

การปรับปรุงสมรรถนะเทคนิคการปกป้องแบบ p-Cycle สำหรับโครงข่าย WDM ที่ใช้อัตราสายผสม



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF P-
CYCLE PROTECTION TECHNIQUE FOR WDM NETWORKS WITH MIXED LINE RATES

Mr. Puttipong Sornpleang



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 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมรรถนะเทคนิคการปกป้องแบบ p-Cycle สำหรับโครงข่าย WDM ที่ใช้อัตราสายผสม
โดย	นายพุดพิงค์ ศรีแผลง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เจริญชัย บวรธรรมรัตน์)

พุดพิงศ์ ศรแผลง : การปรับปรุงสมรรถนะเทคนิคการปกป้องแบบ p-Cycle สำหรับ
 โครงข่าย WDM ที่ใช้อัตราสายผสม (PERFORMANCE IMPROVEMENT OF P-CYCLE
 PROTECTION TECHNIQUE FOR WDM NETWORKS WITH MIXED LINE RATES) อ.ที่
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ.
 ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ, 68 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาปัญหาการจัดสรรเส้นทางและการกำหนดอัตราบิตโดยใช้การ
 ปกป้องโครงข่ายแบบ p-cycle สำหรับโครงข่ายอัตราสายผสม (Mixed line rate: MLR) ปัญหาถูก
 กำหนดไว้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม (integer linear
 programing) อันดับแรกได้นำเสนอการปรับปรุงเทคนิคการปกป้อง p-cycle แบบดั้งเดิม โดยใช้แต่
 ละ p-cycle ปกป้องเส้นทางแสงทำงานที่อัตราสายใด ๆ และเรียกเทคนิคนี้ว่าการปกป้องอัตราบิต
 ของไซเคิลผสม จากนั้นได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการปกป้องอัตราบิตของไซเคิลผสมและ
 อัตราบิตของไซเคิลคงที่ ซึ่งอนุญาตให้แต่ละ p-cycle ปกป้องเส้นทางแสงทำงานที่อัตราสายคงที่
 ร่วมกัน ผลจากทดสอบแสดงว่าวิธีการปกป้องอัตราบิตของไซเคิลผสมมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสำหรับ
 ความจุการปกป้องและต้นทุนของทรานสปอนเดอร์เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของทราฟฟิกโดยเปรียบเทียบกับ
 วิธีการปกป้องอัตราบิตของไซเคิลคงที่ ในอันดับที่สองได้นำเสนอการกำหนดโปรแกรมเชิงเส้นแบบ
 จำนวนเต็มแบบใหม่เพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรเส้นทางและกำหนดอัตราบิตสำหรับโครงข่ายอัตราสาย
 ผสม โดยใช้เทคนิคการปกป้อง extended p-cycle ซึ่งเป็นการขยายการปกป้องของ p-cycle แบบ
 ดั้งเดิมและให้สมรรถนะที่สูงกว่า แนวคิดหลักของการปกป้องคือการให้ p-cycle แบบดั้งเดิมสามารถ
 ปกป้องเส้นทางแสงใด ๆ ที่ไม่เพียงแต่ปกป้องส่วนของไซเคิลหรือ straddling link เท่านั้นยังสามารถ
 ปกป้องเส้นทางหรือส่วนประกอบของเส้นทางได้อีกด้วย ผลการทดสอบแสดงว่าสมรรถนะของ
 extended p-cycle ให้ประสิทธิภาพสำหรับโครงข่าย WDM พร้อมกับอัตราสายผสมที่ดีกว่าเมื่อ
 เปรียบเทียบการปกป้อง p-cycle แบบดั้งเดิม

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5570320121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MIXED LINE RATE / TRANSMISSION REACH / TRANSPONDER COST / P-CYCLE / EXTENDED P-CYCLE / LINK PROTECTION / PATH PROTECTION / PATH AND SEGMENT PROTECTION

PUTTIPONG SORNPLEANG: PERFORMANCE IMPROVEMENT OF P-CYCLE PROTECTION TECHNIQUE FOR WDM NETWORKS WITH MIXED LINE RATES. ADVISOR: ASSOC. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. POOMPAT SAENGUDOMLERT, Ph.D., 68 pp.

This thesis considers the problem of routing and rate assignment for mixed line rate (MLR) using p-cycles. The problem is formulated mathematically using integer linear programming (ILP). First, the thesis proposes a modification of the conventional p-cycle protection technique using each p-cycle to protect any working lightpath at any line rate, and refers to this case as the mixed cycle rate (MCR) approach. Then, a comparative study is performed between MCR and fixed cycle rate (FCR), which allows each p-cycle to protect working lightpaths at a common fixed line rate. The results show that MCR is more efficient in term of protection capacity as well as transponder cost as the traffic increases when compared to FCR. Second, a novel ILP formulation is proposed to solve the routing and rate assignment problem for MLR networks using extended p-cycle protection. The extended p-cycle protection is an extension of the conventional p-cycle protection, and is more efficient than the conventional p-cycle protection. The main concept is to employ conventional p-cycles, not only to protect on-cycle or straddling link, but also to provide path and segment protection. The results show that the performance of extended p-cycle protection is more efficient for WDM network with MLR than the conventional p-cycle protection.

Department: Electrical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร. ลัญฉกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษา และ รศ.ดร. ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่าง ๆ ในการทำวิจัย รวมทั้ง นายฐิติ สิทธิวางกุล นายธราธร พรหมสะอาด นายมนุสส์ เพ็งนู นายสุรพล ตันอร่ามและเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการเดียวกันที่ให้ข้อคิด และคำแนะนำที่ดีมาโดยตลอดไม่ว่าจะเป็นด้านวิจัยหรือด้านอื่น ๆ ก็ตาม

สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยใคร่ขอกราบขอพระคุณ บิดามารดา และทุก ๆ ท่านในครอบครัวของผู้ทำวิจัย ที่ให้ความสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง ซึ่งเป็นกำลังใจแก่ผู้ทำวิจัยเป็นอย่างมากตลอดมาจนสามารถสำเร็จการศึกษา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูป.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	6
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ปัญหาการจัดสรรเส้นทาง.....	8
ในระบบสื่อสารโทรคมนาคมสามารถแบ่งประเภทของกราฟฟิกรออกเป็น 2 ประเภทดังนี้.....	8
2.2 การฟื้นฟูจากความล้มเหลวของโครงข่าย.....	9
2.2.1 การจัดสรรเส้นทางสำรอง.....	10
2.2.2 การปกป้องข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ร่วมกันแบบวงแหวนและ p-cycle.....	13
บทที่ 3 การปกป้องโครงข่ายอัตราสายผสมแบบใช้ p-cycle ร่วมกัน.....	15
3.1 บทนำ.....	15
3.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	17
3.3 รูปแบบที่ได้นำเสนอ.....	18

3.3.1	โครงข่าย MLR ได้รับการปกป้องแบบอัตราบิดของไซเคิลคงที่ (MLR-FCR).....	18
3.3.2	โครงข่าย MLR ได้รับการปกป้องแบบอัตราบิดของไซเคิลผสม (MLR-MCR)	20
3.4	การคำนวณ 2 ขั้นตอนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	21
3.5	ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย.....	24
3.6	สรุป	38
บทที่ 4	การปกป้องแบบ extended p-cycle	39
4.1	บทนำ.....	39
4.2	รูปแบบที่ได้นำเสนอ	40
4.2.1	extended p-cycle สำหรับปกป้องเส้นทาง (EPPP)	40
4.2.2	extended p-cycle สำหรับปกป้องเส้นทางและส่วนประกอบเส้นทาง (EPPSP)	42
4.2.3	พิจารณาการใช้ไซเคิลร่วมกัน.....	43
4.3	การคำนวณ 2 ขั้นตอนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	44
4.3.1	กระบวนการสวิตช์และการกู้คืนระบบสำหรับกรณี EPPP และ EPPSP เมื่อข่าย เชื่อมโยงหนึ่งข่ายมีความล้มเหลวเกิดขึ้น	47
4.4	ผลเฉลยและวิเคราะห์ผลการทดลอง	48
4.5	สรุป	59
บทที่ 5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	60
5.1	บทสรุป	60
5.2	ข้อเสนอแนะ	62
	รายการอ้างอิง	66
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	68

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบวิธีการปกป้องโครงข่ายระหว่าง p-cycle และวงแหวน	13
ตารางที่ 3.1	จำนวนเส้นทางแคนติเดต k จากโนด 1 ไปยังโนด 2 และแสดงถึงอัตราบิตที่สามารถส่งผ่านไปตามเส้นทาง	19
ตารางที่ 3.2	จำนวนเส้นทางแคนติเดต k จากโนด 1 ไปยังโนด 3 และแสดงถึงอัตราบิตที่สามารถส่งผ่านไปตามเส้นทาง	19
ตารางที่ 3.3	ไซเคิลแคนติเดตปกป้องข่ายเชื่อมโยงของเส้นทางแสงทำงาน	20
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี MLR-FCR และ MLR-MCR	21
ตารางที่ 3.5	พารามิเตอร์การป้อนเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี MLR-FCR และ MLR-MCR	22
ตารางที่ 3.6	เมทริกซ์กราฟฟิกสำหรับโครงข่าย 6N_16L	25
ตารางที่ 3.7	เส้นทางแคนติเดตของเส้นทางแสงทำงานพร้อมกับระยะทางจากโนดต้นทางจนถึงโนดปลายทาง	27
ตารางที่ 3.8	ต้นทุนในการจัดสรรโครงข่าย 6N_16L	28
ตารางที่ 3.9	จำนวนไซเคิลใช้ที่ได้จากวิธี MLR-FCR และ MLR-MCR	29
ตารางที่ 3.10	ไซเคิลแคนติเดตที่ใช้สำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR-FCR	30
ตารางที่ 3.11	ไซเคิลแคนติเดตที่ใช้สำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR-MCR	30
ตารางที่ 3.12	เปรียบเทียบการปกป้องโครงข่ายระหว่างวิธีวงแหวนและ p-cycle ในกรณี FCR	30
ตารางที่ 3.13	เปรียบเทียบการปกป้องโครงข่ายระหว่างวิธีวงแหวนและ p-cycle ในกรณี MCR	31
ตารางที่ 3.14	เส้นทางแคนติเดตของเส้นทางแสงทำงานพร้อมกับระยะทางจากโนดต้นทางจนถึงโนดปลายทาง	33
ตารางที่ 3.15	ต้นทุนในการจัดสรรโครงข่าย 6N_20L	34
ตารางที่ 3.16	จำนวนไซเคิลใช้ที่ได้จากวิธี MLR-FCR และ MLR-MCR	35
ตารางที่ 3.17	ไซเคิลแคนติเดตที่ใช้สำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR-FCR	36

ตารางที่ 3.18	ไซเคิลแคนดิเดตที่ใช้สำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR-MCR.....	36
ตารางที่ 3.19	เปรียบเทียบการปกป้องโครงข่ายระหว่างวงแหวนและ p-cycle แบบ FCR.....	37
ตารางที่ 3.20	เปรียบเทียบการปกป้องโครงข่ายระหว่างวงแหวนและ p-cycle แบบ MCR	37
ตารางที่ 4. 1	ตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี EPPP และ EPPSP.....	44
ตารางที่ 4. 2	พารามิเตอร์การป้อนเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการปกป้อง โครงข่ายแบบ EPPP และ EPPSP.....	45
ตารางที่ 4.3	จากการทดสอบ 5 คู่โหนดของวิธี EPPP แสดงถึงความเป็นไปได้ของเส้นทางแสง ทำงานจะได้รับการปกป้องจากไซเคิลแคนดิเดต c	50
ตารางที่ 4.4	การทดสอบ 5 คู่โหนดของวิธี EPPSP สำหรับข่ายเชื่อมโยงที่ไม่ได้รับการปกป้อง	52
ตารางที่ 4.5	จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรและการปกป้องโครงข่าย 6N_16L ด้วยวิธี MLR-FCR ตามหัวข้อที่ 3.4.3	54
ตารางที่ 4.6	จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรและการปกป้องโครงข่าย 6N_16L ด้วยวิธี EPPP	54
ตารางที่ 4.7	จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรและการปกป้องโครงข่าย 6N_16L ด้วยวิธี EPPSP	56
ตารางที่ 4.8	จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรโครงข่าย 6N_20L ด้วยวิธี MLR-FCR ตาม หัวข้อที่ 3.4.3	57
ตารางที่ 4.9	จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรโครงข่าย 6N_20L ด้วยวิธี EPPP	58
ตารางที่ 4.10	จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรโครงข่าย 6N_20L ด้วยวิธี EPPSP.....	58

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 สถาปัตยกรรมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์.....	1
รูปที่ 1.2 สถาปัตยกรรมสวิตช์ที่บแสง	3
รูปที่ 1.3 สถาปัตยกรรมสวิตช์โปร่งแสง.....	4
รูปที่ 2.1 รูปแบบการปกป้องโครงข่าย [3].....	11
รูปที่ 2.2 การปกป้องโครงข่ายแบบ protection [3].....	12
รูปที่ 3.1 โครงข่าย MLR [9]	16
รูปที่ 3.2 การเข้าถึงของแต่ละอัตราบิต [13].....	16
รูปที่ 3.3 โครงข่ายประกอบไปด้วย 6 โหนดและ 16 ข่ายเชื่อมโยง (ความยาวมีหน่วยเป็นกิโลเมตร)..	19
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการจัดสรรเส้นทาง การกำหนดอัตราบิตและการปกป้องโครงข่ายแบบ (ก-ข) MLR-MCR (ค-ง) MLR-MCR.....	21
รูปที่ 3.5 โครงข่ายที่นำมาทดสอบประกอบด้วย 6 โหนดและ 20 ข่ายเชื่อมโยง (ข่ายเชื่อมโยงมี ความยาวในหน่วยของกิโลเมตร)	32

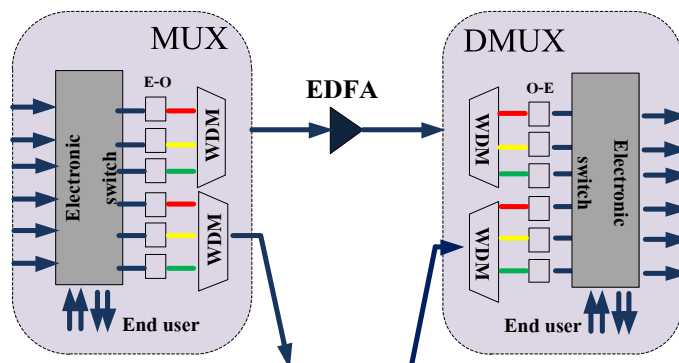
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากทุกวันนี้การสื่อสารโทรคมนาคมมีความต้องการใช้บริการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรับส่งข้อมูลจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับรองรับการใช้บริการดังกล่าว ประกอบกับมีเทคโนโลยีมากมายที่ถูกคิดค้นและปรับปรุงขึ้นสำหรับการส่งข้อมูลให้ได้ปริมาณมากหนึ่งในนั้นคือเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing) หรือเรียกสั้น ๆ ว่าเทคโนโลยี WDM ซึ่งทำหน้าที่มัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณลงไปในตัวกลางเดียวกันพร้อมกับได้รับประโยชน์จากการแบ่งช่องสัญญาณความยาวคลื่น โดยปกติแล้วในแต่ละช่องสัญญาณมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลอยู่ในระดับ Gb/s เมื่อนำเทคโนโลยี WDM มาใช้ในโครงข่ายจะทำให้ความสามารถในการรับส่งข้อมูลสูงถึง Tb/s ตัวกลางที่นำมาใช้ในการส่งข้อมูลคือเส้นใยแก้วนำแสง

โดยทั่วไปแล้วเทคโนโลยีเชิงแสงสำหรับโครงข่ายแกน (core network) ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุด (point-to-point transmission) การสวิตช์ทราฟฟิกยังคงเป็นประเด็นปัญหาที่น่าสนใจที่เกี่ยวข้องกับการใช้อุปกรณ์ภายในโครงข่าย โดยเริ่มจากสถาปัตยกรรมโนด (node architecture) ภายในโครงข่าย WDM ได้อธิบายไว้ในรูปที่ 1.1 เรียกว่าสถาปัตยกรรมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic switching architecture) การดำเนินงานพื้นฐานของสวิตช์ชนิดทางอิเล็กทรอนิกส์จาก [1] อธิบายได้ดังนี้

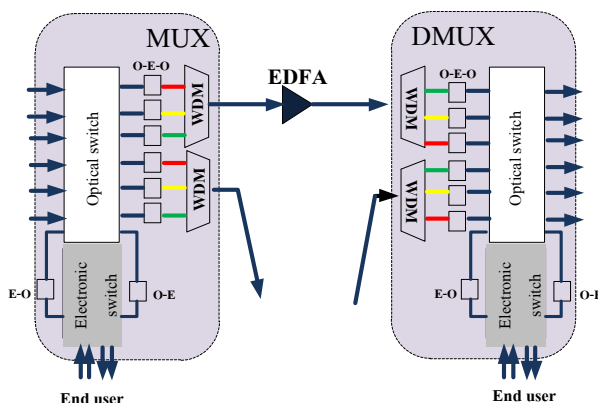


รูปที่ 1.1 สถาปัตยกรรมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

1. การเข้ามาของทราฟฟิกบนเส้นใยแก้วนำแสงขาเข้าถูกตีมัลติเพล็กซ์ลงบนช่องสัญญาณความยาวคลื่นโดยตัวตีมัลติเพล็กซ์เชิงแสง (demultiplexer: DMUX)
2. ทราฟฟิกในแต่ละช่องสัญญาณความยาวคลื่นถูกแปลงจากสัญญาณเชิงแสงไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยใช้ตัวแปลงสัญญาณ O-E (optical-to-electrical converter) และทำการเชื่อมต่อกับพอร์ตขาเข้าของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic switch)
3. ทราฟฟิกแต่ละพอร์ตขาออกจะถูกแปลงกลับจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณทางแสงโดยใช้ตัวแปลงสัญญาณ E-O (electrical-to-optical converter)
4. ช่องสัญญาณความยาวคลื่นขาออกที่ออกจากเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกมัลติเพล็กซ์โดยตัวมัลติเพล็กซ์เชิงแสง (multiplexer: MUX)
5. ทราฟฟิกของผู้ใช้บริการที่ต้องการเข้าหรือออกจากโครงข่ายจะเคลื่อนที่ผ่านทางพอร์ตสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

ปัญหาหลักของสถาปัตยกรรมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 1.1 คือเมื่อปริมาณทราฟฟิกเพิ่มขึ้น ความเร็วของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถทำงานได้ทันกับปริมาณทราฟฟิกที่เข้ามาได้ ความไม่มีประสิทธิภาพในการสวิตช์ของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดปัญหาคอขวดทางอิเล็กทรอนิกส์ (electronic bottleneck) หากโครงข่าย WDM มีขนาดเล็กหรือมีปริมาณทราฟฟิกค่อนข้างน้อยปัญหาของคอขวดทางอิเล็กทรอนิกส์อาจจะไม่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามในอนาคตการสื่อสารข้อมูลแบบจุดต่อจุดที่มีความต้องการปริมาณทราฟฟิกในจำนวนมากและในที่สุดปัญหาคอขวดทางอิเล็กทรอนิกส์กลายเป็นปัญหาใหญ่ได้

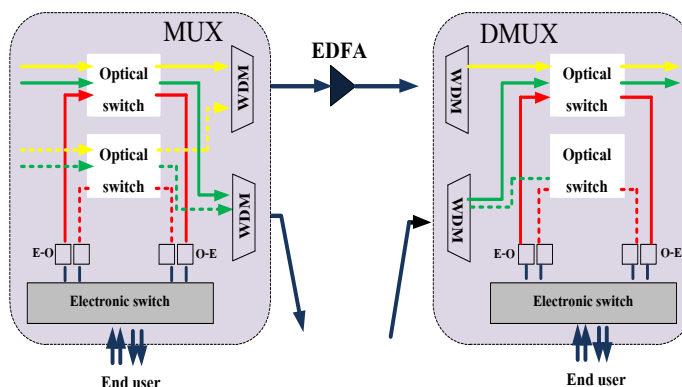
ในการแก้ปัญหาของคอขวดทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสวิตช์เชิงแสงได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.2 เรียกว่าสถาปัตยกรรมสวิตช์ทึบแสง (opaque optical switching architecture) สิ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับสถาปัตยกรรมนี้คือ การอนุญาตให้บางทราฟฟิกทะลุผ่านหรือบายพาส (bypass) การสวิตช์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ผลลัพธ์ที่ได้คือจำนวนความต้องการทรัพยากรการสวิตช์ทางอิเล็กทรอนิกส์ภายในโครงข่ายลดต่ำลงและจะลดเป็นอย่างมากสำหรับโหนดที่มีการบายพาสทราฟฟิกอยู่บ่อย ๆ ยกตัวอย่างเช่น โหนดสี่กลางระหว่าง 2 โครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น



รูปที่ 1.2 สถาปัตยกรรมสวิตช์ทึบแสง

หากนำมาเปรียบเทียบกับสถาปัตยกรรมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์พบว่า สถาปัตยกรรมสวิตช์ทึบแสงจะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า โดยเฉพาะการบายพาสทราฟฟิกที่โหนดสวิตช์จะไม่สามารถมัลติเพล็กซ์ 2 ทราฟฟิกบนช่องสัญญาณความยาวคลื่นขาเข้าที่แตกต่างกันไปยังช่องสัญญาณความยาวคลื่นขาออกที่เหมือนกันได้ ในทำนองเดียวกันกล่าวคือ สถาปัตยกรรมสวิตช์ทึบแสงจะไม่สามารถแยกทราฟฟิกบนช่องสัญญาณความยาวคลื่นขาเข้าไปยังช่องสัญญาณความยาวคลื่นขาออกที่ต่างกันได้ ดังนั้นเมื่อมีทราฟฟิกความยาวคลื่นย่อย (sub-wavelength traffic) เข้ามาที่โหนดสถาปัตยกรรมสวิตช์ทึบแสงจึงต้องการช่องสัญญาณความยาวคลื่นเพิ่มเนื่องจากไม่มีความสามารถในการมัลติเพล็กซ์ทราฟฟิกดังกล่าวได้

การบายพาสเชิงแสงจะสามารถประหยัดต้นทุนการสวิตช์ทางอิเล็กทรอนิกส์ แต่ก็มาพร้อมกับการเพิ่มต้นทุนเล็ก ๆ เนื่องจากจำนวนช่องสัญญาณความยาวคลื่นที่ใช้เพิ่มขึ้นมา หากพิจารณาถึงต้นทุนในการสวิตช์ของสถาปัตยกรรมสวิตช์ทึบแสงในรูปที่ 1.2 อันดับแรกสังเกตว่า ถ้าหากมีเส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมากสถาปัตยกรรมสวิตช์ทึบแสงจำเป็นต้องมีตัวแปลงสัญญาณ O-E-O จำนวนมากด้วยเช่นกันทำให้มีราคาสูง อีกทั้งผู้ออกแบบโครงข่ายจำเป็นต้องพิจารณาถึงต้นทุนของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์การสวิตช์ การบริโภคพลังงานของโครงข่าย ต้นทุนการดำเนินการและต้นทุนสำหรับซ่อมแซมอุปกรณ์ในโครงข่าย [2] เป็นต้น รูปที่ 1.3 แสดงถึงทางเลือกการเอาชนะปัญหาที่เกิดขึ้นกับสถาปัตยกรรมสวิตช์ทึบแสงเรียกว่าสถาปัตยกรรมสวิตช์โปร่งแสง (transparent optical switching architecture)



รูปที่ 1.3 สถาปัตยกรรมสวิตช์โปร่งแสง

การดำเนินการของสถาปัตยกรรมสวิตช์โปร่งแสงในรูปที่ 1.3 มีความแตกต่างจากสถาปัตยกรรมในรูปที่ 1.2 ได้กล่าวมาข้างต้น คือ

1. ทราฟฟิกบนแต่ละช่องสัญญาณความยาวคลื่นขาเข้าสามารถลอดผ่านหรือบายพาสสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์และยังคงอยู่ในรูปเชิงแสงจากพอร์ตขาเข้าจนถึงพอร์ตขาออกของโนดสวิตช์
2. ช่องสัญญาณจากเส้นใยแก้วนำแสงขาเข้าต่าง ๆ บนความยาวคลื่นเดียวกันเข้าสู่สวิตช์เชิงแสง (optical switch) ร่วมกันตามรูปที่ 1.3

สิ่งที่สำคัญที่สุดของสถาปัตยกรรมสวิตช์โปร่งแสงคือ การบายพาสทราฟฟิกทั้งขาเข้าและขาออกของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องมีความยาวคลื่นเดียวกัน จากข้อกำหนดนี้แสดงถึงข้อจำกัดการต่อเนื่องของความยาวคลื่น (wavelength continuity constraint)

เนื่องจากข้อจำกัดของชั้นกายภาพ (physical layer) ยกตัวอย่างเช่น ความอ่อนกำลังลง (attenuation) และการกระจายตัวของสัญญาณ (dispersion) อาจจะทำให้ไม่สามารถรองรับทราฟฟิกแบบจุดต่อจุดบนเส้นทางแสงทำงาน (working lightpath) เดียวกันได้เพราะสัญญาณที่ได้ทำการรับส่งข้อมูลอาจจะจำเป็นต้องทำการกำเนิดสัญญาณใหม่ในทางไฟฟ้าที่ใดที่หนึ่งตามเส้นทางรับส่งข้อมูลนั้น ระยะทางสูงสุดที่เส้นทางแสงทำงานสามารถส่งสัญญาณในรูปเชิงแสงและข้อมูลสามารถถูกตรวจจับได้อย่างถูกต้องที่เครื่องรับสัญญาณเรียกระยะทางในการส่งผ่านนี้ว่า ระยะการไปถึงเชิงแสง (optical reach)

ความน่าสนใจในคุณสมบัติของเส้นทางแสงทำงานคือ ความโปร่งแสง (transparent) ในตัวมันเอง ซึ่งหมายถึงเส้นทางแสงทำงานเดียวกันมีความสามารถในการรองรับอัตราบิตต่าง ๆ ได้ หาก

โครงข่ายต้องการเพิ่มขีดความสามารถในรับส่งข้อมูล เพียงแค่อัพเดตอัตราการส่งข้อมูลหรือรูปแบบการมอดูเลตชั้นที่อุปกรณ์ปลายทางของโครงข่าย อีกทั้งยังส่งผลต่อการลงทุนที่น้อยกว่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ การวางระบบของโครงข่ายใหม่ทั้งหมด

หากพิจารณากราฟฟิกภายในโครงข่ายในปัจจุบันพบว่ามีความต้องการกราฟฟิกมากขึ้น ประกอบกับความแตกต่างของการประยุกต์ใช้ (application) ยกตัวอย่างเช่น IPTV, VoD และ VoIP เป็นต้น มีความสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ที่ต้องการใช้สำหรับการรับส่งข้อมูลแตกต่างกัน ดังนั้นโครงข่ายรุ่นต่อไป (next generation network) จะได้รับประโยชน์เป็นอย่างมากถ้าหากโครงข่ายมีความสามารถในการรองรับอัตราสายผสม (mixed line rate) หรือเรียกสั้น ๆ ว่าโครงข่าย MLR ซึ่งภายในเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย MLR จะประกอบไปด้วยอัตราบิต 10, 40 และ 100 Gb/s ใช้สำหรับการรับส่งกราฟฟิก การที่โครงข่ายสามารถรับส่งกราฟฟิกที่หลายอัตราบิตนั้นส่งผลต่อการจัดสรรทรัพยากรของโครงข่ายที่ให้ความยืดหยุ่นเป็นอย่างมาก

การที่บางส่วนของโครงข่ายได้รับความล้มเหลวไม่ว่าจะเป็นโนดหรือข่ายเชื่อมโยงใด ๆ บนโครงข่ายทำให้ข้อมูลที่ส่งผ่านภายในโครงข่ายเกิดความเสียหายขึ้นและส่งผลกระทบต่อผู้ใช้บริการเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการออกแบบโครงข่าย WDM จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงความล้มเหลวที่เกิดขึ้นภายในโครงข่าย สำหรับการท้าวินยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการออกแบบโครงข่ายโปร่งแสงที่ข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายมีความสามารถรองรับการมิกซ์ (mix) อัตราบิตพร้อมกับการนำเสนอวิธีการปกป้องความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยง และจะศึกษาเฉพาะกรณีที่ความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดี่ยว (single link failure) เกิดขึ้นเท่านั้นเท่านั้น โดยที่ขั้นตอนการออกแบบจะทำการค้นหาเส้นทางแสงทำงานก่อนจากนั้นทำการกำหนดอัตราบิตและปกป้องโครงข่ายภายหลังพร้อมกัน

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและการกำหนดอัตราบิตที่เหมาะสมเพื่อการปกป้องโครงข่าย WDM ในสถานะที่มีความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวเกิดขึ้น วิธีการปกป้องโครงข่ายที่พัฒนาขึ้นนี้อิงตามวิธีการ p-cycle แบบดั้งเดิมให้มีประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรโครงข่ายให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงประโยชน์ของการปกป้องแบบอัตราบิตของไซเคิลผสมเมื่อเปรียบเทียบกับ การปกป้องแบบอัตราบิตของไซเคิลคงที่

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ที่ใช้ integer linear programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนและทรัพยากรที่ใช้ในการจัดสรร การกำหนดอัตราบิดและการปกป้องโครงข่ายทั้งหมดซึ่งประกอบไปด้วย ต้นทุนดำเนินการจากทรานสพอนเดอร์กำหนดไว้เป็นต้นทุนปฐมภูมิและจำนวนไซเคิลที่ถูกใช้สำหรับการปกป้องกำหนดไว้เป็นต้นทุนทุติยภูมิทั้งในแบบ MLR-FCR และ MLR-MCR
2. เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ extended p-cycle ทั้งในแบบปกป้องเส้นทางหรือส่วนประกอบเส้นทาง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนและทรัพยากรที่ใช้ในการจัดสรร การกำหนดอัตราบิดและการปกป้องโครงข่ายทั้งหมดซึ่งประกอบไปด้วย ต้นทุนดำเนินการจากทรานสพอนเดอร์กำหนดไว้เป็นต้นทุนปฐมภูมิและจำนวนไซเคิลที่ถูกใช้สำหรับการปกป้องกำหนดไว้เป็นต้นทุนทุติยภูมิ
3. ศึกษาผลดีและผลเสียของการปกป้องโครงข่ายในแต่ละวิธีที่ได้ทำการศึกษา

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

1. ศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 1.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี WDM
 - 1.2 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับโครงข่าย MLR
 - 1.3 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบจัดสรรเส้นทางและการกำหนดอัตราบิดของโครงข่าย MLR
 - 1.4 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการปกป้องโครงข่ายแบบ p-cycle สำหรับกรณีที่มีความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดียวเกิดขึ้น
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาต้นทุนและทรัพยากรที่ใช้ในการจัดสรรโครงข่ายสำหรับการจัดสรรเส้นทาง การกำหนดอัตราบิดและการปกป้องโครงข่ายในกรณีที่ความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดียวเกิดขึ้น
 - 2.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาต้นทุนของโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทาง การกำหนดอัตราบิดและการปกป้องโครงข่ายทั้งแบบวิธี MLR-FCR และ MLR-MCR

โดยนำ p-cycle มาใช้สำหรับการปกป้องและวิธีการปกป้องเส้นทางหรือส่วนประกอบ
เส้นทางโดยนำ extended p-cycle มาใช้สำหรับการปกป้อง

2.2 ทดสอบผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อที่ 2.1 ว่าถูกต้องอย่างน้อยเพียงใด

2.3 นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำการทดสอบกับกราฟฟิกและโครงข่ายในหลายๆ
รูปแบบเพื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยนำผลของการทดลองในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบต้นทุน
และจำนวนทรัพยากรที่ใช้ในการจัดสรรโครงข่ายมีความแตกต่างกันมากเพียงใด
4. รวบรวมและสรุปผลการวิจัยเพื่อทำการเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาต้นทุนและทรัพยากรที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทาง
กำหนดอัตราบิดและปกป้องโครงข่าย MLR ในกรณีที่ความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดียว
เกิดขึ้น
2. ทำให้ทราบถึงประโยชน์ในการออกแบบโครงข่าย MLR ที่สามารถลดต้นทุนและใช้ทรัพยากร
ในการจัดสรรโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. ทำให้ทราบถึงประโยชน์ของ p-cycle ในการปกป้องโครงข่ายที่ไม่เพียงแต่มีความเร็วในการ
สวิตช์ไปยังเส้นทางสำรองแต่ยังสามารถลดจำนวนความจุที่ต้องการสำหรับการปกป้องอีก
ด้วย
4. ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดและความสามารถของ extended p-cycle สำหรับการปกป้อง
โครงข่ายมีอย่างน้อยเพียงใด
5. ทำให้ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของโครงข่ายเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ p-cycle
และ extended p-cycle มีประสิทธิภาพในการปกป้องโครงข่ายสูงขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาการจัดสรรเส้นทาง

ในระบบสื่อสารโทรคมนาคมสามารถแบ่งประเภทของทราฟฟิกออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1. ทราฟฟิกแบบพลวัต (Dynamic-traffic) หมายถึง รูปแบบการเชื่อมต่อและปริมาณความต้องการทราฟฟิกสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาโดยที่ไม่อาจทราบล่วงหน้าได้
2. ทราฟฟิกแบบสถิต (Static-traffic) หมายถึง รูปแบบการเชื่อมต่อและปริมาณความต้องการทราฟฟิกมีการกำหนดไว้ล่วงหน้าและมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

ในกรณีทราฟฟิกแบบพลวัตมีวัตถุประสงค์ของการจัดเส้นทางมุ่งเน้นถึงความสามารถเชื่อมต่อทราฟฟิกให้ได้ปริมาณมากที่สุด หรือมีความน่าจะเป็นในการบล็อกต่ำที่สุด ส่วนในกรณีของทราฟฟิกแบบสถิต วัตถุประสงค์ของการจัดสรรเส้นทางต้องการให้ระบบสามารถรองรับทราฟฟิกที่กำหนดเอาไว้ล่วงหน้าโดยใช้ทรัพยากรของโครงข่ายให้น้อยที่สุด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะสนใจเฉพาะกรณีทราฟฟิกแบบสถิตเท่านั้นสำหรับเป็นข้อกำหนดในการจัดสรรเส้นทาง โดยใช้โปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มในการแก้ไขปัญหาเพื่อให้ผลเฉลยหรือเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด การจัดสรรเส้นทางของโครงข่ายด้วยโปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มมีได้ 2 แนวทางดังนี้คือ

1. การจัดสรรเส้นทางพิจารณาจากการไหลเข้าและออกในแต่ละโหนดผ่านข่ายเชื่อมต่อใด ๆ ต้องมีความสมดุลกัน ณ โหนดสื่อกลาง โดยโหนดสื่อกลางทำหน้าที่ในการรับและส่งทราฟฟิกเท่านั้น ถ้าผลต่างของผลรวมของทราฟฟิกขาเข้ากับผลรวมของทราฟฟิกขาออกในแต่ละข่ายเชื่อมต่อใด ๆ ของโหนดที่ทำการพิจารณามีค่าเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่กำหนดไว้ก็ต่อเมื่อโหนดที่นำมาพิจารณาเป็นโหนดต้นทางหรือโหนดปลายทาง สังเกตว่าการจัดสรรเส้นทางตามการไหลของ ทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมต่อนี้จะทำการพิจารณาทุกข่ายเชื่อมต่อและทุกโหนดบนโครงข่ายเพื่อค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณค่อนข้างสูง วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบนี้จึงเหมาะสมกับโครงข่ายขนาดเล็ก แต่ถ้านำมาพิจารณากับโครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีโหนดและข่ายเชื่อมต่อจำนวนมาก การจัดสรรด้วยวิธีนี้จะไม่สามารถทำการหาเส้นทางที่เหมาะสมภายในเวลาที่กำหนดได้ การจัดสรรเส้นทางตามการไหลของท

ราฟฟิกผ่านข่ายเชื่อมโยงนี้เรียกว่า การจัดสรรเส้นทางตามข่ายเชื่อมโยง (link-based routing)

2. จากปัญหาของวิธีการจัดสรรเส้นทางตามข่ายเชื่อมโยงจะไม่สามารถหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้ วิธีการหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาและลดเวลาในการจัดสรรเส้นทางของโครงข่ายดังกล่าวคือ การคำนวณหาจำนวนเส้นทางแคนดิเดตของคุโนดใด ๆ ขึ้นมาก่อน หลังจากนั้นใช้โปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มทำการกำหนดการไหลของทราฟฟิกลงไปในเส้นทางแคนดิเดตที่มีความเหมาะสมกับความต้องการทราฟฟิกของคุโนดนั้นเพื่อใช้เป็นเส้นทางสำหรับการรับส่งข้อมูล การจัดสรรเส้นทางตามการไหลของทราฟฟิกบนเส้นทางแคนดิเดตนี้เรียกว่า วิธีการจัดสรรเส้นทางตามวิถี (path-based routing) สำหรับการหาจำนวนเส้นทางแคนดิเดตที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจำนวน k เส้นทาง (k-shortest path algorithm [15]) สังเกตว่าผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการจัดสรรเส้นทางตามวิถีนี้เป็นเส้นทางที่มีระยะทางสั้น แต่บางครั้งเส้นทางดังกล่าวอาจจะไม่ใช่เส้นทางที่เหมาะสมที่สุดก็เป็นได้ ดังนั้นขั้นตอนที่ควรระวังที่สุดสำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางตามวิถีคือ การกำหนดจำนวนเส้นทางแคนดิเดตที่ต้องนำมาพิจารณาให้มีความเหมาะสมกับโครงข่าย

จากประเด็นปัญหาของการจัดสรรเส้นทางที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ต้องทำการจัดสรรเส้นทางและกำหนดอัตราบิตสำหรับการปกป้องโครงข่ายด้วยโปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม ถ้าหากทำการจัดสรรเส้นทางตามข่ายเชื่อมโยงในแบบกรณีทีหนึ่ง ถึงแม้โครงข่ายจะมีขนาดเล็กก็ตามอาจจะไม่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมในเวลาจำกัดได้ เพราะมีจำนวนตัวแปรที่มากเกินไป ดังนั้นสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางตามวิถีเพื่อสามารถทำการค้นหาคำตอบที่เป็นไปได้ในช่วงเวลาที่จำกัด

2.2 การฟื้นฟูจากความล้มเหลวของโครงข่าย

เนื่องจากระบบโครงข่าย WDM มีความจุหรือความเร็วในการรับส่งข้อมูลจำนวนมาก หากมีความเสียหายเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในโครงข่ายเพียงบางส่วน เช่น เกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยง (link failure) หรือเกิดความเสียหายที่โนด (node failure) ข้อมูลที่ส่งผ่านอุปกรณ์ดังกล่าวย่อมเกิดการสูญหายเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการออกแบบระบบการปกป้องโครงข่ายที่มีความสามารถจัดการกับความเสียหายจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการปกป้องโครงข่ายเฉพาะกับความเสียหายบางประเภท ซึ่งในที่นี้จะสนใจเฉพาะความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวที่

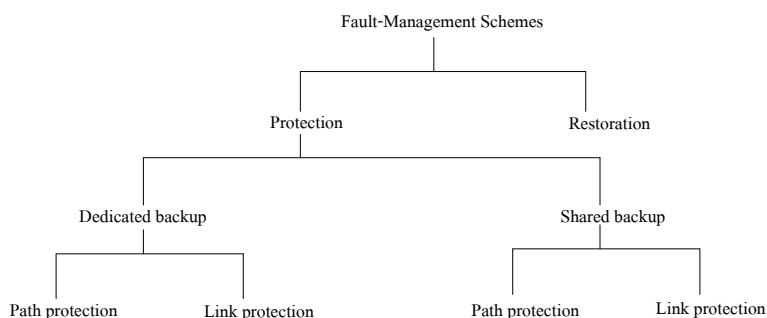
เกิดขึ้นเท่านั้น หากไม่ต้องการให้การสื่อสารของผู้ใช้บริการเกิดการหยุดชะงักลง ระบบจะต้องเตรียมทรัพยากรสำรองไว้รองรับกราฟฟิกสำหรับข่ายเชื่อมโยงที่ถูกรบกวนเป็นเวลาชั่วคราวพร้อมกับใช้เวลาในการกู้คืนระบบได้อย่างรวดเร็วจนกว่าการซ่อมแซมส่วนที่เสียหายของระบบจะเสร็จสิ้นลง

2.2.1 การจัดสรรเส้นทางสำรอง

เมื่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายได้รับความเสียหายช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงนั้นจะได้รับความเสียหายทั้งหมดจนไม่สามารถทำการรับส่งข้อมูลได้ ระบบจัดการสำหรับข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความเสียหายจึงมีหน้าที่ทำการค้นหาเส้นทางใหม่สำหรับการส่งข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางที่ประกอบไปด้วยข่ายเชื่อมโยงเหล่านั้น เส้นทางที่ได้จากการจัดสรรใหม่นี้เรียกว่าเส้นทางสำรอง ดังนั้นหากระบบโครงข่ายใดมีการใช้เส้นทางสำรองสำหรับการแก้ปัญหาความเสียหายนี้จึงมีความต้องการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นให้กับโครงข่าย โดยเส้นใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้นมานั้นเรียกว่าเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง (spare fiber) ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนในการออกแบบของโครงข่าย สำหรับแนวทางในการเลือกเส้นทางใหม่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามรูปที่ 2.1 ดังนี้ [3]

การปกป้องโครงข่ายแบบ protection หมายถึง การปกป้องโครงข่ายที่ทรัพยากรสำรองได้รับการคำนวณและถูกจัดสรรก่อนที่จะมีความเสียหายเกิดขึ้น โดยทรัพยากรสำรองอาจถูกกำหนดโดยเฉพาะ (dedicated) หรือใช้ร่วมกัน (shared) กับการเชื่อมต่ออื่นหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่กำหนดไว้

การปกป้องโครงข่ายแบบ restoration หมายถึง การปกป้องโครงข่ายที่ทรัพยากรสำรองได้รับการคำนวณและถูกจัดสรรหลังจากที่มีความเสียหายเกิดขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการปกป้องโครงข่ายแบบ restoration มีประสิทธิภาพในการใช้ความจุและให้ความยืดหยุ่นต่อชนิดของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นมากกว่า protection แต่ในขณะเดียวกันเมื่อมีความล้มเหลวเกิดขึ้น การปกป้องโครงข่ายแบบ protection ใช้เวลาการกู้คืน (recovery time) ระบบภายในโครงข่ายได้รวดเร็วกว่าการปกป้องแบบ restoration เมื่อพิจารณาถึงความเร็วในการปกป้องโครงข่ายแล้วพบว่า ถ้าหากต้องการใช้เวลาสำหรับการปกป้องโครงข่ายนานจะส่งผลต่อความเสียหายของข้อมูลเป็นจำนวนมาก ดังนั้นสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในที่นี้จะสนใจเฉพาะวิธีการปกป้องโครงข่ายแบบ protection เท่านั้น จากรูปที่ 2.1 แสดงถึงประเภทการปกป้องโครงข่ายเมื่อมีความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดียวเกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 รูปแบบการปกป้องโครงข่าย [3]

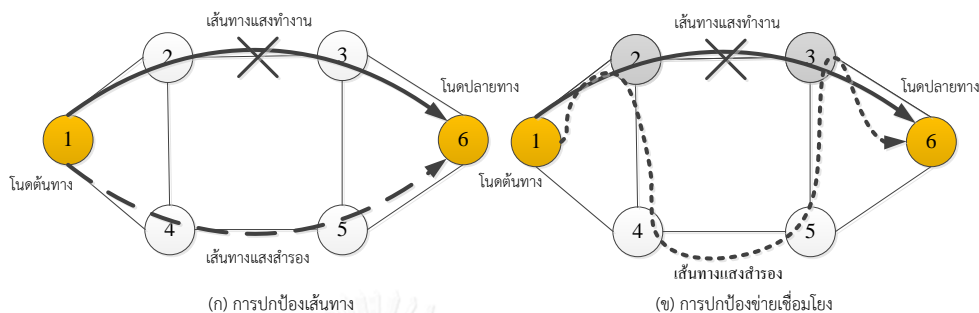
การปกป้องเส้นทาง (path protection) คือกรณีที่ความต้องการของทราฟฟิกซึ่งเคยอยู่บนข่ายเชื่อมโยงที่ขาด จะได้รับการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งหมดตั้งแต่โหนดต้นทางจนถึงโหนดปลายทาง สามารถแบ่งเป็นออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. การปกป้องเส้นทางเฉพาะ (dedicated-path protection) หมายถึง ทรัพยากรสำรองจะถูกจองไว้กับการเชื่อมต่อเท่านั้นและไม่สามารถทำการแชร์เส้นทางสำรองร่วมกับการเชื่อมต่ออื่น ๆ ได้
2. การปกป้องเส้นทางที่ใช้ร่วมกัน (shared-path protection) หมายถึง ทรัพยากรสำรองสามารถใช้เส้นทางสำรองร่วมกับการเชื่อมต่ออื่น ๆ ได้ ดังนั้นการปกป้องเส้นทางที่ใช้ร่วมกันจึงมีประสิทธิภาพในการใช้ความจุ (capacity) มากกว่าหากนำมาเปรียบเทียบกับ การปกป้องเส้นทางเฉพาะ

การปกป้องข่ายเชื่อมโยง (Link protection) คือกรณีที่ความต้องการทราฟฟิกซึ่งเคยอยู่บนข่ายเชื่อมโยงที่ขาดจะได้รับการจัดสรรเส้นทางใหม่โดย 2 โหนดปลายของข่ายเชื่อมโยงนั้น จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีทราฟฟิกซึ่งเคยอยู่บนข่ายเชื่อมโยงที่ขาด โหนดปลายทั้ง 2 ของข่ายเชื่อมโยงจะทำการจัดสรรเส้นทางใหม่รอบ ๆ ข่ายเชื่อมโยงนั้นโดยที่โหนดต้นทางและโหนดปลายทางไม่จำเป็นต้องรับรู้ถึงความเสียหายที่เกิดขึ้น สามารถแบ่งเป็นออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. การปกป้องข่ายเชื่อมโยงเฉพาะ (dedicated-link protection) หมายถึงทรัพยากรสำรองได้ถูกจองไว้รอบ ๆ ข่ายเชื่อมโยงที่ขาดและไม่สามารถทำการใช้เส้นทางสำรองร่วมกับการเชื่อมต่ออื่น ๆ ได้ ดังนั้นการปกป้องข่ายเชื่อมโยงเฉพาะจึงไม่มีประสิทธิภาพในการใช้ความจุ ซึ่งในการทำวิจัยนี้จะไม่พิจารณาในกรณีของการปกป้องข่ายเชื่อมโยงเฉพาะ

2. การปกป้องข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ร่วมกัน (shared-link protection) หมายถึงทรัพยากรสำรองสามารถใช้เส้นทางสำรองรอบ ๆ ข่ายเชื่อมโยงที่ขาดร่วมกับการเชื่อมต่ออื่นได้ ดังนั้นการปกป้องข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ร่วมกันจึงมีประสิทธิภาพในการใช้ความจุมากกว่าหากเปรียบเทียบกับ การปกป้องข่ายเชื่อมโยงเฉพาะ



รูปที่ 2.2 การปกป้องโครงข่ายแบบ protection [3]

พิจารณารูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างแสดงถึงความแตกต่างระหว่างการปกป้องเส้นทางและการปกป้องข่ายเชื่อมโยง ในสภาวะปกติช่องสัญญาณใช้เส้นทางผ่านโหนด 1-2-3-6 สำหรับการส่งข้อมูลจากโหนด 1 ไปยังโหนด 6 เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด 2 และ 3 ขาดหากใช้การปกป้องเส้นทางจะได้เส้นทางสำรองคือ 1-4-5-6 ส่วนการปกป้องข่ายเชื่อมโยงจะได้เส้นทางสำรองผ่านโหนด 1-2-4-5-3-6 ซึ่งเป็นเส้นทางที่ยาวกว่า จากตัวอย่างจะเห็นว่า การปกป้องเส้นทางมีความยืดหยุ่นในการเลือกเส้นทางมากกว่าและมีแนวโน้มว่าจะสามารถหาเส้นทางที่เหมาะสมกว่าการปกป้องข่ายเชื่อมโยง ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบในเชิงต้นทุนที่ใช้ในการวางระบบเกี่ยวกับปัญหาข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวขาดพบว่า การปกป้องเส้นทางมีประสิทธิภาพมากกว่าการปกป้องข่ายเชื่อมโยง แต่ถ้าหากพิจารณาในแง่ของความเร็วที่ใช้ในการกู้คืนระบบพบว่า ทันทีที่ข่ายเชื่อมโยงขาดโหนดปลายของข่ายเชื่อมโยงนั้นจะแก้ไขปัญหาดังกล่าวเองโดยใช้เส้นทางสำรองที่อยู่รอบโหนดปลายทั้งสอง โดยที่โหนดต้นทางและโหนดปลายทางไม่จำเป็นต้องรับรู้ถึงความเสียหายที่เกิดขึ้น ดังนั้นการแก้ไขปัญหาของการปกป้องข่ายเชื่อมโยงจึงสามารถกู้คืนระบบได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณข้อมูลที่สูญหายในระหว่างการสวิตช์ไปใช้เส้นทางสำรอง จากข้อดีของการปกป้องข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวนี้จึงเกิดแนวคิดการปกป้องข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ร่วมกันที่ไม่เพียงแต่ใช้เวลาในการกู้คืนระบบได้อย่างรวดเร็วแล้วยังมีประสิทธิภาพในการปกป้องสูงอีกด้วยซึ่งอยู่ในหัวข้อถัดไป

2.2.2 การปกป้องข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ร่วมกันแบบวงแหวนและ p-cycle

ในส่วนนี้จะพิจารณาถึงการปกป้องข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ร่วมกัน วิธีการหนึ่งที่พบบ่อยและใช้สำหรับการปกป้องโครงข่ายเมื่อมีความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวเกิดขึ้นคือ การครอบคลุมด้วยวงแหวน (ring recover) บนข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายโดยใช้วงแหวนหลายวง (multiple ring) สำหรับการปกป้อง การปกป้องแบบวงแหวนมีข้อกำหนดไว้ดังนี้คือ หากนำวงแหวนแบบมีทิศทางใช้สำหรับการปกป้องโครงข่ายแล้ว วงแหวนจะให้เส้นทางสำรองในทิศทางตรงข้ามกับข่ายเชื่อมโยงที่ขาดสำหรับเส้นทางแสงทำงานที่อยู่บนวงแหวนนั้น เมื่อมีความล้มเหลวเกิดขึ้นบนข่ายเชื่อมโยงโนดปลายทั้ง 2 ของข่ายเชื่อมโยงนั้นจะสวิตช์การเชื่อมต่อไปยังเส้นทางสำรองของวงแหวนที่ได้เตรียมเอาไว้ก่อนหน้านี้ โดยที่โนดอื่น ๆ ภายในโครงข่ายไม่จำเป็นต้องรับรู้ถึงความล้มเหลวที่เกิดขึ้น ผลคือความสามารถในการกู้คืนระบบได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการปกป้องแบบวงแหวนจะสามารถปกป้องได้เพียงข่ายเชื่อมโยงที่อยู่บนวงแหวนได้เท่านั้น ทำให้ความต้องการความจุสำรองหรือจำนวนวงแหวนที่ใช้สำหรับการปกป้องมีค่อนข้างสูง

การปรับปรุงความสามารถในด้านความจุและความสามารถในการปกป้องของวงแหวนอยู่ในรูปแบบของไซเคิลที่ทำการกำหนดไว้ล่วงหน้า (pre-configured cycle) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า p-cycle และถูกนำเสนอโดย [4] p-cycle คือ วงแหวนหรือไซเคิลแบบมีทิศทางมีความสามารถปกป้องไม่เพียงแต่ข่ายเชื่อมโยงที่อยู่บนไซเคิล (on-cycle) เท่านั้นแต่ยังมีความสามารถปกป้องข่ายเชื่อมโยงที่ไม่ได้อยู่บนไซเคิลแต่มี 2 โหนดปลายอยู่บนไซเคิลได้อีกด้วย โดยข่ายเชื่อมโยงแบบหลังนี้เรียกว่า straddling link หากมีความล้มเหลวเกิดขึ้นบน straddling link ไซเคิลดังกล่าวจะให้เส้นทางสำหรับการปกป้องมากถึง 2 เส้นทางโดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มความจุสำรองลงไปในระบบเลย ด้วยเหตุนี้ p-cycle จึงเป็นวิธีการปกป้องโครงข่ายที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งซึ่งแตกต่างจากการครอบคลุมด้วยวงแหวนที่สามารถปกป้องได้เพียงเส้นทางเดียวเท่านั้นบนวงแหวนเท่านั้น ตารางที่ 2.1 สรุปคุณลักษณะการปกป้องโครงข่ายด้วย p-cycle และวงแหวนดัง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบวิธีการปกป้องโครงข่ายระหว่าง p-cycle และวงแหวน

คุณลักษณะ	p-cycle	วงแหวน
จำนวนเส้นทางที่ใช้สำหรับการปกป้อง	ให้จำนวนเส้นทางปกป้องสูงถึง 2 เส้นทางต่อการใช้ 1 ไซเคิล	ให้จำนวนเส้นทางปกป้อง 1 เส้นทางต่อการใช้ 1 ไซเคิล
ประสิทธิภาพของการปกป้อง	สามารถปกป้องได้ทั้ง on-cycle และ straddling link	สามารถปกป้องได้เพียง on-cycle เท่านั้น
ความสิ้นเปลืองของโครงข่าย	น้อยกว่า 100%	เกิน 100-300%

ด้วยข้อดีและความสามารถในการปกป้องโครงข่ายแบบ p-cycle นี้จึงเกิดแรงบันดาลใจในการทำวิทยานิพนธ์สำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR ด้วย p-cycle รายละเอียดได้แสดงไว้อยู่ในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



บทที่ 3

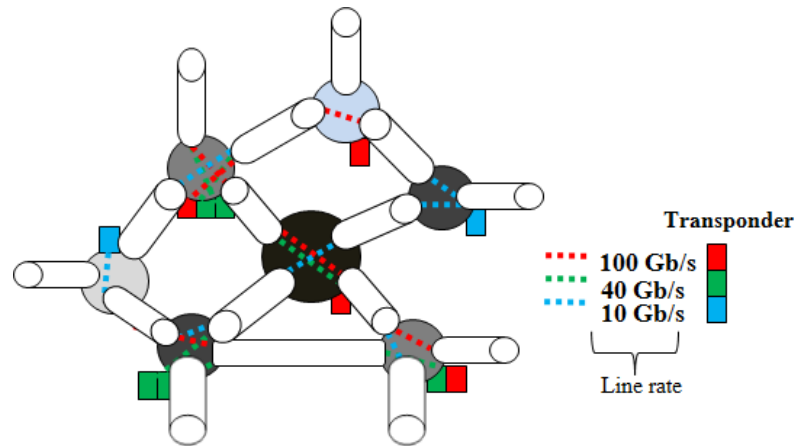
การปกป้องโครงข่ายอัตราสายผสมแบบใช้ p-cycle ร่วมกัน

3.1 บทนำ

เมื่อขีดความสามารถการส่งข้อมูลในระดับโครงข่ายแกน (core network) ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อรองรับความต้องการการทราฟฟิก ในขณะเดียวกันทางภาคอุตสาหกรรมมีความต้องการเพิ่มความจุและยกระดับขีดความสามารถในการรับส่งข้อมูลให้สูงขึ้น (ซึ่งในปัจจุบันนี้ใช้อัตราบิตสำหรับการรับส่งข้อมูลอยู่เพียงแค่ 10 Gb/s เท่านั้น) การมิกซ์ (mix) อัตราบิตในการรับส่งข้อมูลจากเดิม 10 Gb/s ไปเป็น 40 Gb/s (และอาจจะสูงถึง 100 Gb/s ในอนาคต) ทำให้เกิดปัญหาที่ต้องนำมาพิจารณามากมาย เช่น ความคงทนของช่องสัญญาณความเร็วสูงเป็นผลมาจาก chromatic dispersion (CD) และ polarization-mode dispersion (PMD) ต้องคล้ายคลึงกับช่องสัญญาณ 10 Gb/s หรือผลจาก nonlinear crosstalk ของสัญญาณเหล่านั้นจำเป็นต้องได้รับการจัดการ [5] เป็นต้น แต่เมื่อพิจารณาข้อดีในการมิกซ์อัตราบิตสำหรับการรับส่งข้อมูลแล้วพบว่า นอกจากจะได้รับปริมาณข้อมูลที่มากขึ้นแล้วยังส่งผลต่อการใช้ต้นทุนในการจัดสรรทรัพยากรของโครงข่ายสำหรับการวางระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย โดยรับประโยชน์จากทรานสปอนเดอร์ (ทรานสปอนเดอร์คือคู่ของตัวรับ-ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณเชิงแสง) ที่อัตราบิต 40 และ 100 Gb/s พร้อมกับความสามารถทางเทคโนโลยีเชิงแสงที่สามารถจัดการกับปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้ ทำให้โครงข่ายประกอบไปด้วยหลายอัตราบิตและเรียกโครงข่ายแบบนี้ว่า โครงข่ายอัตราสายผสม (mixed line rate) หรือเรียกสั้น ๆ ว่าโครงข่าย MLR รูปที่ 3.1 แสดงถึงตัวอย่างของโครงข่ายที่มีความสามารถรองรับอัตราบิตที่ 10, 40 และ 100 Gb/s บนเส้นใยแก้วนำแสง หากต้องการจัดสรรเส้นทางพร้อมกับการกำหนดอัตราบิตที่ใช้ในการส่งทราฟฟิกตามความต้องการของคู่โหนดใด ๆ ได้กลายเป็นประเด็นปัญหาที่ต้องนำมาพิจารณาซึ่งเรียกปัญหาดังกล่าวนี้ว่า ปัญหาการจัดสรรเส้นทางและการกำหนดอัตราบิต (routing and rate assignment problem: RRA) ให้กับโครงข่าย

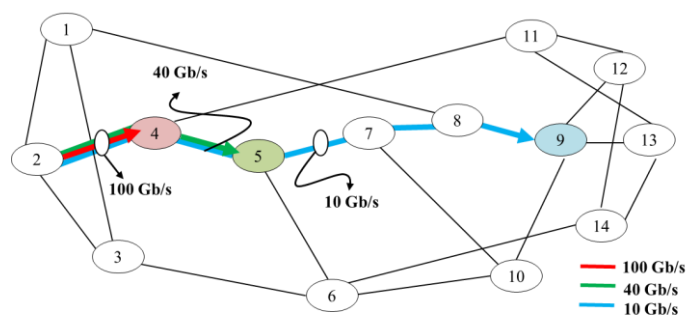
อัตราบิตสูงเป็นสิ่งที่พึงประสงค์เนื่องจากสามารถนำพาทราฟฟิกได้เป็นจำนวนมาก แต่การด้อยค่าของสัญญาณ (signal impairment) ได้จำกัดระยะทางการเคลื่อนที่ของสัญญาณเชิงแสง (ปราศจากการกำเนิดสัญญาณใหม่) ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 3.2 ถ้าหากพิจารณาโครงข่ายที่ใช้อัตราสายเดี่ยว (single line rate) หรือโครงข่าย SLR สำหรับทรานสปอนเดอร์ที่อัตราบิต 10 Gb/s โดยที่เส้นทางแสงทำงานออกจากโหนด 2 และสิ้นสุดที่โหนด 9 เพียงแค่ต้องการขยายสัญญาณเชิงแสงไปตามเส้นทางเคลื่อนที่ของเส้นทางแสงทำงานเท่านั้น โครงข่าย SLR สำหรับทรานสปอนเดอร์ 40 Gb/s

พบว่าเส้นทางแสงทำงานถึงแคโนต 5 และโครงข่าย SLR สำหรับทรานสปอนเดอร์ 100 Gb/s พบว่าเส้นทางแสงทำงานถึงแคโนต 4 เท่านั้น [6] หรืออาจจะกล่าวได้ว่าความจุของช่องสัญญาณ (channel capacity) ที่เพิ่มจาก 10 Gb/s เป็น 40 หรือ 100 Gb/s ได้แสดงถึงข้อแลกเปลี่ยนระหว่างความจุและระยะการส่งผ่าน (transmission reach) สำหรับโครงข่าย MLR ที่ไม่ได้รับการปกป้องได้อธิบายไว้ใน [7-12]



รูปที่ 3.1 โครงข่าย MLR [9]

อย่างไรก็ตามความอยู่รอดของโครงข่ายเป็นกุญแจสำคัญสำหรับการออกแบบโครงข่าย MLR และยังคงเป็นหัวข้อในงานวิจัยที่ได้เริ่มทำการศึกษามากขึ้น อีกทั้งยังเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่าการปกป้องโครงข่ายเชิงแสงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเส้นใยแก้วนำแสงขาดสามารถทำให้นำไปสู่ความล้มเหลวของเส้นทางแสงทำงานจำนวนมาก ปัญหานี้จะกลายเป็นปัญหาที่ใหญ่มากหากเส้นทางแสงทำงานมีอัตราบิตอยู่ที่ 40/100 Gb/s เอกสาร [13] ได้กล่าวถึงการจัดสรรหลายเส้นทาง (multiple routing) ที่นำมาประยุกต์ใช้กับข้อกำหนดสำหรับการปกป้องโครงข่าย และการปกป้องเฉพาะแบบใช้ p-cycle สำหรับการปกป้องโครงข่ายถูกเสนอไว้ในเอกสาร [14]



รูปที่ 3.2 การเข้าถึงของแต่ละอัตราบิต [13]

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการจัดสรรเส้นทางและกำหนดอัตราบิตพร้อมกับทำการปกป้องโครงข่าย MLR แบบใช้ p-cycle ร่วมกันที่ถูกจำกัดโดยระยะการส่งผ่านโดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ ต้นทุนสำหรับการออกแบบโครงข่าย MLR ต้องมีค่าน้อยที่สุดโดยประกอบไปด้วยต้นทุนการดำเนินการของทรานสปอนเดอร์ กำหนดไว้เป็นต้นทุนปฐมภูมิและต้นทุนการดำเนินการของ p-cycle กำหนดไว้เป็นต้นทุนทุติยภูมิ วิธีที่ได้นำเสนอสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การออกแบบโครงข่าย MLR ที่ได้รับการปกป้องแบบอัตราบิตของไซเคิลคงที่ (fixed cycle rate: FCR) การออกแบบโครงข่าย MLR ที่ได้รับการปกป้องแบบอัตราบิตของไซเคิลผสม (mixed cycle rate: MCR)

ส่วนที่เหลือของบทนี้จะประกอบไปด้วยหัวข้อที่ 3.2 คือความสำคัญและที่มาของปัญหา ในหัวข้อที่ 3.3 บรรยายถึงวิธีที่นำเสนอสำหรับการออกแบบโครงข่าย MLR ที่ได้รับการปกป้องแบบ FCR และ MCR ต่อมาการคำนวณ 2 ขั้นตอน (2-step approach) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 3.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์และสรุปผลการทดลองจาก 2 วิธีที่ได้นำเสนอจะอยู่ในหัวข้อที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ

3.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ก่อนจะกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการแก้ปัญหาจำเป็นต้องทำการป้อนข้อมูลขาเข้า (input) ดังต่อไปนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของโครงข่ายประกอบไปด้วยโหนดและข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด
2. จำนวนช่องสัญญาณความยาวคลื่นที่สามารถรองรับได้
3. อัตราบิตที่ 10/40/100 Gb/s
4. ต้นทุนของทรานสปอนเดอร์สำหรับแต่ละอัตราบิต
5. ความต้องการของทราฟฟิกในที่นี่จะแสดงอยู่ในรูปของเมทริกซ์ทราฟฟิก
6. แต่ละข่ายเชื่อมโยงที่ใช้สำหรับการรับส่งทราฟฟิกมีทิศทางและสามารถเกิดความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวเท่านั้น
7. อัตราบิตในการส่งผ่านได้ถูกกำหนดโดยทรานสปอนเดอร์
8. จำนวนเส้นทางแคนติเดตที่สั้นที่สุดจำนวน k เส้นทางระหว่างโหนดเพื่อใช้ในการจัดสรรเส้นทางและกำหนดอัตราบิตสำหรับเส้นทางแสงทำงาน

9. p-cycle ที่เหมาะสมสำหรับการปกป้องในกรณีที่มีความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวเกิดขึ้น

เป้าหมายสำหรับการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้คือ ต้องการจัดสรรทรัพยากรไปยังเส้นทางแคนดิเดตที่เหมาะสมและกำหนดอัตราบิตให้กับเส้นทางแสงทำงานพร้อมกับทำการปกป้องโครงข่ายด้วย p-cycle โดยที่ต้นทุนการดำเนินการของทรานสปอนเดอร์และต้นทุนการดำเนินการของ p-cycle ต้องมีค่าน้อยที่สุด ต้นทุนที่มาจากอุปกรณ์สวิตช์ มัลติเพล็กซ์ ดิมัลติเพล็กซ์หรืออุปกรณ์อื่น ๆ จะไม่นำมาพิจารณาและกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นต่อเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าคงที่

ข้อกำหนดของเส้นทางแสงทำงานแต่ละเส้นทางแคนดิเดตและแต่ละไซเคิลแคนดิเดตก่อนนำมาใช้ในการคำนวณจะต้องพิจารณาตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. กำหนดเส้นทางแคนดิเดตของเส้นทางแสงทำงานจำนวน k เส้นทางระหว่างคูโหนดภายในโครงข่ายโดยใช้ k-shortest path algorithm [15] หลังจากนั้นทำการหาไซเคิลแคนดิเดตที่เป็นไปได้แตกต่างกันโดยใช้อัลกอริทึมใน [16] จากโครงข่ายที่นำมาทดสอบเพื่อนำมาใช้ในการปกป้องข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย
2. กำหนดอัตราบิตที่เป็นไปได้ในแต่ละเส้นทาง k สำหรับเส้นทางแสงทำงานและไซเคิลแคนดิเดตสำหรับปกป้องเส้นทางแสงทำงานพร้อมกับการตรวจสอบว่าระยะเวลาส่งผ่านข้อมูลของเส้นทางแสงทำงานและไซเคิลแคนดิเดตที่นำมาใช้ทั้งสองต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะเวลาส่งผ่านที่ได้กำหนดไว้

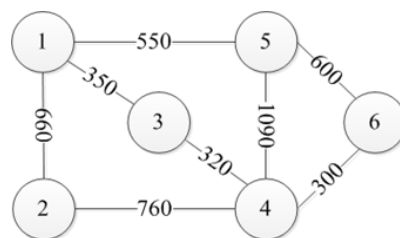
3.3 รูปแบบที่ได้นำเสนอ

สำหรับการทำวิทยานิพนธ์นี้ วิธีที่ได้นำเสนอการปกป้องแบบ p-cycle ใช้รวมกันกับโครงข่าย MLR สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีดังนี้

3.3.1 โครงข่าย MLR ได้รับการปกป้องแบบอัตราบิตของไซเคิลคงที่ (MLR-FCR)

ในการปกป้องโครงข่าย MLR-FCR กำหนดไว้คือ แต่ละ p-cycle จะสามารถปกป้องเส้นทางแสงทำงานได้ก็ต่อเมื่อไซเคิลที่ใช้สำหรับการปกป้องต้องดำเนินการ ณ อัตราบิตเดียวกันกับเส้นทางแสงทำงาน ตารางที่ 3.1-3.2 แสดงถึงเส้นทางแคนดิเดตของเส้นทางแสงทำงานจากโหนด 1 ไปโหนด 2 และจากโหนด 1 ไปโหนด 3 ซึ่งนำมาทดสอบกับโครงข่ายในรูปที่ 3.3 ยกตัวอย่างเช่น เส้นทางแสงทำงาน (1,2) ในเส้นทางที่ 1 ประกอบไปด้วยข่ายเชื่อมโยง (1,2) สามารถกำหนดอัตราบิตที่ 10/40/100

Gb/s ให้กับเส้นทางแสงทำงานดังกล่าว ตารางที่ 3.3 แสดงถึงการนำไซเคิลแคนดิเดตมาปกป้องแต่ละขั้วเชื่อมโยงของเส้นทางแสงทำงาน หากกำหนดให้เส้นทางแสงทำงาน (1,2) และ (1,3) มีความต้องการ ทราฟฟิกเท่ากับ 80 Gb/s และ 40 Gb/s ผลการทดสอบปรากฏว่าโครงข่ายจัดสรรเส้นทางแสงทำงาน (1,2) ที่อัตราบิตเท่ากับ 100 Gb/s แทน เพราะได้รับประโยชน์จากการใช้ทรานสปอนเดอร์ที่อัตราบิต 100 Gb/s ซึ่งถูกกว่าการใช้ต้นทุนจาก 2 ทรานสปอนเดอร์ที่อัตราบิต 40 Gb/s และเส้นทางแสงทำงาน (1,2) ได้รับการปกป้องจาก p-cycle ที่อัตราบิต 100 Gb/s ด้วยเช่นกัน ส่วนเส้นทางแสงทำงาน (1,3) ได้ถูกจัดสรรไปตามขั้วเชื่อมโยง (1,3) ที่อัตราบิต 40 Gb/s และได้รับการปกป้องจาก p-cycle ที่อัตราบิต 40 Gb/s แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 (ก-ข)



รูปที่ 3.3 โครงข่ายประกอบไปด้วย 6 โหนดและ 16 ขั้วเชื่อมโยง (ความยาวมีหน่วยเป็นกิโลเมตร)

ตารางที่ 3.1 จำนวนเส้นทางแคนดิเดต k จากโหนด 1 ไปยังโหนด 2 และแสดงถึงอัตราบิตที่สามารถส่งผ่านไปตามเส้นทาง

เส้นทางที่ k	เส้นทางแสงทำงาน (1,2)	อัตราบิตที่เป็นไปได้ (Gb/s)
1	1-2	10/40/100
2	1-3-4-2	10/40/100

ตารางที่ 3.2 จำนวนเส้นทางแคนดิเดต k จากโหนด 1 ไปยังโหนด 3 และแสดงถึงอัตราบิตที่สามารถส่งผ่านไปตามเส้นทาง

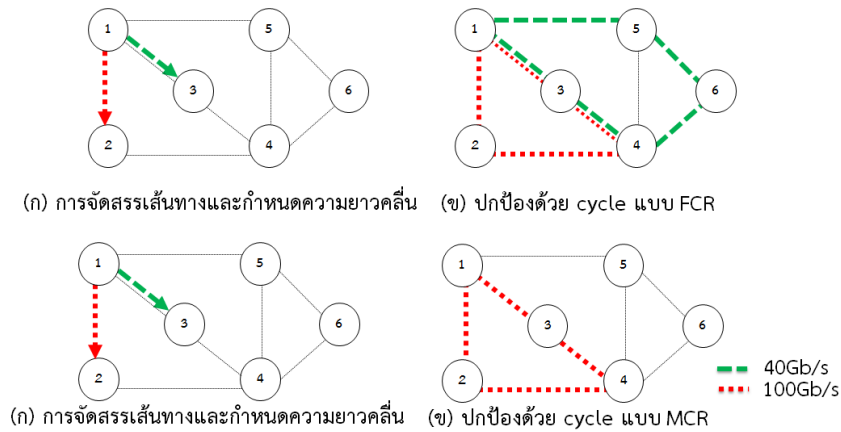
เส้นทางที่ k	เส้นทางแสงทำงาน (1,3)	อัตราบิตที่เป็นไปได้ (Gb/s)
1	1-3	10/40/100
2	1-2-4-3	10/40/100

ตารางที่ 3.3 ไชเคิลแคนดิเดตปกป้องข่ายเชื่อมโยงของเส้นทางแสงทำงาน

ปกป้องข่ายเชื่อมโยง	ไชเคิลแคนดิเดต	อัตราบิตที่เป็นไปได้ (Gb/s)
(1,2)	1-3-4-2-1	10/40/100
	1-5-4-2-1	10
	1-5-6-4-2-1	10/40
(1,3)	1-3-4-2-1	10/40/100
	1-5-4-3-1	10/40
	1-5-6-4-3-1	10/40/100
(3,4)	1-3-4-2-1	10/40/100
	1-5-4-3-1	10/40
	1-5-6-4-3-1	10/40/100
(4,2)	1-3-4-2-1	10/40/100
	1-5-4-2-1	10
	1-5-6-4-2-1	10/40

3.3.2 โครงข่าย MLR ได้รับการปกป้องแบบอัตราบิตของไชเคิลผสม (MLR-MCR)

ในการปกป้องโครงข่าย MLR-MCR พบว่ามีความยืดหยุ่นสำหรับการปกป้องเส้นทางแสงทำงานเพิ่มสูงขึ้น โดยแต่ละ p-cycle สามารถปกป้องเส้นทางแสงทำงานที่อัตราบิตใด ๆ ได้ก็ต่อเมื่อระยะการส่งผ่านอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ ยกตัวอย่างเช่นเดียวกันกับการปกป้องโครงข่ายแบบ MLR-FCR พบว่าไชเคิลที่อัตราบิต 100 Gb/s สามารถทำการปกป้องเส้นทางแสงทำงาน (1,2) และ (1,3) ที่มีความต้องการทราฟฟิกเท่ากับ 80 และ 40 Gb/s ตามลำดับได้และใช้เพียงไชเคิลเดียวเท่านั้นแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 (ค-ง)



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการจัดสรรเส้นทาง การกำหนดอัตราบิตและการปกป้องโครงข่ายแบบ (ก-ข) MLR-MCR (ค-ง) MLR-MCR

3.4 การคำนวณ 2 ขั้นตอนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการแก้ไขปัญหา โดยใช้เทคนิค ILP เริ่มจากปัญหาการจัดสรรเส้นทางแสงทำงานก่อนหลังจากนั้นทำการกำหนดอัตราบิตและ p-cycle พร้อมกันซึ่งเรียกวีธีการแก้ปัญหานี้ว่าการคำนวณ 2 ขั้นตอน เหตุผลที่ใช้การคำนวณ 2 ขั้นตอนในการแก้ไขปัญหาทางคณิตศาสตร์เพราะต้องการให้ความซ้ำซ้อนทางตัวเลขและเวลาที่ใช้สำหรับการคำนวณลดลงเพื่อนำไปสู่ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ MLR-FCR และ MLR-MCR มีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี MLR-FCR และ MLR-MCR

ตัวแปร	ความหมาย
$X_{n,k}^{ij} \in Z^+$	จำนวนเส้นทางแสงทำงานที่อัตราบิต r_k บนเส้นทางแคนติเดิต n จากโหนด i ไปยังโหนด j
$f_{ij}^{sd} \in R^+$	การไหลของทราฟฟิกทั้งหมดจากโหนด i ไปยังโหนด j สำหรับคูโหนดต้นทางปลายทาง (s,d)
$n_k^c \in Z^+$	จำนวน p-cycle c ณ อัตราบิต r_k ที่ใช้สำหรับปกป้อง

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์การป้อนเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี MLR-FCR และ MLR-MCR

พารามิเตอร์การป้อนเข้า	ความหมาย
$G(N,L)$	โทโพโลยีทางกายภาพของโครงข่ายที่ประกอบไปด้วยเซตของโหนด N และเซตของข่ายเชื่อมโยง L
M	เซตของคุโนด
S	เซตของโหนดคู่ต้นทาง-ปลายทาง ($s-d$)
P_l	เซตของเส้นทางที่ใช้ข่ายเชื่อมโยง l
r_k	อัตราบิตสำหรับการส่งผ่านที่ k โดยที่ $k \in K$ และ $K = \{1,2,3\}$
D_k	ต้นทุนของทรานสปอนเดอร์ ณ อัตราบิต r_k
C	เซตของ p-cycle
$L(p)$	ความยาวของเส้นทาง p (มีหน่วยเป็นกิโลเมตร)
$L(c)$	ความยาวของไซเคิลแคนติเดต c (มีหน่วยเป็นกิโลเมตร)
P_n^{ij}	เส้นทางแคนติเดตที่ n จากโหนด i ไปยังโหนด j โดยที่ $n = \{1,2\}$
$ W $	จำนวนความยาวคลื่นต่อเส้นใยแก้วนำแสง
Λ^{sd}	ผลรวมความต้องการของการทราฟฟิก (Gb/s) ระหว่างคุโนด (s,d)
π_l^c	มีค่าเท่ากับ 1 ก็ต่อเมื่อ p-cycle c ใช้ข่ายเชื่อมโยง l เป็นส่วนหนึ่งของไซเคิล และมีค่าเท่ากับ 0 สำหรับในกรณีอื่น
w_l^c	มีค่าเท่ากับ 1 ถ้า p-cycle c ปกป้องข่ายเชื่อมโยง l ในบทบาทของ on-cycle เท่ากับ 2 ถ้า p-cycle c ปกป้องข่ายเชื่อมโยง l ในบทบาทของ straddling link และเท่ากับ 0 สำหรับในกรณีอื่น
β_k^c	มีค่าเท่ากับ 1 ก็ต่อเมื่อ $L(c)$ น้อยกว่าระยะการส่งผ่านสำหรับอัตราบิต r_k และเท่ากับ 0 สำหรับในกรณีอื่น
$\alpha_{n,k}^{ij}$	มีค่าเท่ากับ 1 ก็ต่อเมื่อ $L(p)$ น้อยกว่าระยะการส่งผ่านสำหรับอัตราบิต r_k และเท่ากับ 0 สำหรับในกรณีอื่น

กรณีของ MLR-FCR

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

$$\min \sum_{k=1}^3 D_k \left\{ \sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1}^2 X_{n,k}^{ij} \right\} + 0.01 \sum_{c \in C} \sum_{k=1}^3 n_k^c \quad (3.1)$$

ข้อจำกัด (constraints)

$$\sum_{n=1}^2 \sum_{k=1}^3 r_k \alpha_{n,k}^{ij} X_{n,k}^{ij} \geq \sum_{(s,d) \in S} f_{ij}^{sd} \quad \forall (i,j) \in M \quad (3.2)$$

$$\sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1,2} \sum_{P_{ij}^n \in P_l} X_{n,k}^{ij} + \sum_{c \in C} \sum_{k=1}^3 \pi_l^c n_k^c \leq |W| \quad \forall l \in L \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in N: i \neq j} f_{ij}^{sd} - \sum_{i \in N: i \neq j} f_{ji}^{sd} = \begin{cases} -\Lambda^{sd}, & j = s \\ \Lambda^{sd}, & j = d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall j \in N, \forall (s,d) \in S \quad (3.4)$$

$$\sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1,2} \sum_{P_{ij}^n \in P_l} X_{n,k}^{ij} \leq \sum_{c \in C} w_l^c \beta_k^c n_k^c \quad \forall l \in L, \forall k \in K \quad (3.5)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ (3.1) ประกอบไปด้วยต้นทุนของทรานสปอนเดอร์ที่อัตราบิดใด ๆ ซึ่งกำหนดไว้เป็นต้นทุนปฐมภูมิและจำนวน p-cycle สำหรับการปกป้องเส้นทางแสวงทำงาน กำหนดไว้เป็นต้นทุนทุติยภูมิ โดยผลรวมของต้นทุนทั้งสองต้องมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากต้นทุนที่ได้จากทรานสปอนเดอร์และ p-cycle มีหน่วยของการวัดแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ในที่นี้จึงทำการสมมติว่าต้นทุนที่ได้จากการใช้แต่ละ p-cycle คิดเป็น 1 เปอร์เซนต์ของราคาค่าต้นทุนที่ได้จากทรานสปอนเดอร์ ด้วยเหตุนี้จึงมีเลข 0.01 อยู่ในพจน์ผลรวมของจำนวน p-cycle ในสมการที่ (3.1) ข้อจำกัดในสมการที่ (3.2) บ่งบอกถึงขอบเขตของกราฟฟิสิกที่ได้จัดสรรไปตามเส้นทางแสวงทำงานสร้างไว้บนแต่ละชายเชื่อมโยงลอจิคัล ผลรวมของจำนวนช่องสัญญาณเส้นทางแสวงทำงานและปริมาณความจุสำรอง (backup capacity) จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณที่กำหนดไว้ในสมการที่ (3.3) ข้อจำกัดของการอนุรักษ์การไหล (flow conservation) ถูกแสดงไว้ในสมการที่ (3.4) ข้อจำกัดในสมการที่ (3.5) แต่ละ p-cycle สามารถปกป้องเส้นทางแสวงทำงานที่อัตราบิดเดียวกันได้ก็ต่อเมื่อระยะทางของ p-cycle อยู่ภายใต้ข้อจำกัดของระยะการส่งผ่านของอัตราบิดที่ได้กำหนดไว้

กรณีของ MLR-MCR

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

$$\min \sum_{k=1}^3 D_k \left\{ \sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1}^2 X_{n,k}^{ij} \right\} + 0.01 \sum_{c \in C} \sum_{k=1}^3 n_k^c \quad (3.6)$$

ข้อจำกัด (constraints)

$$\sum_{n=1}^2 \sum_{k=1}^3 r_k \alpha_{n,k}^{ij} X_{n,k}^{ij} \geq \sum_{(s,d) \in S} f_{ij}^{sd} \quad \forall (i,j) \in M \quad (3.7)$$

$$\sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1,2} \sum_{P_i^j \in P_j} \sum_{k=1}^3 X_{n,k}^{ij} + \sum_{c \in C} \sum_{k=1}^3 \pi_k^c n_k^c \leq |W| \quad \forall l \in L \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq j} f_{ij}^{sd} - \sum_{i \in N, i \neq j} f_{ji}^{sd} = \begin{cases} -\Lambda^{sd}, & j = s \\ \Lambda^{sd}, & j = d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall j \in N, \forall (s,d) \in S \quad (3.9)$$

$$\sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1,2} \sum_{P_i^j \in P_j} \sum_{k=1}^3 X_{n,k}^{ij} \leq \sum_{c \in C} \sum_{k=1}^3 w_k^c \beta_k^c n_k^c, \quad \forall l \in L, \forall k \in K \quad (3.10)$$

สมการที่ (3.6-3.9) มีความหมายเหมือนกับสมการที่ (3.1-3.4) ของการปกป้องโครงข่ายแบบ MLR-FCR ทุกประการ การปกป้อง p-cycle ภายใต้เงื่อนไขของ MCR ในสมการที่ (3.10) อนุญาตให้แต่ละ p-cycle ปกป้องเส้นทางแสงทำงานที่อัตราบิตใด ๆ ได้ก็ต่อเมื่อระยะทางของ p-cycle อยู่ภายใต้ข้อจำกัดระยะการส่งผ่านของอัตราบิตที่ได้กำหนดไว้

3.5 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ผลเฉลยที่หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4 สำหรับกรณีที่โครงข่าย MLR สามารถแก้ไขปัญหาค่าความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวได้ ในการวิเคราะห์ผลเฉลยกำหนดให้โครงข่ายมีลักษณะทางกายภาพและปริมาณกราฟฟิกตามรูปที่ 3.3 และตารางที่ 3.6 ดังนี้ โครงข่ายในรูปที่ 3.3 เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโนดทั้งหมด 6 โหนดและมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมด 16 ข่ายเชื่อมโยง เพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปขอเรียกโครงข่ายนี้ว่า 6N_16L (ความยาวมีหน่วยเป็นกิโลเมตร) ความต้องการกราฟฟิกในแต่ละคุโนดได้จากการสุ่มและการกระจายอย่างสม่ำเสมออยู่บนช่วง [1-100] ซึ่งผลรวมของกราฟฟิกทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1.254 Tb/s และกำหนดให้การส่งกราฟฟิกภายในโครงข่ายเป็นการส่งกราฟฟิกแบบส่งทั่วถึงกันทั้งหมดโดยแต่ละคุโนดมีการรับส่งในอัตราบิตเดียวกัน ราคาต้นทุนของทรานสปอนเดอร์ที่อัตราบิต 10, 40 และ 100 Gb/s คือ 1, 2.5 และ 4.5 หน่วยราคาตามลำดับ [12] กำหนดให้ระยะการส่งผ่านของทรานสปอนเดอร์ที่อัตราบิต 10, 40 และ 100 Gb/s มีค่าเท่ากับ 3200, 2200 และ 1880 กิโลเมตรตามลำดับ [12] และสมมติว่าจำนวนความยาวคลื่นต่อเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากับ 128

ปัญหาโปรแกรมมิ่งแบบจำนวนเต็ม (integer programming problem) เป็นการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (optimization) โดยอยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งตัวแปรบางตัวหรือทุกตัวถูกกำหนดไว้อยู่ในรูปของจำนวนเต็มและเรียกปัญหาดังกล่าวนี้ว่า ILP ที่ประกอบไปด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อกำหนดทางคณิตศาสตร์อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น การหาผลเฉลยของการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรม Python ร่วมกับ PuLP เวอร์ชัน 1.4.7 และ GLPK ใช้สำหรับการแก้ไข

ปัญหา ILP ซึ่งทำงานอยู่บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ XP มีหน่วยประมวลผล Intell Core i5 ความเร็ว 2 Gb และมีหน่วยความจำเท่ากับ 2.53 GHz

ตารางที่ 3. เมทริกซ์ทราฟฟิกสำหรับโครงข่าย 6N_16L

โนด	1	2	3	4	5	6
1	0	9	83	45	63	47
2	9	0	13	26	76	51
3	83	13	0	78	41	46
4	45	26	78	0	4	25
5	63	76	41	4	0	20
6	47	51	46	25	20	0

เมื่อพิจารณาโครงข่าย 6N_16L พบว่ามีค่าเฉลี่ยความยาวข่ายเชื่อมโยงและตีกีของโนดเท่ากับ 578.75 กิโลเมตรและ 2.67 ตามลำดับ การที่ค่าเฉลี่ยตีกีโนดมีค่าน้อยนั้นส่งผลถึงไซเคิลแคนต์เดตมีจำนวนน้อย (มีแค่ 6 ไซเคิล) และไซเคิลแคนต์เดตส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพในการปกป้องค่อนข้างต่ำหรือมีความสามารถในการปกป้องแค่ on-cycle และมีเพียงบางไซเคิลเท่านั้นได้รับประโยชน์จาก straddling link

ตารางที่ 3.7 แสดงถึงเส้นทางแคนต์เดตของเส้นทางแสงทำงานพร้อมกับระยะทางจากโนดต้นทางจนถึงโนดปลายทาง (ในหน่วยกิโลเมตร) การที่เส้นทางแสงทำงานผ่าน 1 ข่ายเชื่อมโยงในที่นี้จะกำหนดให้เป็นความยาวของเส้นทางแสงทำงานมีค่าเท่ากับ 1 hop จากตารางที่ 3.7 ค่าเฉลี่ยความยาวและค่าเฉลี่ยของระยะทางที่เส้นทางแสงทำงานในเส้นทางที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1.6 hop และ 725.33 กิโลเมตร หากพิจารณาเส้นทางแคนต์เดตที่ 2 พบว่าค่าเฉลี่ยความยาวและค่าเฉลี่ยของระยะที่เส้นทางแสงทำงานมีค่าเท่ากับ 2.67 hop และ 1444.67 กิโลเมตรตามลำดับ จากระยะทางเส้นทางแคนต์เดตทั้งสองทำให้พบว่าหากจะใช้เส้นทางใดทำการจัดสรรและกำหนดอัตราบิตเส้นทางแคนต์เดตที่ 1 หรือ 2 สามารถกำหนดได้ในทุกอัตราบิตโดยไม่ได้รับผลกระทบในข้อกำหนดของระยะการส่งผ่านเลย

ปัญหาการค้นหาเส้นทางของคูโนดใด ๆ ในทางทฤษฎีจัดว่าเป็นเรื่องที่ยาก โดยเฉพาะเมื่อต้องพิจารณาโครงข่ายที่มีโนดและข่ายเชื่อมโยงจำนวนมาก เพราะจะทำให้จำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามจำนวนโนดและจำนวนข่ายเชื่อมโยงในระบบ อย่างไรก็ตามโครงข่ายที่นำมา

พิจารณาตามรูปที่ 3.3 เป็นโครงข่ายขนาดเล็กทำให้การค้นหาเส้นทางที่เป็นไปได้ระหว่างคูโนดสามารถหาได้ในเวลาที่จำกัด เมื่อพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต้องการให้การจัดสรรทรัพยากรของโครงข่ายมีค่าเหมาะสมและต่ำที่สุด ในที่นี้เลยกำหนดให้เลือกเส้นทางระหว่างคูโนดใด ๆ เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดเพียง 2 เส้นทางเท่านั้นก็น่าจะเพียงพอแล้ว

สังเกตโครงข่ายที่นำมาพิจารณาพบว่าข่ายเชื่อมโยง (4,5) และ (5,4) อาจจะเป็น straddling link สำหรับบางไซเคิลแคนติเดต จากตารางที่ 3.7 พบว่าเส้นทางแสงทำงานเคลื่อนที่ผ่านข่ายเชื่อมโยง (4,5) และ (5,4) มีจำนวนที่น้อยมาก (ตามที่ดอกจันกำกับไว้ในตาราง) สาเหตุเป็นเพราะข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวมีความยาวถึง 1090 กิโลเมตร ทำให้การหาเส้นทางแคนติเดตระหว่างคูโนดใด ๆ เลี่ยงไปใช้เส้นทางอื่นที่สั้นกว่าแทน เส้นทางแคนติเดตที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงนี้มีแค่เส้นทางแสงทำงาน (4,5), (4,6), (6,4) และ (6,5) เท่านั้น

ผลลัพธ์ที่ได้ตามตารางที่ 3.8 สัญลักษณ์ \times ในที่นี้ได้แสดงถึงผลรวมของความต้องการทราฟฟิกทั้งหมดภายในโครงข่ายมีค่าเท่ากับ 1.254 Tb/s โครงข่ายที่นำมาทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 5 โครงข่ายคือ โครงข่าย SLR จำนวน 3 โครงข่ายที่ประกอบไปด้วย SLR-10, SLR-40 และ SLR-100 Gb/s และโครงข่าย MLR จำนวน 2 โครงข่ายที่ประกอบไปด้วย MLR-FCR และ MLR-MCR ยกตัวอย่างการแสดงค่าต้นทุนในตาราง เช่น หากต้นทุนของโครงข่าย SLR-10 Gb/s ยังไม่ได้รับการปกป้องจะมีค่าเท่ากับ 140 หน่วย (ต้นทุนที่เกิดจากทรานสปอนเดอร์เพียงอย่างเดียว) ในปริมาณทราฟฟิกที่ $1x$ แต่ถ้าโครงข่ายได้รับการปกป้องต้นทุนของโครงข่ายจะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 140.13 หน่วย ซึ่งเป็นผลจากจำนวน cycle ที่ใช้สำหรับการปกป้องข่ายเชื่อมโยงของเส้นทางแสงทำงาน เป็นต้น

ตารางที่ 3.7 เส้นทางแคนติเดตของเส้นทางแสงทำงานพร้อมกับระบุระยะทางจากโนดต้นทางจนถึง
โนดปลายทาง

เส้นทางแสง	เส้นทางที่ 1	ระยะทาง	เส้นทางที่ 2	ระยะทาง
(1,2)	1-2	660	1-4-3-2	1430
(1,3)	1-3	350	1-2-4-3	1740
(1,4)	1-3-4	670	1-2-4	1420
(1,5)	1-5	550	1-3-4-6-5	1570
(1,6)	1-3-4-6	970	1-5-6	1150
(2,1)	2-1	660	2-4-3-1	1430
(2,3)	2-1-3	1010	2-4-3	1080
(2,4)	2-4	760	2-1-3-4	1330
(2,5)	2-1-5	1210	2-4-6-5	1660
(2,6)	2-4-6	1060	2-1-3-4-6	1630
(3,1)	3-1	350	3-4-2-1	1740
(3,2)	3-1-2	1010	3-4-2	1080
(3,4)	3-4	320	3-1-2-4	1770
(3,5)	3-1-5	900	3-4-6-5	1660
(3,6)	3-4-6	620	3-1-5-6	1630
(4,1)	4-3-1	670	4-2-1	1420
(4,2)	4-2	760	4-3-1-2	1330
(4,3)	4-3	320	4-2-1-3	1770
(4,5)	4-6-5	900	4-5*	1090
(4,6)	4-6	400	4-5-6*	1690
(5,1)	5-1	550	5-6-4-3-1	1570
(5,2)	5-1-2	1210	5-6-4-2	1660
(5,3)	5-1-3	900	5-6-4-3	1220
(5,4)	5-6-4	900	5-4	1090
(5,6)	5-6	600	5-4-6	1390
(6,1)	6-4-3-1	970	6-5-1	1150
(6,2)	6-4-2	1060	6-4-3-1-2	1630
(6,3)	6-4-3	620	6-5-1-3	1500
(6,4)	6-4	300	6-5-4*	1690
(6,5)	6-5	600	6-4-5*	1390
ค่าเฉลี่ย	hop = 1.6	ระยะทาง = 725.33	hop = 2.67	ระยะทาง = 1444.67

ตารางที่ 3.8 ต้นทุนในการจัดสรรโครงข่าย 6N_16L

ทรานซิปิก	SLR-10Gb/s	SLR-40Gb/s	SLR-100Gb/s	MLR-FCR	MLR-MCR
1x	140.13	125.05	135.05	95.07	95.05
2x	264.25	200.08	180.07	147.09	147.07
4x	516.49	350.14	297.11	258.13	258.12
8x	-	660.28	531.20	484.23	484.21
16x	-	1290.57	990.28	939.43	939.41

เมื่อปริมาณทรานซิปิก x เพิ่มขึ้น สังเกตว่าโครงข่าย SLR-10 Gb/s ไม่สามารถนำพาทรานซิปิกที่มีปริมาณตั้งแต่ 8x เป็นต้นไปได้ เหตุผลเนื่องจากจำนวนช่องสัญญาณความยาวคลื่นมีไม่เพียงพอสำหรับการรองรับทรานซิปิกและการปกป้อง หากพิจารณาต้นทุนที่ได้จากโครงข่าย MLR พบว่าปริมาณทรานซิปิก x จะเพิ่มขึ้นมากเพียงใดต้นทุนที่ได้จากโครงข่าย MLR จะมีค่าน้อยที่สุดเสมอ เมื่อพิจารณาปริมาณทรานซิปิก 1x จนถึง 4x พบว่า SLR-10 Gb/s ใช้ต้นทุนมากที่สุดไม่เพียงแต่ต้นทุนที่เกิดจากทรานสبونเดอร์เท่านั้นยังรวมไปถึงจำนวนการใช้ p-cycle อีกด้วย รองลงมาคือ SLR-40 Gb/s และ SLR-100 Gb/s ตามลำดับ สำหรับทรานซิปิกตั้งแต่ 8x จนถึง 16x พบว่า SLR-40 Gb/s ใช้ต้นทุนมากที่สุดรองลงมาคือ SLR-100 Gb/s MLR-FCR และ MLR-MCR ตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.8

หากทำการวิเคราะห์ถึงต้นทุนจาก MLR ทั้งแบบ FCR และ MCR พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันตามตารางที่ 3.8 และ 3.9 เมื่อปริมาณทรานซิปิกเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 1x จนถึง 16x การปกป้องแบบ MCR ต้องการ cycle น้อยกว่า FCR เพียงเล็กน้อยคิดเป็นค่าเฉลี่ยแล้วอยู่ที่ประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ทั้ง ๆ ที่วิธี MCR ให้ความยืดหยุ่นในการปกป้องสูงกว่าวิธี FCR เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของโครงข่ายที่นำมาทดสอบมีระยะทางของสายเชื่อมโยงยาวทำให้ cycle ที่ใช้ไม่สามารถกำหนดหรือปกป้องในอัตราที่สูง ๆ ได้จึงไม่สามารถได้รับประโยชน์จาก MCR ที่ใช้ไซเคิลอัตราสูงมาปกป้องเส้นทางแสงทำงานที่อัตราที่ต่ำได้

หากพิจารณาถึงการเลือกไซเคิลใช้สำหรับการปกป้องจะพิจารณาไซเคิลแคนดิเดตที่มีส่วนประกอบของ straddling link ก่อน เพราะหากเส้นทางแสงทำงานได้เคลื่อนที่ผ่าน straddling link การใช้ไซเคิลแคนดิเดตสำหรับการปกป้องโครงข่ายดังกล่าวไม่มีความจำเป็นต้องเพิ่มความจุสำรองลงในระบบพร้อมกับให้จำนวนเส้นทางปกป้องมากถึง 2 เส้นทางอีกด้วย

สำหรับไซเคิลแคนดิเดตที่ได้จากโครงข่าย 6N_16L ประกอบไปด้วย 6 ไซเคิลแคนดิเดตที่มีความยาวของไซเคิลแตกต่างกัน หากทำการสมมติว่าผลรวมของความจุสำรองทั้งหมดที่ได้จากไซเคิลแคนดิเดตมีจำนวนเท่ากัน การเลือกขนาดของไซเคิลที่ใช้สำหรับการปกป้องจะมีลักษณะอย่างไร ในที่นี้จึงทำการสมมติแบ่งออกเป็น 2 ประเด็นดังนี้ ประเด็นแรกจะพิจารณาจากการเลือกไซเคิลแคนดิเดตที่มีขนาดใหญ่หรือมีระยะทางของไซเคิลยาวและเพียงพอต่อการรองรับกับความล้มเหลวที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดได้ หรือจะพิจารณาจากการเลือกไซเคิลแคนดิเดตที่มีขนาดเล็กใด ๆ ในจำนวนหลายไซเคิลและเพียงพอต่อการรองรับกับความล้มเหลวที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดได้

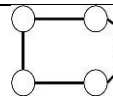
จากประเด็นที่ได้กล่าวมาในข้างต้นผลจากการทดลองพบว่าโปรแกรมจะเลือกไซเคิลที่มีขนาดเล็กแทนที่จะเลือกไซเคิลที่มีขนาดใหญ่ตามตารางที่ 3.10 และ 3.11 เพราะไซเคิลที่มีขนาดใหญ่หรือมีความยาวของระยะทางไซเคิลมากจะมีความสามารถปกป้องเส้นทางแสงทำงานได้ในอัตราบิดต่ำ ๆ เท่านั้น หากต้องการปกป้องเส้นทางแสงทำงานที่อัตราบิดสูงจึงจำเป็นต้องใช้ไซเคิลจำนวนมากซึ่งไม่ตรงกับวัตถุประสงค์ของการออกแบบที่กำหนดไว้

ตารางที่ 3.9 จำนวนไซเคิลใช้ที่ได้จากวิธี MLR-FCR และ MLR-MCR

ทราฟฟิก	จำนวนไซเคิลที่นำมาใช้ในการปกป้องโครงข่าย	
	MLR-FCR	MLR-MCR
1x	7	5
2x	9	7
4x	13	12
8x	23	21
16x	43	41

ในส่วนนี้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากวงแหวน (ring) และ p-cycle ทั้งแบบ FCR และ MCR ตามลำดับ การปกป้องโครงข่ายแบบวงแหวน (ring protection) คือเซตของวงแหวนแบบมีทิศทางที่สามารถปกป้องโครงข่ายจากความล้มเหลวเกิดขึ้นบนข่ายเชื่อมโยง เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดการปกป้องแบบวงแหวนจะให้เส้นทางสำรองในทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นทางแสงทำงานผ่านข่ายเชื่อมโยงบนวงแหวนนั้น จากตารางที่ 3.12 และ 3.13 แสดงถึงการนำวงแหวนมาเปรียบเทียบกับ p-cycle ทั้งแบบ FCR และ MCR โดยโทโพโลยีโครงข่ายและปริมาณทราฟฟิกที่นำมาทดสอบเหมือนกับการทดสอบโครงข่ายก่อนหน้าทุกประการ

ตารางที่ 3.10 ไชเคิลแคนดิเดตที่ใช้สำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR-FCR

ทราฟฟิก	ไชเคิลแคนดิเดตสำหรับโครงข่าย 6N_16L					
	 ไชเคิล 0	 ไชเคิล 1	 ไชเคิล 2	 ไชเคิล 3	 ไชเคิล 4	 ไชเคิล 5
1x	3	-	1	1	2	-
2x	3	-	1	1	2	2
4x	5	-	1	-	4	3
8x	8	-	1	-	8	6
16x	15	-	2	-	15	11

ตารางที่ 3.11 ไชเคิลแคนดิเดตที่ใช้สำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR-MCR

ทราฟฟิก	ไชเคิลแคนดิเดตสำหรับโครงข่าย 6N_16L					
	 ไชเคิล 0	 ไชเคิล 1	 ไชเคิล 2	 ไชเคิล 3	 ไชเคิล 4	 ไชเคิล 5
1x	1	-	1	-	3	-
2x	2	-	1	-	2	2
4x	4	-	-	-	5	3
8x	7	-	-	-	7	7
16x	13	-	-	-	17	11

ตารางที่ 3.12 เปรียบเทียบการปกป้องโครงข่ายระหว่างวิธีวงแหวนและ p-cycle ในกรณี FCR

ทราฟฟิก	เปรียบเทียบการปกป้องระหว่างวิธีวงแหวนและ p-Cycle ในโครงข่าย MLR					
	ข่ายเชื่อมโยงทำงาน		ข่ายเชื่อมโยงสำรอง		จำนวนไชเคิล	
	ring-FCR	MLR-FCR	ring-FCR	MLR-FCR	ring-FCR	MLR-FCR
1x	94	94	102	94	12	11
2x	88	88	98	94	13	12
4x	121	121	138	138	17	17
8x	197	197	440	440	54	54
16x	394	394	440	440	54	54

ก่อนที่จะพิจารณาการปกป้องโครงข่าย กำหนดให้การจัดสรรเส้นทางและกำหนดอัตราบิดในแต่ละปริมาณกราฟฟิกทั้งแบบวงแหวนและ p-cycle เหมือนกันทุกประการในทุก ๆ กรณีกราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น เพราะจะพิจารณาเฉพาะจำนวนข่ายเชื่อมโยงสำรองหรือจำนวนไซเคิลใช้สำหรับการปกป้องเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และต้องการทราบถึงลักษณะของโครงข่ายที่นำมาทำการทดสอบมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการปกป้องแบบ p-cycle และแบบวงแหวนแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

ตารางที่ 3.13 เปรียบเทียบการปกป้องโครงข่ายระหว่างวิธีวงแหวนและ p-cycle ในกรณี MCR

กราฟฟิก	เปรียบเทียบการปกป้องวงแหวนและp-Cycle ในโครงข่าย MLR					
	ข่ายเชื่อมโยงทำงาน		ข่ายเชื่อมโยงสำรอง		จำนวนไซเคิล	
	ring-MCR	MLR-MCR	ring-MCR	MLR-MCR	ring-MCR	MLR-MCR
1x	94	94	68	68	8	8
2x	88	88	66	66	8	8
4x	121	121	106	106	14	14
8x	197	197	370	370	49	49
16x	394	394	370	370	49	49

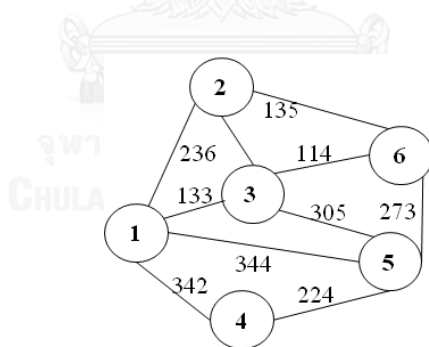
จากตารางที่ 3.13 เมื่อปริมาณกราฟฟิกเพิ่มสูงขึ้นจาก 1x จนถึง 16x จำนวนข่ายเชื่อมโยงสำรองหรือจำนวนไซเคิลที่ใช้สำหรับการปกป้องเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน พิจารณาในกรณีของ FCR พบว่า ปริมาณข่ายเชื่อมโยงสำรองหรือจำนวนไซเคิลทั้งแบบวงแหวนและ p-cycle มีปริมาณเกือบจะเท่ากันในทุก ๆ กราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นและแตกต่างกันเล็กน้อยสำหรับกราฟฟิกที่ 1x และ 2x เท่านั้น ส่วนในกรณีของ MCR ผลการทดสอบได้แสดงออกไปในทางเดียวกันกับ FCR คือ จำนวนข่ายเชื่อมโยงสำรองหรือไซเคิลทั้งแบบวงแหวนและ p-cycle มีจำนวนเท่ากันในทุก ๆ กราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น

หากเปรียบเทียบจำนวนข่ายเชื่อมโยงสำรองหรือจำนวนไซเคิลที่ได้จากการปกป้องโครงข่ายระหว่างวิธี FCR และ MCR พบว่า MCR ต้องการข่ายเชื่อมโยงสำรองหรือจำนวนไซเคิลน้อยกว่า FCR อยู่มากคิดเป็นค่าเฉลี่ยแล้วสูงถึง 19.54 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เป็นการยืนยันว่าไม่ว่าจะเป็นวงแหวนหรือ p-cycle การปกป้องแบบ MCR ให้ความยืดหยุ่นได้มากกว่า FCR ทุกประการ

ประเด็นที่น่าสนใจอีกประเด็นหนึ่งคือ หากเปรียบเทียบการปกป้องโครงข่ายระหว่างวิธีวงแหวนและ p-cycle ทั้งแบบวิธี FCR และ MCR พบว่าจำนวนข่ายเชื่อมโยงสำรองหรือจำนวนไซเคิลที่

ใช้สำหรับการปกป้องมีความแตกต่างในแต่ละกรณีน้อยมาก นั่นก็หมายความว่าแต่ละไซเคิลแคนดิเดตที่ใช้ส่วนใหญ่แล้วมีความสามารถปกป้องได้เพียง on-cycle เท่านั้นโดยไม่ได้รับประโยชน์จาก straddling link เท่าที่ควร เหตุผลเป็นเพราะแต่ละเส้นทางแสงทำงานที่ถูกเลือกในการจัดสรรไม่ได้เคลื่อนที่ผ่าน straddling link หรืออาจจะผ่านในบางเส้นทางแสงทำงาน ด้วยเหตุนี้ผลของการกำหนดจำนวนเส้นทางแคนดิเดตของเส้นทางแสงทำงานมีผลต่อการปกป้องโครงข่ายด้วยเช่นกัน

หลังจากได้ทำการทดลองโครงข่าย 6N_16L พบว่าเป็นโครงข่ายที่ไม่เหมาะสมกับการปกป้องแบบ p-cycle มากนัก เพราะมีจำนวนไซเคิลแคนดิเดตและ straddling link น้อยเกินไปทำให้ไม่ได้รับข้อเด่นจาก p-cycle ประกอบกับมีระยะทางระหว่างข่ายเชื่อมโยงที่ค่อนข้างสูงทำให้บางไซเคิลแคนดิเดตไม่สามารถกำหนดอัตราบิตได้ทุกอัตราบิตส่งผลให้ต้องใช้จำนวนไซเคิลมากขึ้นซึ่งแสดงถึงความสิ้นเปลืองทรัพยากรของโครงข่าย ดังนั้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงข้อดีของการใช้ p-cycle จึงทำการทดสอบกับโครงข่ายที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกับโครงข่าย 6N_16L อย่างสิ้นเชิงคือ ความยาวของข่ายเชื่อมโยงมีระยะทางสั้นลงและค่าเฉลี่ยของดีกรีโนดเพิ่มขึ้นตามภาพที่ 3.5 และตารางที่ 3.14 ตามลำดับ เพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปขอเรียกโครงข่ายนี้ว่า 6N_20L และกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นต่อช่องสัญญาณ ระยะการส่งผ่าน ต้นทุนทรานสปอนเดอร์และการกำหนดทราฟฟิกเหมือนกันกับการทดสอบโครงข่าย 6N_16L ทุกประการโดยที่ผลรวมของทราฟฟิกมีค่าเท่ากับ 1.418 Tb/s



รูปที่ 3.5 โครงข่ายที่นำมาทดสอบประกอบด้วย 6 โหนดและ 20 ข่ายเชื่อมโยง (ข่ายเชื่อมโยงมีความยาวในหน่วยของกิโลเมตร)

ตารางที่ 3.14 เส้นทางแคนติเดตของเส้นทางแสงทำงานพร้อมกับระยะทางจากโนดต้นทางจนถึงโนดปลายทาง

เส้นทางแสง	เส้นทาง 1	ระยะทาง	เส้นทาง 2	ระยะทาง
(1,2)	1-2	236	1-3-2	343
(1,3)	1-3	133	1-2-3	346
(1,4)	1-4	342	1-5-4	568
(1,5)	1-5	344	1-3-5	438
(1,6)	1-3-6	247	1-2-6	371
(2,1)	2-1	236	2-3-1	343
(2,3)	2-3	110	2-6-3	249
(2,4)	2-1-4	578	2-3-1-4	585
(2,5)	2-6-5	408	2-3-5	415
(2,6)	2-6	135	2-3-6	224
(3,1)	3-1	133	3-2-1	346
(3,2)	3-2	110	3-6-2	249
(3,4)	3-1-4	475	3-5-4	529
(3,5)	3-5	305	3-6-5	387
(3,6)	3-6	144	3-2-6	245
(4,1)	4-1	342	4-5-1	568
(4,2)	4-1-2	578	4-1-3-2	585
(4,3)	4-1-3	475	4-5-3	529
(4,5)	4-5	224	4-1-5	686
(4,6)	4-5-6	497	4-1-3-6	589
(5,1)	5-1	344	5-3-1	438
(5,2)	5-6-2	408	5-3-2	415
(5,3)	5-3	305	5-6-3	387
(5,4)	5-4	224	5-1-4	686
(5,6)	5-6	273	5-3-6	419
(6,1)	6-3-1	247	6-2-1	371
(6,2)	6-2	135	6-3-2	224
(6,3)	6-3	144	6-2-3	245
(6,4)	6-5-4	497	6-3-1-4	589
(6,5)	6-5	273	6-3-5	419
ค่าเฉลี่ย	hop = 1.34	ระยะทาง = 294.733	hop = 2.134	ระยะทาง = 419.6

เมื่อพิจารณาโครงข่าย 6N_20L พบว่าระยะทางเฉลี่ยของข่ายเชื่อมโยงและดีกรีโนดมีค่าเท่ากับ 221.6 กิโลเมตรและ 3.34 ตามลำดับ การที่ค่าเฉลี่ยของดีกรีโนดเพิ่มขึ้นจากเดิมส่งผลต่อจำนวนไซเคิลแคตติเดตและจำนวน straddling link ที่บรรจุอยู่ในแต่ละไซเคิลแคตติเดตเพิ่มขึ้น ทำให้การปกป้องโครงข่ายแบบ p-cycle มีโอกาสได้รับประโยชน์จาก straddling link มากขึ้นด้วยเช่นกัน ค่าเฉลี่ยความยาวและค่าเฉลี่ยระยะทางการเคลื่อนที่ของเส้นทางแสงทำงานในเส้นทางแคตติเดตที่ 1 คือ 1.34 hop และ 294.33 กิโลเมตรตามลำดับ ส่วนเส้นทางแคตติเดตที่ 2 พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.134 hop และ 419.6 กิโลเมตร แสดงไว้ในตารางที่ 3.14 ตามลำดับ หากใช้เส้นทางใดเส้นทางหนึ่งทำการจัดสรรจะสามารถกำหนดได้ทุกอัตราบิตและจะไม่ได้รับผลกระทบจากข้อกำหนดของระยะการส่งผ่าน

ตารางที่ 3.15 แสดงถึงต้นทุนของโครงข่าย 6N_20L สำหรับปกป้องความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวเกิดขึ้น โดยที่ผลรวมของความต้องการทราฟฟิกทั้งหมดภายในโครงข่ายมีค่าเท่ากับ 1.418 Tb/s ($x = 1.418$) เมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น ต้นทุนโครงข่าย MLR น้อยกว่าต้นทุนโครงข่าย SLR อย่างมีนัยสำคัญ สังเกตว่าโครงข่าย 6N_20L มีขนาดเล็กถึง SLR-10 Gb/s ยังคงไม่สามารถนำพาทราฟฟิกที่มีปริมาณตั้งแต่ 8x เป็นต้นไปได้ เหตุผลอันเนื่องมาจากจำนวนช่องสัญญาณความยาวคลื่นมีไม่เพียงพอสำหรับการรองรับทราฟฟิกและการปกป้อง หากพิจารณาถึงต้นทุนที่ได้จากโครงข่าย MLR พบว่าไม่ว่าปริมาณทราฟฟิก x จะเพิ่มขึ้นมากเพียงใดต้นทุนที่ได้จาก MLR จะมีค่าน้อยที่สุดเสมอ (ถ้ามีจำนวนช่องสัญญาณความยาวคลื่นเพียงพอ) สำหรับ SLR-10 Gb/s ยังคงใช้ต้นทุนมากที่สุดไม่เพียงแต่ต้นทุนที่เกิดจากทรานสปอนเดอร์เท่านั้นยังรวมไปถึงจำนวน p-cycle ที่ใช้อีกด้วย รองลงมาคือ SLR-40 และ SLR-100 Gb/s ตามลำดับ

ตารางที่ 3.15 ต้นทุนในการจัดสรรโครงข่าย 6N_20L

ทราฟฟิก	SLR-10Gb/s	SLR-40Gb/s	SLR-100Gb/s	MLR-FCR	MLR-MCR
1x	154.1	115.03	135.03	97.04	97.02
2x	296.19	205.06	189.03	161.04	161.02
4x	580.36	385.1	315.05	287.06	287.03
8x	None	740.19	567.09	537.10	537.05
16x	None	1450.4	1089.20	1054.20	1054.1

หากพิจารณาการเลือกไซเคิลที่ใช้สำหรับการปกป้องโครงข่าย 6N_20L ผลจากการทดสอบพบว่า โปรแกรมจะเลือกไซเคิลที่มีจำนวน hop สูง ๆ แทนที่จะเลือกไซเคิลที่มีจำนวน hop ต่ำ ๆ ซึ่งตรงกันข้ามกับผลการทดสอบโครงข่าย 6N_16L เพราะแสดงถึงโอกาสที่จะพบจำนวน straddling link บรรจุภายในไซเคิลเป็น ทำให้ประสิทธิภาพสำหรับการปกป้องโครงข่ายเพิ่มสูงขึ้น ตารางที่ 3.16 แสดงถึงจำนวนไซเคิลถูกใช้จากวิธี MLR-FCR และ MLR-MCR พบว่าเมื่อปริมาณทราฟฟิก \times เพิ่มขึ้นจำนวนไซเคิลที่ใช้เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ถึงอย่างไรจำนวนไซเคิลที่ใช้สำหรับการปกป้องได้จากวิธี MLR-MCR ต้องการจำนวนไซเคิลน้อยกว่า MLR-FCR คิดเป็นค่าเฉลี่ยแล้วสูงถึง 48.78 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3.16 จำนวนไซเคิลที่ใช้จากวิธี MLR-FCR และ MLR-MCR

ทราฟฟิก	จำนวนไซเคิลถูกใช้สำหรับการปกป้อง	
	MLR-FCR	MLR-MCR
1x	4	2
2x	4	2
4x	6	3
8x	10	5
16x	17	9

การที่โครงข่าย 6N_20L มีดีกรีโหนดเท่ากับ 3.34 ซึ่งมากกว่าโครงข่าย 6N_16L ส่งผลถึงจำนวนไซเคิลแคนดิเดตที่ทำได้จากโครงข่ายเพิ่มขึ้นสูงถึง 20 ไซเคิล (เทียบกับโครงข่าย 6N_16L มีแค่ 6 ไซเคิล) และแต่ละไซเคิลแคนดิเดตมีส่วนประกอบของ straddling links เพิ่มขึ้น การได้รับประโยชน์จาก straddling link ดังกล่าวนี้ทำให้การปกป้องโครงข่าย 6N_20L ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ไซเคิลจำนวนมากเหมือนกับการทดลองโครงข่ายในแบบแรกเลยที่ต้องการจำนวนไซเคิลสูงถึง 43 และ 41 ไซเคิลสำหรับ MLR-FCR และ MLR-MCR ตามลำดับ ตารางที่ 3.17 และ 3.18 หากกำหนดให้ความสามารถในการปกป้องของ on-cycle มีค่าเท่ากับ 1 และความสามารถในการปกป้องของ straddling link มีค่าเท่ากับ 2 ประสิทธิภาพในการปกป้องโครงข่ายต่อความต้องการใช้ความจุมีค่าเท่ากับความสามารถในการปกป้องโครงข่ายต่อด้วยจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ประกอบกันเป็นไซเคิลจากตารางที่ 3.17 และ 3.18 แต่ละไซเคิลแคนดิเดตที่แสดงไว้ในตารางมีประสิทธิภาพในการปกป้องสูงถึง 2.333 ทั้งสามไซเคิล แต่ตารางที่ 3.10 และ 3.11 มีประสิทธิภาพในการปกป้องสูงสุดเพียงแค่ 1.4 เท่านั้น เพราะฉะนั้นหากต้องการใช้ไซเคิลสำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR ที่สามารถรองรับกับ

ความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวได้นั้นต้องเลือกไซเคิลแคนดิเดตที่มีประสิทธิภาพในการปกป้องโครงข่ายสูงพร้อมกันกับมีความสามารถรองรับระยะการส่งผ่านของโครงข่าย MLR ได้ทุกอัตราบิต

ตารางที่ 3.17 ไซเคิลแคนดิเดตที่ใช้สำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR-FCR

ทราฟฟิก	ไซเคิลแคนดิเดตที่ถูกใช้สำหรับการปกป้อง		
	 ไซเคิล 0	 ไซเคิล 1	 ไซเคิล 2
1x	1	2	1
2x	2	-	2
4x	1	3	2
8x	1	6	3
16x	7	-	10

ตารางที่ 3.18 ไซเคิลแคนดิเดตที่ใช้สำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR-MCR

ทราฟฟิก	ไซเคิลแคนดิเดตที่ถูกใช้สำหรับการปกป้อง		
	 ไซเคิล 0	 ไซเคิล 1	 ไซเคิล 2
1x	-	-	2
2x	-	2	-
4x	-	2	1
8x	3	2	-
16x	5	4	-

ในส่วนนี้ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้จากวงแหวนและ p-cycle ทั้งแบบ FCR และ MCR ตามตารางที่ 3.19 และ 3.20 หากทำการพิจารณาในกรณีของ FCR พบว่าวงแหวนต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงสำรองและจำนวนไซเคิลมากกว่า p-cycle ส่วนในกรณีของ MCR ผลการทดลองได้แสดงออกไปในทางเดียวกันกับ FCR แต่ถ้านำตารางที่ 3.19 มาเปรียบเทียบกับตารางที่ 3.20 แล้ว

พบว่าในทุกกรณีของการปกป้องไม่ว่าจะเป็นวงแหวนหรือ p-cycle การปกป้องโครงข่ายแบบ MCR ต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงสำรองและจำนวนไซเคิลน้อยกว่า FCR ในทุกกรณี

ตารางที่ 3.19 เปรียบเทียบการปกป้องโครงข่ายระหว่างวงแหวนและ p-cycle แบบ FCR

ทราฟฟิก	เปรียบเทียบการปกป้องโครงข่าย MLR แบบวงแหวนและ p-Cycle					
	เชื่อมโยงทำงาน		ข่ายเชื่อมโยงสำรอง		จำนวนไซเคิลที่ถูกใช้	
	ring-FCR	MLR-FCR	ring-FCR	MLR-FCR	ring-FCR	MLR-FCR
1x	65	65	88	64	9	6
2x	81	81	82	54	8	5
4x	110	110	98	68	10	6
8x	167	167	124	84	14	8
16x	329	329	214	128	22	11

ตารางที่ 3.20 เปรียบเทียบการปกป้องโครงข่ายระหว่างวงแหวนและ p-cycle แบบ MCR

ทราฟฟิก	เปรียบเทียบการปกป้องโครงข่าย MLR แบบวงแหวนและ p-Cycle					
	เชื่อมโยงทำงาน		ข่ายเชื่อมโยงสำรอง		จำนวนไซเคิลที่ถูกใช้	
	ring-MCR	MLR-MCR	ring-MCR	MLR-MCR	ring-MCR	MLR-MCR
1x	65	65	54	24	5	2
2x	81	81	66	40	6	4
4x	110	110	78	46	8	4
8x	167	167	114	70	12	6
16x	329	329	184	106	20	9

อย่างไรก็ตามสำหรับบางโครงข่ายที่มีจำนวนดีกรีโหนดน้อย ยกตัวอย่างเช่น โครงข่าย 6N_16L ไซเคิลแคนติเดตที่ได้จากโครงข่ายมีจำนวนน้อยเช่นกัน หากนำไซเคิลแคนติเดตดังกล่าว นำมาใช้สำหรับการปกป้องแบบ p-cycle พบว่าแต่ละไซเคิลแคนติเดตมีประสิทธิภาพในการปกป้องที่ค่อนข้างต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวความคิดการขยายขีดความสามารถสำหรับการปกป้อง p-cycle ให้เพิ่มสูงขึ้น (ความสามารถในการปกป้องให้ขึ้นอยู่กับโครงข่ายให้น้อยที่สุด) โดยกำหนดให้ความยาวของ straddling link เพิ่มมากขึ้นจากเดิมที่พิจารณาเพียงแค่ว่า 1 ข่ายเชื่อมโยงเท่านั้น ทำให้คาดการณ์ว่าการปกป้องโครงข่ายน่าจะมีประสิทธิภาพในการปกป้องเพิ่มสูงขึ้นพร้อมกับปรับปรุงในเรื่องการใช้ความจุ

ของไซเคิลและยังคงคุณสมบัติสวิตช์การเชื่อมต่อไปยังเส้นทางการสำรองของ p-cycle ไว้เช่นเดิม รายละเอียดจะอธิบายในส่วนถัดไปในบทที่ 4

3.6 สรุป

ในการทำวิทยานิพนธ์ในบทที่ 3 นี้ได้นำเสนอวิธีการใหม่สำหรับการออกแบบเพื่อลดต้นทุนของโครงข่าย MLR สำหรับการปกป้องโครงข่ายโดยใช้ p-cycle ร่วมกัน วิธีที่นำเสนอสร้างขึ้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้เทคนิค ILP ในการแก้ไขปัญหาแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน เริ่มจากปัญหาการจัดสรรเส้นทางแสงทำงานก่อนหลังจากนั้นทำการกำหนดอัตราบิตและการปกป้องแบบ p-cycle ไปพร้อมกัน เหตุผลที่ใช้การคำนวณ 2 ขั้นตอนเพราะต้องการให้ความซ้ำซ้อนทางตัวเลขและเวลาที่ใช้สำหรับในการคำนวณลดลงเพื่อนำไปสู่ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ผลจากการทดสอบได้แสดงถึงการจัดสรรต้นทุนของโครงข่าย MLR มีประสิทธิภาพเป็นอย่างมากสำหรับรองรับกับปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น ส่วนการปกป้องโครงข่าย MLR ในการทำวิทยานิพนธ์นี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การออกแบบโครงข่าย MLR ได้รับการปกป้องแบบอัตราบิตของไซเคิลคงที่ (MLR-FCR) และการออกแบบโครงข่าย MLR ได้รับการปกป้องแบบอัตราบิตของไซเคิลผสม (MLR-MCR) ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการปกป้องโครงข่ายแบบ MLR-MCR มีประสิทธิภาพในการปกป้องโครงข่ายมากกว่า MLR-FCR ในด้านการใช้จำนวนไซเคิลที่ต้องนำมาปกป้องให้กับโครงข่าย อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการปกป้องจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงข่ายที่นำมาทดสอบและการกำหนดจำนวนเส้นทางแสงทำงานด้วยเช่นกัน

บทที่ 4

การปกป้องแบบ extended p-cycle

4.1 บทนำ

จากบทที่ 3 ได้แสดงถึงการปกป้องโครงข่าย MLR โดยใช้ p-cycle สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ MLR-FCR และ MLR-MCR ผลการทดลองสามารถสรุปออกเป็น 2 ประเด็นดังนี้ เมื่อเทียบต้นทุนดำเนินการที่ได้จากทรานสพอนเดอร์ของโครงข่าย MLR กับโครงข่าย SLR พบว่าโครงข่าย MLR ใช้ต้นทุนในการจัดสรรและการปกป้องโครงข่ายน้อยกว่า SLR เป็นอย่างมากทั้งนี้เพราะโครงข่าย MLR ได้รับประโยชน์จากทรานสพอนเดอร์ที่อัตราบิต 40 และ 100 Gb/s ตามลำดับ ประเด็นที่สองคือ p-cycle แบบ MCR มีความสามารถในการปกป้องและให้ความยืดหยุ่นมากกว่าการปกป้องโครงข่ายด้วย p-cycle แบบ FCR เนื่องจาก MCR จะอนุญาตให้เส้นทางแสงสำรองไม่จำเป็นต้องปกป้องเส้นทางแสงทำงานที่อัตราบิตเดียวกันได้ ดังนั้นด้วยความสามารถในการปกป้องโครงข่ายในบทที่ 4 นี้จึงกำหนดให้เป็น MCR สำหรับในทุกกรณี

p-cycle จะมีความสามารถในการปกป้องโครงข่ายหรือมีประสิทธิภาพในการใช้ความจุมากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับจำนวน straddling link จากโครงข่ายที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าหากบางโครงข่ายมีส่วนประกอบของ straddling link จำนวนน้อยทำให้ความสามารถในการปกป้องหรือประสิทธิภาพในการใช้ความจุระหว่าง p-cycle และวงแหวนเกือบจะเท่ากันทุกประการ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุหนึ่งของการทำวิทยานิพนธ์ในบทที่ 4 เพื่อนำเสนอการปรับปรุงและพัฒนาความสามารถในการปกป้องของ p-cycle ซึ่งเรียกว่า extended p-cycle โดยอนุญาตให้ส่วนประกอบของ straddling link มีความยาวมากขึ้นจากเดิมโดยไม่จำเป็นต้องเหมือนกับ p-cycle อีกต่อไป

เนื้อหาในบทที่ 4 ได้นำเสนอวิธีการขยายขีดความสามารถการปกป้องด้วย extended p-cycle โดยได้นำแนวคิดของ p-cycle แบบดั้งเดิมมาใช้และปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถสำหรับการปกป้องโครงข่ายนอกจากจะมีความสามารถปกป้อง on-cycle หรือ straddling link แล้วยังสามารถปกป้องเส้นทางหรือส่วนประกอบเส้นทาง (segment) ที่ถูกรวมคลุมด้วย extended p-cycle ได้ อีกด้วย ดังนั้น extended p-cycle จึงมีโอกาสร่วมกันมากขึ้นและเป็นเหตุผลหนึ่งว่าทำไม extended p-cycle จึงสามารถลดความจุสำรองได้เป็นอย่างมากหากเทียบกับ p-cycle แบบดั้งเดิมพร้อมกันกับได้รับข้อดีในเรื่องของความเร็วในการกู้คืนระบบ (เหมือนกับ p-cycle ที่ 2 โหนดปลายทางทำหน้าที่ในการสวิตช์เข้าไปสู่เส้นทางปกป้องที่เตรียมเอาไว้ก่อนที่ความล้มเหลวจะเกิดขึ้น)

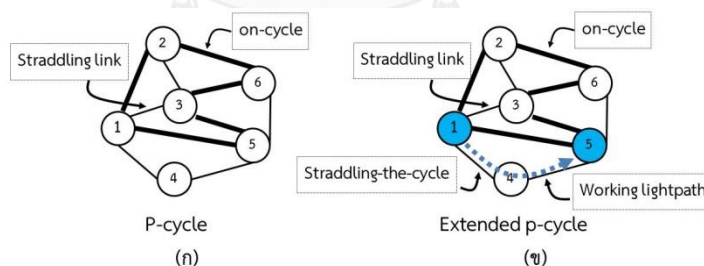
แต่สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งและยากต่อการจัดการสำหรับการใช้ extended p-cycle มาปกป้องเส้นทางหรือส่วนประกอบเส้นทางคือ วิธีจัดการด้านความจุสำรองในบางไซเคิลอาจจะถูกใช้ไม่หมด รายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 4.2.3 อย่างไรก็ตามหากพิจารณาเหตุการณ์ความล้มเหลวแล้ว จะพิจารณาแค่ความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดียวที่สามารถเกิดขึ้นได้เท่านั้น

รูปแบบที่ได้นำเสนอประกอบไปด้วย extended p-cycle สำหรับการปกป้องเส้นทาง (extended p-cycle for path protection: EPPP) extended p-cycle สำหรับปกป้องเส้นทางและส่วนประกอบของเส้นทาง (extended p-cycle for path and segment protection: EPPSP) ทั้งหมดนี้จะอยู่ในหัวข้อที่ 4.2 สำหรับหัวข้อที่ 4.3 อธิบายถึงวิธีการแก้ไขปัญหาแบบการคำนวณ 2 ขั้นตอนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอ สำหรับ 2 หัวข้อสุดท้ายคือการวิเคราะห์ผลเฉลี่ยและสรุปผลการทดลองจะอยู่ในหัวข้อที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

4.2 รูปแบบที่ได้นำเสนอ

วิธีที่ได้นำเสนอสำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR แบบ extended p-cycle แนวคิดการปกป้องโครงข่ายยังคงอยู่บนพื้นฐานของ p-cycle สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีดังต่อไปนี้

4.2.1 extended p-cycle สำหรับปกป้องเส้นทาง (EPPP)



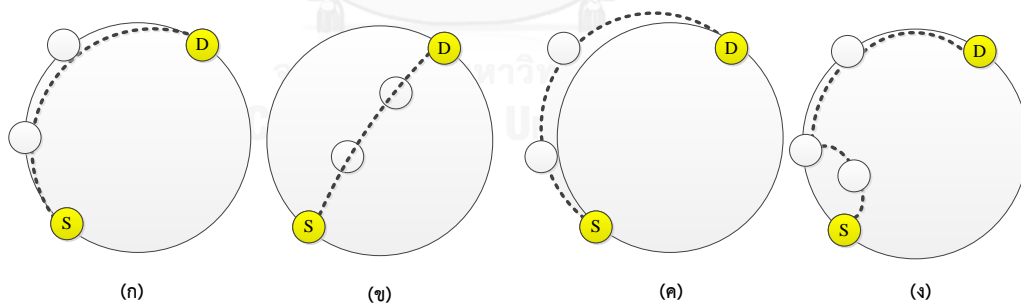
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบการปกป้องระหว่างวิธี p-cycle แบบดั้งเดิมและ EPPP

รูปที่ 4.1 (ก) แสดงถึงการปกป้อง p-cycle แบบดั้งเดิมโดยข่ายเชื่อมโยง (1,2), (2,6), (6,3), (3,5) และ (5,1) เป็นข่ายเชื่อมโยงที่วางอยู่บนไซเคิลหรือเรียกว่า on-cycle ในขณะที่ข่ายเชื่อมโยง (1,3), (2,3) และ (6,5) เป็น straddling link เมื่อมีความล้มเหลวเกิดขึ้นบนข่ายเชื่อมโยง โหนดปลายทั้ง 2 ของข่ายเชื่อมโยงนั้นจะสวิตซ์การเชื่อมต่อไปยังเส้นทางสำรองของวงแหวนที่ได้เตรียมเอาไว้ก่อนหน้า ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากข่ายเชื่อมโยง (2,6) เสียหายเส้นทาง [2-1-5-3-6] บนไซเคิลเสนอให้เป็นเส้นทางปกป้อง (1 เส้นทาง) อย่างไรก็ตามเส้นทาง [1-2-6-3] และเส้นทาง [1-5-3] ทั้ง 2 เส้นทาง

จะสามารถนำมาใช้รองรับกับ straddling link (1,3) ล้มเหลวได้ เป็นต้น รูปที่ 4.1 (ข) ได้แสดงถึงความต้องการส่งทราฟฟิกจากโหนด 1 ไปถึงโหนด 5 พิจารณาข่ายเชื่อมโยง (1,4) และ (4,5) ที่เส้นทางแสงทำงาน (1,5) เคลื่อนที่ผ่านมีลักษณะคล้ายคลึงกับ straddling link ของ p-cycle (มี 2 โหนดปลายทางตัวอยู่บนไซเคิล) ด้วยหลักการปกป้อง straddling link ของ p-cycle ทำให้เกิดแนวคิดและแรงจูงใจในการออกแบบที่มีความสามารถในการปกป้องได้ทั้งข่ายเชื่อมโยง (1,4) และ (4,5) เช่นเดียวกับ straddling link

อย่างไรก็ตามเงื่อนไขสำหรับการปกป้องเส้นทางแสงทำงานในวิธี EPPP ได้นิยามเอาไว้คือ ถ้าหากมีโหนดต้นทางและโหนดปลายทางของเส้นทางแสงทำงานใด ๆ ทับซ้อนกับไซเคิล เส้นทางแสงทำงานจะได้รับการปกป้องทั้งหมดตลอดทั้งเส้นทางไม่ว่าจะเป็นแบบ on-cycle, straddling link หรือ straddling path ดังนั้นข่ายเชื่อมโยง (1,4) และ (4,5) สามารถเรียกได้ว่าเป็นเซตของ straddling path และให้เส้นทางปกป้องมากถึง 2 เส้นทางเช่นเดียวกัน

กำหนดให้ไซเคิลเป็นไซเคิลแคนติเดตสำหรับ EPPP ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางแสงทำงานสามารถเป็นไปได้ทั้งกรณีทับซ้อนและไม่ทับซ้อนกับไซเคิล สำหรับการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP จะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่โหนดต้นทางและโหนดปลายทางของเส้นทางแสงทำงานทับซ้อนกับไซเคิลเท่านั้นแสดงไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปแบบการปกป้องโครงข่าย EPPP

รูปที่ 4.2 (ก) แสดงถึงเส้นทางแสงทำงานทั้งหมดได้ทับซ้อนกับข่ายเชื่อมโยงของไซเคิลซึ่งแต่ละข่ายเชื่อมโยงนี้สามารถเรียกว่า on-cycle รูปที่ 4.2 (ข) และ (ค) แสดงถึงเส้นทางแสงทำงานมีลักษณะคล้ายคลึงกับ straddling link เรียกข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวนี้ว่า straddling path รูปที่ 4.2 (ง) แสดงถึงความซับซ้อนที่เกิดขึ้นสำหรับการปกป้องแบบ EPPP ซึ่งประกอบไปด้วย 1 straddling path และ 2 on-cycle อย่างไรก็ตามการปกป้องแบบ EPPP ยังคงคุณลักษณะเดิมของ p-cycle คือ ถ้า

หากชายเชื่อมโยงใดเป็น straddling path หรือ straddling link ขาด EPPP จะให้เส้นทางในการปกป้องมากถึง 2 เส้นทางส่วน on-cycle จะมีความสามารถในการปกป้องเพียงแค่ 1 เส้นทางเท่านั้น

4.2.2 extended p-cycle สำหรับปกป้องเส้นทางและส่วนประกอบเส้นทาง (EPPSP)

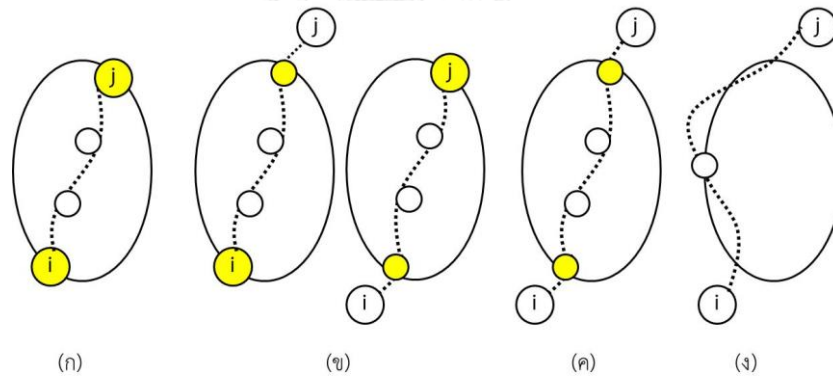
จากเทคนิคการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP มีเงื่อนไขว่าโนดต้นทางและโนดปลายทาง เส้นทางแสงทำงานจะต้องทับซ้อนกับไซเคิลที่ใช้สำหรับการปกป้อง การได้รับประโยชน์จาก straddling link และ straddling path ส่งผลถึงความต้องการความจุสำรองที่ใช้ในการปกป้องลดต่ำลงเป็นอย่างมากหากเทียบกับ p-cycle แบบดั้งเดิมแต่เงื่อนไขของ EPPP ดังกล่าวอาจจะปกป้องได้เพียงบางคูโนดที่เหมาะสมกับไซเคิลแคณติเดตเท่านั้นทำให้ไม่มีประสิทธิภาพในการใช้ความจุของไซเคิล (ไม่สามารถปกป้อง เส้นทางแสงทำงานอื่น ๆ ที่ได้รับความล้มเหลวได้ เพราะโนดต้นทางและโนดปลายทางไม่อยู่บนไซเคิล) ดังนั้นทางออกสำหรับการใช้ความจุของไซเคิลให้เป็นประโยชน์มากที่สุดคือ การเพิ่มความยาวหรือจำนวน hop ของไซเคิลให้ครอบคลุมได้ทุกคูโนดบนโครงข่าย แต่ถ้าหากนำมาพิจารณาควบคู่ไปกับการจัดสรรโครงข่าย MLR แล้วพบว่าบางทีอาจจะไม่สามารถทำการหาคำตอบได้ (infeasible solution) เพราะไม่สามารถหาไซเคิลได้อย่างเหมาะสมที่มีขนาดยาวและมีความสามารถในการรองรับการปกป้องอัตราบิดสูง ๆ จากข้อจำกัดของวิธี EPPP นี้จึงทำให้เกิดแนวคิดใหม่ที่ต้องการเพียงแค่ 2 โหนดใด ๆ วางตัวอยู่บนไซเคิลเท่านั้นก็สามารถปกป้องไม่เพียงแต่เส้นทางแต่ยังสามารถปกป้องส่วนประกอบเส้นทางได้อีกด้วยได้ และเปลี่ยนรูปแบบการปกป้องจากเดิมคือการปกป้องเส้นทางกลายเป็นการปกป้องเส้นทางและส่วนประกอบเส้นทางที่พร้อมให้ความยืดหยุ่นในการปกป้องมากกว่า EPPP และเรียกวิธีการปกป้องนี้ว่า extended p-cycle สำหรับปกป้องเส้นทางและส่วนประกอบของเส้นทางหรือเรียกสั้น ๆ ว่า EPPSP

สิ่งที่ต้องพิจารณาต่อมาสำหรับการปกป้องแบบ EPPSP คือ การหาเซต straddling segment ของเส้นทางแสงทำงาน (i, j) ที่เคลื่อนที่ผ่านไซเคิลแคณติเดต c ใด ๆ สามารถหาได้ตามข้อกำหนดดังนี้

1. ถ้าโนด i และโนด j เป็นโนดต้นทางและโนดปลายทางของเส้นทางแสงทำงานซ้อนทับกับไซเคิลแคณติเดต c โหนดสื่อกลางทั้งหมดระหว่างโนด i และโนด j (ถ้ามี) จะต้องไม่อยู่บนไซเคิลแคณติเดต c เซตของชายเชื่อมโยงที่ประกอบไปด้วยโนดสื่อกลางดังกล่าวนี้เรียกว่า straddling segment ของเส้นทางแสงทำงาน (i, j) พร้อมกับกำหนดให้ชายเชื่อมโยงอื่นที่ไม่ใช่ on-cycle, straddling link หรือ straddling segment เป็นชายเชื่อมโยงที่ไม่ได้รับการปกป้องสำหรับเส้นทางแสงทำงานตามรูปที่ 4.3 (ก)

2. ถ้าโนด i เป็นโนดต้นทางหรือโนด j เป็นโนดปลายทางอย่างใดอย่างหนึ่งแล้วซ้อนทับกับไซเคิลแคนติเดต c โหนดสื่อกลางทั้งหมดระหว่างโนด i และโนด j (ถ้ามี) จะต้องไม่อยู่บนไซเคิลแคนติเดต c เซตของข่ายเชื่อมโยงที่ประกอบไปด้วยโหนดสื่อกลางดังกล่าวนี้เรียกว่า straddling segment ของเส้นทางแสวงทำงาน (i, j) พร้อมกับกำหนดให้ข่ายเชื่อมโยงอื่นที่ไม่ใช่ on-cycle, straddling link หรือ straddling segment เป็นข่ายเชื่อมโยงที่ไม่ได้รับการปกป้องสำหรับเส้นทางแสวงทำงาน (i, j) ตามรูปที่ 4.3 (ข)
3. ถ้าคูโนด (i, j) เป็นโนดต้นทางและโนดปลายทางของส่วนประกอบเส้นทางแสวงทำงานซ้อนทับกับไซเคิลแคนติเดต c โหนดสื่อกลางทั้งหมดระหว่างโนด i และโนด j (ถ้ามี) จะต้องไม่อยู่บนไซเคิลแคนติเดต c เซตของข่ายเชื่อมโยงที่ประกอบไปด้วยโหนดสื่อกลางดังกล่าวนี้เรียกว่า straddling segment ของเส้นทางแสวงทำงาน (i, j) พร้อมกับกำหนดให้ข่ายเชื่อมโยงอื่นที่ไม่ใช่ on-cycle, straddling link หรือ straddling segment เป็นข่ายเชื่อมโยงที่ไม่ได้รับการปกป้องสำหรับเส้นทางแสวงทำงานตามรูปที่ 4.3 (ค)

สำหรับไซเคิลแคนติเดต c ใด ๆ จะไม่สามารถทำการปกป้องเส้นทางแสวงทำงานได้ก็ต่อเมื่อคูโนดของเส้นทางแสวงทำงานดังกล่าวไม่ทับซ้อนกับไซเคิลแคนติเดต c หรือทับซ้อนกับไซเคิลแคนติเดต c เพียงแค่โนดเดียวแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 (ง)



รูปที่ 4.3 รูปแบบการปกป้องโครงข่าย EPPSP

4.2.3 พิจารณาการใช้ไซเคิลร่วมกัน

ในกรณีของ EPPP

สิ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับการปกป้องโครงข่าย EPPP คือ แต่ละไซเคิลที่ใช้สำหรับการปกป้องต้องมีความเหมาะสมและคำนึงถึงคูโนดที่ทับซ้อนกับไซเคิลด้วย ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 3 ไม่สามารถนำมาใช้กับวิธี EPPP ได้เพราะทำให้ความจุสำรองในบางไซเคิลอาจจะถูกใช้ไม่หมดหรือปกป้องได้เพียงบางคูโนดเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องทำการกำหนดตัวแปร $z_{n,k}^{i,j,c}$ โดยที่ $z_{n,k}^{i,j,c}$ หมายถึงปริมาณความจุสำรองบนไซเคิลแคนติเดต c สำหรับปกป้องเส้นทางที่ n ของคูโนด (i, j) ที่อัตราบิด r_k

(ตัวแปร $z_{n,k}^{ij,c}$ ทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางที่ n ของคูโหนด (i, j) ณ อัตราบิต r_k และไซเคิลที่ใช้ในการปกป้อง) ดังนั้นการกำหนดให้ $z_{n,k}^{ij,c}$ เป็นความจุสำรองไปก่อนแล้วค่อยหาจำนวนไซเคิลที่ใช้ในการปกป้องจากตัวแปร $z_{n,k}^{ij,c}$ ภายหลังก็สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้

ในกรณีของ EPPSP

สำหรับกรณีของ EPPSP การสร้างตัวแปร z จะมีความคล้ายคลึงกับกรณีของ EPPP แต่จะแตกต่างกันเพียงแค่ต้องการ 2 โหนดใด ๆ อยู่บนไซเคิลพร้อมกับมีความสามารถในการปกป้องข่ายเชื่อมโยง/ จากเส้นทางแสงทำงาน (i, j) ในเส้นทางที่ n ณ อัตราบิต r_k เท่านั้นที่สามารถสร้างตัวแปร $z_{n,k}^{ij,c,l}$ โดยที่ตัวแปร $z_{n,k}^{ij,c,l}$ จะเป็นการกำหนดความจุสำรองไปก่อนจากนั้นแล้วค่อยหาจำนวนไซเคิลที่ใช้ในการปกป้องจากตัวแปร $z_{n,k}^{ij,c,l}$ ภายหลังก็สามารถแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP ที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้ว

4.3 การคำนวณ 2 ขั้นตอนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้สำหรับการแก้ไขปัญห RRA โดยใช้เทคนิค ILP โดยเริ่มจากปัญหาการจัดสรรเส้นทางแสงทำงานก่อนหลังจากนั้นทำการกำหนดอัตราบิตและปกป้องโครงข่ายโดยใช้ extended p-cycle พร้อมกันซึ่งเรียกวิธีการแก้ไขปัญหานี้ว่าการคำนวณ 2 ขั้นตอน เหตุผลที่ใช้การคำนวณ 2 ขั้นตอนในการแก้ไขปัญหทางคณิตศาสตร์เพราะต้องการให้ความซ้ำซ้อนทางตัวเลขและเวลาที่ใช้สำหรับในการคำนวณลดลงเพื่อนำไปสู่ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ EPPP และ EPPSP มีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4. 1 ตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี EPPP และ EPPSP

ตัวแปร	ความหมาย
$X_{n,k}^{ij} \in Z^+$	จำนวนเส้นทางแสงทำงานที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับคูโหนด (i, j) บนเส้นทางที่ n ของอัตราบิต r_k
$f_{ij}^{sd} \in Z^+$	จำนวนปริมาณทราฟฟิกสำหรับคูโหนดต้นทาง-ปลายทาง (s, d) ที่ไหลผ่านคูโหนด (i, j)
$n_k^c \in Z^+$	จำนวนครั้งที่ไซเคิลแคนดิเดต c ของอัตราบิต r_k ถูกใช้เป็นทรัพยากรสำรอง
$Z_{n,k}^{ij,c} \in Z^+$	ปริมาณความจุสำรองบนไซเคิลแคนดิเดต c ที่ถูกใช้เป็นทรัพยากรสำรองสำหรับเส้นทางที่ n ของคูโหนด (i, j) ของอัตราบิต r_k
$Z_{n,k}^{ij,c,l} \in Z^+$	ปริมาณความจุสำรองบนไซเคิลแคนดิเดต c ที่ถูกใช้เป็นทรัพยากรสำรองสำหรับการปกป้องข่ายเชื่อมโยง/ จากเส้นทางแสงทำงาน (i, j) ในเส้นทางที่ n ของอัตราบิต r_k

ตารางที่ 4. 2 พารามิเตอร์การป้อนเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการปกป้องโครงข่าย
แบบ EPPP และ EPPSP

พารามิเตอร์ การป้อนเข้า	ความหมาย
$G(N,L)$	โทโพโลยีทางกายภาพของโครงข่ายที่ประกอบไปด้วยเซตของโหนด N และเซตของ ข่ายเชื่อมโยง L
M	เซตของคูโหนด
S	เซตของโหนดคู่ต้นทาง-ปลายทาง ($s-d$)
P_l	เซตของเส้นทางที่ใช้ข่ายเชื่อมโยง l
r_k	อัตราบิตสำหรับการส่งผ่านที่ k โดยที่ $k \in K$ และ $K = \{1,2,3\}$
D_k	ต้นทุนของทรานสปอนเดอร์ของอัตราบิต r_k
C	เซตของ p-cycle
$L(p)$	ความยาวของเส้นทาง p (มีหน่วยเป็นกิโลเมตร)
$L(c)$	ความยาวของไซเคิลแคนติเดต c (มีหน่วยเป็นกิโลเมตร)
P_n^{ij}	เส้นทางแคนติเดตที่ n จากโหนด i ไปยังโหนด j โดยที่ $n = \{1,2\}$
$ W $	จำนวนความยาวคลื่นต่อเส้นใยแก้วนำแสง
Λ^{sd}	ผลรวมความต้องการของการทราฟฟิก (Gb/s) ระหว่างคูโหนด (s,d)
$\pi^{l,c}$	เท่ากับ 1 ถ้าข่ายเชื่อมโยง l อยู่บนไซเคิลแคนติเดต c และเท่ากับ 0 สำหรับในกรณี อื่น
$\omega^{ij,c}$ (EPPP)	เท่ากับ 0 ถ้าโหนดต้นทางและโหนดปลายทางของเส้นทางแสงทำงาน (i,j) ไม่ทับซ้อน กับไซเคิลแคนติเดต c และเท่ากับ 1 สำหรับในกรณีอื่น
$\psi_n^{ij,c}$ (EPPSP)	เท่ากับ 1 ถ้ามี 2 โหนดใด ๆ ของเส้นทางแสงทำงาน (i,j) ในเส้นทางที่ n ทับซ้อนกับ ไซเคิลแคนติเดต c และมีค่าเท่ากับ 0 สำหรับในกรณีอื่น
$\beta_k^{l,c}$	เท่ากับ 1 ถ้าความล้มเหลวเกิดขึ้นบนข่ายเชื่อมโยง l แล้วทำให้ความยาวของ $L(c)$ มีค่าน้อยกว่าระยะการส่งผ่านสำหรับอัตราบิต r_k และเท่ากับ 0 สำหรับในกรณีอื่น
$\xi_n^{ij,c,l}$ (EPPSP)	เซตของข่ายเชื่อมโยง l' ที่ไม่ได้รับการปกป้องซึ่งได้จากการเคลื่อนที่ของเส้นทางแสง ทำงาน (i,j) ในเส้นทางที่ n ผ่านไซเคิลแคนติเดต c
$\alpha_{n,k}^{ij}$	เท่ากับ 1 ถ้า $L(p)$ น้อยกว่าระยะการส่งผ่านสำหรับอัตราบิต r_k และเท่ากับ 0 สำหรับกรณีอื่น

กรณีของ EPPP

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

$$\min \sum_{k=1}^3 D_k \left\{ \sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1}^2 X_{n,k}^{ij} \right\} + 0.01 \sum_{c \in C} \sum_{k=1}^3 n_k^c \quad (4.1)$$

ข้อจำกัด (constraints)

$$\sum_{n=1}^2 \sum_{k=1}^3 r_k \alpha_{n,k}^{ij} X_{n,k}^{ij} \geq \sum_{(s,d) \in S} f_{ij}^{sd} \quad \forall (i,j) \in M \quad (4.2)$$

$$\sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1,2} \sum_{P_n^i \in P_i} \sum_{k=1}^3 X_{n,k}^{ij} + \sum_{c \in C} \sum_{k=1}^3 \pi^{l,c} n_k^c \leq |W| \quad \forall l \in L \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq j} f_{ij}^{sd} - \sum_{i \in N, i \neq j} f_{ji}^{sd} = \begin{cases} -\Lambda^{sd}, & j=s \\ \Lambda^{sd}, & j=d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall j \in N, \forall (s,d) \in S \quad (4.4)$$

$$X_{n,k}^{ij} \leq \sum_{c \in C} \omega^{j,c} Z_{n,k}^{ij,c} \quad \forall (i,j) \in M, \forall n \in 1,2, \forall k \in K \quad (4.5)$$

$$\sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1,2} \sum_{P_n^i \in P_i} \sum_{k=k}^3 Z_{n,k}^{ij,c} \leq \sum_{k=k}^3 (2 - \pi_l^c) \beta_k^{l,c} n_k^c, \quad \forall c \in C, \forall l \in L, \forall k \in K \quad (4.6)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ (4.1) ประกอบไปด้วยต้นทุนทั้งหมดสำหรับทรานสปอนเดอร์ที่อัตราบิดใด ๆ ซึ่งกำหนดไว้เป็นต้นทุนปฐมภูมิและจำนวนไซเคิลสำหรับการปกป้องเส้นทางแสงทำงานถูกกำหนดไว้เป็นต้นทุนทุติยภูมิ โดยผลรวมของต้นทุนทั้งสองต้องมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากต้นทุนที่ได้จากทรานสปอนเดอร์และจำนวนไซเคิลที่ใช้มีหน่วยของการวัดที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ในที่นี้จึงทำการสมมติว่าต้นทุนที่ได้จากการใช้แต่ละไซเคิลจะคิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ของราคาต้นทุนที่ได้จากทรานสปอนเดอร์ด้วยเหตุนี้จึงมีตัวประกอบ 0.01 อยู่ในพจน์ผลรวมของจำนวนไซเคิลแสดงไว้ในสมการที่ (4.1) ข้อจำกัดในสมการที่ (4.2) บ่งบอกถึงขอบเขตของกราฟฟิกได้จัดสรรไปตามเส้นทางแสงทำงานที่สร้างไว้บนแต่ละข่ายเชื่อมโยงลจจคัล ผลรวมของจำนวนช่องสัญญาณเส้นทางแสงทำงานและปริมาณความจุสำรองจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณที่ได้กำหนดไว้ในสมการที่ (4.3) ข้อจำกัดของการอนุรักษ์การไหลถูกแสดงไว้ในสมการที่ (4.4) สำหรับเส้นทาง ณ อัตราบิดใด ๆ ของกราฟฟิกในแต่ละคุโนด ความจุสำรองจะต้องมีเพียงพอต่อการใช้ไซเคิลแคนดิเดต c เป็นทรัพยากรสำรองให้กับคุโนด (i,j) ได้ก็ต่อเมื่อโนด i และโนด j ต้องอยู่บนไซเคิลแคนดิเดต c แสดงไว้ในสมการที่ (4.5) สำหรับแต่ละไซเคิลแคนดิเดต c และสำหรับแต่ละกรณีของข่ายเชื่อมโยงขาดจำนวนครั้งที่ไซเคิลถูกใช้เป็นทรัพยากรสำรองจะต้องสามารถรองรับความจุสำรองได้โดยไซเคิลแคนดิเดต c สามารถให้จำนวนเส้นทางปกป้องได้ 1 เส้นทางถ้าข่ายเชื่อมโยง/อยู่บนไซเคิลแคนดิเดต c แล้วให้เส้นทางปกป้องหรือเท่ากับ 2 เส้นทางสำหรับข่ายเชื่อมโยง/เป็น straddling link หรือ straddling path แสดงไว้ในสมการที่ (4.6)

กรณีของ EPPSP

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

$$\min \sum_{k=1}^3 D_k \left\{ \sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1}^2 X_{n,k}^{ij} \right\} + 0.01 \sum_{c \in C} \sum_{k=1}^3 n_k^c \quad (4.7)$$

ข้อจำกัด (constraints)

$$\sum_{n=1}^2 \sum_{k=1}^3 r_k \alpha_{n,k}^{ij} X_{n,k}^{ij} \geq \sum_{(s,d) \in S} f_{ij}^{sd} \quad \forall (i,j) \in M \quad (4.8)$$

$$\sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1,2} \sum_{P_n^j \in P_j} \sum_{k=1}^3 X_{n,k}^{ij} + \sum_{c \in C} \sum_{k=1}^3 \pi^{l,c} n_k^c \leq |W| \quad \forall l \in L \quad (4.9)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq j} f_{ij}^{sd} - \sum_{i \in N, i \neq j} f_{ji}^{sd} = \begin{cases} -\Lambda^{sd}, & j=s \\ \Lambda^{sd}, & j=d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall j \in N, \forall (s,d) \in S \quad (4.10)$$

$$X_{n,k}^{ij} \leq \sum_{l \in Z_{ij}^{l,c}} \sum_{c \in C} \psi_n^{ij,c} Z_{n,k}^{ij,c,l} \quad \forall (i,j) \in M, \forall n \in 1,2, \forall k \in K \quad (4.11)$$

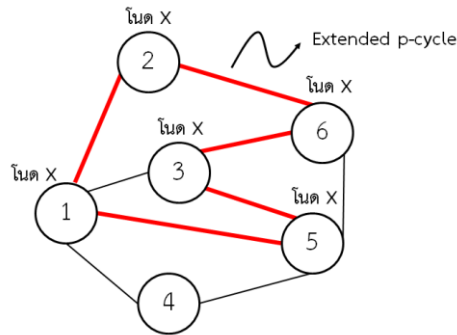
$$\sum_{(i,j) \in M} \sum_{n=1,2} \sum_{P_n^j \in P_j} \sum_{k=k}^3 Z_{n,k}^{ij,c} \leq \sum_{k=k}^3 (2 - \pi_l^c) \beta_k^{l,c} n_k^c, \quad \forall c \in C, \forall l \in L, \forall k \in K \quad (4.12)$$

สมการที่ (4.7-4.10) มีความหมายเหมือนกับสมการที่ (4.1-4.4) ในกรณีของ EPPP สำหรับเส้นทาง ณ อัตราบิดใด ๆ ของกราฟฟิกในแต่ละคู่โหนดความจุสำรองจะต้องมีเพียงพอต่อการใช้ไซเคิลแคนต์ิเดต c สำหรับทรัพยากรสำรองให้กับเส้นทางแสกทำงาน (i,j) ได้ก็ต่อเมื่อโหนดของเส้นทางแสกทำงาน 2 โหนดใด ๆ จะต้องทับซ้อนกับไซเคิลแคนต์ิเดต c และข่ายเชื่อมโยง / ต้องได้รับการปกป้องจากไซเคิลแคนต์ิเดต c แสดงไว้ในสมการที่ (4.11) สำหรับแต่ละไซเคิลแคนต์ิเดต c และสำหรับแต่ละกรณีของข่ายเชื่อมโยง / ขาด จำนวนครั้งที่ไซเคิลเป็นทรัพยากรสำรองจะต้องมีความสามารถในการรองรับความจุสำรองได้ โดยที่ไซเคิลแคนต์ิเดต c สามารถให้จำนวนเส้นทางปกป้องได้ 1 เส้นทางถ้าข่ายเชื่อมโยงอยู่บนไซเคิล c และให้เส้นทางปกป้องมากถึง 2 เส้นทางสำหรับข่ายเชื่อมโยง / เป็น straddling link หรือ straddling segment แสดงไว้ในสมการที่ (4.12)

4.3.1 กระบวนการสวิตช์และการกู้คืนระบบสำหรับกรณี EPPP และ EPPSP เมื่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งข่ายมีความล้มเหลวเกิดขึ้น

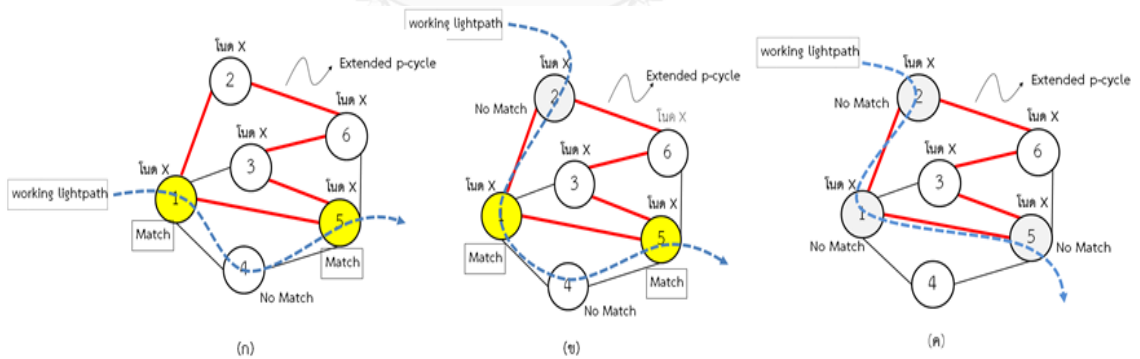
ในหัวข้อนี้ได้อธิบายถึงกระบวนการสวิตช์และการกู้คืนระบบอย่างง่ายในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวมีความล้มเหลวเกิดขึ้นกลไกการสวิตช์และการกู้คืนระบบจะเกี่ยวข้องกับตำแหน่งความล้มเหลวที่เกิดขึ้นบนเส้นทางแสกทำงานและ extended p-cycle ที่นำมาพิจารณาจะต้องมีความสัมพันธ์กันอย่างเหมาะสมซึ่งมีหลักการดังนี้

- กำหนดให้ extended p-cycle ถูกสร้างขึ้นจากโหนดที่ประกอบกันเป็นไซเคิลพร้อมกับตั้งชื่อในแต่ละโหนดของ extended p-cycle ให้อยู่ในรูปของโหนด x แสดงไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การตั้งชื่อโหนด x ให้กับไซเคิลของ extended p-cycle

- ถ้าหากมี 2 โหนดใด ๆ ของเส้นทางแสงทำงานสามารถเข้าคู่ (Match) กับโหนด x ของ extended p-cycle ตามรูปที่ 4.5 แสดงว่า extended p-cycle มีความสามารถในการปกป้อง straddling path หรือ straddling segment เมื่อข่ายเชื่อมโยงใดของ straddling path หรือ straddling segment มีความล้มเหลวเกิดขึ้นโหนดปลายของข่ายเชื่อมโยงนั้นจะส่งข้อความ (message) ไปยังโหนดข้างเคียงจนกระทั่งโหนด x รับรู้ถึงความล้มเหลวและทำการสวิตช์เข้าสู่เส้นทางสำรองที่ได้เตรียมเอาไว้



รูปที่ 4.5 กระบวนการสวิตช์ของ extended p-cycle (ก-ค)

4.4 ผลเฉลยและวิเคราะห์ผลการทดลอง

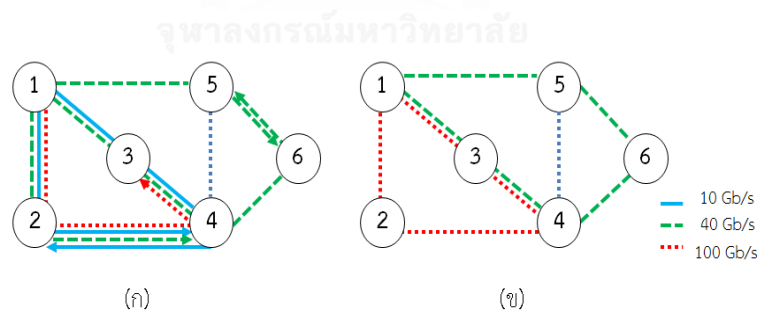
ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยเป็นผลการตอบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามหัวข้อที่ 4.3 ลักษณะโครงข่ายที่นำมาทดสอบแสดงไว้อยู่ในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.5 โดยที่ความยาวของข่ายเชื่อมโยงมีหน่วยเป็นกิโลเมตร ความต้องการทราฟฟิกระหว่างโหนดได้จากการสุ่มและ

กระจายอย่างสม่ำเสมอภายในช่วง [1-100] กำหนดให้ราคาต้นทุนของทรานสปอนเดอร์ที่อัตราบิต 10, 40 และ 100 Gb/s คือ 1, 2.5 และ 4.5 หน่วยราคาตามลำดับพร้อมกับการกำหนดระยะทางการส่งผ่านของทรานสปอนเดอร์ที่อัตราบิต 10, 40 และ 100 Gb/s มีค่าเท่ากับ 3200, 2200 และ 1880 กิโลเมตร

พิจารณาผลการทดลองระหว่างวิธี EPPP และ EPPSP สำหรับต้นทุนในการจัดสรรและทรัพยากรที่ใช้แตกต่างกันอย่างไร ในที่นี้จึงกำหนดให้คู่โหนดที่ต้องการส่งทราฟฟิกมีจำนวนเท่ากับ 5 คู่โหนดแสดงไว้เป็นตัวอย่างเบื้องต้น ซึ่งประกอบไปด้วยโหนด (1,2), (1,3), (1,4), (1,5) และ (1,6) แต่ละคู่โหนดมีความต้องการทราฟฟิกเท่ากับ 9, 83, 45, 40 และ 40 Gb/s ตามลำดับ

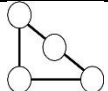
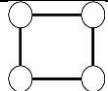
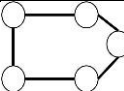
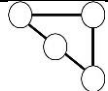
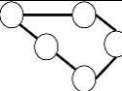

ผลการทดสอบสำหรับวิธี EPPP ของโครงข่าย 6N_16L

ตัวอย่างผลการทดสอบแสดงถึงการจัดสรรเส้นทางและการกำหนดอัตราบิตพร้อมกับการปกป้องโครงข่ายพบว่า เส้นทางแสงทำงาน (1,2) มีอัตราบิตเท่ากับ 9 Gb/s ได้รับการปกป้องจากไซเคิล [1-3-4-2-1] เส้นทางแสงทำงาน (1,3) มีอัตราบิตเท่ากับ 83 Gb/s ได้รับการปกป้องจากไซเคิล [1-3-4-2-1] เส้นทางแสงทำงาน (1,4) มีอัตราบิตเท่ากับ 45 ผลของการจัดสรรเส้นทางและการกำหนดอัตราบิตได้แบ่งออกเป็น 2 อัตราบิตในเส้นทางเดียวกันคือ 10 Gb/s และ 40 Gb/s ตามลำดับและได้รับการปกป้องจากไซเคิล [1-5-6-4-3-1] เส้นทางทำงานแสง (1,5) มีอัตราบิตเท่ากับ 40 Gb/s ได้รับการปกป้องจากไซเคิล [1-5-6-4-3-1] และเส้นทางแสงทำงาน (1,6) มีอัตราบิตเท่ากับ 40 Gb/s และได้รับการปกป้องจากไซเคิล [1-5-6-4-3-1] เช่นเดียวกัน แสดงไว้ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบจำนวน 5 คู่โหนดของวิธี EPPP (ก) การจัดสรรเส้นทางและการกำหนดอัตราบิตที่เป็นไปตามความต้องการทราฟฟิกในแต่ละคู่โหนด (ข) จำนวนและอัตราบิตของไซเคิลที่ใช้ในการปกป้องเส้นทางที่ได้จาก (ก)

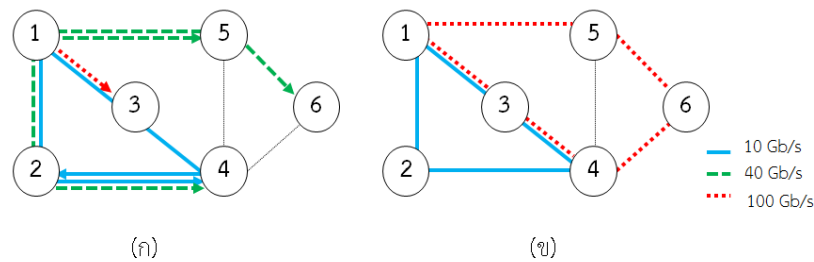
ตารางที่ 4.3 จากการทดสอบ 5 คูณของวิธี EPPP แสดงถึงความเป็นไปได้ของเส้นทางแสงทำงานจะได้รับการปกป้องจากไซเคิลแคนติเดต c

เส้นทาง แสงทำงาน	ไซเคิลแคนติเดตสำหรับโครงข่าย 6N_16L					
	 ไซเคิล 0	 ไซเคิล 1	 ไซเคิล 2	 ไซเคิล 3	 ไซเคิล 4	 ไซเคิล 5
(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	-	-	-
(1,3)	(1,3)	-	(1,3)	(1,3)	(1,3)	-
(1,4)	(1,4)	(1,4)	(1,4)	(1,4)	(1,4)	-
(1,5)	-	(1,5)	(1,5)	-	(1,5)	-
(1,6)	-	-	(1,6)	(1,6)	(1,6)	-

ตารางที่ 4.3 แสดงถึงความสามารถในการปกป้องเส้นทางแสงทำงาน (i, j) ของไซเคิลแคนติเดต c จากการทดสอบพบว่าไซเคิลแคนติเดต 5 ไม่มีความสามารถนำมาใช้ในการปกป้องเส้นทางแสงทำงานที่กำหนดไว้ได้เลย ส่วนไซเคิลที่มีความสามารถในการปกป้องจำนวนเส้นทางแสงทำงาน (i, j) มากที่สุดคือ ไซเคิลแคนติเดต 2 และ 4 เนื่องจากไซเคิลแคนติเดต 2 มีระยะทางของไซเคิลที่ยาวเกินไปไม่สามารถจัดสรรและกำหนดอัตราบิตสูง ๆ ได้ทำให้ไซเคิลแคนติเดต 2 ไม่เหมาะสมต่อการปกป้อง ดังนั้นไซเคิลแคนติเดต 4 จึงถูกใช้ในการปกป้องเส้นทางแสงทำงาน (1,4), (1,5) และ (1,6) แทนส่วนเส้นทางแสงทำงานที่เหลือได้รับการปกป้องจากไซเคิลแคนติเดต 0 ตามภาพที่ 4.6 (ข) และตาราง 4.3 ตามลำดับ

ผลการทดลองสำหรับวิธี EPPSP ของโครงข่าย 6N_16L

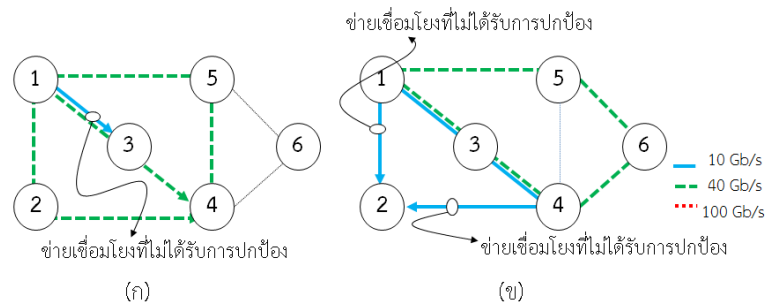
ตัวอย่างผลการทดสอบแสดงถึงการจัดสรรเส้นทางและการกำหนดอัตราบิตพร้อมกับการปกป้องโครงข่าย 6N_16L พบว่า เส้นทางแสงทำงาน (1,2) มีอัตราบิตเท่ากับ 9 Gb/s ได้รับการปกป้องจากไซเคิล [1-5-4-2-1] เส้นทางแสงทำงาน (1,3) มีอัตราบิตเท่ากับ 83 Gb/s ได้รับการปกป้องจากไซเคิล [1-5-6-4-3-1] เส้นทางแสงทำงาน (1,4) มีอัตราบิตเท่ากับ 45 Gb/s ผลของการจัดสรรเส้นทางและการกำหนดอัตราบิตได้แบ่งออกเป็น 2 เส้นทางตามรูปที่ 4.7 ประกอบไปด้วย 10 Gb/s หนึ่งเส้นทางและ 40 Gb/s อีกหนึ่งเส้นทาง โดยเส้นทางแรกได้รับการปกป้องจากไซเคิล [1-3-4-2-1] ส่วนเส้นทางที่ 2 ได้รับการปกป้องจากไซเคิล [1-5-6-4-3-1] เส้นทางแสงทำงาน (1,5) มีอัตราบิตเท่ากับ 40 Gb/s ได้รับการปกป้องจากไซเคิล [1-5-6-4-3-1] และเส้นทางแสงทำงาน (1,6) มีอัตราบิตเท่ากับ 40 Gb/s ได้รับการปกป้องจากไซเคิล [1-5-6-4-3-1] เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบจำนวน 5 โหนดของวิธี EPPSP (ก) การจัดสรรเส้นทางและการกำหนดอัตราบิตที่เป็นไปตามความต้องการทราฟฟิกในแต่ละโหนด (ข) จำนวนและอัตราบิตของไซเคิลที่ใช้ในการปกป้องเส้นทางแสงทำงานที่ได้จาก (ก)

ถัดมาเป็นตัวอย่างการแสดงถึงข่ายเชื่อมโยงของเส้นทางแสงทำงานไม่ได้รับการปกป้องจากไซเคิลแคนติเดตดังนี้ หากกำหนดให้เส้นทางแสงทำงาน (1,3) เคลื่อนที่จากโหนด 1 ไปถึงโหนด 3 ตามข่ายเชื่อมโยง (1,3) และเส้นทางแสงทำงาน (1,4) เคลื่อนที่จากโหนด 1 ไปถึงโหนด 4 ตามข่ายเชื่อมโยง (1,3) และ (3,4) พร้อมกับกำหนดให้ไซเคิล [1-5-4-2-1] เป็นไซเคิลที่ใช้ในการปกป้อง จากรูปที่ 4.8 (ก) พบว่าเส้นทางแสงทำงาน (1,4) มี 2 โหนดใด ๆ ทับซ้อนกับไซเคิลตามเงื่อนไขของ EPPSP แสดงว่าข่ายเชื่อมโยง (1,3) และ (3,4) ได้รับการปกป้องแบบ straddling segment ที่ให้จำนวนการปกป้องโครงข่ายมากถึง 2 เส้นทาง ดังนั้นข่ายเชื่อมโยง (1,3) ของเส้นทางแสงทำงาน (1,3) จึงได้รับการปกป้องไปด้วย หากพิจารณาเงื่อนไขการปกป้องของ EPPSP พบว่า เส้นทางแสงทำงาน (1,3) จะไม่สามารถได้รับการปกป้องเลยจึงจำเป็นต้องได้รับการปกป้องจากไซเคิลอื่นแทน

ต่อไปเป็นการแสดงตัวอย่างอีกชนิดหนึ่งที่ข่ายเชื่อมโยงของเส้นทางแสงทำงานไม่ได้รับการปกป้องจากไซเคิลแคนติเดต เช่น เนื่องจากจำนวนเส้นทางแคนติเดตในที่นี้กำหนดไว้มีเท่ากับ 2 เส้นทาง โดยที่เส้นทางที่ 1 และ 2 ของเส้นทางแสงทำงาน (1,2) คือเส้นทาง [1-2] และ [1-3-4-2] ตามลำดับและกำหนดให้ไซเคิล [1-5-6-4-3-1] เป็นไซเคิลที่ใช้ในการปกป้องจากรูปที่ 4.8 (ข) พบว่าในแต่ละเส้นทางแคนติเดตมีข่ายเชื่อมโยงที่ไม่สามารถทำการปกป้องจากไซเคิล [1-5-6-4-3-1] ได้แตกต่างกันคือข่ายเชื่อมโยง (1,2) และ (4,2) ในเส้นทางที่ 1 และ 2 ตามลำดับด้วยเหตุนี้การกำหนดเซตของข่ายเชื่อมโยงที่ไม่สามารถทำการปกป้องจึงขึ้นอยู่กับเส้นทางแสงทำงาน (i, j) ในเส้นทางที่ n เคลื่อนที่ผ่านไซเคิลแคนติเดต c



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างสายเชื่อมโยงของเส้นทางแสงทำงานไม่ได้รับการปกป้องจากไซเคิลแคนดิเดตแสดงไว้ในรูป (ก) และ (ข)

ผลจากตารางที่ 4.4 พบว่าไซเคิลแคนดิเดต 5 แสดงถึงรายชื่อสายเชื่อมโยงของเส้นทางแสงทำงาน (i, j) ไม่สามารถปกป้องในทุก ๆ คูณโหนดได้ ทำให้ไซเคิลแคนดิเดต 5 ไม่เหมาะสมอย่างยิ่งในการนำมาใช้สำหรับการปกป้อง ส่วนไซเคิลแคนดิเดตที่มีโอกาสใช้ในการปกป้องมากที่สุดคือไซเคิลแคนดิเดต 2 และ 4 โดยที่ไซเคิลแคนดิเดต 2 ไม่สามารถปกป้องสายเชื่อมโยง $(1,3)$ และ $(4,3)$ ในเส้นทางที่ 1 และ 2 ของเส้นทางแสงทำงาน $(1,3)$ ส่วนไซเคิลแคนดิเดต 4 ไม่สามารถปกป้องสายเชื่อมโยง $(1,2)$ และ $(4,2)$ ในเส้นทางที่ 1 และ 2 ของเส้นทางแสงทำงาน $(1,2)$ หากทำการพิจารณาปริมาณความต้องการของทราฟฟิกพบว่า เส้นทางแสงทำงาน $(1,3)$ ต้องการทราฟฟิกเท่ากับ 83 Gb/s ซึ่งเป็นอัตราบิตที่สูงมากแต่ไซเคิลแคนดิเดต 2 มีระยะทางของไซเคิลที่ยาวเกินไปไม่สามารถจัดสรรและกำหนดอัตราบิตดังกล่าวได้ ทำให้ไซเคิลแคนดิเดต 2 ไม่เหมาะสมต่อการปกป้องซึ่งไซเคิลแคนดิเดต 4 สามารถจัดการกับปัญหาเหล่านั้นได้ ดังนั้นจึงเลือกไซเคิลแคนดิเดต 4 ใช้ในการปกป้องแทนโดยสามารถปกป้องเส้นทางแสงทำงาน $(1,3)$, $(1,4)$, $(1,5)$ และ $(1,6)$ ได้ อย่างไรก็ตามยังคงเหลืออีก 1 คูณโหนดที่ยังไม่ได้รับการปกป้องจึงจำเป็นต้องได้รับการปกป้องจากไซเคิลแคนดิเดตอื่นแทนผลก็คือเส้นทางแสงทำงาน $(1,2)$ ได้รับการปกป้องจากไซเคิลแคนดิเดต 0

ตารางที่ 4.4 การทดสอบ 5 คูณโหนดของวิธี EPPSP สำหรับสายเชื่อมโยงที่ไม่ได้รับการปกป้อง

เส้นทางแสงทำงาน (i, j) ในเส้นทางที่ n	ไซเคิลแคนดิเดตสำหรับโครงข่าย 6N_16L					
	ไซเคิล 0	ไซเคิล 1	ไซเคิล 2	ไซเคิล 3	ไซเคิล 4	ไซเคิล 5
$[1,2][0]$	-	-	-	(1,2)	(1,2)	(1,2)
$[1,2][1]$	-	-	-	(4,2)	(4,2)	(1,2),(3,4)
$[1,3][0]$	-	(1,3)	(1,3)	-	-	(4,2)

[1,3][1]	-	(4,3)	(4,3)	-	-	(1,3)
[1,4][0]	-	-	-	-	-	(1,2),(2,4),
[1,4][1]	-	-	-	-	-	(4,3)
[1,5][0]	(1,5)	-	-	-	-	(1,3),(3,4)
[1,5][1]	(4,6),(6,5)	-	-	-	-	(1,2),(2,4)
[1,6][0]	(4,6)	(4,6)	-	(4,6)	-	(1,5)
[1,6][1]	(1,6),(5,6)	(5,6)	-	(5,6)	-	(1,3),(3,4)
						(1,3),(3,4)
						(1,5)

ตารางที่ 4.5-4.7 ผลการทดลองที่แสดงถึงจำนวนขยายเชื่อมโยงทำงาน ขยายเชื่อมโยงสำรอง ต้นทุนและไซเคิลที่ใช้ในการจัดสรรและการปกป้องโครงข่าย 6N_16L ตามความต้องการทราฟฟิกได้ กำหนดไว้สำหรับวิธี MLR-MCR EPPP และ EPPSP ตามลำดับ จำนวนคุโนดที่นำมาทดสอบมีทั้งหมด 8, 14, 20, 24, 26 และ 30 คุโนดและการรับส่งทราฟฟิกในที่นี้กำหนดว่าแต่ละคุโนดมีความต้องการรับส่งทราฟฟิกในอัตราบิตเดียวกัน

คุณสมบัติของไซเคิลที่ใช้ในการปกป้องประกอบไปด้วยเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้นแต่ละเส้นมีทิศทางการรับส่งแตกต่างกัน จำนวนขยายเชื่อมโยงทำงานหมายถึง จำนวนขยายเชื่อมโยงที่ใช้สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดอัตราบิตให้กับคุโนดที่นำมาทดสอบ จำนวนขยายเชื่อมโยงสำรองหมายถึง จำนวนขยายเชื่อมโยงที่ใช้ในการเชื่อมต่อกันเป็นไซเคิลเพื่อใช้ในการปกป้องขยายเชื่อมโยงทำงาน ดังนั้นหากมีกรณีใดใช้จำนวนไซเคิลในการปกป้องเป็นจำนวนมากส่งผลถึงการใช้จ่ายจำนวนขยายเชื่อมโยงสำรองมากขึ้นด้วยเช่นกัน

ผลการทดลองการปกป้องโครงข่ายแบบ MLR-MCR ในตารางที่ 4.5 พบว่าจำนวนขยายเชื่อมโยงทำงาน ขยายเชื่อมโยงสำรอง ต้นทุนและไซเคิลที่ใช้เพิ่มขึ้นตามความต้องการทราฟฟิกใช้มากที่สุดเมื่อมีความต้องการรับส่งทราฟฟิกทั้งหมด 30 คุโนดและผลรวมของทราฟฟิกมีค่าเท่ากับ 1.506 Tb/s

ตารางที่ 4.5 จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรและการปกป้องโครงข่าย 6N_16L ด้วยวิธี MLR-FCR ตามหัวข้อที่ 3.4.3

จำนวนคู่ โนด	จำนวนข่าย เชื่อมโยงทำงาน	จำนวนข่าย เชื่อมโยงสำรอง	จำนวน ไซเคิลที่ใช้	ต้นทุน	ความต้องการ ทราฟฟิก
8	12	28	3	22.03	0.372 Tb/s
14	45	65	6	44.06	0.580 Tb/s
20	40	46	7	78.07	1.178 Tb/s
24	51	66	6	74.06	1.098 Tb/s
26	68	76	9	94.09	1.502 Tb/s
30	70	76	9	100.09	1.506 Tb/s

ผลการทดสอบการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP ในตารางที่ 4.6 พบว่าผลการทดลองดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเด็น ประเด็นแรกคือ ช่วงที่มีความต้องการทราฟฟิกและจำนวนคู่โนดในการรับส่งน้อย (จำนวนคู่โนดเท่ากับ 8 และ 14 ตามลำดับ) พบว่า การปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP ต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงทำงาน ข่ายเชื่อมโยงสำรอง ต้นทุนและไซเคิลที่ใช้น้อยกว่าการปกป้องโครงข่ายแบบ MLR-MCR ประเด็นที่สองคือ ช่วงที่มีความต้องการทราฟฟิกและจำนวนคู่โนดในการรับส่งมากกว่า 14 คู่โนดเป็นต้นไป พบว่าการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP ต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงทำงาน ข่ายเชื่อมโยงสำรอง ต้นทุนและไซเคิลที่ใช้มากกว่าการปกป้องโครงข่ายแบบ MLR-MCR

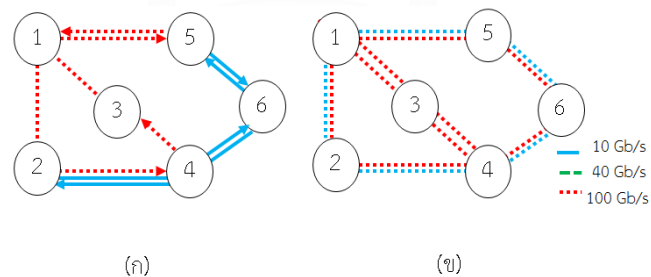
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.6 จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรและการปกป้องโครงข่าย 6N_16L ด้วยวิธี EPPP

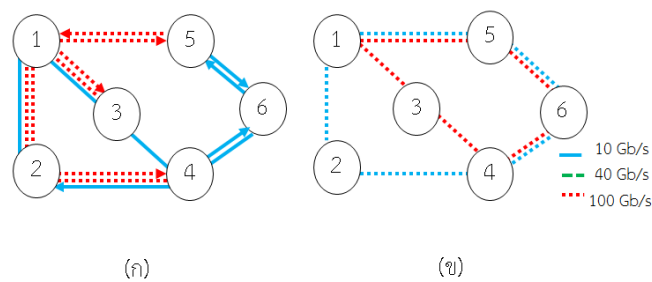
จำนวนคู่ โนด	จำนวนข่าย เชื่อมโยงทำงาน	จำนวนข่าย เชื่อมโยงสำรอง	จำนวน ไซเคิลที่ใช้	ต้นทุน	ความต้องการ ทราฟฟิก
8	16	20	2	22.02	0.372 Tb/s
14	45	38	4	44.04	0.580 Tb/s
20	96	102	11	91.11	1.178 Tb/s
24	70	74	8	80.08	1.098 Tb/s
26	124	138	14	104.14	1.502 Tb/s
30	138	146	15	117.15	1.506 Tb/s

หากพิจารณาจำนวนคูโนดที่ 8 และ 14 พบว่า การจัดสรรและปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี EPPP ใช้ทรัพยากรน้อยกว่าการปกป้องโครงข่ายแบบ MLR-MCR เพราะการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP ใช้ไซเคิลสำหรับการปกป้องได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าโดยได้รับประโยชน์จาก straddling path ยกตัวอย่างเช่น กำหนดให้ความต้องการทราฟฟิกสำหรับคูโนด (1,5), (5,1), (3,4) และ (4,3) มีค่าเท่ากับ 90, 90, 82 และ 82 Gb/s และคูโนด (2,6), (6,2), (5,6) และ (6,5) มีความต้องการทราฟฟิกเท่ากับ 8, 8, 6 และ 6 Gb/s ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า การปกป้องโครงข่าย EPPP ต้องการไซเคิลน้อยกว่าการปกป้องโครงข่าย MLR-MCR เป็นเพราะวิธี EPPP ต้องการจัดสรรเส้นทางแสงทำงานในระยะทางยาว ซึ่งในระยะทางดังกล่าวอาจจะประกอบไปด้วย straddling path และทำให้การปกป้องโครงข่ายไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนไซเคิลให้กับระบบ พร้อมกับใช้ cycle ร่วมกันมากขึ้นในการปกป้อง ด้วยเหตุนี้การปกป้องโครงข่าย EPPP จึงใช้จำนวนทรัพยากรในการจัดสรรและปกป้องโครงข่ายน้อยกว่า MLR-MC

หากมีความต้องการรับส่งทราฟฟิกของจำนวนคูโนดมากขึ้น การจัดสรรเส้นทางหรือจำนวนการใช้เส้นทางแสงทำงานของ EPPP ยังคงมากกว่า MLR-MCR แต่จำนวนไซเคิลที่ใช้ในการปกป้องหรือจำนวนขั้วเชื่อมโยงสำรองก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันเป็นเพราะข้อกำหนดในการใช้ไซเคิลมาปกป้องคูโนดใด ๆ ของ EPPP อาจทำให้ไซเคิลไม่สามารถทำการปกป้องในบางคูโนดได้ ทำให้ต้องใช้ไซเคิลแคนดิเดตอื่นเพิ่มเติมแทน ด้วยเหตุนี้ต้นทุนที่ใช้ในการจัดสรรหรือทรัพยากรที่ถูกใช้ในโครงข่ายด้วยวิธี MLR-MCR จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและใช้น้อยกว่าวิธี EPPP อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.9 การจัดสรรเส้นทางและกำหนดอัตราบิตสำหรับปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี MLR-MCR แสดงไว้ในรูป (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 การจัดสรรเส้นทางและกำหนดอัตราบิตสำหรับปกป้องโครงข่ายด้วยวิธี EPPP แสดงไว้ในรูป (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรและการปกป้องโครงข่าย 6N_16L ด้วยวิธี EPPSP

จำนวนคู่ โนด	จำนวนข่าย เชื่อมโยงทำงาน	จำนวนข่าย เชื่อมโยงสำรอง	จำนวน ไซเคิลที่ใช้	ต้นทุน	ความต้องการ ทราฟฟิก
8	19	20	2	22.02	0.372 Tb/s
14	45	30	3	44.03	0.580 Tb/s
20	71	36	4	78.04	1.178 Tb/s
24	78	26	3	74.03	1.098 Tb/s
26	102	48	5	97.05	1.502 Tb/s
30	130	46	5	100.05	1.506 Tb/s

สำหรับการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPSP ในตารางที่ 4.7 พบว่า ไม่ว่าจำนวนคู่โนดหรือความต้องการทราฟฟิกที่นำมาทดสอบจะมากหรือน้อยเพียงใด จำนวนข่ายเชื่อมโยงสำรอง ต้นทุนและไซเคิลที่ใช้มีจำนวนน้อยกว่าการปกป้องโครงข่ายแบบ MLR-MCR และ EPPP ในทุกกรณี โดยที่การจัดสรรโครงข่ายของ EPPSP ยังคงต้องการจัดสรรเส้นทางแสงทำงานที่ยาวกว่าหากนำมาเปรียบเทียบกับ การจัดสรรโครงข่ายแบบ MLR-MCR ซึ่งเหมือนกันกับกรณี EPPP เพื่อให้เส้นทางดังกล่าวมีโอกาสได้รับประโยชน์จาก straddling segment และการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPSP มีเงื่อนไขในการเลือกไซเคิลค่อนข้างยืดหยุ่นมากกว่าการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP พร้อมกับสามารถแก้ไขปัญหาเส้นทางแสงทำงานที่อัตราบิตสูงสำหรับการรับส่งข้อมูลในระยะทางไกลได้ ดังนั้นไซเคิลที่ได้รับเลือกจึงมีโอกาสแชร์ไซเคิลกันมากขึ้นทำให้จำนวนไซเคิลที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายทั้งหมดมีจำนวนน้อยดังตัวเลขที่แสดงไว้ในตาราง

เพื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของโครงข่ายมีผลต่อการจัดสรรทรัพยากรและต้นทุนที่ใช้ อย่างไรก็ตาม ในที่นี้จึงได้ทำการทดสอบกับโครงข่าย 6N_20L โดยที่ความยาวข่ายเชื่อมโยงมีระยะทางสั้นและค่าเฉลี่ยของดีกรีในแต่ละโนดซึ่งเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 3.34 สำหรับจำนวนคุโนดและความต้องการทราฟฟิกที่นำมาทดสอบเหมือนกับการทดลองของโครงข่าย 6N_16L ทุกประการ

สำหรับผลการทดสอบการปกป้องโครงข่ายแบบ MLR-MCR ไม่ว่าจะจำนวนคุโนดที่นำมาทดสอบหรือความต้องการทราฟฟิกจะเพิ่มขึ้นเพียงใดจำนวนเชื่อมโยงสำรอง ต้นทุนและไซเคิลที่ใช้มีความต้องการเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ความต้องการทรัพยากรดังกล่าวมีความต้องการน้อยมากหากนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของโครงข่าย 6N_16L เนื่องจากจำนวนค่าเฉลี่ยดีกรีของแต่ละโนดเพิ่มขึ้นทำให้ส่งผลต่อจำนวน straddling link ที่บรรจุอยู่ในแต่ละไซเคิลแคตดิตเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้น MLR-MCR จึงได้รับประโยชน์การปกป้องจาก straddling link ทำให้โครงข่ายต้องการเพียงแค่ 1 หรือ 2 ไซเคิลก็เพียงพอต่อการปกป้องแล้วแสดงไว้ในตารางที่ 4.8

เมื่อนำผลการทดสอบของการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP มาเปรียบเทียบกับโครงข่าย 6N_16L พบว่าจำนวนข่ายเชื่อมโยงสำรอง ต้นทุนและจำนวนไซเคิลที่ใช้ในการปกป้องมีความต้องการน้อยลงมากแต่ยังคงมีความต้องการมากกว่าการปกป้องโครงข่ายแบบ MLR-MCR อยู่ดีเป็นเพราะข้อจำกัดในการเลือกไซเคิลมาใช้สำหรับการปกป้อง แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรโครงข่าย 6N_20L ด้วยวิธี MLR-FCR ตามหัวข้อที่ 3.4.3

จำนวนคุโนด	จำนวนข่ายเชื่อมโยงทำงาน	จำนวนข่ายเชื่อมโยงสำรอง	จำนวนไซเคิลที่ใช้	ต้นทุน	ความต้องการทราฟฟิก
8	11	12	1	22.01	0.372 Tb/s
14	30	12	1	44.01	0.580 Tb/s
20	38	12	1	78.01	1.178 Tb/s
24	52	22	2	74.02	1.098 Tb/s
26	54	24	2	94.02	1.502 Tb/s
30	71	24	2	100.02	1.506 Tb/s

ตารางที่ 4.9 จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรโครงข่าย 6N_20L ด้วยวิธี EPPP

จำนวนคู่ โนด	จำนวนข่ายเชื่อมโยง ทำงาน	จำนวนข่าย เชื่อมโยงสำรอง	จำนวน ไซเคิลที่ใช้	ต้นทุน	ความต้องการ ทราฟฟิก
8	11	12	1	22.01	0.372 Tb/s
14	35	22	2	44.02	0.580 Tb/s
20	36	24	2	78.02	1.178 Tb/s
24	56	32	3	74.03	1.098 Tb/s
26	60	46	4	94.04	1.502 Tb/s
30	66	48	4	100.04	1.506 Tb/s

ตารางที่ 4.10 จำนวนทรัพยากรที่ใช้สำหรับการจัดสรรโครงข่าย 6N_20L ด้วยวิธี EPPSP

จำนวนคู่ โนด	จำนวนข่ายเชื่อมโยง ทำงาน	จำนวนข่าย เชื่อมโยงสำรอง	จำนวน ไซเคิลที่ใช้	ต้นทุน	ความต้องการ ทราฟฟิก
8	11	12	1	22.01	0.372 Tb/s
14	30	12	1	44.01	0.580 Tb/s
20	38	12	1	78.01	1.178 Tb/s
24	52	22	2	74.02	1.098 Tb/s
26	54	24	2	94.02	1.502 Tb/s
30	71	24	2	100.02	1.506 Tb/s

ประเด็นสำคัญอยู่ที่ผลการทดสอบการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPSP ไม่ว่าจะจำนวนคู่โนดหรือความต้องการทราฟฟิกจะเพิ่มขึ้นเพียงใด การปกป้องโครงข่ายแบบ EPPSP ให้ผลลัพธ์ดังเช่นการทดลองของ MLR-MCR ทุกประการ เนื่องจากโครงข่าย 6N_20L มีความยาวในแต่ละข่ายเชื่อมโยงลดลงและค่าเฉลี่ยดีกรีโนดเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงไซเคิลที่นำมาใช้ในการปกป้องสามารถครอบคลุมได้ทุกโนดบนโครงข่ายและมีความสามารถปกป้องในอัตราบิดสูง ๆ พร้อมกับไซเคิลดังกล่าวมี straddling link บรรจุอยู่ในไซเคิลเป็นมากมายทำให้การปกป้องแบบ EPPSP ไม่มีความจำเป็นต้องการใช้ประโยชน์จาก straddling segment สำหรับการปกป้องโครงข่ายเลย จำนวนไซเคิลที่ใช้ในการปกป้องจึงมีจำนวนเท่ากับวิธี MLR-MCR ทุกประการแสดงไว้ในตารางที่ 4.10

4.5 สรุป

ในการพัฒนา extended p-cycle ได้นำแนวคิดของ p-cycle แบบดั้งเดิมมาใช้และปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถสำหรับการปกป้องโครงข่าย นอกจากนี้จะมีความสามารถในการปกป้องไม่เพียงแต่ on-cycle หรือ straddling link แล้วยังสามารถปกป้อง straddling path (กรณีของ EPPP) และ straddling segment (กรณีของ EPPSP) ทำให้ extended p-cycle มีความสามารถปกป้องเส้นทางหรือส่วนประกอบเส้นทางได้อีกด้วย ดังนั้น extended p-cycle จึงมีโอกาสแพร่กระจายความรู้ร่วมกันมากขึ้นและเป็นสาเหตุหนึ่งว่าทำไม extended p-cycle จึงสามารถลดความจุสำรองที่ต้องการนำมาใช้ในการจัดสรรให้กับโครงข่ายได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามสิ่งที่ยากต่อการจัดการสำหรับ extended p-cycle ใช้ในการปกป้องคือวิธีการจัดการความจุสำรองในบาง cycle อาจจะถูกใช้ไม่หมดจึงต้องทำการกำหนดตัวแปร z เป็นความจุสำรองไปก่อนแล้วค่อยหาจำนวนไซเคิลที่ใช้สำหรับการปกป้องจากตัวแปร z ภายหลังก็สามารถแก้ไขปัญหาด้านความจุจากการใช้ไซเคิลในการปกป้องได้ สำหรับการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPSP สิ่งที่ต้องทำการพิจารณาต่อมาคือ การหาเซตของ straddling segment ซึ่งจะแตกต่างไปจาก straddling path ของการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP อย่างชัดเจนเพราะเซตของ straddling segment ขึ้นอยู่กับเส้นทางแสงทำงาน (i, j) ในเส้นทางที่ n ผ่านไซเคิลแคนติเดต c จะให้เซตของ straddling segment ได้แตกต่างกันและจะมีบางข่ายเชื่อมโยงที่ไม่สามารถทำการปกป้องได้ ผลการทดลองได้ทำการทดสอบกับ 2 โครงข่ายพบว่า หากโครงข่ายมีการรับส่งทราฟฟิกด้วยจำนวนคุโนดน้อย การปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP ใช้ต้นทุนและการจัดสรรทรัพยากรน้อยกว่า MLR-MCR แต่ถ้ามีจำนวนคุโนดในการรับส่งทราฟฟิกเป็นจำนวนมากการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP ต้องการใช้ต้นทุนและการจัดสรรมากกว่า MCR-MLR อย่างไรก็ตามการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPSP ใช้ต้นทุนและการจัดสรรโครงข่ายได้น้อยที่สุดสำหรับทุกกรณี ผลจากการทดสอบกับโครงข่ายที่สองโดยที่ความยาวของข่ายเชื่อมโยงสั้นลงและค่าเฉลี่ยของดีกรีในแต่ละโนดเพิ่มสูงขึ้นซึ่งบ่งบอกถึงไซเคิลดังกล่าวที่นำมาใช้ในการปกป้องจะสามารถครอบคลุมได้ทุกโนดบนโครงข่ายและมีความสามารถในการปกป้องในอัตราที่สูง ๆ ได้ พร้อมกับไซเคิลดังกล่าวมี straddling link บรรจุอยู่ในไซเคิลเป็นจำนวนมาก ทำให้การปกป้องโครงข่ายแบบ EPPSP ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ straddling segment ในการปกป้องเลย ดังนั้นหากต้องการพิจารณาถึงวิธีที่ใช้ในการปกป้องโครงข่ายจะต้องคำนึงถึงจำนวนการรับส่งของคุโนดที่ต้องการและลักษณะทางกายภาพของโครงข่ายที่นำมาทดสอบด้วย อย่างไรก็ตามการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPSP จะสามารถรองรับปัญหาเหล่านั้นได้เป็นอย่างดี

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาวิธีการจัดสรรเส้นทาง การกำหนดอัตราบิตและการปกป้องโครงข่าย MLR เพื่อแก้ไขปัญหาความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงเดี่ยวเกิดขึ้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีดังนี้ การจัดสรรเส้นทาง การกำหนดอัตราบิตและการปกป้องโครงข่ายแบบ p-cycle EPPP และ EPPSP โดยวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ คือ ต้นทุนที่ใช้ในการจัดสรรทรัพยากรโครงข่ายทั้งหมดที่ประกอบไปด้วยต้นทุนของทรานสปอนเดอร์สำหรับอัตราบิตใด ๆ กำหนดไว้เป็นต้นทุนปฐมภูมิ และจำนวนไซเคิลถูกใช้สำหรับการปกป้องกำหนดไว้เป็นต้นทุนทุติยภูมิ โดยผลรวมของต้นทุนทั้งหมดต้องมีค่าน้อยที่สุด พร้อมกับทำการเปรียบเทียบในแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันอย่างไร

การมีข้ออัตราบิตในการรับส่งข้อมูลนอกจากจะได้รับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นแล้วยังส่งผลต่อการใช้ต้นทุนในการจัดสรรทรัพยากรของโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย เนื่องจากได้รับประโยชน์จากทรานสปอนเดอร์ที่อัตราบิต 40 หรือ 100 Gb/s ซึ่งเรียกโครงข่ายนี้ว่าโครงข่ายอัตราสายผสมหรือโครงข่าย MLR แต่การด้อยค่าของสัญญาณได้จำกัดระยะทางการเคลื่อนที่ของสัญญาณเชิงแสงทำให้เส้นทางแสงทำงานของอัตราบิตสูง ๆ ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในระยะทางไกล ๆ แต่สิ่งที่จำเป็นที่สุดสำหรับการออกแบบคือ การปกป้องโครงข่าย MLR

วิธีการแก้ไขปัญหามาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้เทคนิค ILP โดยเริ่มจากการแก้ไขปัญหาการจัดสรรเส้นทางแสงทำงานก่อน จากนั้นค่อยกำหนดอัตราบิตและการปกป้องโครงข่ายที่หลังพร้อมกัน และเรียกวิธีการแก้ไขปัญหานี้ว่าการคำนวณ 2 ขั้นตอน เหตุผลในการใช้การคำนวณ 2 ขั้นตอนเพราะต้องการให้ความซับซ้อนทางตัวเลขและเวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลงเพื่อนำไปสู่ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ

การนำ p-cycle ใช้สำหรับการปกป้องที่นำเสนอไว้สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี วิธีแรกคือการปกป้องโครงข่ายแบบ MLR-FCR เป็นวิธีการปกป้องที่อนุญาตให้แต่ละไซเคิลสามารถปกป้องเส้นทางแสงทำงานได้ก็ต่อเมื่อไซเคิลที่ใช้ในการปกป้องต้องมีอัตราบิตเดียวกันกับเส้นทางแสงทำงาน ส่วนวิธีที่สองคือการปกป้องโครงข่ายแบบ MCR เป็นวิธีการปกป้องที่อนุญาตให้แต่ละไซเคิลสามารถปกป้องเส้นทางแสงทำงานที่อัตราบิตใดก็ได้ ผลการทดลองได้ทำการทดสอบกับโครงข่าย 6N_16L เป็น

โครงข่ายที่มีความยาวของข่ายเชื่อมโยงค่อนข้างมากและค่าเฉลี่ยดีกรีแต่ละโนดต่ำ ส่งผลให้ไซเคิลแคนดิเดตที่นำมาทดสอบมีประสิทธิภาพในการปกป้องค่อนข้างต่ำหรือไม่ค่อยได้รับประโยชน์จาก straddling link ไม่ว่ากราฟฟิกจะมีปริมาณมากขึ้นเพียงใด ต้นทุนที่ได้จากโครงข่าย MLR จะมีค่าน้อยกว่าโครงข่าย SLR เสมอ หากทำการวิเคราะห์จำนวนไซเคิลที่ถูกใช้ในการปกป้องโครงข่ายทั้งในแบบ FCR และ MCR พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

ต่อมาได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการปกป้องโครงข่ายแบบวงแหวน (ring protection) และ p-cycle (ทั้งแบบ FCR และ MCR) โดยกำหนดให้เส้นทางแสงทำงานในทุกคู่โหนดมีเส้นทางการรับส่งกราฟฟิกเหมือนกันทุกประการ ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณข่ายเชื่อมโยงสำรองหรือจำนวนไซเคิลที่ถูกใช้ทั้งแบบวงแหวนและ p-cycle แตกต่างกันอย่างน้อยมาก นั่นก็เป็นการยืนยันว่าในแต่ละไซเคิลแคนดิเดตที่นำมาใช้ไม่สามารถได้รับประโยชน์จาก straddling link เท่าที่ควร สาเหตุเป็นเพราะข้อจำกัดทางกายภาพของโครงข่าย 6N_16L ที่นำมาทดสอบและการเส้นทางที่ใช้ในการทดสอบ

เนื่องจากโครงข่าย 6N_16L เป็นโครงข่ายที่ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาทดสอบกับการปกป้องแบบ p-cycle มากนัก จึงทำการทดสอบกับโครงข่ายที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกับโครงข่าย 6N_16L อย่างสิ้นเชิงคือ มีระยะทางของข่ายเชื่อมโยงสั้นลงและค่าเฉลี่ยของดีกรีในแต่ละโนดเพิ่มสูงขึ้น เรียกโครงข่ายนี้ว่าโครงข่าย 6N_20L ผลการทดสอบพบว่า การได้รับประโยชน์จาก straddling link สำหรับการปกป้องโครงข่าย 6N_20L ทำให้ไม่จำเป็นต้องการใช้ไซเคิลจำนวนมากนัก โดยจำนวนไซเคิลที่ต้องการสำหรับการปกป้องแบบ p-cycle (ทั้งแบบ FCR และ MCR) น้อยกว่าวงแหวนในทุกกรณี ส่วนวิธีการปกป้องโครงข่ายแบบ MCR ต้องการจำนวนไซเคิลน้อยกว่า FCR ในทุกกรณีด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตามสำหรับโครงข่ายที่มีจำนวนดีกรีในแต่ละโนดน้อยหรือลักษณะทางกายภาพไม่เอื้ออำนวยต่อการปกป้องแบบ p-cycle จึงทำให้เกิดแนวคิดการขยายขีดความสามารถสำหรับการปกป้องนี้ที่อนุญาตให้ความยาวของ straddling link มีความมากกว่า 1 ข่ายเชื่อมโยงและเรียกการปกป้องโครงข่ายแบบนี้ว่า extended p-cycle ซึ่งหลักการของ extended p-cycle ได้นำแนวคิดแบบดั้งเดิมของ p-cycle มาใช้และปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการปกป้อง นอกจากนี้จะมีความสามารถในการปกป้อง on-cycle และ straddling link แล้วยังสามารถปกป้องเส้นทางหรือส่วนประกอบเส้นทางได้อีกด้วย extended p-cycle จึงมีความสามารถในการลดความจุสำรองได้เป็นอย่างมากหากนำมาเปรียบเทียบกับ p-cycle

วิธีที่ได้นำเสนอสำหรับการปกป้องโครงข่าย MLR แบบ extended p-cycle สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีดังนี้ วิธี EPPP มีข้อกำหนดในการปกป้องคือ หากมีโหนดต้นทางและโหนดปลายทางของเส้นทางแสงทำงานทับซ้อนอยู่บนไซเคิล เส้นทางแสงทำงานนั้นจะได้รับการปกป้องตลอดทั้งเส้นทาง และวิธี EPPSP มีข้อกำหนดในการปกป้องคือ เพียงแค่ต้องการ 2 โหนดใด ๆ ของเส้นทางแสงทำงานวางตัวบนไซเคิลเท่านั้นก็สามารถปกป้องไม่เพียงแค่เส้นทางแต่ยังสามารถปกป้องส่วนประกอบของเส้นทางได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตามสิ่งที่ยากและต้องคำนึงที่สุดสำหรับการนำ extended p-cycle มาใช้ในการปกป้องคือ เรื่องความจุสำรองของไซเคิลที่ถูกใช้สำหรับปกป้อง สามารถแก้ปัญหาได้โดยสร้างตัวแปร z ขึ้นมา โดยกำหนดให้ตัวแปร z เป็นปริมาณความจุสำรองไปก่อนจากนั้นแล้วค่อยหาจำนวนไซเคิลถูกใช้ในการปกป้องจากตัวแปร z ภายหลังก็สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้

ผลการทดลองได้ทำการทดสอบกับ 2 โครงข่าย พบว่าหากโครงข่ายมีจำนวนโหนดในการรับส่งเป็นจำนวนน้อย การปกป้องโครงข่ายแบบ EPPP ใช้ต้นทุนและการจัดสรรโครงข่ายน้อยกว่า MLR-MCR แต่ถ้าโครงข่ายต้องการจำนวนโหนดในการรับส่งเป็นจำนวนมาก EPPP ต้องใช้ต้นทุนและการจัดสรรโครงข่ายมากกว่า MLR-MCR อย่างไรก็ตามการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPSP ใช้ต้นทุนและการจัดสรรโครงข่ายได้น้อยที่สุด หากนำวิธีดังกล่าวมาทำการทดสอบกับโครงข่าย 6N_20L พบว่าการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPSP ไม่มีความจำเป็นในการใช้ประโยชน์จาก straddling segment เลยเนื่องจากได้รับประโยชน์จาก straddling link ที่บรรจุอยู่ในไซเคิลแคนติเดตก็เพียงพอต่อการปกป้องแล้ว ดังนั้นหากจะพิจารณาถึงวิธีที่การปกป้องโครงข่ายจะต้องคำนึงถึงจำนวนการรับส่งของโหนดและลักษณะทางกายภาพของโครงข่ายที่นำมาทดสอบด้วย อย่างไรก็ตามการปกป้องโครงข่ายแบบ EPPSP สามารถรองรับกับปัญหาเหล่านั้นได้เป็นอย่างดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. พิจารณาจำนวนเส้นทางแคนติเดตของเส้นทางแสงทำงานมากกว่า 2 เส้นทางทำให้เส้นทางอื่นอาจมีความเหมาะสมมากกว่าถูกนำมาพิจารณา ส่งผลให้การปกป้องโครงข่ายแบบ p-cycle ได้รับประโยชน์จาก straddling link มากขึ้น
2. จำนวนโหนดและสายเชื่อมโยงของโครงข่ายที่มากขึ้น ส่งผลให้จำนวนไซเคิลแคนติเดตมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการคำนวณโดยพิจารณาจากจำนวนไซเคิลทั้งหมดบางทีอาจจะเป็นไปได้หรือไม่สามารถหาคำตอบได้เนื่องจากจำนวนตัวแปรที่มีมากเกินไป ด้วยเหตุนี้ควรมี

อัลกอริทึมในการหาเฉพาะเซตไซเคิลแคนดิเดตที่มีประสิทธิภาพในการปกป้องโครงข่ายก่อนแทนที่จะพิจารณาไซเคิลแคนดิเดตทั้งหมด ส่งผลให้ช่วยลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณลงได้เป็นอย่างมาก

3. หลังจากพิจารณาการปกป้องแบบ extended p-cycle พบว่า การปกป้องกันดังกล่าวสามารถรองรับความล้มเหลวที่เกิดจากสายเชื่อมโยงหลายสายได้ และยังสามารถรองรับความล้มเหลวที่เกิดขึ้นบนโนดสื่อกลางได้อีกด้วย จึงควรทำการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วนำวิธีดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับวิธีที่ได้นำเสนอว่ามีผลแตกต่างกันอย่างไร



รายการอ้างอิง

1. P. Saengudomlert. Optical Networks. Asian Institute of Technology. Course Notes. January 2013: pp. 1-7
2. K. Christodoulopoulos, and K. Manmousakis, and E. Varvarigos, Offline Routing and Wavelength Assignment in Transparent WDM Networks. IEEE/ACM Transaction on Networking Vol. 18, Issue 5 .03 Oct. 2010: pp. 1557-1570
3. S. Ramamurthy, and L. Sahasrabudde, and B. Mukherjee. Survivable WDM Mesh Network. IEEE/OSA J. Lightwave Tech. Vol. 21, Issue 4, April 2003. pp. 870-883
4. W.D. Grover, and D. Stamatelakis. Cycle-oriented distributed preconfiguration: ring-link speed with mesh-like capacity for self-planning network restoration. Proceeding of IEEE ICC 1998, 7-11 June 1998. pp.537-543
5. X Lui and S. Chandrasekhar. High spectral efficiency mixed 10G/40G/100G transmission. in Optical Fiber Communication & Conference, 30 Oct. 2008-2 Nov.2008. pp. 1-3
6. A. Weissberger, Verizon to deliver 100 Gbps on more than 10 US optical backbone route in 2011 [online]. Sep 2011
<http://community.comsoc.org/blogs/alanweissberger/verzon-deliver-100-gbps-and-1-tbps-dedm-prototype.html>
7. T. Wuth, and M. W. Chbat, and V. F. Kamalov. Multi-rate (100 G/40 G/10 G) transponder over deployed optical networks. in Optical Fiber Communication & Conference. 2008. pp. 1-9
8. A. Nag and M. Tornatore. Optical network design with mixed line rate. Optical Switching and networking. Vol. 6, No. 4. Dec 2009. pp. 227-234
9. K. Christodoulopoulos, and K. Manmousakis, and E. Varvarigos, Reach adapting algorithm for mixed line rate WDM transport network. IEEE/OSA journal of lightpath Technology. Vol. 29, no. 21. Nov. 2011. pp. 3350-3363

10. A. Nag and M. Tornatore, Transparent optical network design with mixed line rate, IEEE Adv. Netw. Telecommun. Syst. (ANTS), 15-17 Dec 2008, pp. 1-3
11. A. Nag and M. Tornatore, Transparent vs. translucent optical network design with mixed line rate. Optical fiber communication. 2009: pp. 1-3
12. Y.Lui et al. Green IP over WDM optical design for mixed line rate and limited transmission reach. In Proc. COIN 2013. China, 28-30 Jun 2013
13. M. Lui, M. Tornatore, M, and B. Mukherjee. New strategies for connection protection in mixed-line-rate optical WDM networks. Journal of Optical communication and Networking, Vol. 3, issue 9. 11 Aug. 2011, pp. 641-650
14. H. Drid, N. Brochier, E. Le Rouzie, N. Ghani, P-cycle design for mixed-line-rate optical networks. Proc. ONDM 2012, Essex, UK, 2012
15. Yen, Jin, Y. An algorithm for finding shortest routest from all source to a given destination in general networks. Quarterly of Applied Mathematic 27. pp. 526-530
16. Donald B. Johnson. Finding all the elementary circuits of a directed graph. SIAM J. 1975, pp. 77-84

รายการอ้างอิง



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย พุฒิพงศ์ ศรีแสง เกิดเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2555



