

การจัดสรรความจุสำรองสำหรับความอยู่รอดของโครงข่าย DWDM ที่รองรับทราฟฟิก
แบบมัลติคาสต์โดยอัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานของการค้นหาแบบทาบู



นางสาวกนกภรณ์ วิสเพ็ญ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2513-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SPARE CAPACITY ALLOCATION FOR SURVIVABLE MULTICAST DWDM
NETWORKS BY HEURISTIC ALGORITHM BASED ON TABU SEARCH

Miss Kanokporn Weesapen

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

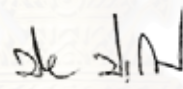
ISBN 974-14-2513-9

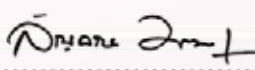
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดสรรความจุสำรอง สำหรับความอยู่รอดของโครงข่าย DWDM ที่รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ โดยอัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานของการค้นหาแบบทามู
โดย	นางสาวกนกภรณ์ วีลเพ็ญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวันยศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพัฒน์มงคล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.สุติมา พรหมมาก)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลู แก้วปลั่ง)

กนกภรณ์ วิสเพ็ญ : การจัดสรรความจุสำรอง สำหรับความอยู่รอดของโครงข่าย DWDM ที่รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ โดยอัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานของการค้นหาแบบทาบู (SPARE CAPACITY ALLOCATION FOR SURVIVABLE MULTICAST DWDM NETWORKS BY HEURISTIC ALGORITHM BASED ON TABU SEARCH) อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ลัญจกร วุฒิสถิธิกุลกิจ, อ. ที่ปรึกษาร่วม: อ.ดร.ชุติมา พรหมมาก, 101 หน้า. ISBN 974-14-2513-9.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนออัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานของการค้นหาแบบทาบูสำหรับการจัดสรรความจุสำรองในโครงข่ายมัลติคาสต์แบบมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นหนาแน่นเพื่อให้สามารถปกป้องความเสียหายหนึ่งสายเชื่อมโยงได้ โดยได้พิจารณากลยุทธ์การป้องกันสองประเภทคือ LR (Light-Tree Reconfiguration) และ LIR (Light-Tree-Interrupted Reconfiguration) กับระบบที่มีการใช้และไม่ใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น วัตถุประสงค์ของการออกแบบคือหาผลเฉลยของการจัดสรรต้นไม้เชิงแสงและความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพ โดยมีความต้องการความจุสำรองต่ำ ภายใต้เงื่อนไขว่าสามารถปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายหนึ่งสายเชื่อมโยงได้ทุกกรณี อัลกอริทึมที่เสนอได้นำมาทดสอบกับการออกแบบโครงข่ายหลายขนาดตั้งแต่ 8 ถึง 14 โหนดกับทราฟฟิกมัลติคาสต์ สำหรับผลการทดสอบกับโครงข่ายขนาดเล็ก (8 โหนด 14 สายเชื่อมโยง) พบว่าอัลกอริทึมที่เสนอให้ผลการออกแบบที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากวิธีที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมฮิวริสติกที่เสนอมีประสิทธิภาพ สำหรับปัญหาของโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นพบว่าการใช้วิธี ILP ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ในเวลาจำกัด ในขณะที่อัลกอริทึมฮิวริสติกสามารถให้ผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพภายในเวลาที่สมเหตุสมผล อย่างไรก็ตาม ผลจากการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของอัลกอริทึมขึ้นอยู่กับ การตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เช่นขนาดของ tabu list เกณฑ์การหยุด ขนาดของแคนดิเดต ซึ่งจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้อัลกอริทึมฮิวริสติกให้น่าเสนอมีประสิทธิภาพนั้น จะต้องใช้ tabu list ที่เป็นแบบพลวัตที่มีช่วงอยู่ระหว่าง 5 ถึง 12 ครั้งสำหรับโครงข่ายขนาด 8 โหนด 14 สายเชื่อมโยง และโครงข่ายขนาด 10 โหนด 21 สายเชื่อมโยง ในขณะที่โครงข่าย 14 โหนด 21 สายเชื่อมโยง จะต้องใช้ tabu list แบบพลวัตที่มีช่วงอยู่ระหว่าง 5 ถึง 15 ครั้ง โดยใช้เกณฑ์การหยุดเท่ากับ 4,000 10,000 และ 6,000 ตามลำดับ โครงข่ายที่ใช้ทดสอบทั้งหมดจะต้องกำหนดให้ขนาดของแคนดิเดตเท่ากับ 4 เช่นเดียวกัน ภายใต้กระบวนการ 100,000 รอบ

จากการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ พบว่าการจัดสรรความจุสำรองโดยใช้กลยุทธ์ LR_VLT จะมีต้นทุนของโครงข่ายต่ำสุด LIR_VLT LR_LT และ LIR_LT จะเป็นกลยุทธ์การป้องกันที่ต้องการต้นทุนมากกว่าวิธี LR_VLT ตามลำดับ จากน้อยไปมาก

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....*ภกณณ์ วิสเพ็ญ*.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*ปิยะธิดา อินท*.....
 ปีการศึกษา...2549.....

4570712221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: DWDM / MULTICAST / PROTECTION / VLT / LT / LR / LIR

KANOKPORN WEESAPEN: SPARE CAPACITY ALLOCATION FOR SURVIVABLE
MULTICAST DWDM NETWORKS BY HEURISTIC ALGORITHM BASED ON TABU
SEARCH. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ.
Ph.D., CO-ADVISOR: CHUTIMA PROMMARK. Ph.D., 101 pp. ISBN 974-14-2513-9.

This thesis proposes heuristic algorithms based on tabu search for spare capacity allocation in survivable multicast dense wavelength division multiplexed (DWDM) networks with single link failure protection capability. Two types of protection strategies, namely Light-Tree Reconfiguration (LR) and Light-Tree Interrupted Reconfiguration (LIR) strategies, are considered for systems with and without wavelength conversion. The objective is to determine efficient light-tree and wavelength assignment that minimizes the spare capacity requirement while providing full protection against all single link failures. The proposed algorithms are applied to tested networks of different sizes from 8 to 14 nodes with certain multicast traffic demands. It is found that the design outcomes of the small network case (8 nodes and 14 links) are comparable to that of optimal ILP-based approach, signifying the effectiveness of the proposed heuristic algorithms. For larger network problems, the ILP-based approach requires excessive computational time, while the heuristic algorithms are able to provide efficient design solutions within reasonable time. However, study has also shown that the effectiveness of the algorithms depends on appropriate parameter settings, types of tabu list, tabu list sizes, stop criteria and candidate sizes. Dynamic tabu list with length ranging from 5 to 12 times is suitable for network size 8 and 10 while length ranging from 5 to 20 times is suitable for network size 14 under candidate size parameter of 4 and stop criteria of 4,000 6,000 and 10,000 respectively in process of 100,000 iterations.

It is found that LR_VLT is the strategy that requires spare capacity allocation at minimum cost in survivable DWDM networks when compared with other techniques: LIR_VLT, LR_LT and LIR_LT.

Department.....Electrical..Engineering....Student's Signature.....*กนกพร เวสเปน*.....

Field of Study....Electrical..Engineering...Advisor's Signature.....*นันทกร วุตติสิติกุลกิจ*.....

Academic Year...2006.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ
รศ. ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อ.ดร.ชุติมา พรหมมาก
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งประสบการณ์ที่เป็น
ประโยชน์ต่องานวิจัยของข้าพเจ้าทั้งทางตรงและทางอ้อมด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย บวรธรรมรัตน์ คุณภัทรินทร์ ลีลารัมย์ คุณอนุชิต จตุรงค์ปัญญา
คุณปรมินทร์ แสงวงษ์งาม และคุณกัปพล วรดิษฐ์ สำหรับคำปรึกษาตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณอนุชิต มั่นจิรังกูร คุณวรางรัตน์ วัฒนวรากุล และคุณกอบเทพ ชัยเสน
เพื่อนร่วมกลุ่มวิจัยเดียวกัน สำหรับคำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนความช่วยเหลือที่มีให้มาโดย
ตลอด

ขอขอบคุณพี่และเพื่อนในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ชั้น 13 ตึกวิศวกรรมไฟฟ้า
4 ทุกท่าน โดยเฉพาะเพื่อนในชั้นปีเดียวกัน สำหรับคำแนะนำ กำลังใจ ข้อคิดที่ดี ตลอดจนความมี
น้ำใจ ที่มีให้กับข้าพเจ้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้การศึกษาระดับปริญญาโทมาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัยของข้าพเจ้าเต็มไปด้วยความทรงจำที่ดีและมีคุณค่า

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรักความอบอุ่น ความเอา
ใจใส่ ในทุกเรื่องของข้าพเจ้าอย่างบริสุทธิ์ใจ และขอบคุณน้องสาวที่คอยห่วงใยและคอยเป็น
กำลังใจให้กับข้าพเจ้าตลอดการทำวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2 แนวทางในการออกแบบโครงข่าย DWDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกที่คำนึงถึง กรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย	6
2.1 โครงข่าย DWDM	6
2.2 รูปแบบการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นบนโครงข่าย DWDM	8
2.3 รูปแบบการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย	10
2.3.1 วิธีการปกป้อง Light-tree แบบกำหนดเส้นทางใหม่ทั้งหมด (Light Tree Reconfiguration, LR)	10
2.3.2 วิธีการปกป้อง Light-tree แบบกำหนดเส้นทางใหม่เฉพาะ light-tree ที่ ได้รับผลกระทบ (Light-Tree-Interrupted Reconfiguration, LIR)	10
2.4 ลักษณะการวางแผนใยแก้วสํารอง	11
3 การจัดสรรความจุสํารองของโครงข่าย DWDM สำหรับรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก โดยใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ Tabu Search	12
3.1 การทำงานของอัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานของการค้นหาแบบทาบู	12
3.2 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานของการค้นหาแบบทาบูเพื่อจัดสรร ความจุสํารองให้กับโครงข่าย DWDM.....	14

3.2.1	การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในสภาวะปกติ.....	15
3.2.2	การจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่าย DWDM เมื่อเกิดความเสียหาย หนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR และ LIR.....	18
4	การทดสอบและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในอัลกอริทึมการตัดสินใจ.....	23
5	ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย	31
5.1	ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยจากฮิวริสติกอัลกอริทึมที่อยู่บนพื้นฐานการ ค้นหาแบบทาบ.....	31
5.2	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองและเวลาที่ใช้ในการ ปกป้องโครงข่าย	32
5.3	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่แต่ละวิธีการปก ป้องโครงข่ายต้องการ	41
5.3.1	ผลของกลยุทธ์การปกป้องโครงข่าย ที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมด ที่โครงข่ายต้องการ	41
5.3.2	ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสง ทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ.....	43
5.4	การเปรียบเทียบเชิงต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพของโครงข่าย	43
6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	46
6.1	สรุปผลการวิจัย.....	46
6.2	ข้อเสนอแนะ	47
	รายการอ้างอิง.....	49
	ภาคผนวก.....	51
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	101

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	ตัวย่อของวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของจัดสรรความจุสำรองสำหรับการปกป้องโครงข่าย.....	11
ตารางที่ 3.1	ตัวอย่างที่เป็นไปได้สำหรับผลเฉลยข้างเคียงของเวกเตอร์ผลเฉลย T	17
ตารางที่ 5.1	จำนวนเส้นใยนำแสงในสภาวะปกติและจำนวนเส้นใยนำแสงสำรอง ในกรณีที่มีการปกป้องโครงข่ายแบบ LR และมีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT โดยใช้ (ก) 1 Diff neighborhood (ข) n VerticalDiff neighborhood (ค) L HorizontalDiff neighborhood.....	33
ตารางที่ 5.2	จำนวนเส้นใยนำแสงในสภาวะปกติและจำนวนเส้นใยนำแสงสำรอง ในกรณีที่มีการปกป้องโครงข่ายแบบ LIR และมีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT.....	36
ตารางที่ 5.3	จำนวนเส้นใยนำแสงในสภาวะปกติและจำนวนเส้นใยนำแสงสำรอง ในกรณีที่มีการปกป้องโครงข่ายแบบ LR และมีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LT.....	37
ตารางที่ 5.4	จำนวนเส้นใยนำแสงในสภาวะปกติและจำนวนเส้นใยนำแสงสำรอง ในกรณีที่มีการปกป้องโครงข่ายแบบ LIR และมีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LT.....	38
ตารางที่ 5.5	เวลาที่ใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองในแต่ละกลยุทธ์ของการปกป้องโครงข่าย เมื่อมีจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT และ LT เมื่อความยาวของ tabu list เป็นแบบพลวัต.....	39
ตารางที่ ข.1	ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบของแต่ละโครงข่าย จำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ เวลาที่ใช้คำนวณ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ tabu list ขนาดต่างกัน เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ และจะหยุดการค้นหาคำตอบเมื่อไม่มีการพัฒนาของคำตอบให้เห็นภายใน 1000 รอบ ของ (ก) โครงข่าย 10N_21L และ (ข) โครงข่าย 14N_21L ตามลำดับ.....	66

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ ข.2	ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบของแต่ละโครงข่าย จำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ เวลาที่ใช้คำนวณ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อ tabu list เป็นแบบพลวัตได้ ในช่วงที่ต่างกัน และระยะเวลาในการหยุดการค้นหาคำตอบที่แตกต่างกัน ที่ 100000 รอบ เมื่อ candidate size เท่ากับ 10 ของ (ก) โครงข่าย 8N_14L และ (ข) โครงข่าย 10N_21L..... 68
ตารางที่ ค.1	ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ ที่แต่ละช่วงของ tabu list ที่เป็นแบบพลวัต ซึ่งแต่ละช่วงนั้นทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน ของโครงข่าย 8N_14L..... 71
ตารางที่ ค.2	ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ ที่แต่ละช่วงของ tabu list ที่เป็นแบบพลวัต ซึ่งแต่ละช่วงนั้นทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน ของโครงข่าย 10N_21L..... 73
ตารางที่ ค.3	ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ ที่แต่ละช่วงของ tabu list ที่เป็นแบบพลวัต ซึ่งแต่ละช่วงนั้นทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน ของโครงข่าย 14N_21L..... 75
ตารางที่ ง.1	ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย โครงข่าย 8N_14L ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ ซึ่งแต่ละขนาดของ tabu list ที่ใช้จะทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน..... 78
ตารางที่ ง.2	ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย 10N_21L ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ ซึ่งแต่ละขนาดของ tabu list ที่ใช้จะทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน..... 84
ตารางที่ ง.3	ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย 14N_21L ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ ซึ่งแต่ละขนาดของ tabu list ที่ใช้จะทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน..... 90

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างของ light-tree.....	1
รูปที่ 2.1 โครงข่าย DWDM แบบมัลติคาสต์ กับ light-tree.....	7
รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมของ MC-OXC.....	7
รูปที่ 2.3 สถาปัตยกรรมของ MC-OXC กับความสามารถในการเปลี่ยนความยาวคลื่น....	8
รูปที่ 2.4 รูปแบบการจัดสรรความยาวคลื่นให้แต่ละ light-tree.....	10
รูปที่ 2.5 รูปแบบการปกป้อง light-tree สำหรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกบนโครงข่าย DWDM.....	11
รูปที่ 3.1 ผังงานของอัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับการปรับปรุงการออกแบบโครงข่าย.....	13
รูปที่ 3.2 ผังงานการจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่าย ในแต่ละกลยุทธ์ด้วย อัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหาแบบทาบูน.....	22
รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 8N_14L (ข) โครงข่าย 7N_13L และ (ค) โครงข่าย 14N_21L.....	24
รูปที่ 4.2 ทราฟฟิกของโครงข่ายที่ใช้ทดสอบ (ก) โครงข่าย 8N_14L (ข) โครงข่าย 10N_21L และ (ค) โครงข่าย 14N_21L.....	24
รูปที่ 4.3 ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบของแต่ละโครงข่าย จำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ เวลาที่ใช้คำนวณ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ tabu list ขนาดต่างกัน เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ และจะหยุดการค้นหาคำตอบเมื่อไม่มีการพัฒนาของคำตอบให้เห็นภายใน 1000 รอบ ของโครงข่าย 8N_14L.....	27
รูปที่ 4.4 ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบของแต่ละโครงข่าย จำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ เวลาที่ใช้คำนวณ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อ tabu list เป็นแบบพลวัตได้ ในช่วง tabu list ที่ต่างกัน และระยะเวลาในการหยุดการค้นหาคำตอบที่แตกต่างกัน ที่ กระบวนการ 100000 รอบ เมื่อ candidate size เท่ากับ 10 ของโครงข่าย 14N_21L.....	28

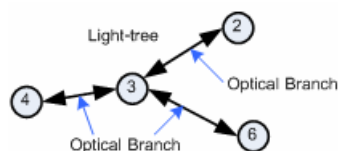
- รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่ (ก) โครงข่าย 8N_14L (ข) โครงข่าย 10N_14L และ (ค) โครงข่าย 14N_21L ต้องการ ในแต่ละกลยุทธ์ของการปกป้องโครงข่าย เมื่อการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT และ LT ตามลำดับ..... 40
- รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของ (ก) โครงข่าย 8N_14L (ข) โครงข่าย 10N_14L และ (ค) โครงข่าย 14N_21L ที่มี การจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LT ต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่มี การจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT (LT/VLT ratio) กับจำนวนความยาวคลื่น สูงสุดที่มัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสง (M) ในแต่ละมีกลยุทธ์การปกป้อง โครงข่าย ตามลำดับ..... 42
- รูปที่ 5.3: การเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพการใช้เส้นใยแก้วนำแสง ของ (ก) โครงข่าย 8N_14L (ข) โครงข่าย 10N_21L และ (ค) โครงข่าย 14N_21L ในแต่ละกลยุทธ์การปกป้องโครงข่าย เมื่อแต่ละกลยุทธ์การปกป้อง โครงข่ายมีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT และ LT ตามลำดับ..... 44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารใยแก้วนำแสงได้มีการพัฒนาและก้าวหน้าไปมาก ส่งผลให้ความจุหรืออัตราการส่งข้อมูลภายในโครงข่ายได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้โครงข่ายมีขีดความสามารถในการรองรับบริการรูปแบบใหม่ ๆ ที่ต้องการแบนด์วิธที่สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างของบริการหรือโปรแกรมประยุกต์ที่ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ การสื่อสารผ่านอินเทอร์เน็ต การประชุมสัมมนาผ่านทางวิดีโอ (video conferencing) การศึกษาทางไกล (distance learning) การประมูลที่มีการถ่ายทอดสด (live auction) และเกมออนไลน์ (online game) เป็นต้น การออกแบบและพัฒนาโครงข่ายความเร็วสูงเพื่อรองรับความต้องการใช้บริการที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ต้องอาศัยเทคโนโลยีที่นอกจากจะให้ความจุสูงแล้วยังต้องสามารถรองรับการให้บริการแบบมัลติคาสต์ได้ ในปัจจุบันการมัลติเพลกซ์เชิงความยาวคลื่นหนาแน่น (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) จึงจัดเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างมาก การมัลติเพลกซ์เชิงความยาวคลื่น (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) [1] มีหลักการคือทำการมัลติเพลกซ์ช่องสัญญาณแสงจำนวนหนึ่งรวมกันโดยอาศัยคลื่นพาห้ที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันเพื่อส่งไปในเส้นใยนำแสงเดียวกัน ทำให้การเข้าใช้ประโยชน์ของแบนด์วิธของเส้นใยนำแสงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้มีการนำเทคโนโลยี DWDM มาใช้ในการออกแบบโครงข่ายความเร็วสูง ซึ่งจะสามารถส่งข้อมูลได้สูงถึงระดับ Tbps เพื่อที่จะรองรับบริการแบบมัลติคาสต์ โครงข่ายจะต้องสามารถรองรับทราฟฟิกที่มีเชื่อมต่อกับโหนดต้นทางไปยังกลุ่มของโหนดปลายทางได้ในเวลาเดียวกัน หรือกล่าวอีกนัยว่าโครงข่ายต้องมีความสามารถที่จะรองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ที่มีการเชื่อมต่อกับโหนดต้นทางไปยังกลุ่มของโหนดปลายทางนั้นจะอยู่ในรูปของ light-tree [2] ดังรูป



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างของ light-tree

อย่างไรก็ตาม การให้บริการดังกล่าวนั้น ถ้าเกิดความไม่ต่อเนื่องในการให้บริการเพียงเสี้ยววินาทีก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายร้ายแรงตามมาได้ ดังนั้นความอยู่รอด (survival) ของโครงข่ายจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบโครงข่าย DWDM เพื่อที่จะปกป้องจากสภาวะข้างต้นและลดความสูญเสียของการให้บริการที่ไม่สามารถจะหลีกเลี่ยงได้

จากการศึกษางานวิจัยเรื่องการออกแบบโครงข่าย DWDM ในช่วงที่ผ่านมา พบว่าโดยมากเป็นงานวิจัยเพื่อรองรับการให้บริการหรือทราฟฟิกแบบยูนิคาสต์ (unicast) ซึ่งเป็นทราฟฟิกที่มีลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างต้นทางและปลายทางในการส่งข้อมูลเป็นการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (point to point) [3] เนื่องจากเป็นทราฟฟิกที่เกิดมากที่สุดโครงข่าย แต่ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและพฤติกรรมของผู้ใช้บริการในโครงข่าย พบว่าในอนาคตบริการแบบมัลติคาสต์ (multicast) มีแนวโน้มที่จะได้รับการตอบสนองจากผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น เพราะสามารถตอบสนองความต้องการบริการรูปแบบเดียวกันสำหรับผู้ใช้งานจำนวนมากได้ในเวลาเดียวกัน [4,5] โดยอาศัยการเชื่อมต่อระหว่างแบบจุดต่อหลายจุด (point to multipoint) ในการส่งข้อมูลด้วยรูปแบบของบริการที่เปลี่ยนไป จึงต้องมีการประยุกต์ปรับเปลี่ยนโครงข่ายให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยที่ผ่านมา [6,7] ได้นำเสนอข้อดีของการกำหนดให้ ทราฟฟิกของโครงข่ายเป็นมัลติคาสต์ โดยนำเสนอในเชิงเปรียบเทียบกับกำหนดทราฟฟิกแบบยูนิคาสต์ให้กับโครงข่าย ในการเปรียบเทียบบ้างว่าจะมีการนำเสนอ light tree เข้ามาช่วยในการส่งข้อมูล เพื่อลดค่าหน่วงเวลา (delay) ในการส่ง ซึ่ง [8] ได้ชี้ให้เห็นถึงประโยชน์ที่จะได้รับการออกแบบโดยอาศัยโครงสร้างของ light-tree สำหรับรองรับทราฟฟิกทั้งแบบยูนิคาสต์และมัลติคาสต์ และนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ทำในเชิงเปรียบเทียบเหมือนกัน แต่ได้การพิจารณาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของการติดตั้งอุปกรณ์ในการทำมัลติคาสต์เพิ่มเติมในโครงข่าย [7] ได้แก่ อุปกรณ์แยกสัญญาณ (splitter) และอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (wavelength converter) หลังจากงานวิจัยดังกล่าวก็ได้มีงานวิจัยที่พิจารณาถึงการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับมัลติคาสต์ทราฟฟิก [9] เพื่อให้การรับส่งข้อมูลเป็นไปตามระดับคุณภาพบริการที่กำหนดโดยใช้ค่าความยาวคลื่นในการส่งน้อยที่สุด นอกจากนี้ก็มีบางงานวิจัยที่พิจารณาในเชิงเดียวกัน [10] แต่ได้มีการพิจารณาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่าย ในด้านต้นทุนและค่าความยาวคลื่นในการส่งข้อมูล นอกจากงานวิจัยดังกล่าวยังมีบางงานวิจัยที่พิจารณาเฉพาะการจัดสรรเส้นทาง [11] ในโครงข่าย โดยจะทำการจัดสรรเส้นทางให้โครงข่ายมีต้นทุนในการติดตั้งสายเชื่อมโยงน้อยที่สุด และยังคงรักษาคุณภาพของสัญญาณไม่ให้มีค่าหน่วงเวลาในการรับส่งข้อมูลเกินกว่าที่กำหนดไว้ ในการตรวจสอบคุณภาพการบริการรับส่งข้อมูลนั้น การพิจารณาจากค่าหน่วงเวลาเพียงอย่างเดียวไม่สามารถรองรับปัญหาที่เกิดขึ้น

การรับส่งข้อมูลในความเป็นจริงได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีงานวิจัยที่ออกแบบโครงข่ายโดยคำนึงถึงค่ากำลังของสัญญาณที่ในปลายทางจะได้รับในการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ด้วย [12] เพราะในการส่งข้อมูลมัลติคาสต์นั้นสัญญาณข้อมูลที่ส่งจากต้นทางจะถูกคัดลอกและแยก (split) ออกเป็นสัญญาณย่อยจำนวนหนึ่ง ส่งต่อไปยังปลายทาง การส่งข้อมูลในลักษณะดังกล่าวทำให้บางครั้งปลายทางจะไม่ได้รับสัญญาณที่ส่ง เนื่องจากค่ากำลังสัญญาณข้อมูลถูกลดทอนลงจากการแยกสัญญาณที่ในดกลางทางจนหมดก่อนที่จะสัญญาณจะเดินทางไปถึงปลายทาง ส่วน [13] กล่าวถึงการกำหนดของการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์บนโครงสร้างแบบเมช (mesh) และวงแหวน (ring) ภายใต้ระบบหลายเส้นใย (multi-fiber system) [14] ได้เสนออุปสมการทางคณิตศาสตร์ที่รวมค่าพารามิเตอร์ที่เรียกว่า จำนวนระดับชั้นของการแยกสัญญาณสูงสุด (fanout) ไว้สำหรับการหาผลเฉลยของปัญหาโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า ILP

วิธีการออกแบบโครงข่ายไม่ว่าจะเป็นโครงข่ายสำหรับรองรับทราฟฟิกแบบยูนิคาสต์ (unicast) หรือ มัลติคาสต์ (multicast) ที่นิยมนำมาใช้ นั้น จะอาศัย LP (Linear Programming), ILP (Integer Linear Programming) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับโครงข่ายหนึ่งๆซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไปโดยอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์ มาช่วยในการกำหนดคุณลักษณะของโครงข่ายตามที่เราต้องการ อย่างไรก็ตาม LP หรือ ILP ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) และข้อบังคับหรือข้อกำหนดของโครงข่ายซึ่งต้องเป็นเชิงเส้น อีกทั้งยังใช้เวลานานในการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นเราไม่สามารถที่จะใช้เครื่องมือดังกล่าวหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ภายในระยะเวลาที่ต้องการ ซึ่งจะแก้ไขโดยการนำอัลกอริทึมฮิวริสติก (Heuristic Algorithm) [15] ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบของปัญหาโดยการประมาณที่รับประกันว่าจะสามารถหาคำตอบของปัญหาได้ภายในระยะเวลาที่กำหนดมาใช้ในการหาคำตอบแทน แม้ว่าคำตอบของปัญหาที่ได้จากอัลกอริทึมฮิวริสติกนี้จะไม่ใช่ว่าคำตอบที่ดีที่สุด แต่คำตอบนั้นก็ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดหรืออยู่ในภาวะที่ยอมรับได้ มีหลายวิธีที่นำมาใช้ในอัลกอริทึมฮิวริสติก เช่น วิธีการหาคำตอบเชิงอนุमान (constructive greedy method) , วิธีค้นหาคำตอบเฉพาะที่ (local Search method), วิธีการหาคำตอบโดยใช้อัลกอริทึมแนวใหม่ที่เป็นแบบวนซ้ำทั่วทุกด้าน (Modern General Iterative Algorithm) เช่น การเย็นตัวลงของแบบจำลอง (Simulated Annealing), อัลกอริทึมที่เกี่ยวข้องกับพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithm), แบบจำลองวิวัฒนาการ (Simulated Evolution) และการค้นหาสิ่งที่ต้องห้าม (Tabu Search) แต่เนื่องจากวิธี Tabu Search ซึ่งเป็นหนึ่งในการหาคำตอบโดยใช้อัลกอริทึมแนวใหม่ที่เป็นแบบวนซ้ำทั่วทุกด้าน เหมาะสำหรับการใช้ในการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ [3] และด้วยคุณลักษณะเฉพาะที่เด่นคือระบบการทำงานจะใช้

หน่วยความจำที่มีความสามารถปรับตัวได้ (Adaptive or Flexible Memory) ซึ่งส่งผลให้เวลาในกระบวนการแก้ปัญหาเร็วขึ้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงจะนำ Tabu Search ซึ่งเป็นอัลกอริทึมวิวิธคติกรรมมาใช้ในการออกแบบปกป้องโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมต่อโยง (Single Link Failure)

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย DWDM เพื่อรองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ (multicast traffic) เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมต่อโยง ภายใต้การออกแบบโครงข่ายด้วยอัลกอริทึมวิวิธคติบนหลักการพื้นฐานของการปกป้องโครงข่ายแบบ LR และ LIR ในกรณีที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT และ LT

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. เสนอและสร้างอัลกอริทึมวิวิธคติที่ใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย DWDM ที่ใช้ในการรองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ ซึ่งสามารถปกป้องโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมต่อโยงได้ โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของการปกป้องโครงข่ายแบบ LR และ LIR ในกรณีที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT และ LT
2. เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่ใช้การปกป้องโครงข่ายแบบ LR และ LIR ซึ่งแต่ละวิธีมีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT และ LT ศึกษาข้อดีข้อเสียของจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่ใช้การปกป้องโครงข่ายในแต่ละรูปแบบ
3. เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแสงที่ได้จาก ILP กับอัลกอริทึมวิวิธคติที่ได้ออกแบบ
4. เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่ได้จาก ILP กับอัลกอริทึมวิวิธคติที่ได้ออกแบบ
5. เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียในแต่ละวิธีการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมต่อโยง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 1.1 ศึกษาบทความเกี่ยวกับเทคโนโลยี DWDM
 - 1.2 ศึกษาโครงสร้างของโครงข่ายเชิงแสงที่ใช้รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์

- 1.3 ศึกษาบทความเกี่ยวกับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่ใช้ในการรองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ของโครงข่ายเชิงแสง
- 1.4 ศึกษาวิธีการปกป้องโครงข่ายที่ใช้รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
- 1.5 ศึกษาอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบต่างๆ ที่สามารถจะนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
2. ออกแบบและทดสอบฮิวริสติกอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบ
3. เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของโครงข่ายในแง่ของการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองสำหรับในแต่ละกรณีที่เกิดขึ้น
4. รวบรวมและสรุปผลการวิจัย เพื่อเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปกป้องโครงข่ายเชิงแสงที่ใช้รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ให้มีความอยู่รอดเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
2. สามารถออกโครงข่ายเชิงแสงได้อย่างเหมาะสมกับงบประมาณโดยที่ได้รับประสิทธิภาพจากการทรัพยากรในโครงข่ายเชิงแสงมากที่สุด
3. ทราบถึงข้อดีข้อเสียในแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางให้กับโครงข่ายเชิงแสง
4. ทราบถึงข้อดีข้อเสียในแต่ละวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายเชิงแสง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

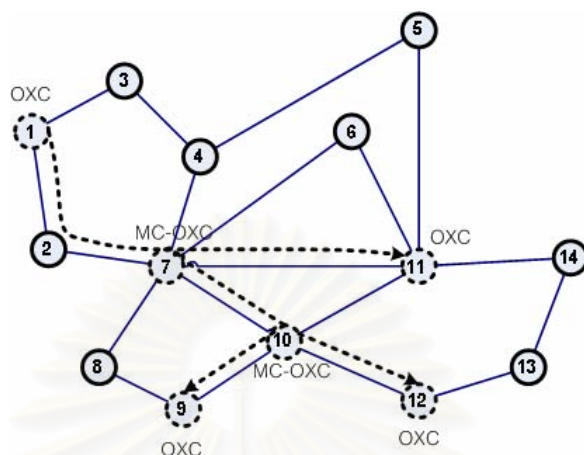
แนวทางในการจัดสรรความจุสำรองของโครงข่าย DWDM เพื่อรองรับมัลติ- คาสต์ทราฟฟิกที่คำนึงถึงกรณีที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย DWDM การพิจารณาค่าต้นทุนของโครงข่ายจากจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ต้องทำการติดตั้งให้กับโครงข่าย และการปกป้องโครงข่ายจากความเสียหาย โดยจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานโดยทั่วไปที่เป็นความรู้เบื้องต้นในการออกแบบโครงข่ายอันประกอบไปด้วย ลักษณะและโครงสร้างของโครงข่าย DWDM รายละเอียดเกี่ยวกับคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ และการจัดสรรเส้นทางการรับส่งข้อมูลให้กับทราฟฟิกภายในโครงข่าย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงข่าย DWDM เป็นโครงข่ายเชิงแสง ดังนั้นแต่ละเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรภายในโครงข่ายจะต้องได้รับการจัดสรรค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางดังกล่าวด้วย นอกจากนี้ แต่ละเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรจะต้องสามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ได้เมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย

2.1 โครงข่าย DWDM

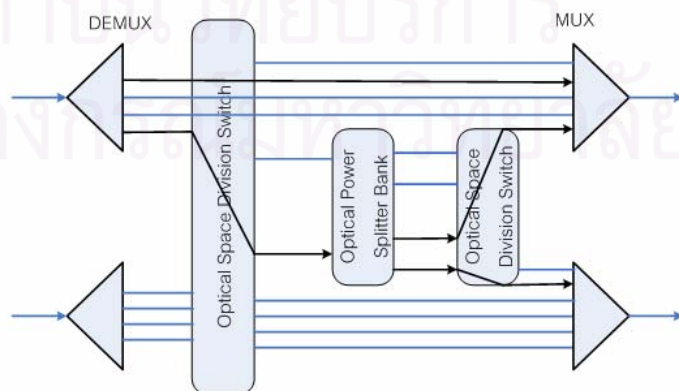
โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย DWDM ประกอบด้วยโนดจำนวนหนึ่งที่ต่อเชื่อมโยงกันด้วยข่ายเชื่อมโยง โดยจัดและกำหนดให้มีลักษณะที่เหมาะสมกับสภาพภูมิศาสตร์ และการกระจายของปริมาณทราฟฟิกในพื้นที่การให้บริการ โหนดมีหน้าที่ติดต่อกับแหล่งกำเนิดทราฟฟิกเพื่อรวบรวมข้อมูลของผู้ใช้ที่จะส่งออก และในทางกลับกันก็ส่งผ่านทราฟฟิกไปยังจุดหมายปลายทาง ข่ายเชื่อมโยงทำหน้าที่เชื่อมต่อโนด และเป็นตัวกลางในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดภายในโครงข่าย โครงสร้างของโนดประกอบด้วย วงจรมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น (Wavelength Multiplexer, WM) วงจรดีมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น (Wavelength Demultiplexer, WD) และสวิตช์วันระยะห่าง (Space Switch) ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกันเป็นตัวกำหนดเส้นทางที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโนดต้นทางกับโนดปลายทางของโครงข่าย อุปกรณ์ทั้งหมดภายในโนดของโครงข่ายเรียกว่า ออปติคอลลครอสคอนเนกต์ (Optical Cross Connect, OXCs) นอกจากนี้โนดในโครงข่ายอาจจะมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter, WC) เพิ่มเติมเพื่อทำหน้าที่ในการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นให้กับช่องสัญญาณ ซึ่งจะทำให้การจัดสรรช่องสัญญาณทำได้ง่ายขึ้น

เพื่อที่จะรองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ โครงสร้างแบบต้นไม้ (tree) จะถูกนำมาใช้ในบนโครงข่าย ซึ่งโครงสร้างแบบต้นไม้ที่อยู่บนโครงข่าย DWDM ทางเทคนิคจะเรียกว่า light-tree ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2.1 โครงข่าย DWDM แบบมัลติคาสต์ กับ light-tree [4]

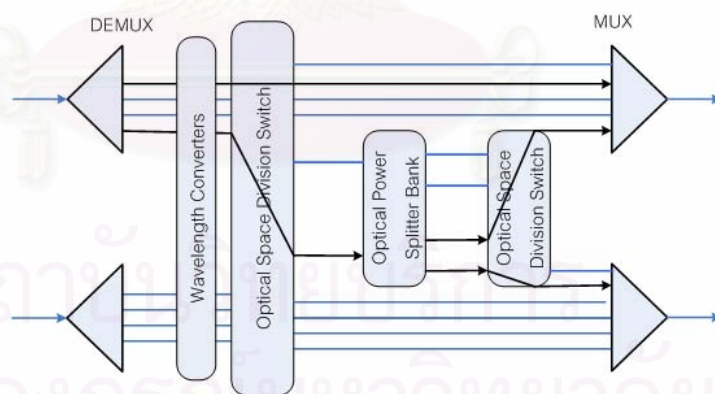
อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับสร้าง light-tree บนโครงข่ายคือตัวแยกกำลังทางแสง (Optical Power Splitter) ซึ่งจะถูกนำมาติดตั้งในออปติคอลครอสคอนเนกต์ของโครงข่าย สำหรับออปติคอลครอสคอนเนกต์ที่ติดตั้งตัวแยกกำลังทางแสง จะเรียกว่า ออปติคอลครอสคอนเนกต์ที่มีความสามารถรองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ หรือ (Multicast-Capable OXCs, MC-OXCs) ที่ MC-OXCs ส่วนที่เป็นตัวแยกกำลังทางแสงมีความสามารถที่จะทำสำเนาและแยกสัญญาณทางแสงที่เข้ามาทางอุปกรณ์รับข้อมูลและส่งต่อไปยังกลุ่มทางออกของสัญญาณ โดยทั่วไปตัวแยกกำลังทางแสงที่นำมาใช้ในทางปฏิบัติจะมีการกำหนดจำนวนระดับขั้นของการแยกสัญญาณสูงสุด หรือ Δ (fanout parameter) เพราะ Δ จะเป็นฟังก์ชันสำคัญในการกำหนดรูปร่างของ light-tree อีกทั้งยังมีผลกระทบโดยตรงต่อวิธีการออกแบบการปกป้องโครงข่ายสำหรับ light-tree



รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมของ MC-OXC

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าข้อมูลที่มาถึงด้านอินพุทของ MC-OXC จะถูกดีมัลติเพลกซ์ให้ ความยาวคลื่นแยกออกจากกัน แต่ละความยาวคลื่นที่แยกออกจากกันนั้นจะบรรจุสัญญาณ แตกต่างกันไป ถ้าสัญญาณใดไม่ได้ถูกนำไปใช้สำหรับการส่งข่าวสารแบบมัลติคาสต์ สัญญาณ ดังกล่าวจะส่งตรงไปยังด้านเอาต์พุท ในทางตรงกันข้ามถ้าสัญญาณใดที่ถูกนำไปใช้สำหรับการส่ง ข่าวสารแบบมัลติคาสต์ สัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งไปยังด้านอินพุทของตัวแยกกำลังทางแสง ซึ่ง จะทำสำเนาของสัญญาณและส่งต่อสัญญาณไปยังสวิตช์เว้นระยะห่างเชิงแสง (Optical Space Switch) เพื่อที่จะส่งออกไปยังด้านเอาต์พุทที่เหมาะสม แต่เนื่องจากสัญญาณที่ผ่านตัวแยกกำลัง ทางแสงกำลังงานจะลดลง ดังนั้นอาจจะต้องนำวงจรขยายทางแสง (Optical Amplifier) ไปติดตั้ง ภายในตัวแยกแสง (Optical Splitter) เพื่อที่จะขยายสัญญาณให้ดีขึ้น

สถาปัตยกรรมของ MC-OXC อีกแบบหนึ่งจะมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ที่ MC-OXC ด้านอินพุท ดังรูปที่ 2.3 จุดมุ่งหมายหลักในการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ที่ MC-OXC คือเพื่อที่จะลดการชนกันของความยาวคลื่น ซึ่งเป็นผลมาจากสองสัญญาณแสงที่ใช้ ความยาวคลื่นเดียวกันจำเป็นต้องออกจากเอาต์พุทของเส้นใยนำแสงเดียวกัน ดังนั้นการใช้ อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะทำให้ลดการชนกันของความยาวคลื่น และลดจำนวน เส้นใยนำแสงที่ใช้เชื่อมต่อกับ MC-OXCs ด้วยเหตุผลข้างต้น ส่งผลให้จำนวนเส้นใยนำแสงสำหรับ การรองรับความต้องการทราฟฟิกในโครงข่ายทั้งหมดลดลง



รูปที่ 2.3 สถาปัตยกรรมของ MC-OXC กับความสามารถในการเปลี่ยนความยาวคลื่น

2.2 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นบนโครงข่าย DWDM

วิทยานิพนธ์นี้จะจัดสรรเส้นทางให้โครงข่ายมีโครงสร้างแบบ light-tree เพื่อที่จะใช้ รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ และยอมให้สายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อระหว่างคู่โหนดสามารถที่จะ ประกอบด้วยกลุ่มของเส้นใยแสง หรือกล่าวได้ว่าเป็นการเชื่อมต่อแบบหลายเส้นใย แทนที่จะ

พิจารณาแบบระบบเส้นใยเดี่ยว (single-fiber system) ซึ่งพบในงานวิจัยทั่วไป [16] เพราะโครงข่าย DWDM ที่พิจารณาแบบระบบหลายเส้นใย มีข้อดีในแง่ของการใช้ประโยชน์จากเส้นใยแสงภายใต้โหนดของ ทราฟฟิกชนิดเดียวกัน การจัดการดูแลรักษาโครงข่าย [17, 18] อีกทั้งยังง่ายต่อการออกแบบสัญญาณของโครงข่าย [15] นอกจากนี้เส้นใยแสงจะมีความสามารถในการใช้ประโยชน์จากความยาวคลื่น (wavelength utilization) ได้มากขึ้นอีกด้วย [19, 20]

ส่วนการจัดสรรความยาวคลื่น รูปแบบการจัดสรรความยาวคลื่นให้แต่ละ light-tree ที่จะนำมาศึกษามีอยู่ 2 รูปแบบ [16] คือ

1. วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ light-tree (Light-Tree Wavelength Allocation Method, LT)

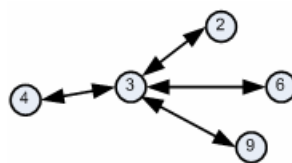
การจัดสรรความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายในรูปแบบนี้ OXCs ทั้งหมดในโครงข่ายไม่จำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น เพราะสำหรับวิธีนี้เราจะเลือกใช้เพียงหนึ่งความยาวคลื่นต่อหนึ่ง light-tree เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งสายเชื่อมโยง light-tree ที่ได้รับผลกระทบจะได้รับการจัดสรรเส้นทางใหม่ โดยที่จะกำหนดให้ความยาวคลื่นที่จัดสรรให้กับ light-tree ที่จัดสรรใหม่ต้องเป็นความยาวคลื่นเดียวกับ light-tree เดิม ดังรูปที่ 2.4 (ก)

2. วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ light-tree เสมือน (Virtual Light-Tree Wavelength Allocation Method, VLT)

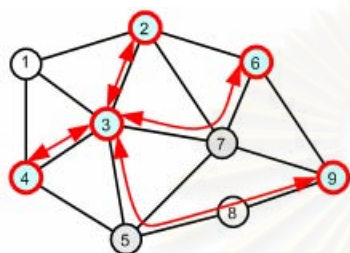
สำหรับรูปแบบนี้แต่ละสายเชื่อมโยงทางกายภาพของ light-tree สามารถที่จะถูกจัดสรรความยาวคลื่นค่าแตกต่างกันได้ เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งสายเชื่อมโยงและ light-tree ได้รับผลกระทบ โครงข่ายมีความสามารถที่จะจัดสรรความยาวคลื่นใหม่ให้กับเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรใหม่ของ light-tree ดังกล่าว โดยที่ความยาวคลื่นที่จัดสรรให้ใหม่นั้นไม่จำเป็นที่จะต้องเหมือนกับกับความยาวคลื่นที่ได้รับการจัดสรรในภาวะปกติ ดังนั้น OXCs ของโครงข่ายที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นลักษณะนี้จะต้องมีความสามารถที่จะแปลงผันได้ทุกความยาวคลื่น ดังรูปที่ 2.4 (ข)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น การเชื่อมต่อโครงข่ายทางแสงที่ใช้รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์หรือ กลุ่มของโหนดที่ใช้รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ (multicast session) จะใช้โครงสร้างแบบ light-tree [16] ได้ให้คำจำกัดความของ light-tree ว่า light-tree คือ กลุ่มของ optical branch ซึ่ง optical branch คือ เส้นทางแสง (lightpath) ที่เชื่อมต่อระหว่างโหนดโหนดซึ่งเป็นสมาชิกของมัลติคาสต์เซชัน และทุกสมาชิกของมัลติคาสต์เซชันจะถูกจัดให้อยู่ในรูปของ light-tree รูปที่ 6 (ก) แสดงการเชื่อมต่อของโครงข่ายทางแสงที่ใช้โครงสร้างแบบ 2 light-tree ในสภาวะปกติ แต่ละ light-tree จะประกอบด้วยกลุ่มของ optical branch จะเห็นว่า light-tree แรก

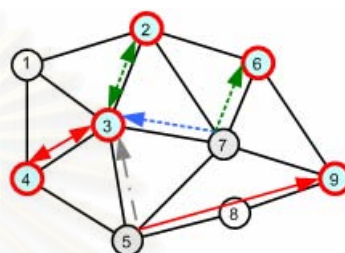
จะประกอบด้วยโนดที่ 2-3-4-6 ซึ่งมี 3 optical branch ในขณะที่ light-tree ที่สองจะประกอบด้วยโนดที่ 5-7-9 ซึ่งมี 2 optical branch



(ก) light-tree



(ข) LT



(ค) VLT

รูปที่ 2.4 รูปแบบการจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่แต่ละ light-tree

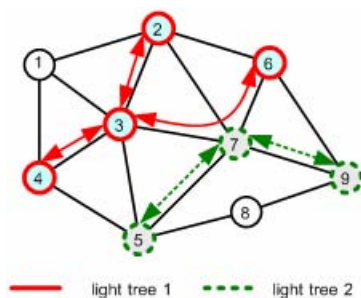
2.3 การจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย

2.3.1 วิธีการปกป้อง Light-tree แบบกำหนดเส้นทางใหม่ทั้งหมด (Light-Tree Reconfiguration, LR)

สำหรับวิธีการปกป้อง light-tree แบบกำหนดเส้นทางใหม่ทั้งหมด หรือ LR นี้ เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง light-tree ทั้งหมดจะถูกปลดและจะได้รับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นใหม่ทั้งหมดเพื่อหลีกเลี่ยงจากข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย แม้ว่าจะมีบาง light-tree ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายแต่ light-tree เหล่านั้นก็ต้องได้รับการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งหมดเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.5 (ข)

2.3.2 วิธีการปกป้อง Light-tree แบบกำหนดเส้นทางใหม่เฉพาะ light-tree ที่ได้รับผลกระทบ (Light-Tree-Interrupted Reconfiguration, LIR)

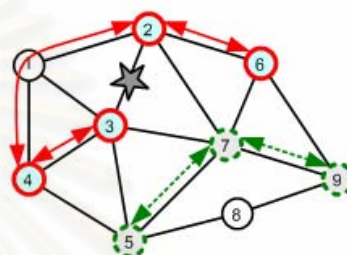
สำหรับวิธีการปกป้อง light-tree แบบ LIR นี้ วิธีการปกป้องโครงข่ายจะมีลักษณะเหมือนกับ LR แต่ LIR จะจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นใหม่ให้เฉพาะ light-tree ที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเท่านั้น ดังรูปที่ 2.5 (ค)



(ก) การเชื่อมต่อในสภาวะปกติ



(ข) LR



(ค) LIR

รูปที่ 2.5 รูปแบบการปกป้อง light-tree สำหรับมัลติคาสต์กราฟฟิบนโครงข่าย DWDM

2.4 ลักษณะการวางเส้นทางนำแสงสำรอง

วิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคการวางเส้นทางนำแสงสำรองที่เรียกว่า SW+WW+SR (Spare Wavelength Channel + Working Wavelength Channel Method with Stub Release) ซึ่งการวางเส้นทางนำแสงสำรองในลักษณะนี้ เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงข่าย ช่องสัญญาณที่เคยใช้เป็นช่องสัญญาณในสภาวะปกติของกิ่งเชิงแสงที่ได้รับผลกระทบ สามารถที่จะนำมาใช้ในการจัดสรรช่องสัญญาณใหม่ให้กับโครงข่ายได้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของจัดสรรความจุสำรองสำหรับการปกป้องโครงข่าย

ลักษณะการกำหนด ความยาวคลื่น	โครงข่ายไม่สามารถ แก้ไขปัญหานี้ด้วย- เชื่อมโยงขัดข้อง	กลยุทธ์การปกป้องโครงข่าย	
		แบบกำหนดเส้นทางใหม่ทั้งหมด	แบบกำหนดเส้นทางใหม่ เฉพาะ light-tree ที่กระทบ
วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง	LT	LR_LT	LIR_LT
วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง เสมือน	VLT	LR_VLT	LIR_VLT

บทที่ 3

การจัดสรรความจุสำรองของโครงข่าย DWDM สำหรับรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก โดยใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ Tabu Search

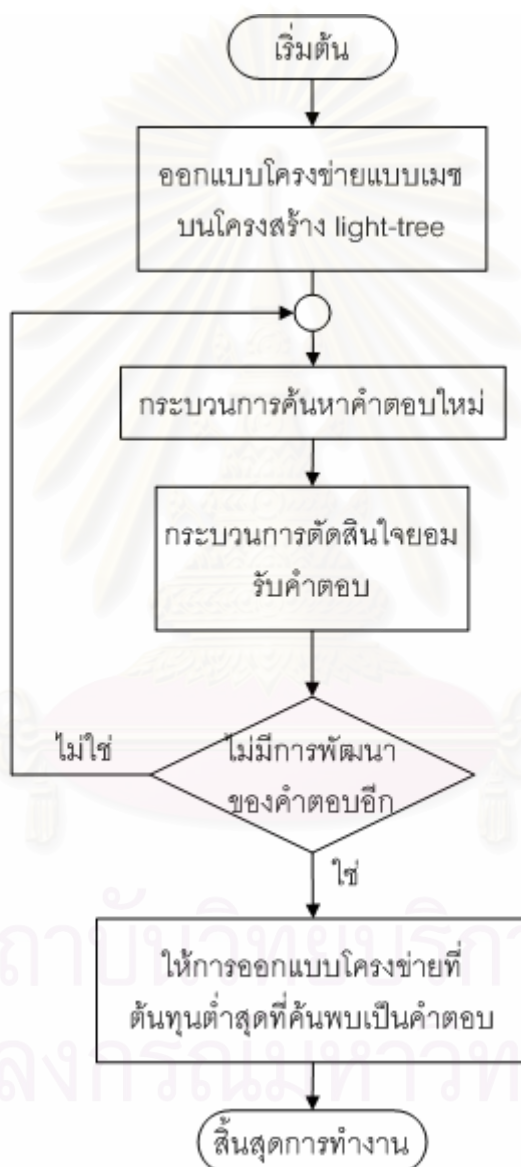
จากการศึกษาถึงผลเฉลยที่ได้จากการจำลองปัญหาด้วยสมการคณิตศาสตร์ใน [16] ซึ่งได้นำเสนอและทดสอบวิธีปกป้องโครงข่ายสำหรับรองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์โดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า ILP พบว่ากระบวนการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นเมื่อทดสอบกับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่จะใช้เวลาค่อนข้างมาก ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการนำอัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานการค้นหาแบบทาบูมาใช้ในการจัดสรรความจุสำรองของโครงข่าย DWDM แทนวิธีการดังกล่าว

3.1 อัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานของการค้นหาแบบทาบู

การหาผลเฉลยของปัญหาแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนสำคัญ คือ กระบวนการค้นหาคำตอบใหม่และกระบวนการตัดสินใจเพื่อยอมรับคำตอบ กระบวนการค้นหาคำตอบใหม่ คือ การปรับเปลี่ยนการออกแบบโครงข่ายจากเดิมไปสู่การออกแบบที่อาจจะให้ต้นทุนดีขึ้น คำตอบใหม่นี้ อาจได้รับการยอมรับหรือไม่ก็ได้ โดยการพิจารณาจะทำในกระบวนการตัดสินใจเพื่อยอมรับคำตอบ กระบวนการค้นหาคำตอบใหม่และกระบวนการตัดสินใจเพื่อยอมรับคำตอบจะถูกทำซ้ำหลาย ๆ รอบ (iterative) จนกว่าจะได้คำตอบเป็นที่น่าพอใจหรือไม่เห็นการพัฒนาของคำตอบอีกภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ ขั้นตอนการปรับปรุงการออกแบบให้ดีขึ้นด้วยอัลกอริทึมฮิวริสติก มีผังงานดังรูปที่ 3.1

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะนำอัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานการค้นหาแบบทาบู (Tabu Search หรือ TS) มาใช้สำหรับปรับปรุงการออกแบบปกป้องโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยงซึ่ง TS คือ อัลกอริทึมฮิวริสติกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการประมาณค่าผลเฉลยของสมการในวิธีการหาคำตอบของปัญหาที่สนใจเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนี้ TS ยังใช้ในการแก้ปัญหาที่คำตอบในกระบวนการปรับปรุงการออกแบบโครงข่ายมักจะติดอยู่ใน Local Optimum ด้วยการเพิ่มความหลากหลายของชุด คำตอบพร้อม ๆ กับการยอมรับคำตอบใหม่ทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบจะให้ต้นทุนดีขึ้น, เท่าเดิม หรือด้อยลงก็ตาม ในการเพิ่มความหลากหลายของชุดคำตอบของ TS จะป้องกันไม่ให้คำตอบใหม่ซ้ำกับคำตอบเดิมในรอบก่อน ๆ โดยในแต่ละรอบของกระบวนการค้นหาคำตอบใหม่จะมีการพิจารณาการย้าย (move) บางอย่างที่มีโอกาสทำให้

คำตอบใหม่ที่จะค้นหาซ้ำกับคำตอบเดิมในรอบก่อน ๆ การย้ายเหล่านี้จะถูกห้ามและถูกบันทึกในหน่วยความจำที่เรียกว่า tabu list อย่างไรก็ตาม การย้ายที่อยู่ในหน่วยความจำนี้จะถูกห้ามอยู่เพียงชั่วคราวเท่านั้น หลังจากนั้นจะได้รับการลบออกจากตารางและอนุญาตให้กระทำดังเดิม ดังนั้นการกำหนดความยาวหรือขนาดของ tabu list คือ การกำหนดระยะเวลาที่การย้ายจะถูกห้ามนั่นเอง



รูปที่ 3.1 ผังงานของอัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับการปรับปรุงการออกแบบโครงข่าย [25]

ขั้นตอนการทำงานของ TS เริ่มจาก กำหนดผลเฉลยที่เป็นไปได้ (current solution, S) ในเซตจำกัดของผลเฉลยที่เป็นไปได้ (search space, Ω) เซตของผลเฉลยที่ได้มาจากการเคลื่อนที่อย่างง่าย (simple move) $q \in Q$ หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ผลเฉลยข้างเคียง (neighborhood,

$N(S)$) เมื่อ Q คือ เซตของการเคลื่อนที่อย่างง่ายที่ยอมให้ใช้เป็นผลเฉลย และ $N(S)$ จะถูกนิยามสำหรับแต่ละ S ตัวอย่างผลเฉลยส่วนเล็กๆของ $N(S)$ หรือ V^* จะถูกสร้างขึ้นซึ่ง $V^* \subset N(S)$ และ V^* จะเรียกว่า ผลเฉลยทดสอบ หรือ trial solution ($|V^*| = n \ll |N(S)|$) เมื่อได้ V^* เราจะสามารถเลือกผลเฉลยที่ดีที่สุด (best solution, S^*) ไว้สำหรับการพิจารณาการหาผลเฉลยถัดไป การเคลื่อนที่ไปยัง S^* จะได้รับการพิจารณาถัดไปเมื่ออยู่ในภาวะที่ยอมรับได้ การเลือกการเคลื่อนที่ที่ดีจะต้องอยู่บนข้อสมมุติว่า การเคลื่อนที่นั้นจะต้องมีความเป็นไปได้ที่จะมีผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่เหมาะสมมากที่สุดแม้ว่า S^* นั้นไม่สามารถที่จะทำให้ S ดีขึ้น แต่ S^* ก็ยังคงนำมาใช้ในการพิจารณาในการหาผลเฉลย อย่างไรก็ตามคุณสมบัติข้างต้นก็ยังคงมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้มีการย้อนกลับไปที่ผลเฉลยก่อนหน้า ดังนั้นจะแก้ปัญหาโดยใช้ tabu list ซึ่ง tabu list นี้ คือหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บระยะเวลาของข้อมูลที่ต้องการปิดไว้ไม่ให้นำมาใช้ในการหาผลเฉลย เพื่อป้องกันการกลับไปยังผลเฉลยก่อนหน้า ดังนั้นการจำกัดการเคลื่อนที่ (tabu restriction) ก็อาจจะทำให้มองไม่เห็นการเคลื่อนที่ที่จะทำให้ได้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นเราจะมีเกณฑ์การยอมรับคำตอบ (aspiration criterion) ตั้งไว้สำหรับมาช่วยในการยืดหยุ่นการดำเนินการของ tabu list และทำให้แน่ใจได้ว่าจะสามารถยอมรับการเคลื่อนที่นี้ได้ ซึ่งถ้า S^* ไม่อยู่ใน aspiration criterion แล้ว จะต้องมีการกำหนดการเคลื่อนที่ขึ้นมาอีกครั้ง และเริ่มดำเนินการหาผลเฉลยตามขั้นตอนข้างต้นอีกจนกว่าจะครบจำนวนรอบตามที่ได้กำหนดไว้

3.2 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมวิวัฒนาการบนพื้นฐานของการค้นหาแบบทาบูเพื่อจัดสรร ความจุสำรองให้กับโครงข่าย DWDM

เนื่องจากการจัดสรรความจุสำรองของโครงข่าย DWDM ในวิทยานิพนธ์นี้ จำเป็นที่จะต้องทราบเส้นทางและความยาวคลื่นในสภาวะปกติของโครงข่ายก่อน เพราะการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นดังกล่าว มีผลกระทบโดยตรงต่อการจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่ายในเชิงของจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่จะต้องวางเพิ่มเข้าไปในโครงข่าย เพื่อปกป้องโครงข่ายให้ทำงานได้เช่นเดิม ดังนั้นการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นในสภาวะปกติของโครงข่ายจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งการเส้นทางในสภาวะปกติถือเป็นปัญหาที่พบในอันดับแรกถ้านำ ILP มาใช้ในการหาคำตอบ เพื่อเป็นการลดปัญหาในขั้นต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำอัลกอริทึมวิวัฒนาการบนพื้นฐานของการค้นหาแบบทาบูมาใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ก่อนที่จะนำคำตอบที่ได้ไปใช้ในการจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งสายเชื่อมโยงเป็นลำดับถัดไป

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ลักษณะและข้อสมมุติของโครงข่ายที่นำมาใช้นั้น จะแทนที่โครงข่าย DWDM ที่พิจารณาด้วยกราฟแบบไม่แสดงทิศทาง (Undirected Graph) $G(V, E)$ ซึ่ง

ประกอบไปด้วยเซตของ MC-OXC โหนด (V) จำนวน N โหนด, $|V| = N$ และเซตของข่ายเชื่อมโยทางกายภาพ (Physical Links) (E) แบบไม่แสดงทิศทาง (Undirected Links) จำนวน L ข่ายเชื่อมโย, $|E| = L$ โดยในแต่ละข่ายเชื่อมโยจะประกอบด้วยกลุ่มของเส้นใยนำแสงที่ทำหน้าที่รองรับเส้นทางการใช้ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางกับปลายทาง รวมทั้งทำการกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นมีจำนวนจำกัดเท่ากับ M นอกจากนี้ยังกำหนดให้แต่ละโหนด MC-OXC มีการติดตั้งอุปกรณ์ในการทำมัลติคาสต์เพื่อทำการคัดลอกและแยก (Split) สัญญาณแสงออกเป็นสัญญาณย่อยจำนวนหนึ่ง ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่ร้องขอข้อมูลดังกล่าวเป็นจำนวนมากได้ นอกจากนี้ยังทำการกำหนดให้ปริมาณทราฟฟิกของแต่ละการเชื่อมต่อแบบมัลติคาสต์ในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกแบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Static Traffic) ซึ่งสอดคล้องกับหลักความเป็นจริงที่ว่า โครงข่ายที่ออกแบบในที่นี้เป็นโครงข่ายขนาดใหญ่มีพื้นที่ครอบคลุมกว้างขวางรวมทั้งมีการเชื่อมโยงในระดับประเทศหรือทวีป (Core Network) ดังนั้น เมื่อทำการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ ทราฟฟิกในโครงข่ายจะพบว่าระดับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทราฟฟิกจะมีน้อยมาก นาน ๆ ครั้งจึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงทำการกำหนดให้ปริมาณของทราฟฟิกในโครงข่ายที่พิจารณาเป็นปริมาณทราฟฟิกแบบคงที่ [16]

3.2.1 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในสภาวะปกติของโครงข่าย DWDM

ส่วนประกอบของอัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานการค้นหาแบบทาบูนเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่าย เมื่อโครงข่ายเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโย มีดังนี้

3.2.1.1 การเข้ารหัส (Encoding)

กำหนดให้ เวกเตอร์ $\mathbf{T}$ คือเวกเตอร์ที่ใช้แทนเซตของดรรชนีของต้นไม้เชิงแสงในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันที่ถูกจัดสรรให้กับโครงข่าย ซึ่งมีจำนวนสมาชิก $|R|$ ตัว

$$\mathbf{T} = [\mathbf{T}_{r_{k=1}} \ \mathbf{T}_{r_{k=2}} \ \mathbf{T}_{r_{k=3}} \ \dots \ \mathbf{T}_{r_{k=|R|}}] \quad (1)$$

ซึ่งเวกเตอร์ $\mathbf{T}_{r_k}$ จะประกอบด้วยดรรชนีของต้นไม้เชิงแสง ($i_{r_k}(n)$, $1 \leq n \leq t_{r_k}$) ที่ถูกนำไปใช้ในการรองรับแต่ละทราฟฟิกของเซสชันที่ k

$$\mathbf{T}_{r_k} = [i_{r_k}(1) \ i_{r_k}(2) \ i_{r_k}(3) \ \dots \ i_{r_k}(t_{r_k})] \quad (2)$$

หมายเหตุ กำหนดให้

$K = |R|$ คือ จำนวนมัลติคาสต์เซตชั้นทั้งหมดในโครงข่ายที่ใช้ทดสอบ

$r_k(s_k, D_k)$ คือ กลุ่มมัลติคาสต์เซตชั้นที่ k ที่มี s_k เป็นโนดต้นทางและ D_k เป็นเซตของโนดปลายทาง

t_{r_k} คือ ปริมาณทราฟฟิกของเซตชั้นที่ k

3.2.1.2 ผลเฉลยตั้งต้น (Initial Solution)

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผลเฉลยตั้งต้น (initial solution) ในตอนเริ่มต้นของกระบวนการค้นหาคำตอบจะกำหนดให้แต่ละทราฟฟิกของแต่ละเซตชั้นเลือกต้นไม้เชิงแสงที่สั้นที่สุดที่ใช้รองรับทราฟฟิกนั้นมาเป็นคำตอบเริ่มต้นให้กับกระบวนการค้นหาคำตอบ กระบวนการค้นหาคำตอบจะเริ่มต้นโดยการประเมินค่าคำตอบที่ได้จากเซตของผลเฉลยข้างเคียงของผลเฉลยตั้งต้นนั้น เพื่อที่จะนำไปเป็นค่าคำตอบในขณะนั้น และเป็นค่าคำตอบเริ่มต้นของการค้นหาคำตอบในรอบถัดไป ซึ่งโครงสร้างผลเฉลยข้างเคียง (neighborhood structure) จะกล่าวไว้ใน 3.2.1.4

3.2.1.3 ฟังก์ชันการประเมิน (Evaluate Function)

โครงข่ายจะได้รับการประเมินโดยใช้เวกเตอร์ผลเฉลย $\mathbf{X}$

$$\mathbf{X} = [\mathbf{V}(\mathbf{T}_{r_{k=1}}) \quad \mathbf{V}(\mathbf{T}_{r_{k=2}}) \quad \mathbf{V}(\mathbf{T}_{r_{k=3}}) \quad \dots \quad \mathbf{V}(\mathbf{T}_{r_{k=|R|}})]^T \quad (3)$$

ซึ่ง $\mathbf{V}(\mathbf{T}_{r_k})$ ประกอบด้วยตัวแปรบูลีนที่ใช้ในการบอกสถานะของข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับการจัดสรรให้กับ ทราฟฟิกของเซตชั้นที่พิจารณา

$$\mathbf{V}(\mathbf{T}_{r_k}) = \begin{bmatrix} X_{i_{r_k(1),l=1}} & X_{i_{r_k(1),l=2}} & X_{i_{r_k(1),l=3}} & \dots & X_{i_{r_k(1),l=L}} \\ X_{i_{r_k(2),l=1}} & X_{i_{r_k(2),l=2}} & X_{i_{r_k(2),l=3}} & \dots & X_{i_{r_k(2),l=L}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i_{r_k(t_{r_k}),l=1}} & X_{i_{r_k(t_{r_k}),l=2}} & X_{i_{r_k(t_{r_k}),l=3}} & \dots & X_{i_{r_k(t_{r_k}),l=L}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยที่ $x_{i_{r_k(n),l}}$ จะเท่ากับหนึ่งถ้าต้นไม้เชิงแสงที่มีดรรชนี $i_{r_k(n)}$ ผ่านข่ายเชื่อมโยงกายภาพ (physical link, l) และเป็นศูนย์ถ้าต้นไม้เชิงแสงที่มีดรรชนี $i_{r_k(n)}$ ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงกายภาพ สำหรับโครงข่ายที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการจะมีค่าเท่ากับ

$$\sum_{l=1}^L \left[\left(\sum_{k=1}^{|R|} \sum_{n=1}^{t_{r_k}} x_{i_{r_k(n),l}} \right) / M \right] \quad \text{ในขณะที่โครงข่ายที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LT}$$

จะคำนวณได้จากเวกเตอร์ผลเฉลย $\mathbf{X}$ ที่เพิ่มมิติของการกำหนดความยาวคลื่นให้กับข่ายเชื่อมโยงที่ใช้งาน, $x_{i_{r_k(n),l,w}}$ โดยมีขั้นตอนการกำหนดความยาวคลื่นให้แต่ละต้นไม้เชิงแสงดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณจำนวนการเชื่อมต่อทั้งหมดที่แต่ละข่ายเชื่อมโยงต้องการจาก $\sum_{k=1}^{|R|} \sum_{n=1}^{t_{r_k}} x_{i_{r_k(n),l}}$

ขั้นที่ 2 หาข่ายเชื่อมโยงที่มีการใช้งานมากที่สุด $l_{\max}$ และหาว่ามีต้นไม้เชิงแสงใดบ้างที่ต้องการใช้ข่ายเชื่อมโยง $l_{\max}$ ดังกล่าว

ขั้นที่ 3 กำหนดความยาวคลื่นให้กับต้นไม้เชิงแสงที่ได้ในขั้นที่ 2 ที่ $x_{i_{r_k(n),l_{\max}}}$ มีค่าเท่ากับ 1 จาก $\lambda=1$ ถึง $\lambda=M$ อย่างเป็นคาบตามลำดับ

ขั้นที่ 4 ทำขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 3 ซ้ำ โดยกำหนดความยาวคลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานให้กับต้นไม้เชิงแสงที่เหลือจนกระทั่งทุกต้นไม้เชิงแสงของโครงข่ายได้รับการจัดสรรความยาวคลื่น

ขั้นที่ 5 กำหนดให้ $\mathbf{B}$ เป็นเวกเตอร์ที่ใช้เก็บจำนวนการเชื่อมต่อทั้งหมดในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของแต่ละความยาวคลื่น $b_{\lambda,l}, 1 \leq l \leq L$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & b_{1,3} & \dots & b_{1,L} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & b_{2,3} & \dots & b_{2,L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M,1} & b_{M,2} & b_{M,3} & \dots & b_{M,L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ขั้นที่ 6 จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ โดยอาศัยเทคนิคการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LT จะมีค่าเท่ากับ $\sum_{l=1}^L \max(b_{\lambda,l} | 1 \leq \lambda \leq M)$

3.2.1.4 โครงสร้างผลเฉลยข้างเคียง (Neighborhood Structure)

ผลเฉลยข้างเคียงจะประกอบด้วยผลเฉลยทั้งหมดของผลเฉลยปัจจุบันที่มีเส้นทางแตกต่างกันหนึ่งเส้นทางจากเส้นทางทั้งหมดที่ได้รับการจัดสรร ตัวอย่างเช่น ผลเฉลยข้างเคียงที่เป็นไปได้ของผลเฉลยตัวอย่างที่กำหนดให้เวกเตอร์

$\mathbf{T} = [[2\ 3][12\ 15\ 17][23\ 27]]$ จะสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างที่เป็นไปได้สำหรับผลเฉลยข้างเคียงของเวกเตอร์ผลเฉลย $\mathbf{T}$

[[8 3][12 15 17][23 27]]	[[2 8][12 15 17][23 27]]	[[2 3][14 15 17][23 27]]
[[2 3][12 14 17][23 27]]	[[2 3][12 15 14][23 27]]	[[2 3][12 15 17][26 27]]
[[2 3][12 15 17][23 26]]	[[2 3][12 19 17][23 27]]	[[2 3][14 15 17][23 27]]

3.2.1.5 เกณฑ์การยอมรับคำตอบ (Aspiration Criterion)

เกณฑ์การยอมรับคำตอบเป็นเกณฑ์ที่กำหนดขึ้นเพื่อที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหาของการจำกัดการเคลื่อนที่เพื่อที่จะช่วยยืดหยุ่นการทำงานของ tabu list หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการยอมรับคำตอบในกรณีที่ระยะเวลาของผลเฉลยปัจจุบันที่อยู่ใน tabu list ยังคงเหลืออยู่

3.2.1.6 เกณฑ์การหยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Stop Criterion)

เกณฑ์การหยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ คือจำนวนรอบของกระบวนการค้นหาคำตอบที่ผลเฉลยไม่มีการพัฒนา ซึ่งจะทำให้กระบวนการหาคำตอบสิ้นสุด

3.2.2 การจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่าย DWDM เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR และ LIR

เนื่องจากการจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่าย DWDM จะใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานการค้นหาแบบทาบูเช่นเดียวกับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในสภาวะปกติ ดังนั้นองค์ประกอบของกระบวนการค้นหาผลเฉลยจึงเหมือนกัน แต่มีความแตกต่างตรงรายละเอียดซึ่งอยู่ในส่วนประกอบดังต่อไปนี้

3.2.2.1 การเข้ารหัส

กำหนดให้ เวกเตอร์ **ST** คือเวกเตอร์ที่ใช้แทนเซตของดรรชนีของต้นไม้เชิงแสงสำรองในแต่ละมิติคาสต์เซชันที่ถูกจัดสรรให้กับโครงข่าย ซึ่งมีจำนวนสมาชิก $|R|$ ตัว

$$\mathbf{ST} = [\mathbf{ST}_{r_{k=1}} \mathbf{ST}_{r_{k=2}} \mathbf{ST}_{r_{k=3}} \dots \mathbf{ST}_{r_{k=|R|}}] \quad (6)$$

เวกเตอร์ $\mathbf{ST}_{r_k}$ ประกอบด้วยดรรชนีของกิ่งเชิงแสงสำรองของทุกกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย $(i_{r_k,l'}(n), 1 \leq l' \leq L, 1 \leq n \leq t_{r_k})$ ที่ถูกนำไปใช้ในการรองรับแต่ละทราฟฟิกของเซชันที่ k

$$\mathbf{ST}_{r_k} = \begin{bmatrix} i_{r_k,l'=1}(1) & i_{r_k,l'=1}(2) & i_{r_k,l'=1}(3) & \dots & i_{r_k,l'=1}(t_{r_k}) \\ i_{r_k,l'=2}(1) & i_{r_k,l'=2}(2) & i_{r_k,l'=2}(3) & \dots & i_{r_k,l'=2}(t_{r_k}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{r_k,l'=L}(1) & i_{r_k,l'=L}(2) & i_{r_k,l'=L}(3) & \dots & i_{r_k,l'=L}(t_{r_k}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

จะพบว่า เวกเตอร์ **ST** มีการเข้ารหัสคล้ายกับเวกเตอร์ **T** ในหัวข้อ 3.2.1.1 แต่เวกเตอร์ **ST** จะเพิ่มจำนวนแถวให้เท่ากับ L แถว เพื่อรองรับการกำหนดดรชนีให้กับต้นไม้เชิงแสงสำรองในกรณีแต่ละข่ายเชื่อมโยงของแต่ละทราฟฟิกในโครงข่ายได้รับความเสียหาย

3.2.2.2 ผลเฉลยตั้งต้น

ผลเฉลยตั้งต้นของการจัดสรรความจุสำรอง จะกำหนดให้แต่ละทราฟฟิกของแต่ละเซสชันเลือกต้นไม้เชิงแสงสำรองที่สั้นที่สุดที่ใช้รองรับทราฟฟิกที่เมื่อแต่ละข่ายเชื่อมโยงเสียหาย มาเป็นคำตอบเริ่มต้นให้กับกระบวนการค้นหาคำตอบ กระบวนการค้นหาคำตอบจะเริ่มต้นโดยการประเมินค่าคำตอบที่ได้จากเซตของผลเฉลยข้างเคียงของผลเฉลยตั้งต้นนั้น เพื่อที่จะนำไปเป็นคำตอบในขณะนั้น และเป็นค่าคำตอบเริ่มต้นของการค้นหาคำตอบในรอบถัดไป ซึ่งโครงสร้างผลเฉลยข้างเคียงที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวไว้ใน 3.2.2.4

3.2.2.3 ฟังก์ชันการประเมิน

โครงข่ายจะได้รับการประเมินโดยใช้เวกเตอร์ผลเฉลย **SX**

$$\mathbf{SX} = [\mathbf{V}(\mathbf{ST}_{r_{k=1}}) \quad \mathbf{V}(\mathbf{ST}_{r_{k=2}}) \quad \mathbf{V}(\mathbf{ST}_{r_{k=3}}) \quad \dots \quad \mathbf{V}(\mathbf{ST}_{r_{k=R}})]^T \quad (8)$$

ซึ่ง $\mathbf{V}(\mathbf{ST}_{r_k})$ ประกอบด้วยตัวแปรบูลีนที่ใช้ในการบอกสถานะของข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับการจัดสรรให้กับทราฟฟิกของเซสชันที่พิจารณาเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยได้แสดงดังนี้

$$\mathbf{V}(\mathbf{ST}_{r_k}) = \begin{bmatrix} \mathbf{SX}_{i_{r_k(1),1}} & \mathbf{SX}_{i_{r_k(1),2}} & \mathbf{SX}_{i_{r_k(1),3}} & \dots & \mathbf{SX}_{i_{r_k(1),L}} \\ \mathbf{SX}_{i_{r_k(2),1}} & \mathbf{SX}_{i_{r_k(2),2}} & \mathbf{SX}_{i_{r_k(2),3}} & \dots & \mathbf{SX}_{i_{r_k(2),L}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{SX}_{i_{r_k(r_k),1}} & \mathbf{SX}_{i_{r_k(r_k),2}} & \mathbf{SX}_{i_{r_k(r_k),3}} & \dots & \mathbf{SX}_{i_{r_k(r_k),L}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

โดยที่ $\mathbf{sx}_{i_{r_k(n),l}}$ จะเท่ากับหนึ่งถ้าต้นไม้เชิงแสงสำรองที่มีดรชนี $i_{r_k,l}(n)$ ผ่านข่ายเชื่อมโยงกายภาพ (physical link, l) และเป็นศูนย์ถ้าต้นไม้เชิงแสงสำรองที่มีดรชนี $i_{r_k,l}(n)$ ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงกายภาพ

- การจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT

เนื่องจากการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT อยู่บนหลักการของ link-by-link [16] ดังนั้นจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการจะมีค่าดังนี้

กรณี LR

$$\sum_{l'=1}^L \left[\left(\left(\sum_{k=1}^{|R|} \sum_{n=1}^{t_k} s x_{i_k(n), l'} \right) - (total \text{ no. of released links of all light} - trees \text{ specify to link, } l') \right) / M \right] \quad (10)$$

กรณี LIR

$$\sum_{l'=1}^L \left[\left(\left(\sum_{k=1}^{|R|} \sum_{n=1}^{t_k} s x_{i_k(n), l'} \right) - (total \text{ no. of released links of effected light} - trees \text{ specify to link, } l') \right) / M \right] \quad (11)$$

- การจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LT

การจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางสำรองในวิทยานิพนธ์นี้ เส้นทางใหม่ที่ได้รับการจัดสรรให้แต่ละทราฟฟิกจะใช้ค่าความยาวคลื่นเดิมที่เคยใช้ในสภาวะปกติ

กรณี LR

จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการจะคำนวณได้จากชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 6 ดังที่กล่าวในหัวข้อ

3.2.1.3 กล่าวคือ จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่โครงข่ายต้องการจะเท่ากับ

$$\sum_{l'=1}^L (\max(b_{\lambda, l'} | 1 \leq \lambda \leq M) - total \text{ no. of released links all light} - trees \text{ specify to link, } l') \quad (12)$$

กรณี LIR

จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการจะคำนวณได้จากชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 6 ดังที่กล่าวในหัวข้อ

3.2.1.3 เช่นเดียวกับกรณี LR แต่จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่โครงข่ายต้องการจะเท่ากับ

$$\sum_{l'=1}^L (\max(b_{\lambda, l'} | 1 \leq \lambda \leq M) - total \text{ no. of released links effected light} - trees \text{ specify to link, } l') \quad (13)$$

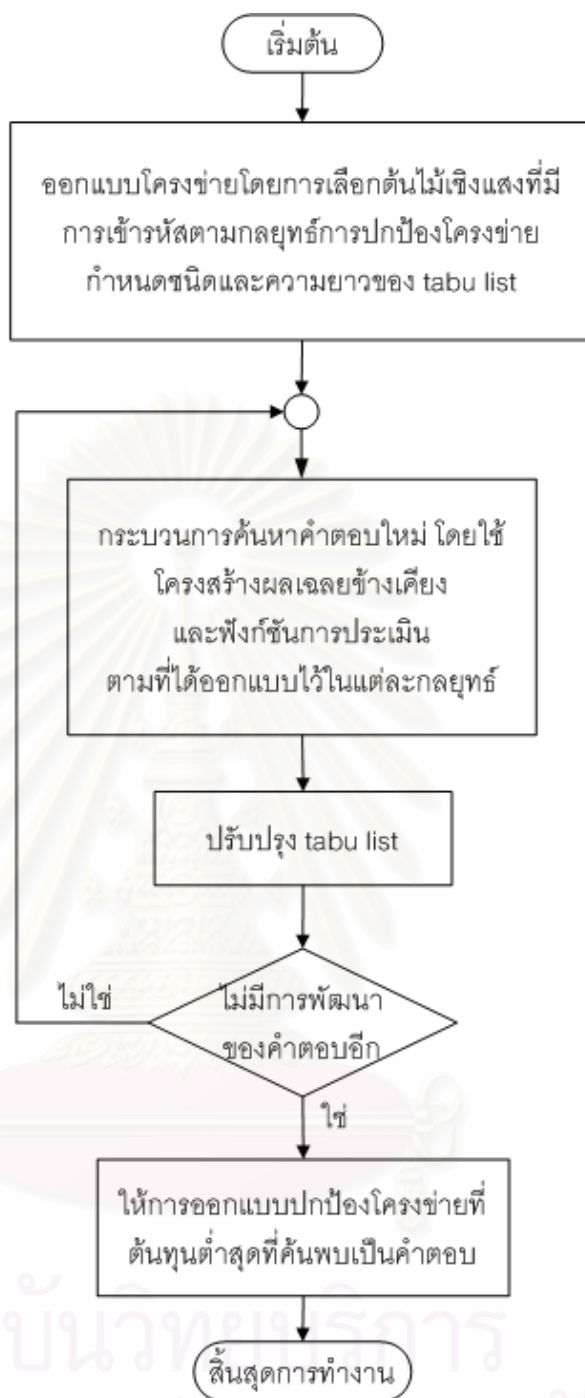
3.2.2.4 โครงสร้างผลเฉลยข้างเคียง

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงพิจารณาโครงสร้างผลเฉลยข้างเคียง 3 แบบ ดังนี้

(ก) 1 Diff neighborhood คือ ผลเฉลยข้างเคียงที่ประกอบด้วยผลเฉลยทั้งหมดของผลเฉลยปัจจุบันที่มีเส้นทางแตกต่างกันหนึ่งเส้นทางจากเส้นทางทั้งหมดที่ได้รับการจัดสรร หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เวกเตอร์ผลเฉลยทั้งหมดที่มีดรรชนีของเส้นทางสำรองที่แตกต่างกัน 1 ดรรชนีของเวกเตอร์ผลเฉลย

(ข) n VerticalDiff neighborhood คือผลเฉลยข้างเคียงที่ประกอบด้วยผลเฉลยทั้งหมดของผลเฉลยปัจจุบันที่มีเส้นทางแตกต่างกัน n เส้นทางในแนวตั้งจากเส้นทางทั้งหมดที่ได้รับการจัดสรร หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เวกเตอร์ผลเฉลยทั้งหมดที่มีดรรชนีของเส้นทางสำรองที่แตกต่างกัน n ดรรชนีในแนวตั้งของเวกเตอร์ผลเฉลย

(ค) L HorizontalDiff neighborhood คือ ผลเฉลยข้างเคียงที่ประกอบด้วยผลเฉลยทั้งหมดของผลเฉลยปัจจุบันที่มีเส้นทางแตกต่างกัน L เส้นทางในแนวนอนจากเส้นทางทั้งหมดที่ได้รับการจัดสรร หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เวกเตอร์ผลเฉลยทั้งหมดที่มีดรรชนีของเส้นทางสำรองที่แตกต่างกัน L ดรรชนีในแนวนอนของเวกเตอร์ผลเฉลย



รูปที่ 3.2 ผังงานการจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่าย ในแต่ละกลยุทธ์ด้วยอัลกอริทึมฮิวริสติก ที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหาแบบทวน

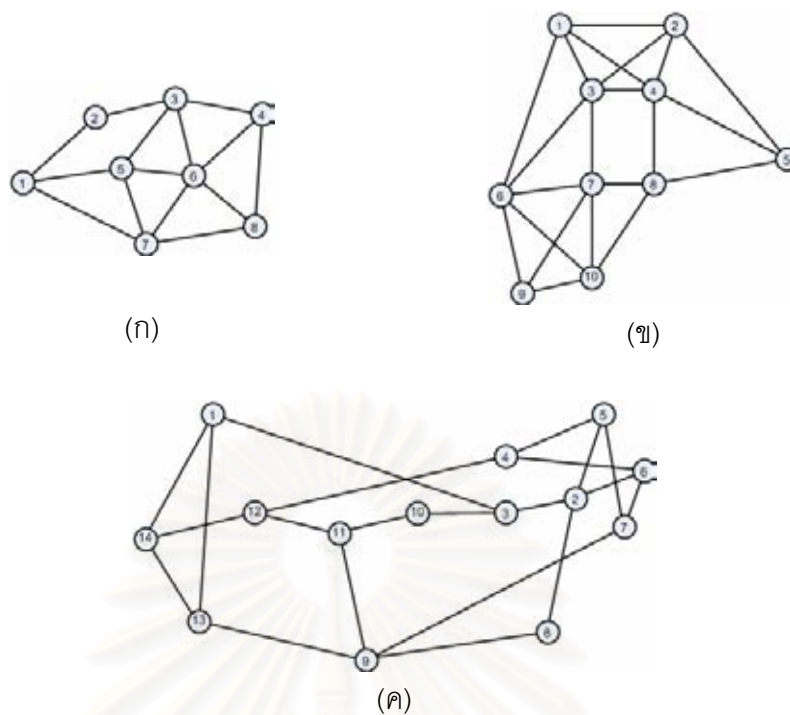
บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในอัลกอริทึมฮิวริสติก

ในบทนี้จะวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหาแบบทาบู พารามิเตอร์ที่จะศึกษาเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดโดยผู้ออกแบบโครงข่ายและส่งผลกระทบต่อกระบวนการออกแบบโครงข่าย อีกนัยหนึ่งคือ ส่งผลต่อต้นทุนของโครงข่ายที่ได้ออกแบบนั่นเอง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ในวิทยานิพนธ์นี้มีความจำเป็นที่จะต้องจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายในสถานะปกติด้วยอัลกอริทึมฮิวริสติกก่อน จึงจะสามารถนำค่าคำตอบที่ได้ไปใช้ในการจัดสรรเส้นทางสำรองให้กับโครงข่ายต่อไป ดังนั้นในบทนี้จะมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์พารามิเตอร์ในสถานะปกติของโครงข่ายซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการออกแบบปกป้องโครงข่ายที่ออกแบบไว้ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จากนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะนำพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในส่วนของการจัดสรรความจุสำรองของโครงข่ายต่อไป

การทดสอบและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในบทนี้จะทดสอบในกรณีที่ $M = 1$ โดยใช้โครงข่ายขนาดเล็ก 1 โครงข่าย และโครงข่ายขนาดใหญ่ 2 โครงข่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ โดยทั้งสามโครงข่ายจะมีลักษณะทางกายภาพและปริมาณทราฟฟิกดังนี้

1. โครงข่ายในรูป 4.1 (ก) เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโนด (Node) ทั้งหมด 8 โหนด และมีจำนวนข่ายเชื่อมโยง (Link) ทั้งหมด 14 ข่ายเชื่อมโยง ปริมาณทราฟฟิกที่ใช้ในการทดลองของแต่ละมัลติคาสต์เซชันจะมีค่าไม่เท่ากัน ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่ายมีค่าเท่ากับ 14 และเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกโครงข่ายนี้ว่า โครงข่าย 8N_14L
2. โครงข่ายในรูป 4.1 (ข) และ (ค) เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโนดทั้งหมด 10 โหนด และ 14 โหนด ตามลำดับ ซึ่งโครงข่ายทั้งสองมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมด 21 ข่ายเชื่อมโยงเท่ากัน และจะใช้ทราฟฟิกชุดเดียวกันในการทดลอง ปริมาณทราฟฟิกที่ใช้ในการทดลองของแต่ละมัลติคาสต์เซชันจะมีค่าไม่เท่ากัน ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่ายมีค่าเท่ากับ 15 และเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงขอเรียกโครงข่ายทั้งสองนี้ว่า โครงข่าย 10N_21L และ โครงข่าย 14N_21L ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 8N_14L (ข) โครงข่าย 7N_13L และ (ค) โครงข่าย 14N_21L

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

(ก)

session	demand	source	destination
1	2	4	3 5 8 9
2	2	4	1 6 10
3	3	4	7 3 2 9
4	3	4	10
5	2	4	9 7
6	1	4	2 5 6
7	2	4	1 8

(ข)

รูปที่ 4.2 ทราฟฟิกของโครงข่ายที่ใช้ทดสอบ (ก) โครงข่าย 8N_14L (ข) โครงข่าย 10N_21L และ โครงข่าย 14N_21L

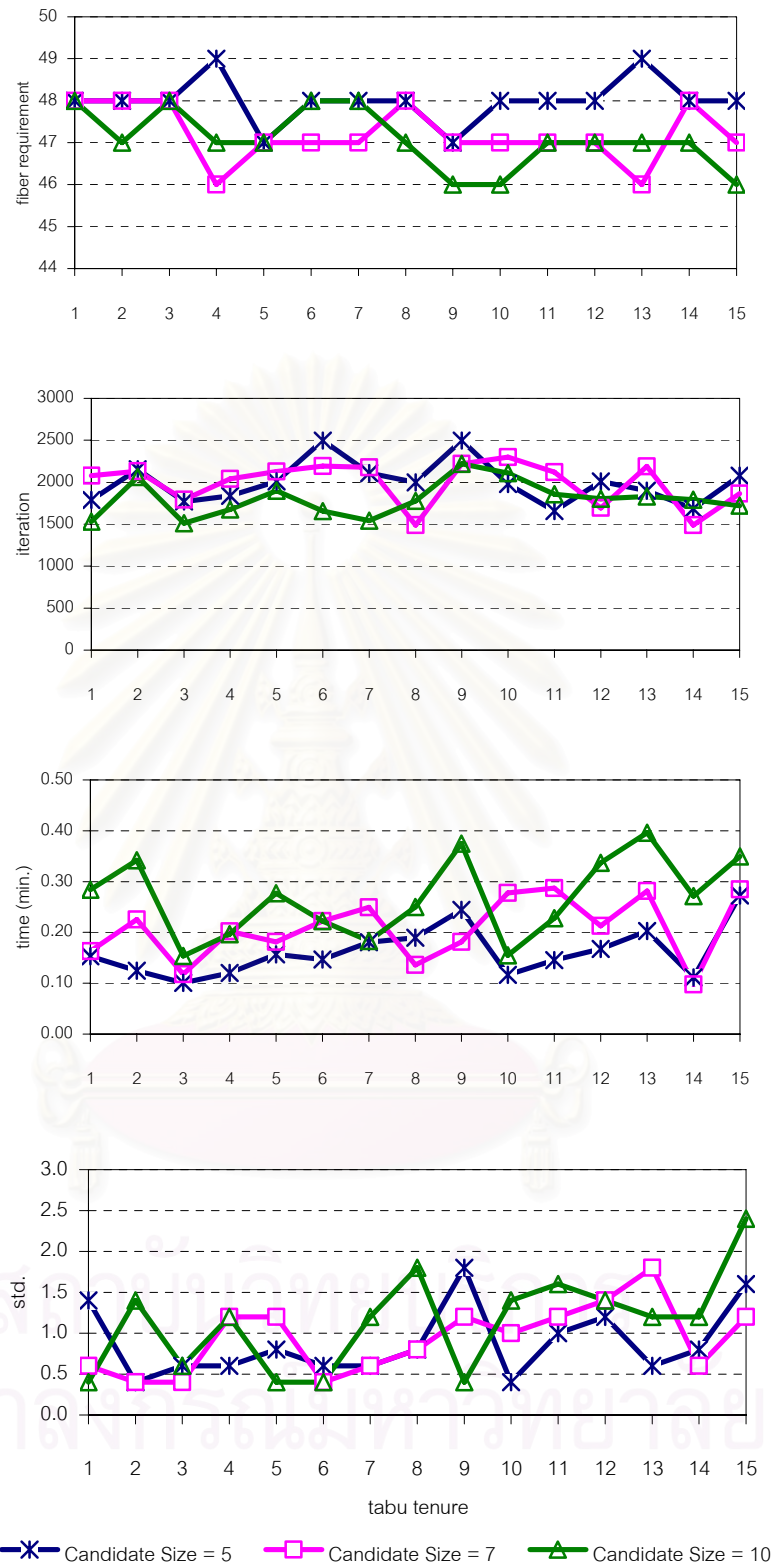
4.1 ผลของขนาด tabu list และ candidate size ที่มีต่ออัลกอริทึมฮิวริสติก

ในส่วนนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของ tabu list เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่และแบบพลวัตควบคู่กับผลกระทบที่ได้จากการกำหนด candidate size ให้ต่างกันในแต่ละโครงข่าย

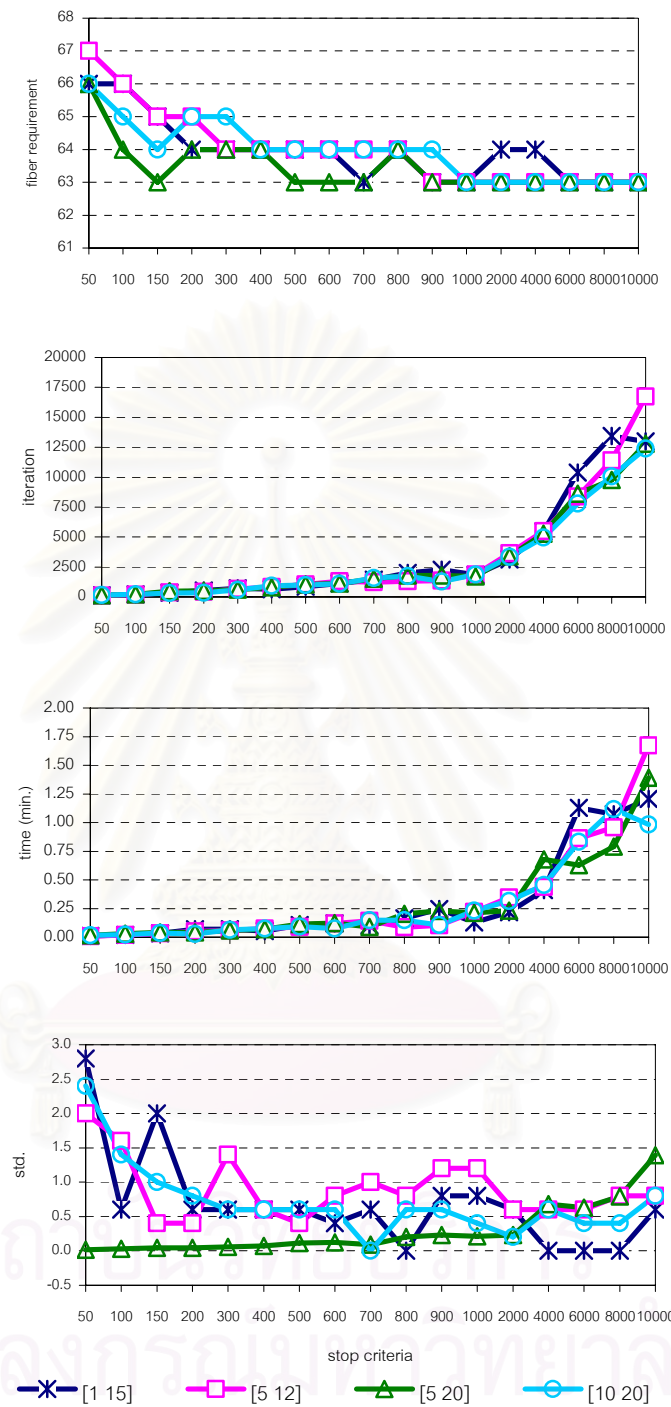
รูปที่ 4.3 และตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก เปรียบเทียบต้นทุนโครงข่าย เวลาในการหาคำตอบและจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบของแต่ละโครงข่าย โดยพิจารณา candidate size ที่ต่างกัน เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ พบว่า candidate size และ ขนาด tabu list มีผลต่อต้นทุน เวลาในการหาคำตอบและจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ โดยพิจารณาผลกระทบดังกล่าวกับโครงข่าย 8N_14L เป็นตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.3 พบว่าแต่ละ candidate size ที่กำหนดจะให้ค่าต้นทุนโครงข่ายต่ำสุดใกล้เคียงกัน โดยที่ให้ค่าต้นทุนต่ำสุดเท่ากับ 47 เส้น เมื่อใช้ candidate size เท่ากับ 5 และให้ค่าต้นทุนต่ำสุด เท่ากับ 46 เส้น เท่ากัน เมื่อใช้ candidate size เท่ากับ 7 และ 10 ซึ่งจะเห็นว่า จำนวนรอบและเวลาในการหาต้นทุนต่ำสุดของโครงข่ายที่แต่ละ candidate size มีค่าแตกต่างกันไม่มาก เพราะโครงข่าย 8N_14L เป็นโครงข่ายขนาดเล็ก ทำให้กระบวนการสุ่มชุดคำตอบให้ค่าคำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าต้นทุนต่ำสุดมีโอกาสเกิดขึ้นได้บ่อยเพราะเส้นทางที่ใช้ในการเลือกชุดคำตอบมีไม่มาก นอกจากนี้จะเห็นว่า ขนาดของ tabu list ก็มีส่วนที่ทำให้ต้นทุนต่ำสุด จำนวนรอบและเวลาในการหาต้นทุนต่ำสุดของโครงข่ายต่างกัน กล่าวคือ โครงข่ายพบค่าต้นทุนต่ำสุดเมื่อ candidate size มีขนาดเท่ากับ 5 และใช้ tabu list ขนาด 5 และ 9 ในขณะที่ถ้าใช้ candidate size มีขนาดเท่ากับ 7 แล้วจะต้องใช้ tabu list ขนาด 4 และ 13 หรือใช้ tabu list ขนาด 9 ถึง 10 และ 15 เมื่อ candidate size มีขนาดเท่ากับ 10 เป็นต้น เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละพารามิเตอร์ (candidate size และ ขนาด tabu list) ที่ให้ค่าต้นทุนโครงข่ายต่ำสุด ควบคู่กับระยะเวลาในการหาค่าต้นทุนโครงข่ายต่ำสุด พบว่าที่ candidate size เท่ากับ 10 และ tabu list มีขนาดเท่ากับ 9 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดในขณะที่ให้ค่าต้นทุนโครงข่ายต่ำสุดด้วย ดังนั้นกระบวนการหาต้นทุนโครงข่าย 8N_14L ต่ำสุด candidate size ที่เหมาะสมควรจะเท่ากับ 10 แต่เนื่องจากยังมีพารามิเตอร์บางตัว (stop criteria) มีความสัมพันธ์กับขนาดของ tabu list และส่งผลต่อกระบวนการหาต้นทุนโครงข่ายต่ำสุดซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป ดังนั้นขนาดของ tabu list ที่เหมาะสมจึงจะพิจารณาควบคู่ไปกับการเลือกค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งอยู่ในหัวข้อที่ 4.2 ในทำนองเดียวกัน โครงข่าย 10N_21L จะมีหลักการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายเช่นเดียวกับที่กล่าวข้างต้น โดยอาศัยตารางที่ ข.1 (ก) ซึ่งพบว่า ต้นทุนโครงข่ายต่ำสุดที่ candidate size เท่ากับ 5 เท่ากับ 54 เส้น ในขณะที่ candidate size เท่ากับ 7 และ 10 จะมีต้นทุนโครงข่ายต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 53 เส้น เท่ากัน โดยใช้ tabu list ขนาด 3 9 และ 15 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ที่ candidate size เท่ากับ 10 และ tabu list มีขนาดเท่ากับ 15 ค่าเบี่ยงเบน

มาตรฐานจะมีค่าต่ำสุดและให้ค่าต้นทุนโครงข่ายต่ำสุด ดังนั้น candidate size ที่เหมาะสมสำหรับโครงข่าย 10N_21L ควรจะเท่ากับ 10 ส่วนโครงข่าย 14N_21L จะอาศัยตารางที่ ข.1 (ข) ในการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่าต้นทุนโครงข่ายต่ำสุด เท่ากับ 65 เส้น เมื่อใช้ candidate size เท่ากับ 5 ในขณะที่ candidate size เท่ากับ 7 และ 10 ต้นทุนโครงข่ายต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 63 เส้น เท่ากัน จะเห็นว่าทุกค่าของขนาด tabu list ที่ candidate size เท่ากับ 5 จะให้ค่าต้นทุนโครงข่ายสูงกว่าเมื่อเทียบกับการหาต้นทุนโครงข่ายโดยใช้ candidate size เท่ากับ 7 และ 10 ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากจำนวนเส้นทางที่นำมาใช้ในการสุ่มชุดคำตอบมีมากทำให้โอกาสในการสุ่มเจอเส้นทางที่ใช้จำนวนสายเชื่อมโยงมีมากตามไปด้วย ประกอบกับจำนวนคำตอบที่สุ่มในแต่ละชุดค่อนข้างน้อยจึงทำให้ค่าต้นทุนโครงข่ายที่ได้สูงกว่าเมื่อเทียบกับเมื่อใช้ candidate size ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้พบว่า ที่ candidate size เท่ากับ 10 และ tabu list มีขนาดเท่ากับ 10 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าต่ำสุดและให้ค่าต้นทุนโครงข่ายต่ำสุด ดังนั้น candidate size ที่เหมาะสมสำหรับโครงข่าย 14N_21L ควรจะเท่ากับ 10 เช่นเดียวกันกับสองโครงข่ายข้างต้น

รูปที่ 4.4 และตารางที่ ข.2 (ก)-(ข) ในภาคผนวก เปรียบเทียบต้นทุนโครงข่าย เวลาในการหาคำตอบและจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบของแต่ละโครงข่าย โดยพิจารณา candidate size ที่เท่ากับ 10 เมื่อ tabu list เป็นแบบพลวัต พบว่าช่วงของ tabu list มีผลต่อต้นทุน เวลาในการหาคำตอบและจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ โดยพิจารณาผลกระทบดังกล่าวกับโครงข่าย 14N_21L เป็นตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.4 พบว่า ค่าต้นทุนโครงข่ายต่ำสุดจะพบที่ทุกช่วงของ tabu list ที่ใช้ทดสอบ ส่วนเวลาในการหาคำตอบและจำนวนรอบที่ค้นพบจะค่อยๆ สูงขึ้นจนถึง stop criteria เท่ากับ 1000 และจะสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อ stop criteria มากกว่า 1000 เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานควบคู่ไปกับค่าต้นทุนโครงข่าย เวลาและจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ จะพบว่าที่ช่วงของ tabu list มีขนาดอยู่ระหว่าง 5 ถึง 12 จะมีการแกว่งของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับ tabu list ช่วงอื่น ส่วนช่วงของ tabu list ที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 1 ถึง 15 และ 10 ถึง 20 การแกว่งของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะต่ำกว่าช่วงของ tabu list ที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 5 ถึง 12 เพียงเล็กน้อย ในขณะที่ tabu list ที่ขนาดอยู่ระหว่าง 5 ถึง 20 การแกว่งของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ tabu list ช่วงอื่น จะเห็นว่าค่าต้นทุนต่ำสุดของแต่ละช่วง tabu list แตกต่างกันไปไม่มากทั้งที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละช่วงของ tabu list จะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น การเลือกช่วง tabu list ที่เหมาะสมสำหรับ tabu list แบบพลวัตของโครงข่ายนี้คือ tabu list ที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 5 ถึง 20 ส่วนโครงข่าย 8N_14L และ 10N_21L นั้นจะอาศัยตารางที่ ข.2 (ก)-(ข) ในภาคผนวก ในการพิจารณาเลือกช่วง tabu list ที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายซึ่งใช้หลักการพิจารณาเช่นเดียวกับการพิจารณาข้างต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า ต้นทุนที่ได้จาก tabu list ที่



รูปที่ 4.3 ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบของแต่ละโครงข่าย จำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ เวลาที่ใช้คำนวณ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ tabu tenure ขนาดต่างกัน เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ และจะหยุดการค้นหาคำตอบเมื่อไม่มีการพัฒนาของคำตอบให้เห็นภายใน 1000 รอบ ของโครงข่าย 8N_14L



รูปที่ 4.4 ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบของแต่ละโครงข่าย จำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ เวลาที่ใช้คำนวณ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อ tabu list เป็นแบบพลวัตได้ ในช่วง tabu list ที่ต่างกัน และ ระยะเวลาในการหยุดการค้นหาคำตอบที่แตกต่างกัน ที่กระบวนการ 100000 รอบ เมื่อ candidate size เท่ากับ 10 ของโครงข่าย 14N_21L

เป็นแบบคงที่และแบบพลวัตได้ในแต่ละโครงข่าย กลับไม่พบความสัมพันธ์ใดๆระหว่างค่าต้นทุนของโครงข่ายกับแต่ละชนิดของ tabu list การกำหนดขนาด tabu list ให้เหมาะสมกับโครงข่ายหรือปัญหาหนึ่งๆ จึงต้องอาศัยการทดสอบกับทุกกรณี

4.2 ผลของ stop criteria ที่มีต่ออัลกอริทึมฮิวริสติก

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลของ stop criteria ซึ่งรูปที่ 4.4 แสดงผลของ stop criteria ที่มีต่อค่าต้นทุนของโครงข่าย เวลาในการหาคำตอบและจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบของโครงข่าย 14N_21L สำหรับ tabu list ที่เป็นแบบคงที่และแบบพลวัต และจะใช้หลักการการเลือก stop criteria ของ tabu list ที่เป็นแบบคงที่ เป็นตัวอย่างในการพิจารณา

เมื่อพิจารณาผลของ stop criteria ที่มีต่อค่าต้นทุนของโครงข่าย เมื่อ tabu list เป็นแบบพลวัต จะเห็นว่าที่ค่า stop criteria สูงขึ้น ค่าต้นทุนต่ำสุดของโครงข่ายในแต่ละช่วงของ tabu list ที่แตกต่างกัน จะมีค่าเท่ากันเมื่อค่า stop criteria มีค่าตั้งแต่ 1000 ขึ้นไป ยกเว้นในกรณีที่ช่วง tabu list มีขนาดอยู่ระหว่าง 1 ถึง 15 ที่ stop criteria มีค่าเท่ากับ 2000 และ 4000 ซึ่งจะให้ค่าต้นทุนของโครงข่ายที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า ตั้งแต่ stop criteria เท่ากับ 6000 ขึ้นไป ค่าต้นทุนต่ำสุดของโครงข่ายจะมีค่าเท่ากันที่เมื่อทดสอบกับทุกช่วงขนาด tabu list นอกจากนี้ จะพบว่ายังมีค่าต้นทุนต่ำสุดของโครงข่ายที่ใช้ stop criteria น้อยกว่า 1000 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการสุ่มในกระบวนการค้นหาคำตอบที่บังเอิญได้คำตอบที่ต่ำสุด ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าที่ค่า stop criteria ต่ำๆ จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับที่ค่า stop criteria ตั้งแต่ 1000 ขึ้นไป (ยกเว้นกรณีที่ tabu list มีขนาดระหว่าง 5 ถึง 20) เมื่อพิจารณาเวลาในการหาคำตอบและจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบของโครงข่ายกลับพบว่าการตั้ง stop criteria ที่สูงมากเกินไปทำให้เวลาและจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบมากขึ้นโดยไม่จำเป็น ส่วนผลของ stop criteria ของโครงข่าย 8N_14L และ โครงข่าย 10N_21L ก็เป็นไปในแนวทางเดียวกัน ดังตาราง ก.2 ตามลำดับ ดังนั้น stop criteria จึงเป็นพารามิเตอร์ที่ยังต้องคำนึงในกระบวนการออกแบบโครงข่ายด้วยอัลกอริทึมฮิวริสติกเช่นกัน

ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1 ว่าการเลือกพารามิเตอร์ให้กับโครงข่ายนั้นควรพิจารณาค่าของ stop criteria และขนาดของ tabu list ควบคู่กันไปพร้อมกับดูค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละค่าของพารามิเตอร์ดังกล่าวด้วย เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกค่าที่เหมาะสม ซึ่งในกรณีของโครงข่าย 14N_21L นี้จะเห็นว่า ของ stop criteria ที่เหมาะสมจะเท่ากับ 6000 และ ขนาดของ tabu list ควรจะมีช่วงอยู่ระหว่าง 5 ถึง 20 อาศัยการพิจารณาข้างต้นกับโครงข่าย 8N_14L และ 10N_21L โดยใช้ตาราง ค.1-ค.2 พบว่า โครงข่าย 8N_14L ควรจะใช้ stop criteria เท่ากับ 4000 tabu list

ควรจะมีช่วงอยู่ระหว่าง 5 ถึง 12 ในขณะที่โครงข่าย 10N_21L ควรจะใช้ stop criteria เท่ากับ 10000 tabu list ควรจะมีช่วงอยู่ระหว่าง 5 ถึง 12 เป็นต้น ส่วนการเลือกพารามิเตอร์ให้แต่ละโครงข่ายที่มี tabu list เป็นแบบคงที่ ก็จะเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับข้างต้นโดยอาศัยตารางที่ ง. 1-ง.3 ในภาคผนวก ในการพิจารณา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย

เนื้อหาในส่วนนี้ จะกล่าวถึงผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมฮิวริสติกที่ได้ออกแบบไว้ในเนื้อหาบทที่ 3 รวมทั้งเปรียบเทียบผลเฉลยดังกล่าวกับผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ใน [16] ในแง่ของต้นทุนของโครงข่ายและเวลาในการหาผลเฉลย

5.1 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยจากอัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหแบบทาบ

ในหัวข้อนี้ จะนำเสนอผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานของการค้นหแบบทาบ ทั้งในกรณีโครงข่ายสามารถและไม่สามารถทำการแก้ไขปัญหาเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ ซึ่งโครงข่ายที่นำไปใช้ในการหาผลเฉลยนั้น เป็นโครงข่ายตามที่แสดงในรูป 4.1 (ก) (ข) และ (ค) และรองรับปริมาณทราฟฟิก ดังแสดงในรูป 4.2 ตามลำดับ

อนึ่ง การหาผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CPLEX6.6 [30] ซึ่งทำงานอยู่บนระบบ ปฏิบัติการวินโดวส์ XP) และอัลกอริทึมฮิวริสติกที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังตารางที่ 5 จะใช้คอมพิวเตอร์เครื่อง Pentium 4 ความเร็ว 2.8 GHz หน่วยความจำ 512 MB

สำหรับผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานของการค้นหแบบทาบ ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 5.1-5.5 และรูปที่ 5.1-5.3 จะถูกนำมาวิเคราะห์ โดยแบ่งพิจารณาตามหัวข้อดังต่อไปนี้

- การเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่ใช้การปกป้องโครงข่าย
- การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่ได้จากอัลกอริทึมฮิวริสติกที่ได้จากการออกแบบกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ ILP เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบ
- การเปรียบเทียบในเชิงจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

5.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองและเวลาที่ใช้ในการปกป้องโครงข่าย

เมื่อพิจารณา ตารางที่ 5.1- 5.4 พบว่าที่ค่า $M \geq 32$ ของโครงข่าย 8N_14L และที่ทุกค่า M ของโครงข่าย 10N_21L และโครงข่าย 14N_21L ของทุกกลยุทธ์การปกป้องโครงข่าย ไม่สามารถหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองได้ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพราะเนื่องจากที่ M สูงๆ หรือโครงข่ายขนาดใหญ่มากๆ ความซับซ้อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์จะสูงขึ้นจนไม่สามารถหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองได้ ในขณะที่อัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหาคำตอบแบบทามูตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 สามารถหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองให้กับโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ในทุกกลยุทธ์การปกป้องโครงข่าย

การเปรียบเทียบในตารางที่ 5.1 แสดงถึงจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และอัลกอริทึมฮิวริสติกที่ได้ออกแบบ เมื่อใช้กลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายแบบ LR_VLT ซึ่งในส่วนของอัลกอริทึมฮิวริสติกนั้นจะพิจารณาการหาเส้นใยนำแสงสำรองโดยเมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ และเป็นแบบพลวัต โดยใช้โครงสร้างผลเฉลยข้างเคียง 3 แบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 เพื่อที่จะใช้ในการตัดสินใจเลือกรูปแบบโครงสร้างผลเฉลยข้างเคียงที่เหมาะสมสำหรับการจัดสรรความจุสำรองเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นภายในโครงข่าย ซึ่งจากการพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่โครงข่ายต้องการพบว่า ไม่ว่าโครงสร้างผลเฉลยข้างเคียงจะเป็นแบบ 1 Diff neighborhood n VerticalDiff neighborhood หรือ L HorizontalDiff neighborhood จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่เมื่อใช้ tabu list เป็นแบบคงที่ จะให้จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่มากกว่าหรือเท่ากับ เมื่อจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่เมื่อใช้ tabu list เป็นแบบพลวัตในขณะที่เวลาในการใช้หาคำตอบมีค่าไม่ต่างกันมาก

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่โครงสร้างผลเฉลยต่างกัน พบว่า การนำโครงสร้างผลเฉลยข้างเคียงแบบ 1 Diff neighborhood มาใช้ในกระบวนการหาคำตอบจะให้ค่าเส้นใยนำแสงสำรองน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้โครงสร้างผลเฉลยข้างเคียงในอีก 2 แบบที่เหลือ เพราะการเปลี่ยนแปลงดรรชนีการเข้ารหัสที่ต่างกันทีละตัว ทำให้โครงข่ายค่อยๆปรับเปลี่ยนคำตอบ ส่งผลให้การเลือกเส้นใยนำแสงสำรองใกล้เคียงกับจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองต่ำสุดมีความเป็นไปได้มากขึ้น ขณะที่อัลกอริทึมฮิวริสติกใช้โครงสร้างผลเฉลยข้างเคียงแบบ n VerticalDiff neighborhood และ L HorizontalDiff neighborhood เส้นใยนำแสงสำรองกลับมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนดรรชนีการเข้ารหัสที่ต่างกันมากเกินไป จนทำให้โอกาสในการเลือกเส้นใยนำแสงสำรองต่ำสุดมีมากตามไปด้วย ดังนั้นกลยุทธ์การปกป้องโครงข่าย

แบบอื่นในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ tabu list แบบพลวัต และโครงสร้างผลเฉลยข้างเคียงแบบ 1 Diff neighborhood เป็นพารามิเตอร์สำหรับการจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่ายในกลยุทธ์การปกป้องโครงข่าย

ตารางที่ 5.1 จำนวนเส้นใยนำแสงในสภาวะปกติและจำนวนเส้นใยนำแสงสำรอง ในกรณีที่มีการปกป้องโครงข่ายแบบ LR และมีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT โดยใช้ (ก) 1 Diff neighborhood (ข) n VerticalDiff neighborhood (ค) L HorizontalDiff neighborhood

Topology		M	NO	ILP		Heuristic Algorithm based on Tabu Search			
						Fixed tabu list size		Dynamic tabu list size	
N	L			spare fibers	time	spare fibers	time	spare fibers	time
8	14	1	46	19	1.70s	23	22.64s	20	43.14s
		2	23	10	3.14s	14	22.80s	11	1m 4.74s
		4	13	6	0.97s	8	22.55s	6	1m 1.76s
		8	7	3	3.33s	7	22.16s	6	1m 0.33s
		16	6	4	0.13s	7	21.45s	7	59.38s
		32	6	4	0.22s	6	21.59s	5	59.39s
		64	6	n/a	n/a	5	21.73s	4	59.11s
		128	6	n/a	n/a	5	21.54s	4	59.19s
10	21	1	51	n/a	n/a	15	1m 19.23s	12	1m 17.49s
		2	27	n/a	n/a	14	1m 15.45s	12	1m 15.72s
		4	15	n/a	n/a	14	1m 15.64s	10	1m 15.16s
		8	10	n/a	n/a	11	1m 12.59s	10	1m 13.73s
		16	9	n/a	n/a	12	1m 13.71s	11	1m 13.16s
		32	9	n/a	n/a	11	1m 13.62s	11	1m 13.83s
		64	9	n/a	n/a	11	1m 13.89s	11	1m 13.92s
		128	9	n/a	n/a	11	1m 14.03s	11	1m 13.74s
14	21	1	63	n/a	n/a	16	41.85s	15	41.92s
		2	33	n/a	n/a	9	41.85s	6	42.91s
		4	18	n/a	n/a	6	43.51s	5	42.69s
		8	11	n/a	n/a	8	38.53s	8	38.98s
		16	9	n/a	n/a	9	37.37s	8	39.97s
		32	9	n/a	n/a	9	39.40s	8	37.73s
		64	9	n/a	n/a	8	38.90s	8	38.06s
		128	9	n/a	n/a	8	39.03s	8	38.24s

(ก)

Topology		M	NO	ILP		Heuristic Algorithm based on Tabu Search			
						Fixed tabu list size		Dynamic tabu list size	
N	L			spare fibers	time	spare fibers	time	spare fibers	time
8	14	1	46	19	1.70s	24	30.56s	21	41.36s
		2	23	10	3.14s	12	31.37s	11	40.98s
		4	13	6	0.97s	8	31.39s	7	40.74s
		8	7	3	3.33s	8	26.15s	6	33.81s
		16	6	4	0.13s	8	29.61s	7	39.27s
		32	6	4	0.22s	7	29.78s	6	40.22s
		64	6	n/a	n/a	6	29.83s	6	39.50s
		128	6	n/a	n/a	6	29.80s	4	39.69s
10	21	1	51	n/a	n/a	15	1m 40.38s	13	1m 28.78s
		2	27	n/a	n/a	21	1m 36.81s	13	1m 26.93s
		4	15	n/a	n/a	14	1m 35.83s	10	1m 26.19s
		8	10	n/a	n/a	11	1m 33.95s	10	1m 18.30s
		16	9	n/a	n/a	12	1m 29.91s	11	1m 17.28s
		32	9	n/a	n/a	12	1m 34.99s	12	1m 24.33s
		64	9	n/a	n/a	14	1m 34.63s	12	1m 24.52s
		128	9	n/a	n/a	12	1m 35.19s	12	1m 23.78s
14	21	1	63	n/a	n/a	18	53.37s	18	48.14s
		2	33	n/a	n/a	9	54.34s	6	47.73s
		4	18	n/a	n/a	7	55.50s	6	49.84s
		8	11	n/a	n/a	11	49.09s	8	41.98s
		16	9	n/a	n/a	9	38.00s	9	44.56s
		32	9	n/a	n/a	10	32.83s	9	35.64s
		64	9	n/a	n/a	8	49.38s	8	45.77s
		128	9	n/a	n/a	8	49.98s	8	44.78s

Topology		M	NO	ILP		Heuristic Algorithm based on Tabu Search			
						Fixed tabu list size		Dynamic tabu list size	
N	L			spare fibers	time	spare fibers	time	spare fibers	time
8	14	1	46	19	1.70s	31	1m 4.18s	28	1m 4.77s
		2	23	10	3.14s	11	1m 2.88s	12	1m 3.50s
		4	13	6	0.97s	10	1m 5.16s	6	1m 6.00s
		8	7	3	3.33s	7	1m 4.47s	7	1m 4.82s
		16	6	4	0.13s	8	1m 4.03s	7	1m 4.81s
		32	6	4	0.22s	7	1m 4.98s	5	1m 4.62s
		64	6	n/a	n/a	7	1m 4.09s	5	1m 4.66s
		128	6	n/a	n/a	6	1m 4.00s	5	1m 4.45s
10	21	1	51	n/a	n/a	16	4m 3.03s	16	5m 28.28s
		2	27	n/a	n/a	16	4m 1.47s	13	4m 59.25s
		4	15	n/a	n/a	10	3m 59.89s	10	4m 5.68s
		8	10	n/a	n/a	11	4m 0.86s	10	4m 2.14s
		16	9	n/a	n/a	12	43m 54.17s	11	43m 31.07s
		32	9	n/a	n/a	12	4m 3.36s	12	4m 2.81s
		64	9	n/a	n/a	14	4m 1.48s	11	4m 2.59s
		128	9	n/a	n/a	12	4m 0.63s	12	4m 1.97s
14	21	1	63	n/a	n/a	18	2m 26.61s	19	2m 22.38s
		2	33	n/a	n/a	8	2m 24.56s	12	2m 24.08s
		4	18	n/a	n/a	7	2m 17.92s	7	2m 23.44s
		8	11	n/a	n/a	11	2m 23.86s	8	2m 23.28s
		16	9	n/a	n/a	10	2m 20.91s	9	42m 16.34s
		32	9	n/a	n/a	9	2m 23.75s	10	2m 16.06s
		64	9	n/a	n/a	8	2m 21.31s	12	2m 20.81s
		128	9	n/a	n/a	8	2m 21.39s	8	2 m 20.66s

(ค)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.2 จำนวนเส้นใยนำแสงในสภาวะปกติและจำนวนเส้นใยนำแสงสำรอง ในกรณีที่มีการปกป้องโครงข่ายแบบ LIR และมีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT

Topology		M	NO	ILP		Heuristic Algorithm based on Tabu Search			
						Fixed tabu list size		Dynamic tabu list size	
N	L			spare fibers	time	spare fibers	time	spare fibers	time
8	14	1	46	23	0.03s	27	1m 22.06s	26	3m 16.53s
		2	23	16	0.15s	17	1m 19.24s	17	3m 34.78s
		4	13	11	6.08s	10	1m 19.88s	9	3m 36.72s
		8	7	6	0.28s	7	1m 21.31s	7	3m 40.14s
		16	6	n/a	n/a	7	1m 21.52s	7	3m 40.72s
		32	6	n/a	n/a	7	1m 21.38s	7	3m 57.61s
		64	6	n/a	n/a	6	1m 21.56s	6	3m 51.31s
		128	6	n/a	n/a	7	1m 21.88s	6	3m 41.59s
10	21	1	51	n/a	n/a	28	4m 56.53s	28	4m 49.05s
		2	27	n/a	n/a	24	4m 56.74s	23	4m 50.53s
		4	15	n/a	n/a	15	4m 56.84s	15	4m 51.06s
		8	10	n/a	n/a	11	4m 58.50s	11	4m 52.47s
		16	9	n/a	n/a	12	4m 58.36s	12	4m 53.00s
		32	9	n/a	n/a	12	4m 58.14s	11	4m 53.66s
		64	9	n/a	n/a	11	4m 58.77s	11	4m 57.20s
		128	9	n/a	n/a	11	4m 57.75s	11	4m 50.22s
14	21	1	63	n/a	n/a	27	3m 15.21s	25	6m 34.19s
		2	33	n/a	n/a	16	2m 40.12s	15	6m 59.49s
		4	18	n/a	n/a	11	3m 27.56s	11	7m 24.13s
		8	11	n/a	n/a	10	3m 10.32s	10	6m 52.34s
		16	9	n/a	n/a	12	3m 43.05s	11	7m 15.45s
		32	9	n/a	n/a	12	3m 42.82s	12	7m 9.92s
		64	9	n/a	n/a	11	2m 37.06s	11	7m 5.52s
		128	9	n/a	n/a	11	2m 15.11s	11	9m 17.56s

ตารางที่ 5.3 จำนวนเส้นใยนำแสงในสภาวะปกติและจำนวนเส้นใยนำแสงสำรอง ในกรณีที่มีการปกป้องโครงข่ายแบบ LR และมีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LT

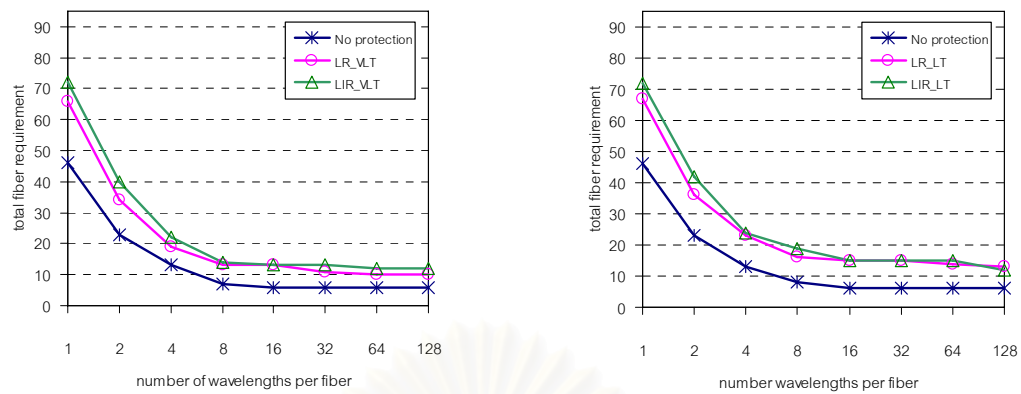
Topology		M	NO	ILP		Heuristic Algorithm based on Tabu Search			
						Fixed tabu list size		Dynamic tabu list size	
N	L			spare fibers	time	spare fibers	time	spare fibers	time
8	14	1	46	21	0.72s	21	2m 39.08s	21	1m 31.16s
		2	23	9	10.88s	14	3m 54.91s	13	2m 6.67s
		4	8	5	11m 48.33s	10	4m 11.43s	10	2m 20.59s
		8	6	n/a	n/a	9	4m 52.97s	9	2m 39.31s
		16	6	n/a	n/a	9	5m 21.34s	9	2m 55.59s
		32	6	n/a	n/a	10	10m 11.30s	9	5m 27.05s
		64	6	n/a	n/a	8	14m 54.30s	8	7m 3.16s
		128	6	n/a	n/a	7	26m 48.25s	7	16m 51.72s
10	21	1	51	n/a	n/a	14	5m 25.12s	14	4m 3.47s
		2	27	n/a	n/a	12	8m 47.64s	12	5m 44.59s
		4	15	n/a	n/a	12	8m 16.72s	12	6m 2.03s
		8	10	n/a	n/a	12	8m 25.27s	11	6m 19.55s
		16	9	n/a	n/a	12	8m 18.49s	12	9m 3.16s
		32	10	n/a	n/a	13	19m 36.66s	13	13m 10.25s
		64	10	n/a	n/a	13	14m 6.85s	12	25m 10.39s
		128	10	n/a	n/a	12	1h 14m 26s	12	49m 44.92s
14	21	1	63	n/a	n/a	18	1m 46.23s	18	48.19S
		2	33	n/a	n/a	9	2m 08.65s	9	1m 47.97S
		4	19	n/a	n/a	12	2m 37.06s	12	2m 25.70s
		8	11	n/a	n/a	14	3m 42.25s	14	3m 45.14S
		16	9	n/a	n/a	14	4m 2.18s	14	4m 18.78s
		32	9	n/a	n/a	14	9m 4.58s	14	7m 8.94S
		64	9	n/a	n/a	14	18m 19.09s	14	13m 59.38s
		128	9	n/a	n/a	14	31m 37s	14	26m 49.77s

ตารางที่ 5.4 จำนวนเส้นใยนำแสงในสภาวะปกติและจำนวนเส้นใยนำแสงสำรอง ในกรณีที่มีการปกป้องโครงข่ายแบบ LIR และมีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LT

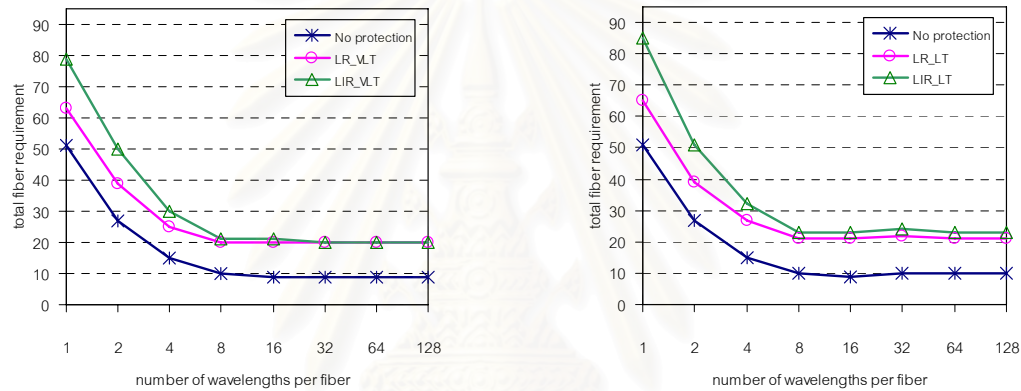
Topology		M	NO	ILP		Heuristic Algorithm based on Tabu Search			
						Fixed tabu list size		Dynamic tabu list size	
N	L			spare fibers	time	spare fibers	time	spare fibers	time
8	14	1	46	23	0.03s	26	18.44s	26	30.11s
		2	23	19	0.09s	21	29.19s	19	30.06s
		4	8	11	0.06s	11	35.02s	11	33.47s
		8	6	10	0.05s	11	40.33s	11	37.33s
		16	6	9	0.08s	9	50.95s	9	47.86s
		32	6	9	0.09s	9	1m 12.11s	9	1m 7.61s
		64	6	6	0.22s	8	1m 53.81s	9	1m 48.33s
		128	6	6	0.3s	9	3m 22.05s	6	3m 11.12s
10	21	1	51	n/a	n/a	34	32.17s	34	1m 9.86s
		2	27	n/a	n/a	24	1m 49.70s	24	1m 17.13s
		4	15	n/a	n/a	18	1m 54.42s	17	1m 25.48s
		8	10	n/a	n/a	14	1m 43.02s	13	1m 40.11s
		16	9	n/a	n/a	14	1m 24.44s	14	2m 11.03s
		32	10	n/a	n/a	14	2m 4.30s	14	3m 8.41s
		64	10	n/a	n/a	13	6m 45.41s	13	5m 6.58s
		128	10	n/a	n/a	13	10m 56.44s	13	7m 51.28s
14	21	1	63	n/a	n/a	33	33.94s	30	28.41s
		2	33	n/a	n/a	23	59.33s	22	53.34s
		4	19	n/a	n/a	19	1m 6.59s	18	1m 6.64s
		8	11	n/a	n/a	18	1m 8.05s	18	1m 18.78s
		16	9	n/a	n/a	14	1m 21.39s	14	1m 43.49s
		32	9	n/a	n/a	16	2m 0.31s	14	2m 33.49s
		64	9	n/a	n/a	16	3m 20.70s	14	5m 6.87s
		128	9	n/a	n/a	16	5m 58.78s	14	9m 3.15s

ตารางที่ 5.5 เวลาที่ใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองในแต่ละกลยุทธ์ของการปกป้องโครงข่าย เมื่อมีจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT และ LT เมื่อความยาวของ tabu list เป็นแบบพลวัต

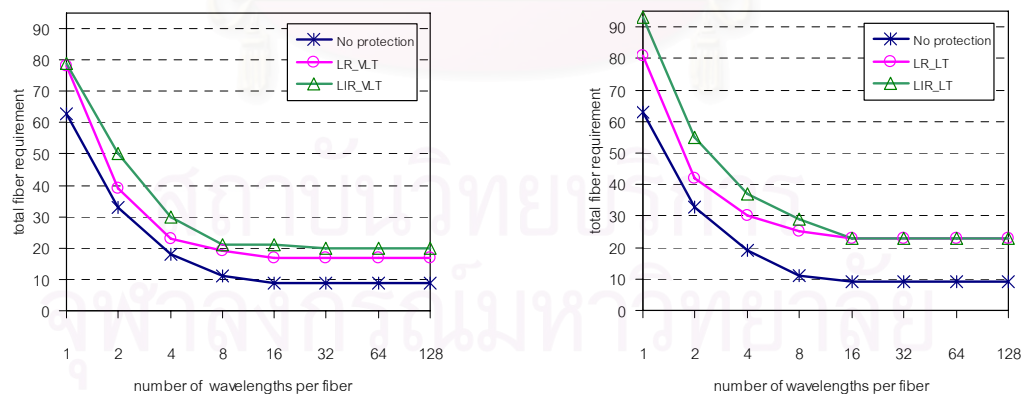
Topology		M	LR_VLT		LR_LT		LIR_VLT		LIR_LT	
N	L		ILP	TS	ILP	TS	ILP	TS	ILP	TS
8	14	1	1.70s	43.14s	0.72s	1m 31.16s	0.03s	3m 16.53s	0.03	30.11s
		2	3.14s	1m 4.74s	10.88s	2m 6.67s	0.15s	3m 34.78s	0.09	30.06s
		4	0.97s	1m 1.76s	11m 48.33s	2m 20.59s	6.08s	3m 36.72s	0.06	33.47s
		8	3.33s	1m 0.33s	n/a	2m 39.31s	0.28s	3m 40.14s	0.05	37.33s
		16	0.13s	59.38s	n/a	2m 55.59s	n/a	3m 40.72s	0.08	47.86s
		32	0.22s	59.39s	n/a	5m 27.05s	n/a	3m 57.61s	0.09	1m 7.61s
		64	n/a	59.11s	n/a	7m 3.16s	n/a	3m 51.31s	0.22	1m 48.33s
		128	n/a	59.19s	n/a	16m 51.72s	n/a	3m 41.59s	0.30	3m 11.12s
10	21	1	n/a	1m 17.49s	n/a	4m 3.47s	n/a	4m 49.05s	n/a	1m 9.86s
		2	n/a	1m 15.72s	n/a	5m 44.59s	n/a	4m 50.53s	n/a	1m 17.13s
		4	n/a	1m 15.16s	n/a	6m 2.03s	n/a	4m 51.06s	n/a	1m 25.48s
		8	n/a	1m 13.73s	n/a	6m 19.55s	n/a	4m 52.47s	n/a	1m 40.11s
		16	n/a	1m 13.16s	n/a	9m 3.16s	n/a	4m 53.00s	n/a	2m 11.03s
		32	n/a	1m 13.83s	n/a	13m 10.25s	n/a	4m 53.66s	n/a	3m 8.41s
		64	n/a	1m 13.92s	n/a	25m 10.39s	n/a	4m 57.20s	n/a	5m 6.58s
		128	n/a	1m 13.74s	n/a	49m 44.92s	n/a	4m 50.22s	n/a	7m 51.28s
14	21	1	n/a	41.92s	n/a	48.19S	n/a	6m 34.19s	n/a	28.41s
		2	n/a	42.91s	n/a	1m 47.97S	n/a	6m 59.49s	n/a	53.34s
		4	n/a	42.69s	n/a	2m 25.70s	n/a	7m 24.13s	n/a	1m 6.64s
		8	n/a	38.98s	n/a	3m 45.14S	n/a	6m 52.34s	n/a	1m 18.78s
		16	n/a	39.97s	n/a	4m 18.78s	n/a	7m 15.45s	n/a	1m 43.49s
		32	n/a	37.73s	n/a	7m 8.94S	n/a	7m 9.92s	n/a	2m 33.49s
		64	n/a	38.06s	n/a	13m 59.38s	n/a	7m 5.52s	n/a	5m 6.87s
		128	n/a	38.24s	n/a	26m 49.77s	n/a	9m 17.56s	n/a	9m 3.15s



(ก)



(ข)



(ค)

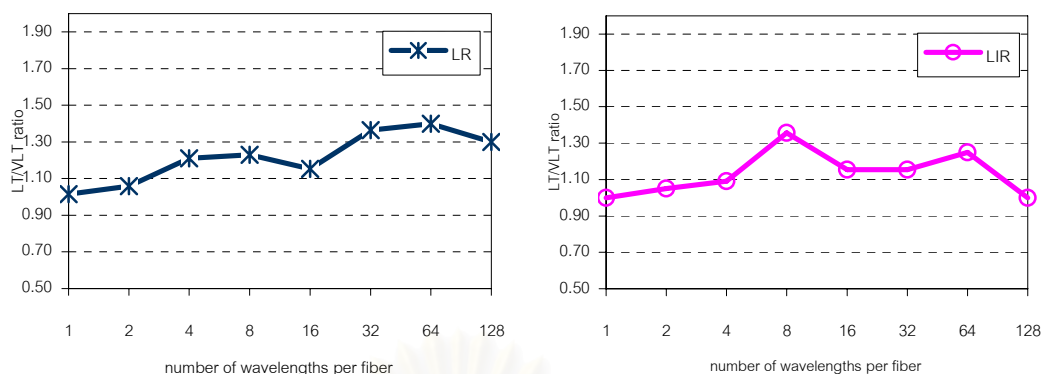
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ (ก) โครงข่าย 8N_14L (ข) โครงข่าย 10N_21L และ (ค) โครงข่าย 14N_21L ต้องการ ในแต่ละกลยุทธ์ของการปกป้องโครงข่าย เมื่อการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT และ LT ตามลำดับ

5.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่แต่ละกลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายต้องการ

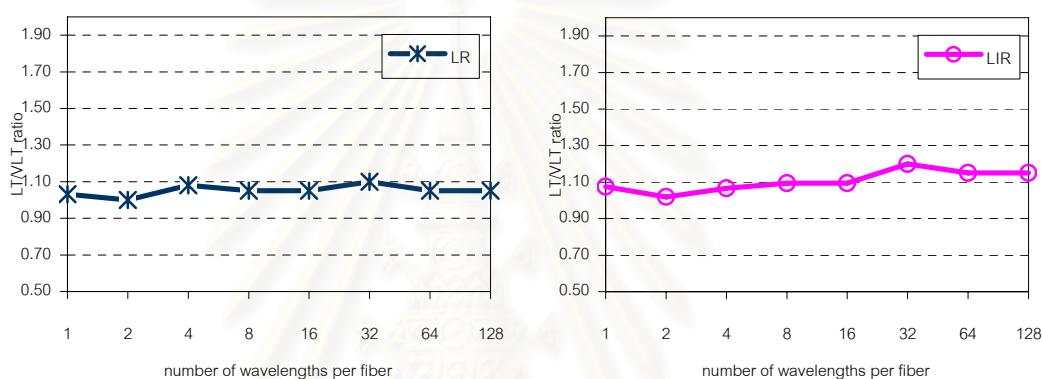
5.3.1 ผลของกลยุทธ์การปกป้องโครงข่าย ที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่แต่ละโครงข่ายต้องการระหว่างกลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายแบบ LR และ LIR ได้ผลดังรูปที่ 5.1

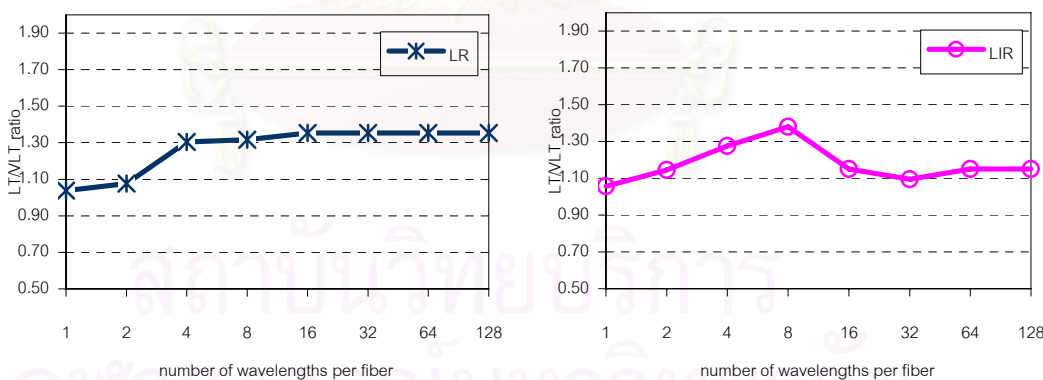
จากรูปที่ 5.1 เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 8N_14L โครงข่าย 10N_21L และโครงข่าย 14N_21L ต้องการ โดยใช้กลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายแบบ LR และ LIR พบว่า จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดมีค่าลดลงเมื่อ M มีค่าสูงขึ้น โดยจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดค่าน้อย ๆ ($M = 4$) และจะค่อยลดลงทีละน้อยจนถึงช่วงที่ $M = 8$ และเริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่ $M = 8$ เป็นต้นไป สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากการที่ค่า M เพิ่มขึ้นนั้นจำนวนช่องสัญญาณในแต่ละเส้นใยนำแสงก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย การที่จำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยนำแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นนี้ จะทำให้จำนวนของเส้นใยนำแสงที่ต้องทำการติดตั้งมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อ M มีค่ามากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้วพบว่าจำนวนเส้นใยนำแสงจะไม่สามารถลดลงได้อีก นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาแต่ละกลยุทธ์การปกป้องโครงข่าย ในขณะที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นเช่นเดียวกัน พบว่า จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมเมื่อมีการปกป้องโครงข่ายโดยใช้กลยุทธ์การปกป้องแบบ LR จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้กลยุทธ์การปกป้องแบบ LIR เสมอ ทั้งนี้เนื่องการ เมื่อเกิดความเสียหายขึ้น ช่องสัญญาณทั้งหมดของต้นไม้เชิงแสงในสถานะปกติทั้งที่ได้รับและที่ไม่ได้รับผลกระทบ สามารถที่จะนำมาใช้ในการจัดสรรช่องสัญญาณใหม่ให้กับโครงข่ายได้ ในขณะที่กลยุทธ์ LIR นั้นช่องสัญญาณที่สามารถนำมาจัดสรรช่องสัญญาณให้ใหม่นั้น จะเป็นช่องสัญญาณในสถานะปกติในส่วน of ต้นไม้เชิงแสงที่ได้รับผลกระทบเท่านั้น ดังนั้นหากการจัดสรรใหม่มีการใช้เส้นทางหรือช่องสัญญาณซ้ำกับต้นไม้เชิงแสงที่ไม่ได้รับผลกระทบ โครงข่ายจะต้องวางเส้นใยนำแสงเพิ่มเข้าไปในโครงข่าย ซึ่งมีผลทำให้การปกป้องแบบ LIR จะให้จำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมมากกว่าการปกป้องแบบ LR อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการปกป้องแบบ LR จะใช้เส้นใยนำแสงในการปกป้องโครงข่ายน้อยกว่า LIR อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นในการจัดการโครงข่ายมากกว่าแต่ กลยุทธ์การปกป้องแบบ LR กลับไม่ค่อยนิยมในทางปฏิบัติ เพราะเกิดความซับซ้อนในการจัดการภายในโครงข่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดการระบบสัญญาณ (signaling) เพื่อที่จะจัดสรรเส้นทางให้กับโครงข่ายใหม่ทั้งหมด [16]



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงของ (ก) โครงข่าย 8N_14L (ข) โครงข่าย 10N_21L และ (ค) โครงข่าย 14N_21L ที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ LT ต่อจำนวนเส้นใยนำแสงของโครงข่ายที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT (LT/VLT ratio) กับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่มัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) ในแต่ละกลยุทธ์การปกป้องโครงข่าย ตามลำดับ

5.3.2 ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อต้นทุนของโครงข่าย ที่กรณีโครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงได้รับความขัดข้องได้ ด้วยกลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายแบบ LR และ LIR โดยจะใช้โครงข่าย 8N_14L โครงข่าย 10N_21L และ โครงข่าย 14N_21L ที่มีลักษณะการวางเส้นใยนำแสงสำรองแบบ SW + WW + SR

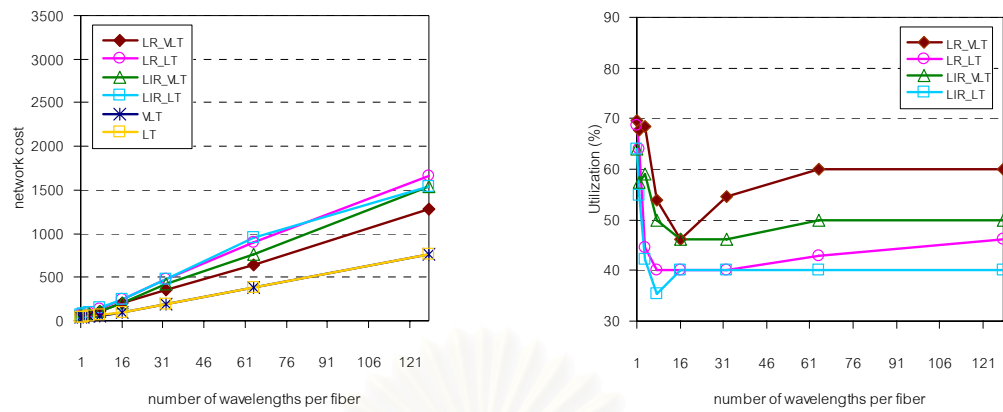
จากรูปที่ 5.2 พบว่าที่ทุกค่า M อัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดของโครงข่ายที่มีการปกป้องแบบ LT ต่อโครงข่ายที่มีการปกป้องแบบ VLT จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ นั้นหมายความว่า อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะมีผลต่อจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดของโครงข่าย โดยอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะส่งผลให้จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดของโครงข่ายมีค่าลดลง กล่าวคือ ในกรณีที่ปกป้องโครงข่ายแบบ LR จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดของโครงข่าย 8N_14L จะมีค่าลดลงประมาณ 3.3-30.0% ส่วนกรณีที่ปกป้องโครงข่ายแบบ LIR 8N_14L จะมีค่าลดลงประมาณ 0-16.7% ในทำนองเดียวกัน โครงข่าย 10N_21L สำหรับกรณีที่การปกป้องโครงข่ายแบบ LR จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดจะมีค่าลดลงประมาณ 0-11.6% ส่วนกรณีที่การปกป้องโครงข่ายแบบ LIR จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดจะมีค่าลดลงประมาณ 2.3-11.4% เมื่อพิจารณาโครงข่าย 14N_21L พบว่า ในกรณีที่ปกป้องโครงข่ายแบบ LR จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดจะมีค่าลดลงประมาณ 13.3-45.7% ส่วนกรณีที่ปกป้องโครงข่ายแบบ LIR จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดจะมีค่าลดลงประมาณ 6.1-23.3%

5.4 การเปรียบเทียบเชิงต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพของโครงข่าย

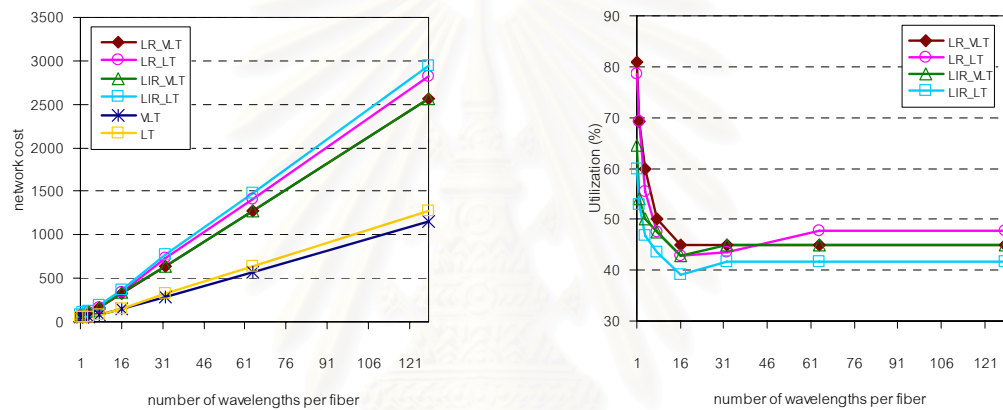
ต้นทุนของโครงข่าย (Network cost) ที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะนิยามให้มีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการกับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M)

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

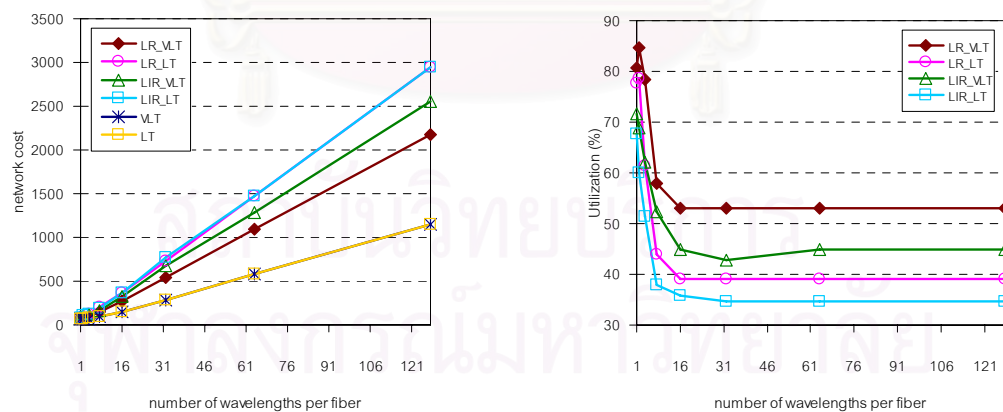
ส่วนประสิทธิภาพของโครงข่าย (Utilization) จะนิยามให้มีค่าเท่ากับอัตราส่วนร้อยละของจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองต่อจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดในโครงข่าย



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่ายและประสิทธิภาพการใช้เส้นใยนำแสงของ(ก) โครงข่าย 8N_14L (ข) โครงข่าย 10N_21L และ (ค) โครงข่าย 14N_21L ในแต่ละกลยุทธ์การปกป้องโครงข่าย เมื่อแต่ละกลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายมีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT และ LT ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.3 พบว่าต้นทุนของแต่ละโครงข่ายจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า M โดยการปกป้องโครงข่ายแบบ LR_VLT จะมีต้นทุนของโครงข่ายต่ำสุดและต้นทุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามค่า M ส่วนกลยุทธ์การป้องกันแบบ LIR_VLT LR_LT และ LIR_LT จะเป็นกลยุทธ์การป้องกันที่ต้องการต้นทุนมากกว่ากลยุทธ์ LR_VLT ตามลำดับจากน้อยไปมาก

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการใช้เส้นใยนำแสงของแต่ละโครงข่าย ในรูปที่ 5.3 พบว่า ที่แต่ละกลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบเดียวกัน การปกป้องโครงข่ายแบบ LR มีประสิทธิภาพการใช้เส้นใยนำแสงมากกว่าการปกป้องโครงข่ายแบบ LIR และจะมีประสิทธิภาพการใช้เส้นใยนำแสงลดลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแนวโน้มในการลดลงของประสิทธิภาพการใช้เส้นใยนำแสงนั้น จะลดลงอย่างรวดเร็วที่ M มีค่าน้อยๆ และจะค่อยลดลงจนคงที่เมื่อค่า M มีค่าสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง และการที่โครงข่ายมีประสิทธิภาพการใช้เส้นใยนำแสงลดลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากโครงข่ายมีช่องสัญญาณสำหรับรองรับทราฟฟิกเป็นจำนวนมาก ถ้าช่องสัญญาณดังกล่าวมีจำนวนมากขึ้นเกินกว่าความต้องการใช้งานจริง ก็จะทำให้เกิดช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้งานเป็นจำนวนมากในระบบ ดังนั้นประสิทธิภาพการใช้เส้นใยนำแสงของโครงข่ายจึงมีค่าลดลง

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนออัลกอริทึมฮิวริสติกบนพื้นฐานของการค้นหาแบบทาบูนสำหรับการจัดสรรความจุสำรองในโครงข่ายมัลติคาสต์แบบมัลติพลาซิงความยาวคลื่นหนาแน่น โดยได้เสนอวิธีการออกแบบโครงข่ายทั้งในกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถและสามารถแก้ไขปัญหานี้ซึ่งเชื่อมโยงได้รับความขัดข้อง ซึ่งกรณีที่โครงข่ายไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ซึ่งเชื่อมโยง จะเป็นการศึกษาการจัดเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ ส่วนกรณีที่โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหานี้ซึ่งเชื่อมโยง จะเป็นการศึกษาการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลบหลีกสายเชื่อมโยงที่ขัดข้อง ซึ่งกลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายที่ออกแบบโดยอาศัยอัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหาแบบทาบูนนั้น มีวิธีการจัดสรรความยาวคลื่น 2 วิธีคือ LR (Light-Tree Reconfiguration) และ LIR (Light-Tree-Interrupted Reconfiguration) กับระบบที่มีการใช้และไม่ใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ซึ่งทั้ง 2 กรณีจะมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบคือ จัดสรรความจุสำรองสำหรับปกป้องโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถหาคำตอบได้โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อหาต้นทุนทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย เพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกได้ทั้งหมด ในกรณีที่เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งสายเชื่อมโยง รวมทั้งศึกษาถึงผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

จากการใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหาแบบทาบูน เพื่อจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่าย พบว่าอัลกอริทึมที่ออกแบบสามารถจัดสรรความจุสำรองให้กับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้ โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ให้เหมาะสม ซึ่งพารามิเตอร์ที่ให้ความสนใจในวิทยานิพนธ์นี้คือ ชนิดและขนาดของ tabu list เกณฑ์การหยุด และขนาดของแคนดิเดตตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบพารามิเตอร์ดังกล่าวกับโครงข่ายที่มีขนาด 8 โหนด 14 สายเชื่อมโยง โครงข่าย 10 โหนด 21 สายเชื่อมโยง และโครงข่าย 14 โหนด 21 สายเชื่อมโยง พบว่าอัลกอริทึมฮิวริสติกที่ได้ออกแบบจะมีประสิทธิภาพเมื่อ tabu list เป็นแบบพลวัตที่มีช่วงอยู่ระหว่าง 5 ถึง 12 สำหรับโครงข่ายขนาด 8 โหนด 14 สายเชื่อมโยง และโครงข่ายขนาด 10 โหนด 21 สายเชื่อมโยง ในขณะที่โครงข่าย 14 โหนด 21 สายเชื่อมโยง จะต้องใช้ tabu list แบบพลวัตที่มีช่วงอยู่ระหว่าง 5 ถึง 20 โดยใช้เกณฑ์การหยุดเท่ากับ 4000 10000 และ 6000 ตามลำดับ โครงข่ายที่ใช้ทดสอบ

ทั้งหมดจะต้องกำหนดให้ขนาดของแคนดิเดตเท่ากับ 4 เช่นเดียวกัน ภายใต้กระบวนการ 100000 รอบ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการพบว่า การจัดสรรความจุสำรองโดยใช้กลยุทธ์ LR_VLT จะมีต้นทุนของโครงข่ายต่ำสุด LIR_VLT LR_LT และ LIR_LT จะเป็นกลยุทธ์การป้องกันที่ต้องการต้นทุนมากกว่าวิธี LR_VLT ตามลำดับจากน้อยไปมาก

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยขั้นต่อไปที่น่าสนใจ

1. เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ ได้จัดสรรความจุสำรองเพื่อปกป้องโครงข่าย โดยใช้ อัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหาแบบทาบู่เท่านั้น ดังนั้น จึงน่าจะนำฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบอื่นๆ เช่น Simulated Annealing หรือ Genetic Algorithm มาลองประยุกต์ใช้ร่วมกับอัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหาแบบทาบู่
2. วัตถุประสงค์ในการออกแบบปกป้องโครงข่ายในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อจัดสรรความจุสำรองที่โครงข่ายขนาดใหญ่ต้องการ แต่เนื่องจากข้อกำหนดของโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึง ต้นทุนของอุปกรณ์อื่นๆที่โครงข่ายต้องนำมาใช้ในในกระบวนการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น ดังนั้น หากมีการออกแบบโดยคำนึงถึงราคาของอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อการออกแบบปกป้องโครงข่ายด้วยก็จะทำให้การออกแบบสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. C. Siva Ram Murthy. WDM optical networks: Concepts, design, and algorithms. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002.
2. N. Singhal, L. H. Sahasrabuddhe, and B. Mukherjee, "Protecting a multicast session against single link failures in a mesh network," presented at the IEEE Int. Conf. Communications, Anchorage, AK, pp. 1504-1508, May , 2003.
3. L. H. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, "Light-trees: Optical multicasting for improved performance in wavelength-routed networks," IEEE Commun. Mag., vol. 37, pp. 67-73, Feb. 1999.
4. Y. Xin, G. N. Rouskas and H. G. Perros, "Light-Tree Routing Under Optical Layer Power Budget Constraints," Infocom submission, pp . 1-11, 2003.
5. N. Singhal and B. Mukherjee, "Protecting a multicast sessions in WDM optical mesh networks," IEEE J. Lightwave Technol., vol. 21, No.4, pp. 884-892, Apr. 2003.
6. M. Saad and Z. Quan Luo, "On the Routing and Wavelength Assignment inMultifiber WDM Networks," supported by grant from NSERC, TRIO and the Canada Research Chair Program., pp. 1-9.
7. I. Chlamtac, A. Ganz, G. Karmi, "Lightpath Communications: An Approach to High Bandwidth Optical WAN's," IEEE Trans. on Communication., vol. 40 , No. 7,pp. 1171-1182, July 1992.
8. R. Malli, X. Zhang and C. Qiao, "Benefit of Multicasting in All-Optical Networks," in Proc. SPIE, vol. 3531, pp. 9-20, 1998.
9. L.H. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, "Light-trees: Optical multicasting for improved performance in wavelength-routed networks," IEEE Communications Magazine, pp. 67-73, Feb. 1999.
10. Xiao-Hua Jia, et.al., "Optimization of wavelength for QoS Multicast in WDM networks," IEEE Trans. on Commuications, vol. 49, NO. 2, pp. 341-350, Feb. 2001.

11. B. Chen and J. Wang, "Efficient routing and wavelength assignment for multicast in wavelength-routed networks," IEEE J. Select. Areas Comm., vol. 20, NO. 1, pp. 97-109, Jan. 2002.
12. T. Znati, T. Alvabiah and R. Melhem, "Point-to-multipoint Path Establishment Schemes to Support Multicasting in WDM Networks," in Proc. 3rd IFIP Working Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM'99), pp. 1-22, Feb. 1999.
13. Y. Xin, G. N. Rouskas and H. G. Perros, "Light-Tree Routing Under Optical Layer Power Budget Constraints," Infocom submission, pp. 1-11, 2003.
14. C. Boworntummarat, L. Wuttisittikulkij, and S. Segkhoonthod, "Multicast routing and wavelength allocation in multi-fiber mesh and multi-ring WDM networks," submission to JSAC-OCN.
15. X. Jia, D. Du, X. Hu, M. Lee and J. Gu, "Optimization of wavelength assignment for QoS multicast in WDM networks," IEEE Trans on Commun., vol. 49, pp. 341-350, Feb. 2001.
16. C. Baworntummarat. Wavelength routing and optical layer network protection approaches against single link failures for multicast traffic on WDM network. Doctoral dissertation, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2003.
17. S. Baroni, Routing and wavelength allocation in WDM Optical Networks, Doctoral dissertation, University of College London, 1998.
18. N. Nagutsu, "Photonic network design issues and applications to the IP backbone," IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 18, pp. 2010-2018, Dec. 2000.
19. Y. Luo and N. Ansari, "Performance Evaluation of Survivable Multifiber WDM Networks," Proc. IEEE GLOBECOM'03, pp. 2524-2528, 2003.
20. G. Li and R. Wang, "On the wavelength assignment problem in multifiber WDM Star and ring network," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 9, no. 1, pp.60-68, Feb. 2001.

21. W. D. Grover. Mesh-Based Survivable Networks: Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networking. New Jersey. Prentice Hall, 2004.
22. F. Grover, P. Kelly and M. Lagun, "Tabu Search," Kluwer Academic Publishers, 1997.
23. M. Sait and H. Youssef. Iterative Computer Algorithm with Application in Engineering: Solving Combinatorial Optimization Problems. IEEE Computer Society Press, Angela Burgess, 1999.
24. วัลญกร วุฒิสถิธิกุลกิจ, รศ. ดร., วิศวกรรมโทรคมนาคม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
25. ธีญพร เอี่ยมวสันต์. การออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง โดยใช้วิธีสถิติอัลกอริทึม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
26. ภัทรินทร์ ลีลาวัณย์. การออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกที่คำนึงถึงการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก แบบจำลองคณิตศาสตร์

เนื้อหาส่วนนี้แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ [16] ได้นำเสนอสำหรับการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง สำหรับการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ และสำหรับการออกแบบปกป้องโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

งานวิจัย [16] เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้ออกแบบการแก้ไขปัญหาการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ และแบบจำลองสำหรับการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายสำหรับโครงข่าย DWDM ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยมีวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองคือ เพื่อใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ ทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีและไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยอาศัย Integer Linear Programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

ก.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
N	จำนวนโหนดทั้งหมดในโครงข่าย
L	จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาทั้งหมดในโครงข่าย
$K = R $	จำนวนมัลติคาสต์เซสชัน
$r_k (s_k, D_k)$	มัลติคาสต์เซสชันที่ r_k โดยมีโหนดต้นทางคือ s_k และมีชุดโหนดปลายทางคือ ชุด D_k
t_{r_k}	ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k
Δ	จำนวนสัญญาณที่มากที่สุดที่อนุญาตให้ออกจากตัวแยกสัญญาณได้ (fanout)
M	จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ลงบนเส้นใยนำแสงได้
$\delta_{ij,p}^{r_k}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ p ของชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0
P_{sd}	ชุดของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดของคูโหนดที่ sd
I_∞	ค่าคงที่จำนวนเต็มที่มีค่ามาก
ตัวแปร	คำอธิบาย
f_{ij}	จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij
$x_{r_k}^{ij}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อกิ่งเชิงแสงที่ใช้ส่งข้อมูลจากโหนด i ไปยังโหนด j ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างต้นไม้งเชิงแสงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ถ้าไม่ถูกใช้จะมีค่าเป็น 0

ตัวแปร	คำอธิบาย
$a_{r_k,p}^{sd}$	เส้นทางทางกายภาพ (physical route) ลำดับที่ p ของคุโนดที่ sd สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซชันที่ r_k (กรณี VLT)
$a_{r_k,p,\lambda}^{sd}$	เส้นทางทางกายภาพลำดับที่ p ของคุโนดที่ sd สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซชันที่ r_k ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ (กรณี LT)
$W_{r_k,\lambda}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อค่าความยาวคลื่น λ ถูกเลือกเพื่อใช้ส่งข้อมูลสำหรับมัลติคาสต์เซชันที่ r_k ถ้าไม่ถูกเลือกจะมีค่าเป็น 0 (กรณี LT)

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรเพิ่มเติมสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายได้รับความเสียหาย

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
$E_{sd}^{ij'}$	เซตของเส้นทางสำรองของคุโนดที่ sd เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความเสียหาย
$\delta_{ij,p}^{sd}$	มีค่าเป็น 1 ถ้าเส้นทางปกติลำดับที่ p ของคุโนด sd ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij และจะมีค่าเป็น 0 ถ้าไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij
$\mu_{ij,e}^{sd,ij'}$	มีค่าเป็น 1 ถ้าเส้นทางสำรองลำดับที่ e ของคุโนดที่ sd ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความเสียหาย ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0

ตัวแปร	คำอธิบาย
f_{ij}	จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij
$xf_{r_k,ij}^{ij'}$	มีค่าเป็น 1 ถ้ากึ่งเชิงแสงสำรองระหว่างโนด i และ j เป็นส่วนหนึ่งของต้นไม้เชิงแสงสำรองที่รองรับปริมาณทราฟฟิกของมัลติคาสต์เซชันที่ r_k เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความเสียหาย
$u_{r_k,e}^{sd,ij'}$	วิธีบูรณะตัวเลือกลำดับที่ e ของคุโนด sd ที่รองรับปริมาณทราฟฟิกของมัลติคาสต์เซชันที่ r_k เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความเสียหาย (กรณี VLT)
$u_{r_k,e,\lambda}^{sd,ij'}$	วิธีบูรณะตัวเลือกลำดับที่ e ของคุโนด sd ที่รองรับปริมาณทราฟฟิกของมัลติคาสต์เซชันที่ r_k ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ เมื่อข่ายเชื่อมโยง ij' ได้รับความเสียหาย (กรณี LT)

ก.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

ในการหาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด (optimal light-tree) T_k เพื่อรองรับมัลติคาสต์เซตชั้นที่ $r_k(s_k, D_k)$ นั้น จะต้องแทนที่โครงข่าย DWDM ที่พิจารณาด้วยกราฟแบบไม่แสดงทิศทาง $G_k = (N_k, A_k)$ โดยชุดของโนด N_k จะประกอบไปด้วยโนดต้นทาง s_k และชุดของโนดปลายทาง D_k แสดงได้ดังสมการ $N_k = \{i \in N_k | i \in D_k \vee i = s_k\}$ รวมทั้งสิ้นจำนวน N_k โหนด, และชุดของเส้นเชื่อมเชิงตรรกะ (logical arcs) A_k ซึ่งแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $A_k = \{ij \in A_k | i, j \in N_k \wedge i \neq j\}$ แล้วเปลี่ยนกราฟแบบไม่แสดงทิศทาง G_k ที่ได้ให้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด T_k โดยโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องประกอบด้วยกิ่งเชิงแสงจำนวน $|N_k| - 1$ กิ่ง ดังนั้น สามารถแสดงเงื่อนไขบังคับ 2 ข้อแรกได้ดังนี้

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

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

เมื่อพิจารณาเส้นเชื่อมขาออกของแต่ละโนด จะพบว่าจำนวนเส้นเชื่อมขาออกของแต่ละโนดจะถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสงที่สามารถแยกสัญญาณแสงออกเป็นสัญญาณขนาดย่อยได้จำนวนเท่ากับ Δ ดังนั้น สามารถแสดงเงื่อนไขบังคับสมการที่ ก.3 ได้ดังนี้

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

และเพื่อเป็นการรับประกันว่าทุกโนดที่เป็นสมาชิกของกลุ่มมัลติคาสต์สามารถเชื่อมต่อถึงกันได้ และโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องไม่มีลักษณะเป็นวงปิด เงื่อนไขบังคับสมการที่ ก.4 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sum_{ij \in \mathcal{G}(S)} x_{r_k}^{ij} \geq 1, \quad \forall S \subset N_k, S \neq \emptyset, N, \forall r_k \in R \quad (ก.4)$$

เมื่อ S คือเซตย่อย (subset) ของ N_k และ $\mathcal{G}(S)$ คือ เซตตัด (cut-set) ของเซตย่อย S โดยสามารถแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $\mathcal{G}(S) = \{ij \in A_k | i \in S, j \notin S\}$

ก.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

ในการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ในสภาวะทำงานปกติ จะเป็นการจัดสรรความจุใช้งานเพื่อรองรับเส้นทางที่เป็นวิธีทำงานให้กับโครงข่าย โดยสามารถใช้เทคนิค ILP ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

ก.4.1 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (ก.5)$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) และ

$$\sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p}^{sd} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (ก.6)$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p}^{sd} \delta_{ij, p}^{sd} \geq 0, \quad \forall ij \in L \quad (ก.7)$$

$$a_{r_k, p}^{sd} \in Z^+, \quad \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (ก.8)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (ก.9)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นวิธี VLT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.5) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) และ (ก.6) - (ก.9) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้หาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.6) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.7) เป็นเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้บังคับให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.8) และ (ก.9) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้หาค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

ก.4.2 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (\text{ก.10})$$

และมีเงื่อนไขบังคับสมการที่ (ก.1) - (ก.4) และ

$$\sum_{p \in P_k} \sum_{\lambda=1}^M a_{r_k, p, \lambda} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in V_k, \forall r_k \in R \quad (\text{ก.11})$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p, \lambda}^{sd} \delta_{ij, p}^{sd} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L \quad (\text{ก.12})$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{r_k, \lambda} = t_{r_k}, \quad \forall r_k \in R \quad (\text{ก.13})$$

$$a_{r_k, p, \lambda}^{sd} \leq I_{\infty} \times W_{r_k, \lambda}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (\text{ก.14})$$

$$W_{r_k, \lambda} \in \{0, 1\}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R \quad (\text{ก.15})$$

$$a_{r_k, p, \lambda}^{sd} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (\text{ก.16})$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (\text{ก.17})$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นวิธี LT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.10) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) – (ก.4) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้หาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.11) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กึ่งเชิงแสงของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.12) เป็นเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้บังคับให้ความจุของสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.13) จะกำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซชันเลือกความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียว และความยาวคลื่นนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางทางกายภาพที่เลือกจากเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.11) ซึ่งแสดงได้ดังเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.14) ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.15) – (ก.17) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นตัวแปรแบบบูล (boolean variable) และจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

ก.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายได้รับความเสียหาย

เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นในโครงข่าย ทราฟฟิกในโครงข่ายจะถูกจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น โดยสามารถแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่าง ๆ ดังนี้

ก.5.1 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ LR (Light-Tree Reconfiguration)

กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} , \quad (ก.18)$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) ,และ

$$\sum_{ij \in A_k} x f_{r_k, ij}^{ij} = |N_k| - 1, \quad \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.19)$$

$$\sum_{ij \in \mathcal{G}(S)} x f_{r_k, ij}^{ij} \geq 1, \quad \forall S \subset N_k, S \neq \emptyset, N, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.20)$$

$$\sum_{j: ij \in A_k} x f_{r_k, ij}^{ij} \leq \Delta, \quad \forall i \in N_k, \forall ij' \in L \quad (ก.21)$$

$$x f_{r_k, ij}^{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall ij \in A_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.22)$$

$$\sum_{e \in E_{sd}^{ij}} u_{r_k, e}^{sd, ij} = t_{r_k} \times x f_{r_k, ij}^{sd}, \quad \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.23)$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{e \in E_{sd}^{ij}} u_{r_k, e}^{sd, ij} \mu_{ij, e}^{sd, ij} \geq 0, \quad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.24)$$

$$u_{r_k, e}^{sd, ij} \in Z^+, \quad \forall e \in E_{sd}^{ij}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (ก.25)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (ก.26)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นสำหรับกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ LR ในกรณี VLT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.18) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยใช้เงื่อนไขบังคับตามข้อที่ (ก.1) – (ก.4) ส่วนเงื่อนไขข้อที่ (ก.19)-(ก.22) จะบังคับให้ทุกต้นไม้มัลติคาสต์สามารถที่จะจัดสรรเส้นทาง

ใหม่ได้ทุกกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความขัดข้อง เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.23) บังคับให้เมื่อเกิดความขัดข้องขึ้น กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.24) เป็นเงื่อนไขที่แสดงว่า เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขึ้น ความจุช่องสัญญาณทุกข่ายเชื่อมโยงจะยังคงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เปลี่ยนมาใช้งาน ข่ายเชื่อมโยงนั้นๆได้ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.25) และ (ก.26) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นตัวแปรแบบบูล และจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} , \quad (ก.27)$$

และมีเงื่อนไขบังคับสมการที่ (ก.1) - (ก.4), (ก.11), (ก.12), (ก.14) และ

$$\sum_{ij \in A_k} x f_{r_k, ij}^{ij} = |N_k| - 1, \quad \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.28)$$

$$\sum_{ij \in 9(S)} x f_{r_k, ij}^{ij} \geq 1, \quad \forall S \subset N_k, S \neq \phi, N, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.29)$$

$$\sum_{j: ij \in A_k} x f_{r_k, ij}^{ij} \leq \Delta, \quad \forall i \in N_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.30)$$

$$x f_{r_k, ij}^{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall ij \in A_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.31)$$

$$\sum_{e \in E_{sd}^{ij'}} \sum_{\lambda=1}^M u_{r_k, p, \lambda}^{sd, ij'} = t_{r_k} \times x f_{r_k, ij'}^{sd}, \quad \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.32)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{e \in E_{sd}^{ij'}} u_{r_k, e, \lambda}^{sd, ij'} \mu_{ij, e}^{sd, ij'} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \quad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.33)$$

$$u_{r_k, e, \lambda}^{sd, ij'} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall e \in E_{sd}^{ij'}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.34)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{r_k, \lambda} = t_{r_k}, \quad \forall r_k \in R \quad (ก.35)$$

$$u_{r_k, e, \lambda}^{sd, ij'} \leq I_{\infty} \times W_{r_k, \lambda}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall e \in E_{sd}^{ij'}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.36)$$

$$W_{r_k, \lambda} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R \quad (ก.37)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L. \quad (ก.38)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นสำหรับกลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายแบบ LR ในกรณี LT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.27) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.1) – (ก.4) ส่วนเงื่อนไขข้อที่ (ก.28)-(ก.31) จะบังคับให้ทุกต้นไม้งาแสงสามารถที่จะจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ทุกกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความขัดข้อง ส่วนเงื่อนไขข้อที่ (ก.33) – (ก.38) เป็นเงื่อนไขที่มีการพิจารณาเช่นเดียวกันกับการปกป้องโครงข่ายแบบ LR ในกรณี VLT ทุกประการเพียงแต่จะมีการเพิ่มมิติของความยาวคลื่นเข้าไปในสมการคณิตศาสตร์เพื่อระบุความยาวคลื่นให้กับวิถีนูรณะ

ก.5.2 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ LIR (Light-Tree Interrupted Reconfiguration)

กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} , \quad (ก.39)$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) , (ก.6) - (ก.8) และ

$$\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p}^{sd} \delta_{ij, p}^{sd} \leq I_{\infty} \times G_{r_k}^{ij'} , \quad \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.40)$$

$$\sum_{ij \in A_k} x f_{r_k, ij}^{ij} = (|N_k| - 1) \times G_{r_k}^{ij'} , \quad \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.41)$$

$$\sum_{ij \in \theta(S)} x f_{r_k, ij}^{ij} \geq G_{r_k}^{ij'} , \quad \forall S \subset N_k, S \neq \emptyset, N , \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.42)$$

$$\sum_{j: ij \in A_k} x f_{r_k, ij}^{ij} \leq \Delta \times G_{r_k}^{ij'} , \quad \forall i \in N_k , \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.43)$$

$$x f_{r_k, ij}^{ij} \in \{0, 1\} , \quad \forall ij \in A_k , \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.44)$$

$$\sum_{e \in E_{sd}^{ij'}} u_{r_k, e}^{sd, ij'} = t_{r_k} \times x f_{r_k, ij}^{sd} , \quad \forall sd \in A_k , \forall r_k \in R , \forall ij' \in L \quad (ก.45)$$

$$\left(\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p}^{sd} \delta_{ij, p}^{sd} - C_{r_k, ij}^{ij'} \right) \leq I_{\infty} G_{r_k}^{ij'} , \quad \forall r_k \in R, \forall ij \in L - \{ij'\} , \forall ij' \in L \quad (ก.46)$$

$$C_{r_k,ij}^{ij'} \leq I_\infty (1 - G_{r_k}^{ij'}), \quad \forall r_k \in R, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.47)$$

$$C_{r_k,ij}^{ij'} \in Z^+, \quad \forall r_k \in R, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.48)$$

$$G_{r_k}^{ij'} \in \{0,1\}, \quad \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.49)$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{e \in E_{sd}^{ij}} u_{r_k,e}^{sd,ij'} \mu_{ij,e}^{sd,ij'} - \sum_{r_k \in R} C_{r_k,ij}^{ij'} \geq 0, \quad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.50)$$

$$u_{r_k,e}^{sd,ij'} \in Z^+, \quad \forall e \in E_{sd}^{ij'}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R, ij' \in L \quad (ก.51)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (ก.52)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นสำหรับกลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายแบบ LIR ในกรณี VLT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.39) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.1) – (ก.4) และ (ก.11), (ก.12), (ก.14) สำหรับการเลือกรูปแบบโครงร่างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายในสภาวะปกติ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.40) และ (ก.49) เป็นเงื่อนไขที่ใช้ร่วมกันในการระบุต้นไม้เชิงแสงที่จะได้รับการจัดวิธีบูรณะใหม่ เมื่อข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพของต้นไม้เชิงแสงนั้นเกิดความเสียหาย โดย $G_{r_k}^{ij'}$ จะเท่ากับ 1 เมื่อข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij ที่ใช้รองรับปริมาณทราฟฟิกของมัลติคาสต์เซตชั้นที่ r_k ได้รับผลกระทบ (ij') และจะเป็น 0 เมื่อต้นไม้เชิงแสงนั้นไม่ได้รับผลกระทบ ซึ่ง I_∞ จะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ที่มีค่าสูงๆ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.41) และ (ก.45) เป็นเงื่อนไขที่ใช้กำหนดวิธีบูรณะให้กับต้นไม้เชิงแสงที่ใช้รองรับปริมาณทราฟฟิกของมัลติคาสต์เซตชั้นที่ r_k เมื่อ $G_{r_k}^{ij'}$ มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.46) และ (ก.48) นั้น เป็นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับหาจำนวนช่องสัญญาณที่มีการคืนให้กับโครงข่าย $C_{r_k,ij}^{ij'}$ ตามหลักการของกลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายแบบ LIR และเทคนิคการวางเส้นใยแสงสำรองแบบ SW+WW+SR เพื่อที่จะนำช่องสัญญาณเหล่านั้นไปจัดวิธีบูรณะใหม่ให้กับต้นไม้เชิงแสงที่ได้รับผลกระทบ แต่เมื่อ $G_{r_k}^{ij'}$ มีค่าเท่ากับ 0 ตัวแปร $C_{r_k,ij}^{ij'}$ จะมีค่าเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณที่ข่ายเชื่อมโยง ij ของต้นไม้เชิงแสง r_k ที่ไม่ได้รับผลกระทบจาก ij' ในขณะที่ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.47) เป็นเงื่อนไขที่ใช้บังคับว่า ถ้า $G_{r_k}^{ij'}$ มีค่าเท่ากับ 1 แล้ว $C_{r_k,ij}^{ij'}$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.50) เป็นเงื่อนไขที่ใช้รับประกันว่า เมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขึ้น ความจุช่องสัญญาณทุกข่ายเชื่อมโยงจะยังคงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เปลี่ยนมาใช้งาน

ขายเชื่อมโยงกันนั้นๆได้ สำหรับเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.51) และ (ก.52) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นตัวแปรแบบบูล และจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} , \quad (ก.53)$$

และมีเงื่อนไขบังคับสมการที่ (ก.1) - (ก.4), (ก.11), (ก.12), (ก.14) และ

$$\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} \sum_{\lambda=1}^M a_{r_k, p, \lambda}^{sd} \delta_{ij', p}^{sd} \leq I_{\infty} \times G_{r_k}^{ij'} , \quad \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.54)$$

$$\sum_{ij \in A_k} x f_{r_k, ij}^{ij} = (|N_k| - 1) \times G_{r_k}^{ij'} , \quad \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.55)$$

$$\sum_{ij \in \theta(S)} x f_{r_k, ij}^{ij} \geq G_{r_k}^{ij'} , \quad \forall S \subset N_k, S \neq \emptyset, N, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.56)$$

$$\sum_{j: ij \in A_k} x f_{r_k, ij}^{ij} \leq \Delta \times G_{r_k}^{ij'} , \quad \forall i \in N_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.57)$$

$$x f_{r_k, ij}^{ij} \in \{0, 1\} , \quad \forall ij \in A_k, \forall ij' \in L, \forall r_k \in R \quad (ก.58)$$

$$\left(\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p, \lambda}^{sd} \delta_{ij', p}^{sd} - C_{r_k, ij, \lambda}^{ij'} \right) \leq I_{\infty} G_{r_k}^{ij'} , \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R, \\ \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.59)$$

$$\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} \sum_{\lambda=1}^M a_{r_k, p, \lambda}^{sd} \delta_{ij', p}^{sd} \leq I_{\infty} \times G_{r_k}^{ij'} , \quad \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.60)$$

$$C_{r_k, ij, \lambda}^{ij'} \in Z^+ , \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.61)$$

$$G_{r_k}^{ij'} \in \{0, 1\} , \quad \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.62)$$

$$\sum_{e \in E_{sd}^{ij'}} \sum_{\lambda=1}^M u_{r_k, e, \lambda}^{sd, ij'} = t_{r_k} \times x f_{r_k, ij}^{sd} , \quad \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.63)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{e \in E_{sd}^{ij}} u_{r_k, e, \lambda}^{sd, ij'} \mu_{ij, e}^{sd, ij'} - \sum_{r_k \in R} C_{r_k, ij, \lambda}^{ij'} \geq 0,$$

$$\forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.64)$$

$$u_{r_k, e, \lambda}^{sd, ij'} \in Z^+, \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall e \in E_{sd}^{ij'}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.65)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{r_k, \lambda} = t_{r_k}, \quad \forall r_k \in R \quad (ก.66)$$

$$u_{r_k, e, \lambda}^{sd, ij'} \leq I_\infty \times W_{r_k, \lambda},$$

$$\forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall e \in E_{sd}^{ij'}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R, \forall ij' \in L \quad (ก.67)$$

$$W_{r_k, \lambda} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R \quad (ก.68)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L. \quad (ก.69)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นสำหรับกลยุทธ์การปกป้องโครงข่ายแบบ LIR ในกรณี LT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.53) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.1) – (ก.4) ส่วนเงื่อนไขข้อที่ (ก.28)-(ก.31) จะบังคับให้ทุกต้นไม้งางแสงสามารถที่จะจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ทุกกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความขัดข้อง ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.54) – (ก.69) เป็นเงื่อนไขที่มีการพิจารณาเช่นเดียวกันกับการปกป้องโครงข่ายแบบ LR ในกรณี VLT ทุกประการเพียงแต่จะมีการเพิ่มมิติของความยาวคลื่นเข้าไปในสมการคณิตศาสตร์เพื่อระบุความยาวคลื่นให้กับวิถีนูรณ์



ต้นฉบับไม่มีหน้านี้

NO THIS PAGE IN ORIGINAL

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข ผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ของโครงข่าย

เนื้อหาส่วนนี้แสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหาลำดับที่มีผลต่อการหาต้นทุนของโครงข่าย 8N_14L, 10N_21L และ 14N_21L ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบของแต่ละโครงข่าย จำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ เวลาที่ใช้คำนวณ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ tabu list ขนาดต่างกัน เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ และจะหยุดการค้นหาคำตอบเมื่อไม่มีการพัฒนาของคำตอบให้เห็นภายใน 1000 รอบ ของ (ก) โครงข่าย 10N_21L และ (ข) โครงข่าย 14N_21L ตามลำดับ

ขนาด tabu list	Candidate Size = 5				Candidate Size = 7				Candidate Size = 10			
	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาทีก)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาทีก)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาทีก)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ
1	54	1.0	0.1667	3070	55	0.8	0.1458	2327	54	0.2	0.1875	1999
2	54	1.8	0.1151	2218	55	2.6	0.2008	2343	55	0.2	0.2099	2051
3	54	1.0	0.1513	2718	54	2.2	0.1745	2095	54	2.2	0.1922	1879
4	56	0.6	0.1057	2348	56	0.6	0.1039	1879	55	0.8	0.1620	1832
5	56	0.4	0.0924	1848	55	2.6	0.1599	2134	54	3.2	0.2255	1869
6	56	0.6	0.1383	2724	54	1.0	0.1654	2556	53	1.6	0.2901	2354
7	55	1.6	0.1086	2556	53	1.2	0.2276	2951	53	2.0	0.2818	2190
8	55	1.2	0.1500	2242	54	3.2	0.2365	2187	54	1.4	0.3042	1951
9	55	2.2	0.1654	2513	53	2.0	0.2065	2566	55	1.6	0.1792	2181
10	54	4.0	0.1276	2195	54	0.4	0.1870	2469	55	0.4	0.2810	2266
11	55	0.4	0.2070	2988	54	2.0	0.1542	2217	54	1.0	0.2474	1922
12	55	1.4	0.1716	2146	54	0.4	0.1563	2330	54	0.4	0.2708	2094
13	55	0.2	0.2180	2626	56	0.8	0.1826	2103	54	2.4	0.2628	2146
14	55	0.4	0.1117	2408	54	0.8	0.1807	2857	55	0.8	0.2648	2042
15	54	3.8	0.1253	1854	54	0.6	0.2013	2740	53	1.4	0.3104	1968

(ก)

ขนาด tabu list	Candidate Size = 5				Candidate Size = 7				Candidate Size = 10			
	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาทื)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาทื)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาทื)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ
1	66	4.6	0.0112	2127	63	0.4	0.1349	2134	64	0.4	0.1380	1304
2	67	1.8	0.0052	2069	64	0.8	0.1117	1598	63	1.0	0.1857	1579
3	66	2.6	0.0063	1898	63	1.4	0.1497	1921	63	0.8	0.2284	1818
4	67	1.4	0.0099	1738	64	0.6	0.1260	1805	63	0.6	0.2417	1870
5	68	0.6	0.0052	1983	63	0.4	0.1451	2110	64	0.4	0.1820	1614
6	67	4.8	0.0073	1625	63	0.2	0.1698	2074	64	0.8	0.1883	2096
7	66	3.6	0.0094	1753	63	0.2	0.1695	2433	64	0.0	0.1628	1575
8	69	1.0	0.0055	2110	64	0.8	0.1646	2149	64	0.8	0.2240	1597
9	67	2.2	0.0117	1879	63	0.4	0.1346	1794	64	0.0	0.2068	1747
10	69	2.6	0.0076	2121	63	2.0	0.1570	1945	63	0.2	0.2690	2006
11	65	4.4	0.0073	2206	63	0.4	0.1227	1665	64	0.8	0.1523	1469
12	67	1.2	0.0078	1735	63	0.4	0.2115	2467	64	0.0	0.1698	1718
13	67	2.4	0.0091	1719	64	0.6	0.1589	1995	63	0.2	0.1977	1872
14	69	2.6	0.0052	2281	64	0.4	0.1586	1774	64	0.8	0.2070	1604
15	66	3.4	0.0057	1769	63	1.8	0.1362	1655	63	0.4	0.2284	2014

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบของแต่ละโครงข่าย จำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบ เวลาที่ใช้คำนวณ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อ tabu list เป็นแบบพลวัตได้ ในช่วงที่ต่างกัน และระยะเวลาในการหยุดการค้นหาคำตอบที่แตกต่างกัน ที่ 100000 รอบ เมื่อ candidate size เท่ากับ 10 ของ (ก) โครงข่าย 8N_14L และ (ข) โครงข่าย 10N_21L

stop criteria	ขนาด tabu list แบบพลวัต															
	[1 15]				[5 12]				[5 20]				[10 20]			
	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาท)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาท)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาท)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาท)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ
50	49	2.8	0.0198	122	50	2.0	0.0161	114	50	1.6	0.0203	126	51	1.4	0.0143	102
100	49	0.8	0.0326	248	50	0.4	0.0167	207	50	1.2	0.0266	190	50	2.0	0.0297	180
150	50	1.2	0.0294	241	49	2.0	0.0263	231	50	1.2	0.0224	266	50	0.6	0.0651	350
200	49	1.2	0.0448	405	50	1.6	0.0682	396	50	1.2	0.0518	381	50	0.6	0.0404	336
300	49	0.8	0.0534	638	47	2.8	0.1083	729	49	1.4	0.0661	511	47	3.6	0.1010	699
400	49	0.8	0.0938	834	49	1.4	0.0737	682	48	1.8	0.0872	656	47	1.2	0.1354	805
500	48	0.4	0.1539	1108	48	0.8	0.1211	1023	48	0.6	0.1375	1020	48	0.8	0.1164	1036
600	48	0.6	0.1536	1216	47	1.0	0.1503	1097	48	0.6	0.1120	1179	48	0.4	0.0805	917
700	47	1.2	0.2237	1566	47	0.8	0.2120	1435	48	1.0	0.1372	1086	48	1.4	0.1318	1299
800	46	1.0	0.2841	1637	47	1.2	0.2594	1553	46	1.8	0.2716	1661	48	0.2	0.1490	1460
900	46	1.2	0.1753	1732	47	1.2	0.2690	1957	48	0.4	0.1997	1758	48	0.0	0.2328	1859
1000	46	1.2	0.2682	2093	46	1.4	0.4578	2183	47	1.4	0.2656	1806	47	1.2	0.2599	1700
2000	47	0.6	0.4026	3942	46	1.4	0.4536	3207	46	2.2	0.6990	3959	46	1.4	0.5784	3917
4000	46	1.2	0.7419	7123	46	0.4	1.2555	8849	46	0.4	1.2344	7327	46	1.4	1.1221	9367
6000	46	0.8	1.6276	10680	46	1.0	0.9740	10294	47	0.8	0.8365	9296	46	1.0	1.0984	9230
8000	46	1.4	2.1070	16048	46	0.4	1.8172	12978	46	0.8	1.3206	13143	46	0.4	2.4891	16468
10000	46	0.0	2.2661	17422	46	0.8	2.1448	17893	46	0.0	1.6185	14153	46	0.0	2.1281	18980

(ก)

stop criteria	ขนาด tabu list แบบพลวัต															
	[1 15]				[5 12]				[5 20]				[10 20]			
	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาท)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาท)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาท)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลาที่ใช้ คำนวณ (นาท)	จำนวน รอบที่ ค้นพบ
50	60	0.2	0.0130	135	59	2.6	0.0172	128	60	0.8	0.0096	122	57	6.8	0.0151	107
100	58	3.2	0.0453	273	59	0.6	0.0221	240	57	3.4	0.0326	266	58	0.4	0.0247	260
150	57	3.2	0.0490	395	58	0.4	0.0555	437	58	2.0	0.0214	320	58	0.6	0.0451	358
200	56	2.6	0.0396	444	57	3.4	0.0414	489	55	3.2	0.0646	574	56	2.0	0.0789	462
300	56	2.4	0.0615	669	57	0.6	0.0638	745	55	2.0	0.0518	765	54	4.2	0.0573	715
400	56	0.8	0.0846	780	56	2.8	0.0904	808	54	2.0	0.1404	1084	57	0.2	0.0721	853
500	54	1.4	0.1331	1267	55	2.2	0.0630	951	55	0.4	0.1201	991	55	2.0	0.1362	1147
600	54	1.8	0.0979	1523	55	0.6	0.1602	1599	55	1.0	0.1180	1436	55	1.2	0.1701	1219
700	54	1.0	0.1451	1609	54	1.4	0.2232	1657	55	1.0	0.2029	1749	52	5.2	0.2221	1770
800	53	1.4	0.1630	1838	53	2.8	0.2154	2267	55	2.6	0.1940	1821	54	1.4	0.1833	2016
900	53	1.8	0.3122	2602	55	0.4	0.1729	1894	54	2.0	0.2419	2033	54	2.2	0.2581	1850
1000	54	2.2	0.1648	1913	54	1.2	0.1872	2267	55	0.2	0.1602	1683	54	2.6	0.2503	2053
2000	53	1.0	0.4185	5428	53	0.4	0.3167	4573	53	1.2	0.3878	4137	54	0.8	0.2487	4653
4000	53	0.2	0.6497	6614	53	0.4	0.9016	8276	52	1.6	0.7682	6763	53	0.4	0.7063	7116
6000	53	0.2	0.7164	9252	52	0.6	1.3568	14374	52	0.4	1.2857	11133	52	1.2	1.5107	11713
8000	52	0.4	1.9940	14747	52	0.4	1.0523	13075	52	1.4	1.4143	12417	52	1.0	2.2378	14427
10000	52	0.2	2.9747	22759	52	0.4	1.6013	14040	52	1.2	2.3820	17599	53	0.8	1.3370	14995

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค การปรับพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมฮิวริสติกในกรณีทดสอบ

เนื้อหาส่วนนี้แสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหาลำดับที่มีผลต่อการหาต้นทุนของโครงข่าย 8N_14L, 10N_21L และ 14N_21L ตามลำดับ ที่ stop criteria ต่างกัน เมื่อ tabu list เป็นแบบพลวัต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ ที่แต่ละช่วงของ tabu list ที่เป็นแบบพลวัต ซึ่งแต่ละช่วงนั้นทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน ของโครงข่าย 8N_14L

จำนวน รอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	50	[1 15]	10	49	52	2.8	0.0198	132	122	0.08	0.10
100000	100	[1 15]	10	49	50	0.8	0.0326	200	248	0.04	0.06
100000	150	[1 15]	10	50	52	1.2	0.0294	113	241	0.04	0.05
100000	200	[1 15]	10	49	51	1.2	0.0448	221	405	0.03	0.03
100000	300	[1 15]	10	49	50	0.8	0.0534	197	638	0.01	0.02
100000	400	[1 15]	10	49	50	0.8	0.0938	466	834	0.01	0.02
100000	500	[1 15]	10	48	49	0.4	0.1539	931	1108	0.01	0.01
100000	600	[1 15]	10	48	49	0.6	0.1536	817	1216	0.01	0.01
100000	700	[1 15]	10	47	49	1.2	0.2237	1376	1566	0.01	0.01
100000	800	[1 15]	10	46	48	1.0	0.2841	1811	1637	0.01	0.01
100000	900	[1 15]	10	46	48	1.2	0.1753	709	1732	0.01	0.01
100000	1000	[1 15]	10	46	48	1.2	0.2682	1492	2093	0.01	0.01
100000	2000	[1 15]	10	47	48	0.6	0.4026	1714	3942	0.00	0.00
100000	4000	[1 15]	10	46	48	1.2	0.7419	2870	7123	0.00	0.00
100000	6000	[1 15]	10	46	47	0.8	1.6276	8593	10680	0.00	0.00
100000	8000	[1 15]	10	46	47	1.4	2.1070	10805	16048	0.00	0.00
100000	10000	[1 15]	10	46	46	0.0	2.2661	10089	17422	0.00	0.00

จำนวน รอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	50	[5 12]	10	50	52	2.0	0.0161	92	114	0.07	0.09
100000	100	[5 12]	10	50	51	0.4	0.0167	55	207	0.03	0.05
100000	150	[5 12]	10	49	51	2.0	0.0263	93	231	0.04	0.05
100000	200	[5 12]	10	50	51	1.6	0.0682	430	396	0.02	0.03
100000	300	[5 12]	10	47	49	2.8	0.1083	688	729	0.01	0.02
100000	400	[5 12]	10	49	50	1.4	0.0737	279	682	0.02	0.02
100000	500	[5 12]	10	48	49	0.8	0.1211	590	1023	0.01	0.01
100000	600	[5 12]	10	47	49	1.0	0.1503	785	1097	0.01	0.01
100000	700	[5 12]	10	47	48	0.8	0.2120	1237	1435	0.01	0.01
100000	800	[5 12]	10	47	49	1.2	0.2594	1558	1553	0.01	0.01
100000	900	[5 12]	10	47	48	1.2	0.2690	1541	1957	0.01	0.01
100000	1000	[5 12]	10	46	48	1.4	0.4578	3143	2183	0.00	0.01
100000	2000	[5 12]	10	46	48	1.4	0.4536	2116	3207	0.00	0.00
100000	4000	[5 12]	10	46	47	0.4	1.2555	7180	8849	0.00	0.00
100000	6000	[5 12]	10	46	47	1.0	0.9740	2780	10294	0.00	0.00
100000	8000	[5 12]	10	46	47	0.4	1.8172	7963	12978	0.00	0.00
100000	10000	[5 12]	10	46	47	0.8	2.1448	8792	17893	0.00	0.00

จำนวน รอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาทื)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	50	[5 20]	10	50	52	1.6	0.0203	131	126	0.05	0.10
100000	100	[5 20]	10	50	52	1.2	0.0266	149	190	0.04	0.06
100000	150	[5 20]	10	50	52	1.2	0.0224	43	266	0.04	0.04
100000	200	[5 20]	10	50	51	1.2	0.0518	260	381	0.02	0.03
100000	300	[5 20]	10	49	51	1.4	0.0661	282	511	0.02	0.02
100000	400	[5 20]	10	48	50	1.8	0.0872	400	656	0.01	0.02
100000	500	[5 20]	10	48	49	0.6	0.1375	736	1020	0.01	0.01
100000	600	[5 20]	10	48	49	0.6	0.1120	416	1179	0.01	0.01
100000	700	[5 20]	10	48	50	1.0	0.1372	534	1086	0.01	0.01
100000	800	[5 20]	10	46	49	1.8	0.2716	1689	1661	0.01	0.01
100000	900	[5 20]	10	48	49	0.4	0.1997	928	1758	0.01	0.01
100000	1000	[5 20]	10	47	49	1.4	0.2656	1453	1806	0.00	0.01
100000	2000	[5 20]	10	46	48	2.2	0.6990	4322	3959	0.00	0.00
100000	4000	[5 20]	10	46	47	0.4	1.2344	7049	7327	0.00	0.00
100000	6000	[5 20]	10	47	48	0.8	0.8365	1454	9296	0.00	0.00
100000	8000	[5 20]	10	46	47	0.8	1.3206	3666	13143	0.00	0.00
100000	10000	[5 20]	10	46	46	0.0	1.6185	4141	14153	0.00	0.00

จำนวน รอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาทื)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	50	[10 20]	10	51	52	1.4	0.0143	71	102	0.09	0.11
100000	100	[10 20]	10	50	52	2.0	0.0297	155	180	0.06	0.07
100000	150	[10 20]	10	50	51	0.6	0.0651	436	350	0.02	0.04
100000	200	[10 20]	10	50	51	0.6	0.0404	155	336	0.03	0.04
100000	300	[10 20]	10	47	50	3.6	0.1010	620	699	0.02	0.02
100000	400	[10 20]	10	47	49	1.2	0.1354	830	805	0.01	0.02
100000	500	[10 20]	10	48	49	0.8	0.1164	540	1036	0.01	0.01
100000	600	[10 20]	10	48	49	0.4	0.0805	109	917	0.01	0.01
100000	700	[10 20]	10	48	49	1.4	0.1318	487	1299	0.01	0.01
100000	800	[10 20]	10	48	49	0.2	0.1490	553	1460	0.01	0.01
100000	900	[10 20]	10	48	48	0.0	0.2328	1196	1859	0.01	0.01
100000	1000	[10 20]	10	47	49	1.2	0.2599	1235	1700	0.01	0.01
100000	2000	[10 20]	10	46	48	1.4	0.5784	3218	3917	0.00	0.00
100000	4000	[10 20]	10	46	47	1.4	1.1221	6043	9367	0.00	0.00
100000	6000	[10 20]	10	46	47	1.0	1.0984	3810	9230	0.00	0.00
100000	8000	[10 20]	10	46	47	0.4	2.4891	13406	16468	0.00	0.00
100000	10000	[10 20]	10	46	46	0.0	2.1281	8422	18980	0.00	0.00

ตารางที่ ค.2 ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ ที่แต่ละช่วงของ tabu list ที่เป็นแบบพลวัต ซึ่งแต่ละช่วงนั้นทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน ของโครงข่าย 10N_21L

จำนวนรอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุนโครงข่าย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าดีที่สุดเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่เจอต้นทุนต่ำสุด	จำนวนรอบที่ค้นพบ	อัตราส่วนยอมรับ/ไม่รับ	ยอมรับ/ไม่รับเฉลี่ย
100000	50	[1 15]	10	60	61	0.2	0.0130	103	135	0.07	0.11
100000	100	[1 15]	10	58	61	3.2	0.0453	426	273	0.03	0.06
100000	150	[1 15]	10	57	60	3.2	0.0490	428	395	0.03	0.04
100000	200	[1 15]	10	56	58	2.6	0.0396	272	444	0.03	0.04
100000	300	[1 15]	10	56	58	2.4	0.0615	422	669	0.02	0.03
100000	400	[1 15]	10	56	57	0.8	0.0846	598	780	0.01	0.02
100000	500	[1 15]	10	54	56	1.4	0.1331	1056	1267	0.01	0.02
100000	600	[1 15]	10	54	56	1.8	0.0979	553	1523	0.01	0.01
100000	700	[1 15]	10	54	56	1.0	0.1451	1013	1609	0.01	0.01
100000	800	[1 15]	10	53	55	1.4	0.1630	1143	1838	0.01	0.01
100000	900	[1 15]	10	53	55	1.8	0.3122	2786	2602	0.01	0.01
100000	1000	[1 15]	10	54	56	2.2	0.1648	957	1913	0.01	0.01
100000	2000	[1 15]	10	53	54	1.0	0.4185	2940	5428	0.00	0.00
100000	4000	[1 15]	10	53	54	0.2	0.6497	3537	6614	0.00	0.00
100000	6000	[1 15]	10	53	54	0.2	0.7164	2376	9252	0.00	0.00
100000	8000	[1 15]	10	52	53	0.4	1.9940	14129	14747	0.00	0.00
100000	10000	[1 15]	10	52	53	0.2	2.9747	21582	22759	0.00	0.00

จำนวนรอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุนโครงข่าย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าดีที่สุดเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่เจอต้นทุนต่ำสุด	จำนวนรอบที่ค้นพบ	อัตราส่วนยอมรับ/ไม่รับ	ยอมรับ/ไม่รับเฉลี่ย
100000	50	[5 12]	10	59	62	2.6	0.0172	144	128	0.08	0.11
100000	100	[5 12]	10	59	60	0.6	0.0221	173	240	0.05	0.06
100000	150	[5 12]	10	58	59	0.4	0.0555	504	437	0.03	0.04
100000	200	[5 12]	10	57	59	3.4	0.0414	272	489	0.02	0.04
100000	300	[5 12]	10	57	58	0.6	0.0638	435	745	0.02	0.02
100000	400	[5 12]	10	56	58	2.8	0.0904	655	808	0.01	0.02
100000	500	[5 12]	10	55	57	2.2	0.0630	232	951	0.01	0.02
100000	600	[5 12]	10	55	56	0.6	0.1602	1256	1599	0.01	0.01
100000	700	[5 12]	10	54	56	1.4	0.2232	1908	1657	0.01	0.01
100000	800	[5 12]	10	53	56	2.8	0.2154	1701	2267	0.01	0.01
100000	900	[5 12]	10	55	56	0.4	0.1729	1099	1894	0.01	0.01
100000	1000	[5 12]	10	54	55	1.2	0.1872	1184	2267	0.01	0.01
100000	2000	[5 12]	10	53	54	0.4	0.3167	1675	4573	0.00	0.00
100000	4000	[5 12]	10	53	54	0.4	0.9016	6329	8276	0.00	0.00
100000	6000	[5 12]	10	52	53	0.6	1.3568	8938	14374	0.00	0.00
100000	8000	[5 12]	10	52	53	0.4	1.0523	3869	13075	0.00	0.00
100000	10000	[5 12]	10	52	53	0.4	1.6013	7568	14040	0.00	0.00

จำนวน รอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาทื)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	50	[5 20]	10	60	61	0.8	0.0096	65	122	0.09	0.13
100000	100	[5 20]	10	57	60	3.4	0.0326	276	266	0.04	0.06
100000	150	[5 20]	10	58	60	2.0	0.0214	100	320	0.03	0.05
100000	200	[5 20]	10	55	58	3.2	0.0646	537	574	0.02	0.03
100000	300	[5 20]	10	55	57	2.0	0.0518	290	765	0.02	0.02
100000	400	[5 20]	10	54	56	2.0	0.1404	1210	1084	0.01	0.02
100000	500	[5 20]	10	55	56	0.4	0.1201	875	991	0.01	0.02
100000	600	[5 20]	10	55	57	1.0	0.1180	785	1436	0.01	0.01
100000	700	[5 20]	10	55	57	1.0	0.2029	1640	1749	0.01	0.01
100000	800	[5 20]	10	55	56	2.6	0.1940	1418	1821	0.01	0.01
100000	900	[5 20]	10	54	56	2.0	0.2419	1898	2033	0.01	0.01
100000	1000	[5 20]	10	55	56	0.2	0.1602	860	1683	0.01	0.01
100000	2000	[5 20]	10	53	54	1.2	0.3878	2438	4137	0.00	0.00
100000	4000	[5 20]	10	52	54	1.6	0.7682	4652	6763	0.00	0.00
100000	6000	[5 20]	10	52	53	0.4	1.2857	8172	11133	0.00	0.00
100000	8000	[5 20]	10	52	54	1.4	1.4143	7516	12417	0.00	0.00
100000	10000	[5 20]	10	52	54	1.2	2.3820	15357	17599	0.00	0.00

จำนวน รอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาทื)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	50	[10 20]	10	57	62	6.8	0.0151	127	107	0.10	0.14
100000	100	[10 20]	10	58	59	0.4	0.0247	173	260	0.06	0.07
100000	150	[10 20]	10	58	59	0.6	0.0451	350	358	0.04	0.05
100000	200	[10 20]	10	56	58	2.0	0.0789	715	462	0.02	0.04
100000	300	[10 20]	10	54	57	4.2	0.0573	350	715	0.01	0.03
100000	400	[10 20]	10	57	58	0.2	0.0721	439	853	0.02	0.02
100000	500	[10 20]	10	55	57	2.0	0.1362	1076	1147	0.01	0.01
100000	600	[10 20]	10	55	57	1.2	0.1701	1364	1219	0.01	0.02
100000	700	[10 20]	10	52	56	5.2	0.2221	1861	1770	0.01	0.01
100000	800	[10 20]	10	54	56	1.4	0.1833	1343	2016	0.01	0.01
100000	900	[10 20]	10	54	56	2.2	0.2581	2102	1850	0.01	0.01
100000	1000	[10 20]	10	54	56	2.6	0.2503	1676	2053	0.01	0.01
100000	2000	[10 20]	10	54	55	0.8	0.2487	852	4653	0.00	0.00
100000	4000	[10 20]	10	53	54	0.4	0.7063	4019	7116	0.00	0.00
100000	6000	[10 20]	10	52	54	1.2	1.5107	10362	11713	0.00	0.00
100000	8000	[10 20]	10	52	54	1.0	2.2378	15976	14427	0.00	0.00
100000	10000	[10 20]	10	53	54	0.8	1.3370	5146	14995	0.00	0.00

ตารางที่ ค.3 ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ ที่แต่ละช่วงของ tabu list ที่เป็นแบบพลวัต ซึ่งแต่ละช่วงนั้นทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน ของโครงข่าย 14N_21L

จำนวนรอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุนโครงข่าย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าดีที่สุดเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่เจอต้นทุนต่ำสุด	จำนวนรอบที่ค้นพบ	อัตราส่วนยอมรับ/ไม่รับ	ยอมรับ/ไม่รับเฉลี่ย
100000	50	[1 15]	10	66	68	2.8	0.0112	80	124	0.07	0.11
100000	100	[1 15]	10	66	67	0.6	0.0193	121	207	0.06	0.06
100000	150	[1 15]	10	65	67	2.0	0.0344	259	356	0.03	0.05
100000	200	[1 15]	10	64	65	0.6	0.0695	604	548	0.02	0.03
100000	300	[1 15]	10	64	65	0.6	0.0698	511	716	0.01	0.02
100000	400	[1 15]	10	64	65	0.6	0.0521	213	644	0.02	0.02
100000	500	[1 15]	10	64	65	0.6	0.1052	744	864	0.01	0.02
100000	600	[1 15]	10	64	65	0.4	0.1208	821	1120	0.01	0.01
100000	700	[1 15]	10	63	64	0.6	0.1044	531	1451	0.01	0.01
100000	800	[1 15]	10	64	64	0.0	0.1648	1154	1998	0.01	0.01
100000	900	[1 15]	10	63	64	0.8	0.2464	2007	2280	0.01	0.01
100000	1000	[1 15]	10	63	64	0.8	0.1284	510	1847	0.01	0.01
100000	2000	[1 15]	10	64	65	0.6	0.2177	595	3141	0.00	0.01
100000	4000	[1 15]	10	64	64	0.0	0.4120	826	5472	0.00	0.00
100000	6000	[1 15]	10	63	63	0.0	1.1286	6920	10400	0.00	0.00
100000	8000	[1 15]	10	63	63	0.0	1.0724	4323	13453	0.00	0.00
100000	10000	[1 15]	10	63	64	0.6	1.2078	3717	12985	0.00	0.00

จำนวนรอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุนโครงข่าย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าดีที่สุดเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่เจอต้นทุนต่ำสุด	จำนวนรอบที่ค้นพบ	อัตราส่วนยอมรับ/ไม่รับ	ยอมรับ/ไม่รับเฉลี่ย
100000	50	[5 12]	10	67	69	2.0	0.0091	57	102	0.09	0.11
100000	100	[5 12]	10	66	68	1.6	0.0208	140	190	0.06	0.08
100000	150	[5 12]	10	65	66	0.4	0.0336	238	384	0.03	0.04
100000	200	[5 12]	10	65	66	0.4	0.0497	356	423	0.03	0.04
100000	300	[5 12]	10	64	66	1.4	0.0599	405	671	0.02	0.02
100000	400	[5 12]	10	64	65	0.6	0.0758	480	840	0.01	0.02
100000	500	[5 12]	10	64	65	0.4	0.0896	534	1046	0.01	0.02
100000	600	[5 12]	10	64	65	0.8	0.1193	785	1317	0.01	0.01
100000	700	[5 12]	10	64	65	1.0	0.1430	945	1241	0.01	0.01
100000	800	[5 12]	10	64	65	0.8	0.0870	210	1305	0.01	0.01
100000	900	[5 12]	10	63	65	1.2	0.1021	274	1358	0.01	0.01
100000	1000	[5 12]	10	63	65	1.2	0.2208	1583	1881	0.01	0.01
100000	2000	[5 12]	10	63	64	0.6	0.3474	2008	3628	0.00	0.00
100000	4000	[5 12]	10	63	64	0.6	0.4393	1156	5499	0.00	0.00
100000	6000	[5 12]	10	63	64	0.6	0.8638	3738	8391	0.00	0.00
100000	8000	[5 12]	10	63	64	0.8	0.9573	2897	11411	0.00	0.00
100000	10000	[5 12]	10	63	64	0.8	1.6719	8449	16736	0.00	0.00

จำนวน รอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาทื)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	50	[5 20]	10	66	69	3.6	0.0167	149	121	0.08	0.12
100000	100	[5 20]	10	64	67	2.4	0.0310	242	209	0.04	0.07
100000	150	[5 20]	10	63	65	1.2	0.0424	349	489	0.03	0.03
100000	200	[5 20]	10	64	66	1.4	0.0432	292	516	0.02	0.03
100000	300	[5 20]	10	64	66	1.2	0.0581	355	606	0.02	0.02
100000	400	[5 20]	10	64	66	2.6	0.0708	415	790	0.01	0.02
100000	500	[5 20]	10	63	65	1.4	0.1133	832	1031	0.01	0.02
100000	600	[5 20]	10	63	64	0.4	0.1240	829	1115	0.01	0.02
100000	700	[5 20]	10	63	64	0.8	0.0901	352	1539	0.01	0.01
100000	800	[5 20]	10	64	65	0.8	0.2036	1534	1790	0.01	0.01
100000	900	[5 20]	10	63	64	1.4	0.2294	1784	1802	0.01	0.01
100000	1000	[5 20]	10	63	64	0.4	0.2115	1436	1717	0.01	0.01
100000	2000	[5 20]	10	63	64	0.6	0.2320	696	3409	0.00	0.01
100000	4000	[5 20]	10	63	64	0.4	0.6794	3706	5281	0.00	0.00
100000	6000	[5 20]	10	63	63	0.0	0.6294	1186	8627	0.00	0.00
100000	8000	[5 20]	10	63	64	0.8	0.7911	977	9779	0.00	0.00
100000	10000	[5 20]	10	63	64	0.6	1.3898	5356	12809	0.00	0.00

จำนวน รอบ	stop criteria	ขนาด tabu list	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาทื)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	50	[10 20]	10	66	68	2.4	0.0156	136	155	0.06	0.09
100000	100	[10 20]	10	65	67	1.4	0.0237	164	206	0.05	0.06
100000	150	[10 20]	10	64	66	1.0	0.0370	273	312	0.03	0.04
100000	200	[10 20]	10	65	66	0.8	0.0292	138	336	0.03	0.04
100000	300	[10 20]	10	65	66	0.6	0.0633	428	588	0.02	0.03
100000	400	[10 20]	10	64	65	0.6	0.0758	468	934	0.01	0.02
100000	500	[10 20]	10	64	65	0.6	0.0914	564	992	0.01	0.02
100000	600	[10 20]	10	64	65	0.6	0.0747	266	1095	0.01	0.01
100000	700	[10 20]	10	64	64	0.0	0.1474	1014	1572	0.01	0.01
100000	800	[10 20]	10	64	65	0.6	0.1487	896	1728	0.01	0.01
100000	900	[10 20]	10	64	65	0.6	0.1073	322	1279	0.01	0.01
100000	1000	[10 20]	10	63	64	0.4	0.2328	1473	1866	0.01	0.01
100000	2000	[10 20]	10	63	64	0.2	0.3146	1615	3353	0.00	0.01
100000	4000	[10 20]	10	63	64	0.6	0.4562	1239	4961	0.00	0.00
100000	6000	[10 20]	10	63	64	0.4	0.8331	3339	7785	0.00	0.00
100000	8000	[10 20]	10	63	64	0.4	1.1182	4609	10055	0.00	0.00
100000	10000	[10 20]	10	63	64	0.8	0.9839	1094	12402	0.00	0.00

ภาคผนวก ง การปรับพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมฮิวริสติกในกรณีทดสอบ

เนื้อหาส่วนนี้แสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมฮิวริสติกที่อยู่บนพื้นฐานการค้นหาลำดับที่มีผลต่อการหาต้นทุนของโครงข่าย 8N_14L, 10N_21L และ 14N_21L ตามลำดับ ที่ stop criteria ต่างกัน เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย โครงข่าย 8N_14L ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ ซึ่งแต่ละขนาดของ tabu list ที่ใช้จะทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	50	1	10	50	52	1.4	0.0253	160	126	0.06	0.11
100000	50	2	10	50	52	1.2	0.0109	45	100	0.07	0.10
100000	50	3	10	52	53	0.8	0.0117	58	118	0.07	0.09
100000	50	4	10	50	52	2.6	0.0201	127	115	0.08	0.11
100000	50	5	10	51	52	0.6	0.0187	118	129	0.07	0.09
100000	50	6	10	50	52	1.0	0.0198	121	129	0.06	0.10
100000	50	7	10	48	52	3.6	0.0203	133	120	0.07	0.09
100000	50	8	10	51	52	0.6	0.0109	51	101	0.10	0.12
100000	50	9	10	51	53	3.2	0.0125	67	100	0.08	0.11
100000	50	10	10	49	52	7.0	0.0083	29	117	0.06	0.11
100000	50	11	10	51	53	1.0	0.0120	60	90	0.08	0.10
100000	50	12	10	52	53	0.6	0.0169	98	107	0.04	0.10
100000	50	13	10	51	53	1.2	0.0096	27	92	0.10	0.13
100000	50	14	10	51	53	1.4	0.0146	79	112	0.09	0.11
100000	50	15	10	53	54	0.4	0.0107	48	88	0.07	0.11

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	100	1	10	50	52	1.2	0.0263	124	201	0.05	0.06
100000	100	2	10	49	51	1.0	0.0315	182	254	0.04	0.05
100000	100	3	10	49	52	2.0	0.0365	227	232	0.04	0.05
100000	100	4	10	50	52	1.4	0.0331	194	216	0.04	0.05
100000	100	5	10	52	52	0.0	0.0198	78	160	0.06	0.07
100000	100	6	10	49	51	1.2	0.0341	193	219	0.05	0.05
100000	100	7	10	49	50	0.4	0.0474	316	250	0.03	0.05
100000	100	8	10	50	51	0.8	0.0310	181	198	0.04	0.06
100000	100	9	10	47	51	4.0	0.0448	303	239	0.04	0.06
100000	100	10	10	48	51	2.4	0.0430	291	258	0.04	0.04
100000	100	11	10	50	51	0.4	0.0187	74	189	0.04	0.06
100000	100	12	10	51	52	0.6	0.0227	106	202	0.05	0.06
100000	100	13	10	49	51	1.0	0.0240	108	209	0.05	0.06
100000	100	14	10	50	52	2.8	0.0320	189	177	0.04	0.07
100000	100	15	10	49	52	1.8	0.0260	135	180	0.04	0.07

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	150	1	10	49	51	1.2	0.0547	346	369	0.02	0.03
100000	150	2	10	50	51	1.0	0.0484	287	324	0.03	0.04
100000	150	3	10	51	52	0.8	0.0401	207	247	0.03	0.05
100000	150	4	10	48	50	1.6	0.0591	377	378	0.03	0.03
100000	150	5	10	50	52	1.4	0.0385	186	254	0.04	0.04
100000	150	6	10	49	51	1.6	0.0427	161	336	0.03	0.04
100000	150	7	10	48	51	2.4	0.0484	211	296	0.04	0.04
100000	150	8	10	47	50	2.0	0.0279	53	369	0.02	0.03
100000	150	9	10	50	51	0.6	0.0417	149	269	0.03	0.04
100000	150	10	10	48	51	3.2	0.0573	281	282	0.03	0.04
100000	150	11	10	48	50	1.6	0.0539	235	372	0.03	0.03
100000	150	12	10	49	50	1.6	0.0656	338	349	0.03	0.04
100000	150	13	10	49	50	0.8	0.0417	145	314	0.03	0.04
100000	150	14	10	50	51	0.2	0.0352	109	279	0.03	0.04
100000	150	15	10	50	51	0.8	0.0466	198	277	0.03	0.04

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	200	1	10	49	51	2.0	0.0531	201	400	0.03	0.03
100000	200	2	10	49	52	3.2	0.0615	255	349	0.02	0.03
100000	200	3	10	48	50	2.0	0.0742	343	395	0.02	0.03
100000	200	4	10	49	51	1.4	0.0555	206	367	0.02	0.03
100000	200	5	10	49	50	1.2	0.0828	415	411	0.02	0.03
100000	200	6	10	48	50	1.2	0.0497	170	330	0.03	0.04
100000	200	7	10	48	50	2.0	0.0612	247	398	0.02	0.03
100000	200	8	10	49	50	0.4	0.0563	209	393	0.02	0.03
100000	200	9	10	50	51	0.8	0.0398	76	296	0.02	0.04
100000	200	10	10	50	51	0.6	0.0466	134	333	0.03	0.03
100000	200	11	10	49	51	2.0	0.0406	110	449	0.02	0.03
100000	200	12	10	50	52	2.0	0.0638	268	327	0.02	0.04
100000	200	13	10	49	51	2.6	0.0789	374	413	0.02	0.03
100000	200	14	10	50	51	0.4	0.0727	348	364	0.02	0.04
100000	200	15	10	49	51	1.2	0.0576	218	369	0.02	0.03

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	300	1	10	48	49	0.6	0.0622	155	762	0.02	0.02
100000	300	2	10	48	49	0.4	0.0984	426	767	0.01	0.02
100000	300	3	10	48	51	3.2	0.1240	616	623	0.01	0.02
100000	300	4	10	49	50	0.6	0.1344	698	671	0.01	0.02
100000	300	5	10	49	50	0.6	0.1234	611	706	0.01	0.02
100000	300	6	10	47	49	1.2	0.1206	583	758	0.01	0.02
100000	300	7	10	48	50	1.4	0.0901	358	537	0.02	0.03
100000	300	8	10	48	50	1.2	0.1182	563	643	0.01	0.02
100000	300	9	10	48	49	0.6	0.0753	259	733	0.01	0.02
100000	300	10	10	49	50	0.4	0.1065	480	592	0.01	0.02
100000	300	11	10	49	51	2.8	0.0786	278	497	0.02	0.02
100000	300	12	10	48	50	1.4	0.0896	355	564	0.01	0.02
100000	300	13	10	49	50	0.6	0.1115	537	574	0.02	0.02
100000	300	14	10	49	51	2.0	0.1154	550	677	0.01	0.02
100000	300	15	10	49	50	1.0	0.1336	687	597	0.01	0.02

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	400	1	10	48	49	0.2	0.1266	532	816	0.01	0.02
100000	400	2	10	48	49	0.8	0.1344	594	933	0.01	0.02
100000	400	3	10	48	49	0.6	0.1549	752	935	0.01	0.02
100000	400	4	10	49	50	0.8	0.1049	372	709	0.01	0.02
100000	400	5	10	48	49	2.4	0.0971	327	825	0.01	0.02
100000	400	6	10	48	49	0.4	0.0852	214	662	0.01	0.02
100000	400	7	10	48	50	1.2	0.1583	771	851	0.01	0.02
100000	400	8	10	48	49	0.4	0.0867	233	758	0.01	0.02
100000	400	9	10	49	50	0.6	0.1344	591	814	0.01	0.02
100000	400	10	10	49	51	2.0	0.1641	808	805	0.01	0.02
100000	400	11	10	47	49	1.8	0.1867	990	881	0.01	0.02
100000	400	12	10	48	50	1.0	0.1370	603	762	0.01	0.02
100000	400	13	10	48	49	0.8	0.1409	654	997	0.01	0.01
100000	400	14	10	48	50	2.6	0.1953	1034	807	0.01	0.02
100000	400	15	10	48	49	0.4	0.1297	560	837	0.01	0.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	500	1	10	48	50	2.2	0.0969	216	861	0.01	0.02
100000	500	2	10	47	49	1.6	0.2151	1073	980	0.01	0.01
100000	500	3	10	48	50	1.0	0.1508	619	819	0.01	0.02
100000	500	4	10	47	49	1.4	0.2029	988	1318	0.01	0.01
100000	500	5	10	48	50	2.6	0.1583	680	911	0.01	0.01
100000	500	6	10	47	49	1.2	0.1406	526	810	0.01	0.02
100000	500	7	10	47	49	1.0	0.2349	1215	1125	0.01	0.02
100000	500	8	10	48	49	0.4	0.1578	666	1087	0.01	0.01
100000	500	9	10	49	50	0.4	0.0982	253	880	0.01	0.02
100000	500	10	10	49	50	1.4	0.1732	774	1001	0.01	0.01
100000	500	11	10	47	49	1.2	0.1982	966	1237	0.01	0.01
100000	500	12	10	48	50	1.2	0.1214	400	1060	0.01	0.01
100000	500	13	10	48	50	1.0	0.2078	1041	1063	0.01	0.01
100000	500	14	10	49	50	0.6	0.1193	387	863	0.01	0.01
100000	500	15	10	47	49	1.6	0.1323	457	1069	0.01	0.01

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	600	1	10	48	50	1.2	0.2068	920	980	0.01	0.01
100000	600	2	10	47	49	1.4	0.1604	583	1233	0.01	0.01
100000	600	3	10	48	49	0.6	0.1120	247	1263	0.01	0.01
100000	600	4	10	48	49	0.6	0.1740	679	1093	0.01	0.01
100000	600	5	10	48	49	0.8	0.1643	622	1250	0.01	0.01
100000	600	6	10	48	49	1.0	0.2211	1017	1396	0.01	0.01
100000	600	7	10	47	49	1.0	0.2214	1042	1102	0.01	0.01
100000	600	8	10	48	49	0.2	0.1891	808	1061	0.01	0.01
100000	600	9	10	48	49	0.4	0.1388	411	1070	0.01	0.01
100000	600	10	10	47	49	1.6	0.1706	652	1206	0.01	0.01
100000	600	11	10	47	49	1.4	0.2083	909	1333	0.01	0.01
100000	600	12	10	48	49	0.8	0.1698	622	1030	0.01	0.01
100000	600	13	10	49	50	0.8	0.1336	391	960	0.01	0.01
100000	600	14	10	47	48	0.8	0.1865	798	1298	0.01	0.01
100000	600	15	10	48	49	0.4	0.1479	479	1016	0.01	0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาทีก)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	700	1	10	47	48	0.4	0.2255	878	1691	0.01	0.01
100000	700	2	10	48	49	0.2	0.0951	160	1239	0.01	0.01
100000	700	3	10	48	49	0.6	0.1945	1050	1486	0.01	0.01
100000	700	4	10	47	50	2.4	0.1943	742	1143	0.01	0.01
100000	700	5	10	47	49	1.0	0.1805	613	1258	0.01	0.01
100000	700	6	10	46	48	1.2	0.3823	2128	1833	0.01	0.01
100000	700	7	10	46	48	1.2	0.3430	1814	1531	0.01	0.01
100000	700	8	10	48	49	0.4	0.1602	476	1046	0.01	0.01
100000	700	9	10	48	49	0.6	0.2255	952	1414	0.01	0.01
100000	700	10	10	49	50	0.6	0.1466	359	1117	0.01	0.01
100000	700	11	10	47	49	1.2	0.1865	633	1304	0.01	0.01
100000	700	12	10	46	49	2.2	0.2578	1611	1392	0.01	0.01
100000	700	13	10	47	49	1.0	0.1565	618	1333	0.01	0.01
100000	700	14	10	48	49	0.6	0.1716	856	1183	0.01	0.01
100000	700	15	10	47	49	1.2	0.2161	1276	1394	0.01	0.01

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาทีก)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	800	1	10	47	49	1.6	0.2143	951	1686	0.01	0.01
100000	800	2	10	48	49	1.0	0.2573	1117	1659	0.01	0.01
100000	800	3	10	49	50	0.4	0.2617	813	1409	0.01	0.01
100000	800	4	10	48	49	0.2	0.2010	693	1555	0.01	0.01
100000	800	5	10	47	49	1.2	0.2224	850	1777	0.01	0.01
100000	800	6	10	46	48	1.2	0.3187	1542	1723	0.01	0.01
100000	800	7	10	47	48	1.4	0.2698	1190	1789	0.01	0.01
100000	800	8	10	47	49	1.2	0.2568	1076	1534	0.01	0.01
100000	800	9	10	48	49	0.4	0.2372	946	1471	0.01	0.01
100000	800	10	10	47	48	0.4	0.3039	1452	1978	0.01	0.01
100000	800	11	10	48	49	0.2	0.3229	1611	1756	0.01	0.01
100000	800	12	10	48	49	0.4	0.2021	693	1389	0.01	0.01
100000	800	13	10	49	50	0.6	0.1654	402	1379	0.01	0.01
100000	800	14	10	47	49	1.0	0.3268	1619	1629	0.01	0.01
100000	800	15	10	47	49	2.0	0.1724	472	1444	0.01	0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	900	1	10	47	49	2.0	0.2240	741	1340	0.01	0.01
100000	900	2	10	47	49	1.6	0.2456	907	1547	0.01	0.01
100000	900	3	10	47	49	1.8	0.2083	642	1538	0.01	0.01
100000	900	4	10	46	49	2.4	0.2703	1089	1712	0.01	0.01
100000	900	5	10	47	48	0.6	0.2586	1024	1751	0.01	0.01
100000	900	6	10	47	49	1.2	0.3372	1559	1943	0.01	0.01
100000	900	7	10	48	49	0.6	0.1763	408	1834	0.00	0.01
100000	900	8	10	47	49	1.2	0.3003	1319	1714	0.01	0.01
100000	900	9	10	48	49	0.2	0.2156	689	1600	0.01	0.01
100000	900	10	10	47	48	0.4	0.2570	996	1966	0.00	0.01
100000	900	11	10	47	48	0.6	0.3122	1391	1728	0.01	0.01
100000	900	12	10	48	49	0.8	0.2542	983	1685	0.00	0.01
100000	900	13	10	48	49	0.6	0.1732	342	1601	0.01	0.01
100000	900	14	10	47	49	1.2	0.2224	746	1481	0.01	0.01
100000	900	15	10	47	49	1.2	0.3508	1695	1566	0.01	0.01

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	1000	1	10	48	49	0.4	0.2841	1094	1532	0.01	0.01
100000	1000	2	10	47	49	1.4	0.3419	2092	2063	0.00	0.01
100000	1000	3	10	48	49	0.6	0.1539	379	1513	0.01	0.01
100000	1000	4	10	47	49	1.2	0.1964	710	1676	0.01	0.01
100000	1000	5	10	47	48	0.4	0.2773	1484	1898	0.01	0.01
100000	1000	6	10	48	49	0.4	0.2224	1021	1656	0.01	0.01
100000	1000	7	10	48	49	1.2	0.1831	653	1540	0.01	0.01
100000	1000	8	10	47	49	1.8	0.2500	866	1779	0.01	0.01
100000	1000	9	10	46	47	0.4	0.3747	1764	2221	0.01	0.01
100000	1000	10	10	46	48	1.4	0.1552	157	2110	0.01	0.01
100000	1000	11	10	47	49	1.6	0.2279	696	1856	0.01	0.01
100000	1000	12	10	47	49	1.4	0.3367	1473	1803	0.01	0.01
100000	1000	13	10	47	49	1.2	0.3958	1904	1831	0.00	0.01
100000	1000	14	10	47	49	1.2	0.2716	1009	1795	0.01	0.01
100000	1000	15	10	46	49	2.4	0.3495	1584	1722	0.01	0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.2 ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย 10N_21L ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ ซึ่งแต่ละขนาดของ tabu list ที่ใช้จะทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	50	1	10	60	62	1.6	0.0128	97	138	0.08	0.10
100000	50	2	10	59	62	3.0	0.0237	210	126	0.07	0.13
100000	50	3	10	60	63	5.4	0.0112	81	102	0.08	0.12
100000	50	4	10	60	62	3.8	0.0135	96	106	0.10	0.12
100000	50	5	10	59	62	6.0	0.0240	224	130	0.07	0.11
100000	50	6	10	59	61	1.8	0.0117	85	123	0.08	0.12
100000	50	7	10	60	61	1.2	0.0086	51	153	0.08	0.11
100000	50	8	10	58	61	2.8	0.0148	123	142	0.08	0.10
100000	50	9	10	60	62	1.6	0.0182	160	110	0.09	0.12
100000	50	10	10	59	62	3.6	0.0174	144	129	0.08	0.11
100000	50	11	10	61	62	1.4	0.0076	39	101	0.09	0.15
100000	50	12	10	58	60	1.8	0.0120	93	136	0.10	0.11
100000	50	13	10	59	61	1.2	0.0224	201	148	0.07	0.12
100000	50	14	10	58	60	5.2	0.0174	143	138	0.08	0.11
100000	50	15	10	59	62	4.4	0.0146	104	112	0.09	0.12

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	100	1	10	56	59	2.2	0.0250	188	345	0.04	0.04
100000	100	2	10	58	60	1.8	0.0294	221	238	0.06	0.06
100000	100	3	10	58	60	2.8	0.0245	177	263	0.05	0.06
100000	100	4	10	58	61	4.4	0.0229	154	218	0.04	0.06
100000	100	5	10	57	61	5.0	0.0273	218	209	0.06	0.07
100000	100	6	10	59	60	0.4	0.0219	142	206	0.06	0.08
100000	100	7	10	57	59	1.4	0.0271	195	282	0.04	0.06
100000	100	8	10	56	59	6.4	0.0414	370	271	0.04	0.06
100000	100	9	10	56	58	1.6	0.0359	304	291	0.05	0.06
100000	100	10	10	59	60	0.6	0.0247	175	294	0.04	0.06
100000	100	11	10	55	59	4.6	0.0349	282	272	0.05	0.06
100000	100	12	10	58	60	2.0	0.0185	103	238	0.05	0.07
100000	100	13	10	57	59	1.0	0.0401	357	268	0.04	0.08
100000	100	14	10	57	60	3.6	0.0388	348	251	0.03	0.06
100000	100	15	10	58	60	1.6	0.0203	125	232	0.05	0.06

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	150	1	10	57	59	1.4	0.0221	105	317	0.03	0.04
100000	150	2	10	58	59	0.4	0.0315	203	367	0.03	0.04
100000	150	3	10	56	59	3.4	0.0464	370	373	0.04	0.04
100000	150	4	10	56	58	1.0	0.0401	301	384	0.04	0.04
100000	150	5	10	57	59	2.4	0.0315	206	341	0.03	0.05
100000	150	6	10	55	58	3.6	0.0419	232	374	0.03	0.04
100000	150	7	10	57	58	1.2	0.0568	371	418	0.03	0.04
100000	150	8	10	58	60	1.8	0.0508	321	314	0.04	0.05
100000	150	9	10	57	58	0.6	0.0552	368	469	0.03	0.03
100000	150	10	10	55	58	2.2	0.0344	170	398	0.03	0.04
100000	150	11	10	55	59	7.8	0.0411	225	275	0.04	0.05
100000	150	12	10	56	59	3.6	0.0607	425	447	0.02	0.04
100000	150	13	10	58	60	1.4	0.0313	124	282	0.04	0.06
100000	150	14	10	57	60	2.6	0.0570	392	351	0.03	0.04
100000	150	15	10	58	59	0.6	0.0367	202	334	0.03	0.05

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	200	1	10	58	59	0.6	0.0354	127	442	0.03	0.04
100000	200	2	10	55	57	1.6	0.0589	356	576	0.02	0.03
100000	200	3	10	57	58	0.6	0.0659	400	421	0.02	0.04
100000	200	4	10	56	57	0.8	0.0870	621	546	0.03	0.03
100000	200	5	10	57	59	2.0	0.0654	425	572	0.02	0.03
100000	200	6	10	55	58	6.8	0.0909	631	503	0.02	0.04
100000	200	7	10	57	59	2.8	0.0398	162	409	0.03	0.04
100000	200	8	10	57	59	1.4	0.0659	425	474	0.02	0.03
100000	200	9	10	57	58	0.2	0.0521	293	505	0.03	0.03
100000	200	10	10	56	58	2.0	0.0872	612	505	0.02	0.03
100000	200	11	10	57	59	1.2	0.0385	155	453	0.02	0.04
100000	200	12	10	57	58	0.4	0.0732	482	435	0.02	0.04
100000	200	13	10	57	58	0.8	0.0573	334	408	0.04	0.04
100000	200	14	10	57	59	1.8	0.0435	207	390	0.03	0.04
100000	200	15	10	56	59	2.2	0.0732	478	420	0.03	0.04

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาทีก)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	300	1	10	55	57	1.2	0.1331	954	771	0.02	0.03
100000	300	2	10	57	58	0.6	0.0568	231	572	0.02	0.03
100000	300	3	10	56	57	0.4	0.0836	496	737	0.02	0.02
100000	300	4	10	56	58	1.2	0.0721	370	710	0.01	0.02
100000	300	5	10	56	58	1.4	0.1094	725	698	0.02	0.02
100000	300	6	10	55	57	1.2	0.0911	547	796	0.02	0.02
100000	300	7	10	56	57	1.6	0.1224	835	792	0.01	0.02
100000	300	8	10	55	57	2.2	0.1357	968	981	0.01	0.02
100000	300	9	10	56	57	0.4	0.0766	427	740	0.02	0.02
100000	300	10	10	56	58	1.4	0.1073	683	736	0.02	0.02
100000	300	11	10	56	57	0.2	0.0693	363	722	0.02	0.02
100000	300	12	10	56	58	1.4	0.0992	634	741	0.02	0.02
100000	300	13	10	55	57	1.4	0.0935	566	761	0.02	0.02
100000	300	14	10	58	59	0.6	0.0430	103	464	0.02	0.03
100000	300	15	10	54	56	1.0	0.1039	671	962	0.02	0.02

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาทีก)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	400	1	10	55	57	1.4	0.0919	467	1101	0.01	0.02
100000	400	2	10	57	58	0.4	0.1534	1010	804	0.01	0.02
100000	400	3	10	55	56	1.4	0.1057	599	1116	0.01	0.02
100000	400	4	10	55	58	2.8	0.1341	859	949	0.01	0.02
100000	400	5	10	56	58	1.2	0.1602	1093	903	0.01	0.02
100000	400	6	10	55	56	0.6	0.1112	632	1129	0.01	0.02
100000	400	7	10	55	57	1.2	0.1495	1010	1048	0.02	0.02
100000	400	8	10	57	58	0.8	0.1063	591	838	0.02	0.02
100000	400	9	10	56	58	1.2	0.1214	738	810	0.02	0.02
100000	400	10	10	55	56	0.8	0.1253	742	1066	0.01	0.02
100000	400	11	10	55	57	1.4	0.0755	311	905	0.02	0.02
100000	400	12	10	56	58	1.4	0.0948	497	816	0.01	0.02
100000	400	13	10	57	58	0.6	0.0833	386	796	0.02	0.02
100000	400	14	10	57	58	0.4	0.0974	519	815	0.01	0.02
100000	400	15	10	57	59	1.2	0.1375	872	820	0.02	0.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	500	1	10	55	57	2.2	0.0901	324	1038	0.01	0.02
100000	500	2	10	54	56	1.8	0.1273	702	1170	0.01	0.02
100000	500	3	10	55	57	2.0	0.1237	654	1079	0.01	0.02
100000	500	4	10	56	57	0.4	0.1648	1050	1322	0.01	0.01
100000	500	5	10	55	57	1.2	0.1128	557	1038	0.01	0.02
100000	500	6	10	55	57	1.2	0.1544	932	1115	0.01	0.01
100000	500	7	10	55	56	0.4	0.1927	1297	1157	0.01	0.02
100000	500	8	10	55	56	0.8	0.1055	487	1124	0.01	0.01
100000	500	9	10	56	57	0.8	0.1359	770	1094	0.01	0.02
100000	500	10	10	56	58	1.4	0.0982	411	958	0.01	0.02
100000	500	11	10	54	56	2.0	0.2393	1776	1183	0.01	0.02
100000	500	12	10	55	57	1.6	0.1328	728	973	0.01	0.02
100000	500	13	10	54	56	2.0	0.2299	1673	1626	0.01	0.01
100000	500	14	10	54	57	2.0	0.1516	943	987	0.01	0.02
100000	500	15	10	56	58	1.0	0.1378	801	1272	0.01	0.01

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	600	1	10	55	57	1.0	0.1534	847	1371	0.01	0.01
100000	600	2	10	54	56	1.8	0.2216	1449	1619	0.01	0.01
100000	600	3	10	54	56	1.6	0.2466	1728	1477	0.01	0.01
100000	600	4	10	55	57	2.0	0.1677	968	1309	0.01	0.01
100000	600	5	10	54	55	1.0	0.2242	1489	2000	0.01	0.01
100000	600	6	10	54	56	2.2	0.1224	559	1545	0.01	0.01
100000	600	7	10	55	57	2.0	0.2078	1356	1507	0.01	0.01
100000	600	8	10	56	58	1.4	0.1852	1101	1087	0.01	0.02
100000	600	9	10	55	57	1.8	0.1208	541	1060	0.01	0.02
100000	600	10	10	53	56	3.6	0.1523	816	1212	0.01	0.02
100000	600	11	10	53	57	5.2	0.2565	1783	1267	0.01	0.02
100000	600	12	10	55	57	1.6	0.1956	1246	1266	0.01	0.01
100000	600	13	10	54	55	0.8	0.1398	704	1431	0.01	0.01
100000	600	14	10	53	56	2.8	0.2003	1294	1280	0.01	0.01
100000	600	15	10	55	57	1.0	0.1758	1053	1266	0.01	0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	700	1	10	54	56	1.2	0.2365	1997	1877	0.01	0.01
100000	700	2	10	55	56	0.4	0.1646	1191	1404	0.01	0.01
100000	700	3	10	54	56	1.2	0.1198	691	1463	0.01	0.01
100000	700	4	10	54	55	1.2	0.1802	997	1722	0.01	0.01
100000	700	5	10	54	56	1.4	0.2872	1987	1658	0.01	0.01
100000	700	6	10	55	57	2.2	0.2120	1276	1577	0.01	0.01
100000	700	7	10	55	56	0.8	0.1240	443	1478	0.01	0.01
100000	700	8	10	54	56	1.8	0.2216	1373	1697	0.01	0.01
100000	700	9	10	55	56	0.4	0.1789	960	1556	0.01	0.01
100000	700	10	10	54	55	0.6	0.2305	1462	1884	0.01	0.01
100000	700	11	10	54	56	1.6	0.1701	1271	1797	0.01	0.01
100000	700	12	10	54	55	0.8	0.1807	1370	1721	0.01	0.01
100000	700	13	10	54	56	2.0	0.2799	2412	1676	0.01	0.01
100000	700	14	10	52	55	2.0	0.2740	2451	2412	0.01	0.01
100000	700	15	10	55	56	0.8	0.2021	1638	1983	0.01	0.01

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	800	1	10	54	56	1.6	0.1758	829	1896	0.01	0.01
100000	800	2	10	55	56	0.8	0.2542	1549	1936	0.01	0.01
100000	800	3	10	55	57	1.4	0.2453	1497	1652	0.01	0.01
100000	800	4	10	54	56	2.8	0.2706	1739	1640	0.01	0.01
100000	800	5	10	56	57	1.0	0.1883	986	1578	0.01	0.01
100000	800	6	10	55	56	0.4	0.1323	427	1543	0.01	0.01
100000	800	7	10	54	55	0.4	0.1872	951	2436	0.01	0.01
100000	800	8	10	54	56	2.0	0.3060	2093	1633	0.01	0.01
100000	800	9	10	53	56	4.0	0.2453	1504	1738	0.01	0.01
100000	800	10	10	53	55	1.0	0.3195	2183	2212	0.01	0.01
100000	800	11	10	54	55	0.6	0.2245	1274	1803	0.01	0.01
100000	800	12	10	55	57	1.2	0.1479	588	1298	0.01	0.01
100000	800	13	10	54	56	1.4	0.2526	1562	1788	0.01	0.01
100000	800	14	10	55	56	0.6	0.2516	1582	1608	0.01	0.01
100000	800	15	10	54	56	3.8	0.3414	2411	2005	0.01	0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	900	1	10	54	55	0.4	0.3388	2279	2258	0.01	0.01
100000	900	2	10	54	55	0.6	0.3208	2101	2663	0.01	0.01
100000	900	3	10	54	55	0.8	0.3589	2417	2292	0.01	0.01
100000	900	4	10	53	55	2.0	0.3094	2010	1970	0.01	0.01
100000	900	5	10	55	56	1.4	0.2219	1187	2277	0.01	0.01
100000	900	6	10	54	55	1.2	0.2935	1817	2252	0.01	0.01
100000	900	7	10	54	55	0.2	0.2161	1128	2182	0.01	0.01
100000	900	8	10	54	55	0.8	0.2872	1775	1961	0.01	0.01
100000	900	9	10	54	55	0.8	0.2617	1564	2069	0.01	0.01
100000	900	10	10	54	56	1.0	0.3674	2531	2215	0.00	0.01
100000	900	11	10	55	57	2.0	0.2281	1237	1519	0.01	0.01
100000	900	12	10	55	56	0.8	0.1633	627	1459	0.01	0.01
100000	900	13	10	55	57	1.6	0.1896	870	1523	0.01	0.01
100000	900	14	10	53	56	2.2	0.2073	1079	2240	0.01	0.01
100000	900	15	10	55	57	1.2	0.1979	953	1437	0.01	0.01

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	1000	1	10	54	55	0.2	0.1875	1000	1999	0.01	0.01
100000	1000	2	10	55	56	0.2	0.2099	1418	2051	0.01	0.01
100000	1000	3	10	54	56	2.2	0.1922	1233	1879	0.01	0.01
100000	1000	4	10	55	56	0.8	0.1620	718	1832	0.01	0.01
100000	1000	5	10	54	57	3.2	0.2255	1620	1869	0.01	0.01
100000	1000	6	10	53	55	1.6	0.2901	2334	2354	0.01	0.01
100000	1000	7	10	53	55	2.0	0.2818	1631	2190	0.01	0.01
100000	1000	8	10	54	56	1.4	0.3042	1875	1951	0.01	0.01
100000	1000	9	10	55	57	1.6	0.1792	682	2181	0.01	0.01
100000	1000	10	10	55	56	0.4	0.2810	1637	2266	0.01	0.01
100000	1000	11	10	54	56	1.0	0.2474	1329	1922	0.01	0.01
100000	1000	12	10	54	55	0.4	0.2708	1524	2094	0.01	0.01
100000	1000	13	10	54	56	2.4	0.2628	1455	2146	0.01	0.01
100000	1000	14	10	55	56	0.8	0.2648	1481	2042	0.01	0.01
100000	1000	15	10	53	55	1.4	0.3104	1889	1968	0.01	0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.3 ผลของการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาต้นทุนที่ดีที่สุดของโครงข่าย 14N_21L ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบ 100000 รอบ เมื่อ tabu list เป็นแบบคงที่ ซึ่งแต่ละขนาดของ tabu list ที่ใช้จะทดสอบกับ stop criteria ที่มีค่าต่างกัน

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	50	1	10	66	67	0.4	0.0089	49	117	0.09	0.11
100000	50	2	10	66	67	1.4	0.0128	87	139	0.09	0.10
100000	50	3	10	66	68	2.6	0.0148	119	119	0.08	0.11
100000	50	4	10	68	69	0.4	0.0068	20	90	0.08	0.14
100000	50	5	10	66	68	1.2	0.0133	94	135	0.09	0.11
100000	50	6	10	68	70	2.0	0.0083	51	99	0.11	0.13
100000	50	7	10	67	69	1.2	0.0143	113	140	0.08	0.10
100000	50	8	10	66	68	1.6	0.0214	183	138	0.06	0.11
100000	50	9	10	66	68	2.6	0.0122	87	115	0.10	0.13
100000	50	10	10	66	68	1.4	0.0130	100	113	0.09	0.12
100000	50	11	10	66	69	2.8	0.0198	162	134	0.07	0.11
100000	50	12	10	66	68	1.2	0.0143	112	135	0.08	0.10
100000	50	13	10	66	68	0.8	0.0109	85	120	0.07	0.11
100000	50	14	10	67	69	1.2	0.0078	45	96	0.11	0.14
100000	50	15	10	66	69	3.6	0.0161	134	110	0.08	0.13

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีที่สุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	100	1	10	65	67	1.4	0.0305	243	235	0.05	0.07
100000	100	2	10	65	68	2.4	0.0372	310	242	0.04	0.07
100000	100	3	10	65	67	2.0	0.0313	256	254	0.04	0.06
100000	100	4	10	65	67	1.2	0.0187	114	202	0.06	0.07
100000	100	5	10	65	67	1.4	0.0211	139	218	0.04	0.06
100000	100	6	10	65	66	0.4	0.0174	98	168	0.06	0.08
100000	100	7	10	66	67	0.2	0.0201	131	244	0.05	0.06
100000	100	8	10	64	67	3.2	0.0266	194	255	0.03	0.06
100000	100	9	10	64	66	1.2	0.0383	343	294	0.03	0.05
100000	100	10	10	65	68	3.2	0.0240	170	221	0.05	0.06
100000	100	11	10	65	67	1.4	0.0258	193	257	0.05	0.06
100000	100	12	10	65	66	0.8	0.0221	148	280	0.05	0.06
100000	100	13	10	66	67	0.6	0.0299	244	223	0.04	0.06
100000	100	14	10	65	68	2.8	0.0273	173	193	0.06	0.07
100000	100	15	10	65	66	0.6	0.0286	206	268	0.04	0.06

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	150	1	10	65	67	1.2	0.0357	256	361	0.03	0.04
100000	150	2	10	64	66	1.6	0.0401	304	382	0.03	0.05
100000	150	3	10	65	66	0.4	0.0294	179	309	0.04	0.05
100000	150	4	10	64	66	1.8	0.0589	542	364	0.02	0.05
100000	150	5	10	65	67	3.0	0.0508	437	378	0.03	0.03
100000	150	6	10	63	66	3.0	0.0396	230	351	0.04	0.05
100000	150	7	10	65	67	2.0	0.0396	218	310	0.04	0.05
100000	150	8	10	65	67	2.8	0.0464	300	311	0.03	0.04
100000	150	9	10	64	65	0.6	0.0451	261	463	0.02	0.04
100000	150	10	10	65	66	0.6	0.0456	287	295	0.04	0.05
100000	150	11	10	64	66	1.2	0.0539	353	356	0.03	0.04
100000	150	12	10	64	66	1.6	0.0375	208	358	0.04	0.05
100000	150	13	10	65	66	1.6	0.0586	408	308	0.03	0.05
100000	150	14	10	65	66	0.2	0.0521	324	404	0.03	0.04
100000	150	15	10	65	67	2.6	0.0565	378	372	0.03	0.04

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	200	1	10	64	66	1.2	0.0398	160	399	0.03	0.04
100000	200	2	10	65	67	1.2	0.0456	227	431	0.02	0.03
100000	200	3	10	64	66	2.8	0.0680	443	464	0.03	0.04
100000	200	4	10	64	65	0.8	0.0495	273	422	0.03	0.03
100000	200	5	10	65	67	2.0	0.0529	304	363	0.02	0.04
100000	200	6	10	64	66	1.6	0.0549	307	574	0.02	0.03
100000	200	7	10	65	66	0.8	0.0586	327	454	0.02	0.04
100000	200	8	10	64	66	1.8	0.0815	559	455	0.02	0.03
100000	200	9	10	64	66	1.4	0.0464	241	478	0.02	0.03
100000	200	10	10	66	67	1.0	0.0357	135	332	0.03	0.04
100000	200	11	10	66	67	1.0	0.0313	98	377	0.03	0.04
100000	200	12	10	63	66	2.4	0.0659	419	438	0.03	0.04
100000	200	13	10	65	67	1.6	0.0667	430	442	0.02	0.03
100000	200	14	10	65	66	0.8	0.0698	471	392	0.02	0.04
100000	200	15	10	65	67	1.4	0.0690	461	360	0.02	0.04

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	300	1	10	64	66	1.0	0.0906	571	542	0.02	0.03
100000	300	2	10	63	66	2.8	0.0924	561	621	0.02	0.03
100000	300	3	10	64	66	1.2	0.0628	313	658	0.02	0.02
100000	300	4	10	64	66	2.2	0.0930	557	648	0.02	0.02
100000	300	5	10	63	66	2.2	0.0802	466	512	0.02	0.03
100000	300	6	10	64	66	1.4	0.0643	292	629	0.02	0.02
100000	300	7	10	64	66	1.0	0.0888	561	623	0.02	0.02
100000	300	8	10	63	65	1.4	0.0807	481	709	0.02	0.02
100000	300	9	10	65	66	0.6	0.0708	375	614	0.02	0.02
100000	300	10	10	64	65	0.6	0.1008	674	713	0.02	0.02
100000	300	11	10	64	66	1.4	0.1385	972	777	0.01	0.02
100000	300	12	10	63	65	1.4	0.1010	637	716	0.02	0.03
100000	300	13	10	63	65	2.8	0.1154	752	703	0.02	0.03
100000	300	14	10	65	66	1.0	0.0654	311	644	0.02	0.02
100000	300	15	10	64	65	0.6	0.0807	444	577	0.02	0.03

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	400	1	10	65	66	0.6	0.0773	309	827	0.01	0.02
100000	400	2	10	64	65	0.4	0.1318	816	999	0.01	0.02
100000	400	3	10	63	65	1.2	0.1096	609	798	0.02	0.02
100000	400	4	10	64	65	0.8	0.0896	434	762	0.02	0.02
100000	400	5	10	64	65	0.6	0.0969	498	847	0.01	0.02
100000	400	6	10	64	66	1.2	0.0638	206	633	0.02	0.02
100000	400	7	10	64	65	0.6	0.0872	405	960	0.01	0.02
100000	400	8	10	63	64	0.4	0.1388	903	1047	0.01	0.02
100000	400	9	10	63	65	1.8	0.1247	765	836	0.01	0.02
100000	400	10	10	63	65	1.4	0.1177	718	918	0.01	0.02
100000	400	11	10	65	66	0.8	0.0779	313	723	0.02	0.02
100000	400	12	10	64	66	1.2	0.1115	632	811	0.01	0.02
100000	400	13	10	64	65	0.4	0.0880	413	911	0.01	0.02
100000	400	14	10	64	65	1.2	0.1083	597	799	0.01	0.02
100000	400	15	10	63	64	0.6	0.1497	1002	1046	0.01	0.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	500	1	10	64	65	0.2	0.1326	739	929	0.01	0.02
100000	500	2	10	63	65	1.6	0.1068	484	921	0.01	0.02
100000	500	3	10	63	64	0.4	0.1128	560	1193	0.01	0.01
100000	500	4	10	63	64	0.4	0.1305	715	1139	0.01	0.01
100000	500	5	10	63	65	2.0	0.0789	223	978	0.01	0.02
100000	500	6	10	64	65	0.4	0.1096	528	993	0.01	0.02
100000	500	7	10	64	65	0.2	0.1331	760	1117	0.01	0.01
100000	500	8	10	63	64	0.6	0.0906	356	1215	0.01	0.01
100000	500	9	10	64	65	0.8	0.1563	940	1093	0.01	0.01
100000	500	10	10	63	65	1.0	0.1185	613	993	0.01	0.02
100000	500	11	10	63	65	1.0	0.0964	396	961	0.01	0.02
100000	500	12	10	63	64	0.4	0.1349	743	1292	0.01	0.01
100000	500	13	10	65	66	0.8	0.1326	729	918	0.01	0.02
100000	500	14	10	64	65	0.8	0.1547	945	1033	0.01	0.02
100000	500	15	10	64	65	0.8	0.1044	484	854	0.02	0.02

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	600	1	10	63	64	0.4	0.1456	759	1046	0.01	0.01
100000	600	2	10	64	65	0.8	0.1648	936	1133	0.01	0.02
100000	600	3	10	64	65	0.6	0.1310	630	1077	0.01	0.01
100000	600	4	10	64	65	0.6	0.1349	678	1054	0.01	0.01
100000	600	5	10	63	65	1.0	0.1063	410	1114	0.01	0.02
100000	600	6	10	64	65	0.4	0.1474	791	1066	0.01	0.02
100000	600	7	10	63	65	1.8	0.1068	397	1152	0.01	0.02
100000	600	8	10	63	65	1.0	0.2047	1296	1210	0.01	0.01
100000	600	9	10	65	66	0.8	0.1263	581	1181	0.01	0.01
100000	600	10	10	64	65	0.4	0.1232	540	899	0.01	0.02
100000	600	11	10	64	65	0.4	0.0841	166	956	0.01	0.01
100000	600	12	10	64	65	0.4	0.1846	1119	1349	0.01	0.01
100000	600	13	10	64	65	0.6	0.1490	794	1232	0.01	0.01
100000	600	14	10	64	65	0.6	0.1443	731	1222	0.01	0.01
100000	600	15	10	64	65	0.8	0.1505	807	1211	0.01	0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	700	1	10	63	64	0.4	0.1326	827	1398	0.01	0.01
100000	700	2	10	63	65	1.2	0.1380	888	1308	0.01	0.01
100000	700	3	10	64	65	0.6	0.1172	648	1221	0.01	0.01
100000	700	4	10	63	65	1.2	0.1615	808	1297	0.01	0.01
100000	700	5	10	64	65	0.8	0.1648	851	1379	0.01	0.01
100000	700	6	10	64	65	0.8	0.1130	360	1138	0.01	0.01
100000	700	7	10	64	65	0.6	0.1773	966	1313	0.01	0.01
100000	700	8	10	63	64	0.4	0.1630	851	1540	0.01	0.01
100000	700	9	10	64	65	0.2	0.1021	254	1037	0.01	0.01
100000	700	10	10	63	65	1.0	0.2352	1520	1547	0.01	0.01
100000	700	11	10	64	64	0.0	0.1294	759	1401	0.01	0.01
100000	700	12	10	64	65	0.4	0.1557	1072	1248	0.01	0.01
100000	700	13	10	63	65	2.2	0.1398	932	1254	0.01	0.01
100000	700	14	10	65	66	0.6	0.0846	286	1021	0.01	0.01
100000	700	15	10	64	65	0.6	0.1245	727	1320	0.01	0.01

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาที่)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	800	1	10	64	65	0.4	0.1836	911	1464	0.01	0.01
100000	800	2	10	63	65	2.2	0.1885	966	1207	0.01	0.01
100000	800	3	10	63	64	0.4	0.1706	803	1673	0.01	0.01
100000	800	4	10	64	64	0.0	0.1711	825	1454	0.01	0.01
100000	800	5	10	64	65	0.4	0.1727	781	1280	0.01	0.01
100000	800	6	10	63	64	0.4	0.2018	1105	1822	0.01	0.01
100000	800	7	10	64	65	0.6	0.1393	505	1605	0.01	0.01
100000	800	8	10	63	64	0.4	0.1404	530	1176	0.01	0.01
100000	800	9	10	63	65	1.2	0.1872	977	1378	0.01	0.01
100000	800	10	10	63	65	1.6	0.2091	1172	1567	0.01	0.01
100000	800	11	10	64	65	0.8	0.1224	338	1222	0.01	0.01
100000	800	12	10	64	65	0.4	0.1753	835	1575	0.01	0.01
100000	800	13	10	63	64	0.4	0.2898	1901	1794	0.01	0.01
100000	800	14	10	64	65	0.8	0.1523	650	1373	0.01	0.01
100000	800	15	10	63	65	1.6	0.1747	820	1662	0.01	0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	900	1	10	64	65	0.8	0.2750	1657	1702	0.01	0.01
100000	900	2	10	63	64	0.2	0.1958	951	1660	0.01	0.01
100000	900	3	10	64	65	0.8	0.1393	400	1616	0.01	0.01
100000	900	4	10	64	65	0.8	0.1346	345	1335	0.01	0.01
100000	900	5	10	64	65	0.4	0.1203	217	1250	0.01	0.01
100000	900	6	10	64	65	0.8	0.1279	281	1401	0.01	0.01
100000	900	7	10	64	65	0.6	0.2427	1338	1739	0.01	0.01
100000	900	8	10	63	64	0.6	0.1164	187	1455	0.01	0.01
100000	900	9	10	63	64	0.8	0.2867	1787	1936	0.01	0.01
100000	900	10	10	64	65	0.4	0.2107	1101	1601	0.01	0.01
100000	900	11	10	63	65	1.2	0.2854	1784	1800	0.01	0.01
100000	900	12	10	63	64	0.2	0.2120	1110	1590	0.01	0.01
100000	900	13	10	63	65	1.4	0.2372	1313	1541	0.01	0.01
100000	900	14	10	63	64	0.6	0.1203	237	1743	0.01	0.01
100000	900	15	10	63	64	0.2	0.1214	245	1433	0.01	0.01

จำนวน รอบ	stop criteria	tabu tenure	can. size	ต้นทุน โครงข่าย	ต้นทุน โครงข่าย เฉลี่ย	ค่าดีสุด เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เวลา (นาท)	รอบที่ เจอต้นทุน ต่ำสุด	จำนวน รอบที่ ค้นพบ	อัตราส่วน ยอมรับ/ ไม่รับ	ยอมรับ/ ไม่รับ เฉลี่ย
100000	1000	1	10	64	65	0.4	0.1380	539	1304	0.01	0.01
100000	1000	2	10	63	65	1.0	0.1857	1118	1579	0.01	0.01
100000	1000	3	10	63	64	0.8	0.2284	1627	1818	0.01	0.01
100000	1000	4	10	63	64	0.6	0.2417	1699	1870	0.01	0.01
100000	1000	5	10	64	65	0.4	0.1820	1112	1614	0.01	0.01
100000	1000	6	10	64	65	0.8	0.1883	1169	2096	0.01	0.01
100000	1000	7	10	64	64	0.0	0.1628	557	1575	0.01	0.01
100000	1000	8	10	64	65	0.8	0.2240	1082	1597	0.01	0.01
100000	1000	9	10	64	64	0.0	0.2068	940	1747	0.01	0.01
100000	1000	10	10	63	64	0.2	0.2690	1524	2006	0.01	0.01
100000	1000	11	10	64	65	0.8	0.1523	421	1469	0.01	0.01
100000	1000	12	10	64	64	0.0	0.1698	607	1718	0.01	0.01
100000	1000	13	10	63	64	0.2	0.1977	837	1872	0.01	0.01
100000	1000	14	10	64	65	0.8	0.2070	960	1604	0.01	0.01
100000	1000	15	10	63	64	0.4	0.2284	1145	2014	0.01	0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

- 1 K. Weesapen , A. Munjirungkoon , C. Prommak , L. Wuttisittikulkij , “A Heuristic Algorithm Based on Tabu Search for Routing and Wavelength Assignment in Multicast Multi-Wavelength Multi-Fiber Networks,” in the Proceeding of IEEE Sarnoff Symposium on Advances in Wired and Wireless Communications (New Jersey, U.S.A), 27-28 March 2006.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Heuristic Algorithm Based on Tabu Search for Routing and Wavelength Assignment in Multicast Multi-Wavelength Multi-Fiber Networks

K. Weesapen †, A. Munjirungkoon †, C. Prommak ‡, L. Wuttisittikulij †

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

‡ School of Telecommunications Engineering, Institute of Engineering
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000
E-mail: Kanokporn.W@student.netserv.chula.ac.th

Abstract This paper proposes a heuristic algorithm based on tabu search for solving the problem of routing and wavelength assignment in multicast multi-fiber WDM networks using Virtual Light –Tree (VLT) technique. The objective is to design an effective algorithm that can be applied to large network problems served as an alternative method to that based on Integer Linear Programming technique. The design outcomes measured in terms of the total capacity requirement of the proposed algorithm are evaluated and compared to that of ILP approach. Results on tested networks demonstrate that both techniques offer comparable design output, signifying the effectiveness of the proposed algorithm.

Index Terms— WDM, multicast, multi-fiber system, Virtual Light –Tree, tabu search.

I. INTRODUCTION

Over recent years, optical fiber technology has become the dominant transport medium in telecommunication systems, because of its advantages in capacity, reliability, cost and scalability. Such technology is expected to serve as a broadband transport network that supports various emerging multimedia services over the Internet such as interactive distance learning, distributed games, live action and video conferencing. An attractive feature of optical fiber is its potential to offer extremely large transmission capacity in the order of Tb/s. In order to utilize fiber capacity effectively, Wavelength Division Multiplexing (WDM) technology [1, 2] was introduced as a means of expanding the bandwidth capacity of existing optical fibers. WDM technology enables networks to transmit several information streams, each at different wavelengths, simultaneously on a single optical fiber. For example, with the advancement of light wave technology [3-5], the transmission of 100 wavelengths over a fiber with each wavelength modulated at 10 Gb/s to provide a throughput of 1 Tb/s is feasible.

In this paper, we address a key optical network design issue known as routing and wavelength assignment (RWA) specifically for multicast communication in WDM networks. Multicast communication refers to the delivery of the same

traffic from a source node to an arbitrary number of destination nodes. While multicast communication is highly demanded in many applications as mentioned, in the literature study on this problem has been relatively limited. Multicast traffic demand when indirectly supported by multiple one-to-one or broadcast generally results in more network traffic and a substantial waste of network system resources. Therefore it is of great benefit to have multicasting capability incorporated in all-optical networks by using a light-tree structure. Reference [6] for example demonstrated the advantages of using light-tree structure for supporting both unicast and multicast traffic in optical network design. Reference [7] introduced a mathematical model that can achieve optimal RWA for multicast traffic over mesh and ring network structure under multi-fiber environment (allowing an arbitrary number of fibers per physical link as opposed to a single pair of fiber per link, an assumption used by many other previous research study). Note that multi-fiber per link is a more realistic approach, and generally suits better for practical network infrastructure.

The mathematical model as derived in [7] is based ILP formulation that finds optimal light-tree structures simultaneously with wavelength assignment. Although solution found by such a model is optimal, it is applicable only for relatively small sizes of networks; larger network sizes demands excessive computation, as its complexity increases exponentially with the network size. As a result, network design based on heuristic algorithms is usually considered as a more effective means to solve large-scale network problems. Although, heuristic algorithms do not guarantee the optimality of the obtained solution, but it is generally simpler, faster while offering acceptable solution. Tabu search (TS) algorithm is one such technique, introduced in Glover [8] and [9] that exploits a collection of principles of intelligent problem solving. Its power is based on the use of adaptive memory which is carefully designed for guiding the search process to overcome local optimality and to obtain near-optimal solutions [10]. The TS algorithm is also demonstrated in [11] for its capability to handle large networks. As a result, in this paper we introduce a new RWA algorithm based on Tabu search (TS) suitable for designing

multi-fiber networks that supports multicast traffic using Virtual Light-Tree (VLT) concept used as an alternative to the ILP-based algorithm described in [7].

The remainder of this paper is organized as follows. In section II, problem description and network assumptions is introduced. Moreover, a mathematical model for multicast routing which was proposed in [7] is concisely mentioned. The basic concept of TS is briefly described together with the proposed algorithm in section III. Simulation results and discussions are presented in section IV. Finally, the conclusion is given in the section V.

II. PROBLEM DESCRIPTION AND MULTICAST FORMULATIONS

Consider an optical network represented by an undirected graph $G = (N, L)$, where N denotes a set of optical nodes, $i = \{1, 2, 3, \dots, N\}$, with $|N| = N$. Meanwhile, the physical link are represented as a set of undirected links, $L \subseteq N \times N$, where a physical link ij is the set L if there exists a link connecting node i and j . In the model, we assume that each physical link is bi-directional and may consist of more than one optical fiber to serve the traffic demands of the network. Each optical fiber is limited to multiplexing the number of wavelengths up to M .

Notations:

- N total number of nodes of the network;
- L total number of physical links of the networks;
- $K = |R|$ total number of multicast traffic requests of the networks;
- $r_k(s_k, D_k)$ multicast traffic request r_k from source s_k to set of destinations D_k ;
- t_{r_k} total traffic demand of the multicast traffic request r_k in units of wavelength channels;
- Δ the fanout of optical splitters;
- M a maximum number of wavelength per fiber;
- $\delta_{ij,p}^{sd}$ takes the value of one if route p of node pair sd passes through link ij , and zero, otherwise;
- P_{sd} a set of candidate routes of node pair sd ;
- $x_{r_k}^{ij}$ a Boolean variable, an optical branch between node i and j to form a light-tree for carrying multicast demand r_k ;
- $a_{r_k,p}^{sd}$ a candidate physical route p of node pair sd for multicast demand r_k .

To determine an optimal light-tree, T_k for supporting multicast request $r_k(s_k, D_k)$, let us construct a fully connected logical graph $G_k(N_k, A_k)$ corresponding to $r_k(s_k, D_k)$. The set of nodes N_k of graph G_k has elements consisting of s_k and the set of destinations D_k , namely $N_k = \{i \in N_k \mid i \in D_k \vee i = s_k\}$, and $|N_k|$ is defined as the

total number of nodes. Meanwhile, the set of logical arcs is defined mathematically as $A_k = \{ij \in A_k \mid i, j \in N_k \wedge i \neq j\}$.

A formulation of routing assignment problem for multicasting mesh network which is proposed in [7] can be written as follows:

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (1)$$

Subject to the constraints:

$$\sum_{ij \in A_k} x_{r_k}^{ij} = |N_k| - 1 \quad (2)$$

$$x_{r_k}^{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall ij \in A_k \quad (3)$$

$$\sum_{ij \in \mathcal{S}(S)} x_{r_k}^{ij} \geq 1, \quad \forall S \subset N_k, S \neq \emptyset, N \quad (4)$$

$$\sum_{j: ij \in A_k} x_{r_k}^{ij} \leq \Delta, \quad \forall i \in N_k \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k,p}^{sd} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (6)$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd \in P_{sd}} a_{r_k,p}^{sd} \delta_{ij,p}^{sd} \geq 0, \quad \forall ij \in L \quad (7)$$

$$a_{r_k,p}^{sd} \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (8)$$

$$f_{ij} \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall ij \in L \quad (9)$$

As formulated for VLT wavelength allocation technique, the objective function (1) is the minimization of the total number of optical fibers needed to support the multicast demand set, R . Constraints (2) set the number of optical branches that form a light-tree in each session to have the number of link is less than the number of nodes equal to one. Constraints (3) indicate selected optical branches of each session that used to form a light-tree. Constraints (4) ensure the light-tree should not contain a cycle and should be connected which a cutset $\mathcal{S}(S)$ is defined by $\mathcal{S}(S) = \{ij \in A_k \mid i \in S, j \notin S\}$. Constraints (5) limit the optical splitter capability of each multicast member in each session. These constraints set (2), (3), (4) and (5) are formulation to find the optimal light-tree. Constraints (6) ensure that exactly physical routes selected for optical branches of the light-trees. Due to the link-by-link wavelength assignment of VLT, constraints set (7) state that the wavelength policy of each physical link should be sufficient to meet the multicast traffic load crossing to it. Finally, (8) and (9) limit the network variables of the physical routes and optical fibers to be in the nonnegative integer set [7].

III. TABU SEARCH ALGORITHM

Tabu Search (TS) is an iterative improvement procedure, in which its process starts from an initial feasible solution and then attempts to determine a better solution in the manner of ordinary (descent) local method, until a local optimum is reached. This method can be used to guide any process that employs a set of moves to define the neighborhood of any given solution for transforming one solution into another, and that provides an evaluation function for measuring the

attractiveness of these moves [12]. Tabu list includes recently selected solutions that are forbidden to prevent cycling in the search process. If the move is present in the tabu list, it is accepted only if it decreases the objective function value below the minimal level so far achieved according to an aspiration level [13].

The solutions of this problem are represented by the following expression

$$\mathbf{A} = [\mathbf{J}(1) \ \mathbf{J}(2) \ \mathbf{J}(3) \dots \mathbf{J}(K)],$$

where the vectors $\mathbf{J}(k)$ consist of the assigned tree indices $X_{k,d}$, $1 \leq d \leq t_k$, used for supporting demand of the k th session

$$\mathbf{J}(k) = [X_{k,1} \ X_{k,2} \ X_{k,3} \dots X_{k,t_k}].$$

For more understanding, consider a sample network problem with multicast demands of 3 different sessions. Suppose that the demand quantity of each session is 2, 3 and 2 respectively. A possible solution for this problem can be expressed as $\mathbf{A} = [[2 \ 3] [12 \ 15 \ 17] [23 \ 27]]$. This solution of $\mathbf{A}$ means that the 2nd and 3rd trees are used for supporting the demand of the first session whereas the 12th, 15th and 17th trees are assigned for supporting the demand of the second session and so on.

The neighborhood of the current solution consists of all solutions that have any one route difference from the routes assigned in the current solution. The possible neighbors of a sample solution vector $\mathbf{A}$ are given in Table I.

TABLE I. THE NEIGHBORS OF SOLUTION $[[2 \ 3] [12 \ 15 \ 17] [23 \ 27]]$

$[[8 \ 3] [12 \ 15 \ 17] [23 \ 27]]$	$[[2 \ 8] [12 \ 15 \ 17] [23 \ 27]]$	$[[2 \ 3] [14 \ 15 \ 17] [23 \ 27]]$
$[[2 \ 3] [12 \ 14 \ 17] [23 \ 27]]$	$[[2 \ 3] [12 \ 15 \ 14] [23 \ 27]]$	$[[2 \ 3] [14 \ 15 \ 17] [26 \ 27]]$
$[[2 \ 3] [12 \ 15 \ 17] [23 \ 26]]$	$[[2 \ 3] [12 \ 19 \ 17] [23 \ 27]]$	$[[2 \ 3] [14 \ 15 \ 19] [23 \ 27]]$

Since VLT technique under investigated assigns wavelengths to a light-tree on a link-by-link fashion, the optical networks must include wavelength converters at all network nodes [7]. Therefore, only the routing problem requires careful and sophisticated assignment while wavelength assignment becomes relatively simple. From the solution vector which consists of elements denoting tree number to route traffic demands of all sessions, the fiber requirement in the network correspond to the network constraints as described above is achieved by

$$\sum_{i=1}^L \left[\left(\sum_{k=1}^{|R|} \sum_{d=1}^{t_k} P_{i,X_{k,d}} \right) / M \right], \quad P_{i,X_{k,d}} \in \{0,1\} \quad \text{where } P_{i,X_{k,d}} \text{ is the}$$

Boolean variable which is equal to one if the selected optical tree uses physical link i in order to support traffic demand d th of k th session, and zero, otherwise.

The initial solution vector of the tabu search algorithm for this problem is generated on a random basis. The search begins by evaluating the total fiber requirements corresponding to considered neighbor solutions. Then the best neighbor is selected as the new current solution, if the neighbor is not obtained via a tabu move.

The parameters values of the proposed tabu algorithm were determined experimentally by setting the candidate size = 10 and tabu tenure = 7. The developed TS algorithm is terminated when a chosen maximum iteration number is reached.

The specific procedure of the TS applied into VLT system, is designed and shown in Figure 1.

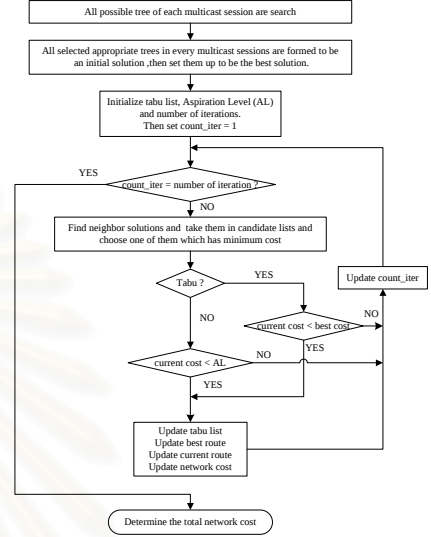


Figure 1. The proposed TS-based Algorithm.

IV. SIMULATION RESULTS

In this section, we analyze and compare the capacity requirements between ILP and proposed heuristic algorithm based on tabu search for two networks shown in Figure 2. Note that, ILP mathematical formulations are optimally solved by using the CPLEX 6.6 program with CPU 2.80GHz, 512 MB of RAM.

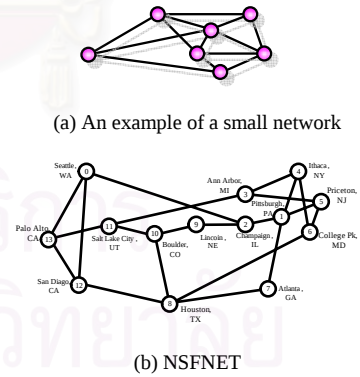


Figure 2. Test networks

Figure 3 shows the resulting network cost achieved by the proposed algorithm in comparison to the ILP for the sample network of 7 nodes and 13 links with 10 multicast sessions. It appears the ILP approach results in comparable network costs across the whole range of the number of wavelengths used. However, the performance gap between the two approaches gets wider with larger values of M .

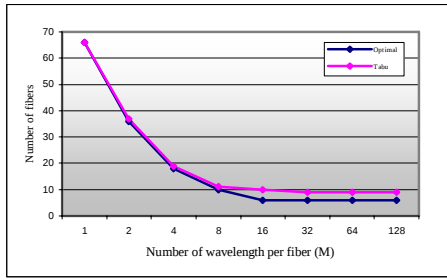


Figure 3. Results for tested network of 7 nodes.

For a more realistic network structure of 14 nodes and 21 links, referred to as a National Science Foundation Network (NSFNet) as shown in Figure 2 (b), two levels of multicast traffic have been tested, 10 and 15 sessions. Results as shown in Figure 4 indicates that the network cost achieved by ILP are always less than tabu search algorithm at every value of M . Similar behavior to the previous network case is also observed here: the tabu search algorithm is able to deliver as effective design outcome as the ILP with much lower complexity.

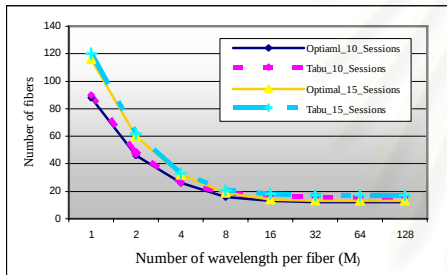


Figure 4. Results for NSFNET.

Let us investigate the comparing computational time among ILP and TS algorithm in Table II.

TABLE II. THE COMPARATIVE RESULT OF NSFNET NETWORK

M	10 sessions (avg. member = 3)				15 sessions (avg. member = 3)				15 sessions (avg. member = 4)			
	Optimal		Tabu		Optimal		Tabu		Optimal		Tabu	
	cost	time(s)	cost	time(s)	cost	time(s)	cost	time(s)	cost	time(s)	cost	time(s)
1	88	0.5	90	11	116	0.56	120	12	172	6858	178	11
2	46	10	48	11	60	45	62	14	none	none	90	14
4	26	9633	26	9	32	225	33	12	none	none	47	11
8	16	3834	19	4	19	180	21	21	none	none	27	15
16	13	250	17	4	14	120	18	14	16	12311	21	15
32	12	120	16	4	13	262	17	12	13	7711	20	13
64	12	106	16	4	13	232	17	12	13	698	20	11
128	12	113	16	5	13	255	17	14	13	760	20	13

In case of 10 sessions with average number of members of each session set to 4, the time requirement of TS algorithm is less than ILP, at most values of M except for $M = 1$ and $M = 2$. Notice that the differences in time requirement are particularly obvious at $M = 4$ and $M = 8$, approximately 1000 times greater. Similarly, in case of 15 sessions the average number of members of each session is set to 3, the time requirement of TS algorithm for most values of M (except $M = 1$) is less than ILP. When the average number of members of each session in 15 sessions network is increased to 4, the

computational time requirement of ILP becomes excessive while TS algorithm is able to find reasonably effective solutions.

V. CONCLUSION

In this paper, we have proposed a heuristic algorithm based on tabu search for solving RWA problem using VLT concept in multi-fiber multicasting networks. Based on simulation results of some tested networks, it is shown that the differences of capacity requirement or network cost determined by ILP and heuristic algorithm are marginal. Computational time requirement of ILP and the TS-based algorithm is comparable for small network sizes, but for larger network problem measured in terms of the number of nodes, the number of links, the number of wavelengths and the number of sessions only the TS-based can be applied while the ILP algorithm requires dramatically increase in computational time.

Acknowledgment

This work was supported in part by the Cooperation Project between Department of Electrical Engineering and Private Sector for Research and Development, Chulalongkorn University, Thailand.

REFERENCES

- [1] Special Issue on High-Capacity Optical Transport Networks, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, Sept. 1998.
- [2] Special Issue on Multiwavelength Optical Technology and Networks, *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 14, June 1996. K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
- [3] "Bell labs technology: Trends & Developments" available at www.lucent.com/minds/trend.
- [4] B. Makherjee, "WDM optical communication networks: Progress and challenges," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, pp. 1810-1824, Sept. 1998. M. Young, *The Technical Writer's Handbook*. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [5] R. Ramaswami, "Optical fiber communication: From transmission to networking," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 138-147, May 2002.
- [6] R. Malli, X. Zhang and C. Qiao, "Benefit of Multicasting in All-Optical Networks," in *Proc. SPIE*, vol. 3531, pp. 9-20, 1998.
- [7] C. Baworntummarat, L. Wuttisittikulij and S. Segkhoonthod, "Analysis and Design of Multicast Routing and Wavelength Assignment in Mesh and Multi-Ring Transport Networks with Multiple Fiber Systems," *IEICE Trans. on Communication*, vol. E87-B, No. 11, pp. 3216-3229, 2004.
- [8] F. Glover, Tabu search: Part I, *ORSA Journal of Computing* 1 (1989) 190-206.
- [9] F. Glover, Tabu search: Part II, *ORSA Journal of Computing* 1 (1990) 4-32.
- [10] Juan A. Daiz and Elena Fernandez, "A Tabu Search heuristic for the generalized assignment problem," *European Journal of Operation Research* 132 (2001), 22-38.
- [11] W. D. Grover. *Mesh-Based Survivable Networks: Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networking*. New Jersey. Prentice Hall, 2004.
- [12] S. Pierre and A. Elgibaoui, "Improving Communication Network Topologies Using Tabu Search," *IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN '97)*, 44-53.
- [13] Bena Dengiz and Cigdem Alabas, "Simulation Optimizaion using Tabu Search," *Proceeding of the 2002 Winter Simulation Conference*, pp. 805-809.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกนกภรณ์ วิสเพ็ญ เกิดเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน พ.ศ.2521 ที่จังหวัดอุบลราชธานี เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย