข่ายเพื่อใช้ในการทดสอบวิธีการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี GA มีจำนวน 3 โครงข่าย [13,14] ดังแสดงในรูปที่ 4.9 คือ

1. โครงข่าย EuroCore ขนาด 11 โนด
2. โครงข่าย New Jersey ขนาด 11 โนด
3. โครงข่าย NSFNet ขนาด 14 โนด



(1) โครงข่าย EuroCore



(2) โครงข่าย New Jersey

(3) โครงข่าย NSFNet

รูปที่ 4.9 ตัวอย่างของโครงข่ายจริงที่ใช้ในการทดสอบ

4.8.1 ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการ GA

4.8.1.1 วิธีการคำนวณค่าความเหมาะสม

ในการคำนวณค่าความเหมาะสมหรือค่าความจุของโครงข่ายที่เตรียมไว้รองรับทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่าย โปรแกรม GA อาจส่งโครงสร้างบิตสตริงที่ประกอบด้วยยีนบางตัวซึ่งอยู่นอกเหนือจากเลขลำดับของวงแหวนอันเป็นผลมาจากการปัดเศษเพื่อหาความกว้างของยีนที่มีหน่วยเป็นบิตซึ่งทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าความจุได้เพราะเลขอันดับของวงแหวนของบิตสตริงที่ GA อ้างถึงไม่มีอยู่จริง ดังนั้น จึงได้แบ่งการทดสอบวิธีการคำนวณค่าความเหมาะสมเป็น 2 วิธีคือ

1. ส่งกลับค่าความเหมาะสมที่มีค่าสูงมาก (INT_MAX) เนื่องจากผลตอบที่ต้องการเป็นค่าความจุที่น้อยที่สุด ดังนั้น จึงให้ส่งกลับค่าที่สูงที่สุด เพื่อไม่ให้เป็นค่าที่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบที่ต้องการ

2. เกลี่ยเลขลำดับของวงแหวนให้มีวงแหวนที่สามารถอ้างอิงได้ครบตามจำนวน โดยการนำวงแหวนที่ถูกกำหนดเลขอันดับของวงแหวนไปแล้วกลับมาเรียงเพื่อรับเลขอันดับของวงแหวนเพิ่ม ดังนั้น วงแหวนนั้นจึงมีเลขอันดับของวงแหวนมากกว่า 1 เลขอันดับวงแหวนเดิมที่มีเลขอันดับของวงแหวนต่ำกว่ามีโอกาสได้รับเลขอันดับของวงแหวนเพิ่มมากกว่าวงอื่น ๆ ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

วิธีการคำนวณค่าความเหมาะสมทั้งสองวิธีจัดเป็นขั้นตอนหนึ่งของการแทนปัญหาเพื่อให้ GA รู้จักและเข้าใจ การคำนวณค่าความเหมาะสมทั้งสองวิธีถูกทดสอบเพื่อสรุปว่าวิธีใดเหมาะสมกับการจัดสรรวงแหวนมากกว่า โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์กับการทดสอบดังต่อไปนี้

- โครงข่ายทดสอบ NSFNet ขนาด 14 โนด
- จำนวนครั้งของการลอง (trial) ในการคำนวณค่าความเหมาะสมของโครงสร้างอินพุต : $1x10^6$ ครั้ง
- ขนาดของประชากร (population size) ในแต่ละรุ่น : 1178 (กำหนดเป็นสองเท่าของความยาวบิตสตริง, ความยาวบิตสตริง = 589 บิต) ความยาวบิตสตริงคือผลรวมความยาวบิตของทุกยีนรวมกัน
- โครงสร้างเริ่มต้นของประชากร : แบบไม่มีโครงสร้างเริ่มต้นและแบบมีโครงสร้างเริ่มต้นจำนวน 1 โครงสร้าง (เลขอันดับของวงแหวนเป็น 0 ทุกยีน : SP/SR)
- ทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม คือ ทุกคู่โนดต้องการทราฟฟิกจำนวน 1 ช่องสัญญาณ
- NWC : ไม่มีการแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงระหว่างเส้นทาง

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบวิธีการคำนวณค่าความเหมาะสมที่มีผลต่อความจุ

การคำนวณค่าความเหมาะสมวิธีที่ 1				การคำนวณค่าความเหมาะสมวิธีที่ 2			
ไม่มีโครงสร้างเริ่มต้น		มีโครงสร้างเริ่มต้น		ไม่มีโครงสร้างเริ่มต้น		มีโครงสร้างเริ่มต้น	
จำนวนรุ่น	ความจุ	จำนวนรุ่น	ความจุ	จำนวนรุ่น	ความจุ	จำนวนรุ่น	ความจุ
1212	INT_MAX	9983	288	1271	305	1257	229

การคำนวณค่าความเหมาะสมวิธีที่ 1 ให้ค่าความจุของโครงข่ายที่ไม่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีโครงสร้างเริ่มต้น เนื่องจากโครงสร้างบิตสตริงมีความยาวมาก ทำให้มีโอกาสมากที่โครงสร้างบิตสตริงที่ GA ส่งให้ประกอบด้วยอย่างน้อย 1 ยีนที่เป็นเลขอันดับของวงแหวนที่ไม่สามารถคำนวณได้และเป็นเหตุให้ทุกโครงสร้างที่ GA ให้คำนวณค่าความเหมาะสมนั้นส่งค่ากลับคืนเป็น INT_MAX หมด นอกจากนี้ ในกรณีที่มี

โครงสร้างเริ่มต้น ค่าความจุที่ได้คือ 288 ซึ่งมากกว่าการคำนวณด้วยวิธีที่ 2 จากการสังเกตผลของวิธีที่ 1 ในกรณีที่มีโครงสร้างเริ่มต้น พบว่า ประชากรตั้งแต่รุ่นที่ 3 เป็นต้นมามีลักษณะเหมือนกันหมดคือมีการคำนวณค่าความเหมาะสมโดยมีโครงสร้างอินพุตที่แตกต่างกันใน 3 รุ่นเพียง 1948 โครงสร้างเท่านั้น สาเหตุเป็นเพราะขั้นตอนในการเลือกโครงสร้างที่มีคุณภาพ (selection) ระหว่างกระบวนการ GA มีค่าผลตอบที่ดีในการเลือกไม่มากพอ ทำให้เลือกได้แต่โครงสร้างเดิม ๆ

อย่างไรก็ตาม ค่าความจุที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ 2 มีค่าที่ดีมากกว่าวิธีที่ 1 โดยแบบไม่มีโครงสร้างเริ่มต้นให้ค่าความจุ = 305 และแบบมีโครงสร้างเริ่มต้นให้ค่าความจุ = 229 ดังนั้น แบบที่มีโครงสร้างเริ่มต้นให้ผลตอบที่ดีกว่าจากการทดสอบโดยกำหนดให้จำนวนครั้งของการลองคำนวณค่าความเหมาะสมของโครงสร้างอินพุตมีจำนวนเท่ากัน

4.8.1.2 จำนวนครั้งของการลองและขนาดของประชากร

จำนวนครั้งของการลอง (trial) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้กำหนดว่าจะให้ GA สิ้นสุดกระบวนการเมื่อไร ซึ่งกระบวนการ GA จะสิ้นสุดลงเมื่อครบจำนวนครั้งของการลองที่ไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ หรือ เมื่อค่าเฉลี่ยของค่าความเหมาะสมของประชากรที่ได้ในแต่ละรุ่นมีค่าใกล้เคียงกันมากหรือเท่ากัน

ขนาดของประชากรในแต่ละรุ่น (population size) คือ จำนวนโครงสร้างของอินพุตที่มีอยู่ในประชากรแต่ละรุ่น ขนาดของประชากรที่ใหญ่ทำให้มีความหลากหลายของโครงสร้างอินพุตมากและมีโอกาสในการพบโครงสร้างอินพุตที่ให้ผลตอบที่ดีที่สุดมากกว่าขนาดของประชากรที่มีขนาดเล็กทำให้โอกาสในการพบโครงสร้างอินพุตที่ให้ผลตอบที่ดีที่สุดมีน้อยลงเช่นเดียวกันกับการแต่งงานโดยที่มีคู่ให้เลือกไม่มาก วิธีการ exhaustive search เปรียบเสมือนการค้นหาผลตอบโดยมีขนาดของประชากรเป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดคือจำนวนโครงสร้างอินพุตที่เป็นไปได้ทั้งหมดและมีจำนวนรุ่นเพียงรุ่นเดียวเท่านั้น

การทดสอบผลของจำนวนครั้งการลอง ถูกกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- โครงข่ายทดสอบ NSFNet
- ขนาดของประชากร (population size) ในแต่ละรุ่น : 1178 (กำหนดเป็นสองเท่าของความยาวบิตสตริง, ความยาวบิตสตริง = 589 บิต)
- โครงสร้างเริ่มต้น : แบบไม่มีโครงสร้างเริ่มต้น และแบบมีโครงสร้างเริ่มต้นจำนวน 1 โครงสร้าง ซึ่งกำหนดให้อันดับของวงแหวนเป็น 0 ทุกยีน (SP/SR)
- ทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์ม คือ ทุกคู่โนดต้องการทราฟฟิกจำนวน 1 ช่องสัญญาณ
- NWC : ไม่มีการแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงระหว่างเส้นทาง

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการลองที่มีผลต่อความจุ

จำนวนครั้งของการลอง	ความจุ	
	ไม่มีโครงสร้างเริ่มต้น	มีโครงสร้างเริ่มต้น
$1x10^3$	654	295
$5x10^3$	636	283
$10x10^3$	609	276
$50x10^3$	504	245
$100x10^3$	422	239
$500x10^3$	315	234
$1x10^6$	305	231

จากตารางที่ 4.9 เมื่อจำนวนครั้งในการคำนวณค่าความเหมาะสมเพิ่มขึ้น ค่าความจุมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับทั้งแบบกำหนดโครงสร้างเริ่มต้นและไม่กำหนดโครงสร้างเริ่มต้น ดังนั้น ถ้ากำหนดจำนวนครั้งเป็นจำนวนมาก ๆ โอกาสที่จะได้รับผลตอบที่ดีจึงมีมากตามไปด้วย ในขณะเดียวกัน จำนวนครั้งก็ถูกจำกัดโดยเวลาที่เพิ่มขึ้นในการหาผลตอบด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้ ทดสอบผลของขนาดประชากร โดยกำหนดจำนวนครั้งของการลอง = $1x10^6$ ครั้ง และแปรค่าขนาดของประชากรตามความยาวของบิตสตริง (589 บิต) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบขนาดของประชากรที่มีผลต่อความจุ

ขนาดประชากร	ความจุ	
	ไม่มีโครงสร้างเริ่มต้น	มีโครงสร้างเริ่มต้น
147 (0.25X)	305	275
295 (0.5X)	305	224
589 (1X)	315	231
1178 (2X)	305	229
1767 (3X)	284	228
2356 (4X)	244	222
2945 (5X)	252	222

แม้ว่าโดยหลักการแล้ว เมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น มีโอกาสที่จะได้รับผลตอบที่ดีมากกว่า เพราะประชากรขนาดเล็กทำให้มีแนวโน้มที่โครงสร้างซึ่งเป็นสมาชิกของประชากรจะมีลักษณะลู่เข้าใกล้เคียงกันมากภายในไม่กี่รุ่นโดยที่โครงสร้างเหล่านั้นยังไม่มีคุณภาพดีพอที่จะเป็นผลตอบ แต่จากผลที่ได้ไม่ได้เป็นไปตามนั้นเลยเสียทีเดียวโดยเฉพาะแบบไม่กำหนดโครงสร้างเริ่มต้น อาจเป็นเพราะผลของขั้นตอนสุ่มหาประชากรเริ่มต้นที่ทำให้ผลตอบมีค่าไม่แน่นอนและไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่าขนาดของประชากรเท่าใดเหมาะสมที่สุด จากตารางที่ 4.10 พบว่าประชากรขนาด 4X มีความเหมาะสมที่สุด แต่เมื่อปรับค่า seed ในการสุ่มแล้ว ขนาดของประชากร 4X ให้ผลตอบที่ไม่ดีไปกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดของประชากรเท่ากับสองเท่าของความยาวบิตสตริงซึ่งเป็นขนาดที่ไม่เล็กหรือใหญ่จนเกินไปนัก

4.8.1.3 จำนวนโครงสร้างเริ่มต้น

ตามที่เกริ่นไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการกำหนดโครงสร้างเริ่มต้น ได้แบ่งการทดสอบออกเป็นแบบไม่กำหนดโครงสร้างเริ่มต้น, แบบกำหนดโครงสร้างเริ่มต้นเพียงโครงสร้างเดียว และ แบบกำหนดจำนวนโครงสร้างเริ่มต้นเป็นเปอร์เซ็นต์ของขนาดประชากร โครงสร้างเริ่มต้นควรเป็นโครงสร้างที่มีแนวโน้มว่าจะให้ผลตอบที่ดีได้ ดังนั้น จึงกำหนดโครงสร้างเริ่มต้นทุกโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่แต่ละยีนเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กที่สุดและวงแหวนที่มีขนาดเล็กนั้นครอบคลุมเส้นทางที่สั้นที่สุด (SP/SR) ในกรณีที่จำนวนโครงสร้างอินพุตที่ทุกยีนเลือกวงแหวนแบบ SP/SR มีมากกว่าจำนวนโครงสร้างเริ่มต้นที่ต้องการ ใช้วิธีการสุ่มเลือกจนครบตามจำนวน ค่าพารามิเตอร์อื่นในการทดสอบถูกกำหนดเช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 4.8.1.1 และผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบจำนวนโครงสร้างเริ่มต้นในประชากรรุ่นแรกที่มีผลต่อความจุ

จำนวนโครงสร้างเริ่มต้น	ความจุ
0	305
1	229
1 %	228
25 %	227
75 %	229

การหาผลตอบโดยไม่กำหนดโครงสร้างเริ่มต้นได้รับผลตอบที่แย่ที่สุด ในขณะที่การกำหนดโครงสร้างเริ่มต้นไม่ว่าจะมีจำนวนเท่าใดให้ผลตอบที่ไม่ต่างกันมากนักรวมทั้งไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนพอจะสรุปได้ว่าจำนวนโครงสร้างเริ่มต้นเท่าใดเหมาะสมที่สุด ผลในตารางที่ 4.11 เป็นเพียงผลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างหนึ่งเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่โครงสร้างเริ่มต้นมีจำนวนมาก เปรียบเสมือนมีประชากรที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันและค่อนข้างดีมารวมตัวกระจุกกันอยู่ ผลที่ได้จึงมักจะสรุปอยู่แต่เพียงประชากรกลุ่มเล็กเหล่านั้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจมีประชากรที่มีคุณภาพมากกว่าอยู่นอกเหนือจากกลุ่มประชากรที่กำลังพิจารณาอยู่ ดังนั้น สมาชิกของประชากรที่มีลักษณะคล้ายกันเมื่อผ่านกระบวนการ crossover หรือ mutation ก็ยังคงได้ลักษณะของโครงสร้างที่คล้ายเดิมหรืออาจซ้ำกับโครงสร้างในประชากรรุ่นก่อนรวมทั้งทำให้กระบวนการ GA สิ้นสุดก่อนที่ควรจะเป็น

4.8.2 ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม

กำหนดค่าพารามิเตอร์ของ GA ในการหาผลตอบดังนี้

- จำนวนครั้งของการคำนวณค่าความเหมาะสมทั้งหมด = $1x10^5$ ครั้ง
- ขนาดประชากรเท่ากับสองเท่าของความยาวบิตสตริง
- กำหนดประชากรเริ่มต้นจำนวน 1% ของขนาดประชากร โดยสุ่มเลือกมาเฉพาะโครงสร้างที่เป็นแบบ SP/SR

ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์และความจุของโครงข่ายทดสอบที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม

โครงข่าย	พารามิเตอร์							ความจุ	
	โนด	คู่โนด	วงแหวน	Gene	bit length	pop size	Init struct	NWC	WC
EuroCore	11	55	2529	55	605	1210	12	129	117
New Jersey	11	55	307	55	360	720	7	129	127
NSFNet	14	91	139	91	589	1187	12	228	215

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความจุที่ได้จากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ข้างต้น แม้ว่าโครงข่าย EuroCore และ New Jersey มีจำนวนโนดเท่ากัน แต่มีจำนวนวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดต่างกันมาก เนื่องจากโครงข่าย EuroCore มีปริมาณการเชื่อมโยงมากกว่า อย่างไรก็ตามค่าความจุที่ได้ของโครงข่ายทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น สรุปได้ว่าวงแหวนจำนวนหนึ่งจากจำนวนวงแหวนทั้งหมดก็เพียงพอในการจัดสรรให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกทั้งหมด และวงแหวนที่ได้รับการจัดสรรทราฟฟิกไปให้มีจำนวนไม่มากโดยเฉพาะในกรณีที่ไม่กระจายทราฟฟิก เพราะ มี

จำนวนคู่โนดน้อยกว่าจำนวนวงแหวนมาก นอกจากนี้ การแปลงผันความยาวคลื่นช่วยลดความจุได้เล็กน้อย

ค่าที่แสดงไว้เป็นผลที่ได้จากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ข้างต้น แต่เมื่อมีการปรับพารามิเตอร์ไปเรื่อย ๆ ค่าความจุที่ได้อาจมีค่าน้อยกว่านี้ ซึ่งเป็นไปได้ว่าจำนวนครั้งของการลองยังไม่มากพอ ผลตอบที่ได้จึงยังไม่อยู่ในช่วงลู่เข้าที่ค่าใดค่าหนึ่งแน่นอน

4.8.3 ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม

กำหนดให้ทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มซึ่งได้จากการสุ่มของโครงข่ายทดสอบขนาด 11 โนด EuroCore และ New Jersey เป็นไปตามตารางที่ 4.13 และ ทราฟฟิกของโครงข่าย NSFNet ขนาด 14 โนด เป็นไปตามตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.13 ทราฟฟิกทดสอบแบบไม่ยูนิฟอร์มของโครงข่าย EuroCore และ New Jersey

โนด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	0	2	0	2	0	3	1	1	2	2
2		-	0	1	0	0	2	3	3	0	1
3			-	3	1	1	3	1	2	2	2
4				-	1	0	1	3	3	2	2
5					-	0	3	1	1	2	3
6						-	2	3	2	0	1
7							-	2	2	1	1
8								-	2	1	0
9									-	1	2
10										-	1
11											-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 ทราฟฟิกทดสอบแบบไม่ยูนิฟอร์มของโครงข่าย NSFNet

โนด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	-	3	0	1	1	2	3	2	2	1	2	1	1	1
2		-	3	1	3	2	2	2	3	1	2	3	2	2
3			-	3	2	2	0	3	3	3	2	1	1	3
4				-	0	2	2	3	2	1	1	2	3	0
5					-	2	3	1	0	2	3	2	1	1
6						-	0	0	0	2	2	0	2	1
7							-	2	0	0	1	2	1	1
8								-	3	0	2	1	1	2
9									-	1	0	2	1	0
10										-	1	0	1	2
11											-	1	1	0
12												-	0	1
13													-	1
14														-

การหาค่าผลตอบในโครงข่ายที่มีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม แบ่งการคำนวณออกเป็นแบบไม่กระจายทราฟฟิกและกระจายทราฟฟิก ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.15 พารามิเตอร์และความจุของโครงข่ายทดสอบที่มีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม และไม่มีการกระจายทราฟฟิก

โครงข่าย	พารามิเตอร์							ความจุ	
	โนด	คู่โนด	วงแหวน	gene	bit length	pop size	init struct	NWC	WC
EuroCore	11	55	2529	44	484	968	10	160	160
New Jersey	11	55	307	44	288	576	6	186	185
NSFNet	14	91	139	74	483	966	12	353	350

ตารางที่ 4.16 พารามิเตอร์และความจุของโครงข่ายทดสอบที่มีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม และมีการกระจายทราฟฟิก

โครงข่าย	พารามิเตอร์							ความจุ	
	โนด	คู่โนด	วงแหวน	gene	bit length	pop size	init struct	NWC	WC
EuroCore	11	55	2529	81	891	1782	18	171	168
New Jersey	11	55	307	81	528	1056	11	185	184
NSFNet	14	91	139	135	879	1758	18	382	380

ในกรณีที่ไม่กระจายทราฟฟิก จำนวนยีนเท่ากับจำนวนคู่โนดที่ต้องการทราฟฟิก (น้อยกว่าเท่ากับในโครงข่ายที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม) ในขณะที่กรณีกระจายทราฟฟิก จำนวนยีนจะเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกของทุกคู่โนดรวมกัน จึงทำให้จำนวนยีนแตกต่างกัน แม้ว่าการจัดสรรแบบกระจายทราฟฟิกมีความยืดหยุ่นของในการเลือกวงแหวนมากกว่า แต่ค่าความจุที่ได้กลับมีผลที่แย่กว่าซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดจำนวนครั้งของการลองที่ $1x10^5$ ครั้ง ทำให้ค่าความจุที่ได้ยังไม่ลู่เข้าสู่ค่าผลตอบสุดท้าย ดังนั้น การหาผลตอบด้วยวิธี GA ที่มีจำนวนครั้งของการลอง $1x10^5$ ครั้ง ควรจะมีโครงข่ายที่มีความยาวบิตของโครงสร้างไม่เกิน 500 บิตเท่านั้น ถ้าโครงข่ายมีความยาวบิตของโครงสร้างมากกว่านั้น จะต้องเพิ่มจำนวนครั้งของการลองให้มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การจัดสรรวงแหวนเป็นจำนวน $1x10^5$ ครั้งนั้น จัดได้ว่าเป็นจำนวนครั้งที่มากและใช้เวลาค่อนข้างนานอยู่แล้ว ดังนั้น วิธี GA จึงช่วยหาผลตอบได้ในโครงข่ายที่มีขนาดและการเชื่อมโยงจำกัดในระดับหนึ่ง นอกจากนี้ การแปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดค่าความจุได้เล็กน้อยเช่นเดียวกันกับผลที่ได้จากโครงข่ายที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม

4.9 ผลการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm

การทดสอบกับโครงข่ายตัวอย่างของการจัดสรรวงแหวนของวิธีนี้คล้ายกันกับของวิธีการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี GA แต่พิจารณาเฉพาะการจัดสรรวงแหวนให้กับช่องสัญญาณทราฟฟิกแบบมีการกระจายทราฟฟิกเท่านั้น โดยพิจารณาโครงข่ายทดสอบ EuroCore, New Jersey และ NSFNet ผลตอบเป็นความจุที่ได้ถูกแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบความจุของโครงข่ายทดสอบแบบวงแหวนหลายวงของวิธี GA และ HA

	EuroCore						New Jersey					
	uniform traffic		non-uniform traffic				uniform traffic		non-uniform traffic			
			ไม่กระจายทราฟฟิก		กระจายทราฟฟิก				ไม่กระจายทราฟฟิก		กระจายทราฟฟิก	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
GA	129	117	160	160	171	168	129	127	186	185	185	184
HA	108	108	-	-	154	154	118	118	-	-	168	168

	NSFNet					
	uniform traffic		non-uniform traffic			
			ไม่กระจายทราฟฟิก		กระจายทราฟฟิก	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
GA	228	215	353	350	382	380
HA	222	222	-	-	369	369

ผลตอบที่ได้จากวิธี heuristic algorithm ดีกว่าที่ได้จากวิธี genetic algorithm เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ การแปลงผันความยาวคลื่นของโครงข่ายทดสอบทั้งสามไม่ได้ช่วยลดค่าความจุลง อย่างไรก็ตาม เปรียบเทียบผลตอบที่ได้กับการจัดสรรแบบเมชโดยตรง [15] เฉพาะโครงข่ายที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มและไม่มีการแปลงผันความยาวคลื่นได้ดังแสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 การเปรียบเทียบความจุของโครงข่ายทดสอบแบบวงแหวนหลายวงและเมช

โครงข่าย	mesh	GA		HA	
		ความจุ	% ความแตกต่างจากแบบเมช	ความจุ	% ความแตกต่างจากแบบเมช
EuroCore	87	129	48%	108	24%
New Jersey	96	129	34%	118	23%
NSFNet	195	228	17%	222	14%

ผลจากวิธี GA และ HA ของโครงข่ายทดสอบทั้งหมดยังมีค่าต่างจากความจุที่ได้จากการจัดสรรแบบเมชโดยตรงอยู่พอสมควร ซึ่งควรทำการปรับปรุงอัลกอริทึมในวิธี HA เพื่อให้ได้ผลตอบที่ดีกว่านี้ อย่างไรก็ตาม เวลาที่ใช้ในการคำนวณในโครงข่ายแบบยูนิฟอร์ม วิธี GA แบบไม่กระจายทราฟฟิกใช้เวลาประมาณ 12, 0.5, 1 ชั่วโมง สำหรับโครงข่าย Eurocore, New Jersey และ NSFNet ตามลำดับ (จำนวนครั้งการลอง = $1x10^5$) ในขณะที่แบบ HA ใช้เวลากับโครงข่าย Eurocore ประมาณ 10 นาที และ 30 นาที สำหรับทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มและไม่ยูนิฟอร์ม ตามลำดับ และ ใช้เวลากับโครงข่าย New Jersey และ NSFNet ในเวลาน้อยกว่า 1 นาทีทั้งทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มและแบบไม่ยูนิฟอร์ม ดังนั้น วิธี heuristic algorithm ใช้เวลาในการคำนวณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจัดสรรวงแหวนแบบอื่น แม้ว่าผลตอบจะยังไม่ดีนักเมื่อเทียบกับการจัดสรรแบบเมชโดยตรง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายแบบวงแหวน

การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้รับการหาผลตอบของการจัดสรรเป็นจำนวนความยาวคลื่นต่อกิ่งเชื่อมโดยทุกกิ่งเชื่อมในวงแหวนมีจำนวนความยาวคลื่นที่สามารถรองรับทราฟฟิกได้เท่ากันหมด นอกจากนี้ ยังแสดงการวิเคราะห์ผลตอบที่ได้ของวงแหวนที่มีพารามิเตอร์แตกต่างกัน เช่น ชนิดของทราฟฟิก, ความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทางของวิถีแสง เป็นต้น

5.1.1 ผลของอันดับในการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับวิถีแสง

ผลการทดสอบวิธีการเรียงอันดับของวิถีแสงในการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธีที่เสนอ คือ วิธีที่เรียงอันดับของวิถีแสงในการจัดสรรความยาวคลื่นโดยการสุ่ม, วิธีที่ให้วิถีแสงที่สั้นที่สุดได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นก่อน และ วิธีที่ให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นก่อน พบว่า วิธีที่กำหนดให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นก่อน เป็นวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดจากผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นที่มีค่าน้อยกว่าวิธีอื่นจากการทดสอบกับวงแหวนขนาด 3-100 โนดที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม ทั้งนี้ วิถีแสงที่สั้นสามารถเติมเต็มส่วนที่ยังว่างอยู่ภายหลังการจัดสรรวิถีแสงที่ยาวกว่าได้ ในทางตรงกันข้าม ถ้าให้วิถีแสงที่สั้นได้รับการจัดสรรก่อนอาจมีกรณีที่วิถีแสงที่สั้นจำนวนหลายวิถีนั้นได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นในตำแหน่งกระจัดกระจายกันและกีดขวางการจัดสรรให้กับวิถีแสงที่ได้รับการจัดสรรถัดไปที่มีความยาวมากกว่าซึ่งต้องการความยาวคลื่นค่าหนึ่งที่ยังว่างอยู่อย่างต่อเนื่องเป็นจำนวนหลายกิ่งเชื่อมที่เส้นทางของวิถีแสงนั้นผ่าน ทำให้การจัดสรรไม่ลงตัวและไม่สามารถจัดสรรความยาวคลื่นให้กับทุกวิถีแสงได้เต็มหรือใกล้เคียงกับความจุสูงสุดได้ นอกจากนี้ วิธีที่ให้วิถีแสงที่ยาวที่สุดได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นก่อนยังใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น อย่างไรก็ตาม วิธีที่เรียงอันดับของวิถีแสงในการจัดสรรโดยการสุ่มเป็นวิธีที่ให้ผลตอบที่ไม่แน่นอนและต้องทดสอบเป็นจำนวนหลายครั้งจึงเป็นวิธีที่ไม่มีความเหมาะสมทั้งในด้านผลตอบและเวลาที่ใช้

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของวิถีแสงระหว่างเส้นทาง วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นทั้ง 3 วิธีให้ผลตอบที่เป็นจำนวนความยาวคลื่นเท่ากันหมด เพราะ การจัดสรรความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบ WC ไม่มีผลต่อจำนวนความยาวคลื่นของโครงข่าย ดังนั้น โครงข่ายแบบ WC จึงขึ้นอยู่กับวิธีการจัดสรรเส้นทางของแต่ละช่องสัญญาณทราฟฟิกเท่านั้น

5.1.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุด

วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ SP กำหนดให้ทราฟฟิกระหว่างคู่โนดใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด ถ้าคู่โนดนั้นอยู่ตรงกันข้ามกันหรือทั้งสองเส้นทางมีความยาวเท่ากัน ให้ใช้เส้นทางในทิศตามเข็มนาฬิกาจากโนดที่มีเลขลำดับน้อยกว่าไปยังโนดที่มีเลขลำดับมากกว่า

ค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติถูกกำหนดขึ้นเป็นค่าอ้างอิงที่ได้จากการตั้งสมมติฐานว่าช่องสัญญาณทราฟฟิกทั้งหมดใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดและทุกความยาวคลื่นของแต่ละกิ่งเชื่อมถูกใช้ประโยชน์หมด ดังนั้น จำนวนความยาวคลื่นอุดมคติจึงเป็นค่าที่ต่ำที่สุดซึ่งอาจไม่สามารถจัดสรรได้จริงในทางปฏิบัติ ทั้งนี้ มีค่าเป็นผลรวมของจำนวนฮ็อพของทุกช่องสัญญาณทราฟฟิกที่ใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดแล้วหารด้วยจำนวนกิ่งเชื่อมของวงแหวน

เมื่อโครงข่ายมีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม จำนวนความยาวคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่อขนาดของวงแหวนเพิ่มขึ้น วงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคี่ทั้งแบบ NWC และ WC ใช้จำนวนความยาวคลื่นเท่ากันและเท่ากับค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติ ดังนั้น วงแหวนโนดคี่ที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มสามารถจัดสรรให้มีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นได้เต็ม 100% ในขณะที่วงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคู่ให้ค่าจำนวนความยาวคลื่นเรียงตามลำดับดังนี้ $M_{ideal} \leq M_{WC} \leq M_{NWC}$ และโครงข่ายแบบ WC ใช้จำนวนความยาวคลื่นน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแบบ NWC

เมื่อโครงข่ายมีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม ผลการทดสอบกับทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์มที่มีบางคู่โนดต้องการจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกมากกว่าปกติจำนวน 8 รูปแบบ พบว่า โครงข่ายแบบ NWC และ WC ให้ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นใกล้เคียงกันโดยแบบ WC ใช้จำนวนความยาวคลื่นน้อยกว่าเล็กน้อย แต่โครงข่ายทั้ง 2 แบบ ให้ผลตอบต่างจากค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติประมาณ 7-15% เนื่องจากผลของทราฟฟิกที่มีบางคู่โนดต้องการทราฟฟิกมากกว่าปกติซึ่งทำให้การใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรโดยเฉพาะทราฟฟิกในรูปแบบที่มีปริมาณคู่โนดที่ต้องการทราฟฟิกมากกว่าปกติและห่างไกลกันอยู่เป็นจำนวนมาก

5.1.3 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นด้วยวิธีกำหนดเส้นทางที่ไม่แน่นอน

วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ AP ช่วยทำให้ปริมาณการครอบครองความยาวคลื่นของวิถีแสงทราฟฟิกในแต่ละกิ่งเชื่อมของวงแหวนมีจำนวนใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับแบบ SP ซึ่งให้ผลของการจัดสรรที่ยังไม่มีประสิทธิภาพโดยการสลับทิศทางของบางวิถีแสงที่ครอบครองความยาวคลื่นในกิ่งเชื่อมที่คับคั่งที่สุดนั้นแล้วทำให้จำนวนความยาวคลื่นลดลงได้

เมื่อโครงข่ายมีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม โครงข่ายทั้งแบบ NWC และ WC ในวงแหวนโนดคู่ใช้จำนวนความยาวคลื่นลดลงเมื่อเทียบกับการจัดสรรเส้นทางแบบ SP โดยเฉพาะโครงข่ายแบบ WC สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นจนใกล้เคียงกับค่าจำนวนความยาวคลื่นอุดมคติและมีการ

ใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นจนมีค่าเข้าใกล้ 100% ในขณะที่วงแหวนโนดคี่ยังมีค่าผลตอบเท่าเดิมทั้งโครงข่ายแบบ NWC และ WC เพราะการจัดสรรเส้นทางแบบ SP ในโนดคี่มีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นเต็มความจุของโครงข่ายอยู่แล้ว

เมื่อโครงข่ายมีทราฟฟิกแบบไม่ยูนิฟอร์ม การจัดสรรเส้นทางแบบ AP ช่วยลดจำนวนความยาวคลื่นและเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นได้มากขึ้นเช่นเดียวกับทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม นอกจากนี้ โครงข่ายแบบ WC สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้มากกว่าแบบ NWC มากถ้าทราฟฟิกภายในวงแหวนมีปริมาณคู่โนดที่อยู่ห่างไกลกันเป็นจำนวนมาก

อย่างไรก็ตาม การจัดสรรเส้นทางแบบ AP ใช้เวลามากกว่าแบบ SP มากโดยเฉพาะเมื่อวงแหวนมีขนาดใหญ่เพราะต้องมีการจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ทุกครั้งที่วิถีแสงถูกกลับทิศทาง จากผลการทดสอบ โครงข่ายแบบ WC มีจำนวนครั้งของการจัดสรรใหม่น้อยกว่าแบบ NWC และทำให้ใช้เวลาน้อยกว่าแบบ NWC

จากการเปรียบเทียบผลของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นระหว่างโครงข่ายแบบ NWC และ WC พบว่า การแปลงผันความยาวคลื่นช่วยลดจำนวนความยาวคลื่นลงได้เล็กน้อยเมื่อจัดสรรเส้นทางแบบ SP ในขณะที่โครงข่ายแบบ WC ที่มีขนาดใหญ่และมีการจัดสรรเส้นทางแบบ AP สามารถลดจำนวนความยาวคลื่นได้มากขึ้นเมื่อทราฟฟิกภายในวงแหวนมีปริมาณคู่โนดที่อยู่ห่างไกลกันเป็นจำนวนมาก ดังนั้น วิธีการจัดสรรที่ให้ผลตอบเป็นจำนวนความยาวคลื่นน้อยที่สุด คือ การจัดสรรเส้นทางแบบ AP และโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันจำนวนความยาวคลื่นของวิถีแสงระหว่างเส้นทางได้ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าโครงข่ายแบบ WC ช่วยลดจำนวนความยาวคลื่นได้ดีเมื่อจัดสรรเส้นทางแบบ AP แต่ก็ไม่มากพอที่จำเป็นจะต้องเพิ่มความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นระหว่างเส้นทางให้กับทุกคู่โนด เพราะ จำนวนความยาวคลื่นที่ลดลงไม่คุ้มค่ากับอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพิ่มเข้าไป

5.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายแบบเมชในรูปแบบวงแหวนหลายวง

เมื่อโครงข่ายแบบเมชถูกแปลงเป็นโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง จึงนำวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นภายในวงแหวนเดี่ยวมาใช้กับวงแหวนแต่ละวงในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวง ทั้งนี้ ทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่ายถูกพิจารณาว่าควรจัดสรรให้ผ่านวงแหวนใด โดยแบ่งการจัดสรรวงแหวนให้กับทราฟฟิกออกเป็นแบบไม่กระจายทราฟฟิกซึ่งทราฟฟิกในคู่โนดเดียวกันถูกส่งผ่านวงแหวนเดียวกันและแบบกระจายทราฟฟิกซึ่งทราฟฟิกในคู่โนดเดียวกันอาจถูกส่งผ่านวงแหวนที่แตกต่างกัน วิธีการจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี exhaustive search, genetic algorithm และ heuristic algorithm ได้รับการพิจารณาว่าการจัดสรรวงแหวนแบบใดมีความเหมาะสมที่สุด

5.2.1 ผลจากขนาดและดัชนีการต่อถึงกันของโครงข่าย

ดัชนีการต่อถึงกันของโครงข่ายซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนโนดและจำนวนกิ่งเชื่อมมีผลต่อปริมาณวงแหวนที่เป็นไปได้เป็นอย่างมาก เมื่อจำนวนวงแหวนเพิ่มมากขึ้น ทุกคู่โนดย่อมมีปริมาณวงแหวนที่สามารถครอบคลุมเส้นทางของคู่โนดนั้นได้มากขึ้นด้วย ดังนั้น จำนวนชุดของการเลือกวงแหวนของทุกคู่โนดที่จะเป็นอินพุตในการคำนวณความจุอาจมีจำนวนมากจนไม่สามารถคำนวณครบทุกกรณีของอินพุตได้ในทางปฏิบัติ

5.2.2 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี exhaustive search

การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธีนี้ใช้ได้กับโครงข่ายที่มีขนาดเล็กมากเท่านั้น (4-5 โนด) โดยผลตอบที่ได้มีค่าที่ดีที่สุด เพราะเป็นการหาคำตอบจากทั้งสเปซ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ยังมีข้อจำกัดกับโครงข่ายแบบกระจายทราฟฟิกที่มีจำนวนช่องสัญญาณทราฟฟิกรวมทั้งหมดในปริมาณมากจนไม่สามารถคำนวณค่าความจุได้ทุกกรณีและไม่สามารถนำไปใช้จริงได้เนื่องจากโครงข่ายที่ใช้งานจริงมีขนาดที่ใหญ่กว่านี้มาก

5.2.3 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี genetic algorithm

กระบวนการ GA ถูกนำมาใช้ในการจัดสรรวงแหวนให้กับทราฟฟิกทั้งแบบไม่กระจายทราฟฟิกและกระจายทราฟฟิก โดยสรุปผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ GA ได้ดังนี้

- รูปแบบการคำนวณค่าความเหมาะสมที่แตกต่างกันให้ค่าผลตอบที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นการแทนปัญหาให้ GA รู้จักจึงเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด โดยวิธีการคำนวณค่าความเหมาะสมแบบเกลี่ยให้มีการใช้เลขอันดับของวงแหวนครบตามจำนวนค่า bit sring ของแต่ละยีนเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ส่งคืนค่า INT_MAX ในกรณีที่ไม่พบอันดับของวงแหวนที่ bit string อ้างถึง
- จำนวนครั้งของการทดลองที่เพิ่มขึ้นทำให้ได้ผลตอบที่ลู่เข้าสู่ผลตอบที่ดีกว่าไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งประชากรในรุ่นนั้นมีโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกันหมดหรือมีค่าเฉลี่ยค่าความเหมาะสมของทุกโครงสร้างในกลุ่มประชากรนั้นใกล้เคียงกับของประชากรรุ่นก่อนหน้า (ค่าเฉลี่ยลู่เข้าสู่ค่าความเหมาะสมค่าหนึ่ง) ดังนั้น จำนวนครั้งของการทดลองที่เหมาะสมคือจำนวนครั้งที่มากพอที่ทำให้ค่าเฉลี่ยค่าความเหมาะสมของประชากรลู่เข้าสู่ค่า ๆ หนึ่ง
- ขนาดของประชากรที่เล็กมากทำให้ประชากรมีลักษณะคล้ายกันภายในไม่กี่รุ่น ดังนั้นขนาดของประชากรไม่ควรมีค่าเล็กจนเกินไป แต่ขนาดของประชากรที่ใหญ่เกินไปทำให้การลู่เข้าช้าและใช้เวลาในการผลตอบนานขึ้นด้วยเช่นกัน

- โครงสร้างเริ่มต้นช่วย GA ในการหาสมาชิกของประชากรที่มีคุณภาพดี แต่ไม่ควรมีเป็นจำนวนมากเกินไป เพราะโครงสร้างเริ่มต้นที่มีลักษณะคล้ายกันมากจำนวนหนึ่งทำให้ไม่เกิดความหลากหลายของโครงสร้างรวมทั้งหมด เปรียบเสมือนกับการแต่งงานในเครือญาติเดียวกัน

จากค่าความจุที่ได้จากการจัดสรรวงแหวนในโครงข่าย EuroCore, New Jersey และ NSFNet ทั้งแบบไม่กระจายทราฟฟิกและกระจายทราฟฟิก พบว่าค่าความจุที่ได้ยังไม่ดีนัก รวมทั้งใช้เวลาในการหาผลตอบนานมาก โดยค่าความจุในโครงข่ายแบบ WC สามารถลดความจุได้เล็กน้อย นอกจากนี้ ในโครงข่ายที่มีความยาวบิตมากกลับให้ค่าความจุจากการจัดสรรวงแหวนแบบกระจายทราฟฟิกมากกว่าแบบไม่กระจายทราฟฟิก ยกเว้นโครงข่าย New Jersey ซึ่งมีความยาวบิตน้อยกว่าอีก 2 โครงข่ายที่เหลือมาก ทั้งนี้ เพราะผลที่ได้จากการจัดสรรวงแหวนแบบกระจายทราฟฟิกในโครงข่าย EuroCore และ NSFNet ยังไม่ลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสม เนื่องจากกำหนดให้จำนวนครั้งของการทดลองในการจัดสรรวงแหวนทั้งสองแบบเท่ากันคือเท่ากับ $1x10^5$ ครั้ง

5.2.4 การจัดสรรวงแหวนด้วยวิธี heuristic algorithm

วิธี HA ใช้แก้ไขปัญหาในเรื่องเวลาของการจัดสรรวงแหวนวิธี GA ที่มีการจัดสรรวงแหวนแบบกระจายทราฟฟิกซึ่งใช้เวลานานมากและผลตอบไม่ลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมในเวลาจำกัด วิธี GA เป็นวิธีหาผลตอบที่ง่ายเนื่องจากไม่จำเป็นต้องศึกษาลักษณะคุณสมบัติของปัญหา ในทางตรงกันข้าม วิธี HA พิจารณาถึงปริมาณการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นในแต่ละวงแหวนและพยายามลดค่าความจุโดยทดลองย้ายทราฟฟิกที่อยู่ในวงแหวนที่มีการใช้ประโยชน์ความยาวคลื่นไม่มีประสิทธิภาพไปยังวงแหวนอื่นที่สามารถรองรับทราฟฟิกนั้นได้ โดยที่วงแหวนเดิมสามารถลดจำนวนความยาวคลื่นลงทำให้ความจุโดยรวมมีค่าลดลงตาม

ผลตอบที่ได้ด้วยวิธีการจัดสรรวงแหวนแบบกระจายทราฟฟิกจากวิธี HA ให้ค่าความจุที่ดีกว่าผลที่ได้จาก GA เล็กน้อย แต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี GA นอกจากนี้ การแปลงผันความยาวคลื่นของวิธีการจัดสรรวงแหวนแบบ HA ด้วยโครงข่ายทดสอบ Eurocore, New Jersey และ NSFNet ไม่สามารถลดความจุลงได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลตอบที่เป็นความจุที่ได้กับการจัดสรรแบบเมชโดยตรงจากโครงข่ายทดสอบเดียวกันที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและมีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม พบว่าวิธี GA ให้ค่าความจุมากกว่าแบบเมชโดยตรงประมาณ 17-48% และวิธี HA ให้ค่าความจุมากกว่าแบบเมชโดยตรงประมาณ 14-24% ในขณะที่ไม่สามารถเปรียบเทียบผลของการจัดสรรวงแหวนแบบ exhaustive search ได้ เพราะ ไม่สามารถหาผลตอบในเวลาจำกัดได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

- ในการหาผลตอบของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในวงแหวนเดี่ยวหรือของการจัดสรรวงแหวนในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงก็ตาม ต้องใช้เวลาในการคำนวณหาผลตอบที่ดีที่สุดเป็นเวลานาน ดังนั้น ควรมีการพัฒนาการหาผลตอบโดยแบ่งการคำนวณเป็นแบบขนานกันหลาย ๆ เครื่อง
- วิธีการจัดสรรวงแหวนแบบ HA ในโครงข่ายแบบวงแหวนหลายวงควรจะมีการพัฒนาต่อไปเพื่อให้สามารถลดความจุของโครงข่ายให้ใกล้เคียงกับผลตอบที่ได้จากการจัดสรรแบบเมชโดยตรง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Govind, P. A. Fiber-Optic Communication Systems. New York: John Wiley & Sons, 1992.
2. Gnauck, A. H., et al. One Terabit/s transmission experiment. Proceedings of OFC'96 2 (Feb/March 1996): 407-410.
3. Wagner, R. E., et al. MONET: Multi Wavelength Optical Networking. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 14 (June 1996): 1341-1348.
4. Kaminow, I. P., et al. A Wideband All-Optical WDM Network. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 14 (1996): 780-799.
5. Chang, G. K., et al. Multi Wavelength Reconfigurable WDM/ATM/SONET Network Testbed. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 14 (June 1996): 1320-1340.
6. Jourdan, A., et al. Fully Reconfigurable WDM Optical Crossconnect: Feasibility Validation and Preparation of Prototype Crossconnect for ACTS "OPEN" Field Trials. Proceedings of ECOC'97 (1997): 55-58.
7. Garnot, M.; Sotom, M.; and Masetti, F. Routing strategies for optical paths in WDM networks. IEEE Proceedings of ICC'97 1 (1997): 422-426.
8. Stavdas, A.; Avramopoulos, H.; and Protonotarios, E. N. An OXC Architecture Suitable for High Density WDM Wavelength Routed Networks. Journal of Photonic Network Communications 1 (June 1999): 77-88.
9. Mark Kuznetsov, et al. A Next-Generation Optical Regional Access Network. IEEE Communications Magazine 38 (Jan 2000): 66-72.
10. Wuttisittikulkij, L.; and O'Mahony, M. J. Design of a WDM Network using a Multiple Ring Approach. IEEE Proceedings of GLOBECOM'97 (Nov 1997): 551-555.
11. Wuttisittikulkij, 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.
12. Goldberg, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. New York: Addison-Wesley, 1991.

13. 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.

14. Xiong, Y.; and Mason, L. Restoration Strategies and Spare Capacity Requirements in Self-Healing ATM Networks. Proceedings of INFOCOM'97 (1997): 353-360.

15. 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).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสิทธิชัย ลีลานันท์นุกูล เกิดวันที่ 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2540

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย