

การออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง  
โดยใช้วิธีสถิติอัลกอริทึม



นางสาวธัญพร เอี่ยมวสันต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2543  
ISBN 974-346-618-5  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1 & อ.ก. 2545

๕19314๖16

WDM NETWORK DESIGN BASED ON THE MULTI-RING STRUCTURE  
USING A HEURISTIC ALGORITHM

Miss Thanyaporn lamvasant

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-346-618-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานโครงสร้างแบบวงแหวน  
หลายวงโดยใช้วิธีสถิติอัลกอริทึม

โดย

นางสาวธัญพร เอี่ยมวสันต์

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ลัญจนกร วุฒิสัทติกุลกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



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

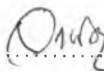
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



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



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ลัญจนกร วุฒิสัทติกุลกิจ)



..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วาทีต เบญจพลกุล)



..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธารา ชลปราณี)

ัญญา เอี่ยมวสันต์ : การออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้  
ฮิวริสติกอัลกอริทึม. (WDM NETWORK DESIGN BASED ON THE MULTI-RING STRUCTURE  
USING A HEURISTIC ALGORITHM) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ลัญจน วุฒิสิริทกุลกิจ, 123 หน้า. ISBN  
974-346-618-5.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาฮิวริสติกอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสำหรับใช้ในการ  
ออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง เพื่อให้ได้ระบบที่สามารถรองรับความ  
ต้องการทราฟฟิกทั้งในสภาวะการใช้งานปกติและสภาวะที่เกิดความเสียหายที่สายเชื่อมโยงหนึ่งข่าย ในงานวิจัยนี้ได้  
พัฒนาอัลกอริทึมขึ้นทั้งหมด 4 แบบ คือ แบบ Local Search (LS), Simulated Annealing (SA), Tabu Search (TS)  
และ Tabu Search โดยประยุกต์ร่วมกับแบบ Local Search (TabuLS) จากผลการศึกษาพบว่าแต่ละวิธีมีสมรรถนะ,  
จำนวนพารามิเตอร์การค้นหา และความซับซ้อนของอัลกอริทึมที่แตกต่างกันไป วิธีที่ให้ผลตอบดีที่สุด คือ วิธี SA แต่  
จุดด้อยของวิธีนี้ก็คือซับซ้อนมาก ในทางกลับกันวิธี LS เป็นวิธีที่เรียบง่าย แต่ผลตอบที่ได้ไม่ดีเท่าวิธี SA เนื่องจาก  
กระบวนการค้นหาคำตอบถูกจำกัดอยู่เฉพาะบริเวณบางแห่ง ส่วนวิธี TS เป็นวิธีที่สามารถค้นหาคำตอบในบริเวณที่  
กว้างขวาง จึงให้ชุดของคำตอบที่หลากหลาย แต่กระนั้นผลตอบที่ได้ยังคงด้อยกว่าวิธีอื่น ๆ วิธีสุดท้าย คือ วิธี TabuLS  
เกิดจากการนำกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธี LS และ TS รวมเข้าด้วยกัน ผลการทดสอบพบว่าวิธี TabuLS ให้  
ผลตอบที่ใกล้เคียงกับวิธี SA มาก โดยที่ทั้งเวลาในการค้นหาคำตอบ, จำนวนพารามิเตอร์ และความซับซ้อนของ  
อัลกอริทึมต่ำกว่าวิธี SA มาก งานวิจัยนี้ได้แยกวิธีจัดสรรความจุสำรองเป็น 2 วิธี ในวิธีแรกเส้นใยแสงสำหรับรองรับ  
ทราฟฟิกปกติและสำหรับการเผื่อความจุสำรองจะถูกจัดสรรความจุแยกจากกัน ขณะที่ในวิธีที่ 2 เส้นใยแสงชุดเดียวกัน  
สามารถใช้รองรับทราฟฟิกทั้ง 2 ส่วนได้ จากผลการทดสอบพบว่าวิธีที่ 2 สามารถลดปริมาณเส้นใยแสงที่ต้องการได้ดี  
กว่าวิธีแรก ทั้งเมื่อในวิธีจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection หรือ Span Protection

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลของปัจจัยอื่น ๆ ที่มีต่อการออกแบบโครงข่าย ได้แก่ปริมาณและ  
รูปแบบของทราฟฟิก, Connectivity ของโครงข่าย, จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแสง จากผลการศึกษา  
พบว่าปัจจัยเหล่านี้ส่งผลร่วมกันให้ต้นทุนของโครงข่ายรวมทั้งชุดของวงแหวนที่เลือก มีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละกรณี  
โดยที่ต้นทุนของโครงข่ายจะมีค่าสูงขึ้นถ้าโครงข่ายมี Connectivity ต่ำ ต้นทุนของโครงข่ายยังมีค่าสูงขึ้นเมื่อทราฟฟิก  
หรือจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแสงมีค่าสูงขึ้น นอกจากนั้น จากการเปรียบเทียบต้นทุนของโครงข่าย  
กับต้นทุนที่ได้จากกรรมวิธีโครงสร้างแบบเมช พบว่าในสภาวะปกติต้นทุนของโครงสร้างแบบวงแหวนมีค่าทัดเทียมกับ  
โครงสร้างแบบเมช แต่ในสภาวะที่ต้องมีการเผื่อความจุสำรองพบว่าต้นทุนของโครงสร้างแบบวงแหวนสูงกว่าโครงสร้าง  
แบบเมชมาก ท้ายที่สุดได้มีการศึกษาถึงความสำคัญของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น พบว่าอุปกรณ์แปลงผัน  
ความยาวคลื่นเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีความจำเป็นสำหรับโครงข่าย WDM ที่ใช้โครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต ..... ัญญา เอี่ยมวสันต์ .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... ลัญจน วุฒิสิริทกุลกิจ .....

# # 4170339521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: Optical Network / WDM / Multi-Ring Structure / Heuristic Algorithm

THANYAPORN IAMVASANT: WDM NETWORK DESIGN BASED ON THE MULTI-RING STRUCTURE USING A HEURISTIC ALGORITHM. THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULIJ. Ph.D. 123 pp. ISBN 974-346-618-5.

This thesis presents a design and development of effective heuristic algorithms for designing a Wavelength Division Multiplexed (WDM) network based on the multi-ring structure to support traffic demands both for normal operation and all single-link failure scenarios. In this research, four heuristic algorithms, namely Local Search (LS), Simulated Annealing (SA), Tabu Search (TS) and Tabu Search applied with Local Search (TabuLS), have been developed. Our studies show that each algorithm has different levels of performance, searching parameters and complexity. The SA algorithm offers the best performance among these algorithms, but its shortcomings lie in the complexity. On the contrary, LS is much simpler but its solution is not so good as SA's because the searching process is concentrated on a limited area. In contrast, TS has a mechanism that enables it to search into a wider and more diverse area. However, the TS algorithm does not necessarily find a better solution, and in fact its performance is the worst. The TabuLS algorithm is developed based on the combination of searching mechanisms of the LS and TS. The simulation results indicate that this algorithm has comparable performance to the SA's but has much less complexity. Furthermore, two distinct allocation techniques for network protection are investigated. In the first technique, fibers used as working and spared capacity must be assigned separately. In the second technique, the spared capacity can be assigned in both the working and spared fiber. It is found that the second technique requires lower fibers than that required by the first technique. This is the case for both span and path restoration.

This thesis also discusses the effects of other factors on the network design. These factors are the amounts and patterns of traffic, the network connectivity and the number of wavelengths multiplexed in a fiber (M). From the study, it is apparent that these factors play an important role on both the resulting network cost and the chosen set of rings. The network cost increases with the traffic volumes and M, whereas it decreases with the network connectivity. In addition, cost comparison between the multi-ring and the mesh design schemes is carried out. Under normal operation, the cost differences are not substantial. On the contrary, under the failure scenario, the ring cost is much higher than that of the mesh design. Finally, the importance of wavelength converter is examined. It is revealed that the wavelength converter is not a necessary device in this WDM network design.

Department of Electrical Engineering

Field of study Electrical Engineering

Academic year 2000

Student's signature ..... *T. Iamvasant* .....

Advisor's signature ..... *Lunchakorn Wuttisittikulij* .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ. ดร.สัตยฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยด้วยดีเสมอมา และต้องขอขอบคุณ คุณสิทธิชัย ลีลานันท์นุกุล คุณศิริชัย อารีวานิช และคุณเจริญชัย บวรธรรมรัตน์ เพื่อน ๆ ในกลุ่มงานวิจัยเรื่องเดียวกัน ที่ได้คำแนะนำและข้อคิดที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ซึ่งให้ความสนับสนุนทางการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ธัญพร เอี่ยมวสันต์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฒ
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	5
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	5
1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน .....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	7
2 แนวทางที่ใช้ในการออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานโครงสร้างแบบวงแหวน หลายวง .....	8
2.1 กล่าวนำ .....	8
2.2 ชนิดของโครงข่ายรูปวงแหวน .....	8
2.2.1 วงแหวนแบบ Uni-directional .....	8
2.2.2 วงแหวนแบบ Bi-directional .....	9
2.3 เทคนิคที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวน หลายวง .....	10
2.4 ค่าต้นทุนของโครงข่าย (Network Cost) .....	11

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
2.5	การออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ Exhaustive Search .....	12
2.6	การออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ ฮิวริสติกอัลกอริทึม .....	13
2.6.1	การเลือกวงแหวนที่เหมาะสมและการกระจายทราฟฟิกลงบน วงแหวน .....	15
2.6.1.1	การเลือกวงแหวนแบบสุ่ม (Random Ring) .....	16
2.6.1.2	การเลือกวงแหวนโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม (Heuristic Algorithm).....	17
2.6.2	อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter) .....	18
2.6.3	การจัดวิธีให้ทราฟฟิกแต่ละค่า .....	20
2.7	แบบจำลองทราฟฟิกที่ใช้ทดสอบ .....	21
2.8	แบบจำลองโครงข่ายที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการออกแบบ .....	22
2.9	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ .....	24
2.9.1	การทดสอบอัลกอริทึมการออกแบบโดยใช้ Exhaustive Search ....	24
2.9.2	การเปรียบเทียบการออกแบบเมื่อใช้วิธีการเลือกวงแหวนเบื้องต้น โดยการสุ่มและโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม .....	25
3	เทคนิคการปรับปรุงการออกแบบให้ดีขึ้นด้วยฮิวริสติกอัลกอริทึม .....	30
3.1	กล่าวนำ .....	30
3.2	ขั้นตอนการปรับปรุงการออกแบบ .....	30
3.3	กระบวนการค้นหาคำตอบใหม่ .....	31
3.4	กระบวนการตัดสินใจยอมรับคำตอบ .....	32
3.5	การปรับปรุงการออกแบบโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Local Search .....	33



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.6	การปรับปรุงการออกแบบโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Simulated Annealing ..... 34
3.7	การปรับปรุงการออกแบบโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Tabu Search ..... 36
3.7.1	การปรับปรุงการออกแบบโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Tabu Search ..... 37
3.7.2	การปรับปรุงการออกแบบโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Tabu Search ประยุกต์ร่วมกับแบบ Local Search ..... 38
4	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในฮิวริสติกอัลกอริทึม ..... 41
4.1	กล่าวนำ ..... 41
4.2	การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน Simulated Annealing ..... 41
4.2.1	การวิเคราะห์ค่า <i>factor</i> และค่า <i>r</i> ..... 42
4.2.2	การวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ( $t_0$ ) ..... 50
4.2.3	ค่า <i>factor</i> และ ค่า <i>r</i> ที่มีความเหมาะสมกับการออกแบบโครงข่ายแต่ละแบบ ..... 51
4.3	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Tabu Search ..... 57
4.3.1	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Tabu Search ..... 57
4.3.2	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Tabu Search ประยุกต์ร่วมกับแบบ Local Search ..... 59
4.4	การเปรียบเทียบต้นทุนที่ได้ระหว่างฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบต่าง ๆ ..... 61
5	การป้องกันโครงข่ายจากความเสียหายที่ขยายเชื่อมโยงหนึ่งบนพื้นฐานโครงสร้างแบบวงแหวน ..... 64
5.1	กล่าวนำ ..... 64

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.2	วิธีการป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวน ..... 64
5.2.1	การจัดเส้นทางในการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection ..... 65
5.2.2	การจัดเส้นทางในการป้องกันโครงข่ายแบบ Span Protection ..... 65
5.3	การจัดสรรความยาวคลื่นสำรอง ..... 67
5.3.1	การสำรองบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก ..... 67
5.3.2	การสำรองบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อน ..... 67
5.4	ความจำเป็นของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นต่อการป้องกันโครงข่าย ..... 69
5.5	อัลกอริทึมการจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่าย ..... 70
5.5.1	อัลกอริทึมการจัดสรรความจุสำรองในป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection ..... 70
5.5.2	อัลกอริทึมการจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Span Protection ..... 72
5.5.3	อัลกอริทึมการจัดสรรความยาวคลื่นให้เส้นทางสำรอง ..... 73
5.6	การทดสอบและวิเคราะห์ ..... 75
5.6.1	การวิเคราะห์วิธีการจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวน ..... 75
5.6.2	ความจำเป็นของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อการป้องกันโครงข่าย ..... 79
6	ปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการออกแบบโครงข่าย ..... 83
6.1	กล่าวนำ ..... 83
6.2	อัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบโครงข่าย ..... 83
6.3	ผลของปริมาณกราฟฟิคที่เพิ่มขึ้น และ Connectivity ของโครงข่าย ..... 84
6.3.1	โครงข่ายที่จะใช้ในการวิเคราะห์ ..... 84

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6.3.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ .....	84
6.4 ผลของปริมาณกราฟฟีกและจำนวนความยาวคลื่นที่มีลติเพลกซ์ใน เส้นใยแสง .....	88
6.5 ผลของลักษณะของกราฟฟีกแบบ Non-uniform .....	93
6.6 ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น .....	99
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	103
7.1 บทสรุป .....	103
7.2 ข้อเสนอแนะ .....	106
รายการอ้างอิง .....	107
ภาคผนวก .....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	123

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	รายละเอียดของโครงข่ายที่จำลองเพื่อใช้ทดสอบอัลกอริทึมการออกแบบ..	23
ตารางที่ 2.2	ผลการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนโดยใช้ Exhaustive Search .....	24
ตารางที่ 2.3	คำตอบเบื้องต้นที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายเมื่อใช้วิธีการเลือก วงแหวนแบบสุ่ม .....	27
ตารางที่ 2.4	คำตอบเบื้องต้นที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายเมื่อใช้วิธีการเลือก วงแหวนแบบ Shortest-Route Shortest-Ring (SRSR) .....	29
ตารางที่ 4.1	ต้นทุนจากการปรับปรุงคำตอบด้วย Simulated Annealing บนโครงข่าย EUROCore เมื่อใช้ทราฟฟิก Uniform ขนาดเท่ากับ 1 ที่ $M=1$ และจะ หยุดค้นหาคำตอบเมื่อไม่พบการพัฒนาของคำตอบภายใน 10000 รอบ..	52
ตารางที่ 4.2	ต้นทุนจากการปรับปรุงคำตอบด้วย Simulated Annealing บนโครงข่าย THAINet เมื่อใช้ทราฟฟิก Uniform ขนาดเท่ากับ 1 ที่ $M=1$ และจะหยุด ค้นหาคำตอบเมื่อไม่พบการพัฒนาของคำตอบภายใน 10000 รอบ .....	52
ตารางที่ 4.3	ต้นทุนจากการปรับปรุงคำตอบด้วย Simulated Annealing บนโครงข่าย NSFNet เมื่อใช้ทราฟฟิก Uniform ขนาดเท่ากับ 1 ที่ $M=1$ และจะหยุด ค้นหาคำตอบเมื่อไม่พบการพัฒนาของคำตอบภายใน 10000 รอบ .....	53
ตารางที่ 4.4	ต้นทุนจากการปรับปรุงคำตอบด้วย Simulated Annealing บนโครงข่าย EON เมื่อใช้ทราฟฟิก Uniform ขนาดเท่ากับ 1 ที่ $M=1$ และจะหยุด ค้นหาคำตอบเมื่อไม่พบการพัฒนาของคำตอบภายใน 10000 รอบ .....	53
ตารางที่ 4.5	ต้นทุนจากการปรับปรุงคำตอบด้วย Simulated Annealing บนโครงข่าย ARPANet เมื่อใช้ทราฟฟิก Uniform ขนาดเท่ากับ 1 ที่ $M=1$ และจะหยุด ค้นหาคำตอบเมื่อไม่พบการพัฒนาของคำตอบภายใน 10000 รอบ .....	54
ตารางที่ 4.6	ต้นทุนจากการปรับปรุงคำตอบด้วย Simulated Annealing บนโครงข่าย UKNet เมื่อใช้ทราฟฟิก Uniform ขนาดเท่ากับ 1 ที่ $M=1$ และจะหยุด ค้นหาคำตอบเมื่อไม่พบการพัฒนาของคำตอบภายใน 10000 รอบ .....	54
ตารางที่ 4.7	จำนวนต้นทุนที่ค้นพบในอัลกอริทึมแบบ SA ที่ดีกว่าและด้อยกว่า LS เมื่อหยุดการค้นหาคำตอบเมื่อไม่มีการพัฒนาของคำตอบภายใน 10000 รอบ .....	55

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 4.8	ต้นทุนจากการปรับปรุงคำตอบด้วย Simulated Annealing บนโครงข่าย EUROCore เมื่อใช้ทราฟฟิก Uniform ขนาดเท่ากับ 1 ที่ $M=1$ และจะหยุดค้นหาคำตอบเมื่อไม่พบการพัฒนาของคำตอบภายใน 50000 รอบ..	56
ตารางที่ 4.9	ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบของโครงข่าย EUROCore และจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบเมื่อใช้ความยาวของ Tabu List ต่าง ๆ กัน .....	57
ตารางที่ 4.10	ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบของโครงข่าย NFSNet และจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบเมื่อใช้ความยาวของ Tabu List ต่าง ๆ กัน .....	58
ตารางที่ 4.11	ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบของโครงข่าย EON และจำนวนรอบที่ค้นพบคำตอบเมื่อใช้ความยาวของ Tabu List ต่าง ๆ กัน .....	58
ตารางที่ 5.1	จำนวนเส้นใยแสงและต้นทุนของโครงข่าย 4 โหนด ทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 3 เมื่อใช้วิธีจัดสรรความจุสำรองแต่ละวิธี ในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น .....	76
ตารางที่ 5.2	จำนวนเส้นใยแสงและต้นทุนของโครงข่าย 5 โหนด ทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 3 เมื่อใช้วิธีจัดสรรความจุสำรองแต่ละวิธี ในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น .....	76
ตารางที่ 5.3	ความยาวของเส้นทางสำรองนับเป็นข่ายเชื่อมโยง เมื่อใช้การจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection และ Span Protection .....	78
ตารางที่ 5.4	จำนวนเส้นใยแสงของโครงข่าย 4 โหนด ทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 3 เมื่อใช้วิธีจัดสรรความจุสำรองแต่ละวิธี ทั้งในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น .....	81
ตารางที่ 5.5	จำนวนเส้นใยแสงของโครงข่าย 5 โหนด ทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 3 เมื่อใช้วิธีจัดสรรความจุสำรองแต่ละวิธี ทั้งในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น .....	81
ตารางที่ 6.1	ต้นทุนของโครงข่าย UKNet, EON, ARPANet, EUROCore, NSFNet และ THAINet ในสภาวะปกติและเมื่อมีการเผื่อความจุสำรอง เมื่อออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนและโครงสร้างแบบเมฆทดสอบกับทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 1 ที่ $M=1$ .....	88

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 6.2	ผลการออกแบบโครงข่าย EUROCore ที่ทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 5 ที่ M ต่าง ๆ .....	93
ตารางที่ 6.3	ระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างโหนดต่าง ๆ ของโครงข่าย EUROCore .....	96
ตารางที่ 6.4	ผลที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนเมื่อใช้ ทราฟฟิก Non-uniform ชนิดต่าง ๆ ที่ M=1 .....	97
ตารางที่ 6.5	ผลที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนเมื่อใช้ทราฟฟิกแบบ Central_22_0 ที่มีโหนดศูนย์กลางเป็นโหนดต่าง ๆ กันที่ M=1 .....	98
ตารางที่ 6.6	ต้นทุนของโครงข่าย EUROCore ทราฟฟิก Uniform ขนาดต่าง ๆ กัน ทั้งในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น .....	100

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น .....	2
รูปที่ 1.2 โครงสร้างของโนดในโครงข่าย WDM .....	2
รูปที่ 1.3 การออกแบบโดยการเลือกวงแหวนทั้ง 2 วิธี .....	4
รูปที่ 2.1 (ก) การส่งข้อมูลระหว่างคูโนด A-B ในวงแหวนแบบ Uni-directional (ข) การส่งข้อมูลระหว่างคูโนด A-B ในวงแหวนแบบ Bi-directional .....	9
รูปที่ 2.2 เทคนิคในการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง .....	10
รูปที่ 2.3 ผังงานของอัลกอริทึมการออกแบบโดยใช้ Exhaustive Search .....	12
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม .....	13
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของวงแหวนที่ใช้รองรับทราฟฟิกระหว่างโนดต้นทางและปลายทาง ..	15
รูปที่ 2.6 ผังงานของการเลือกวงแหวนแบบสุ่ม .....	17
รูปที่ 2.7 ผังงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมการเลือกวงแหวนแบบ Shortest-Route Shortest Ring .....	18
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น .....	19
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างแบบจำลองทราฟฟิกของโครงข่ายที่มี 5 โหนด .....	22
รูปที่ 2.10 โครงข่าย EUROCore .....	26
รูปที่ 3.1 ผังงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมการปรับปรุงการออกแบบโครงข่าย .....	31
รูปที่ 3.2 ผังงานของกระบวนการค้นหาคำตอบใหม่ .....	32
รูปที่ 3.3 ผังงานของการปรับปรุงการออกแบบด้วยฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Local Search .....	33
รูปที่ 3.4 ผังงานของการปรับปรุงการออกแบบด้วยฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Simulated Annealing .....	36
รูปที่ 3.5 ผังงานของการปรับปรุงการออกแบบด้วยฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Tabu Search .....	38
รูปที่ 3.6 ผังงานของการปรับปรุงการออกแบบด้วยฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Tabu Search ประยุกต์ร่วมกับแบบ Local Search .....	39
รูปที่ 4.1 ลักษณะการลดลงของความน่าจะเป็นที่ยอมรับคำตอบที่ดี .....	43

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า	
รูปที่ 4.2	ต้นทุนที่ได้รับการยอมรับและต้นทุนที่ดีที่สุด 300 รอบแรก ของโครงข่าย EUROCore เมื่อใช้ค่า <i>factor</i> เป็น 0.5 และ 0.99 ที่ค่า <i>r</i> เป็น 5 .....	46
รูปที่ 4.3	ผลการทดสอบโครงข่าย EUROCore ที่ทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 1 ในช่วง 70000 รอบของการค้นหาคำตอบ .....	47
รูปที่ 4.4	ลักษณะการลดลงของค่าต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบเมื่อใช้อุณหภูมิเริ่มต้นค่าต่าง ๆ .....	50
รูปที่ 4.5	ต้นทุนที่ค้นพบของฮิวริสติกอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบแบบ Local Search , Tabu Search และ Tabu LS .....	60
รูปที่ 4.6	จำนวนคำตอบที่ให้ต้นทุนแต่ละค่า .....	60
รูปที่ 4.7	ต้นทุนที่ดีที่สุดที่ค้นพบตามจำนวนรอบในการปรับปรุงการออกแบบ.....	62
รูปที่ 5.1	การจัดเส้นทางเพื่อป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวนแบบ Path Protection และ Span Protection .....	66
รูปที่ 5.2	การสำรวจความจุนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อน .....	68
รูปที่ 5.3	ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection .....	71
รูปที่ 5.4	ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Span Protection .....	72
รูปที่ 5.5	ผังงานการจัดสรรความยาวคลื่นให้เส้นทางสำรองของทราฟฟิกค่าหนึ่ง...	74
รูปที่ 6.1	โทโพโลยีและรายละเอียดของโครงข่าย EURO-A, EURO-B, EURO-C...	84
รูปที่ 6.2	ต้นทุนของโครงข่ายในสภาวะปกติ (No Protection) และสภาวะที่สำรองความจุสำหรับความเสียหาย (With Protection) ที่ปริมาณทราฟฟิกต่าง ๆ กัน ที่ $M=1$ .....	85
รูปที่ 6.3	ผลการออกแบบโครงข่าย EUROCore .....	90
รูปที่ 6.4	ทราฟฟิก Non-uniform 3 แบบที่จะใช้ทดสอบ.....	94



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

WDM	ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น
$N_\lambda$	จำนวนความยาวคลื่นที่ต้องการในวงแหวนแต่ละวง
M	จำนวนช่องสัญญาณ (จำนวนความยาวคลื่น) ที่มัลติเพลกซ์กันในเส้นใยแสงแต่ละเส้น
$fiber_i$	จำนวนเส้นใยแสงที่ต้องวางบนวงแหวนที่ i
$RingCost_i$	ต้นทุนของวงแหวนที่ i
$Ringsize_{av}$	ขนาดวงแหวนเฉลี่ย
$Node_i$	จำนวนโหนดในวงแหวนที่ i
$Nring$	จำนวนวงแหวนที่ถูกเลือกเพื่อรองรับทราฟฟิกในโครงข่าย
SRSR	วิธีการเลือกวงแหวน แบบ Shortest-Route Shortest-Ring
C	ค่า Connectivity ของโครงข่าย
L	จำนวนข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย
N	จำนวนโหนดของโครงข่าย
P	ความน่าจะเป็นที่ยอมรับคำตอบที่ด้อยลง
$Cost_i$	ค่าต้นทุนของคำตอบที่ค้นพบในรอบที่ i
$t_i$	ค่าอนุหภูมิในรอบที่ i
r	จำนวนครั้งที่คำตอบดีขึ้นก่อนจะให้อนุหภูมิลดค่าลง
factor	อัตราส่วนในการลดค่าอนุหภูมิ
$t_0$	ค่าอนุหภูมิเริ่มต้น
LS	ฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Local Search
SA	ฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Simulated Annealing
TS	ฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Tabu Search
TabuLS	ฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ Tabu Search ประยุกต์ร่วมกับแบบ Local Search
PSF	วิธีการจัดสรรความจุสำรองโดยจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection และสำรองบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก
PSW	วิธีการจัดสรรความจุสำรองโดยจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection และสำรองบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อน

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

LSF	วิธีการจัดสรรความจุสำรองโดยจัดเส้นทางสำรองแบบ Span Protection และสำรองบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก
LSW	วิธีการจัดสรรความจุสำรองโดยจัดเส้นทางสำรองแบบ Span Protection และสำรองบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อน
LSF_NWC	วิธี LSF ที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
LSW_NWC	วิธี LSW ที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
Near	ทราฟฟิกแบบ Non-uniform ที่มีทราฟฟิกของคู่โหนดที่ติดกันจำนวนมาก
Far	ทราฟฟิกแบบ Non-uniform ที่มีทราฟฟิกของคู่โหนดที่ไม่ติดกันจำนวนมาก
Central	ทราฟฟิกแบบ Non-uniform ที่มีทราฟฟิกไปสู่โหนดใดโหนดหนึ่งมาก
Ux	ทราฟฟิกแบบ Uniform ที่มีขนาดเป็น x