

การวางแผนทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นแบบสถิตสำหรับกราฟิกชนิดมัลติคาสต์



นายพรพงศ์ ชิวชรัตน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

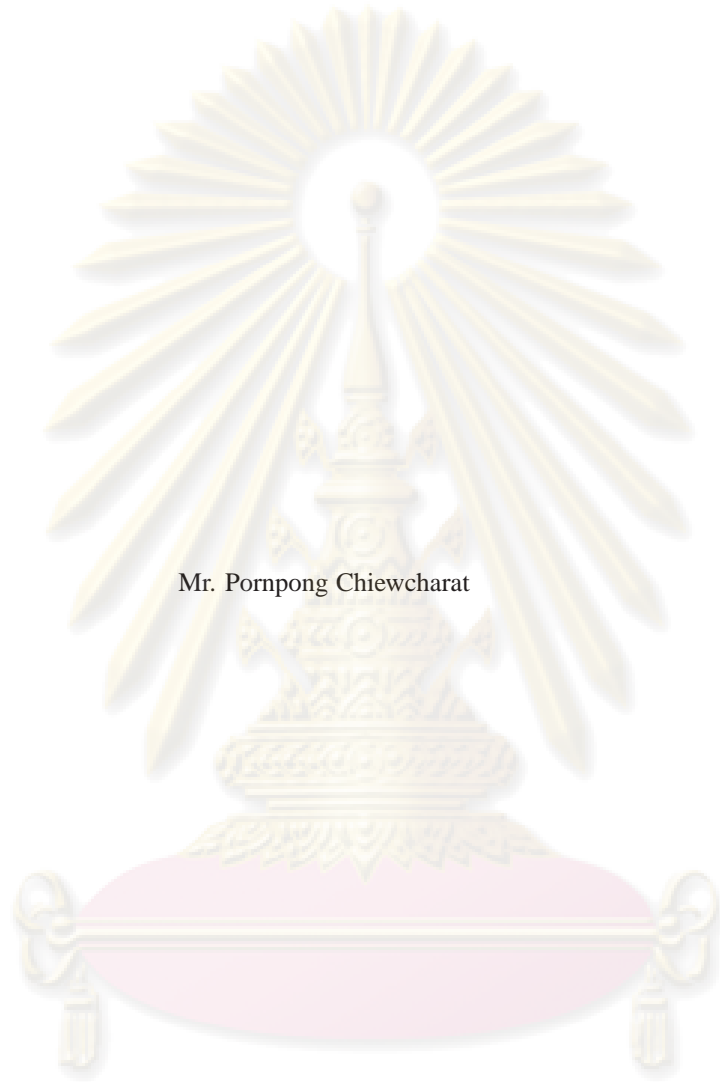
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STATIC MULTI-LAYER PROTECTION FOR MULTICAST TRAFFIC



Mr. Pornpong Chiewcharat

ศูนย์วิทยทรัพยากร

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พรพงศ์ ชิวชรัตน์: การวางแผนทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นแบบสถิตสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (STATIC MULTI-LAYER PROTECTION FOR MULTICAST TRAFFIC), อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. ชัยเชษฐ สายวิจิตร, 90 หน้า

การพิจารณาการใช้ทรัพยากรโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดนั้น เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับโครงข่ายที่มีทรัพยากรอย่างจำกัด ซึ่งสำหรับการวางแผนทางป้องกันเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์นั้น การใช้ขั้นตอนวิธีดั้งเดิมอาจไม่สามารถทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรโครงข่ายอย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ ดังนั้น จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้คือ เพื่อออกแบบวิธีการวางแผนทางป้องกันแบบสถิต (static protection) สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (multicast traffic) หนึ่งเซสชัน (session) เพื่อรองรับความขัดข้อง (failure) ที่อาจเกิดขึ้นในโครงข่าย (network) โดยจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน นั่นคือ ส่วนของการสร้างเส้นทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้น และ ส่วนการหารูปแบบการวางแผนทางป้องกันที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ปริมาณความจุสำรอง (spare capacity) เป็นตัวเปรียบเทียบ

สำหรับส่วนแรกนั้น ผู้วิจัยจะทำการออกแบบการป้องกันโดยคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากความขัดข้อง 4 ประเภท คือ ความขัดข้องที่เกิดจากเส้นใยนำแสง (fiber optic) อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง (Optical Cross-Connect: OXC) ทางเดินแสง (lightpath) หรือ อุปกรณ์จัดหาเส้นทาง (router) ซึ่งหลักการออกแบบนั้น จะใช้การพิจารณาการวางแผนทางป้องกันร่วมกันระหว่าง 2 ระดับชั้น คือ การวางแผนทางป้องกันในระดับชั้นออปติคัล (optical layer) และ ระดับชั้นไอพี (IP layer) เพื่อให้การวางแผนทางป้องกันดังกล่าวสามารถถูกความขัดข้องได้โดยไม่รบกวนซึ่งกันและกัน สำหรับส่วนที่ 2 นั้นเป็นการนำเสนอแนวทางการหารูปแบบการป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นที่สามารถให้ปริมาณการจูงความจุสำรองต่ำที่สุดได้

ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการจูงความจุสำรองด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเลือกเส้นทางที่ใช้ระยะฮอปสั้นที่สุด โดยที่วิธีการที่นำเสนอนั้นจะมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เมื่อทดสอบด้วยโครงข่ายที่มีค่าเฉลี่ยดีกรีของโหนด (average node degree) สูงขึ้น

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิสิต พรพงศ์ ชิวชรัตน์
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก *ชัยเชษฐ สายวิจิตร*

##5070586321: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MULTICAST TRAFFIC / NETWORK PROTECTION / MULTI-LAYER RECOVERY MECHANISM / LIGHTPATH / LIGHT TREE / RESOURCE OPTIMIZATION

PORNPONG CHIEWCHARAT: STATIC MULTI-LAYER PROTECTION FOR MULTICAST TRAFFIC, ADVISOR: CHAIYACHET SAIVICHIT, Ph.D., 90 pp.

Resource utilization is an important issue that needs to be taken into account when providing recovery mechanism in networks. With the limited resources, some traditional recovery schemes will not efficiently reserve the capacity. In this thesis, we investigate the recovery schemes for multi-layer network which can not only manage the confusion which may arise among recovery mechanisms triggered by each layer, but also reserve network resources effectively. Then, we proposed an algorithm that adapts the concept of multi-layer approach to single-session multicast protection in order to recover the failures and reduce network reserved resources at the same time.

In the design, our algorithm will be divided into two parts, i.e. the part of constructing the multicast multi-layer protection and the part of minimizing the reserved capacity used for the protection. In the first part, four types of failures which are optical link failure, optical node failure, IP link failure and IP node failure are considered to construct the failure independent path protections. For the second part, the optimization schemes are proposed to determine which multi-layer protection formation will result in the minimum reserved capacity.

The simulation results show that our algorithm can provide multicast protection which uses less reserved resources compared to the traditional shortest hop algorithm. The difference will be more significant if our algorithm is implemented in the network topology with high average node degree.

Department: Electrical Engineering
Field of Study: Electrical Engineering
Academic Year: 2008

Student's Signature: Pornpong Chiewcharat
Advisor's Signature: Chaiyachet Saivichit

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และมุมมองต่างๆ รวมทั้งได้มอบหมายงานที่เป็นประโยชน์ ทำให้นิสิตมีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับระบบโทรคมนาคม ทั้งในด้าน ทฤษฎี และ ปฏิบัติมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร. เขวาร์นดิศ อัศวกุล และ ดร. พนิดา พงษ์ไพบุลย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละ เวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุก ท่านในสาขาไฟฟ้าสื่อสาร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้พื้นฐานในวิชาทางระบบ สื่อสาร อันเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจ เป็นที่ปรึกษา และ คอยช่วยเหลือตลอดมา ไม่ว่าจะ เป็นเรื่องเกี่ยวกับการเรียน หรือ เรื่องในชีวิตประจำวัน รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณที่ให้โอกาสผู้วิจัยได้ ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทมาบัดนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องในห้องปฏิบัติการวิจัยโทรคมนาคม ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้กำลังใจและคำปรึกษา จนผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ขอขอบคุณ พี่ลลิตา สุขสมบูรณ์ สำหรับข้อมูลและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม ศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรต่างๆ ในการศึกษา ค้นคว้าและวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	5
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (multicast routing)	6
2.1.1 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี (IP layer multicast) ..	6
2.1.2 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออปติคัล (multicast via optical layer unicast)	7
2.1.3 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออปติคัล (optical layer multicast)	8
2.2 การกู้ความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น (multi-layer recovery)	10
2.2.1 การกู้ความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น (layer recovery)	10
2.2.2 รูปแบบการทำงานร่วมกันของหลายระดับชั้น (inter-working between layers)	13
2.2.3 กลยุทธ์ของความอยู่รอดโดยพิจารณาการกู้ความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น (multi-layer survivability strategies)	15
3 การวางแผนป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นแบบสถิติสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์.....	18

บทที่	หน้า
3.1 การออกแบบเพื่อรองรับความขัดข้อง	18
3.1.1 การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นออปติคอลล	19
3.1.2 การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพี	22
3.1.3 การหาเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น	24
3.2 การออกแบบเพื่อลดปริมาณการใช้ความจุสำรองของโครงข่าย	25
3.2.1 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ (Candidate check scheme) ..	26
3.2.2 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตัดตัวเลือก (Candidate elimination scheme)	29
4 การทดสอบขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นแบบสถิตสำหรับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์.....	31
4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบและ โดยการตัดตัวเลือก	32
4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจองความจุสำรองระหว่างขั้นตอนวิธีที่นำเสนอและ ขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะฮอปที่สั้นที่สุด (shortest hop algorithm) .	34
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจองความจุสำรองด้วยวิธีที่นำเสนอสำหรับมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิด	66
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	72
5.1 บทสรุป	72
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
รายการอ้างอิง	74
ภาคผนวก	76
ภาคผนวก ก ข้อมูล SRLG ของโครงข่ายแต่ละรูปแบบ	77
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	90

สารบัญตาราง

หน้า

3.1	ตารางนิยามพารามิเตอร์	19
3.2	ตารางเปรียบเทียบการออกแบบเส้นทางป้องกันในระดับชั้นออฟติคอลลโดยใช้หลักการ FIPP เมื่อเกิดความขัดข้องประเภทต่างๆ	20
3.3	ตารางเปรียบเทียบการออกแบบเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพีโดยใช้หลักการ FIPP เมื่อเกิดความขัดข้องประเภทต่างๆ	23
4.1	ตารางเปรียบเทียบจำนวนฮอปในระดับชั้นไอพีเฉลี่ยที่ได้จากขั้นตอนการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะฮอปสั้นที่สุดกับวิธีที่นำเสนอ	67
1	ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1	77
2	ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2	78
3	ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3	78
4	ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4	79
5	ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5	79
6	ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 6	80
7	ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 7	80

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

2.1	การจัดเส้นทางของกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี	6
2.2	มุมมองของคำร้องในแต่ละระดับชั้นสำหรับการจัดเส้นทางของกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี	7
2.3	การจัดเส้นทางของกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออฟติคอลล	8
2.4	มุมมองของคำร้องในแต่ละระดับชั้นสำหรับการจัดเส้นทางของกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออฟติคอลล	9
2.5	การจัดเส้นทางของกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออฟติคอลล	9
2.6	มุมมองของคำร้องขอในแต่ละระดับชั้นสำหรับการจัดเส้นทางของกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออฟติคอลล	10
2.7	หัวข้อที่เกี่ยวข้องในการกู้ความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น	11
2.8	การกู้ความขัดข้องในระดับชั้นออฟติคอลล (optical layer recovery)	12
2.9	การกู้ความขัดข้องในระดับชั้นไอพี (IP layer recovery)	13
2.10	รูปแบบของปัญหาที่เกิดจากการวางโครงข่ายในทั้ง 2 ระดับชั้น	14
2.11	รูปแบบการทำงานแบบไม่ประสานกัน	15
2.12	กลวิธีการกู้ความขัดข้องแบบสถิต	17
3.1	ผังงานการวางเส้นทางป้องกันให้กับทางเดินแสงของคำร้องขอในระดับชั้นออฟติคอลล	22
3.2	ผังงานการวางเส้นทางป้องกันให้กับทางเดินแสงของคำร้องขอในระดับชั้นไอพี	24
3.3	ผังงานการวางเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น	25
3.4	การคำนวณปริมาณความจุสำรองโดยพิจารณาการใช้งานร่วมกันภายในระดับชั้น	26
3.5	ผังงานการหารูปแบบการป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นที่ให้ปริมาณการจองความจุสำรองต่ำที่สุด	28
3.6	ผังงานสรุปขั้นตอนการหาเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นที่ให้ค่าปริมาณการจองความจุสำรองต่ำที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ	29
3.7	ผังงานสรุปขั้นตอนการหาเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นที่ให้ค่าปริมาณการจองความจุสำรองต่ำที่สุดโดยการตัดตัวเลือก	30
4.1	โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 1	32
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรูปแบบการป้องกันที่ต้องตรวจสอบและจำนวนโหนดปลายทางโดยกำหนดให้โหนดที่ 5 เป็นโหนดต้นทาง	33

4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของปริมาณการจางความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนโหนด ปลายทางของคำร้องขอเมื่อทดสอบด้วยทอพอโลยีชนิดต่างๆ	65
4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของปริมาณการจางความจุสำรองเฉลี่ยกับดีกรีเฉลี่ยของ โหนดเมื่อทดสอบด้วยจำนวนโหนดปลายทางต่างๆ	66
4.55 โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 7	68
4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจางความจุสำรองเฉลี่ยของกราฟฟิก 3 ชนิดกับจำนวน ครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 7 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด	68
4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจางความจุสำรองเฉลี่ยของกราฟฟิก 3 ชนิดกับจำนวน ครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 7 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด	69
4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจางความจุสำรองเฉลี่ยของกราฟฟิก 3 ชนิดกับจำนวน ครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 7 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด	69
4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจางความจุสำรองเฉลี่ยของกราฟฟิก 3 ชนิดกับจำนวน ครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 7 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด	70
4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความจุสำรองของมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิดกับจำนวน โหนดปลายทางของคำร้องขอ	70
4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของปริมาณความจุสำรองระหว่าง 2 วิธีสำหรับรอง รับมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิดกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอ	71



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีได้ทำให้การสื่อสารโทรคมนาคมเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากวิถีชีวิตของมนุษย์ในยุคปัจจุบันที่เล็งเห็นความจำเป็นของเทคโนโลยีที่เรียกว่า อินเทอร์เน็ต (internet) ซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการในการสื่อสารได้อย่างทั่วถึงไม่ว่าการสื่อสารนั้นจะเชื่อมโยงระหว่างบุคคลที่อยู่คนละสถานที่ก็ตาม และด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสื่อสารนี้ทำให้ งานประยุกต์ (application) ที่เอื้อประโยชน์ต่อมนุษย์เกิดขึ้นตามมาอย่างมากมาย อาทิเช่น การประชุมร่วมผ่านระบบวิดีโอคอนเฟอเรนซ์ (video conference) การเรียนรู้ออนไลน์แบบโต้ตอบ (interactive distance learning) และการให้บริการโทรทัศน์ผ่านระบบไอพี (IPTV: Internet Protocol Television) งานประยุกต์เหล่านี้ได้นำเอาเทคนิคการส่งข้อมูลแบบ มัลติคาสต์ (multicast) มาใช้เพื่อทำให้การสื่อสารสามารถครอบคลุม ผู้ใช้บริการได้มากกว่าหนึ่งราย

การที่จะให้บริการงานประยุกต์ดังกล่าวถึงได้นั้น ผู้ให้บริการโครงข่าย (provider) จำเป็นต้องเพิ่มขีดความสามารถของโครงข่ายไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารโดยใช้เส้นใยแสงเป็นพาหะ การเพิ่มแบนด์วิดท์ของท่อส่ง หรือแม้แต่การส่งสัญญาณรวมสื่อ (multiplex) ของข้อมูล นอกจากการเพิ่มความสามารถของโครงข่ายแล้ว ความต่อเนื่องในการส่งข้อมูลก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่จำเป็นต้องพิจารณา การเกิดความขัดข้องขึ้นในโครงข่ายสามารถทำให้การส่งข้อมูลนั้นไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ (user) เช่น เวลาที่ผู้ใช้ต้องเสียไป หรือ ความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้รับ ในทางเดียวกันความขัดข้องนี้อาจส่งผลกระทบต่อผู้ให้บริการการเชื่อมโยงเอง เช่น สูญเสียความน่าเชื่อถือจากผู้ให้บริการ ส่วนประมวลผลยุติการทำงาน และการสูญเสียรายได้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจเกิดจากความขัดข้องขององค์ประกอบภายในโครงข่ายเพียงแค่ว่า 1 องค์ประกอบเท่านั้น [1] และยิ่งถ้าความขัดข้องนั้นเกิดภายในแกนโครงข่าย (core network) ผลกระทบที่ตามมาอาจส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงได้ ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบจากความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่าย ผู้ให้บริการโครงข่ายจำเป็นต้องเตรียมกระบวนการการกู้ความขัดข้อง (network failure recovery) สำหรับรองรับคำร้องขอ (request) ของผู้ให้บริการ

ผู้ให้บริการโครงข่ายส่วนใหญ่ในปัจจุบันได้กำหนดให้หน้าที่ความรับผิดชอบในการดำเนินการของแต่ละระดับชั้น (layer) เป็นอิสระต่อกัน นั่นคือเมื่อมีความขัดข้องเกิดขึ้นในโครงข่าย ระดับชั้นใดที่ตรวจพบความขัดข้องนั้นได้ ก็จะเริ่มกระบวนการกู้ความขัดข้องโดยไม่คำนึงถึงระดับชั้นอื่น การกระทำเช่นนี้อาจส่งผลให้เกิดความสับสนในการกู้ความขัดข้อง ในกรณีที่ความขัดข้องนั้นถูกตรวจพบได้ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน รวมไปถึงการใช้ทรัพยากรของโครงข่าย (network utilization) อย่างไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งถือเป็นปัญหาที่ควรคำนึงถึงในโครงข่ายยุคปัจจุบัน

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

จากงานวิจัยส่วนใหญ่ในอดีตพบว่าการกักความขัดข้องได้ถูกออกแบบในลักษณะที่แตกต่างกัน โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อกักความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่ายเฉพาะในแต่ละระดับชั้น

งานวิจัย [2],[3],[4] และ [5] เป็นงานวิจัยที่คิดค้นรูปแบบการกักความขัดข้องสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ ในระดับชั้นกายภาพ (physical layer) ที่ใช้เทคโนโลยี WDM (Wavelength Division Multiplexing) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงโดยใช้ความยาวคลื่นเป็นพาหะ โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเรียกรวมว่าระดับชั้นออปติคอลล (optical transport layer)

ในงานวิจัย [2] ได้นำเสนอแผนการกักความขัดข้องของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ในกรณีที่โครงข่ายเกิดความขัดข้องขึ้นโดยการวางเส้นทางป้องกันให้กับทุกเซกเมนต์ (segment) ของเส้นทางร้องขอ การออกแบบในลักษณะนี้จะยึดโหนดตัวแยก (splitting node) เพื่อแบ่งเส้นทางร้องขอออกเป็นเซกเมนต์ ซึ่งแต่ละเซกเมนต์จำเป็นต้องได้รับการป้องกัน การออกแบบนั้นจะคำนึงถึงการใช้ความจุสำรองร่วมกันระหว่างเส้นทางป้องกันเพื่อลดการใช้ทรัพยากรของโครงข่าย ในกรณีที่บางเซกเมนต์ไม่มีโหนดปลายทางอยู่ภายใน การสำรองความจุสำหรับ เซกเมนต์เหล่านี้ จะไม่มีความจำเป็นเมื่อเปรียบเทียบกับสำรองความจุสำหรับเส้นทางป้องกันระหว่าง โหนดต้นทาง ถึง โหนดปลายทางโดยตรง ดังนั้นการวางเส้นทางป้องกันสำหรับทุก เซกเมนต์อาจทำให้การใช้ทรัพยากรโครงข่ายไม่เหมาะสมนัก

สำหรับงานวิจัย [3] และ [4] ได้มีการเสนอแผนการกักความขัดข้องโดยใช้วิธีการการคำนวณหาเส้นทางป้องกันที่คล้ายคลึงกัน นั่นคือ อาศัยการวิเคราะห์เส้นทางร้องขอแบบมัลติคาสต์ในลักษณะของใบ (leaf) ถึง ใบ โดยที่แต่ละคูใบจะต้องมีเส้นทางป้องกันไว้รองรับในกรณีที่เส้นทางระหว่างคูใบนี้เกิดความขัดข้องขึ้น จากนั้นจึงนำเส้นทางป้องกันเหล่านี้ไปหาเส้นทางที่สามารถครอบคลุมได้ทุกใบ (spanning path) และ เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) สำหรับเส้นทางร้องขอชนิดมัลติคาสต์ที่มีโหนดปลายทางอยู่ระหว่างคูใบ การวางเส้นทางสำรองในลักษณะนี้จะไม่สามารถวางเส้นทางสำรองให้กับโหนดดังกล่าวได้ ดังนั้น การที่จะทำให้โหนดปลายทางนี้ได้รับผลกระทบจากความขัดข้องน้อยที่สุด คือโหนดที่ทำหน้าที่เป็นใบอื่นจะต้องส่งสัญญาณ (signaling) ไปยังโหนดระหว่างคูใบนั้นให้เปลี่ยนทิศทางในการส่งข้อมูล ซึ่งการกระทำเช่นนี้ทำให้เกิดความล่าช้าในการกักความขัดข้อง นอกจากนี้การคำนวณหาเส้นทางป้องกันโดยการใช้ขั้นตอนวิธี (algorithm) แบบเส้นทางที่สั้นที่สุด จะไม่สามารถรับรองได้ว่าการใช้ทรัพยากรของโครงข่ายมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัย [5] ได้เสนอแผนการกักความขัดข้องในลักษณะของเส้นทางป้องกันแบบบางส่วน นั่นคือ พิจารณาการวางเส้นทางป้องกัน เฉพาะการเชื่อมโยงที่ใช้ในการส่งข้อมูลสำหรับหลายโหนดปลายทางเท่านั้น สำหรับการเชื่อมโยงที่ส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางเพียงโหนดเดียว เมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นทำให้โหนดดังกล่าวไม่สามารถรับข้อมูลได้ โหนดนั้นจะทำการคำนวณหาเส้นทางใหม่ที่สามารถเชื่อมโยงไปยังส่วนของต้นไม้ (tree) เดิม ถึงแม้การสร้างเส้นทางป้องกันในลักษณะนี้จะสามารถลดการใช้ความจุสำรองได้ในระดับหนึ่งก็ตาม การกักความขัดข้องสำหรับโหนดปลายทางยังคงต้องใช้การคำนวณแบบพลวัต (dynamic) เพื่อหาเส้นทางเชื่อมโยงไปยังต้นไม้ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคำนวณอาจส่งผลกระทบต่อทราฟฟิก

ชนิดมัลติคาสต์ ที่ต้องการความเชื่อถือได้ (reliability) ในระดับสูง

สำหรับงานวิจัย [6],[7] และ [8] เป็นการนำเสนอวิธีการกู้ความขัดข้องสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ในระดับชั้นไอพี (IP layer) โดยใช้เทคโนโลยี MPLS (Multi-Protocol Label Switching) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทในการให้บริการโครงข่ายในยุคปัจจุบัน

งานวิจัย [7] และ [8] ได้นำเอาเทคนิคการจัดเส้นทางใหม่อย่างรวดเร็ว (fast rerouting) ที่ถูกนำเสนอใน [6] มาพัฒนาให้เกิดประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สำหรับงานวิจัย [7] ได้นำเสนอแผนการกู้ความขัดข้องที่สามารถกระทำภายหลังการเกิดความขัดข้องโดยสร้างเป็นเส้นทางป้องกันขึ้นเพื่อรองรับทราฟฟิกแทน การสร้างเส้นทางสำรองนั้นจะกระทำโดยโหนดที่ทำหน้าที่เป็นโหนดตัวส่ง (upstream node) ที่สามารถตรวจจับความขัดข้องที่เกิดขึ้นได้ โดยการกำหนดเส้นทางสำรองนั้นจะพิจารณาการใช้งานความจุสำรองร่วมกันสำหรับโหนดตัวส่งที่มีโหนดตัวรับ (downstream node) มากกว่า 1 โหนด การแก้ปัญหาความขัดข้องในลักษณะนี้จำเป็นต้องใช้ความสามารถในการคำนวณที่รวดเร็ว ซึ่งในบางกรณีที่โครงข่ายมีความคับคั่งของทราฟฟิกรอบจุดที่เกิดความขัดข้องสูง การหาเส้นทางป้องกันจะทำได้ยากและใช้เวลานาน

สำหรับงานวิจัย [8] เป็นการออกแบบการวางคำร้องขอชนิดมัลติคาสต์ให้มีการใช้การเชื่อมโยงที่น้อยที่สุด จุดประสงค์ของการกระทำเช่นนี้เพื่อนำเส้นทางดังกล่าว ไปใช้ในการออกแบบเส้นทางป้องกันด้วยเทคนิค การจัดเส้นทางใหม่อย่างรวดเร็ว ซึ่งยิ่งคำร้องขอนั้นใช้การเชื่อมโยงน้อยเพียงใด ความจุสำรองที่ใช้ในการวางเส้นทางป้องกันด้วยเทคนิคนี้ก็ยิ่งน้อยตามลงไปด้วย อย่างไรก็ตาม การออกแบบในลักษณะนี้ยังขาดการพิจารณาการใช้ความจุสำรองร่วมระหว่างเส้นทางป้องกัน ซึ่งสามารถทำให้ความจุสำรองโดยรวมของโครงข่ายลดลงได้อีก

เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นจากการแบ่งหน้าที่ความรับผิดชอบในการดำเนินการแยกกัน ในแต่ละระดับชั้นไม่ว่าจะเป็นความซับซ้อนของการกู้ความขัดข้อง หรือ การรบกวนกันของการกู้ความขัดข้อง งานวิจัย [9],[10],[11] และ [12] จึงได้เสนอการกู้ความขัดข้องโดยพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น ซึ่งทุกงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงแล้วแต่นำเสนอแผนการกู้ความขัดข้องแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น เพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์เท่านั้น

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมด การพิจารณาการป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์จึงเป็นแนวทางที่งานวิจัยข้างต้นยังไม่ได้พิจารณา ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะเสนอแผนการกู้ความขัดข้องแบบสถิติเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ ที่ต้องการความเชื่อถือได้สูง โดยการพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น สำหรับการออกแบบการกู้ความขัดข้องในแต่ละระดับชั้นจะอ้างอิงจากเทคนิคการกู้ความขัดข้องที่มีอยู่เดิม รวมไปถึงการออกแบบให้ปริมาณความจุสำรองที่ใช้ในการวางเส้นทางป้องกันมีค่าน้อยที่สุดเพื่อลดปัญหาความล้นเปลืองในการใช้ความจุสำรองของโครงข่าย

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในโครงร่างวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอแผนการกู้ความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์หนึ่งเซสชันในกรณีที่โครงข่ายเกิดความขัดข้องขึ้น โดยจะสามารถรองรับความขัดข้องที่เกิด

ขึ้น และ มีการใช้ความจุสำรองรวมต่ำที่สุดได้ ทั้งนี้ความขัดข้องดังกล่าวเป็นความขัดข้องที่เกิดขึ้นจาก เส้นใยนำแสงขาด อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงขัดข้อง อุปกรณ์จัดหาเส้นทางขัดข้อง หรือ ทางเดินแสงเสียหาย อย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น (single-type of failure) ในส่วนของการออกแบบแผนการกู้ความขัดข้อง จะพิจารณาการกู้ความขัดข้องระหว่างระดับชั้นออปติคัล (optical transport layer) และ ระดับชั้นไอพี (IP layer) เท่านั้น สำหรับส่วนของการหาปริมาณความจุสำรองที่ต่ำที่สุดเพื่อใช้ในการป้องกันนั้น จะพิจารณาการใช้งานความจุสำรองร่วมกัน 2 รูปแบบ นั่นคือ การใช้ความจุสำรองร่วมกันระหว่างระดับชั้น และการใช้ความจุสำรองร่วมกันภายในระดับชั้น เพื่อให้การจองความจุสำรองของโครงข่ายนั้นมีประสิทธิภาพมากที่สุดภายใต้สภาวะของการเชื่อมโยงที่มีความจุสำรองจำกัด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาแบบแผนการกู้ความขัดข้องในประเภทต่างๆ ทั้งในระดับชั้นออปติคัล และระดับชั้นไอพี พร้อมทั้งศึกษาแบบแผนการกู้ความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้น
2. กำหนดรูปแบบการป้องกันที่จะทำการวิจัย พร้อมทั้งกำหนดรูปแบบของปัญหา
3. คิดค้นแบบจำลองที่ใช้ในการแก้ปัญหา หรือ ใช้ประกอบเพื่อการแก้ปัญหา
4. เขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ทดสอบแบบจำลอง
5. วิเคราะห์ และประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยเทียบกับขั้นตอนวิธีมาตรฐาน
6. สรุปผลการวิเคราะห์ และดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์
2. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการกู้ความขัดข้องในรูปแบบต่างๆทั้งในระดับชั้นออปติคัล และ ระดับชั้นไอพี
3. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบบแผนการกู้ความขัดข้องโดยพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น
4. แนวทางการกู้ความขัดข้องที่ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยในอดีต
5. การนำขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ไปใช้เพื่อแก้ปัญหาคือความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่าย อีกทั้งยังช่วยลดการใช้ทรัพยากรโครงข่ายลงเพื่อเพิ่มการใช้งานโครงข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ
6. การนำขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไปปรับปรุง และ พัฒนาเพื่อให้รองรับกับเทคโนโลยีในอนาคต

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์โดยจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อได้แก่ ประเภทของมัลติคาสต์ทราฟฟิก โดยจะกล่าวถึงลักษณะพิเศษและความแตกต่างของมัลติคาสต์ในแต่ละประเภท และการกู้ความขัดข้อง โดยจะอธิบายถึงประเภทของการกู้ความขัดข้อง รวมไปถึงการเตรียมเส้นทางการกู้ความขัดข้องในประเภทต่างๆ

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ โดยจะเริ่มจาก หลักการออกแบบให้ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอสามารถรองรับความขัดข้องที่เกิดขึ้นจาก เส้นใยนำแสง อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง เส้นทางเดินแสง และอุปกรณ์จัดเส้นทาง ได้ รวมทั้งต้องสามารถรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกได้ทุกชนิดอีกด้วย จากนั้น จะอธิบายถึงวิธีการหาเส้นทางป้องกันที่ใช้ความจุสำรองของโครงข่ายที่ต่ำที่สุด โดยใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization)

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบที่ได้จากขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ โดยเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีที่มีอยู่เดิม นอกจากนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบของขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอ

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์เล่มนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

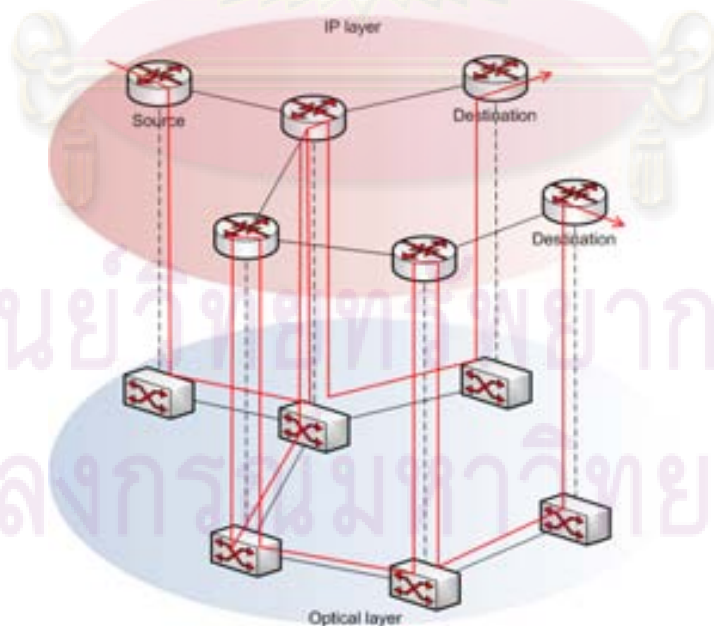
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (multicast routing)

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงประเภทของการจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ โดยจะแบ่งออกเป็นทั้งสิ้น 3 ประเภท [13] คือ การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี (IP layer multicast) การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ (unicast) ในระดับชั้นออปติคัล (multicast via optical layer unicast) และ การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออปติคัล (optical layer multicast) โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละประเภทดังต่อไปนี้

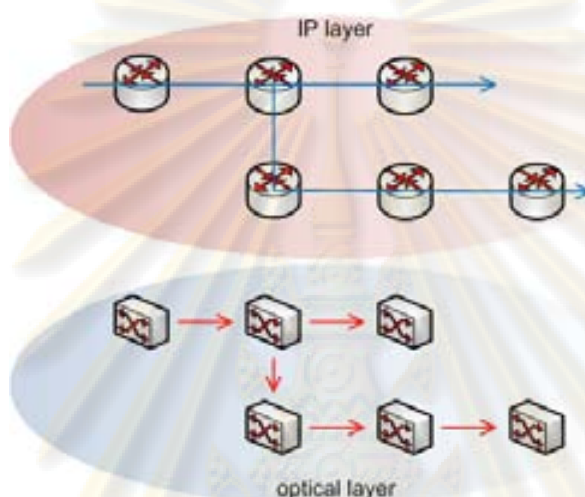
2.1.1 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี (IP layer multicast)

การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ประเภทนี้จะใช้หลักการจัดเส้นทางผ่านระดับชั้นไอพี (Internet Protocol: IP) นั่นคือข้อมูลจะต้องผ่านการประมวลผลในรูปแบบไฟฟ้า ในอุปกรณ์จัดเส้นทาง ดังรูปที่ 2.1 เมื่อมีคำร้องขอ (request) จากโหนดต้นทาง ไปยังกลุ่มของโหนดปลายทาง จะเห็นได้ว่าการเดินทางของข้อมูลนั้นจะผ่านการเปลี่ยนรูปแบบจากแสงเป็นไฟฟ้าเพื่อทำการประมวลผลที่อุปกรณ์จัดเส้นทาง และเมื่อสิ้นสุดการประมวลผลดังกล่าว รูปแบบของข้อมูลจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแสงอีกครั้งเพื่อการส่งไปยังโหนดถัดไปผ่านระดับชั้นออปติคัล



รูปที่ 2.1: การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี

เมื่อทำการพิจารณาในแต่ละระดับชั้นพบว่า ในระดับชั้นออฟติคัล การเดินทางของข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบของการเชื่อมโยงทางแสง หรือที่เรียกว่า ทางเดินแสง (light path) โดยแต่ละทางเดินแสงจะเชื่อมระหว่างอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงรอบข้างเท่านั้น ในกรณีนี้ถือว่ามีทางเดินแสงทั้งหมด 5 เส้นทาง ในขณะที่เมื่อพิจารณาในระดับชั้นไอพี พบว่า การเดินทางของข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบของการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทาง โดยที่อุปกรณ์จัดเส้นทางของโหนดต้นทางจะสามารถเห็นทั้งอุปกรณ์จัดเส้นทางระหว่างทาง และ อุปกรณ์จัดเส้นทางของโหนดปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



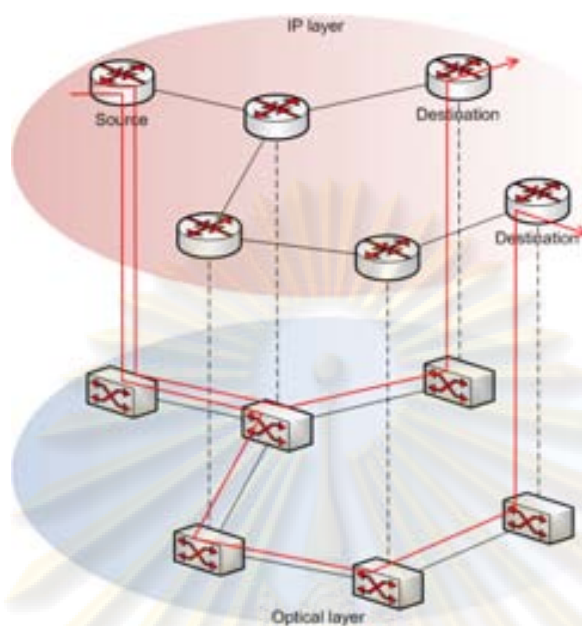
รูปที่ 2.2: มุมมองของคำร้องในแต่ละระดับชั้นสำหรับการจัดเส้นทางของกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี

ข้อดีของการจัดเส้นทางในลักษณะนี้คือ โหนดระหว่างทางจะสำเนาชุดข้อมูลที่ส่งมาจากต้นทางและเก็บไว้ในฐานข้อมูล ดังนั้น โหนดระหว่างทางเหล่านี้จะสามารถทำตัวเป็นต้นทางได้เช่นเดียวกับโหนดต้นทางในกรณีที่มีโหนดปลายทางใหม่เพิ่มขึ้นมาในโครงข่าย ในทางตรงกันข้าม เนื่องจากการส่งข้อมูลในลักษณะนี้จะมีเปลี่ยนแปลงรูปแบบของข้อมูลจากไฟฟ้าเป็นแสง และจากแสงเป็นไฟฟ้า รวมไปถึงโหนดระหว่างทางจะต้องทำการประมวลผลทุกครั้ง ดังนั้น การส่งข้อมูลในลักษณะนี้จะใช้เวลานานมาก

2.1.2 การจัดเส้นทางของกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออฟติคัล (multicast via optical layer unicast)

การจัดเส้นทางประเภทนี้ โหนดต้นทางจะพิจารณาการส่งข้อมูลไปยังแต่ละโหนดปลายทางในรูปแบบยูนิคาสต์ที่เป็นอิสระต่อกัน (independent) ซึ่งการส่งแบบยูนิคาสต์นี้ โหนดต้นทางจะทำการส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์จัดเส้นทางของตนเอง จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งผ่านทางเดินแสงจากอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงต้นทาง ไปยัง อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงปลายทาง ดังรูปที่ 2.3

เมื่อทำการวิเคราะห์การจัดเส้นทางประเภทนี้โดยแยกเป็นมุมมองของระดับชั้นออฟติคัล และ ระดับชั้นไอพี พบว่าในชั้นออฟติคัล อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงต้นทางจะเห็นการเชื่อมโยงของทางเดินแสงไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงปลายทาง โดยระหว่างทางเดินแสงดังกล่าวข้อมูลจะไม่มีเปลี่ยนแปลงรูปแบบเป็นไฟฟ้า นั่นหมายความว่าข้อมูลจะเดินทางผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงของโหนดระหว่างทางเท่า



รูปที่ 2.3: การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออปติคอลล

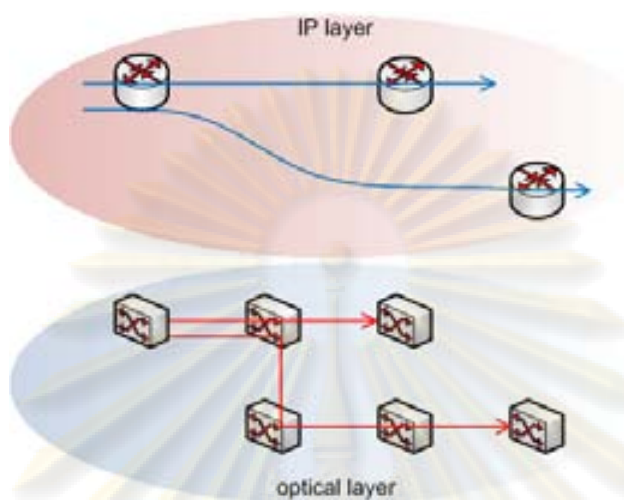
นั้น เมื่อพิจารณามุมมองของระดับชั้นไอพีพบว่า อุปกรณ์จัดเส้นทางของโหนดต้นทางจะเห็นการเชื่อมโยงไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทางของโหนดปลายทางโดยตรง โดยที่อุปกรณ์จัดเส้นทางของโหนดต้นทางนั้นจะไม่สามารถมองเห็นอุปกรณ์จัดเส้นทางของโหนดระหว่างทางได้ เนื่องจากการเดินทางของข้อมูลจะไม่ผ่านการประมวลผลที่ระดับชั้นไอพี หรือ ที่อุปกรณ์จัดเส้นทางระหว่างทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.4

การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออปติคอลลนั้นสามารถทำให้การควบคุมดูแลโหนดปลายทางสะดวกยิ่งขึ้น เนื่องจากแต่ละคู่ต้นทาง-ปลายทางนั้นเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ในทางตรงกันข้าม สำหรับกรณีที่ทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์มีโหนดปลายทางจำนวนมาก จำนวนยูนิคาสต์ที่จำเป็นต้องใช้จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นปริมาณแบนด์วิดท์ที่ใช้สำหรับยูนิคาสต์เหล่านี้จะสูงมาก

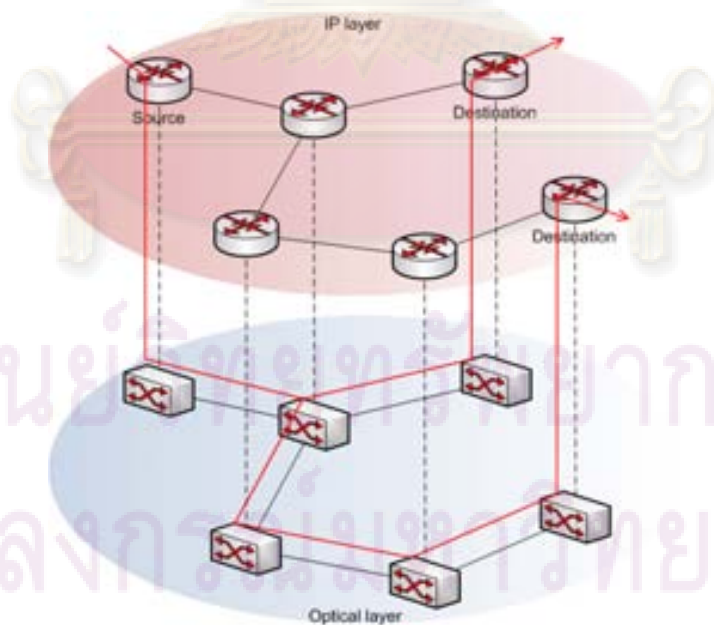
2.1.3 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออปติคอลล (optical layer multicast)

สำหรับการจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ประเภทนี้จะใช้ความสามารถในการแยกแสง (light splitting) ของโหนดในระดับชั้นออปติคอลลเพื่อส่งข้อมูล โดยกลุ่มของข้อมูลขาออกของโหนดที่มีการแยกแสงนั้นจะมีความต้องการที่เหมือนกัน ดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าการส่งข้อมูลประเภทนี้จะมีการทำมัลติคาสต์ที่ระดับชั้นออปติคอลลเท่านั้น

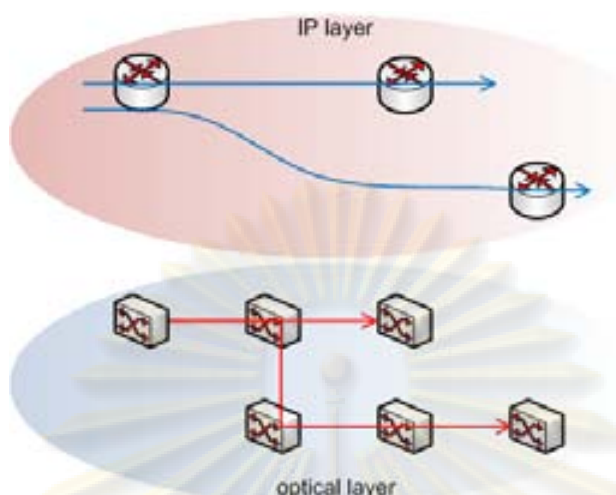
เมื่อทำการพิจารณามุมมองของการจัดเส้นทางประเภทนี้ในแต่ละระดับชั้น พบว่าสำหรับระดับชั้นออปติคอลล การเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์วงจรแสงของโหนดต้นทางกับกลุ่มของอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงของโหนดปลายทางจะมีรูปแบบเป็นต้นไม้ (light tree) สำหรับในระดับชั้นไอพี พบว่าอุปกรณ์จัดเส้นทางของโหนดต้นทางจะเห็นการเชื่อมโยงกับอุปกรณ์จัดเส้นทางของโหนดปลายทางโดยตรง โดยที่จำนวนของ



รูปที่ 2.4: มุมมองของคำร้องในแต่ละระดับชั้นสำหรับการจัดเส้นทางของกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออฟติคอลล



รูปที่ 2.5: การจัดเส้นทางของกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออฟติคอลล



รูปที่ 2.6: มุมมองของคำร้องขอในแต่ละระดับชั้นสำหรับการจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออปติคอลล

การเชื่อมโยงระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทางจะเพิ่มขึ้น เมื่อทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์นั้นมีจำนวนโหนดปลายทางมากขึ้นดังรูปที่ 2.6

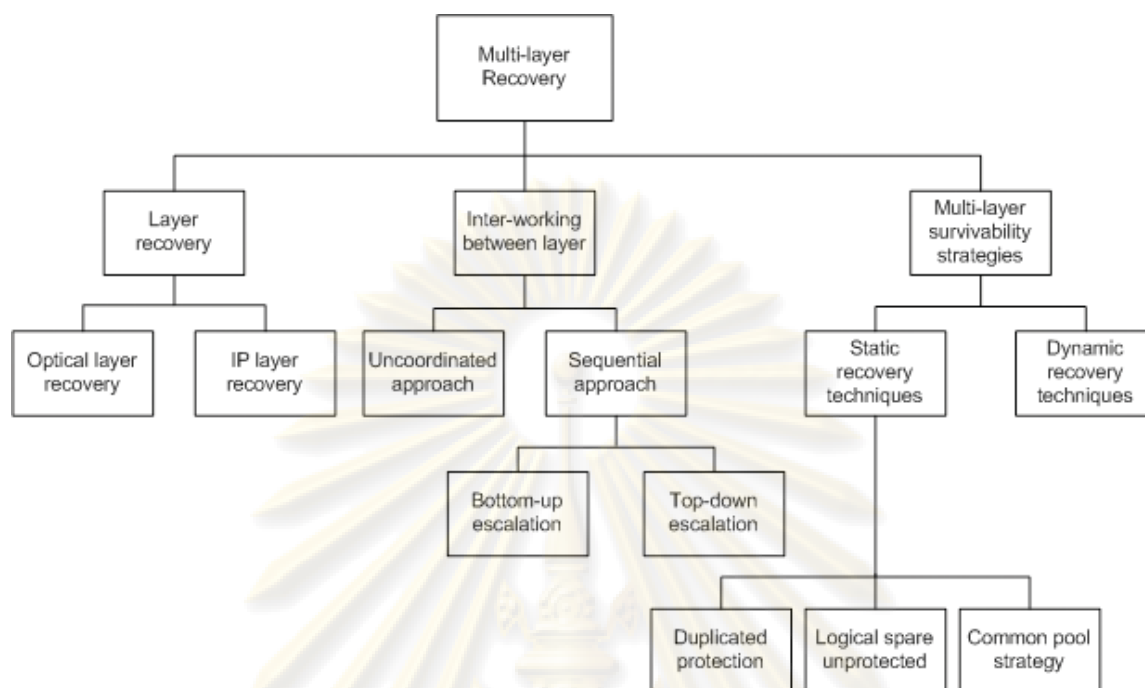
การจัดเส้นทางประเภทนี้ได้แก้ไขข้อบกพร่องของการจัดเส้นทางผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออปติคอลล ในกรณีที่กลุ่มของโหนดปลายทางมีความต้องการเหมือนกัน โดยจะเห็นได้ว่าแบนด์วิดท์ที่ถูกใช้ในการส่งข้อมูลแบบต้นไม้นี้ในระดับชั้นออปติคอลลจะมีปริมาณที่น้อยกว่า อีกทั้งการส่งข้อมูลด้วยการจัดเส้นทางประเภทนี้จะใช้เวลาน้อยกว่าการจัดเส้นทางผ่านระดับชั้นไอพี เนื่องจากข้อมูลจะไม่ถูกประมวลผลในอุปกรณ์จัดเส้นทางระหว่างทาง

2.2 การกู้ความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น (multi-layer recovery)

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีและเหตุผลที่เกี่ยวข้องในการกู้ความขัดข้องที่อาจเกิดขึ้นได้ในโครงข่าย โดยใช้การพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น เพื่อให้ทราฟฟิกที่ถูกผลกระทบจากความขัดข้องดังกล่าวสามารถถูกส่งต่อไปยังปลายทางได้ ทฤษฎีที่จำเป็นต้องพิจารณาในการกู้ความขัดข้องแบบหลายระดับชั้นนั้นแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ [9] คือ 1. หลักการกู้ความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น 2. รูปแบบการกู้ความขัดข้องร่วมกันของหลายระดับชั้น และ 3. กลยุทธ์ของความอยู่รอดโดยพิจารณาการกู้ความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น ดังรูปที่ 2.7

2.2.1 การกู้ความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น (layer recovery)

การกู้ความขัดข้องนั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การกู้ความขัดข้องในระดับชั้นออปติคอลล (optical layer recovery) และ การกู้ความขัดข้องในระดับชั้นไอพี (IP layer recovery) ซึ่งการกู้ความขัดข้องในแต่ละระดับชั้นนั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ในแต่ละระดับชั้น เช่น ความสามารถในการมองเห็นเส้นทางของข้อมูล ในระดับชั้นออปติคอลลนั้นจะเห็นเส้นทางเดินของข้อมูลในรูปแบบของทาง

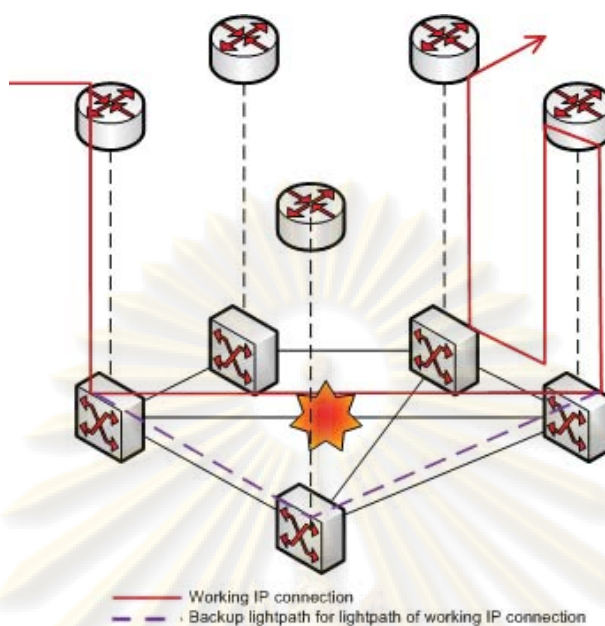


รูปที่ 2.7: หัวข้อที่เกี่ยวข้องในการกู้ความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น

เดินแสงจากอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงหนึ่งไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงอีกตัวหนึ่ง ในขณะที่ในระดับชั้นไอพี เส้นทางเดินของข้อมูลจะถูกมองเห็นในลักษณะของการเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทางต้นทางไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทางปลายทาง

2.2.1.1 การกู้ความขัดข้องในระดับชั้นออปติคัล (optical layer recovery)

การกู้ความขัดข้องในระดับชั้นออปติคัลเป็นการกู้ความขัดข้องแบบง่ายที่สุดโดยจะพิจารณาเฉพาะทางเดินแสงที่เกิดความขัดข้องขึ้นเท่านั้น ซึ่งเมื่ออุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงต้นทางของทางเดินแสงใดตรวจพบความขัดข้องดังกล่าว อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงนั้นจะทำการสลับทางเดินแสงที่เกิดความขัดข้องไปยังอีกทางเดินแสงหนึ่งซึ่งมีอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงปลายทางอันเดียวกัน ดังรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าทั้งการตรวจพบความขัดข้อง และการกู้ความขัดข้อง จะกระทำในระดับชั้นออปติคัลทั้งสิ้น ซึ่งข้อดีของการกู้ความขัดข้องในระดับชั้นนี้ คือ มีความรวดเร็วในการกู้ความขัดข้องเนื่องจากข้อมูลไม่จำเป็นต้องผ่านการประมวลผลที่ระดับชั้นไอพีซึ่งจำเป็นต้องเปลี่ยนรูปแบบจากแสงเป็นไฟฟ้า แต่ข้อเสียเปรียบของการกู้ความขัดข้องในระดับชั้นออปติคัลคือ ในกรณีที่การเชื่อมโยงจำเป็นต้องใช้ทางเดินแสงหลายเส้นทางร่วมกัน การเตรียมเส้นทางป้องกัน (protection path) เพื่อรองรับความขัดข้องของการเชื่อมโยงนี้ก็จะใช้ความจุสำรองเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และยิ่งไปกว่านั้นการกู้ความขัดข้องในระดับชั้นนี้ไม่สามารถกู้ความขัดข้องได้ทุกประเภท

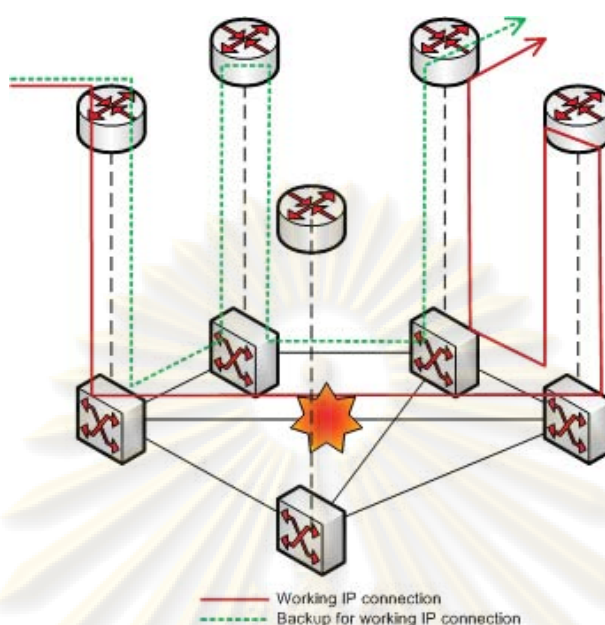


รูปที่ 2.8: การกู้ความขัดข้องในระดับชั้นออปติคัล (optical layer recovery)

2.2.1.2 การกู้ความขัดข้องในระดับชั้นไอพี (IP layer recovery)

การกู้ความขัดข้องในระดับชั้นไอพีนั้น จะพิจารณาการกู้ความขัดข้องจากมุมมองของอุปกรณ์จัดเส้นทางต้นทางและปลายทาง โดยเมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นที่เส้นทางหลักซึ่งทำให้อุปกรณ์จัดเส้นทางต้นทางไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทางปลายทางได้ อุปกรณ์จัดเส้นทางต้นทางจะทำการเปลี่ยนเส้นทางของข้อมูลจากเส้นทางเดิมไปยังเส้นทางใหม่ซึ่งยังคงส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทางปลายทางได้อยู่ ดังรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าการกู้ความขัดข้องในระดับชั้นนี้จะใช้เวลาในการกู้ความขัดข้องมากกว่าการกู้ความขัดข้องในระดับชั้นออปติคัล เนื่องจาก ข้อมูลจะถูกเปลี่ยนรูปแบบจากแสงเป็นไฟฟ้า เพื่อเข้าสู่กระบวนการประมวลผลที่อุปกรณ์จัดเส้นทาง ในทางตรงกันข้ามการกู้ความขัดข้องในระดับชั้นนี้จะสามารถกู้ความขัดข้องได้หลายประเภทเช่น ความขัดข้องของเส้นใยแสง อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง หรือ อุปกรณ์จัดเส้นทางระหว่างทาง

เป็นที่ทราบกันดีกันว่า การเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีนั้นเป็นการเชื่อมโยงจากอุปกรณ์จัดหาเส้นทางหนึ่งไปยังอีกอุปกรณ์จัดเส้นทางหนึ่ง นั่นคือสิ่งที่เกิดการเชื่อมโยงดังกล่าวได้นั้น อุปกรณ์จัดเส้นทางหนึ่งจะทำการส่งข้อมูลโดยผ่านการประมวลผลในรูปแบบไฟฟ้าจากนั้นจะถูกเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลไปเป็นรูปแบบของแสง เพื่อให้สามารถส่งผ่านเส้นใยนำแสงได้ เมื่อข้อมูลถูกส่งไปยังโหนดที่ต้องการแล้ว ข้อมูลจะถูกเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นไฟฟ้าอีกครั้ง เพื่อทำการประมวลผลที่อุปกรณ์จัดเส้นทาง ซึ่งนี่ถือเป็นเส้นทางเดินของข้อมูลที่อุปกรณ์จัดเส้นทางทั้ง 2 เห็นว่าสามารถเชื่อมโยงกันได้ การเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีนั้นอาจประกอบด้วย การเชื่อมโยงในระดับชั้นออปติคัล และ อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง มากกว่า 1 องค์ประกอบขึ้นไป ดังรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่า เมื่อเกิดความขัดข้องในระดับชั้นล่างเพียง 1 องค์ประกอบอาจส่งผลให้องค์ประกอบโครงข่ายในระดับชั้นบนขัดข้องมากกว่า 1 องค์ประกอบได้ ดังนั้น SRLG หรือ Shared Risk Link



รูปที่ 2.9: การกู้ความขัดข้องในระดับชั้นไอพี (IP layer recovery)

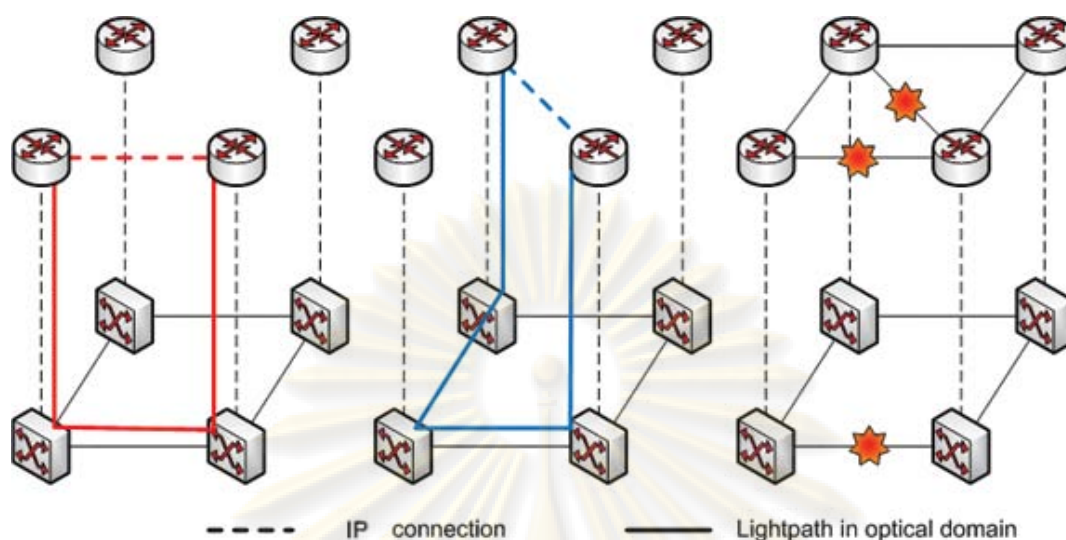
Group [14] จึงได้ถูกนำเสนอขึ้นเพื่อประกอบการพิจารณาในการออกแบบเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพี SRLG ของการเชื่อมโยงหนึ่งในระดับชั้นไอพีนั้น บ่งบอกถึงกลุ่มของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีที่ใช้การเชื่อมโยงในระดับชั้นออปติคอลลีกับกับการเชื่อมโยงในระดับชั้นออปติคอลลีนั้น ดังนั้นการออกแบบเส้นทางป้องกันอาจนำเอา SRLG ของทุกการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีมาเป็นข้อกำหนดในการหาเส้นทางป้องกันของคำร้องขอได้ เพื่อป้องกันความขัดข้องที่อาจเกิดพร้อมกันระหว่างเส้นทางหลัก และ เส้นทางป้องกัน

2.2.2 รูปแบบการทำงานร่วมกันของหลายระดับชั้น (inter-working between layers)

จากที่ได้กล่าวถึงการกู้ความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่ายของแต่ละระดับชั้นในหัวข้อที่แล้ว หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทำงานร่วมกันของหลายระดับชั้นในการกู้ความขัดข้องที่เกิดขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่ารูปแบบการทำงานร่วมกันของหลายระดับชั้นนั้นแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การทำงานแบบไม่ประสานกัน (uncoordinated approach) และ การทำงานแบบเป็นลำดับ (sequential approach) ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

2.2.2.1 รูปแบบการทำงานแบบไม่ประสานกัน (uncoordinated approach)

การกู้ความขัดข้องในลักษณะนี้จะไม่มีการกำหนดใดที่จะดูแลกระบวนการกู้ความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น นั่นคือ ระดับชั้นใดที่ตรวจจับความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่ายได้ก่อน จะเป็นระดับชั้นที่เริ่มทำการกู้ความขัดข้องก่อน การวางรูปแบบในลักษณะนี้มีข้อดีคือ ช่วยลดภาระในการดูแลและควบคุมการกู้ความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่าย ในทางตรงกันข้ามข้อเสียของรูปแบบนี้คือ อาจเกิดการรบกวนกันระหว่างกระบวนการกู้ความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น รวมไปถึง การใช้ความจุสำรองเป็นจำนวนมากเนื่องจากแต่



รูปที่ 2.10: รูปแบบของปัญหาที่เกิดจากการวางโครงข่ายในทั้ง 2 ระดับชั้น

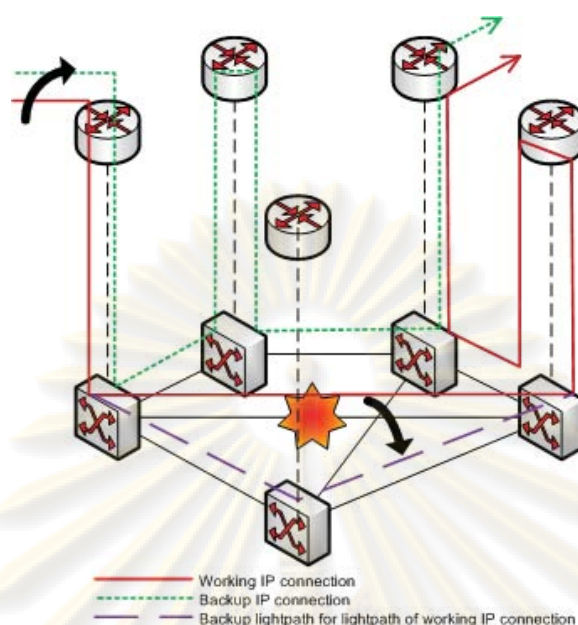
ละระดับชั้นเริ่มทำการกู้ความขัดข้องในเวลาใกล้เคียงกัน ในกรณีที่แต่ละระดับชั้นสามารถตรวจจับความขัดข้องได้ในเวลาใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 2.11

2.2.2.2 รูปแบบการทำงานแบบเป็นลำดับ (sequential approach)

รูปแบบการทำงานแบบเป็นลำดับ คือการกำหนดลำดับของแต่ละระดับชั้นในการกู้ความขัดข้องที่เกิดขึ้น ซึ่งการแบ่งลำดับให้ชัดเจนในลักษณะนี้ช่วยให้การกู้ความขัดข้องมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถลดการใช้ความจุสำรองของโครงข่ายได้มากเมื่อเทียบกับรูปแบบการทำงานแบบไม่ประสานกัน การจะกำหนดให้แต่ละระดับชั้นทำหน้าที่กู้ความขัดข้องที่เกิดขึ้นได้นั้น จำเป็นต้องมีช่วงจำกัดเวลา (hold-off timer) ค่าหนึ่งเพื่อบอกถึงระยะเวลามากที่สุดที่ระดับชั้นหนึ่งๆสามารถทำการกู้ความขัดข้องได้ ถ้าระดับชั้นใดไม่สามารถกู้ความขัดข้องได้ตามระยะเวลาที่กำหนด ระดับชั้นที่มีหน้าที่ในการกู้ความขัดข้องถัดไปจะเริ่มทำการกู้ความขัดข้องทันที โดย ระดับชั้นที่ทำการกู้ความขัดข้องอยู่เดิมต้องยุติกระบวนการทุกอย่าง รูปแบบการทำงานแบบเป็นลำดับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ รูปแบบการทำงานจากระดับชั้นล่างขึ้นบน (bottom-up escalation) และ รูปแบบการทำงานจากระดับชั้นบนลงล่าง (top-down escalation)

- รูปแบบการทำงานจากระดับชั้นล่างขึ้นบน (bottom-up escalation)

รูปแบบการทำงานจากระดับชั้นล่างขึ้นบนนี้ เป็นการกำหนดให้กระบวนการกู้ความขัดข้องในระดับชั้นออฟติคอลลบหน้าที่ในการแก้ไขความขัดข้องที่เกิดขึ้นก่อน เมื่อระดับชั้นนี้ไม่สามารถแก้ไขความขัดข้องที่เกิดขึ้นได้ หรือกระบวนการแก้ไขใช้เวลามากกว่าค่าขีดเวลาที่กำหนด ระดับชั้นไอพีจะรับหน้าที่ในการกู้ความขัดข้องถัดไป ข้อดีของรูปแบบนี้คือ ถ้าความขัดข้องที่เกิดขึ้นสามารถแก้ไขได้ในระดับชั้นออฟติคอลล เวลาที่ใช้ในการกู้ความขัดข้องจะไม่มากนัก เมื่อเทียบกับการกู้ความเสียหายดังกล่าวในระดับชั้นไอพี



รูปที่ 2.11: รูปแบบการทำงานแบบไม่ประสานกัน

- รูปแบบการทำงานจากระดับชั้นบนลงล่าง (top-down escalation)

รูปแบบการทำงานจากระดับชั้นบนลงล่างนี้เป็นการกำหนดให้ระดับชั้นไอพีรับหน้าที่ในคู่ความขัดข้องที่เกิดขึ้นก่อน จากนั้นจึงเป็นระดับชั้นออฟติคัลที่จะทำหน้าที่ในคู่ความขัดข้องที่เกิดขึ้นถัดไป การกำหนดให้ระดับไอพีทำการคู่ความขัดข้องก่อนนั้นเนื่องจาก ในระดับไอพีอุปกรณ์จัดเส้นทางบนโครงข่ายจะทราบถึงข้อมูลของโครงข่าย ณ ขณะนั้น รวมไปถึงประเภทของทราฟฟิกซึ่งสามารถจัดลำดับความสำคัญ (priority) ในการคู่ความขัดข้องได้ก่อน [15]

2.2.3 กลยุทธ์ของความอยู่รอดโดยพิจารณาการคู่ความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น (multi-layer survivability strategies)

กลยุทธ์ของความอยู่รอดของโครงข่ายโดยพิจารณาการคู่ความขัดข้องแบบหลายระดับชั้นแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ กลวิธีการคู่ความขัดข้องแบบสถิต (static recovery technique) และ กลวิธีการคู่ความขัดข้องแบบพลวัต (dynamic recovery technique) โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.3.1 กลวิธีการคู่ความขัดข้องแบบสถิต (static recovery technique)

การคู่ความขัดข้องแบบสถิต เป็นรูปแบบการคู่ความขัดข้องที่สามารถเตรียมการได้ในลักษณะออฟไลน์ (offline configuration) นั่นคือรูปแบบการคู่ความขัดข้องจะถูกเตรียมไว้ก่อนการให้บริการ รูปแบบการเตรียมการคู่ความขัดข้องแบบสถิตหรือที่เรียกว่า การป้องกัน (protection) นั้นจะถูกเตรียมไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ความขัดข้องที่เกิดขึ้นส่งผลต่อทราฟฟิกหลังจากการเปิดให้บริการ ดังนั้นการป้องกันความขัดข้องดังกล่าวจะไม่ทำให้ทอพอโลยี (topology) ของโครงข่ายเปลี่ยนแปลงไปจากทอพอโลยีขณะก่อนเริ่มให้บริการ การสร้างการป้องกันแบบสถิตแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

- Duplicated protection

การเตรียมการป้องกันในลักษณะนี้จะพิจารณาการป้องกันในทุกองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องนั่นคือ คำร้องขอจำเป็นต้องมีการป้องกันรองรับทั้งในระดับชั้นออฟติคัล และ ระดับชั้นไอพี นอกจากนี้เส้นทางป้องกันดังกล่าวจะต้องมีการป้องกันของตัวเองอีกด้วย ดังรูปที่ 2.12.ก จะเห็นได้ว่า องค์ประกอบของการป้องกันที่จำเป็นคือ เส้นทางป้องกันเพื่อรองรับการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี ทางเดินแสงป้องกันสำหรับทางเดินแสงที่ใช้งาน และ ทางเดินแสงป้องกันสำหรับทางเดินแสงของเส้นทางป้องกัน

- Logical spare unprotected

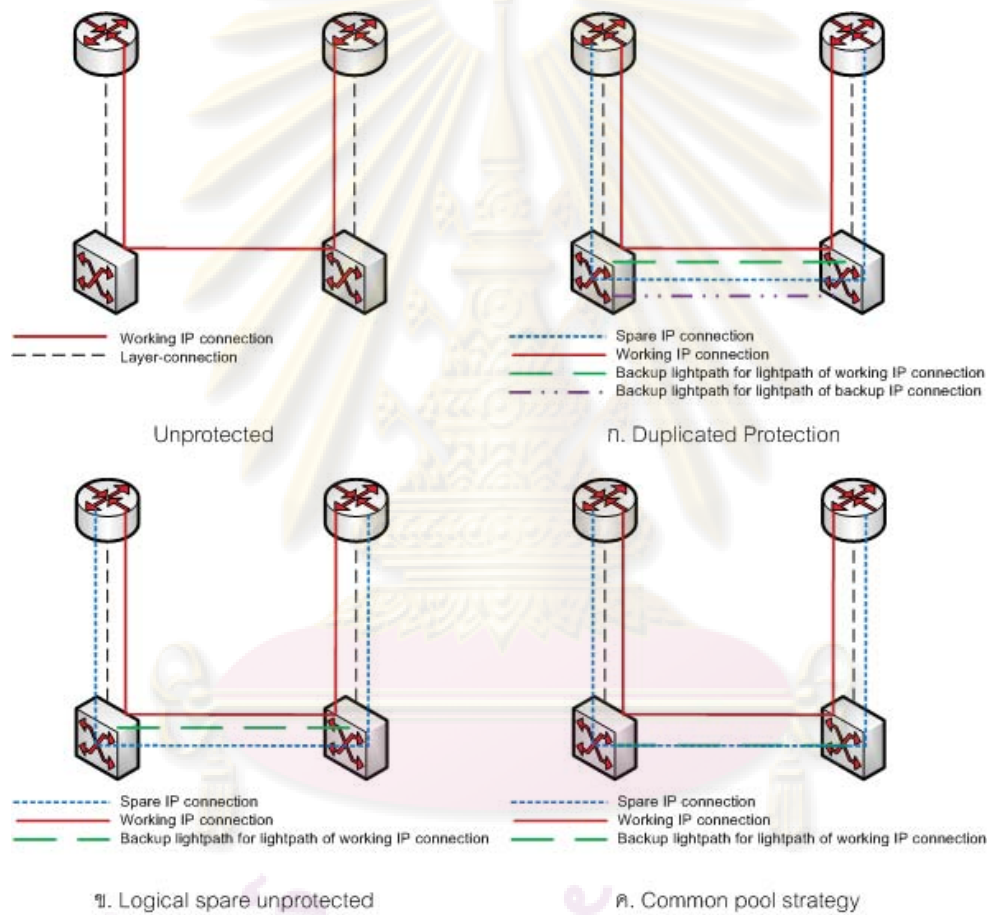
การสร้างการป้องกันในลักษณะนี้จะพิจารณาการป้องกันเพียงเส้นทางหลักเท่านั้น ซึ่งจะแตกต่างจากการเตรียมการป้องกันแบบ Duplicated protection ตรงที่ จะไม่มีการเตรียมทางเดินแสงป้องกันสำหรับทางเดินแสงของเส้นทางป้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12.ข นอกจากนี้การละการเตรียมการป้องกันดังกล่าวจะทำให้ปริมาณความจุสำรองที่จำเป็นต้องใช้ลดลงอีกด้วย

- Common pool strategy

รูปแบบการสร้างการป้องกันในลักษณะนี้จะกระทำในลักษณะเดียวกันกับการสร้างการป้องกันในรูปแบบ Logical spare unprotected โดยที่ จะนำความจุสำรองที่ใช้ในการเตรียมเส้นทางป้องกันเพื่อรองรับการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี มาใช้ร่วมกับความจุสำรองที่ใช้ในการเตรียมทางเดินแสงป้องกันสำหรับทางเดินแสงที่ใช้งาน ดังรูปที่ 2.12.ค ซึ่งจุดประสงค์ของการเตรียมการป้องกันแบบนี้คือ การทำให้ความจุสำรองที่จำเป็นต้องเตรียมเพื่อป้องกันความขัดข้องมีปริมาณลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การเตรียมการป้องกันใน 2 รูปแบบที่ได้กล่าวข้างต้น

2.2.3.2 กลวิธีการกู้ความขัดข้องแบบพลวัต (dynamic recovery technique)

การกู้ความขัดข้องในลักษณะนี้ จะเป็นการกู้ความขัดข้องเมื่อมีการขัดข้องเกิดขึ้นในโครงข่ายภายหลังการส่งข้อมูลคำร้องขอแล้ว ดังนั้นการจัดการความขัดข้องดังกล่าวจำเป็นต้องใช้หลักการจัดสรรโครงข่ายแบบออนไลน์ (online configuration) การจัดสรรโครงข่ายแบบออนไลน์นี้จะมีหน้าที่ดูแลการจองและยกเลิกการจองความจุสำรองในกรณีที่โครงข่ายเกิดความขัดข้องขึ้น รวมไปถึง การดูแลทอพอโลยีที่เปลี่ยนไปในระหว่างดำเนินการกู้ความขัดข้อง การกู้ความขัดข้องในลักษณะนี้จำเป็นต้องใช้เทคนิคหรือกระบวนการที่มีความไวในการคำนวณสูง เพื่อลดผลกระทบที่อาจส่งผลกระทบต่อทราฟฟิก



ข. Logical spare unprotected

ค. Common pool strategy

รูปที่ 2.12: กลวิธีการกู้ความขัดข้องแบบสถิต

ศูนย์วิจัยทรัพยากรสารสนเทศ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การวางแผนทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นแบบสถิต สำหรับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์

บทนี้จะเป็นการกล่าวถึงขั้นตอนวิธีการวางแผนทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้น โดยจะเลือกนำวิธีการกู้ความขัดข้องที่ได้กล่าวถึงในบทที่แล้ว มาใช้เพื่อสร้างขั้นตอนวิธีที่สามารถรองรับความขัดข้องที่เกิดจาก เส้นใยแสง อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง เส้นทางเดินแสง หรืออุปกรณ์จัดเส้นทาง นอกจากนี้แนวทางการออกแบบจำเป็นต้องสามารถรองรับมัลติคาสต์กราฟฟิกได้ทั้ง 3 ประเภทอีกด้วย และเนื่องจาก ทางผู้วิจัยมุ่งเน้นการกู้ความขัดข้องเฉพาะกราฟฟิกที่ต้องการค่าความน่าเชื่อถือสูง ดังนั้นแนวทางการออกแบบจะกระทำในลักษณะสถิต

หลักการออกแบบการวางแผนทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นแบบสถิตนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน นั่นคือ การออกแบบเพื่อรองรับความขัดข้อง และ การออกแบบเพื่อลดปริมาณการใช้ความจุสำรองของโครงข่าย โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อจากนี้

3.1 การออกแบบเพื่อรองรับความขัดข้อง

ก่อนการออกแบบการวางแผนทางป้องกันเพื่อรองรับความขัดข้องนั้น สิ่งแรกที่จะต้องคำนึงถึงคือข้อมูลที่ป้อนเข้า (input) ในขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ ซึ่งข้อมูลเหล่านั้นมีดังนี้

- ทอพอโลยีในระดับชั้นออปติคัล (optical) และ ไอพี (IP)

สำหรับงานวิจัยนี้จะแทนด้วยเมตริกซ์จัตุรัสที่มีขนาดเท่ากับจำนวนโหนดของระดับชั้นออปติคัล โดยที่ค่าในแต่ละตำแหน่งของเมตริกซ์จะมีค่าเป็น 1 เมื่อคูโหนดในระดับชั้นนั้นมีการเชื่อมโยงถึงกันโดยตรง และมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่มีการเชื่อมโยงระหว่างคูโหนด

- คำร้องขอ

คำร้องขอในที่นี้คือ เส้นทางที่เชื่อมจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง ทั้งในระดับชั้นไอพี และระดับชั้นออปติคัล โดยที่เส้นทางเหล่านี้จำเป็นต้องได้รับการป้องกันเพื่อความต่อเนื่องในการส่งข้อมูลในกรณีที่เกิดความขัดข้องขึ้นในโครงข่าย

- ข้อมูล SRLG

ข้อมูลนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญเมื่อต้องพิจารณาโครงข่ายที่มีระดับชั้นมากกว่า 1 ระดับชั้น ข้อมูลนี้จะอยู่รูปแบบ เซตของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี นั่นคือ SRLG ของการเชื่อมโยงหนึ่งในระดับชั้นไอพี จะประกอบด้วยกลุ่มของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีที่ใช้การเชื่อมโยงในระดับชั้นออปติคัลเดียวกับการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีนั้น

- ความจุสำรองสูงสุดที่สามารถใช้ได้

เนื่องจากความจุสำรองในแต่ละการเชื่อมในระดับชั้นออฟติคอลลมีจำกัด ดังนั้นการออกแบบจำเป็นต้องใช้ค่าความจุสำรองสูงสุดเป็นตัวกำหนดการวางเส้นทางป้องกัน โดยที่ค่าความจุสำรองในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เป็น จำนวนหน่วย (capacity unit) ซึ่งจะมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวกเท่านั้น สำหรับปริมาณความจุสำรองของแต่ละการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลนั้น ในการทดลองจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10 หน่วย

เพื่อความสะดวกในการกล่าวอ้างถึงข้อมูลต่างๆในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยจึงให้นิยามพารามิเตอร์ขึ้นมาดังแสดงในตารางที่ 3.1 เพื่อใช้ในการเรียกถึงต่อไป

ตารางที่ 3.1: ตารางนิยามพารามิเตอร์

V, E	จำนวนโหนดและการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลล
G_O, G_I	เมตริกซ์แสดงทอพอโลยีของโครงข่ายในระดับชั้นออฟติคอลล และ ไอพี
\mathcal{L}	เซตของทางเดินแสงในระดับชั้นออฟติคอลลที่ถูกใช้โดยคำร้องขอ
L_i	ลำดับโหนดของทางเดินแสงที่ i ในระดับชั้นออฟติคอลลของคำร้องขอ, $L_i \in \mathcal{L}$
\mathcal{R}	เซตของการเชื่อมโยงระหว่างโหนดต้นทางถึงโหนดปลายทางในระดับชั้นไอพีของคำร้องขอ
R_i	ลำดับโหนดของการเชื่อมต่อที่ i ในระดับชั้นไอพีของคำร้องขอ, $R_i \in \mathcal{R}$
\mathcal{W}_i	เซตของทางเดินแสงป้องกันในระดับชั้นออฟติคอลลที่ใช้เพื่อป้องกัน L_i เช่น $\mathcal{W}_i = \{W_i^1, W_i^2, \dots, W_i^n\}$
W_i^n	ลำดับโหนดของทางเดินแสงป้องกันในระดับชั้นออฟติคอลลที่ n เพื่อป้องกัน L_i , $W_i^n \in \mathcal{W}_i$
\mathcal{M}_i	เซตของการเชื่อมต่อป้องกันในระดับชั้นไอพีที่ใช้เพื่อป้องกัน R_i เช่น $\mathcal{M}_i = \{M_i^1, M_i^2, \dots, M_i^n\}$
M_i^n	ลำดับโหนดของการเชื่อมต่อป้องกันในระดับชั้นไอพีที่ n เพื่อป้องกัน R_i , $M_i^n \in \mathcal{M}_i$
B_i	เซตของการเชื่อมต่อป้องกันในระดับชั้นออฟติคอลลที่ถูกเปลี่ยนส่งจาก \mathcal{M}_i
B_i^n	ลำดับโหนดของการเชื่อมต่อป้องกันในระดับชั้นออฟติคอลลที่ n ที่ถูกเปลี่ยนส่งมาจาก M_i^n
η	จำนวนรูปแบบทั้งหมดของการวางเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น
\mathcal{P}_i	รูปแบบเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นที่ i , $i \in \{1, 2, \dots, \eta\}$ เช่น $\mathcal{P}_1 = \{W_1^1, \dots, W_n^1, B_1^1, \dots, B_m^1\}$
C_i	จำนวนความจุสำรองที่ใช้เพื่อวาง P_i
$SRLG_i$	เซตของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีที่ใช้การเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลเดียวกับการเชื่อมโยงที่ i ในระดับชั้นไอพี

3.1.1 การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นออฟติคอลล

หลังจากรับข้อมูลทั้ง 4 ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นเข้ามาในขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันแล้ว กระบวนการหาเส้นทางจะเริ่มต้น โดยเริ่มจากกระบวนการหาเส้นทางป้องกันที่เป็นไปได้ทั้งหมด ในระดับชั้นออฟติคอลล

W_i เพื่อรองรับคำร้องขอที่อยู่ในชั้นอพติคอลล L_i

จากการสังเกตพบว่ามัลติคาสต์ทราฟฟิกที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 นั้น มีความหลากหลายแตกต่างกันออกไป สำหรับทราฟฟิกประเภทมัลติคาสต์ในระดับชั้นไอพี พบว่า ทางเดินแสงในระดับชั้นอพติคอลล นั้นจะมีลักษณะเชื่อมเฉพาะโหนดถึงโหนด หรืออาจกล่าวว่ามีลักษณะคล้ายทางเดินแสงของ ทราฟฟิกชนิดยูนิคาสต์ ส่วนทราฟฟิกประเภท มัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นอพติคอลล นั้น จะมีการวางแผนทางเดินของข้อมูลในรูปแบบของการใช้เส้นทางเดินแสง ที่เชื่อมระหว่างโหนดต้นทางถึงโหนดปลายทางหลายเส้นตามจำนวนของโหนดปลายทาง และสำหรับทราฟฟิกประเภทสุดท้ายนั้นคือ มัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นอพติคอลล พบว่าเส้นทางของข้อมูลในระดับชั้นอพติคอลลนั้นมีรูปแบบเป็นทางเดินแสงแบบต้นไม้ นั่นคือมีเส้นทางเดินจากโหนดต้นทางถึงกลุ่มของโหนดปลายทาง ดังนั้นการที่จะออกแบบเพื่อให้รองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกในระดับชั้นอพติคอลลได้ จึงจำเป็นต้องออกแบบโดยการหาเส้นทางป้องกันเชิงยูนิคาสต์ เพื่อให้ขั้นตอนวิธีที่น่าเสนอสามารถครอบคลุมคุณลักษณะของมัลติคาสต์ทั้ง 3 ชนิดได้

คำร้องขอในระดับชั้นอพติคอลล L ที่จำเป็นต้องหาเส้นทางป้องกันให้คือ คู่โหนดทุกคู่ในระดับชั้นอพติคอลลที่มีการส่งข้อมูลถึงกัน ยกตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นอพติคอลลที่มีโหนดต้นทาง 1 โหนด และ โหนดปลายทาง 2 โหนด คำร้องขอดังกล่าวจะต้องการเส้นทางป้องกันในระดับชั้นอพติคอลลทั้งสิ้น 2 เส้นทางด้วยกัน นับจากคู่โหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางที่ 1, L_1 และ คู่โหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางที่ 2, L_2

เมื่อทราบจำนวนทางเดินแสงทั้งหมดที่จะต้องวางแผนเส้นทางป้องกันให้แล้ว ขั้นตอนต่อจากนี้จะเป็นผังงานในรูปที่ 3.1 ก่อนที่จะทำการหาเส้นทางป้องกันนั้น เราจำเป็นต้องทราบถึงผลกระทบของรูปแบบความขัดข้องที่จะทำการพิจารณาว่ามีผลอย่างไร และสามารถหลีกเลี่ยงได้อย่างไร หลักการของการวางแผนเส้นทางป้องกันแบบหลีกเลี่ยงเส้นทางที่อาจได้รับผลกระทบจากความขัดข้อง (FIPP: Failure Independent Path Protection) นั้นสามารถกำหนดได้จากการศึกษารูปแบบในการหาเส้นทางป้องกันที่สามารถป้องกันความขัดข้องได้มากที่สุด ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.2 โดยที่จะเห็นได้ว่าการเลือกออกแบบการวางแผนเส้นทางป้องกันแบบ FIPP ชนิด node-disjoint จะเป็นวิธีที่มีความน่าจะเป็นในการกักความขัดข้องได้มากที่สุด โดยเฉพาะในกรณี IP link failure ที่การออกแบบในลักษณะนี้สามารถกักความขัดข้องได้ 100 % ดังนั้นในการออกแบบในระดับชั้นอพติคอลลนี้ ผู้วิจัยจะอาศัยเงื่อนไขบังคับ (constraint) node-disjoint ในการวางแผนเส้นทางป้องกัน

ตารางที่ 3.2: ตารางเปรียบเทียบการออกแบบเส้นทางป้องกันในระดับชั้นอพติคอลลโดยใช้หลักการ FIPP เมื่อเกิดความขัดข้องประเภทต่างๆ

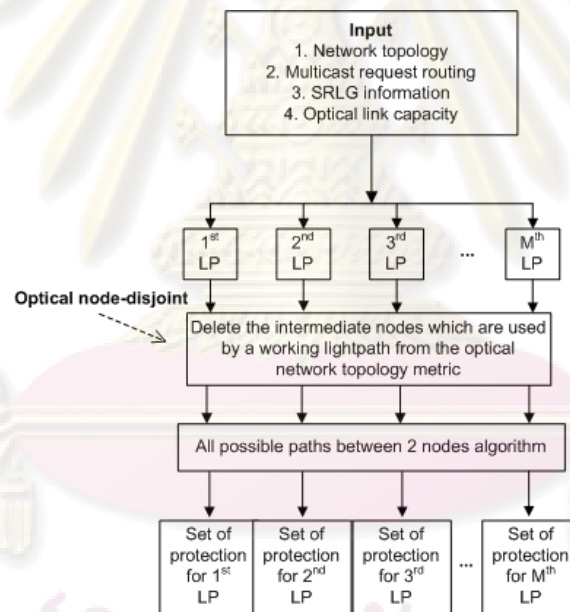
optical layer protection	link-disjoint	node-disjoint
optical node failure	$\leq 100 \%$	$\leq 100 \%$
optical link failure	$= 100 \%$	$= 100 \%$
IP node failure	$= 0 \%$	$= 0 \%$
IP link failure	$\leq 100 \%$	$= 100 \%$

ขั้นตอนการหาเส้นทางป้องกันสำหรับระดับชั้นอพติคอลนี้ทำได้โดย อาศัยเงื่อนไขบังคับ node-disjoint นั่นคือการลบโหนดที่เป็นโหนดทางผ่านของทางเดินแสงที่ 1 จากนั้นเริ่มหาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่เชื่อมระหว่างโหนดต้นทาง และ โหนดปลายทางของทางเดินแสงนี้ในรูปของลำดับโหนด W_i^n ซึ่งเส้นทางเหล่านี้จะอยู่ภายในเซตของเส้นทางป้องกันของทางเดินแสงที่ 1, W_1 จากนั้นกระทำในลักษณะเดียวกันกับทางเดินแสงทั้งหมดที่อยู่ในคำร้องขอ ซึ่งสุดท้ายจะได้ จำนวนเซตของเส้นทางป้องกันเท่ากับจำนวนทางเดินแสงของคำร้องขอ ขั้นตอนเหล่านี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พิจารณาทางเดินแสงแรกของคำร้องขอ L_1 เพื่อทำการสร้างเส้นทางป้องกันที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อรองรับความขัดข้องที่อาจเกิดขึ้นได้ในโครงข่าย โดยอ้างอิงจาก G_O ที่ทำการลบโหนดระหว่างทางที่เชื่อมระหว่างโหนดต้นทาง และ โหนดปลายทาง ของ L_1 เรียบร้อยแล้ว สำหรับการลบโหนดระหว่างทางนั้นทำได้โดยการเปลี่ยนองค์ประกอบของเมตริกซ์ G_O ที่มีสมาชิกของคู่ลำดับเป็นโหนดระหว่างทางใน L_1 ยกเว้นกรณีที่โหนดต้นทางกับโหนดปลายทางเชื่อมต่อกันโดยตรง ซึ่งในกรณีนี้ จะทำการเปลี่ยนองค์ประกอบที่มีสมาชิกของคู่ลำดับเป็นโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง เท่านั้น
2. นำ G_O ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาทำการหาการเชื่อมต่อที่เหลือทั้งหมดของแต่ละโหนด โดยที่จะทำการบันทึกลงในเซต `cand_mat` ซึ่งแต่ละแถวจะแทนเซตของโหนดที่สามารถเชื่อมต่อได้โดยตรงกับโหนดหมายเลขแถวนั้น
3. กำหนด `close_list` คือเซตลำดับของเส้นทางป้องกัน โดยเริ่มต้นจะถูกกำหนดให้มีสมาชิกเป็นโหนดต้นทางเพียงโหนดเดียว จากนั้นกำหนดให้ `check_list` คือเซตที่มีสมาชิกในแต่ละแถวเป็นเมตริกซ์ขนาด $1 \times V$ ใช้เพื่อตรวจสอบว่าการเชื่อมต่อไปยังโหนดใดถูกใช้ไปแล้วบ้าง ถ้าตัวเลขในตำแหน่งใดของเมตริกซ์มีค่าเท่ากับ 0 นั้นหมายความว่า การเชื่อมโยงไปยังโหนดในตำแหน่งนั้นจะไม่สามารถใช้ได้อีก ซึ่งเริ่มต้นจะกำหนดให้ `check_list = \{[1, 1, \dots, 1]_{1 \times V}\}` และสุดท้ายกำหนดให้ `open_list` คือเซตของโหนดตัวเลือกที่สามารถเชื่อมต่อได้ในขณะนั้น โดยมีจำนวนแถวของ `open_list` แสดงถึงจำนวนฮอปที่เส้นทางป้องกันได้ใช้ไป สำหรับ `open_list` เริ่มต้นจะกำหนดให้มีสมาชิกแถวแรกเป็น `cand_mat` ของโหนดต้นทาง
4. ตรวจสอบในแถวสุดท้ายของ `open_list` ว่ายังคงมีสมาชิกเหลืออยู่หรือไม่ ถ้าไม่มีสมาชิกเหลือแล้ว ต้องทำการตรวจสอบต่อว่าแถวสุดท้ายที่ตรวจสอบนั้นคือแถวแรกหรือไม่ ถ้าเป็นแถวแรกจริงกระบวนการหาเส้นทางป้องกันก็จะยุติลง นั้นหมายความว่า จะไม่สามารถหาเส้นทางป้องกันเพิ่มเติมได้อีก แต่ถ้าแถวที่ทำการตรวจสอบไม่ใช่แถวแรก ก็จะมีการตัดแถวนั้นทิ้ง และ ลบโหนดตัวแรกในแถวถัดขึ้นมาออก จากนั้นจะทำการตัด `check_list` ในแถวสุดท้ายออกเช่นกันเพื่อให้จำนวนแถวของ `open_list` และ `check_list` มีจำนวนเท่ากัน ในทางตรงกันข้ามถ้าตรวจสอบแถวสุดท้ายของ `open_list` แล้วยังคงมีสมาชิกเหลืออยู่ โหนดตัวแรกของแถวสุดท้ายจะถูกนำมาตรวจสอบว่าสามารถนำไปต่อใน `close_list` ได้หรือไม่ ซึ่งการตรวจสอบนั้นกระทำได้โดยพิจารณาตำแหน่งของโหนดนั้นใน `check_list` แถวสุดท้ายว่ามีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ ถ้าตำแหน่งนั้นมีค่าไม่เท่ากับ 0 (ในที่นี้จะให้มีค่าเท่ากับ 1) แสดงว่าโหนดนั้นสามารถนำมาใช้ในการสร้างเส้นทางป้องกันได้ ในกรณีโหนดที่นำมาใช้

คือโหนดปลายทาง จะแทน $close_list$ นั้นด้วย W_1^n โดยที่ n คือลำดับของเส้นทางป้องกันที่ใช้เพื่อรองรับ L_1 จากนั้นทำการลบโหนดที่เป็นโหนดปลายทางนี้ออกจาก $close_list$ และ $open_list$ แถวสุดท้าย เพื่อการสร้างเส้นทางป้องกันต่อไป สำหรับกรณีโหนดที่นำมาใช้ไม่ใช่โหนดปลายทาง จะทำการเพิ่มแถวของ $check_list$ ขึ้นมาอีก 1 แถว โดยแถวที่เพิ่มขึ้นมานั้นจะมีลักษณะเหมือนแถวก่อนหน้าทุกประการยกเว้นตำแหน่งของโหนดที่นำมาใช้ ซึ่งจะต้องมีค่าเท่ากับ 0 สำหรับ $check_list$ นั้นจำเป็นต้องเพิ่มแถวสุดท้ายขึ้นมาใหม่ ซึ่งแทนได้ด้วย $cand_mat$ ของโหนดนั้น ในกรณีที่ตำแหน่งของโหนดที่พิจารณามีค่าเท่ากับ 0 ใน $check_list$ แถวสุดท้าย แสดงว่าโหนดนั้นไม่สามารถนำมาใช้ได้อีกในการสร้างเส้นทางป้องกันนี้ ดังนั้นจะทำการลบโหนดดังกล่าวออกจาก $open_list$ แถวสุดท้ายเพื่อป้องกันการใช้โหนดซ้ำ

5. เมื่อ $open_list$ ไม่มีสมาชิกเหลือแล้ว จะได้เซตของการป้องกัน $\mathcal{W}_1 = \{W_1^1, W_1^2, \dots, W_1^n\}$ ที่สามารถรองรับ L_1 ได้ จากนั้นให้กระทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 - 4 สำหรับทุกทางเดินแสงของคำร้องขอ L_i ที่เป็นสมาชิกในเซตของ \mathcal{L}



รูปที่ 3.1: ผังงานการวางเส้นทางป้องกันให้กับทางเดินแสงของคำร้องขอในระดับชั้นออฟติคัล

3.1.2 การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพี

การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพีนั้นไม่จำเป็นต้องกระทำหลังจากการหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นออฟติคัล เนื่องจากการหาเส้นทางป้องกันในทั้ง 2 ระดับชั้นนั้นไม่จำเป็นต้องแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกัน การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพีนี้จะอ้างอิงจากข้อมูลที่รับเข้ามาตั้งแต่ครั้งแรก นั่นก็คือ ข้อมูลทอพอโลยีในระดับชั้นไอพี G_I , ข้อมูลคำร้องขอ \mathcal{R} , ข้อมูล $SRLG_i$ และ ข้อมูลความจุสำรองสูงสุดที่สามารถใช้ได้ สำหรับรูปแบบมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ประเภทในระดับชั้นไอพีนั้น สามารถนำหลัก

การวิเคราะห์เชิงยูนิคาสต์เช่นเดียวกับที่กระทำในระดับชั้นออฟติคอลลมาใช้ได้ ซึ่งจำนวนของเส้นทางที่จำเป็นต้องป้องกันในระดับชั้นไอพีนั้นจะเท่ากับจำนวนของโหนดปลายทางของคำร้องขอ

หลักการออกแบบนั้น จะมีความคล้ายคลึงกับขั้นตอนการหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นออฟติคอลลซึ่งจำเป็นต้องศึกษาการวางเส้นทางป้องกันโดยใช้หลักการ FIPP ทั้งชนิด link-disjoint และ node-disjoint ดังแสดงในตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าการวางเส้นทางป้องกันโดยใช้หลักการ FIPP ชนิด node-disjoint สามารถกัความขัดข้องที่เกิดจาก เส้นใยแสง อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง ทางเดินแสง และ อุปกรณ์จัดเส้นทาง ได้ทุกกรณี ดังนั้นผู้วิจัยจะเลือกการวางเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพีด้วยเงื่อนไขบังคับ node-disjoint

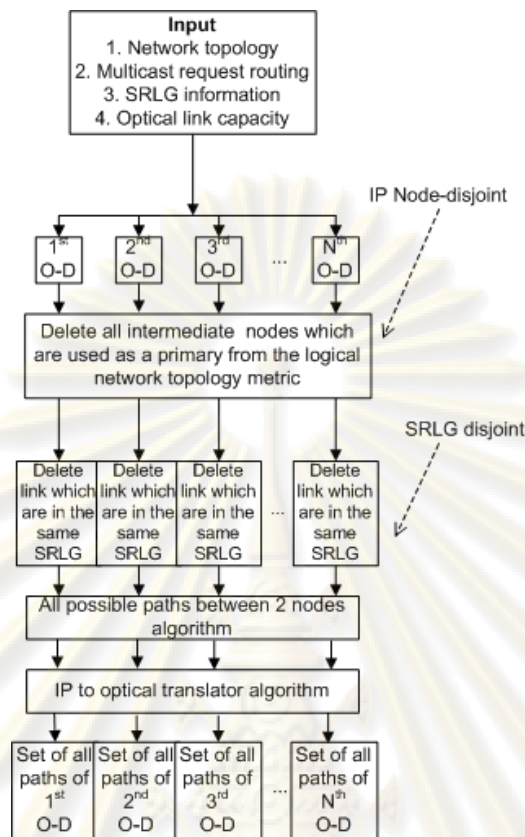
ตารางที่ 3.3: ตารางเปรียบเทียบการออกแบบเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพีโดยใช้หลักการ FIPP เมื่อเกิดความขัดข้องประเภทต่างๆ

optical layer protection	link-disjoint	node-disjoint
optical node failure	= 100 %	= 100 %
optical link failure	= 100 %	= 100 %
IP node failure	\leq 100 %	= 100 %
IP link failure	= 100 %	= 100 %

การหาเส้นทางป้องกันที่เป็นไปได้ทั้งหมด M_i ตามเงื่อนไข node-disjoint สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับระดับชั้นออฟติคอลล นั่นคือ การลบโหนดที่เป็นโหนดระหว่างทางที่เชื่อมระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางที่จะทำการวางเส้นทางป้องกัน นอกจากนี้การวางเส้นทางป้องกันสำหรับระดับชั้นไอพียังจำเป็นต้องคำนึงถึงประเด็นของ SRLG ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการดูแลโครงข่ายตั้งแต่ 1 ระดับชั้นขึ้นไป โดยข้อมูล SRLG ที่รับมาตั้งแต่ต้นจะอยู่ในรูปของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี และ เซตของการเชื่อมโยงในระดับไอพีที่มีการใช้การเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลเดียวกับการเชื่อมโยงนั้น โดยการสร้างเส้นทางป้องกันที่เป็น SRLG-disjoint เพื่อความสมบูรณ์ในหลักการ FIPP นั้นกระทำได้โดยการ ลบการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี G_I ที่อยู่ในเซต SRLG เดียวกันกับการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทางออก

การสร้างเส้นทางป้องกัน M_i ให้กับคำร้องขอในระดับชั้นไอพี R_i นั้นสามารถทำได้ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งผลจากการทำ node-disjoint, SRLG-disjoint และการหาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด จะทำให้ได้เซตตามจำนวนโหนดปลายทาง ซึ่งภายในแต่ละเซตจะประกอบด้วยลำดับของโหนดในระดับชั้นไอพีที่เป็นไปได้ทั้งหมด M_i^n ในการป้องกันความขัดข้องที่อาจส่งผลกระทบต่อคำร้องขอหนึ่งๆ

ขั้นตอนต่อมาคือการเปลี่ยนโดเมนของเส้นทางจาก M_i เป็น B_i ซึ่งการเปลี่ยนโดเมนนั้นหมายถึงการเปลี่ยนส่ง (mapping) จากเส้นทางในระดับชั้นไอพี ไปเป็น โดเมนในระดับชั้นออฟติคอลล เหตุผลของกระทำเช่นนี้เพื่อทำให้การจองความจุสำรองเป็นรูปธรรม เนื่องจากความจุสำรองจะเป็นค่าที่มีอยู่ในการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลเท่านั้น ดังนั้นการจองความจุสำรองจำเป็นต้องกระทำในระดับชั้นออฟติคอลลเท่านั้นเช่นเดียวกัน ขั้นตอนในการเปลี่ยนส่งเส้นทางป้องกันจากระดับชั้นไอพีเป็นระดับชั้น



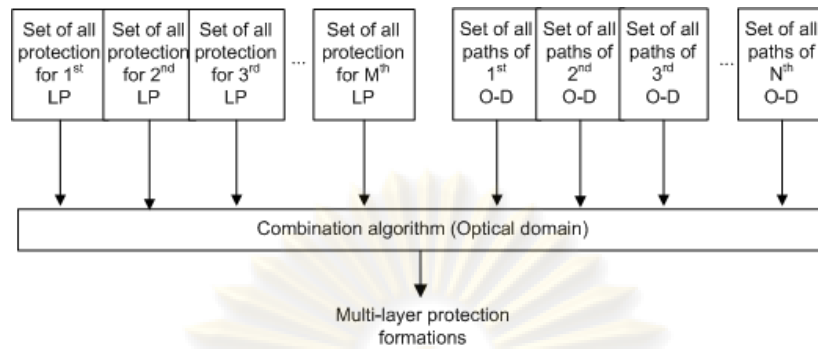
รูปที่ 3.2: ผังงานการวางเส้นทางป้องกันให้กับทางเดินแสงของคำร้องขอในระดับชั้นไอพี

ออกพัตคอลลนั้น เริ่มจากการพิจารณาคู่โหนดแรกของเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพี M_i ว่าจำเป็นต้องผ่านโหนดในระดับชั้นออกพัตคอลลใดบ้าง จากนั้นจึงพิจารณาเส้นทางในระดับชั้นออกพัตคอลลที่เชื่อมระหว่างลำดับโหนดที่ 2 และ 3 ในระดับชั้นไอพี โดยที่ลำดับโหนดในระดับชั้นออกพัตคอลลที่ถูกใช้ทั้งหมดจะถูกบันทึกลงใน B_i เพื่อใช้ในการคำนวณความจุสำรองต่อไป

3.1.3 การหาเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น

การกำหนดเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นนั้น สามารถหาได้จากข้อมูลที่ถูส่งออก (output) มาจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.1.1 และ 3.1.2 นั่นคือ W_i และ B_i ตามลำดับ โดยที่เส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น P_i นั้นจำเป็นต้องประกอบด้วยเส้นทางป้องกันเชิงยูนิคาสต์ของทุกองค์ประกอบคำร้องไม่ว่าจะเป็นระดับชั้นไหนก็ตามดังแสดงในรูปที่ 3.3

การหารูปแบบของการป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นสามารถทำได้โดยการจัดหมู่ (combination) ให้กับเส้นทางทั้งหมดนั่นคือ รูปแบบการป้องกัน 1 รูปแบบจำเป็นต้องประกอบด้วยสมาชิก 1 ตัวจากทุกเซตการป้องกัน ยกตัวอย่างเช่น เส้นทางป้องกันในระดับชั้นออกพัตคอลลที่ถูส่งออกมาคือ $W_1 = \{W_1^1, W_1^2, W_1^3\}$ และ $W_2 = \{W_2^1\}$ เส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพีที่ถูส่งออกมาคือ $B_1 = \{B_1^1, B_1^2\}$ และ $B_2 = \{B_2^1\}$ เพราะฉะนั้นจำนวนรูปแบบทั้งหมดในการวางเส้นทางป้องกันแบบพิจารณา



รูปที่ 3.3: ผังงานการวางเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น

การทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น (η) จะมีค่าเท่ากับ 6 ซึ่งค่านี้สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

$$\eta = \left(\prod_{\forall i} |W_i| \right) \times \left(\prod_{\forall j} |B_j| \right) \quad (3.1)$$

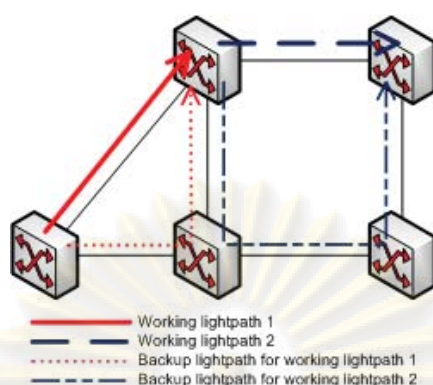
โดยที่ $|W_i|$ และ $|B_j|$ คือขนาดของ W_i และ B_j ตามลำดับ และเมื่อนำมาเรียงตามทฤษฎีการจัดหมู่จะได้ดังนี้ $P_1 = \{W_1^1, W_2^1, B_1^1, B_2^1\}$, $P_2 = \{W_1^1, W_2^1, B_1^2, B_2^1\}$, $P_3 = \{W_1^2, W_2^1, B_1^1, B_2^1\}$, $P_4 = \{W_1^2, W_2^1, B_1^2, B_2^1\}$, $P_5 = \{W_1^3, W_2^1, B_1^1, B_2^1\}$ และ $P_6 = \{W_1^3, W_2^1, B_1^2, B_2^1\}$

3.2 การออกแบบเพื่อลดปริมาณการใช้ความจุสำรองของโครงข่าย

การออกแบบเพื่อลดการใช้ความจุสำรองของโครงข่ายนั้นเป็นอีกหนึ่งจุดมุ่งหมายหลักในการวางเส้นทางป้องกัน การจะหาว่า P_i ใดที่สามารถให้ค่าการจองความจุสำรองได้น้อยที่สุดภายใต้การจำกัดปริมาณความจุสำรองสูงสุดในแต่ละการเชื่อมโยงที่สามารถใช้ได้ นั้น จะกระทำโดยใช้หลักการการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization)

การที่จะทำให้เส้นทางป้องกันใช้ปริมาณความจุสำรองของโครงข่ายให้ต่ำที่สุดได้นั้น เราจำเป็นต้องเลือกวิธีการที่เหมาะสมในการลดการใช้งานความจุสำรอง ซึ่งนั่นก็คือ การพิจารณาการใช้งานร่วมกันของความจุสำรอง (capacity sharing) จากที่ได้กล่าวถึงทฤษฎีของการกู้ความขัดข้องแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นในบทที่ 2 พบว่าการกำหนดการทำงานแบบเป็นลำดับ จะอาศัยการปล่อยให้ระดับชั้นใดระดับชั้นหนึ่งเริ่มกระบวนการกู้ความขัดข้องไปก่อนจนกระทั่งไม่สามารถกู้ได้ หรือ ใช้เวลามากกว่าค่าชี้วัดเวลา จากนั้นกระบวนการในระดับชั้นดังกล่าวจะต้องถูกหยุดลงและปล่อยให้อีกระดับชั้นหนึ่งเริ่มกระบวนการกู้ความขัดข้องต่อ จะเห็นได้ว่าการกำหนดกระบวนการกู้ความขัดข้องในลักษณะนี้แต่ละระดับชั้นจะมีการใช้ความจุสำรองในเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำเอาเอกลักษณ์การทำงานเช่นนี้มาลดค่าการจองความจุสำรองลงได้ สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกกระบวนการกู้ความขัดข้องแบบเป็นลำดับชั้นนี้เพื่อแก้ปัญหาการกู้ความขัดข้องของแต่ละระดับชั้นในเวลาเดียวกัน

จากบทที่ 2 พบว่ากระบวนการลดการจองความจุสำรองเมื่อพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นที่มีประสิทธิภาพที่สุด คือวิธี common-pool strategy ซึ่งเป็นกระบวนการหาเส้นทางที่ผ่านการเชื่อม



รูปที่ 3.4: การคำนวณปริมาณความจุสำรองโดยพิจารณาการใช้งานร่วมกันภายในระดับชั้น

โยงในระดับชั้นออฟติคอลละดับเดียวกัน ทำให้การจองความจุสำรองสำหรับการเชื่อมต่อโยงในระดับชั้นออฟติคอลละดับนั้นสามารถใช้ร่วมกันได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้จะเลือกวิธี common-pool strategy นี้เป็นแนวทางในการคิดปริมาณความจุสำรองรวมที่ใช้ในการสร้างการป้องกัน

นอกจากการใช้ความจุสำรองร่วมกันแบบต่างระดับชั้นแล้ว การเตรียมการป้องกันโดยคำนึงถึงการใช้ความจุสำรองร่วมกันภายในระดับชั้น ก็เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถทำให้ปริมาณความจุสำรองรวมที่ใช้ในการเตรียมการป้องกันลดลงได้ ดังรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้มีทางเดินแสงของคำร้องขออยู่ 2 ทางเดินแสง และการออกแบบทางเดินแสงป้องกันสำหรับทางเดินแสงของคำร้องก็จะมีอยู่ 2 ทางเดินแสงด้วยกัน ในกรณีนี้การเตรียมความจุสำรองโดยไม่พิจารณาการใช้งานร่วมกันระหว่างทางเดินแสงป้องกันทั้ง 2 นั้นจะมีค่าเท่ากับ 5 หน่วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเตรียมความจุสำรองในลักษณะนี้เป็นการเตรียมความจุสำรองที่ซ้ำซ้อน ความซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดตรงการเชื่อมโยงที่เป็นทางผ่านของทางเดินแสงป้องกันทั้ง 2 ซึ่งสามารถลดการเตรียมความจุสำรองสำหรับการเชื่อมโยงนี้ให้เหลือเพียง 1 หน่วยได้เนื่องจากทางเดินแสงของคำร้องขอสามารถเกิดความขัดข้องได้เพียงเส้นเดียว ดังนั้นด้วยการเตรียมความจุสำรองในรูปแบบนี้จะทำให้ความจุสำรองรวมมีค่าเท่ากับ 4 หน่วย

3.2.1 วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ (Candidate check scheme)

กระบวนการออกแบบขั้นตอนวิธีเพื่อหารูปแบบของการป้องกันที่ทำให้การจองความจุสำรองต่ำที่สุดภายใต้การจำกัดปริมาณความจุสำรองสูงสุดที่สามารถใช้ได้ในรูปแบบนี้นั้น ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 โดยขั้นแรกเพื่อความสะดวกในการคำนวณ ผู้วิจัยจึงเปลี่ยนส่งรูปแบบของลำดับโหนดใน W_i^n และ B_i^n ให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์จัตุรัสขนาดเท่ากับ $V \times V$ ดังนี้

$$W_i^n = \begin{bmatrix} W_i^n(1,1) & \cdots & W_i^n(1,V) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_i^n(V,1) & \cdots & W_i^n(V,V) \end{bmatrix}_{V \times V}$$

โดยที่

$$W_i^n(p, q) = \begin{cases} 1, & \text{ถ้า } W_i^n \text{ ใช้การเชื่อมโยง } (p, q) \\ 0, & \text{ถ้า } W_i^n \text{ ไม่ได้ใช้การเชื่อมโยง } (p, q) \end{cases}$$

ซึ่ง $p, q \in \{1, 2, \dots, V\}$ และสำหรับ B_i^n จะนิยามแตกต่างจาก W_i^n เล็กน้อยดังนี้

$$B_i^n = \begin{bmatrix} B_i^n(1, 1) & \cdots & B_i^n(1, V) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_i^n(V, 1) & \cdots & B_i^n(V, V) \end{bmatrix}_{V \times V}$$

โดยที่ $B_i^n(p, q)$ เท่ากับจำนวนครั้งที่ B_i^n ผ่านการเชื่อมโยง (p, q) ซึ่ง $p, q \in \{1, 2, \dots, V\}$

การคำนวณการใช้งานความจุสำรองร่วมกันในระดับชั้นอพติคอลนั้นจะกระทำระหว่าง W_i^n ด้วยกันเอง ส่วนการใช้งานความจุสำรองร่วมกันในระดับไอพีก็จะเป็นการร่วมใช้ระหว่าง B_i^n และสุดท้ายคือ การร่วมใช้ความจุสำรองระหว่างระดับชั้นนั้นคือร่วมใช้ระหว่าง B_i^n และ W_i^n ซึ่งการแยกคิดทีละส่วนจะเป็นการเสียเวลาเป็นอย่างมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางการคำนวณร่วมกันในครั้งเดียว โดยเริ่มจาก

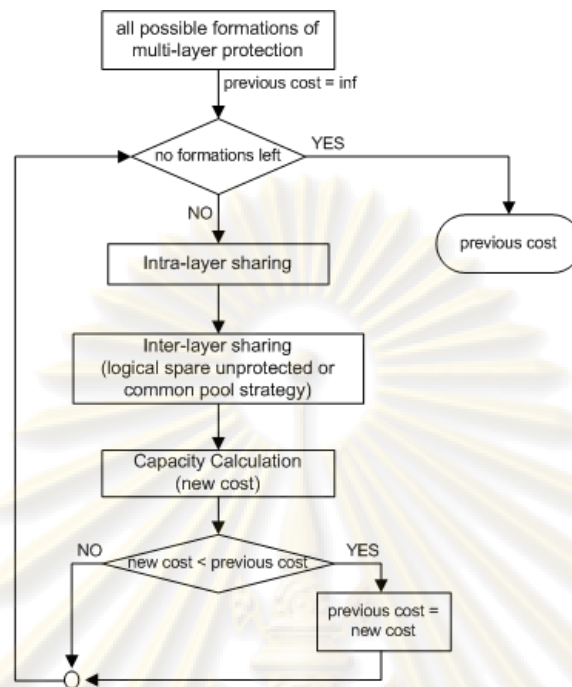
- กำหนดให้ Z เป็นเมตริกซ์ศูนย์ ที่มีขนาดเท่ากับ $V \times V$ จากนั้นนำสมาชิกตัวแรกจาก $P_1 = \{W_1^1, W_2^1, \dots, W_n^1, B_1^1, B_2^1, \dots, B_m^1\}$ นั่นคือ $P_1\{1\} = W_1^1$ มาเปรียบเทียบกับ Z โดยการเปรียบเทียบจะกระทำในทุกการเชื่อมโยง (p, q) โดยที่ $p, q \in \{1, 2, \dots, V\}$ ซึ่งค่าของ $Z(p, q)$ นั้นจะเปลี่ยนไปเป็น $P_1\{1\}(p, q)$ ก็ต่อเมื่อค่าการจองความจุสำรองของ $P_1\{1\}$ บนการเชื่อมโยง (p, q) มีค่ามากกว่า $Z(p, q)$ ณ ขณะนั้นดังแสดงในสมการที่ 3.2

$$Z(p, q) = \max(Z(p, q), P_n\{k\}(p, q)) \quad (3.2)$$

โดยที่ k คือจำนวนสมาชิกทั้งหมดของ P_n และ $n \in \{1, 2, \dots, \eta\}$ จากนั้นเปรียบเทียบซ้ำในรูปแบบเดิมจนกระทั่งครบทุกสมาชิกในเซต P_n โดยถ้าสมาชิกใดที่มีปริมาณการจองความจุสำรองในการเชื่อมโยงเกิน ค่าความจุสำรองสูงสุดที่สามารถใช้ได้ อย่างน้อย 1 การเชื่อมโยง รูปแบบการป้องกันนั้น P_n จะถูกละทิ้งจากการพิจารณาทันที

- ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำเมตริกซ์ Z จากขั้นที่ 1 มาคำนวณหาปริมาณความจุสำรอง C_n ที่ต้องใช้ในการวางแผนป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นที่ n โดยเริ่มจาก พิจารณา Z ที่ได้มา ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณความจุสำรองที่ใช้ในการเชื่อมโยง (p, q) และการเชื่อมโยง (q, p) อาจมีปริมาณที่ไม่เท่ากัน ทั้งที่การเชื่อมโยงดังกล่าวคือการเชื่อมโยงเดียวกัน เพียงแต่มีทิศทางการส่งข้อมูลตรงกันข้าม ดังนั้น ค่าการจองความจุสำรองที่จะใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณคือ การเชื่อมโยงที่มีปริมาณการจองความจุสำรองมากกว่า จากนั้นเมื่อได้ตัวแทนในแต่ละการเชื่อมโยงแล้ว จึงจะนำค่าเหล่านั้นมารวมกัน เพื่อหาปริมาณความจุสำรองที่ใช้ทั้งหมดเพื่อรองรับรูปแบบการป้องกันแบบพิจารณาร่วมกันหลายระดับชั้นที่ n ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$C_n = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^V \sum_{q=1}^V \max(Z(p, q), Z(q, p)) \quad (3.3)$$

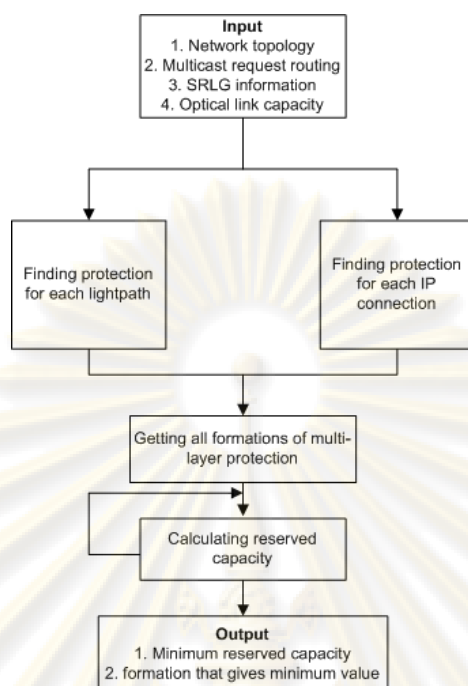


รูปที่ 3.5: ผังงานการหารูปแบบการป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นที่ให้ปริมาณการจองความจุสำรอง ต่ำที่สุด

- เมื่อได้ C_n จากขั้นตอนที่ 2 แล้ว จากนั้นจะต้องทำการเปรียบเทียบค่าการจองความจุสำรองในทุกๆ รูปแบบ นั่นคือ นำค่า C_1 เปรียบเทียบกับ C_2 ถ้า C_2 มีค่าน้อยกว่า ก็จะมี C_2 เป็นตัวเปรียบเทียบต่อไป แต่ถ้า C_1 มีค่าน้อยกว่า C_2 ก็จะต้องถูกนำไปเปรียบเทียบต่อไปดังสมการที่ 3.4 ซึ่งการเปรียบเทียบจำเป็นต้องทำให้ครบเพื่อ หาค่าปริมาณการจองความจุสำรองที่น้อยที่สุดที่เส้นทางป้องกันใช้เพื่อรองรับความขัดข้องได้นั้นมีค่าเท่าใด โดยรูปแบบการป้องกันใดที่ให้ค่าการจองความจุสำรองต่ำสุดจะถูกส่งออก (output) ซึ่งถือเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ

$$C_{\min} = \min_{\forall i} C_i, i \in \{1, 2, \dots, \eta\} \quad (3.4)$$

เมื่อกล่าวถึง วิธีการของการหาเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นที่ให้ปริมาณการจองความจุสำรองต่ำที่สุด โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบนี้ จะสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยที่เมื่อรับข้อมูลทั้ง 4 นั่นคือ G_O และ G_I , คำร้องขอ, ข้อมูล SRLG และ ค่าความจุสำรองสูงสุดที่สามารถใช้ได้ เข้ามาในขั้นตอนวิธีที่น่าเสนอ ข้อมูลส่งออก (output) สุดท้ายที่ถูกส่งออกมาจะเป็น ปริมาณความจุสำรองต่ำที่สุดที่ใช้เพื่อวางเส้นทางป้องกัน และ รูปแบบการป้องกันที่ให้ค่านั้น

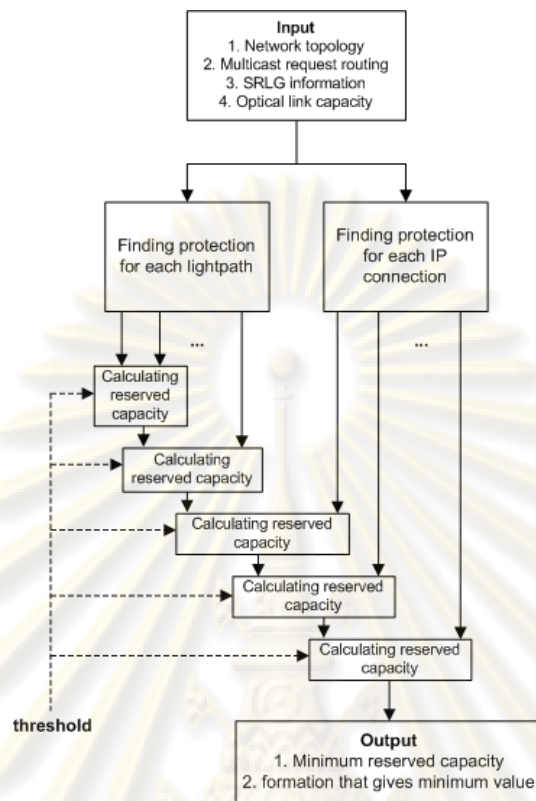


รูปที่ 3.6: ผังงานสรุปขั้นตอนการหาเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นที่ให้ค่าปริมาณการจองความจุสำรองต่ำที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ

3.2.2 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตัดตัวเลือก (Candidate elimination scheme)

รูปแบบการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนี้ได้ถูกนำเสนอโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะลดความซับซ้อน (complexity) ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ ซึ่งในรูปแบบนี้การคำนวณหารูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการวางเส้นทางป้องกัน P_i จะไม่จำเป็นอีกต่อไป เนื่องจากรูปแบบการคำนวณจะกระทำในลักษณะของการตัดตัวเลือกที่เป็นไปไม่ได้ทิ้งระหว่างการคำนวณ การออกแบบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตัดตัวเลือกนี้จะให้ข้อมูลส่งออกเดียวกับในรูปแบบแรก นั่นคือ รูปแบบของการวางเส้นทางป้องกันที่ให้ปริมาณการจองความจุสำรองต่ำที่สุด วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตัดตัวเลือกจะมีขั้นตอนการปฏิบัติดังต่อไปนี้

1. ดำเนินงานในส่วนของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ โดยการจำกัดจำนวนฮอปของแต่ละเส้นทางป้องกันให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จุดประสงค์ของการกระทำเช่นนี้เพื่อต้องการค่าปริมาณความจุสำรองส่งออกที่ต่ำในระดับหนึ่ง และมีอยู่จริง ซึ่งค่านี้จะถูกเรียกว่า ค่าขีดแบ่ง (threshold)
2. นำค่าขีดแบ่งจากขั้นตอนที่ 1 มาเป็นขอบเขตบนเพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าคำนวณความจุสำรอง โดยการเปรียบเทียบนั้นจะทำการจัดหมู่เป็นคู่ รูปแบบไหนให้ค่าการจองความจุสำรองมากกว่าหรือเท่ากับค่าขีดแบ่ง รูปแบบนั้นจะถูกตัดออกไปจากการจัดหมู่ครั้งต่อไป ยกตัวอย่างเช่น ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 เท่ากับ 6 และมีเส้นทางป้องกันดังนี้ $W_1 = \{W_1^1, W_1^2, W_1^3\}$, $W_2 = \{W_2^1\}$ และ $B_1 = \{B_1^1, B_1^2\}$ การคำนวณจะเริ่มจาก คู่ของ W_1 และ W_2 โดยที่ $\{W_1^1, W_2^1\}$ ให้ค่าเท่ากับ 7,



รูปที่ 3.7: ผังงานสรุปขั้นตอนการหาเส้นทางป้องกันแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นที่ให้ค่าปริมาณการจองความจุสำรองต่ำที่สุดโดยการตัดตัวเลือก

$\{W_1^2, W_2^1\}$ ให้ค่าเท่ากับ 4 และ $\{W_1^3, W_2^1\}$ ให้ค่าเท่ากับ 8 จะเห็นได้ว่ารูปแบบ $\{W_1^1, W_2^1\}$ ให้ค่าเกิน 6 ซึ่งไม่ว่ารูปแบบนี้จะมีสมาชิกเพิ่มเช่นใดก็ตาม ค่าปริมาณการจองความจุสำรองก็ไม่สามารถต่ำกว่า 7 ได้อีก เช่นเดียวกับกรณีของ $\{W_1^3, W_2^1\}$ ดังนั้นรูปแบบ $\{W_1^1, W_2^1\}$ และ $\{W_1^3, W_2^1\}$ จึงถูกตัดออกจากการพิจารณา

3. คำนวณโดยใช้วิธีการจัดหมู่แบบเป็นคู่จนครบทุกองค์ประกอบ จากนั้นจึงค่อยส่งค่าปริมาณการจองความจุสำรองที่ต่ำที่สุดออกมา จากตัวอย่างที่แล้ว นำรูปแบบที่ได้มานั้นคือ $\{W_1^2, W_2^1\}$ มาจัดหมู่คู่กับ $B_1 = \{B_1^1, B_1^2\}$ ซึ่งจะได้รูปแบบทั้งหมดดังนี้ $\{W_1^2, W_2^1, B_1^1\}$ และ $\{W_1^2, W_2^1, B_1^2\}$ หลังจากนั้นจึงส่งรูปแบบที่ให้ปริมาณการจองความจุสำรองต่ำที่สุดออกมา จะเห็นได้ว่า จำนวนรูปแบบที่ต้องคำนวณปริมาณการจองความจุในรูปแบบนี้เท่ากับ $(3 \times 1) + (1 \times 2) = 5$ ซึ่งถ้านำมาเปรียบเทียบกับจำนวนรูปแบบที่ต้องคำนวณโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ จะมีทั้งหมดเท่ากับ $3 \times 1 \times 2 = 6$ ซึ่งมากกว่ากรณีใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตัดตัวเลือก

ลำดับขั้นตอนในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตัดตัวเลือก นี้จะแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบความซับซ้อนระหว่างวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตัดตัวเลือก อีกครั้งในบทที่ 4

บทที่ 4

การทดสอบขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นแบบ สถิตสำหรับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์

ในบทนี้จะเสนอการทดสอบขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นแบบสถิตสำหรับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่ได้นำเสนอ โดยจะแบ่งเป็น 3 แนวทางด้วยกันนั้นคือ

- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ และการตัดตัวเลือก
- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจองความจุสำรองระหว่างขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ และ ขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะฮอปที่สั้นที่สุด (shortest hop algorithm)
- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจองความจุสำรองด้วยวิธีที่นำเสนอสำหรับมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิด

สำหรับขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะฮอปที่สั้นที่สุด (shortest hop algorithm) นั้น มีจุดประสงค์เพื่อหารูปแบบของการป้องกันที่นอกจากจะให้ระยะฮอปจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางต่ำที่สุดแล้ว ยังให้ปริมาณความจุสำรองที่ต่ำอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้นำขั้นตอนวิธีนี้มาใช้เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบกับวิธีที่ได้นำเสนอ ขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะฮอปที่สั้นที่สุดนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. นำ W_i มาพิจารณาตัดเลือก W_i^n ที่ใช้จำนวนฮอปต่ำที่สุด จากนั้นกระทำเช่นเดิมจนครบทุกเซตทางเดินแสงป้องกัน นำตัวเลือกที่เหลือในแต่ละเซตการป้องกันมาทำการจัดหมู่ และ คำนวณหารูปแบบการวางทางเดินแสงป้องกันที่ใช้ปริมาณความจุสำรองต่ำที่สุดในระดับชั้นออฟติคอลล
2. นำ M_i มาพิจารณาในลักษณะเดียวกันกับขั้นตอนที่ 1 เพียงแต่การกระทำทั้งหมดจะอยู่ในระดับชั้นไอพีเท่านั้น ซึ่งจากขั้นตอนนี้จะได้รูปแบบการป้องกันในระดับชั้นไอพี ที่มีการใช้การเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีน้อยที่สุด และมีระยะฮอปจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางต่ำที่สุดอีกด้วย
3. จากนั้นนำตัวเลือกที่เหลือจากการจำกัดระยะฮอปที่ต่ำที่สุดใน M_i มาเปลี่ยนส่งให้อยู่ในระดับชั้นออฟติคอลล B_i
4. เลือกเส้นทางป้องกัน 1 รูปแบบจากขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 เพื่อสร้างเส้นทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้น โดยที่จะสามารถคำนวณปริมาณการจองความจุสำรองร่วมกันหลายระดับชั้นได้ตามสมการที่ 3.2 และ 3.3

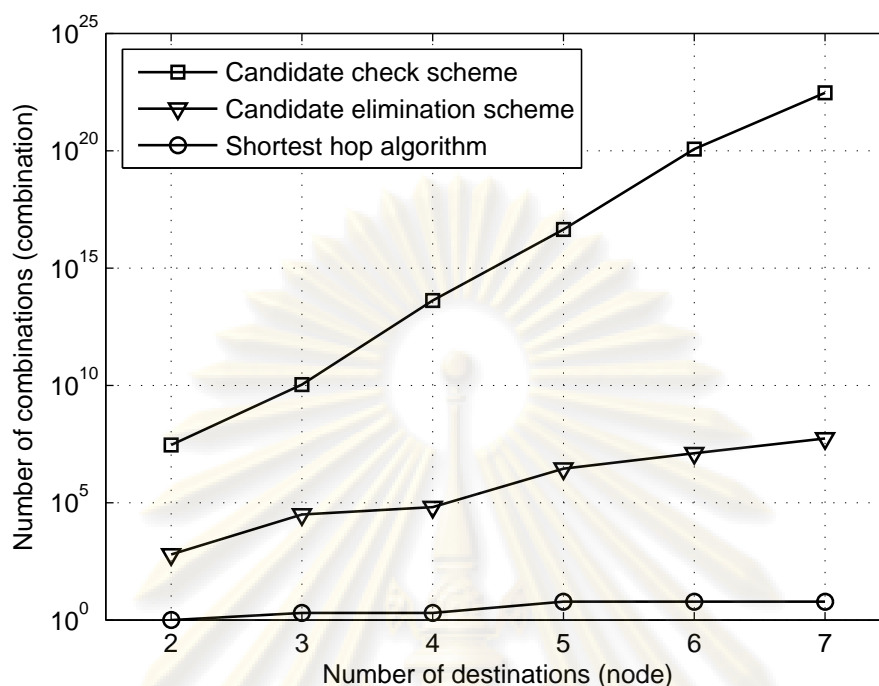


รูปที่ 4.1: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 1

4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ และ โดยการตัดตัวเลือก

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ และ โดยการตัดตัวเลือก นั้นมีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความซับซ้อน (complexity) ในเชิงจำนวนรูปแบบที่จำเป็นต้องตรวจสอบเมื่อทำการแปรผันจำนวนโหนดปลายทาง การทดสอบนั้นจะกระทำการโครงข่ายรูปแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 [16] โดยเริ่มจากการสุ่มโหนดต้นทางที่จะทำหน้าที่เป็นโหนดคำร้องขอ ด้วยการกระจายตัวแบบเอกกรูป (uniform distribution) ซึ่งจะอ้างอิงจากระดับชั้นไอพีที่มีแต่ละโหนดทำหน้าที่จัดเส้นทาง สำหรับในการทดสอบนี้ โหนดที่เป็นโหนดต้นทางนั้นคือโหนดที่ 5 จากนั้นจะทำการเลือกโหนดปลายทางตั้งแต่ 2 โหนดจนถึง 7 โหนด โดยการเลือกจะเลือกโหนดที่อยู่ใกล้โหนดต้นทางเป็นหลัก นั่นก็คือ เริ่มจาก โหนดที่มีระยะฮอปในระดับชั้นไอพีจากโหนดต้นทางสั้นที่สุด เหตุผลที่ต้องกระทำเช่นนี้เนื่องจากการเปรียบเทียบจำนวนรูปแบบการป้องกันนั้น จำเป็นต้องยึดรูปแบบของคำร้องขอเดิม เช่น ในกรณีที่มีโหนดปลายทางเดิมมี 2 โหนดนั้นคือ โหนดที่ 4 และ โหนดที่ 6 การที่จะทดสอบว่า การเพิ่มโหนดปลายทางขึ้นมาอีก 1 โหนดนั้นมีผลต่อจำนวนรูปแบบอย่างไร จำเป็นต้องยึดโหนดปลายทาง 2 โหนดเดิมเอาไว้ เพื่อคงจำนวนองค์ประกอบเดิมที่ต้องการป้องกัน จากนั้นจึงค่อยเพิ่มการพิจารณาขึ้นไปอีก 1 โหนด นั่นคือ โหนด 10 ซึ่งจะเป็นกรณีที่คำร้องขอมีโหนดปลายทาง 3 โหนด

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรูปแบบของการป้องกันที่จำเป็นต้องตรวจสอบและจำนวนโหนดปลายทางที่แปรผันไป โดยการแสดงรูปแบบของผลการทดลองนั้น จะแสดงอยู่ในลักษณะของกราฟกึ่งล็อก (semi-log) ที่มีแกน y เป็นจำนวนรูปแบบการป้องกันแสดงผลในรูปแบบล็อก และแกน x

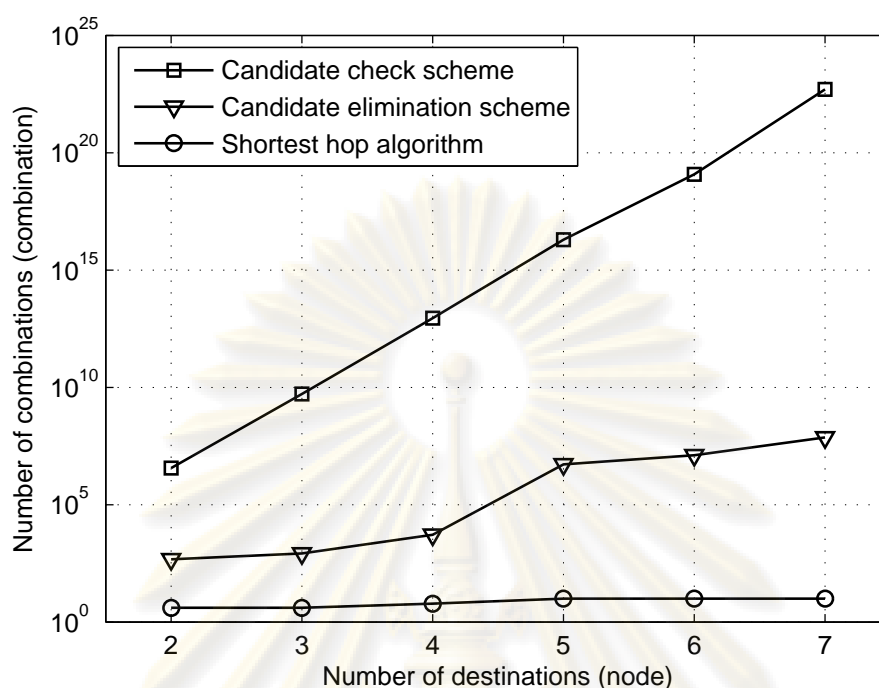


รูปที่ 4.2: ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรูปแบบการป้องกันที่ต้องตรวจสอบและจำนวนโหนดปลายทางโดยกำหนดให้โหนดที่ 5 เป็นโหนดต้นทาง

เป็นจำนวนโหนดปลายทางที่แปรผันไป แสดงผลในรูปแบบปกติ จะเห็นได้ว่า จำนวนรูปแบบที่จำเป็นต้องตรวจสอบเมื่อใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ นั้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยความชันที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งนั่นเป็นเพราะว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนโหนดปลายทางนั้น ส่งผลให้จำนวนองค์ประกอบที่จำเป็นต้องป้องกันเพิ่มมากยิ่งขึ้น ซึ่งทำให้จำนวนรูปแบบของการป้องกันที่ต้องตรวจสอบนั้นเพิ่มขึ้นในลักษณะเท่าตัวดังแสดงในสมการที่ 3.1

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรูปแบบของการป้องกันที่จำเป็นต้องตรวจสอบและจำนวนโหนดปลายทางที่แปรผันไป เมื่อทำการทดสอบด้วยการเปลี่ยนโหนดต้นทางจากโหนดที่ 5 เป็นโหนดที่ 13 ซึ่งเป็นโหนดที่อยู่ภายในทอพอโลยี สำหรับการทดสอบจะกระทำในลักษณะเดิมนั้นคือเริ่มจากกรณีโหนดปลายทางใกล้ตัว 2 โหนดแรก จากนั้นเพิ่มอีก 1 โหนดที่อยู่ถัดออกไป จนจำนวนโหนดปลายทางเท่ากับ 7 โหนด

สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตัดตัวเลือกนั้น เป็นการตรวจสอบในลักษณะการตัดตัวเลือกที่เป็นไปไม่ได้ทิ้ง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตัดตัวเลือก นี้ สามารถลดจำนวนรูปแบบการป้องกันที่ไม่จำเป็นต้องตรวจสอบลงได้มาก ถึงแม้จำเป็นต้องคำนวณหาค่าขีดแบ่งก่อนก็ตาม นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนรูปแบบที่ต้องตรวจสอบเมื่อแปรผันจำนวนโหนดปลายทางนั้น จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นโดยรวมที่น้อยลง และเมื่อเปรียบเทียบจำนวนรูปแบบการป้องกันที่ต้องตรวจสอบระหว่างวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตรวจสอบทุกรูปแบบ และ โดยการตัดตัวเลือกนั้น จะพบว่าความแตกต่างของปริมาณรูปแบบจะอยู่ในลำดับ 10^{22} และ 10^7 ซึ่งเป็นผลต่างที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการตัดตัวเลือก นั้นนอกจากจะสามารถคำนวณปริมาณความจุ



รูปที่ 4.3: ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรูปแบบการป้องกันที่ต้องตรวจสอบและจำนวนโหนดปลายทางโดยกำหนดให้โหนดที่ 13 เป็นโหนดต้นทาง

สำรองที่ต่ำที่สุดได้เหมือนในรูปแบบแรก แล้ว ยังสามารถลดจำนวนรูปแบบของการป้องกันที่จำเป็นต้องตรวจสอบลงได้มากอีกด้วย ผู้วิจัยจึงเลือกวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดรูปแบบนี้ไปใช้ในการทดสอบ

จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบความซับซ้อนในเชิงจำนวนรูปแบบที่จำเป็นต้องตรวจสอบของขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะฮอปสั้นที่สุด กับ วิธีตัดตัวเลือกนั้น พบว่าจำนวนของรูปแบบที่ได้จากวิธีการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะฮอปสั้นที่สุด จะน้อยกว่าวิธีตัดตัวเลือกมากทั้งนี้ เป็นเพราะว่า ในขั้นตอนการเลือกเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะฮอปสั้นที่สุดนั้น เป็นการจำกัดจำนวนฮอปของเส้นทางป้องกัน ทำให้จำนวนรูปแบบการป้องกันลดลงอย่างมาก ส่งผลให้การคำนวณสามารถกระทำได้รวดเร็ว ในทางตรงกันข้ามปริมาณความจุสำรองที่ได้จากวิธีเลือกกระยะฮอปที่สั้นที่สุดนี้ อาจมีค่ามากกว่าปริมาณความจุสำรองที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ ซึ่งจะแสดงให้เห็นในการทดสอบถัดไป

4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจองความจุสำรองระหว่างขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ และ ขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะฮอปที่สั้นที่สุด (shortest hop algorithm)

การทดสอบประสิทธิภาพในการจองความจุสำรองของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ นั้น มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของจำนวนความจุสำรองต่อจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะนำขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอนี้ ไปเปรียบเทียบกับปริมาณการจองความจุสำรองที่ได้จากขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะฮอปสั้นที่สุด (shortest hop algorithm) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานเนื่องจาก การวางเส้นทาง

ป้องกันแบบใช้ระยะฮอปสั้นที่สุดนั้น มีจุดประสงค์ที่คล้ายคลึงกับขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันที่ได้นำเสนอ นั่นคือการให้ปริมาณการจูงความจุสำรองที่ต่ำโดยการเลือกระยะฮอปของเส้นทางป้องกันให้น้อยที่สุด

ในการทดสอบนั้นจะกระทำบนโครงข่ายทั้งหมด 6 รูปแบบ ซึ่งทั้ง 6 รูปแบบนั้นจะคงจำนวนโหนดในระดับชั้นออฟติคัล 13 โหนด และ ในระดับชั้นไอพี 8 โหนดไว้ โดยที่ในแต่ละรูปแบบจะแตกต่างกันด้วยค่า เฉลี่ยดีกรีของโหนด (average node degree, \bar{d}) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความหนาแน่นของการเชื่อมต่อ (connectivity) ของโครงข่ายดังสมการที่ 4.1 โดยที่ n และ l คือจำนวนโหนด และ จำนวนการเชื่อมโยง ในระดับชั้นที่พิจารณา นอกจากนี้การเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี จะถูกกำหนดด้วยเส้นทางในระดับชั้นออฟติคัลที่ใช้ระยะฮอปน้อยที่สุด

$$\bar{d} = \frac{2 \times l}{n} \quad (4.1)$$

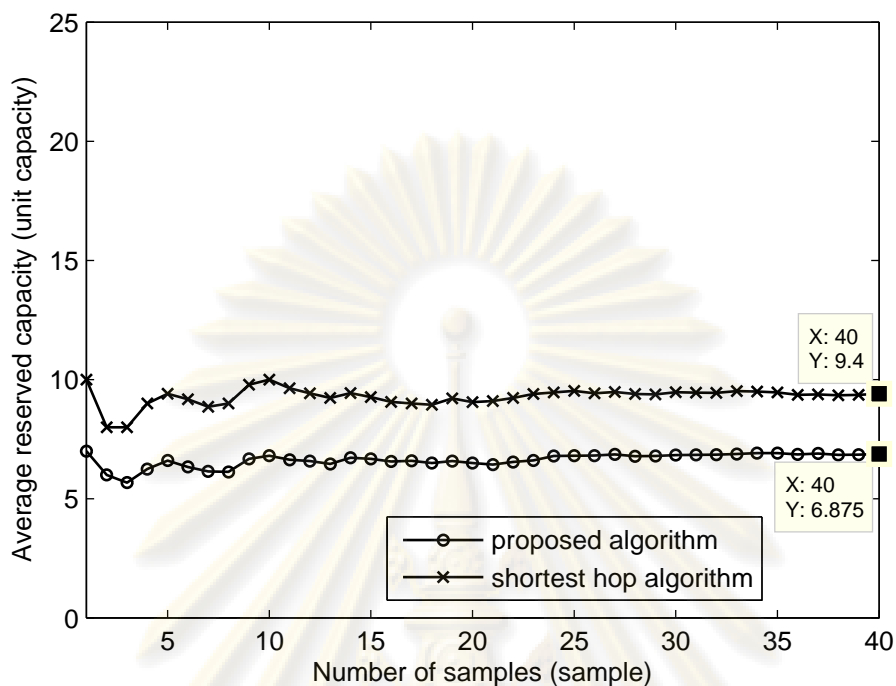
สำหรับการวัดค่าความจุสำรองนั้นจะกระทำโดยการแปรผันจำนวนโหนดปลายทาง ซึ่งในที่นี้คือตั้งแต่ 2 โหนด ถึง 7 โหนด อ้างอิงจากโหนดในระดับชั้นไอพี ซึ่งมีอุปกรณ์จัดเส้นทางเป็นตัวกำหนดเส้นทางให้กับคำร้องขอ สำหรับแต่ละจำนวนของโหนดปลายทางนั้นจะทำการเก็บปริมาณความจุสำรองเฉลี่ยที่ใช้ จากรูปแบบคำร้องขอลักษณะต่างๆ โดยที่คำร้องขอดังกล่าวจะเกิดจากการสุ่มโหนดต้นทาง 1 โหนด ด้วยการกระจายตัวแบบเอกกรุป (uniform distribution) และ กลุ่มของโหนดปลายทางที่ต้องการทดสอบด้วยกฎการจัดหมู่ ซึ่งจะไม่นำรูปแบบคำร้องขอที่เคยทดสอบแล้วมาพิจารณา

รูปที่ 4.4-4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจูงความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มโหนดต้นทางและกลุ่มของโหนดปลายทางบนโครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 1 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยดีกรีของโหนดในระดับชั้นออฟติคัลเท่ากับ 3.538 และในระดับชั้นไอพีเท่ากับ 3.5 สำหรับการสุ่มนั้นจะเริ่มต้นจาก โหนดปลายทาง 2 โหนด จนถึง 7 โหนด โดยที่จะเห็นได้ว่าในแต่ละจำนวนโหนดปลายทางต้องอาศัยการสุ่มประมาณ 30 - 40 ครั้ง ปริมาณความจุสำรองเฉลี่ยถึงจะค่อนข้างคงที่ ยกเว้นกรณีโหนดปลายทาง 7 โหนดซึ่งมีรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งสิ้น 8 รูปแบบด้วยกัน

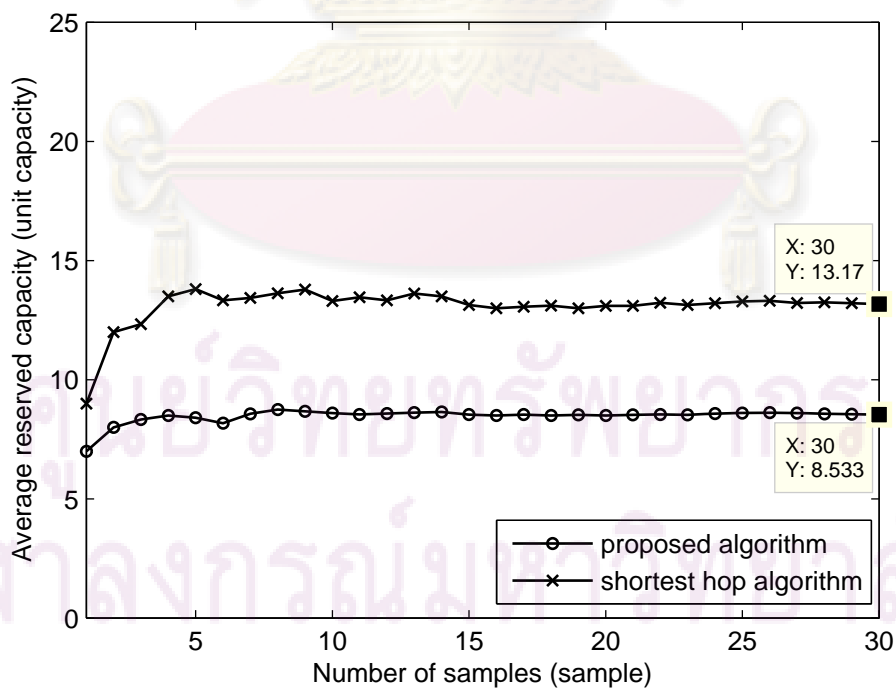
รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความจุสำรองเฉลี่ย กับ จำนวนโหนดปลายทางของคำร้อง บนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 จะเห็นได้ว่าเป็นช่วงพิจารณาออกเป็นทั้งสิ้น 3 ช่วงด้วยกัน นั่นคือ ช่วงที่ 1 กรณีจำนวนโหนดปลายทางเท่ากับ 2 และ 3 โหนด, ช่วงที่ 2 กรณีจำนวนโหนดปลายทางเท่ากับ 4, 5 และ 6 โหนด และช่วงที่ 3 คือกรณีที่จำนวนโหนดปลายทางเท่ากับ 7 โหนด

สำหรับช่วงที่ 1 นั้นพบว่าความแตกต่างของทั้งขั้นตอนวิธีที่เสนอและวิธีเลือกฮอปที่สั้นที่สุดนั้น มีความแตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งทั้งนี้เป็นผลจากเมื่อมีจำนวนโหนดปลายทางน้อย ถึงแม้จะทำให้ทางเลือกในการป้องกันมีมาก แต่จำนวนองค์ประกอบของเส้นทางที่ต้องการการป้องกันยังคงมีน้อยอยู่ จึงทำให้การเลือกเส้นทางที่ใช้จำนวนฮอปน้อยที่สุดแล้วจึงพิจารณาการใช้งานร่วมกัน กับ การเลือกเส้นทางด้วยขั้นตอนวิธีที่นำเสนอซึ่งเป็นการวางเส้นทางโดยคำนึงถึงการใช้ความจุสำรองร่วมกันเป็นหลัก นั้นให้ค่าออกมาไม่แตกต่างกันมาก

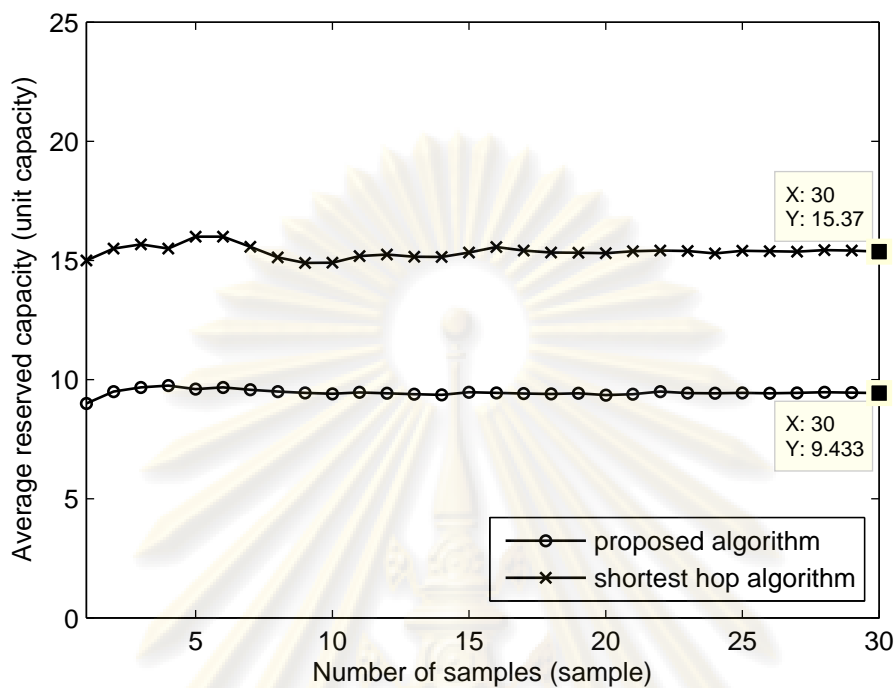
สำหรับในช่วงที่ 2 จะสังเกตได้ว่า การวางเส้นทางป้องกันโดยคำนึงถึงการใช้ความจุสำรองเป็นหลัก นั้นให้ผลที่ดีกว่าการเลือกเส้นทางป้องกันด้วยขั้นตอนวิธีเลือกจำนวนฮอปที่ต่ำที่สุด อย่างเห็นได้ชัด ซึ่ง



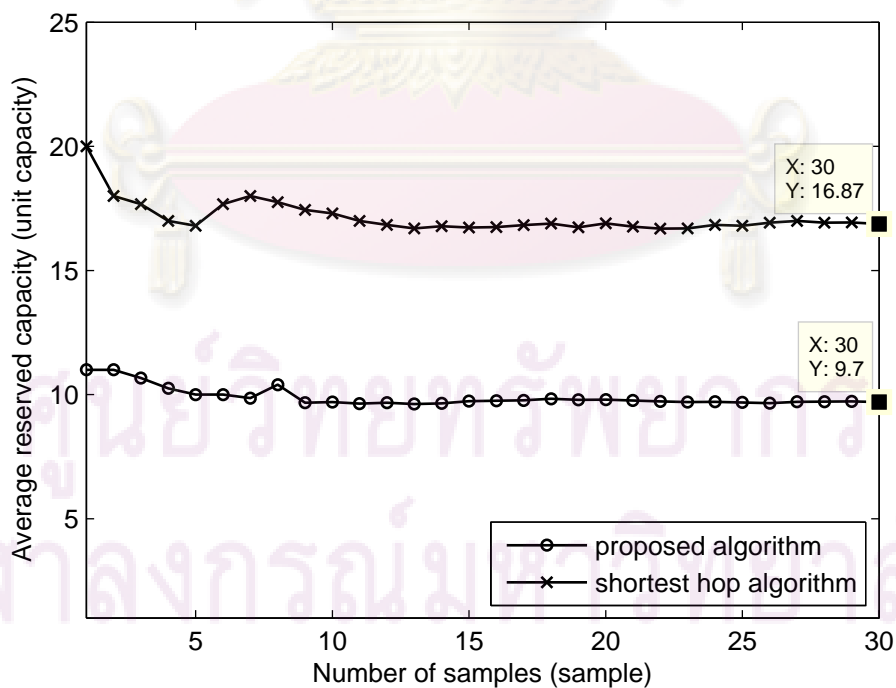
รูปที่ 4.4: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด



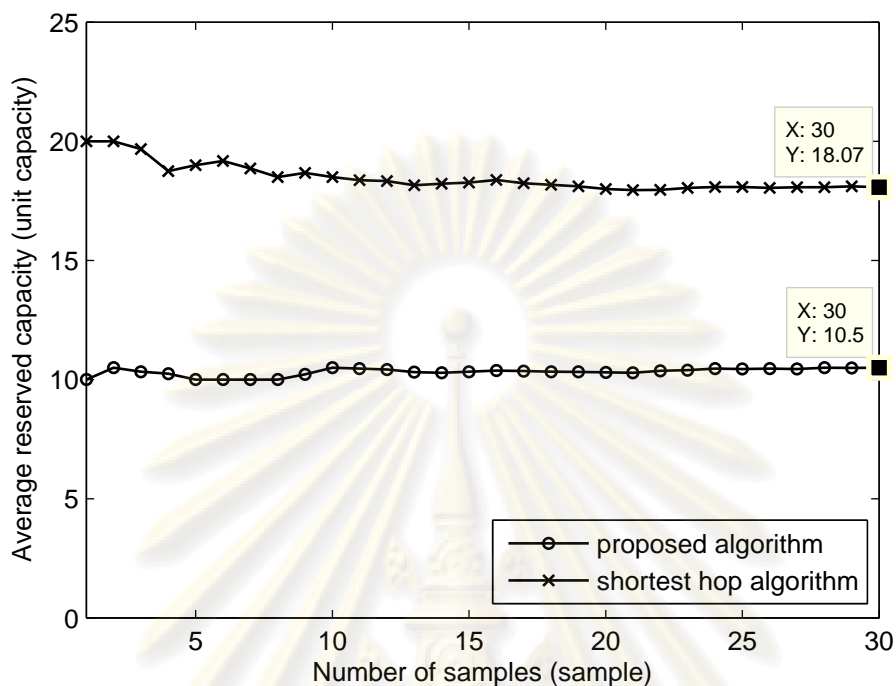
รูปที่ 4.5: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



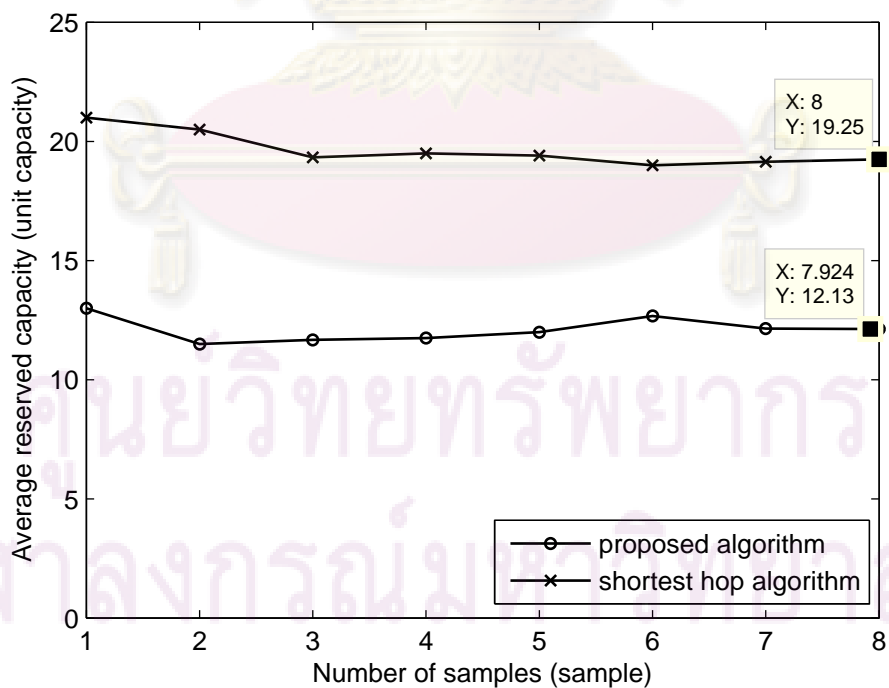
รูปที่ 4.6: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด



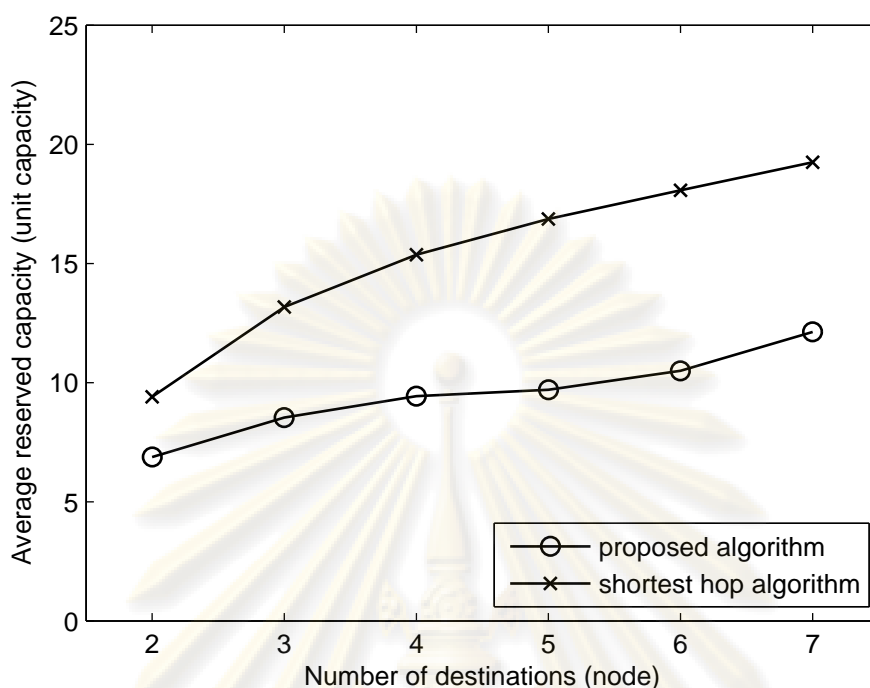
รูปที่ 4.7: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด



รูปที่ 4.8: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด



รูปที่ 4.9: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด

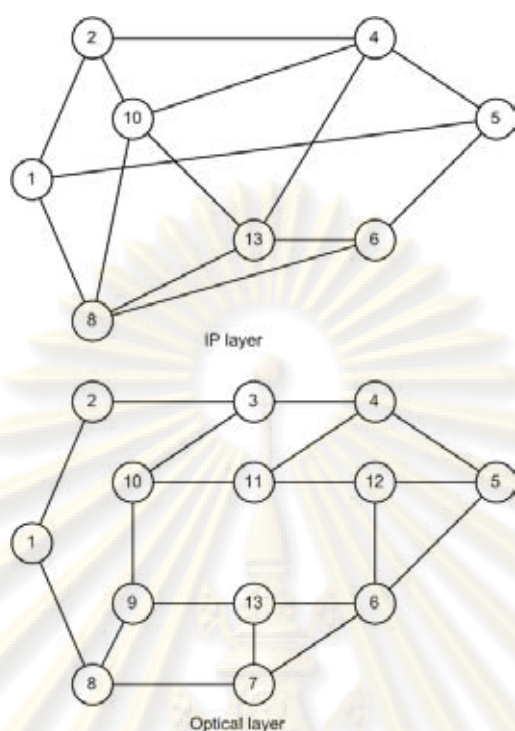


รูปที่ 4.10: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1

เป็นผลจากการที่ เมื่อมีจำนวนโหนดปลายทางมากขึ้นจะทำให้โอกาสของการกระจายตัวของโหนดปลายทางในโครงข่ายมีหลากหลายยิ่งขึ้น รวมทั้งองค์ประกอบที่ต้องการการป้องกันมีเพิ่มขึ้น ดังนั้นรูปแบบของการป้องกันจึงมีความหลากหลายมากขึ้น ไม่จำกัดอยู่เพียงการเลือกเฉพาะเส้นทางที่ใช้จำนวนฮอปน้อยที่สุด ซึ่งความหลากหลายดังกล่าวก็จะทำให้โอกาสในการใช้ความจุสำรองร่วมกันมีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นั่นหมายความว่า การเลือกเส้นทางป้องกันที่ใช้จำนวนฮอปมากกว่าแต่สามารถนำการเชื่อมโยงที่อยู่ในเส้นทางป้องกันนั้นไปใช้งานร่วมกับเส้นทางป้องกันอื่นได้ จะทำให้ปริมาณความจุสำรองที่ถูกจองมีค่าน้อยกว่าวิธีเลือกเส้นทางป้องกันที่สั้นที่สุด

สำหรับในช่วงสุดท้าย ซึ่งมีจำนวนโหนดปลายทางเท่ากับ 7 โหนด หรือก็คือมีการกระจายตัวของโหนดปลายทางอย่างทั่วถึงทั้งโครงข่าย ซึ่งจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างระหว่างขั้นตอนวิธีทั้ง 2 นั้นน้อยลงจากในช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นผลจากการที่ เมื่อโหนดกระจายตัวกันอย่างเต็มที่ในโครงข่าย ทำให้เกือบทุกองค์ประกอบของคำร้องขอจำเป็นต้องได้รับการป้องกัน ซึ่งส่งผลให้การวางแผนเส้นทางป้องกันของแต่ละองค์ประกอบ จะมีบางส่วนที่ถูกละเลยการเชื่อมโยงที่เส้นทางป้องกันอื่นไม่ผ่าน นั่นหมายความว่า การที่จะทำให้เส้นทางป้องกันเกิดการใช้ความจุสำรองร่วมกันได้นั้น อาจต้องใช้การเชื่อมโยงที่ยังไม่มีการจองเพื่อเป็นส่วนเชื่อมต่อไปยังเส้นทางป้องกันอื่นที่ใช้ร่วมกันอยู่ ถึงกระนั้นการใช้งานความจุสำรองที่นำเสนอ ก็ยังให้ปริมาณเฉลี่ยในการจองความจุสำรองที่ต่ำกว่า วิธีการเลือกเส้นทางที่ใช้ฮอปต่ำที่สุด

สำหรับโครงข่ายรูปแบบที่ 2 ซึ่งกระทำการกำจัดการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟดีคอลลอกเพื่อทำให้ค่าเฉลี่ยดีกรีของโหนดในระดับชั้นลดลงจาก 3.54 เป็น 2.92 ส่วนในระดับชั้นไอพีจะคงทอพอโลยีเดิมไว้

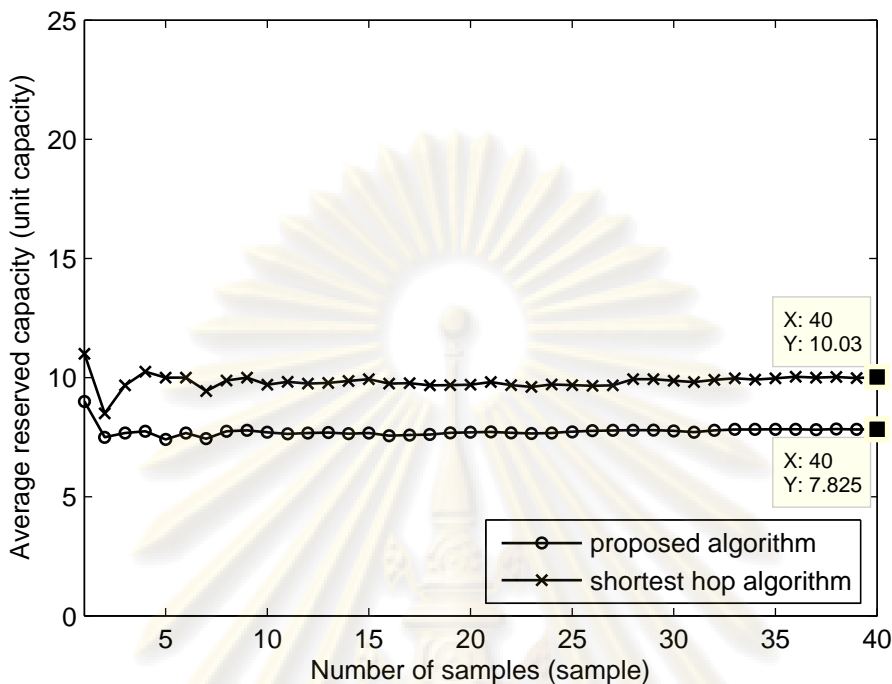


รูปที่ 4.11: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 2

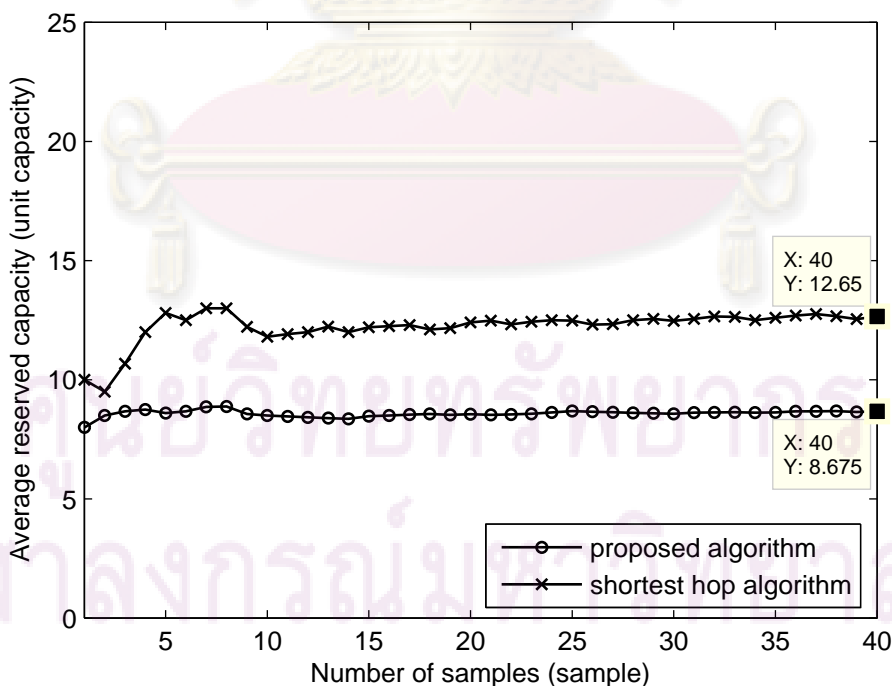
คือมีค่าเฉลี่ยดีกรีของโหนดเท่ากับ 3.5 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จุดประสงค์ของการกระทำเช่นนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอเมื่อโครงข่ายมีค่าเฉลี่ยดีกรีของโหนดในระดับชั้นออฟติคอลลดลง

รูปที่ 4.12-4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มโหนดต้นทางและกลุ่มของโหนดปลายทางบนโครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 2 ซึ่งจะกระทำในรูปแบบเดียวกันกับในโครงข่ายรูปแบบที่ 1 นั่นคือ เริ่มจากการสุ่มโหนดต้นทาง 1 โหนด ด้วยการกระจายตัวแบบเอกรูป จากนั้นทำการสุ่มกลุ่มของโหนดปลายทางด้วยการการกฎการจัดหมู่เพื่อทดสอบ ซึ่งจะในการทดสอบจะทำการแปรผันจำนวนของโหนดปลายทางตั้งแต่ 2 โหนด จนถึง 7 โหนด โดยที่ จะเห็นได้ว่าในแต่ละจำนวนโหนดปลายทางต้องอาศัยการสุ่มประมาณ 30 - 40 ครั้ง ปริมาณความจุสำรองเฉลี่ยถึงจะค่อนข้างคงที่ ยกเว้นกรณีโหนดปลายทาง 7 โหนดซึ่งมีรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งสิ้น 8 รูปแบบด้วยกัน

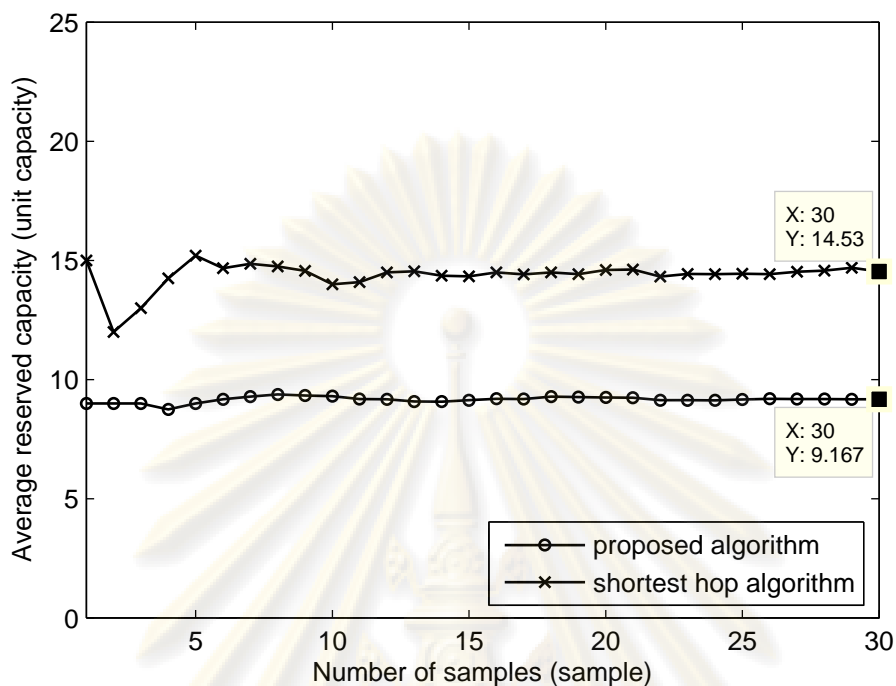
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอเทียบกับปริมาณความจุสำรองเฉลี่ย จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาการจองความจุสำรองด้วยวิธีการที่นำเสนอ นั้นจะทำให้ปริมาณความจุสำรองเฉลี่ยของแต่ละจำนวนโหนดปลายทางนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นั่นหมายความว่าต้องใช้ปริมาณความจุสำรองเพิ่มจากเดิมเพื่อสร้างเส้นทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้น สาเหตุของการเพิ่มขึ้นนั้นเป็นเพราะว่าเมื่อทำการกำจัดการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลอก ทำให้การกระจายตัวของคำร้องขอมีมากขึ้นเมื่อเทียบกับโครงข่ายใหม่ ดังนั้นตัวเลือกในการสร้างเส้นทางป้องกันจึงน้อยลงตามเงื่อนไขบังคับการสร้างเส้นทางป้องกัน ซึ่งการที่มีตัวเลือกที่น้อยลงประกอบกับการกระจายตัวของคำร้องขอที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้โอกาสในการสร้างเส้นทางป้องกันที่สามารถถูกใช้งานร่วมกันหลายองค์ประกอบของคำร้องขอนั้นน้อยลง จึงทำให้การจองความจุสำรองต้องใช้ปริมาณเพิ่มขึ้น



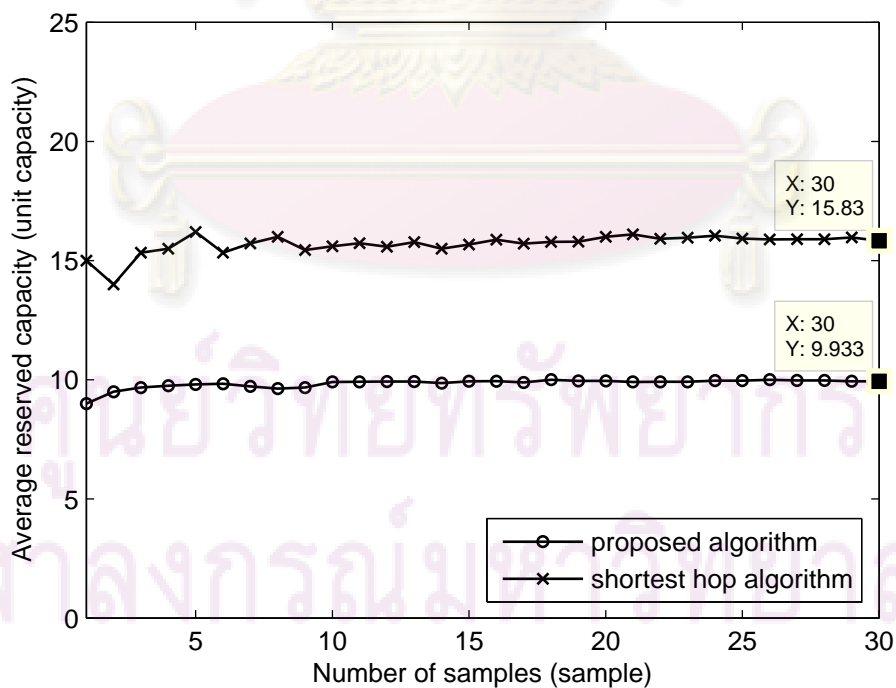
รูปที่ 4.12: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด



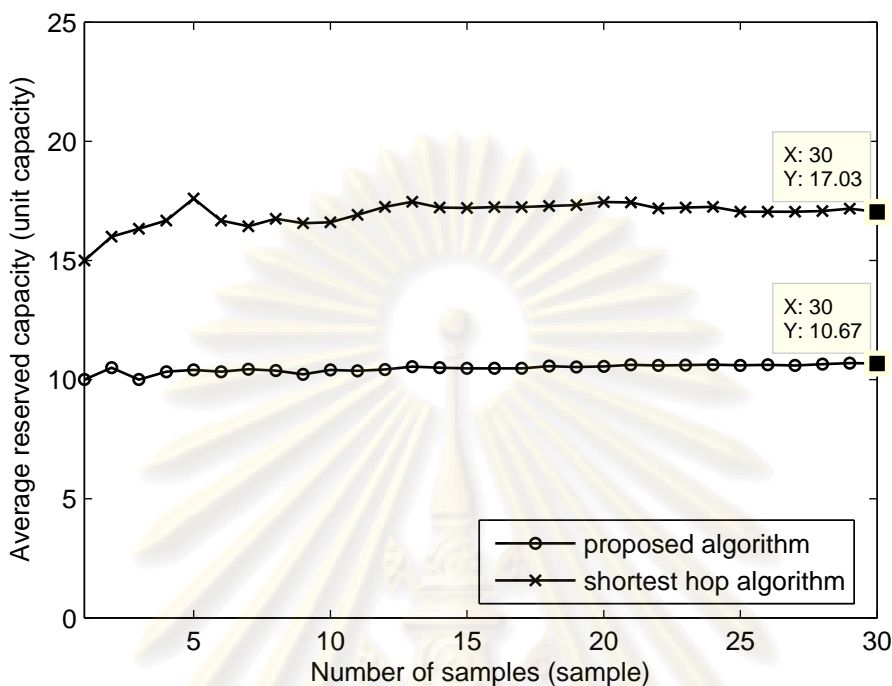
รูปที่ 4.13: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



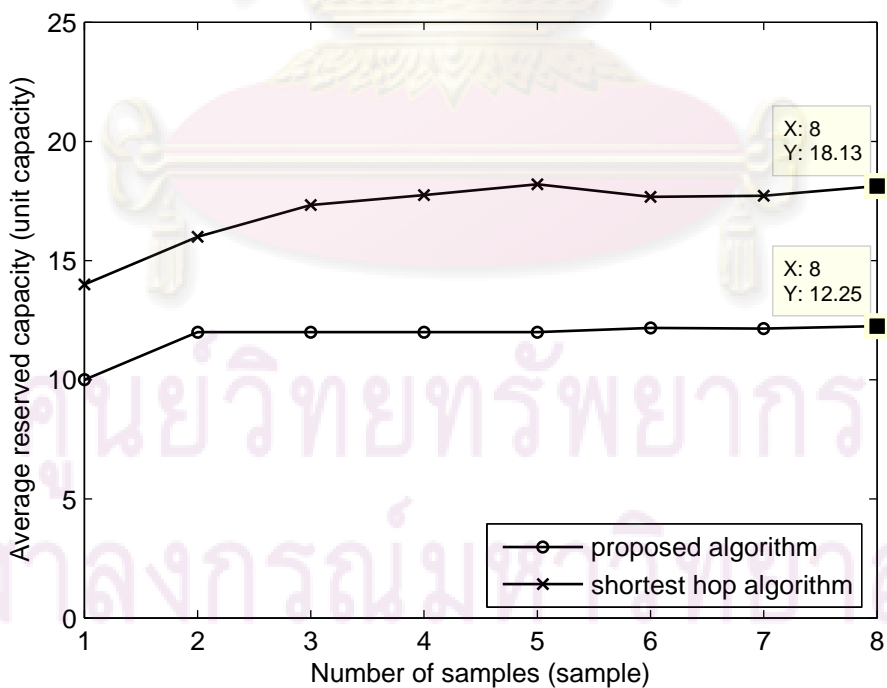
รูปที่ 4.14: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด



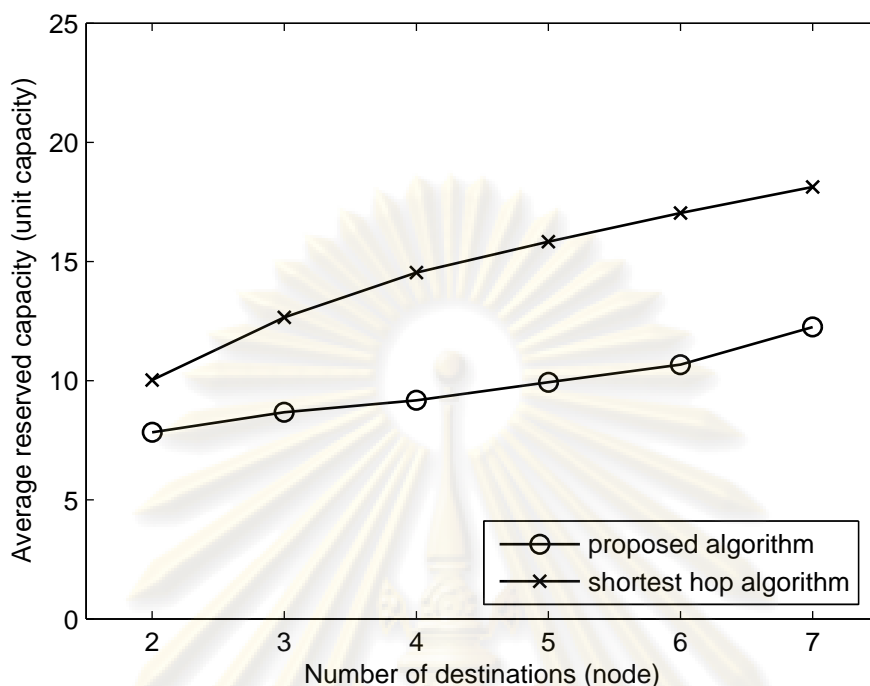
รูปที่ 4.15: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด



รูปที่ 4.16: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด



รูปที่ 4.17: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด

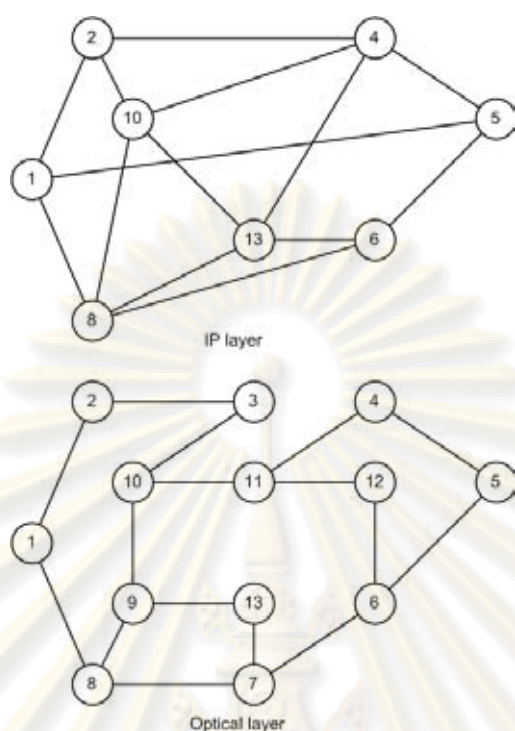


รูปที่ 4.18: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2

สำหรับวิธีการเลือกเส้นทางป้องกันด้วยระยะฮอปที่สั้นที่สุดนั้น สังเกตได้ว่าปริมาณความจุสำรองที่จองด้วยวิธีนี้จะมีค่าลดลงเล็กน้อยที่ทุกจำนวนของโหนดปลายทาง เมื่อเทียบกับกรณีทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 ถึงแม้ว่าการกำจัดการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลจะทำให้ตัวเลือกในการสร้างเส้นทางป้องกันน้อยลง และ โอกาสในการจองความจุสำรองของโครงข่ายน่าจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่การเพิ่มขึ้นของปริมาณดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเทียบกับปริมาณความจุสำรองรวมของโครงข่ายที่มี ซึ่งในกรณีนี้คือปริมาณความจุสำรองรวมของโครงข่ายลดลงเนื่องจากถูกกำจัดการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลอก ทำให้การเลือกเส้นทางป้องกันโดยเลือกระยะฮอปที่สั้นที่สุดนั้น จะมีการจองความจุสำรองเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวเลือกของการเชื่อมโยงน้อยลง แต่การเพิ่มขึ้นนั้น จะเพิ่มขึ้นในเพดานของปริมาณความจุสำรองรวมของโครงข่ายที่ลดลง ส่งผลให้ปริมาณความจุสำรองที่จองด้วยวิธีนี้ลดลงจากกรณีทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 รวมทั้งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณการจองความจุสำรองด้วยวิธีนี้จะลดลงอีกด้วย

รูปที่ 4.19 แสดงโครงข่ายรูปแบบที่ 3 ที่จะทำการทดสอบโดย ลักษณะทอพอโลยีเกิดจากการกำจัดการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลจากโครงข่ายรูปแบบที่ 1 ออกทั้งสิ้น 7 การเชื่อมโยงเพื่อให้ดีกรีเฉลี่ยของโหนดเท่ากับ 2.462 ซึ่งลดลงจากเดิม 1.08 ดีกรี โดยจะคงทอพอโลยีในระดับชั้นไอพีไว้ดังเดิม การกระทำเช่นนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการลดลงของการเชื่อมต่อในระดับชั้นออฟติคอลล

รูปที่ 4.20-4.25 แสดงการหาค่าเฉลี่ยของปริมาณการจองความจุสำรองที่ใช้ เทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มโหนดต้นทางและกลุ่มของโหนดปลายทาง โดยจะแปรผันจำนวนโหนดปลายทางจาก 2 ถึง 7 โหนด และกำหนดให้การสุ่มโหนดต้นทาง 1 โหนดนั้นมีการกระจายตัวแบบเอกรูป และการสุ่มกลุ่มของโหนดปลายทางจะเป็นไปตามกฎการจัดหมู่ โดยที่กลุ่มใดที่ได้รับการทดสอบแล้วจะไม่นำมาพิจารณาอีก จะเห็น



รูปที่ 4.19: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 3

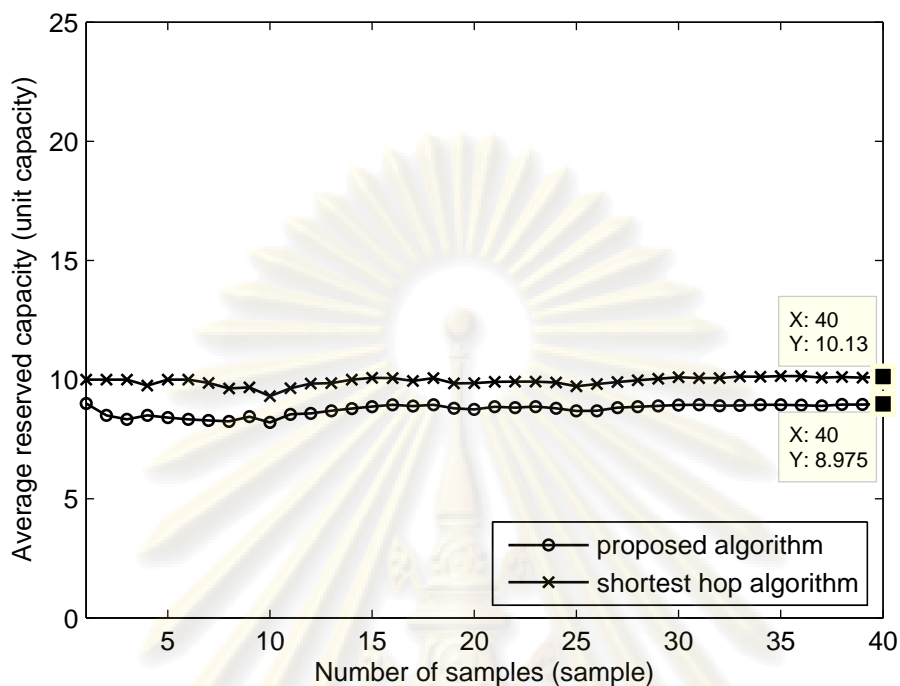
ได้ว่าในแต่ละกรณีจะทำการหาค่าเฉลี่ยจนกระทั่งถึงที่ นั่นคือจำเป็นต้องสุ่มกลุ่มตัวอย่างประมาณ 30 - 40 ครั้ง ในแต่ละจำนวนของโหนดปลายทาง ยกเว้นกรณีที่คำร้องขอมีโหนดปลายทางเท่ากับ 7 โหนดซึ่งจะมีจำนวนรูปแบบเท่ากับ 8 รูปแบบเท่านั้น

รูปที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ และ ขั้นตอนวิธีการเลือกเส้นทางป้องกันที่ใช้จำนวนฮอปน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการลดค่าเฉลี่ยดีกรีของโหนดบนโครงข่ายในระดับชั้นออฟติคอลลงจากโครงข่ายรูปแบบที่ 1 ลง 1.08 ดีกรี รูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณการจูงความจุสำรองเฉลี่ยเมื่อแปรผันจำนวนโหนดปลายทางนั้น ยังคงมีแนวโน้มดังเดิม เพียงแต่การเปลี่ยนแปลงจะไม่มากดังกรณีโครงข่ายทดสอบรูปแบบ 1 และ โครงข่ายรูปแบบที่ 2

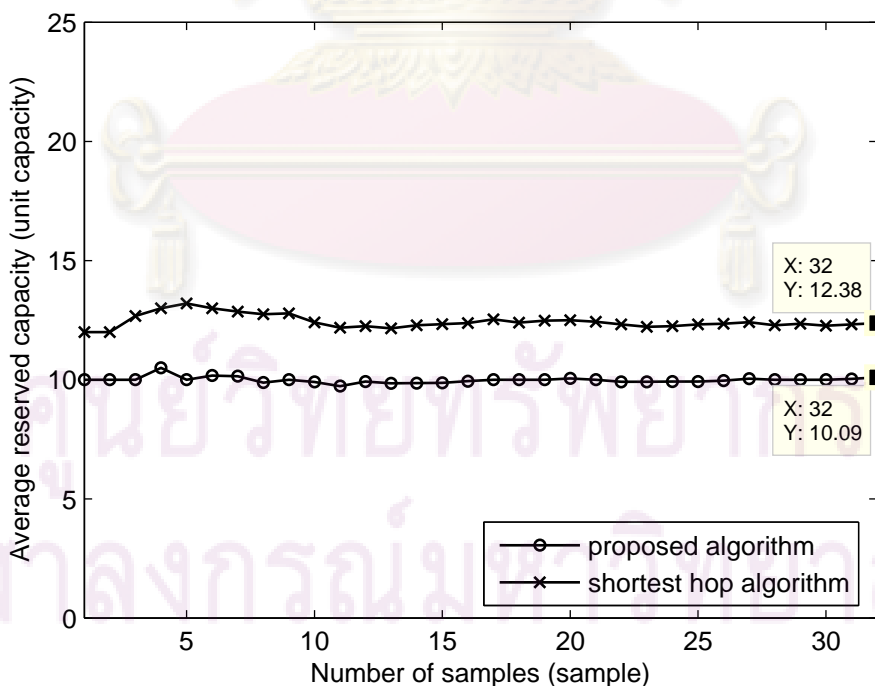
สำหรับปริมาณการจูงความจุสำรองเฉลี่ยในแต่ละจำนวนโหนดปลายทางนั้น พบว่าวิธีการที่นำเสนอ นั้นยังคงให้ค่าที่เพิ่มขึ้นจากกรณีทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 รวมไปถึงวิธีการเลือกเส้นทางป้องกันโดยใช้จำนวนฮอปน้อยที่สุดก็จะให้ค่าปริมาณการจูงความจุสำรองที่ลดลงจากเดิมด้วย ซึ่งเหตุผลของการเพิ่มขึ้นนั้นจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับที่ได้ทำการวิเคราะห์ไปเมื่อทำการทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2

รูปที่ 4.27 แสดงโครงข่ายรูปแบบที่ 4 ที่ทำการทดสอบโดย จะทำการกำจัดการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลงจากโครงข่ายรูปแบบที่ 1 ออกจนเหลือ 14 การเชื่อมโยงเพื่อให้ดีกรีเฉลี่ยของโหนดเท่ากับ 2.153 ซึ่งลดลงจากเดิม 1.386 ดีกรี โดยจะคงทอพอโลยีในระดับชั้นไอพีไว้ดังเดิม การกระทำเช่นนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการลดลงของการเชื่อมต่อในระดับชั้นออฟติคอลล

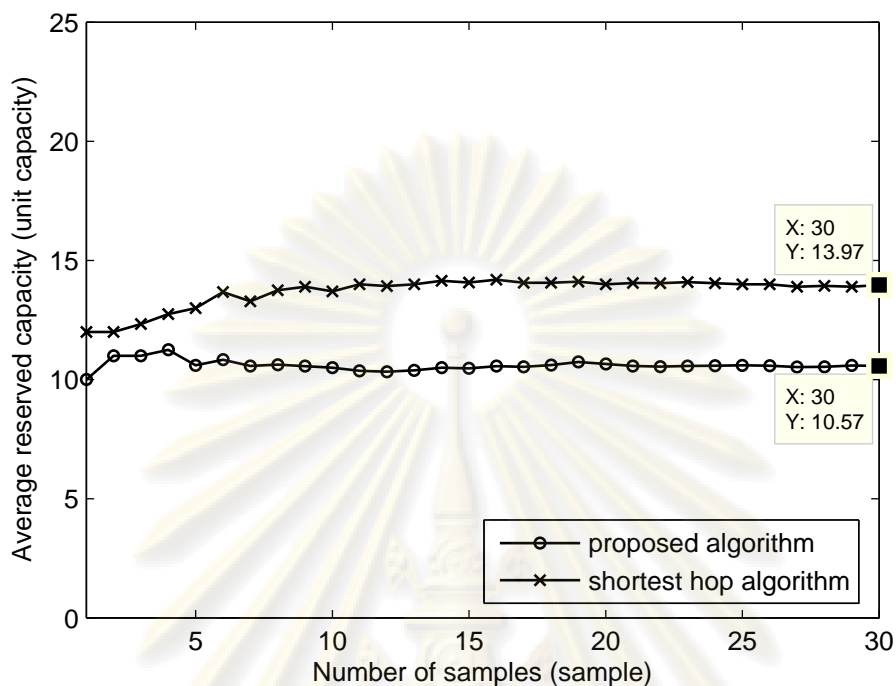
รูปที่ 4.28-4.33 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งที่ทดสอบ กับ ปริมาณความจุสำรองเฉลี่ยที่คำนวณจากวิธีการที่นำเสนอ และ วิธีการเลือกฮอปสั้นที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนตัวอย่างที่ใช้ใน



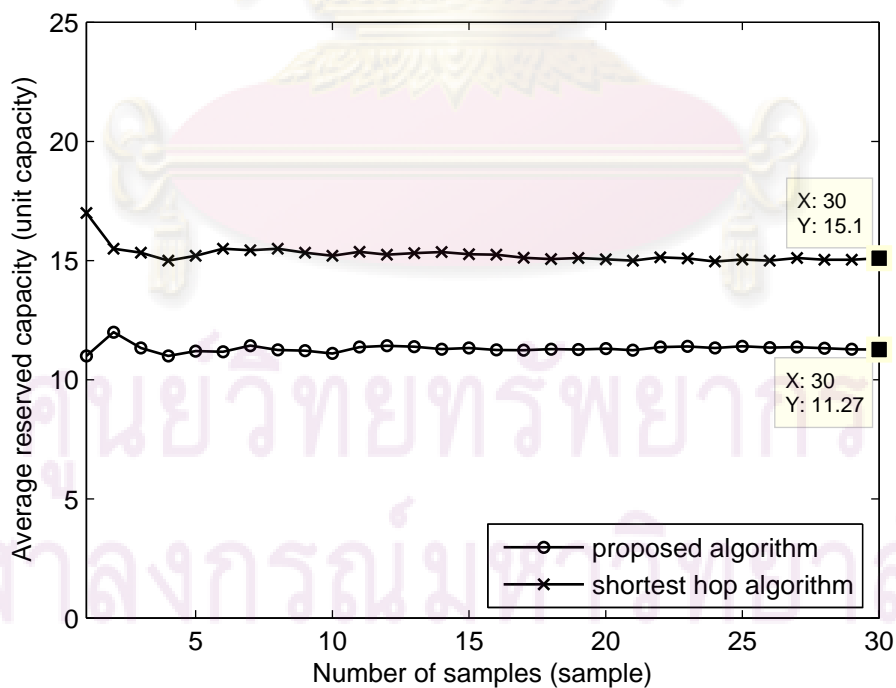
รูปที่ 4.20: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด



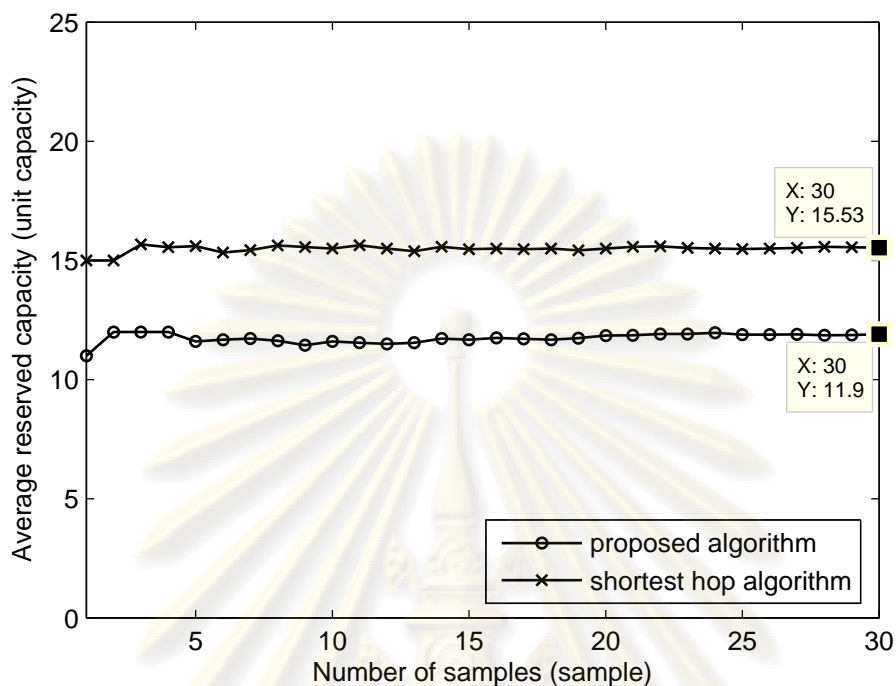
รูปที่ 4.21: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



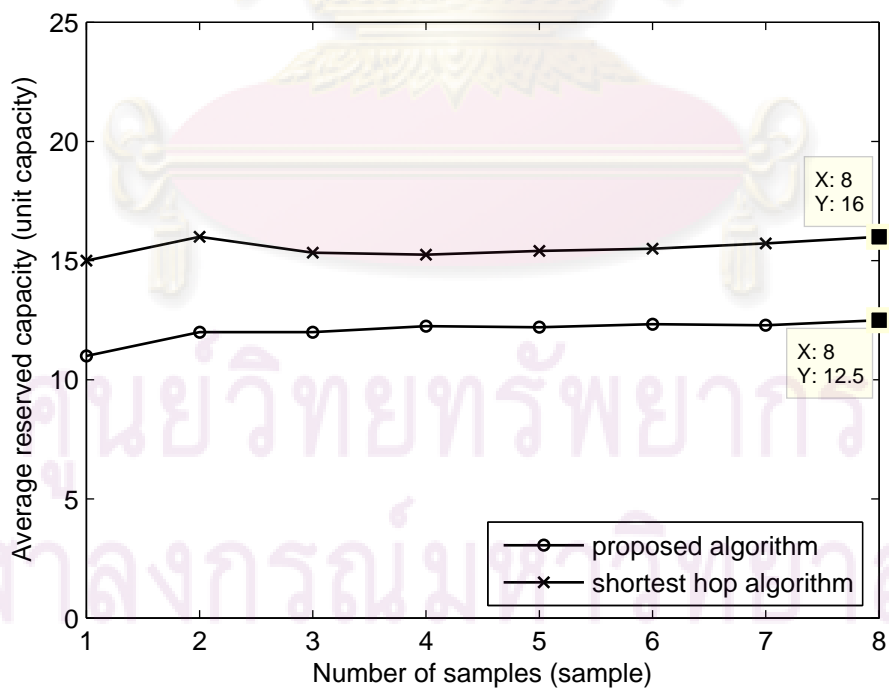
รูปที่ 4.22: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด



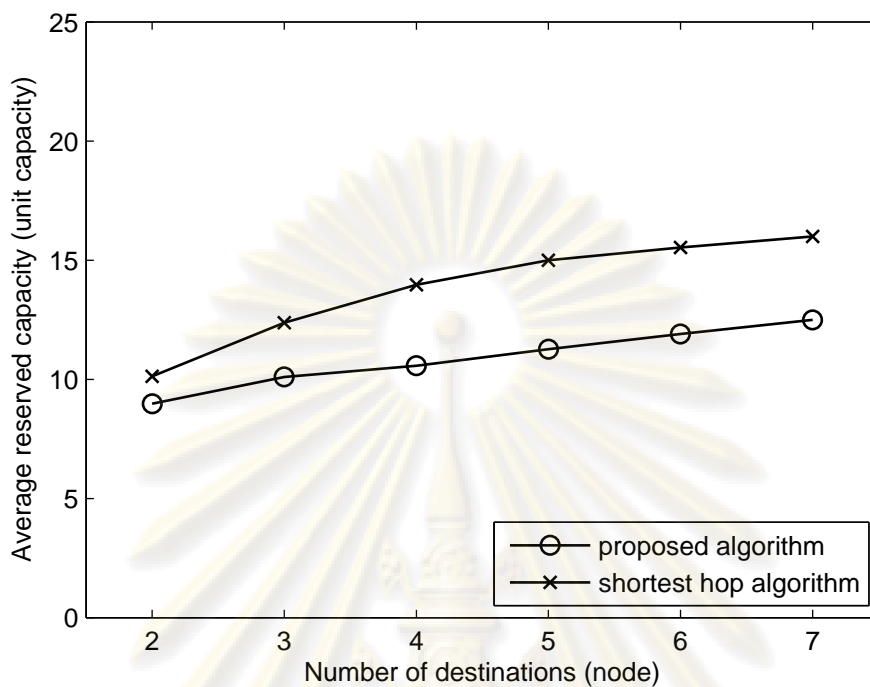
รูปที่ 4.23: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด



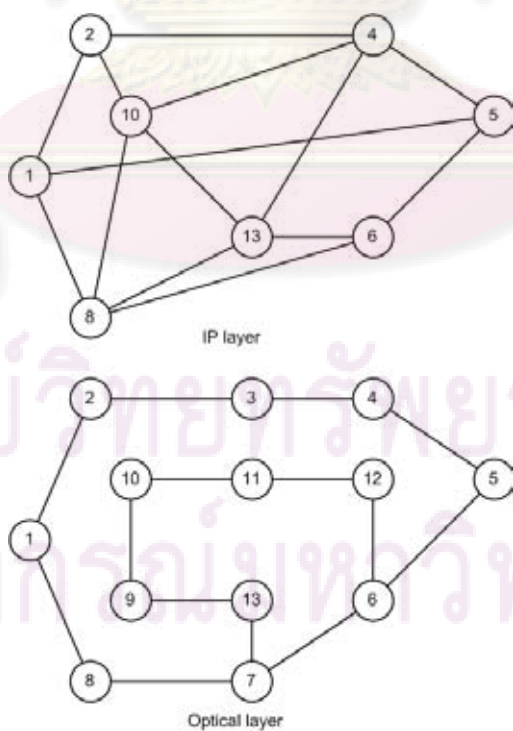
รูปที่ 4.24: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด



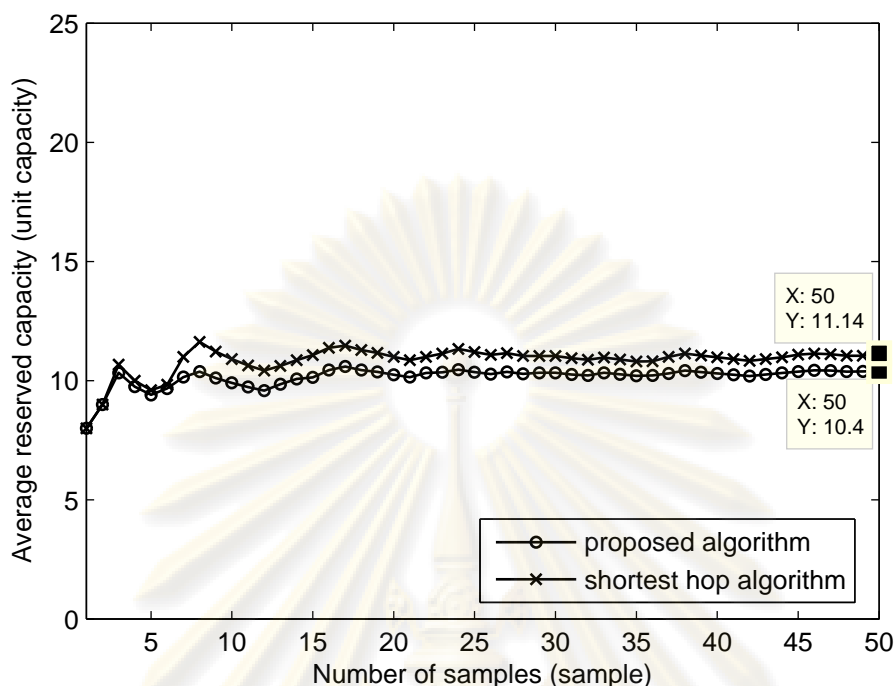
รูปที่ 4.25: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด



รูปที่ 4.26: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3



รูปที่ 4.27: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 4

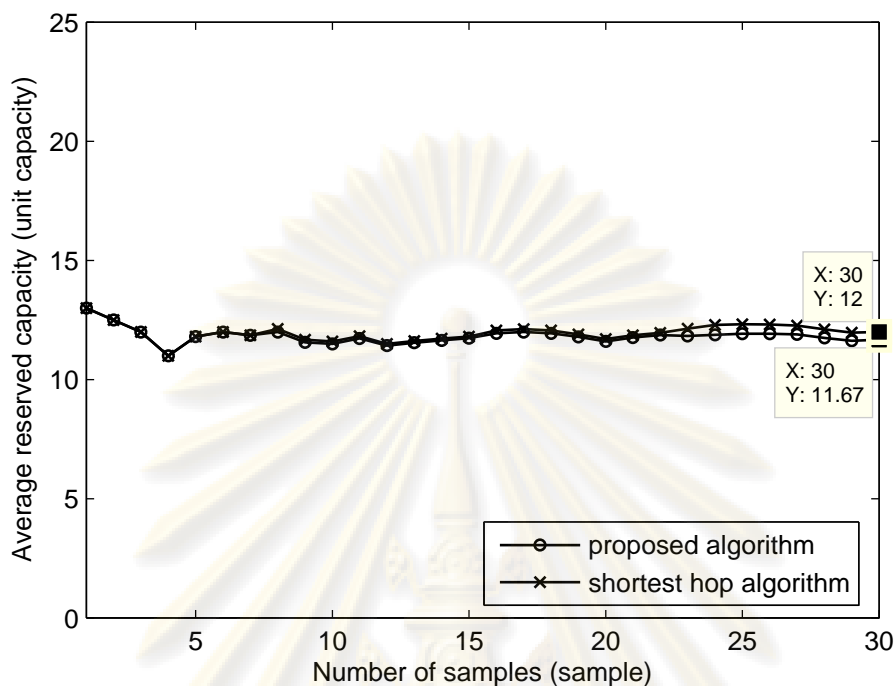


รูปที่ 4.28: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด

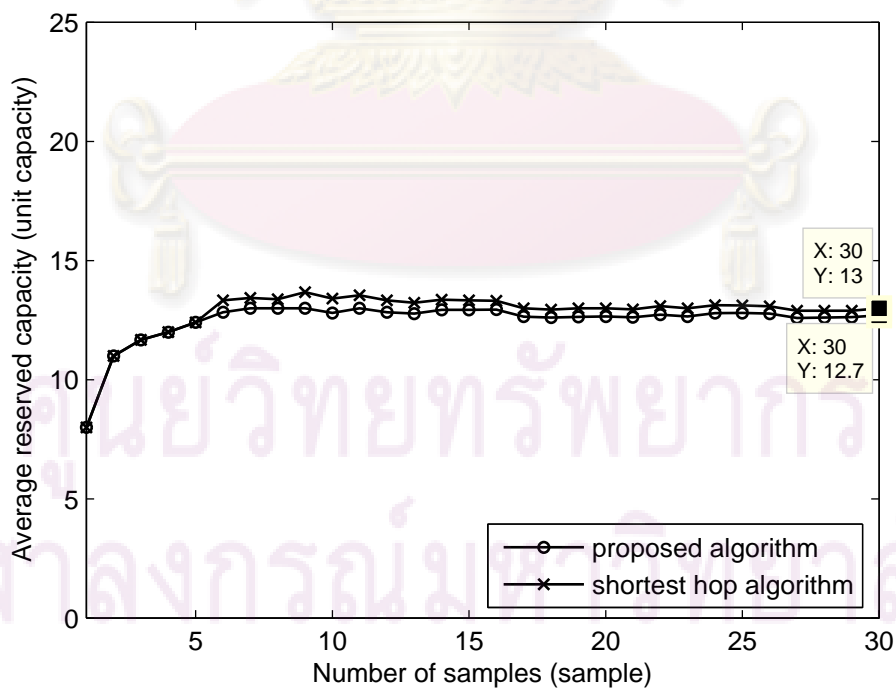
การหาค่าเฉลี่ยนั้นจะอยู่ในช่วง 30-50 ตัวอย่างถึงจะทำให้ค่าเฉลี่ยค่อนข้างคงที่ ในการสุ่มแต่ละครั้งนั้น จะกระทำในลักษณะเดิมคือ สุ่มโหนดต้นทางด้วยการกระจายตัวแบบเอกรูป จากนั้นจึงทำการสุ่มกลุ่มของโหนดปลายทางด้วยกฎการจัดหมู่ โดยที่กลุ่มใดที่ถูกนำมาทดสอบแล้ว จะไม่นำมาทดสอบซ้ำอีก ยกเว้นกรณีที่คำร้องขอมีโหนดปลายทางเท่ากับ 7 โหนดซึ่งจะมีจำนวนรูปแบบเท่ากับ 8 รูปแบบเท่านั้น

รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความจุสำรองที่ถูกจองด้วยวิธีการที่นำเสนอและวิธีการเลือกจำนวนฮอปที่สั้นที่สุด เทียบกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอ จะเห็นได้ว่า ปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ทุกจำนวนของโหนดปลายทาง ซึ่งในขณะเดียวกัน ปริมาณความจุสำรองที่ได้จากวิธีการเลือกจำนวนฮอปที่สั้นที่สุดก็จะลดระดับลงมา โดยที่ถ้าทำการเพิ่มจำนวนของโหนดปลายทางมากขึ้น จะทำให้ปริมาณความจุสำรองที่ได้จากวิธีการการทั้ง 2 นั้นมีค่าเท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เมื่อโครงข่ายในระดับชั้นออฟติคอลลดลงทอนติกรีเฉลี่ยของโหนดไปเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับ 2.0 ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะโครงข่ายแบบเป็นวง (ring) ดังนั้นเมื่อโครงข่ายมีความหลากหลายของการเชื่อมโยงให้เล็กลงน้อย การสร้างเส้นทางป้องกันทั้ง 2 วิธีจึงเปรียบเสมือนถูกบังคับให้เลือกเส้นทางโดยอัตโนมัติ และเส้นทางทั้งสองจะมีรูปแบบที่เหมือนกัน ส่งผลให้ปริมาณความจุสำรองที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าเท่ากัน

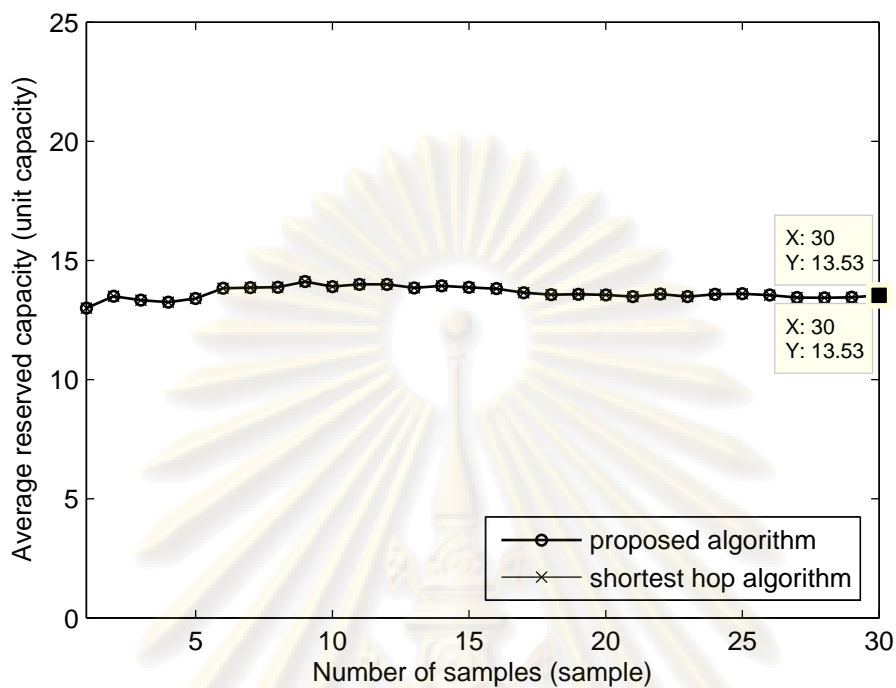
จากการทดสอบผลกระทบเมื่อเปลี่ยนทอพอโลยีในระดับชั้นออฟติคอลล โดยคงทอพอโลยีในระดับชั้นไอพีเอาไว้ดังที่ได้แสดงในโครงข่ายทดสอบทั้ง 4 รูปแบบ พบว่าสามารถสรุปแนวโน้มได้เป็น 2 แนวทาง โดยแนวทางที่ 1 นั้นจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดปลายทางที่เพิ่มขึ้นกับความแตก



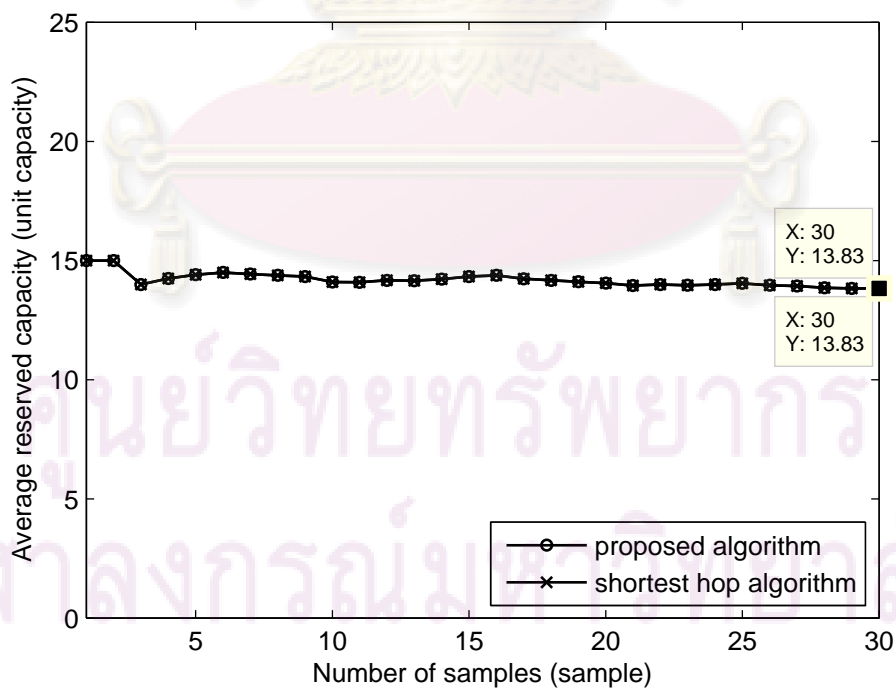
รูปที่ 4.29: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



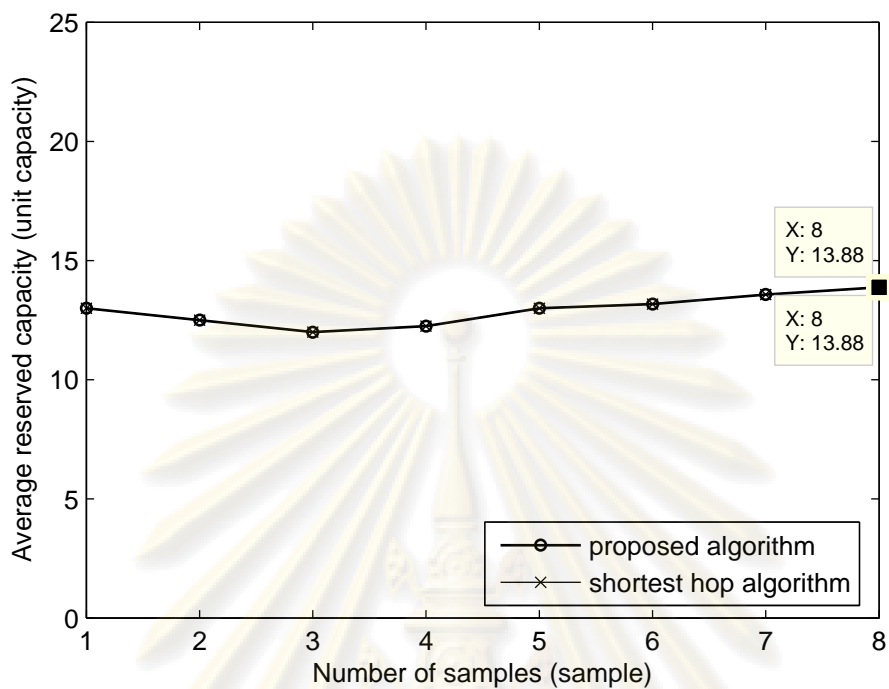
รูปที่ 4.30: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด



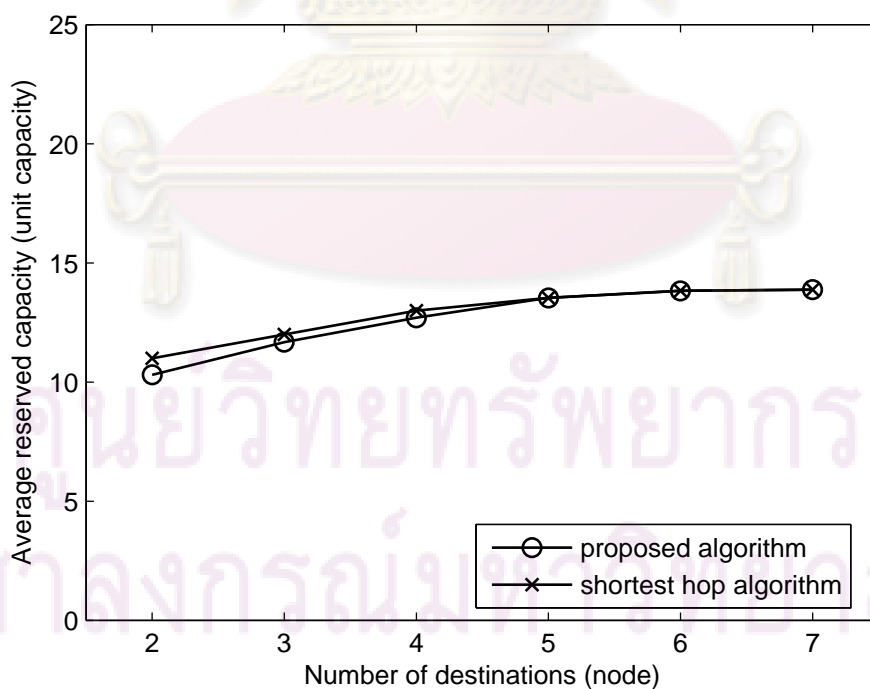
รูปที่ 4.31: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด



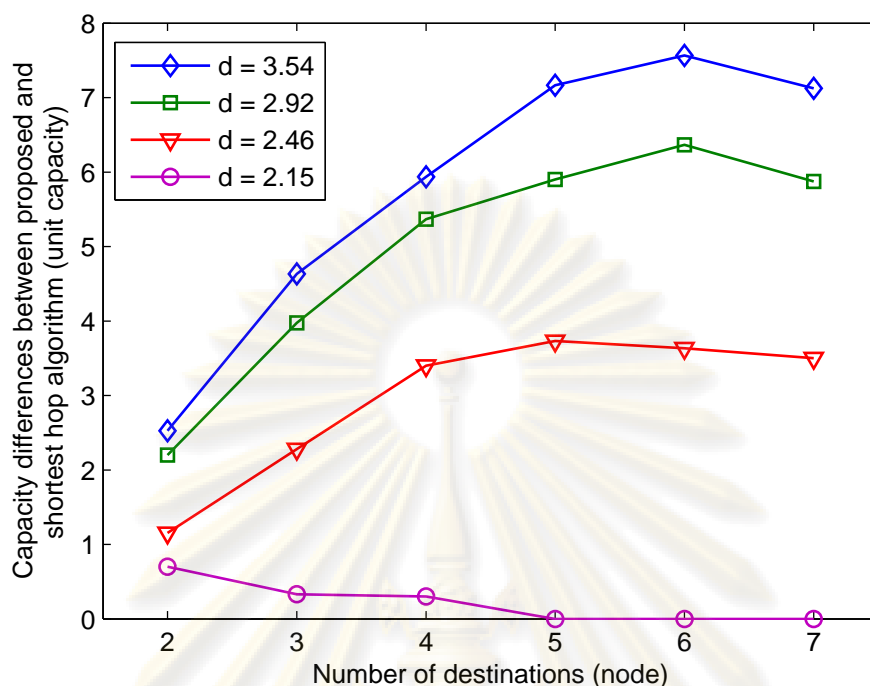
รูปที่ 4.32: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด



รูปที่ 4.33: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด



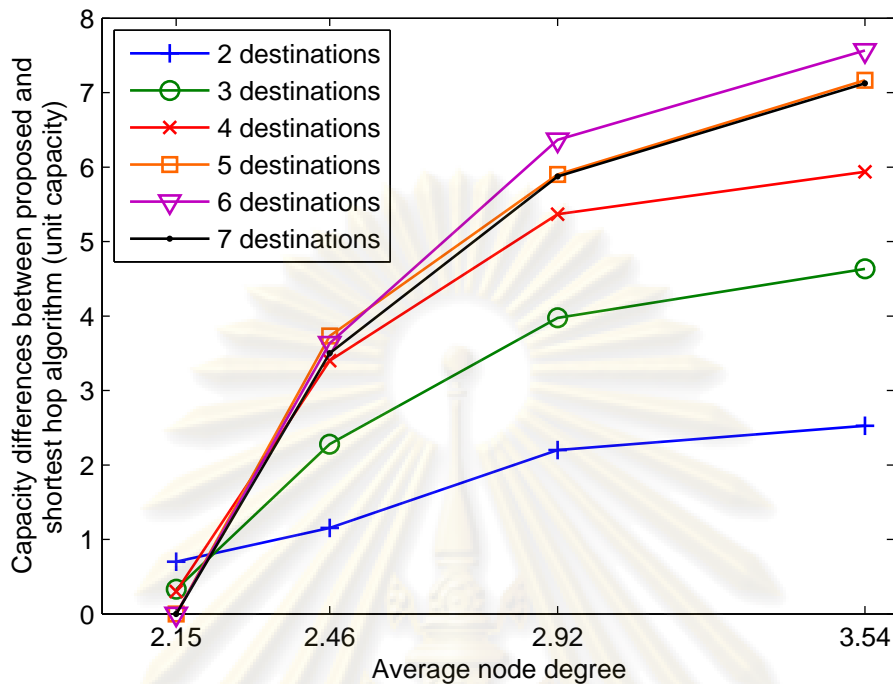
รูปที่ 4.34: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4



รูปที่ 4.35: ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของปริมาณการจูงความจุสำรองเฉลี่ยเมื่อเทียบกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอที่แปรผัน เมื่อทดสอบบนทอพอโลยีในโครงข่ายรูปที่ 1 ถึงโครงข่ายรูปแบบที่ 4

ต่างของปริมาณความจุสำรองเฉลี่ยระหว่างวิธีที่นำเสนอ กับ วิธีเลือกเส้นทางป้องกันที่ใช้ฮอปน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ซึ่งจะสรุปได้ว่าเมื่อทอพอโลยีมีค่าดีกรีเฉลี่ยของโหนดต่ำลง ความแตกต่างของทั้ง 2 วิธีการจะน้อยลงตามไปด้วยซึ่งความแตกต่างนั้นจะมีอัตราการลดลงที่เพิ่มขึ้นเมื่อทดสอบด้วยคำร้องขอที่มีจำนวนโหนดปลายทางมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าเมื่อทอพอโลยีในระดับชั้นฮอปติคอลที่ดีกรีเฉลี่ยของโหนดสูง จำนวนตัวเลือกของการสร้างเส้นทางป้องกันในระดับชั้นฮอปติคอลจึงสูงตามไปด้วย ดังนั้นโอกาสในการหาเส้นทางป้องกันที่สามารถใช้งานร่วมกันได้จึงมีสูง ส่งผลให้ความแตกต่างระหว่าง 2 วิธีมีมาก นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำเพิ่มจำนวนโหนดปลายทางขึ้นถึงขั้นหนึ่ง ความแตกต่างของทั้ง 2 วิธีจะเริ่มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มจำนวนโหนดปลายทางนั้นเป็นการเพิ่มการกระจายตัวของคำร้องขอซึ่งเมื่อทอพอโลยีมีการเชื่อมต่อที่น้อยลง การกระจายตัวของคำร้องขอที่มีจำนวนโหนดเท่ากันก็จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นโอกาสในการหาเส้นทางป้องกันที่สามารถใช้งานร่วมกันได้มากๆ นั้นจะลดลง ซึ่งส่งผลให้ความแตกต่างของทั้ง 2 วิธีลดลงตามไปด้วย

แนวทางที่ 2 นั้นคือการเปรียบเทียบระหว่างดีกรีเฉลี่ยของโหนดของระดับชั้นฮอปติคอล กับความแตกต่างของปริมาณความจุสำรองเฉลี่ยระหว่างวิธีที่นำเสนอ และ วิธีเลือกเส้นทางป้องกันที่ใช้ฮอปน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.36 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการพิจารณาที่จำนวนโหนดปลายทางค่าหนึ่ง ความแตกต่างของความจุสำรองเฉลี่ยเมื่อทำการเพิ่มดีกรีของทอพอโลยีในระดับชั้นฮอปติคอลนั้น จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อมีจำนวนโหนดปลายทางเท่ากันการกระจายตัวในแต่ละทอพอโลยีจะไม่เท่ากัน นั่นคือเมื่อทดสอบด้วยทอพอโลยีที่มีดีกรีของโหนดเฉลี่ยสูง การกระจายตัวของคำร้องขอจะต่ำกว่า



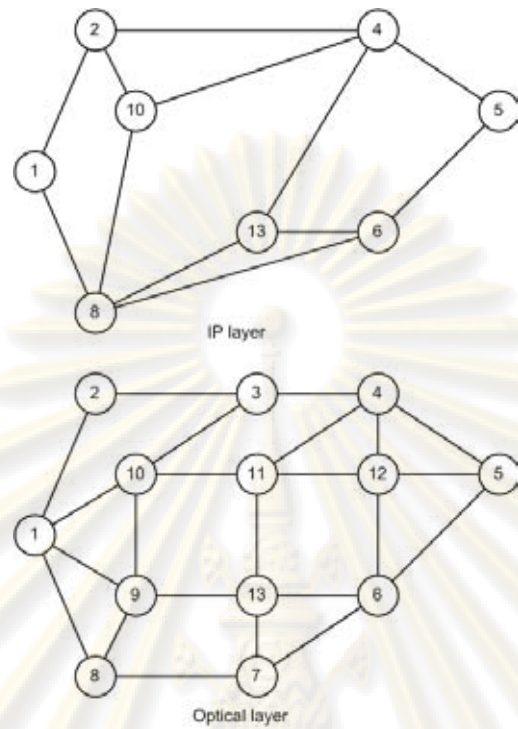
รูปที่ 4.36: ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของปริมาณการจูงความจุสำรองเฉลี่ยกับดีกรีเฉลี่ยของโหนดเมื่อทดสอบด้วยจำนวนโหนดปลายทางต่างๆ

กรณีทดสอบด้วยทอพอโลยีที่มีดีกรีเฉลี่ยของโหนดต่ำ ดังนั้นเมื่อทดสอบบนทอพอโลยีที่มีดีกรีเฉลี่ยของโหนดต่ำจึงทำให้ความแตกต่างต่ำตามไปด้วย

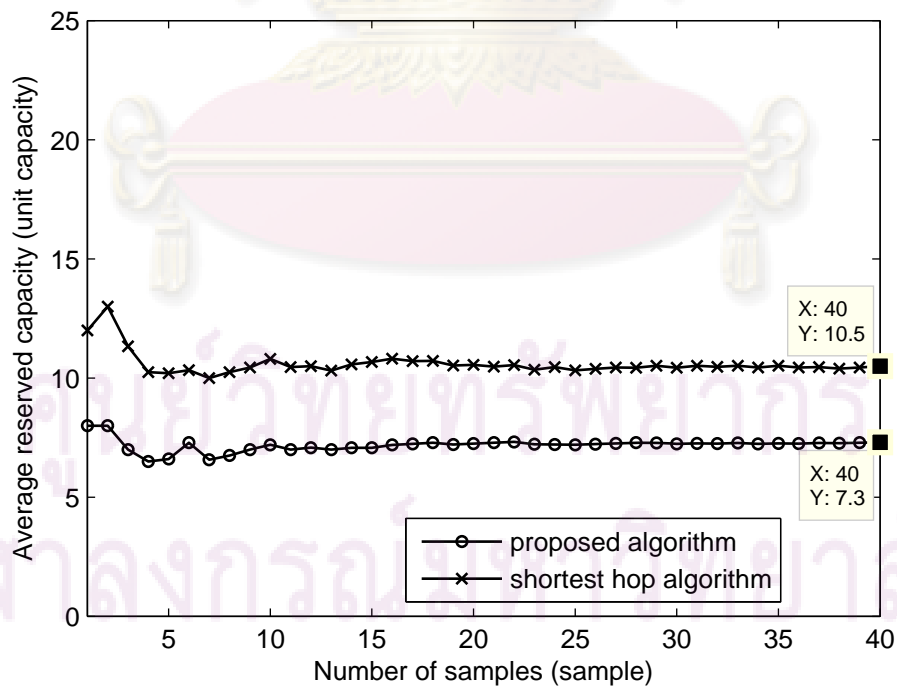
รูปที่ 4.37 คือโครงข่ายที่ใช้เพื่อทดสอบผลกระทบที่มีต่อการจูงความจุสำรองสำหรับเส้นทางป้องกัน เมื่อดีกรีเฉลี่ยของโหนดบนระดับชั้นไอพีลดลงจาก 3.5 เหลือ 3.0 ด้วยการกำจัดการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีออก 2 การเชื่อมโยง โดยที่สำหรับระดับชั้นออกพัตคอลนั้นจะยังคงลักษณะของทอพอโลยีในโครงข่ายรูปแบบที่ 1

รูปที่ 4.38-4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความจุสำรองเฉลี่ย กับ จำนวนครั้งที่ใช้สุม ซึ่งในการสุม 1 ครั้งนั้นประกอบด้วยการสุมโหนดต้นทาง 1 โหนดด้วยการกระจายตัวแบบเอกรูป จากนั้นจึงสุมกลุ่มของโหนดปลายทางที่ต้องการด้วยกฎการจับหมู่ โดยที่กลุ่มใดที่ถูกพิจารณาไปแล้ว จะไม่นำมาพิจารณาซ้ำ จากผลการทดลองพบว่าแต่ละจำนวนของโหนดปลายทาง นั้นจำเป็นต้องใช้การสุมทั้งสิ้น 30-40 ครั้ง ยกเว้นกรณีที่คำร้องขอมโหนดปลายทางเท่ากับ 7 โหนดซึ่งจะมีจำนวนรูปแบบทั้งสิ้นเท่ากับ 8 รูปแบบด้วยกัน

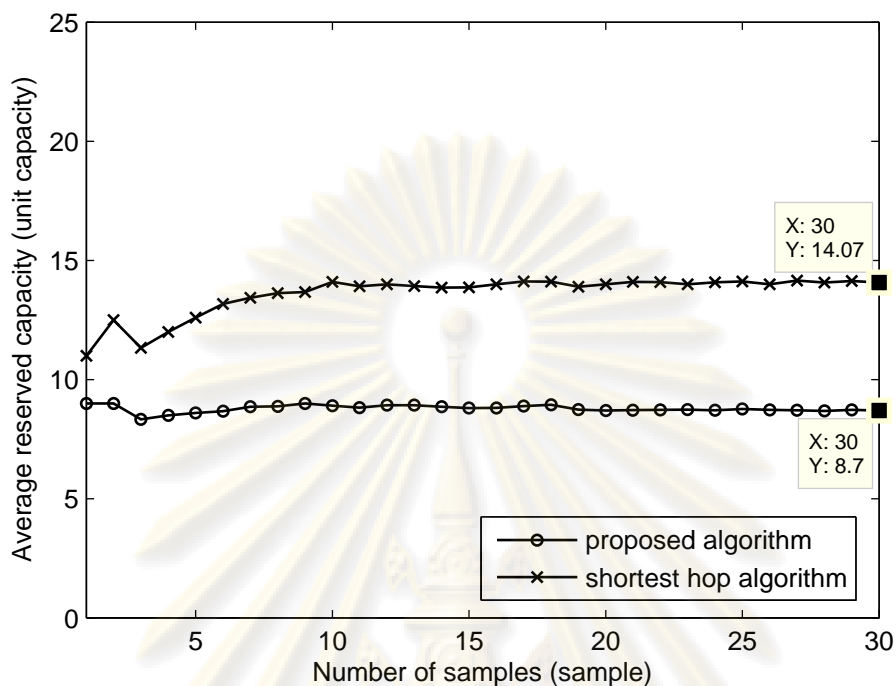
รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความจุสำรอง กับ จำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอ เมื่อทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโครงข่ายรูปแบบที่ 1 นั้น การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความจุสำรองที่ได้จากวิธีที่นำเสนอจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย นั้นเป็นเพราะว่าการกำจัดการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีออก เป็นการลดจำนวนรูปแบบของการสร้างเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพี ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อการสร้างเส้นทางป้องกันในระดับชั้นออกพัตคอลส่งผลให้โอกาสในการใช้งานความจุสำรองร่วมกันยังคงมีเท่าเดิม แต่ปริมาณความจุสำรองที่เพิ่มขึ้นนั้นจะเพิ่มขึ้นจากการ



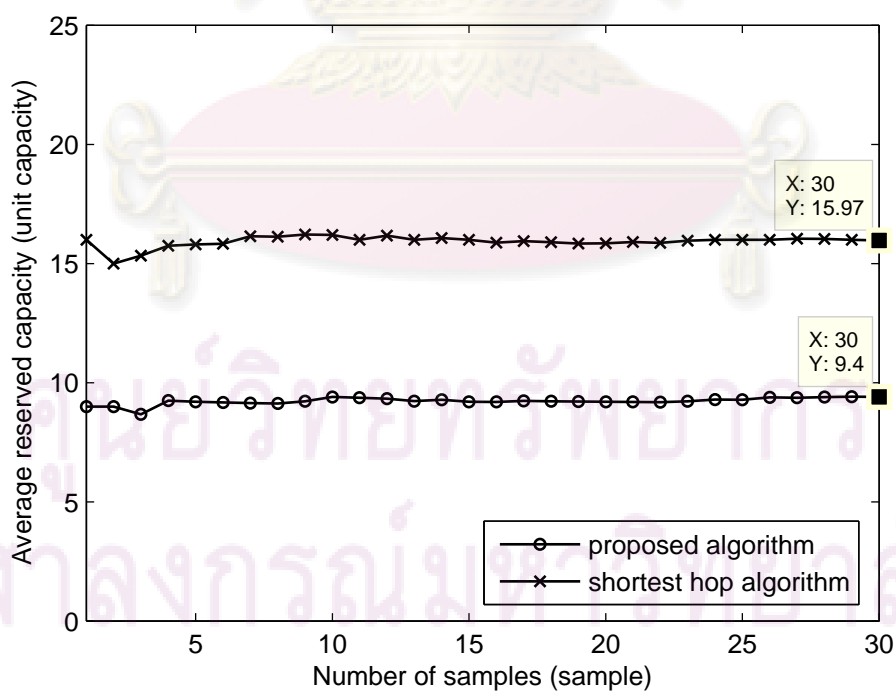
รูปที่ 4.37: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 5



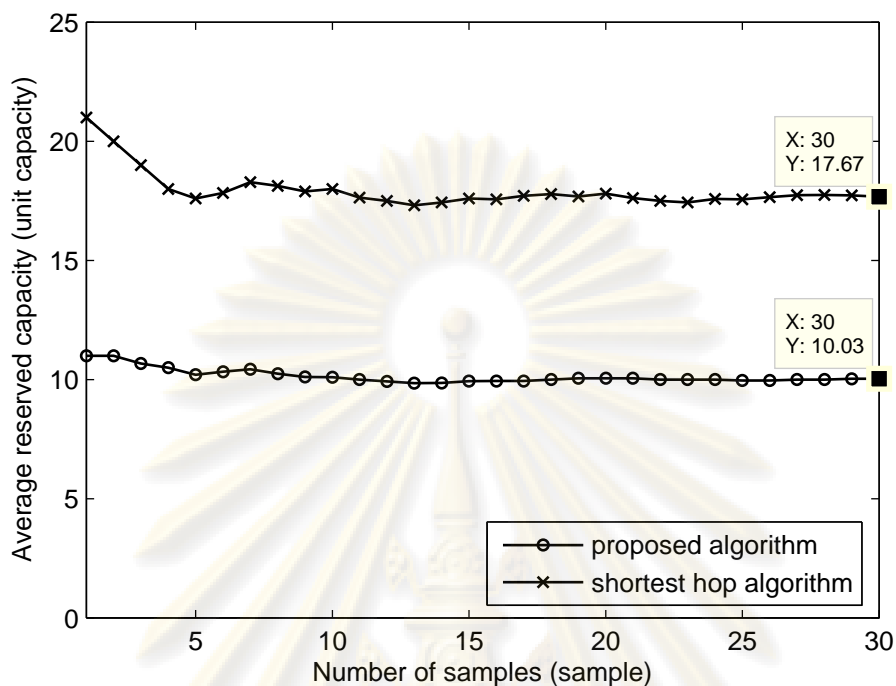
รูปที่ 4.38: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด



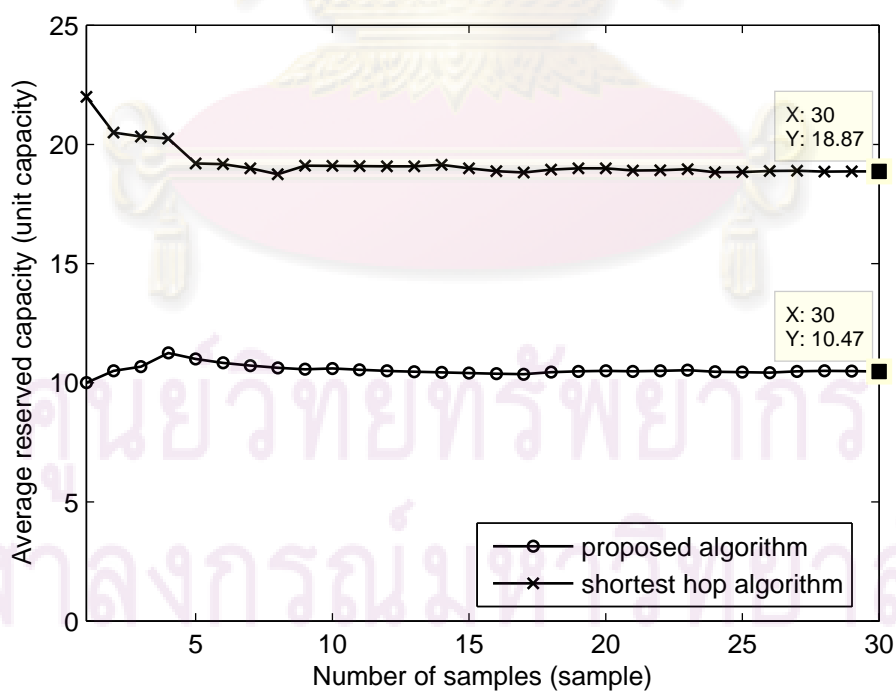
รูปที่ 4.39: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



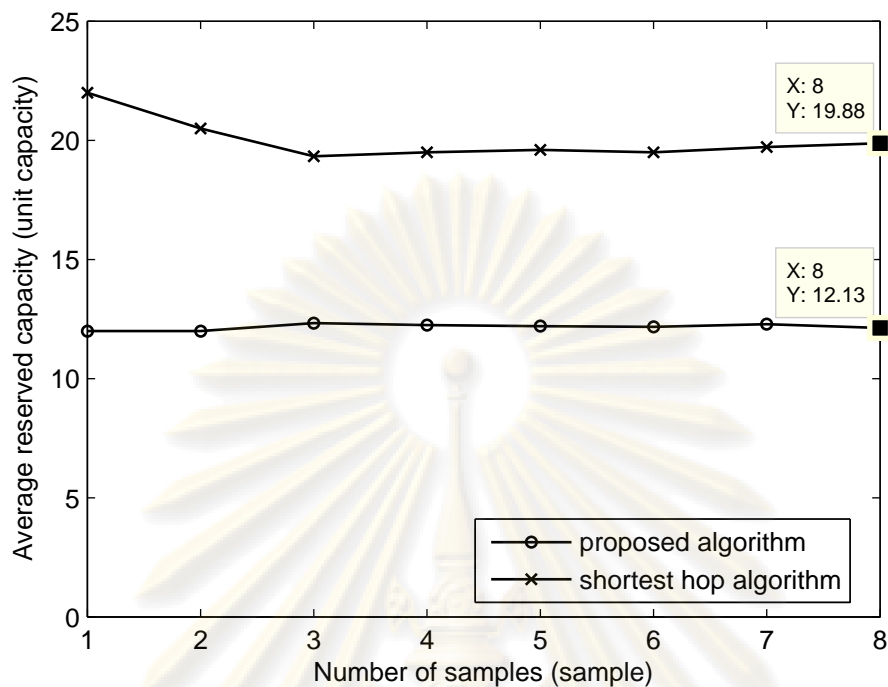
รูปที่ 4.40: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด



รูปที่ 4.41: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด



รูปที่ 4.42: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด



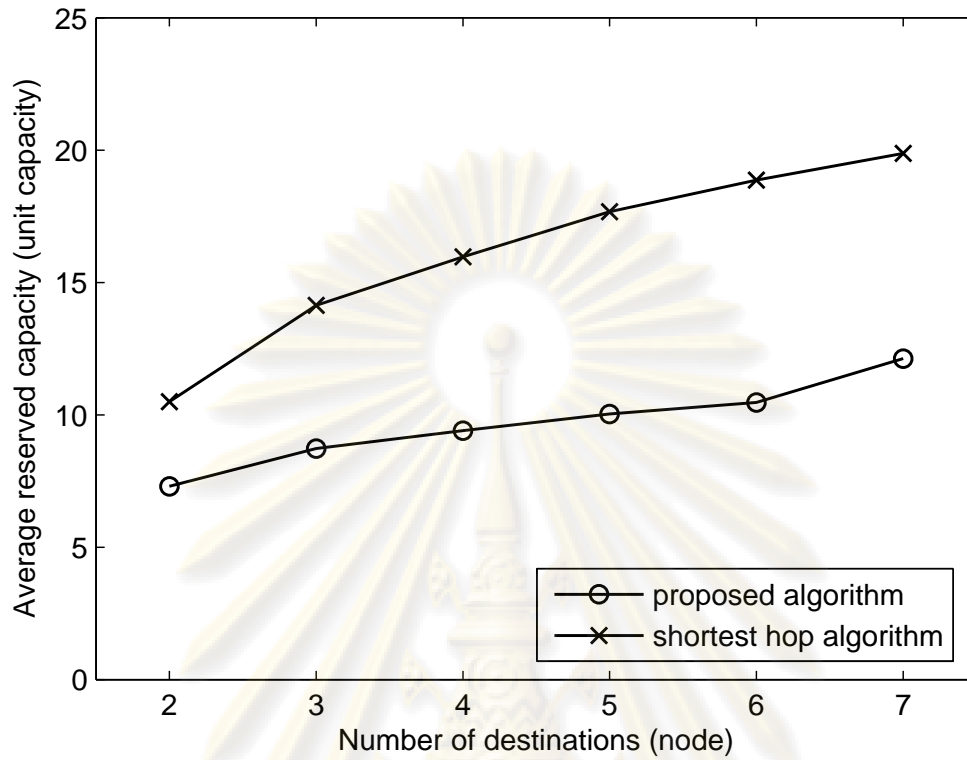
รูปที่ 4.43: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด

เลือกเส้นทางป้องกันที่ไกลมากขึ้น ซึ่งปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับปริมาณการจองความจุสำรองด้วยวิธีเลือกจำนวนฮอปสั้นที่สุดนั้น จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากกรณีที่ทดสอบด้วยโครงข่ายรูปแบบที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า นั้นเป็นเพราะว่าโอกาสในการใช้เส้นทางป้องกันที่ไกลขึ้นเนื่องจากถูกกำจัดการเชื่อมในระดับชั้นไอพีมีมากขึ้น จึงส่งผลให้การจองความจุสำรองในระดับชั้นไอพี มีปริมาณการใช้สูงขึ้น

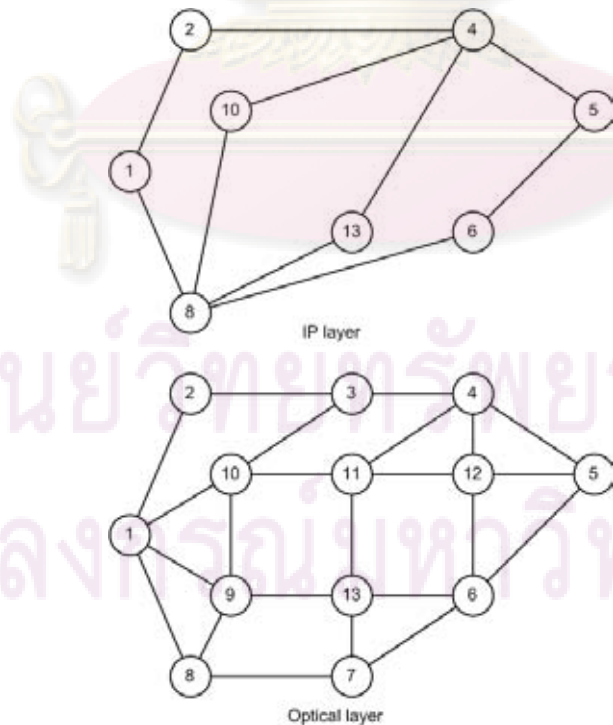
รูปที่ 4.45 แสดงลักษณะโครงข่ายที่ใช้ทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีในระดับชั้นไอพี ซึ่งทำให้ค่าดีกรีเฉลี่ยของโหนดในระดับชั้นไอพีลดลงจากทอพอโลยีในโครงข่ายรูปแบบที่ 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.5 ลงเหลือ 2.5 โดยการทดสอบนั้นจะคงลักษณะทอพอโลยีในระดับชั้นออฟดิคอลเอาไว้ นั่นคือ ยังคงมีค่าดีกรีเฉลี่ยของโหนดในระดับชั้นออฟดิคอลเท่ากับ 3.54

รูปที่ 4.46-4.51 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งที่ทดสอบ กับ ปริมาณความจุสำรองเฉลี่ยที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ และ วิธีการเลือกกระยะฮอปสั้นที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการหาค่าเฉลี่ยนั้นจะอยู่ในช่วง 30 ตัวอย่างถึงจะทำให้ค่าเฉลี่ยค่อนข้างคงที่ ในการสุ่มแต่ละครั้งนั้นจะกระทำในลักษณะเดิมคือ สุ่มโหนดต้นทางด้วยการกระจายตัวแบบเอกรูป จากนั้นจึงทำการสุ่มกลุ่มของโหนดปลายทางด้วยกฎการจัดหมู่ โดยที่กลุ่มใดที่ถูกนำมาทดสอบแล้ว จะไม่นำมาทดสอบซ้ำอีก ยกเว้นกรณีที่คำร้องขอมีโหนดปลายทางเท่ากับ 7 โหนดซึ่งจะมีจำนวนรูปแบบเท่ากับ 8 รูปแบบเท่านั้น

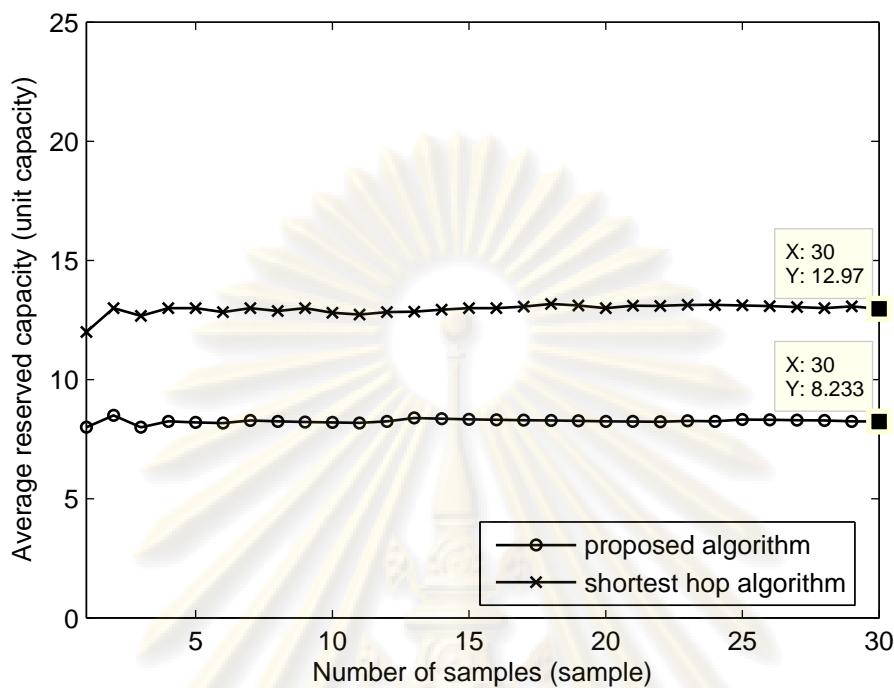
รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดปลายทางและปริมาณการจองความจุสำรองที่ใช้ เมื่อทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 6 จะเห็นได้ว่ารูปแบบของการเปลี่ยนแปลงยังคงเป็นเหมือนกรณีที่ทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 นั่นคือปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ทดสอบ



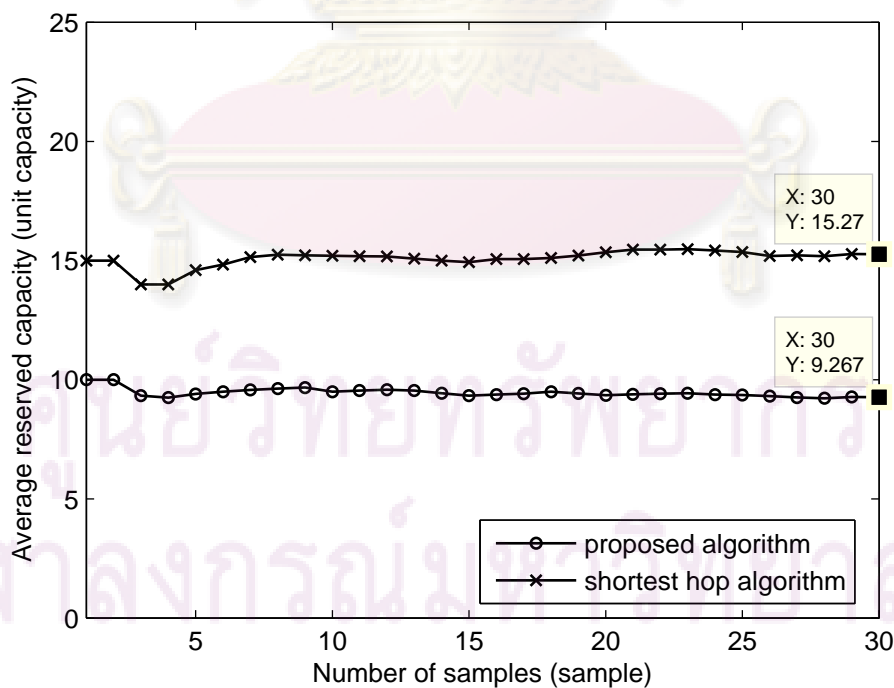
รูปที่ 4.44: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5



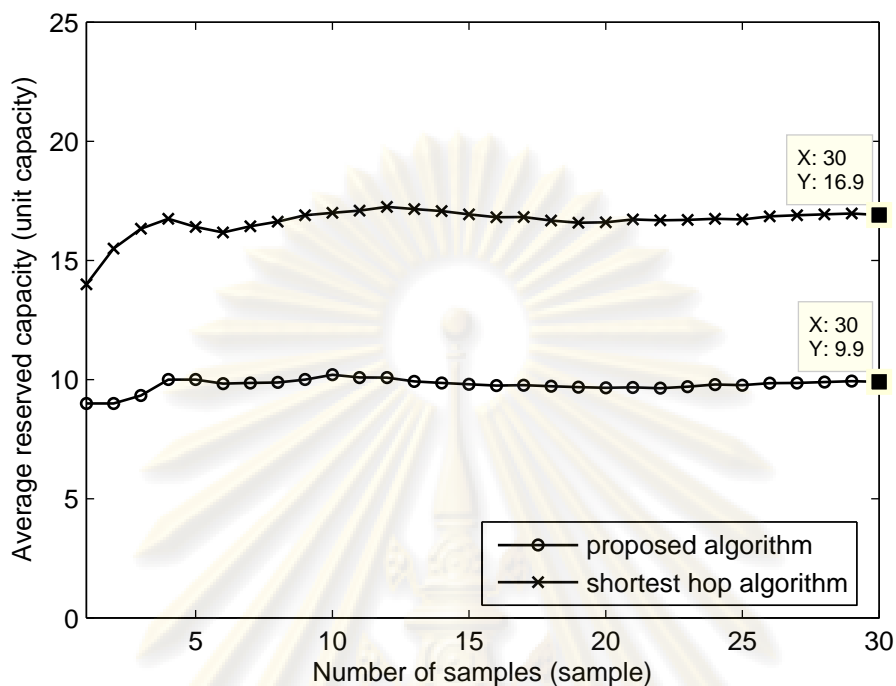
รูปที่ 4.45: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 6



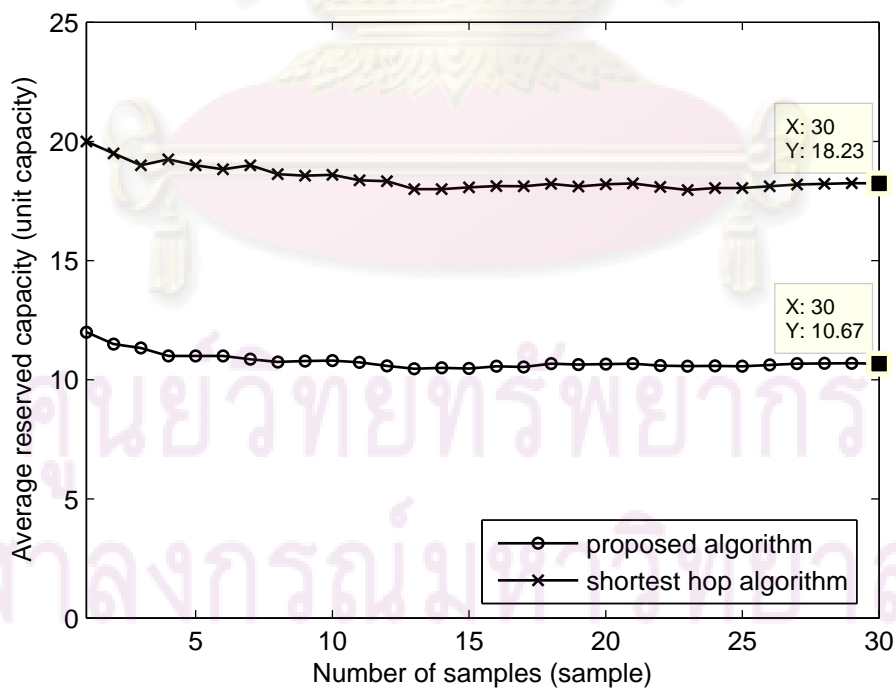
รูปที่ 4.46: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 6 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด



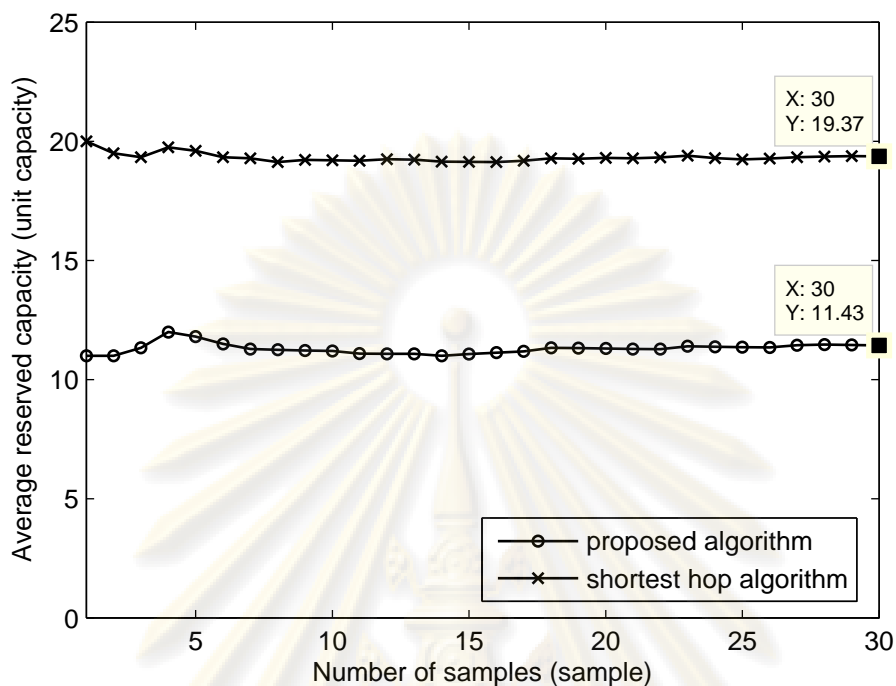
รูปที่ 4.47: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 6 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



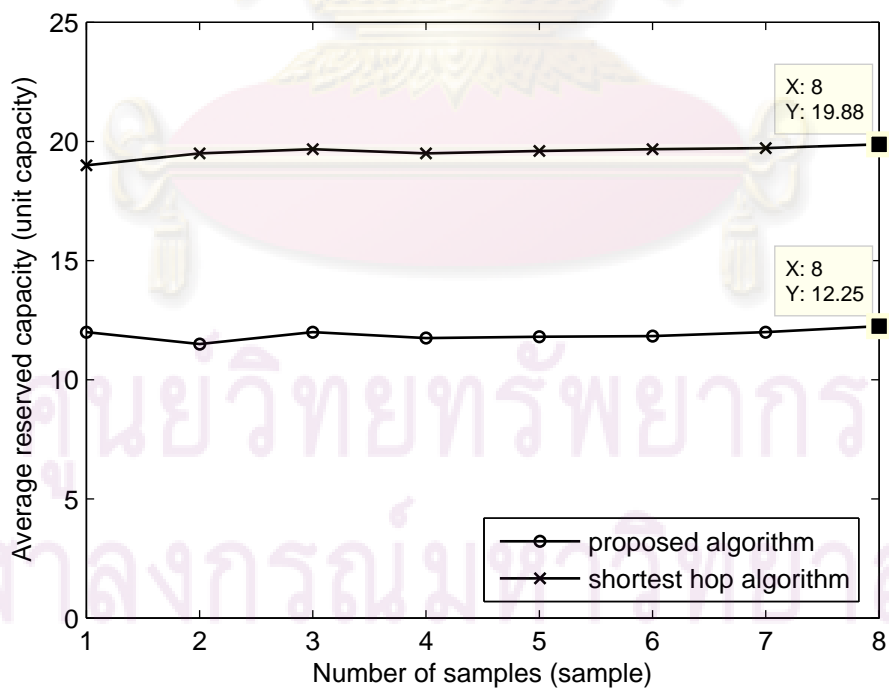
รูปที่ 4.48: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 6 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด



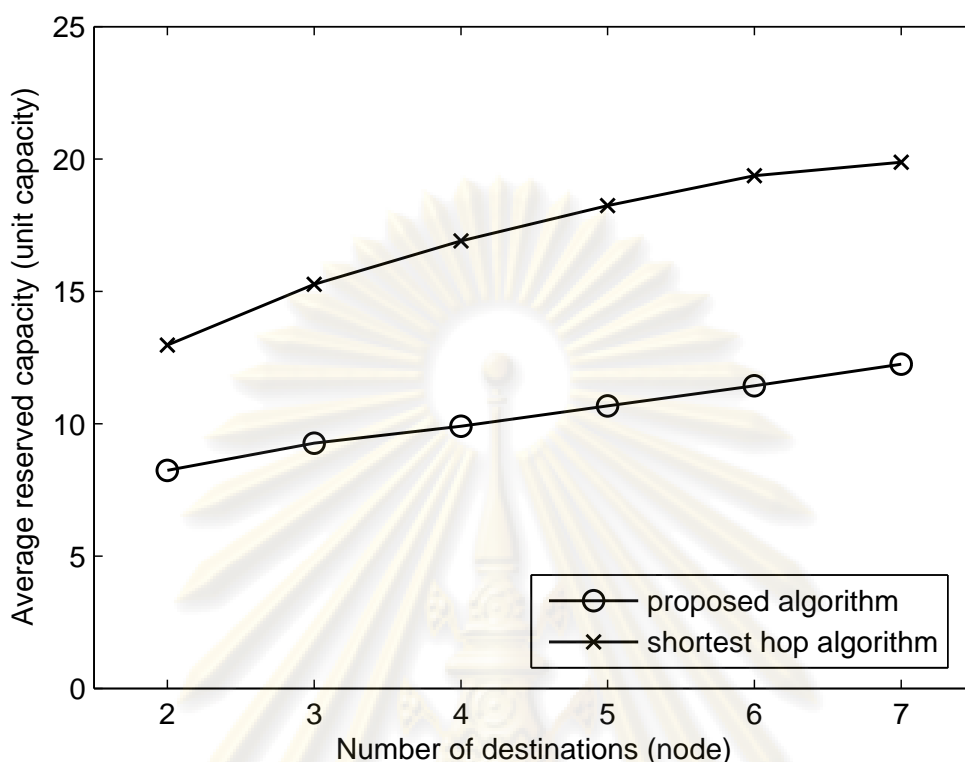
รูปที่ 4.49: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 6 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด



รูปที่ 4.50: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 6 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด



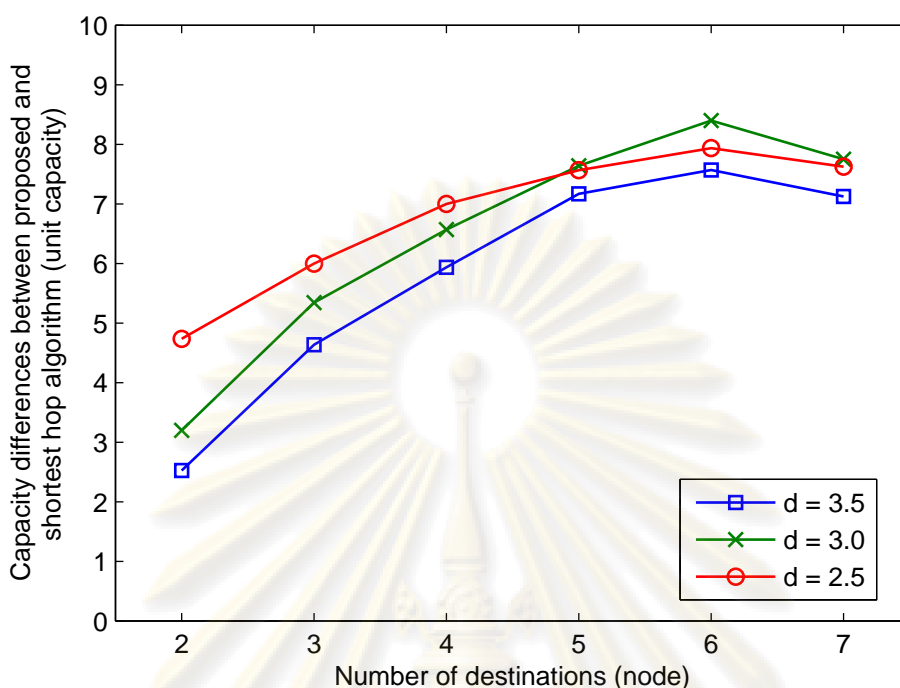
รูปที่ 4.51: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 6 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด



รูปที่ 4.52: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอบนโครงข่ายรูปแบบที่ 6

สอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 ซึ่งเหตุผลของการเพิ่มขึ้นนี้ก็สามารถอธิบายด้วยทวิเคราะห์ที่ได้อธิบายไว้ในกรณีทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5

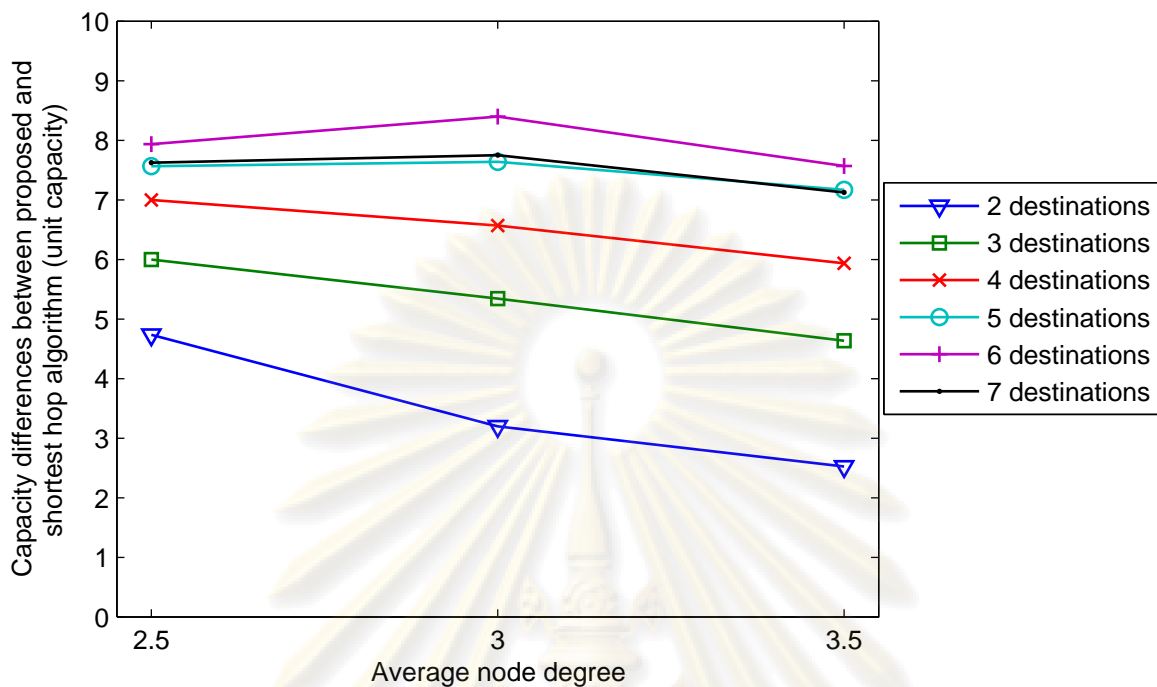
จากการทดสอบผลกระทบของการจองความจุสำรองเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าดีกรีเฉลี่ยของโหนดในระดับชั้นไอพีนั้น สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.53 ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของปริมาณความจุสำรองที่ได้จากทั้ง 2 วิธี เทียบกับค่าดีกรีเฉลี่ยของโหนด จะเห็นได้ว่าความแตกต่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจากนั้นจะเริ่มลดลงเมื่อทำการเพิ่มจำนวนโหนดปลายทางต่อไป นั่นเป็นเพราะว่าเมื่อโหนดปลายทางมีเพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดการกระจายตัวของคำร้องขอเต็มโครงข่าย ทำให้โอกาสในการใช้งานร่วมกันลดน้อยลง อีกทั้งวิธีการเลือกเส้นทางที่ใช้จำนวนฮอปน้อยที่สุดนั้น ในกรณีนี้ก็อาจไม่สามารถใช้งานความจุสำรองได้มากไปกว่านี้ เนื่องจากได้ใช้งานอย่างเต็มที่แล้ว จึงส่งผลให้ความแตกต่างของทั้ง 2 วิธีมีค่าลดลง อีกสิ่งหนึ่งที่น่าสนใจในรูปนี้คือจะสังเกตได้ว่า กราฟแสดงความแตกต่างปริมาณความจุสำรองบนโครงข่ายที่มีค่าดีกรีเฉลี่ยของโหนดเท่ากับ 2.5 นั้น มีการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างที่น้อยกว่าโครงข่ายดีกรีอื่น ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อดีกรีน้อยลง หมายความว่าโอกาสที่การเลือกเส้นทางป้องกันจำเป็นต้องเลือกเส้นทางที่ยาวขึ้นนั้นมีเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ต้องใช้การเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความจุสำรองที่เตรียมด้วยวิธีที่นำเสนอเพิ่มขึ้นจากเดิม ในขณะที่การเลือกด้วยวิธีเลือกเส้นทางป้องกันแบบใช้จำนวนฮอปน้อยที่สุดนั้น การจองจะเพิ่มขึ้นจากเดิมไม่มากทำให้ความแตกต่างของทั้ง 2 วิธีน้อยกว่ากรณีดีกรีเฉลี่ยของโหนดเท่ากับ 3.0



รูปที่ 4.53: ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของปริมาณการจูงความจุสำรองเฉลี่ยกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอเมื่อทดสอบด้วยทอพอโลยีชนิดต่างๆ

สำหรับรูปที่ 4.54 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดีกรีเฉลี่ยของโหนด กับ ความแตกต่างของปริมาณความจุสำรองที่ได้จากทั้ง 2 วิธี ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มดีกรีของโครงข่ายในระดับชั้นไอพีแล้ว แนวโน้มของความแตกต่างระหว่างทั้ง 2 วิธี จะมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มดีกรีของระดับชั้นไอพี ทำให้ตัวเลือกในระดับชั้นไอพีมีมากขึ้น ดังนั้นโอกาสที่จะเลือกด้วยวิธีการเลือกเส้นทางที่ใช้ขอบต่ำที่สุดก็อาจให้ค่าได้ใกล้เคียงกับวิธีที่นำเสนอ นอกจากนี้ระดับการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างนั้นจะมีค่าน้อยลงเมื่อเพิ่มจำนวนโหนดปลายทาง ซึ่งนั่นเป็นเพราะเมื่อมีโหนดปลายทางมากทำให้การกระจายตัวของคำร้องขอมีสูง ดังนั้นเส้นทางป้องกันที่ถูกสร้างขึ้นในระดับไอพี ถึงจะมีมากขึ้นก็ได้มีผลกระทบกับการวางความจุสำรองมากนัก เนื่องจากได้ทำการวางเส้นทางป้องกันครอบคลุมโครงข่ายในระดับชั้นออดิโกลส่วนใหญ่ไปแล้ว

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้ ถึงแม้ว่าขั้นตอนการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะขอบสั้นที่สุดจะให้ปริมาณการจูงความจุสำรองที่สูงกว่าปริมาณความจุสำรองที่ได้จากวิธีที่นำเสนอก็ตาม ระยะขอบที่ได้จากวิธีวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะขอบสั้นที่สุดนี้จะต่ำกว่าวิธีที่นำเสนอดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งทำการทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 โดยใช้โหนดต้นทางเป็นโหนดที่ 13 จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของระยะขอบเฉลี่ยที่ใช้จะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนโหนดปลายทาง ซึ่งถ้าคำร้องขอจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะขอบที่ใช้ในการส่งข้อมูลวิธีการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะขอบสั้นที่สุดอาจมีความเหมาะสมกว่าวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 4.54: ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของปริมาณการจูงความจุสำรองเฉลี่ยกับดีกรีเฉลี่ยของโหนดเมื่อทดสอบด้วยจำนวนโหนดปลายทางต่างๆ

4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจูงความจุสำรองด้วยวิธีที่นำเสนอสำหรับมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิด

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจูงความจุสำรองด้วยวิธีที่นำเสนอสำหรับมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิด มีจุดประสงค์เพื่อวัดปริมาณความจุสำรองเฉลี่ยสำหรับกราฟฟิกแต่ละประเภทเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง โดยในการทดสอบนั้นจำเป็นต้องทดสอบบนโครงข่ายที่มีทอพอโลยีในระดับชั้นไอพีแบบมีการเชื่อมต่อทั่วถึง (fully connected) เพื่อให้สามารถทดสอบด้วยกราฟฟิกทั้ง 3 ชนิดได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพีนั้น ต้องการการเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นต้นไม้บนระดับชั้นไอพีโดยที่โหนดปลายทางส่วนใหญ่ ไม่ได้เชื่อมต่อกับโหนดต้นทางโดยตรง สำหรับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับออปติคัล และ กราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออปติคัลนั้น จะต้องการการเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างโหนดต้นทางถึงโหนดปลายทาง

สำหรับการทดสอบนั้น จะกระทำบนโครงข่ายรูปแบบที่ 7 ดังแสดงในรูปที่ 4.55 [17] โดยที่ในระดับชั้นออปติคัลจะมีโหนดทั้งหมด 7 โหนด และการเชื่อมโยงทั้งหมด 12 การเชื่อมโยงและ ในระดับชั้นไอพีซึ่งจะมีโหนด 6 โหนดและมีการเชื่อมต่อกันแบบทั่วถึง

รูปที่ 4.56-4.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่ทำการสุ่ม และ ค่าเฉลี่ยความจุสำรองที่ใช้เพื่อสร้างเส้นทางป้องกันสำหรับกราฟฟิกทั้ง 3 รูปแบบ โดยที่การสุ่มหนึ่งครั้งจะทำการสุ่มโหนดต้นทาง 1 โหนดด้วยการกระจายตัวแบบเอกรูป จากนั้นจะทำการสุ่มกลุ่มของโหนดปลายทางด้วยกฎการจัดหมู่

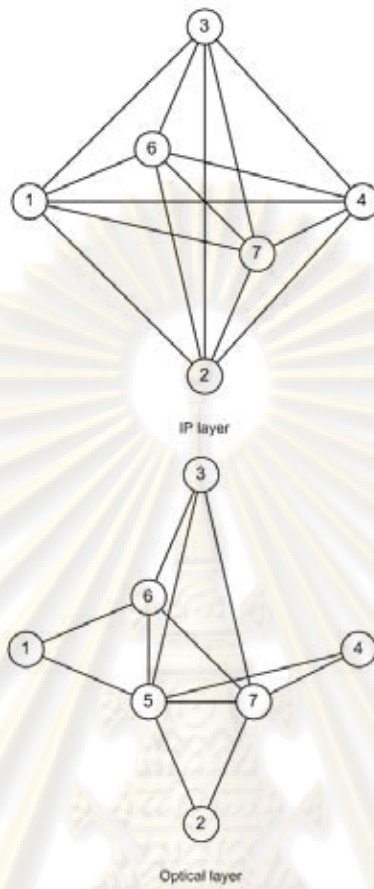
ตารางที่ 4.1: ตารางเปรียบเทียบจำนวนฮอปในระดับชั้นไอพีเฉลี่ยที่ได้จากขั้นตอนการวางเส้นทางป้องกันแบบใช้ระยะฮอปสั้นที่สุดกับวิธีที่นำเสนอ

	proposed algorithm	shortest hop algorithm
2 destinations	3	3
3 destinations	2.667	2.667
4 destinations	2.5	2.5
5 destinations	3.6	2.6
6 destinations	3.667	2.667
7 destinations	3.57	2.57

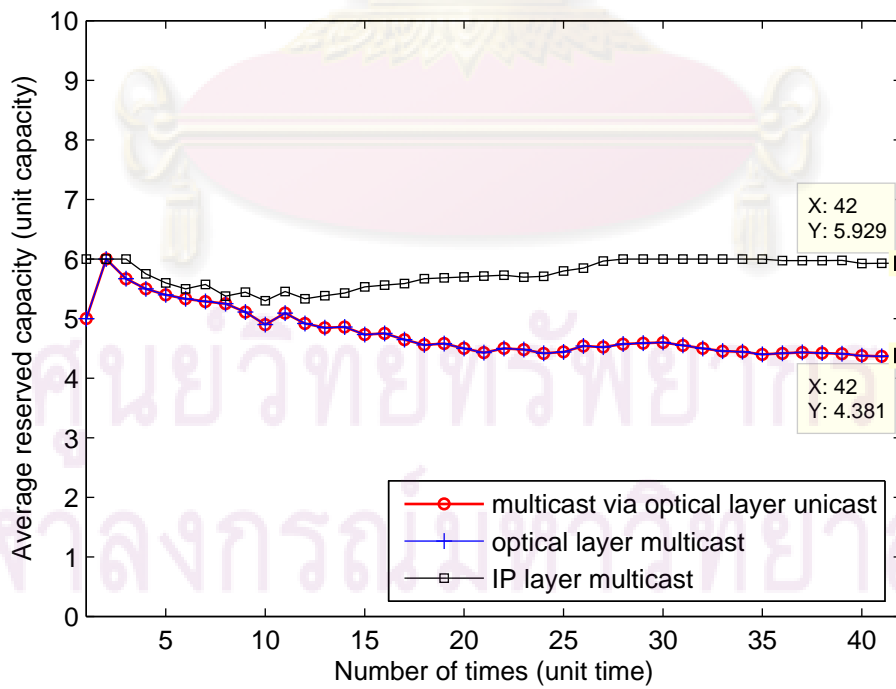
โดยที่จะไม่นำกลุ่มที่เคยพิจารณาแล้วกลับมาพิจารณาใหม่ การสร้างเส้นทางของคำร้องขอนั้นสำหรับ มัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออฟติคอลล และ มัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออฟติคอลล จะมีวิธีเลือกโหนดปลายทางที่เหมือนกัน นั่นคือจะเลือกเส้นทางที่เชื่อมต่อโดยตรงกับโหนดปลายทาง ซึ่งหมายความว่าแต่ละเส้นทางจะไม่มี การผ่านอุปกรณ์จัดเส้นทางใดเลย สำหรับการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพีนั้น จะเลือกเส้นทางของคำร้องขอโดยเลือกระยะฮอปที่ห่างจากโหนดต้นทางในระดับชั้นไอพีเท่ากับ 2 ฮอป นอกจากนี้ทุกการสุ่มคำร้องขอ จำเป็นต้องตรวจสอบทางเดินข้อมูลไม่ให้เกิดการวน (loop)

รูปที่ 4.60 แสดงปริมาณความจุสำรองของมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิดเมื่อแปรผันจำนวนโหนดปลายทางจาก 2 โหนดถึง 5 โหนด จะเห็นได้ว่ากราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี จำเป็นต้องใช้ปริมาณการจูงความจุสำรองมากกว่ากราฟฟิกอีก 2 ชนิด ซึ่งนั่นเป็นเพราะว่า กราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพีนั้น ต้องอาศัยการจัดเส้นทางด้วยทางเดินแสงมากกว่าจำนวนโหนดปลายทาง ดังนั้นความต้องการในการจูงความจุสำรองจึงมีมากกว่าอีก 2 ประเภท ซึ่งอาศัยการจัดเส้นทางด้วยจำนวนทางเดินแสงเท่ากับจำนวนของโหนดปลายทาง

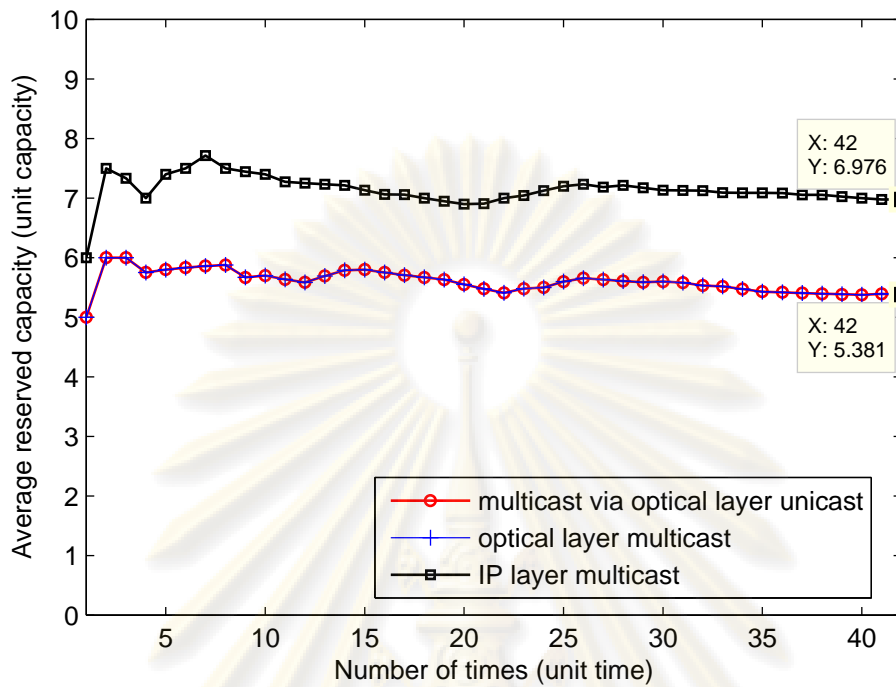
รูปที่ 4.61 แสดงความแตกต่างระหว่างความจุสำรองที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอและวิธีเลือกฮอปที่สั้นที่สุด เทียบกับ จำนวนโหนดปลายทาง จะเห็นได้ว่าในขณะที่โหนดปลายทางเท่ากับ 2 โหนด ค่าความแตกต่างของความจุสำรองที่ได้จากทั้ง 2 วิธีเพื่อรองรับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี จะน้อยกว่า ความแตกต่างของความจุสำรองที่รองรับมัลติคาสต์กราฟฟิกอีก 2 ชนิดแต่เมื่อเพิ่มจำนวนโหนดเป็น 3, 4 และ 5 โหนดจะพบว่าความแตกต่างของความจุสำรองเพื่อรองรับกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพีจะมากกว่าเทียบกับกราฟฟิกอีก 2 ชนิด ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เมื่อขอคำร้องขอมีจำนวนโหนดปลายทางเท่ากับ 2 ความแตกต่างระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการเลือกเส้นทางที่มีจำนวนฮอปน้อยที่สุดนั้นจะไม่แตกต่างกันนัก แต่ภายหลังเมื่อเพิ่มจำนวนโหนดปลายทางมากขึ้น ทำให้คำร้องขอมีองค์ประกอบที่จำเป็นต้องป้องกันมากกว่ากราฟฟิกอีก 2 ชนิด โอกาสในการใช้งานความจุสำรองร่วมกันจึงมีมากขึ้น ทำให้ความแตกต่างระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีเลือกเส้นทางป้องกันที่ใช้ระยะฮอปสั้นที่สุดมากขึ้นกว่าเดิมมาก



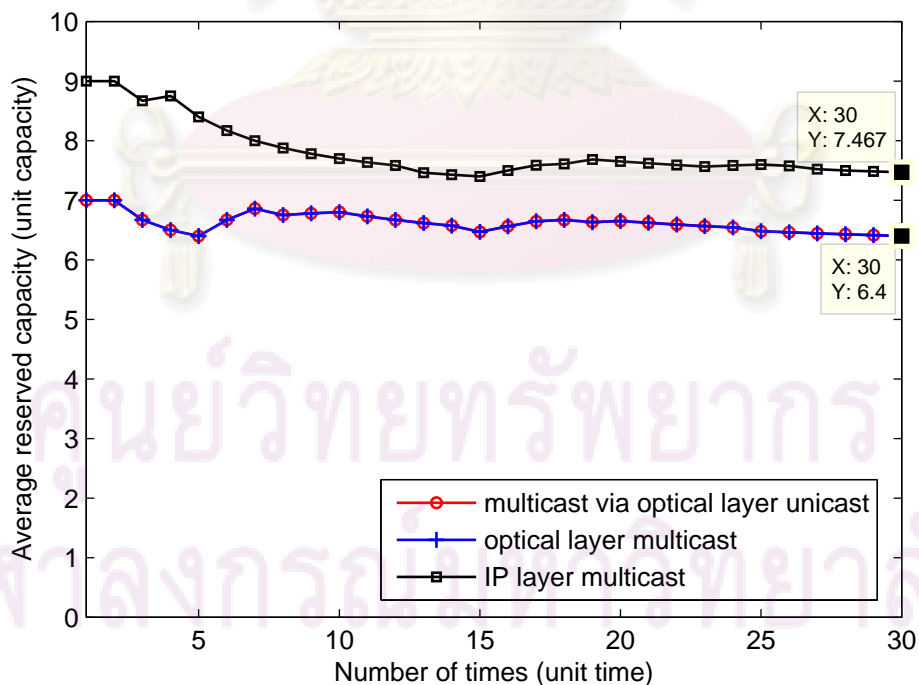
รูปที่ 4.55: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 7



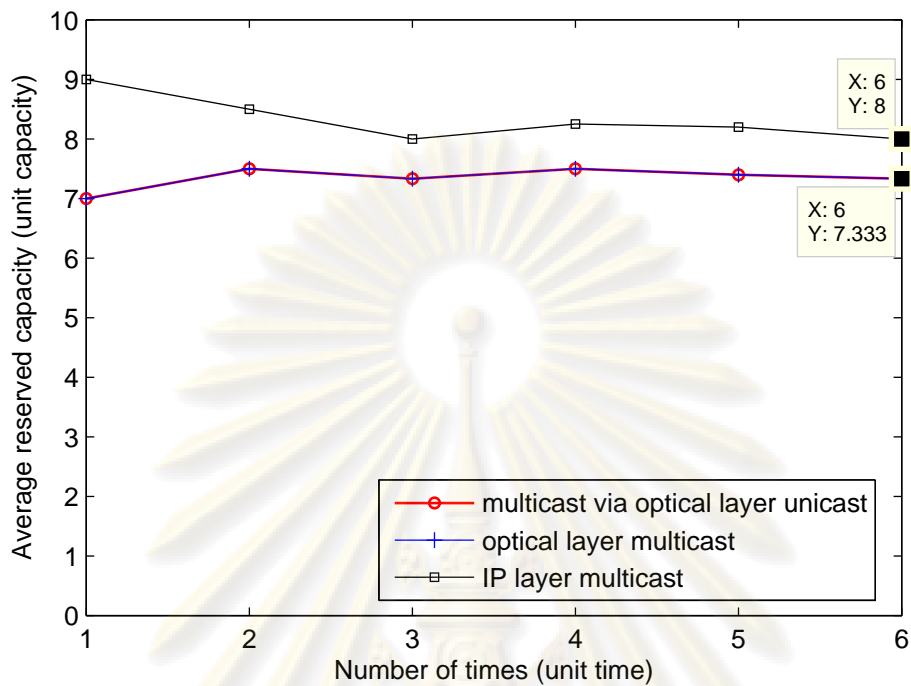
รูปที่ 4.56: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยของกราฟฟิก 3 ชนิดกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 7 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด



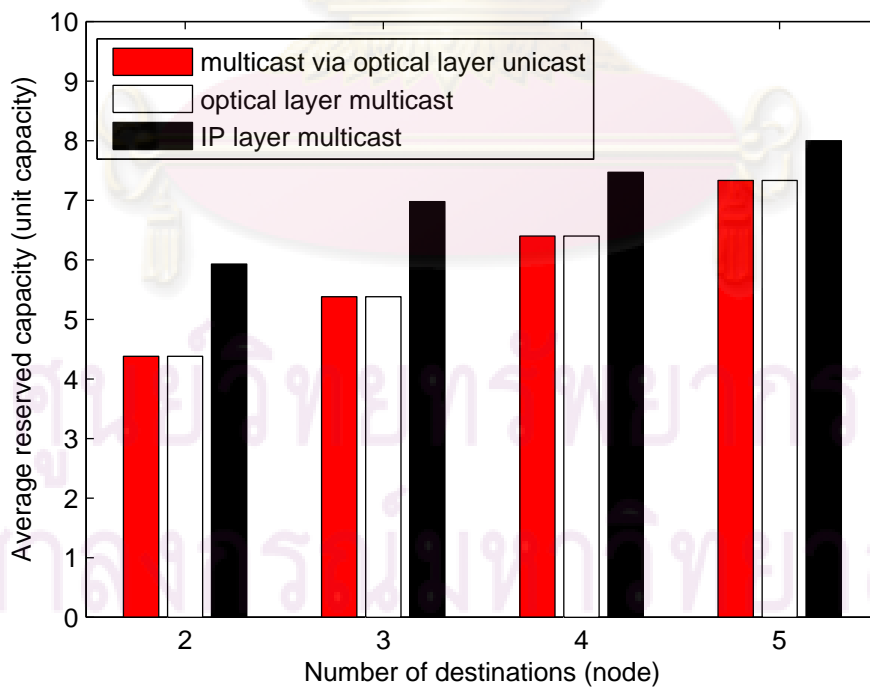
รูปที่ 4.57: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยของทราฟฟิก 3 ชนิดกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 7 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



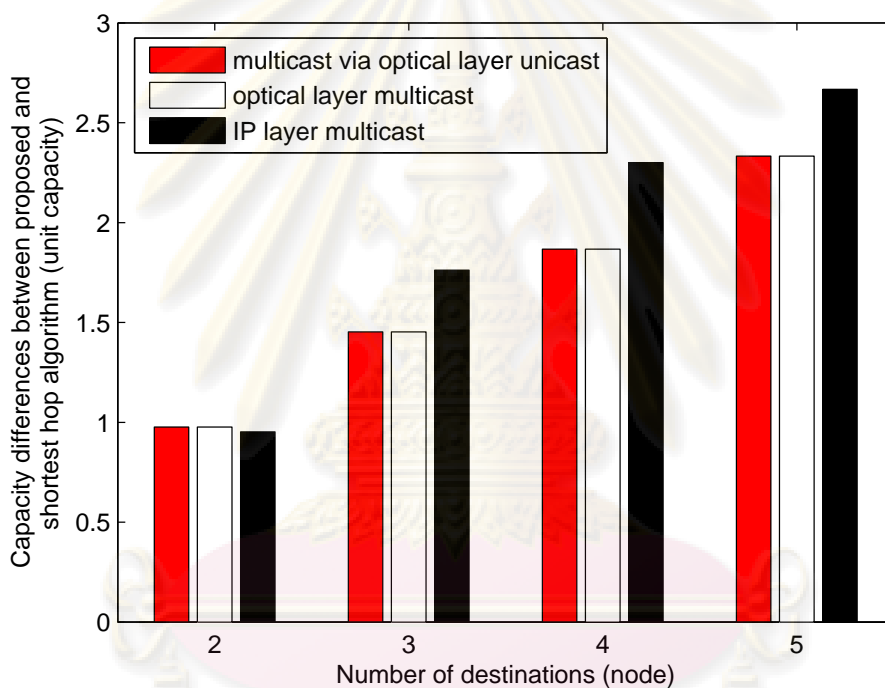
รูปที่ 4.58: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยของทราฟฟิก 3 ชนิดกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 7 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด



รูปที่ 4.59: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจองความจุสำรองเฉลี่ยของกราฟฟิก 3 ชนิดกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 7 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด



รูปที่ 4.60: ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความจุสำรองของมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิดกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอ



รูปที่ 4.61: ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของปริมาณความจุสำรองระหว่าง 2 วิธีสำหรับรองรับมัลติคาสต์ทรานฟิกร์ทั้ง 3 ชนิดกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการกู้ความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้น เพื่อป้องกันความขัดข้องที่อาจส่งผลกระทบต่อกราฟฟิคนิตมัลติคาสต์หนึ่งเซสชัน เช่น ความขัดข้องที่เกิดกับเส้นใยแก้วนำแสง อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง ทางเดินแสง หรือ อุปกรณ์จัดเส้นทาง โดยที่การออกแบบจะแบ่งเป็น 2 ส่วน นั่นคือ การออกแบบเพื่อรองรับความขัดข้อง และการออกแบบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับส่วนแรก การออกแบบจะใช้หลักการ *Failure Independent Path Protection (FIPP)* เพื่อสร้างเส้นทางป้องกันที่สามารถหลบหลีกผลกระทบจากความขัดข้องที่ได้กล่าวข้างต้นได้ นอกจากนี้การแบ่งหน้าที่ตามหลักการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นทำให้กระบวนการกู้ความขัดข้องมีแบบแผนที่แน่นอน ทำให้การกู้ความขัดข้องในแต่ละระดับชั้นนั้นไม่รบกวนซึ่งกันและกัน หรือขัดขวางการกู้ความขัดข้องต่อกัน

สำหรับการออกแบบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้น ผู้วิจัยจะออกแบบโดยใช้หลักการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นเพื่อพิจารณาการใช้ความจุสำรองร่วมกันทั้งระหว่างระดับชั้น และ ภายในระดับชั้นเดียวกัน ซึ่งสามารถทำให้ปริมาณความจุสำรองซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการให้บริการโครงข่ายมีการใช้งานที่คุ้มค่าขึ้น นอกจากนี้การคำนวณปริมาณความจุสำรองที่ใช้ใน การกระทำภายใต้ปริมาณความจุสำรองสูงสุดของการเชื่อมโยงในระดับชั้นออพติคอลที่สามารถใช้ได้ ในบทที่ 3 รูปแบบการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเสนอไว้ 2 รูปแบบ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแต่ละรูปแบบและสรุปว่ารูปแบบใดควรนำไปใช้มากกว่ากัน

จากผลการทดลองพบว่า ผลกระทบของการเปลี่ยนทอพอโลยีในระดับชั้นออพติคอลนั้น จะส่งผลกระทบต่อมากกว่าการเปลี่ยนทอพอโลยีในระดับชั้นไอพี นั่นคือ การลดดีกรีเฉลี่ยของโหนดในทอพอโลยีของระดับชั้น ออพติคอล จะทำให้ความแตกต่างของการจองความจุสำรองน้อยลง นั่นอาจสรุปได้ว่าวิธีการที่ได้แนะนำเสนอนั้นไม่เหมาะสมในการใช้กับทอพอโลยีที่มีดีกรีเฉลี่ยของโหนดในระดับชั้นออพติคอลต่ำ เนื่องจากความซับซ้อนของวิธีการที่นำเสนอมีมากกว่าวิธีการเลือกเส้นทางป้องกันที่ใช้จำนวนฮอปส์น้อยที่สุดในทางตรงกันข้าม ความแตกต่างของการจองความจุสำรองจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อทอพอโลยีในระดับชั้นออพติคอลมีดีกรีเฉลี่ยของโหนดมากขึ้น สำหรับทอพอโลยีในระดับชั้นไอพีนั้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงในระดับชั้นนี้จะส่งผลกระทบต่อน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงในระดับชั้นออพติคอล นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าวิธีที่นำเสนอจะคำนึงถึงการสร้างเส้นทางให้สามารถใช้งานความจุสำรองร่วมกันได้มากที่สุด การกระทำดังกล่าวจะส่งผลให้จำนวนฮอปของเส้นทางป้องกันนั้นมีปริมาณมากกว่าการวางแผนป้องกันแบบใช้ระยะฮอปส์น้อยที่สุด ซึ่งความแตกต่างนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอมีปริมาณเพิ่มขึ้น

สุดท้าย ประเภทของมัลติคาสต์กราฟฟิคนิตได้ถูกนำมาทดสอบเพื่อวัดปริมาณความจุสำรองเทียบกัน โดยจากผลการทดลองพบว่า กราฟฟิคนิตมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี จะใช้ปริมาณความจุสำรองเฉลี่ย

มากกว่ากราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออฟติคอล และ กราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออฟติคอล และเมื่อทำการเพิ่มจำนวนโหนดปลายทางขึ้น ปริมาณความจุสำรองจะถูกจองมากขึ้นตามไปด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบนั้นพิจารณาเพียงการจองความจุสำรองของคำร้องขอเดียว ซึ่งถ้าพิจารณาการมีคำร้องขอเข้ามาพร้อมกันมากกว่า 1 คำร้องขอนั้นการใช้ความจุสำรองอาจพิจารณาการจองความจุสำรองร่วมกันได้เพิ่มขึ้น
2. ในการออกแบบการป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นในงานวิจัยนี้ ยังขาดการพิจารณาในส่วนของสภาพพร้อมใช้งาน (Availability) ซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับส่วนหนึ่งของข้อตกลงการให้บริการ (Service Level Agreement: SLA)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] W. D. Grover. Mesh-Based Survivable Networks Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networking. *Prentice Hall*, (2004).
- [2] L. Liao, L. Li, and S. Wang. Multicast protection scheme in survivable WDM optical networks. *Journal of Network and Computer Applications* 31, 3 (2008): 303 - 316.
- [3] H. Luo, L. Li, H. Yu, and S. Wang. Achieving shared protection for dynamic multicast sessions in survivable mesh WDM networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 25, 9 (2007): 83 - 95.
- [4] H. Luo, H. Yu, L. Li, and S. Wang. On protecting dynamic multicast sessions in survivable mesh WDM networks. *Optical Fiber Communication Conference and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference*, (2006).
- [5] C. Wang, S. Wang, and C. Chen. Partial multicast protection in WDM networks. *The 9th International Conference on Advanced Communication Technology*, (2007): 1559 - 1563.
- [6] P. Pan, G. Swallow, and A. Atlas. Fast reroute extensions to RSVP-TE for LSP tunnels. tech. rep., IETF RFC 4090, (2005).
- [7] G. Li, D. Wang, and R. Doverspike. Efficient distributed MPLS P2MP fast reroute. *25th IEEE International Conference on Computer Communication, INFOCOM 2006*, (2006): 1 - 11.
- [8] K. Mochizuki, M. Shimizu, and S. Yasukawa. Multicast tree algorithm minimizing the number of fast reroute protection links for P2MP-TE networks. *IEEE Global Telecommunication Conference, GLOBECOM'06*, (2006): 1 - 5.
- [9] M. Pickavet, P. Demeeter, D. Colle, D. Staessens, B. Puype, L. Depre, and I. Lievens. Recovery in Multilayer Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology* 24, 1 (2006): 122 - 132.
- [10] P. Demeester et al. . Resilience in multi-layer networks. *IEEE Commun. Mag.* 37, 8 (1998): 70 - 76.
- [11] P. Pongpailool and H. Kim. Novel Algorithms for Dynamic Connection Provisioning with Guaranteed Service Level Agreements in IP over Optical Networks. *IEEE Globecom*, (2003).
- [12] A. Urria and E. Calle and J. Marzo. Multi-Layer Network Recovery: Avoiding Traffic Disruptions against Fiber Failures. *Workshop on Evolution toward Next Generation Internet, ICCS 2006*, (2006).

- [13] M. Jeong and C. Qiao and Y. Xiong and H. C. Cankaya and M. Vandenhoute. Tree-shared multicast in optical burst-switched WDM networks. *Journal of Lightwave Technology* 21, 1 (2003): 13 - 24.
- [14] B. Rajagopalan and D. Pendarakis and D. Saha and R. S. Ramamoorthy and K. Bala. IP over optical networks: Architectural aspects. *IEEE Commun. Mag.* 38, 9 (2000): 94 - 102.
- [15] H. Kim and Y. Kim and K. Kim and S. Ahn. A multi-layer recovery scheme in ASON/GMPLS networks. *5th International Conference Computational Science and its Applications*, (2007): 423 - 432.
- [16] Y. Liu, D. Tipper, and K. Vajanapoom. Spare Capacity Allocation in Multi-Layer Networks. *Proceedings 5th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks, DRCN 2005*, (2005): 261 - 268.
- [17] A. Capone, G. Carello, and R. Matera. Multi-layer Network Design with Multicast Traffic and Statistical Multiplexing. *Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM 2007*, (2007): 2565 - 2570.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูล SRLG ของโครงข่ายแต่ละรูปแบบ

ข้อมูล SRLG ของแต่ละโครงข่าย เป็นข้อมูลที่ใช้ประกอบเพื่อการออกแบบเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพี เพื่อให้เส้นทางเหล่านั้นไม่ถูกผลกระทบจากความขัดข้องที่พิจารณา โดยข้อมูลนี้จะแสดงในรูปแบบกลุ่มของการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคัล ที่ใช้เพื่อสร้างการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 1-7

ตารางที่ 1: ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1

IP link	1-2	1-5	1-8	2-4	2-10	4-5	4-10	4-13	5-6	6-8	6-13	8-10	8-13	10-13
1-2	X	X			X									
1-5	X	X		X		X								
1-8			X											
2-4		X		X										
2-10	X				X									
4-5		X				X								
4-10							X	X						X
4-13							X	X						X
5-6									X					
6-8										X				
6-13											X			
8-10												X	X	
8-13												X	X	
10-13							X	X						X

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2: ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2

IP link	1-2	1-5	1-8	2-4	2-10	4-5	4-10	4-13	5-6	6-8	6-13	8-10	8-13	10-13
1-2	X	X												
1-5	X	X		X	X	X		X						
1-8			X											
2-4		X		X	X									
2-10		X		X	X									
4-5		X				X		X						
4-10							X							
4-13		X				X		X	X		X			
5-6								X	X					
6-8										X				
6-13								X			X			
8-10												X	X	X
8-13												X	X	X
10-13												X	X	X

ตารางที่ 3: ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3

IP link	1-2	1-5	1-8	2-4	2-10	4-5	4-10	4-13	5-6	6-8	6-13	8-10	8-13	10-13
1-2	X													
1-5		X	X						X	X	X			
1-8		X	X											
2-4				X	X		X	X						
2-10				X	X									
4-5						X								
4-10				X			X	X						
4-13				X			X	X				X	X	X
5-6		X							X					
6-8		X								X	X			
6-13		X								X	X			
8-10								X				X	X	X
8-13								X				X	X	X
10-13								X				X	X	X

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

P. Chiewcharat and C. Saivichit. Minimizing Resource Reservation for Multicast Protection with Multi-layer Approach. *The Proceedings of the 2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology. (ECTI-CON 2009)*. May 2009, Pattaya, Thailand.

P. Chiewcharat and C. Saivichit. Multi-layer Protection Schemes for Multicast Traffic. *International Symposium on Multimedia and Communication Technology. (ISMAC'09)*. January 2009, Bangkok, Thailand



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Minimizing Resource Reservation for Multicast Protection with Multi-layer Approach

Pornpong Chiewcharat and Chaiyachet Saivichit
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand
p.chiewcharat@gmail.com and chaiyachet.s@chula.ac.th

Abstract—Resource utilization is an important issue that needs to be taken into account when providing recovery mechanism in networks. In this paper, we investigate the recovery scheme for multi-layer network which cannot only manage the operation confusion among each layer, but also reserve network resources effectively. Then, we proposed an algorithm that adapts the concept of multi-layer approach to multicast protection in order to recover the failures and reduce network reserved resources at the same time. In our design, four types of failure, i.e. optical link failure, optical node failure, IP link failure and IP node failure are considered. The simulation results show that our algorithm can provide multicast protection which uses less reserved resources compared to the traditional shortest hop algorithm. The difference will be more significant if our algorithm is implemented in the network topology with high average node degree.

I. INTRODUCTION

Due to the recent development of technology, multicasting has become a major technique used for transmitting the data in today applications such as IPTV and video conferencing. With this technique adapted, the communication with selective number of destinations can be possible. Many providers nowadays aim at increasing their network capability in order to support these newly launched applications with their limited network resources.

Not only the ability to support multicast applications with efficient resource usage is needed, network reliability is also the main topic that must be taken into account. In the core network, multicast traffic with high reliability requirement is being transmitted at a very high speed while only one failure that occurs in the network can cause a severe effect to both customers and providers. Therefore, one way to avoid this effect is to obtain the recovery mechanism during the communications.

Most researches focused on providing the recovery mechanism for multicast traffic in specific layer, i.e. optical layer or IP layer. In optical layer, Wavelength Division Multiplexing (WDM), has been introduced to increase the network performance in various approaches, e.g. minimum cost backup tree approach in [1] and [2], and multicast segment approach in [3]. However, those approaches do not guarantee that they will lead to minimum resource usage.

In IP layer, Multi Protocol Label Switching (MPLS) has become a major technology that is used in NGN (Next Generation Network). The technique called Fast-Reroute

(FRR) [4] is introduced to recover the failure in IP/MPLS network. Reference [5] designed an algorithm by expecting that if multicast request uses the minimum number of links, resource allocated for traditional fast-reroute protection links will consequently decrease. This algorithm will depend on network topology and may not guarantee that number of protection links will be minimized.

Another challenge of providing recovery mechanism in the network is the inter-working between layers. When the failure occurs during the process of transmission, each layer will activate the recovery mechanism independently. If both layers detect the failure nearly at the same time, the interference among these processes might occur. Reference [6] introduced the recovery scheme for multi-layer network which considers the inter-working between layers. The study shows that adapting the multi-layer concept can also decrease network reserved resources. As far as [6] have presented, they focused on providing multi-layer recovery mechanism only in unicast traffic.

The goal of this paper is to provide the recovery mechanism in order to minimize reserved resources for multicast traffic by considering the concept of multi-layer network. We also integrated the concept of "Failure Independent Path Protection" (FIPP) into the design which can recover the system from four types of failures, i.e. optical link failures, optical node failures, IP link failures, or IP node failures. Moreover, cross-layer information, i.e. Shared-Risk-Link Group (SRLG) [7] will be included into the consideration in order to avoid using failure-dependent links.

The rest of this paper is organized as follows. Section II presents the concept of multi-layer recovery and the classifications of multicast traffic. The multicast protection algorithm is then proposed in Section III, followed by simulation results shown in Section IV. In Section V, we conclude our paper

II. BACKGROUND

A. Multi-layer Recovery

Two generic approaches [6] based on multi-layer recovery are as follows.

1) *Inter-working between layers*: This approach allows each layer to activate its recovery mechanism sequentially. For bottom-up escalation, the recovery of bottom layer will be activated first. If the recovery at bottom layer cannot

recover the failure or spends too much time in recovering, then the upper layer will activate its protection. On the contrary, top-down escalation is a scheme that allows top layer to perform recovering first. In this way, the recovery mechanism from each layer will not interfere among one another.

2) *Spare capacity sharing*: By assigning the order of recovery, capacity that reserved for recovery mechanism in one layer is allowed to be shared with another layer mechanism. This is called *common-pool strategy*. By doing this, total reserved capacity of the network will be smaller.

B. Classifications of multicast traffic

Three classifications of multicast traffic requests, namely IP-layer multicast, multicast via optical-layer unicast and optical-layer multicast [8], are considered in this paper. In Fig. 1 (a), the multicast routing has been formed in IP-layer by the intermediate IP nodes. For optical layer, each node will connect to its neighbors with lightpaths. On the other hand, the source node will connect directly to its destinations in IP layer for multicast via optical-layer unicast shown in Fig. 1 (b). By using unicasting technique, multiple unicasts are created in optical layer. In Fig. 1 (c) which is optical-layer multicast, the source node will connect directly to its destinations in IP layer like in multicast via optical-layer unicast. For optical layer, the multicasting technique is used.

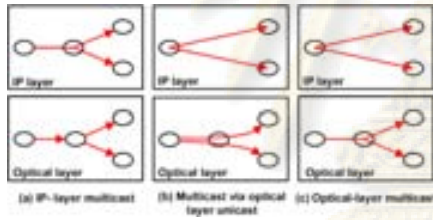


Fig. 1. Classifications of multicast traffic

III. PROPOSED ALGORITHM

A. Assumptions and notations

In this paper, we consider four types of failure, namely optical node failure, optical link failure, IP node failure, and IP link failure. When a source is making a request with the route in IP layer \mathcal{R} and in optical layer \mathcal{L} , our algorithm will begin the process of finding the protection with respect to network topologies in optical layer G_O and IP layer G_I and information, i.e. SRLG and optical link capacity. Then, the protection will be reserved on the optical links of the network. The rest of the notations are defined in Table I.

B. Multicast Protection Algorithm

We design the multicast protection algorithm based on point-to-point element in order to support both unicast and multicast consisted in the traffic as described in the previous section. For example, if Fig. 1 (a) is the request, five elements, i.e. three lightpaths in optical layer and two

TABLE I
NOTATION

V, E	Number of optical layer nodes and links in the network
G_O, G_I	Network topology in optical layer, and IP layer
\mathcal{L}	The set of lightpaths used in multicast request
L_i	Optical-node sequence of i^{th} requested lightpath, $L_i \in \mathcal{L}$
\mathcal{R}	The set of IP connections used in multicast request
R_i	IP-node sequence of i^{th} IP-connection request, $R_i \in \mathcal{R}$
\mathcal{W}_i	The set of lightpath protections for L_i , e.g. $\mathcal{W}_i = \{W_i^1, W_i^2, \dots, W_i^n\}$
W_i^n	n^{th} optical-node sequence used to protect L_i , $W_i^n \in \mathcal{W}_i$
B_i	The set of protections for R_i , e.g. $B_i = \{B_i^1, B_i^2, \dots, B_i^n\}$
B_i^n	n^{th} IP-node sequence used to protect R_i , $B_i^n \in B_i$
η	Total number of multi-layer protection formations
\mathcal{P}_i	i^{th} formation set of multi-layer protection, $i \in \{1, 2, \dots, \eta\}$ e.g. $\mathcal{P}_1 = \{W_1^1, \dots, W_1^n, B_1^1, \dots, B_1^n\}$
C_i	Number of capacity unit reserved for \mathcal{P}_i
$SRLG_i$	Group of IP links that use optical link i , $i \in \{1, 2, \dots, E\}$

connections between one source to one destination in IP layer are counted as an input. In case of Fig. 1 (b) and Fig. 1 (c), there are four elements to be the input which are two elements from optical layer and the rest from IP layer. The following paragraph will describe each step of our proposed algorithm.

• Step 1: Protection in optical layer

The objective for this step is to find all possible lightpath protections W_i^n for each R_i in G_O by using FIPP concept. To consider FIPP, the method of finding the paths will depend on the type of the failure we considered. By using node-disjoint constraint, the lightpath protections will be able to recover the failure from optical link, optical node and IP link. Note that, in IP-layer multicast, this layer protection will fail only when the failure occurs at the optical node which has to pass the traffic to IP-layer, e.g. node in the middle of the optical layer in Fig. 1 (a).

• Step 2: Protection in IP layer

Same as step one, we find a set of all possible alternative connections B_i^n for each R_i in G_I based on node-disjoint constraint. Moreover, SRLG information needs to be considered in this layer. A candidate IP link which can be used in the protection must not be in the same SRLG of other IP links. For example, if one IP link in the protection is in $SRLG_1$ and $SRLG_2$, other candidate IP links that can be used must not be in either $SRLG_1$ or $SRLG_2$. This is called SRLG-disjoint constraint. Next, we map all of the protections returned in this step into optical domain in order to cope with the calculation of resource reservation. Note that, in this layer, optical node failure and IP node failure can be recovered.

• Step 3: Protection in Multi-layer

This step constructs all possible formations of multi-layer protection. Each formation \mathcal{P}_i must consist of one member from every lightpath protections and one from every IP protections. Therefore, total number of multi-layer protection formations will be equal to the

multiplication of number of members in each set of protections. We define η as a total number of formations in multi-layer protection which can be calculated by

$$\eta = \left(\prod_{\forall i} |\mathcal{W}_i| \right) \times \left(\prod_{\forall j} |\mathcal{B}_j| \right), \quad (1)$$

where $|\mathcal{W}_i|$ and $|\mathcal{B}_j|$ refers to the size of \mathcal{W}_i and \mathcal{B}_j . For example, if the request has three sets of lightpath protections which are $\mathcal{W}_1 = \{W_1^1, W_1^2\}$, $\mathcal{W}_2 = \{W_2^1\}$ and $\mathcal{W}_3 = \{W_3^1, W_3^2, W_3^3\}$ and two sets of IP protections which are $\mathcal{B}_1 = \{B_1^1\}$ and $\mathcal{B}_2 = \{B_2^1, B_2^2\}$. The number of multi-layer protection formations will be 12.

• *Step 4: Resource optimization*

The objective of this step is to find the multi-layer protection formation that reserves minimum resources. First of all, we map W_i^n into matrix form which is

$$W_i^n = \begin{bmatrix} W_i^n(1,1) & \cdots & W_i^n(1,V) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_i^n(V,1) & \cdots & W_i^n(V,V) \end{bmatrix}_{V \times V}$$

where

$$W_i^n(p,q) = \begin{cases} 1, & \text{if } W_i^n \text{ uses link } (p,q); \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$p, q \in \{1,2,\dots,V\}$. In the same way, we also define B_i^n in a form of $V \times V$ matrix which is

$$B_i^n = \begin{bmatrix} B_i^n(1,1) & \cdots & B_i^n(1,V) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_i^n(V,1) & \cdots & B_i^n(V,V) \end{bmatrix}_{V \times V}$$

where $B_i^n(p,q) =$ number of times that B_i^n uses link (p,q) .

With the concept of capacity sharing, we consider both *common pool strategy* and *intra-layer sharing* in this algorithm. Apart from *common-pool strategy* which we have already described in section II, *intra-layer sharing* allows the capacity to be shared within the same layer. Fig. 2 shows the intra-sharing between 2 lightpath protections which can reduce total reserved capacity from 4 to 3 units. With these conditions, we can construct the multicast protection by sharing each point-to-point protection together.

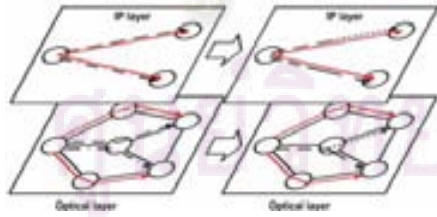


Fig. 2. Intra-sharing within optical layer

In order to calculate the reserved capacity used in one formation of multi-layer protection based on

common-pool strategy and *intra-layer sharing*, a mathematical model is proposed in (1) by assuming that $P_i = \{W_1^a, \dots, W_n^b, B_1^c, \dots, B_m^d\}$ where a, b, c and d depend on combinatoric approach, and we define $P_i\{k\}$ as element k in P_i where $k \in \{1, 2, \dots, m+n\}$. Number of capacity units reserved for P_i can be computed by

$$C_i = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^V \sum_{q=1}^V \max_{\forall k} (P_i\{k\}(p,q), P_i\{k\}(q,p)) \quad (2)$$

Next, the algorithm will find which formation gives the minimum number of reserved capacity units. In this case, η is considered to have an impact on complexity. The objective function is then formulated in (3). By doing this, the unit of capacity returned from our algorithm (C_{\min}) will be guaranteed to be minimized.

$$C_{\min} = \min_{\forall i \in \{1,2,\dots,\eta\}} (C_i) \quad (3)$$

IV. SIMULATION RESULT

In this section, we evaluate our proposed algorithm by comparing the efficiency in terms of resource usage for the protection. Two network topologies are used in this experiment, i.e. the network with 10 nodes and 22 links (average node degree = 4.4) representing the dense topology called SMALLNET shown in Fig. 3 and grid network with 9 nodes and 10 links (average node degree = 2.22) representing the light topology shown in Fig. 4.

We compare shortest hop algorithm with our proposed algorithm. With shortest hop from source to destination, it refers that the reserved resources will be less. The more hops the protection uses, the more units of capacity it has to reserve. Therefore, the comparison with this algorithm is very challenging for the protection resource preparation by hop condition versus sharing condition.

In the experiments, we evaluate our algorithm through MATLAB. Sources and destinations are generated randomly with the uniform distribution. The shortest hop protections in each layer are constructed without knowledge of any information about the other layer. Moreover, we compare the results of these two algorithms by increasing the number of multicast destinations starting from 2 nodes to 7 nodes in the first topology and 2 nodes to 8 nodes in the second topology based on IP layer. The experiments are tested in the case that there was only one multicast source at a time.

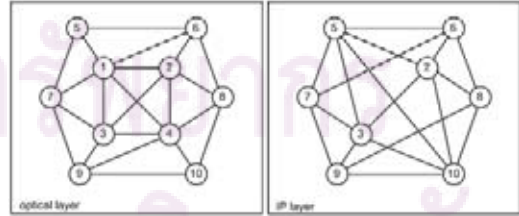


Fig. 3. SMALLNET network topology

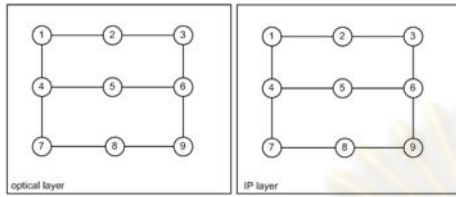


Fig. 4. Grid network topology with 9 nodes and 10 links

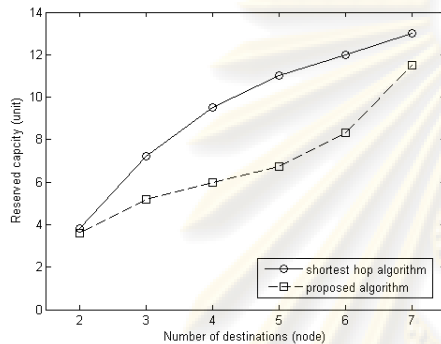


Fig. 5. Simulation result on SMALLNET network

Fig. 5 illustrated the comparison between our algorithm and the traditional shortest hop algorithm in SMALLNET network. We classify our discussion into three categories. The first category is when multicast request has 2 and 3 destinations. The results from two algorithms are comparable. This is because when there is a few destinations, our algorithm will choose little sharing which can reserve less resources than more sharing. Therefore, the result of ours will be close to shortest hop algorithm. For the second category which covers from 3 to 6 destinations, our algorithm has reflected the efficiency in sharing which can dramatically decrease the reserved resources for about 40 percents compared to the shortest hop algorithm. With many link candidates to be used, sharing among the group of destinations can be done in an effective way. The last category is when multicast request has 7 destinations. The result does not have much difference between these two algorithms compared to the second category. Because of the distribution of seven-destination multicast, the candidate links used for protection sharing will not be diverse.

In the same way, we then test our algorithm in grid network which has 9 nodes and 10 links. The result illustrated in Fig. 6 shows that our algorithm can reserve less resources than shortest hop algorithm similarly to the previous result. However, the difference between two algorithms is not much compared to the previous network which has 4.4 average node degree. Notice in both results that our algorithm tend to outperform the traditional shortest hop algorithm in dense network.

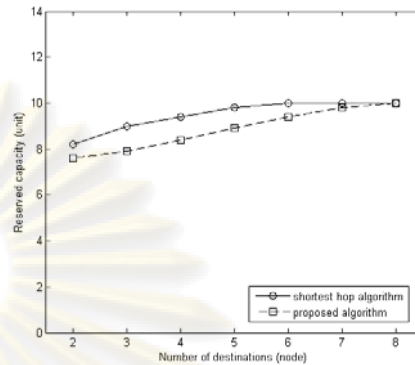


Fig. 6. Simulation result on grid network

V. CONCLUSIONS

In this paper, the concept of multi-layer recovery has been investigated to manage the operation confusion among each layer. With this concept adopted, the network resources used for the recovery mechanism will be decreased. Next, we proposed a protection algorithm for multicast traffic, i.e. IP-layer multicast, multicast via optical layer unicast and optical layer multicast based on multi-layer approach. In the experiment, the result of our algorithm shows that it can not only reserve less resources compared to the traditional shortest hop algorithm, but also guarantees that the reserved resources are minimum. Moreover, two network topologies with different values of average node degree are then tested to compare the efficiency of our algorithm. The result shows that our algorithm will perform better if it is implemented in the network with high average node degree.

REFERENCES

- [1] H. Luo, H. Yu, L. Li and S. Wang, "On protecting dynamic multicast sessions in survivable mesh WDM networks," in Proc. ICC '06, *IEEE International Conference on Communications*, 2006, pp. 835-840.
- [2] H. Luo, L. Li, H. Yu and S. Wang, "Achieving Shared Protection for Dynamic Multicast Sessions in Survivable Mesh WDM Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, pp.83-95.
- [3] L. Liao, L. Li and S. Wang, "Multicast protection scheme in survivable WDM optical networks," *Journal of Network and Computer Applications*, 2008, pp. 303-316
- [4] P. Pan, G. Swallow and A. Atlas, "Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP Tunnels," *IETF RFC 4090*, 2005.
- [5] K. Mochizuki, M. Shimizu and S. Yasukawa, "Multicast Tree Algorithm Minimizing the Number of Fast Reroute Protection Links for P2MP-TE Networks," in Proc. *IEEE Global Telecommunication Conference, GLOBECOM '06*, 2006, pp.1-5.
- [6] M. Pickavet, P. Demeeter, D. Colle, D. Staessens, B. Puype, L. Depra and I. Lievens, "Recovery in Multilayer Optical Networks," *Journal of Lightwave Technology*, 2006, pp.122- 134.
- [7] B. Rajagopalan, D. Pendarakis, D. Saha, R. S. Ramamoorthy and K. Bala, "IP over optical networks: Architectural aspects," *IEEE Commun. Mag.*, 2000, vol.38, pp.94-102.
- [8] M. Jeong, C. Qiao, Y. Xiong, H. C. Cankaya and M. Vandenhoute, "Tree-shared multicast in optical burst-switched WDM networks," *Journal of Lightwave Technology*, 2003, pp. 13-24.

Multi-layer Protection Schemes for Multicast Traffic

Pornpong Chiewcharat and Chaiyachet Saivichit
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand
E-mail: p.chiewcharat@gmail.com and chaiyachet.s@chula.ac.th

Abstract—In this paper, we investigate the protection scheme for multi-layer network which can decrease the operation confusion caused by each layer protection, and then we propose an algorithm that adapts the concept of cooperation in multi-layer network to multicast protection. With the design of our proposed algorithm, failure from optical link, optical node, IP link or IP node can be protected. We also generalize our algorithm in order to support 3 classifications of multicast traffic, i.e. IP-layer multicast, multicast via optical layer unicast, and optical layer multicast. Moreover, the objective of our proposed algorithm is not only aiming at protecting multicast traffic, but also minimizing the reserved capacity used for those protections. The simulation result shows that our algorithm can provide less reserved capacity than traditional schemes.

I. INTRODUCTION

Due to the recent development of technology, multicasting has become a major technique used for transmitting the data in today applications such as IPTV and video conference. With this technique adapted, the communication with selective number of destination can be possible. Many providers nowadays aim at increasing their network capability in order to support these newly launched applications with their limited network resources.

Not only the ability to support multicast applications with efficient resource usage is needed, network reliability is also the main topic that must be taken into account. In core network, multicast traffic with high-reliability requirement is being transmitted at a very high speed. Only one failure that occurs in the network can cause a severe effect to both customers and providers [1]. Therefore, one way to avoid this effect is to obtain the recovery mechanism when operating the network.

Most researches focused on providing the recovery mechanism for multicast traffic in specific layer, i.e. optical transport network layer or IP layer. In optical transport layer, Wavelength Division Multiplexing (WDM) has been introduced to increase network performance in various ways. [2] and [3] proposed an algorithm which can reserve the backup tree with respect to cost constraint. With cost assigned to the network topology, the minimum cost backup tree is calculated. In term of resource reservation, there is no guarantee that minimum cost can lead to minimum resource usage. Based on segment protection, [4] designed their algorithm in order to recover the failure that affects each multicast segment. By doing this, the process of activating the recovery mechanism will be easy, but the resource usage will be high.

In IP layer, Multi Protocol Label Switching (MPLS) has become the major technology that is used in NGN (Next Generation Network). The technique called Fast-Reroute (FRR) [5] is introduced to recover the failure in IP/MPLS network. [6] designed an algorithm by expecting that if multicast request uses the minimum number of links, resource that allocated for traditional fast-reroute protection links will be consequently decrease. In this way, this algorithm will depend on network topology and may not guarantee that number of protection links will be minimum.

Another challenge of providing recovery mechanism in the network is the inter-working between layers. When the failure occurs during the process of transmission, each layer will activate the recovery mechanism independently. If both layers detect the failure nearly at the same time, the interference among these processes might occur. [7] introduced the recovery scheme for multi-layer network which consider the inter-working between layers. The study shows that adapting the multi-layer concept can also decrease network reserved resources. As far as [7] have presented, they focused on providing multi-layer recovery mechanism only in unicast traffic.

Thus, the goal of this paper is to provide the recovery mechanism for multicast traffic by considering the concept of multi-layer network. We construct the recovery algorithm by aiming at decreasing the reserved resources, so network optimization is formulated here to solve this problem. We also integrated the concept of Failure Independent Path Protection (FIPP) into the design which can recover the failure from optical link, optical node, IP link, or IP node. Moreover, cross-layer information, i.e. Shared-Risk-Link Group (SRLG) [8] will be included into the consideration.

The rest of this paper is organized as follow. Section II presents the background of what we need to rely on. The algorithm is then proposed in Section III, followed by a simulation result shown in Section IV. In Section V, we conclude our paper.

II. BACKGROUND

A. Multi-layer Recovery

Multi-layer concept has become necessary in providing network nowadays. Two generic approaches were presented in [7], i.e. the inter-working between layers and spare capacity sharing in multi-layer network.

1) *Inter-working between layers*: This approach allows each layer to activate its recovery mechanism sequentially. For bottom-up escalation, the recovery of bottom layer will be activated first. If the recovery at bottom layer cannot recover the failure or spends too much time in recovering, then upper layer will activate its protection. On the contrary, top-down escalation is a scheme that allows top layer to perform recovering first. In this way, the recovery mechanism from each layer will not interfere each other's.

2) *Spare capacity sharing*: By assigning the order of recovery, capacity that reserved for recovery mechanism in one layer is allowed to be shared with another layer's. This is called common-pool strategy. By doing this, total reserved capacity of the network will decrease.

B. Layer Multicast

[9] presented that there are 3 types of multicast routing which are IP-layer multicast, multicast via optical-layer unicast and optical-layer multicast. Fig. 1(a) shows the characteristic of IP-layer multicast which is the multicast that is routed by the intermediate routers. In optical layer, each node will connect to its neighbors with lightpaths (LP). Fig. 1(b) illustrates multicast via optical-layer unicast. This technique uses a group of unicast to create multicast in IP-layer. Source node will connect directly to the destination nodes. In optical layer, lightpath is constructed to connect source node to destination node. In fig. 1(c), the concept of light tree is introduced. Optical nodes must have the ability of light splitting in order to create multicast routing. The same as multicast via optical-layer unicast, source node in IP-layer will connect directly to the destination nodes.

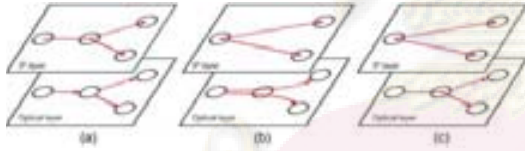


Fig. 1. Layer multicast

III. PROPOSED ALGORITHM

A. Assumptions and notations

In this paper, we consider only 4 kinds of failure which are optical node failure, optical link failure, IP node failure, and IP link failure. However, only one failure type is allowed to occur at a time. We assume that our algorithm must be done before providing services and one multicast request needs one unit of resource in any links that it passes. Same requirement is needed in every destination nodes. Moreover, the information that must be known in advance is multicast request routing (R^{LP_i} , R^{SD_j}), network topology in both layers (N_o , N_l), SRLG, and optical link capacity. The notations are then defined in table I.

TABLE I
NOTATION

N, L	Number of optical layer nodes and links in the network
N_o, N_l	Network topology in optical layer, and IP layer
R^{LP_i}	i^{th} lightpath used in multicast request
R^{SD_j}	j^{th} IP connection from source (S) to j^{th} destination (D_j) in multicast request
$P_m^{LP_i}$	m^{th} lightpath protection for i^{th} working lightpath
P^{LP_i}	Set of lightpath protections for i^{th} working lightpath, e.g. $P^{LP_i} = \{P_1^{LP_i}, P_2^{LP_i}, \dots, P_f^{LP_i}\}$
$P_n^{SD_j}$	n^{th} protection for working IP connection S and D_j
P^{SD_j}	Set of protections for working IP connection S and D_j , e.g. $P^{SD_j} = \{P_1^{SD_j}, P_2^{SD_j}, \dots, P_t^{SD_j}\}$
η	Total number of multi-layer protection formation
P_k	k^{th} formation of multi-layer protection, $k \in \eta$ e.g. $P_k = \{P_a^{LP_1}, \dots, P_b^{LP_x}, P_c^{SD_1}, \dots, P_d^{SD_y}\}$
C_t	Number of unit capacity reserved for P_t
$SRLG_s$	Group of IP links that use s^{th} optical link, $s \in L$

B. Algorithm design

In order to support 3 types of multicast mentioned in the previous section, we have to design the algorithm based on point-to-point element. For example, if fig. 1(a) is the request, 3 elements of lightpaths in optical layer and 2 elements of connections between one source to one destination in IP layer are counted as an input. In case of fig. 1(b) and fig. 1(c), there are 4 elements to be the input, i.e. 2 elements from optical layer and the rest from IP layer. The following paragraph will describe each step of our proposed algorithm.

- *Step 1: Protection in optical layer*

In each R^{LP_i} , find all possible protection lightpaths (P^{LP_i}) in optical layer (N_o) that connect the origin and the destination of R^{LP_i} by using FIPP concept. To consider FIPP, the way of finding the paths will depend on the type of the failure we considered. By using node-disjoint constraint, the lightpath protection will be able to recover the failure from optical link, optical node and IP link. In IP-layer multicast, this layer protection will fail only when the failure occurs at the optical node which has to pass the traffic to IP-layer, e.g. node in the middle of the optical layer in fig. 1(a).

- *Step 2: Protection in IP layer*

For each R^{SD_j} , find all possible alternative connection P^{SD_j} that connect source node (S) to destination node (D_j) in N_l with respect to node-disjoint constraint. Moreover, SRLG information needs to be considered in this layer. A candidate IP link which can be used in the protection must not be in the same SRLG of other IP links, e.g. if one IP link in the protection is in $SRLG_1$ and $SRLG_4$, the candidate IP links that can be used must not be in either $SRLG_1$ or $SRLG_4$. This is called SRLG-disjoint constraint. Next, we change all of the protections returned in this step into optical domain in order to cope with the calculation of resource reservation. In this layer, optical node failure and IP node failure can be recovered.

- *Step 3: Protection in Multi-layer*

One formation of multi-layer protection P_k must consist of one member from every lightpath protections and one from every IP protections. Therefore, total number of multi-layer protection formations will equal to the multiplication of number of members in each set of protections. For example, if the request has 3 lightpath protection sets which are $P^{LP_1} = \{P_1^{LP_1}, P_2^{LP_1}\}$, $P^{LP_2} = \{P_1^{LP_2}\}$ and $P^{LP_3} = \{P_1^{LP_3}, P_2^{LP_3}, P_3^{LP_3}\}$ and 2 IP protection sets which are $P^{SD_1} = \{P_1^{SD_1}\}$ and $P^{SD_2} = \{P_1^{SD_2}, P_2^{SD_2}\}$. The number of multi-layer protection formation will be 12, i.e.

$$\begin{aligned} P_1 &= \{P_1^{LP_1}, P_1^{LP_2}, P_1^{LP_3}, P_1^{SD_1}, P_1^{SD_2}\} \\ P_2 &= \{P_1^{LP_1}, P_1^{LP_2}, P_1^{LP_3}, P_1^{SD_1}, P_2^{SD_2}\} \\ P_3 &= \{P_1^{LP_1}, P_1^{LP_2}, P_2^{LP_3}, P_1^{SD_1}, P_1^{SD_2}\} \\ P_4 &= \{P_1^{LP_1}, P_1^{LP_2}, P_2^{LP_3}, P_1^{SD_1}, P_2^{SD_2}\} \\ &\vdots \\ P_{11} &= \{P_2^{LP_1}, P_1^{LP_2}, P_3^{LP_3}, P_1^{SD_1}, P_1^{SD_2}\} \\ P_{12} &= \{P_2^{LP_1}, P_1^{LP_2}, P_3^{LP_3}, P_1^{SD_1}, P_2^{SD_2}\}, \end{aligned}$$

based on combinatoric approach.

- *Step 4: Resource optimization*

The objective of this step is to find the multi-layer protection formation that reserves minimum capacity. First of all, we define

$$P_m^{LP_i} = \begin{bmatrix} P_m^{LP_i}(1, N) & \cdots & P_m^{LP_i}(1, N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_m^{LP_i}(N, 1) & \cdots & P_m^{LP_i}(N, N) \end{bmatrix}_{N \times N},$$

where

$$P_m^{LP_i}(p, q) = \begin{cases} 1, & \text{if } m^{\text{th}} \text{ protection LP of } i^{\text{th}} \text{ LP} \\ & \text{uses link}(p, q); \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$p, q \in N$. In the same way, we also define $P_n^{SD_j}$ in a form of $N \times N$ matrix which is

$$P_n^{SD_j} = \begin{bmatrix} P_n^{SD_j}(1, N) & \cdots & P_n^{SD_j}(N, 1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_n^{SD_j}(N, 1) & \cdots & P_n^{SD_j}(N, N) \end{bmatrix}_{N \times N},$$

where $P_n^{SD_j}(r, s) =$ number of times that n^{th} protection of working path connecting S to D_j uses link (r, s) , $r, s \in N$.

With the concept of capacity sharing, we consider both inter-layer sharing (common pool strategy) and intra-layer sharing in this paper. Apart from common-pool strategy which we have already described in section 2, intra-layer sharing allows the capacity to be shared within the layer. Fig. 2 shows the intra-sharing between

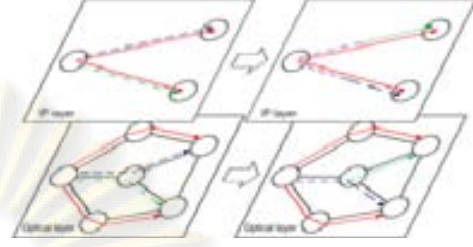


Fig. 2. Intra-sharing within optical layer

2 lightpath protections which can reduce total reserved capacity from 4 to 3 units.

In order to calculate the reserved capacity used in one formation of multi-layer protection, a mathematical model is shown in (1). Assume that

$$P_t = \{P_a^{LP_1}, \dots, P_b^{LP_N}, P_c^{SD_1}, \dots, P_d^{SD_M}\}$$

and $P_t\{k\}$ is k^{th} element in array P_t where $k \in \{1, 2, \dots, M + N\}$,

$$C_t = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \max_{\forall k} (P_t\{k\}(i, j), P_t\{k\}(j, i)). \quad (1)$$

Next, we have to find what formation gives minimum number of unit capacity reserved; hence, every formation must be known in advance. By doing this, the unit of capacity returned from our algorithm (C_{min}) can be guaranteed to be global minimum.

We define η to be a total number of formation in multi-layer protection which can be calculated by

$$\eta = \left(\prod_{\forall i} |P^{LP_i}| \right) \times \left(\prod_{\forall j} |P^{SD_j}| \right), \quad (2)$$

where $|P^{LP_i}|$ and $|P^{SD_j}|$ refers to the size of array P^{LP_i} and P^{SD_j} .

Then, the objective function of our algorithm is formulated in (3).

$$C_{min} = \min_{\forall t \in \eta} (C_t) \quad (3)$$

IV. SIMULATION RESULT

We found that network topology used in paper [10] really inspired us. With the topology of 7 nodes and 12 links in optical layer shown in fig. 3 and 6 nodes with fully connected topology in IP layer shown in fig. 4, the implementation of IP layer multicast, multicast via optical layer unicast and optical layer multicast could be possible.

In this paper, we chose shortest hop algorithm to compare with our proposed algorithm. With shortest hop from source to destination, it refers that the reserved capacity will be less. The more hops we use, the more capacity we have to reserve. Therefore, the comparison with this algorithm is very

challenging in term of preparation the protections by hop condition vs. sharing condition.

In the experiment, source and destinations were generated randomly with uniform distribution. We setup the shortest hop protections in each layer without knowing any information about the other layer. Moreover, we compared the result of these 2 algorithms by increasing the number of multicast destination which started from 2 nodes to 5 nodes based on IP layer. This experiment was tested in the case that there is only one multicast source.

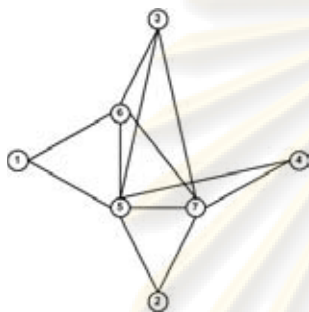


Fig. 3. Test network: optical layer topology

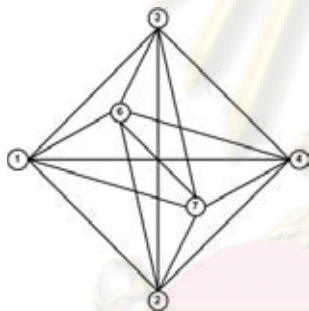


Fig. 4. Test network: IP layer topology

Fig. 5 illustrates the comparison between our proposed algorithm and traditional shortest hop algorithm. We found that the result will not have much significant at the beginning, but the difference will be dramatically increased when the number of destinations increases and then it will increase with lower rate. If we compare the percentage of the increment, it will be 17, 34, 37 and 39. This reflects that during the small number of destinations, network has more candidate links which can be shared by the protections than during the large number of destinations which links can hardly be shared with the others. Although, the difference between our algorithm and traditional shortest hop algorithm decreases when the number of destinations is higher, our algorithm will still be more efficient in term of resource reservation.

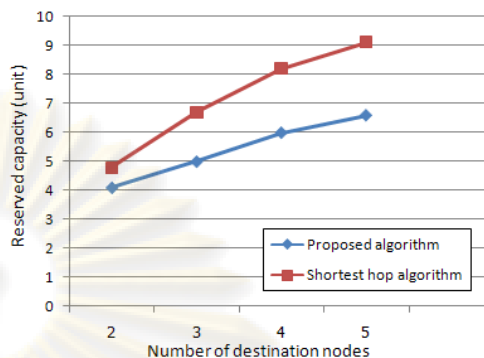


Fig. 5. Simulation result on test network

V. CONCLUSIONS

In this paper, we proposed a protection algorithm for multicast traffic which considered the concept of multi-layer network in the design. We also generalized our algorithm in order to support 3 classifications of multicast, i.e. IP-layer multicast, multicast via optical-layer unicast, and optical-layer multicast. Moreover, we used FIPP as a constraint in designing our algorithm which can recover the failure from optical link, optical node, logical link or logical node at a time. With the adaptation of multi-layer concept, our algorithm can not only reserve less resources compared to the traditional algorithm, it also guarantees the unit of reserved resources to be global minimum.

REFERENCES

- [1] W. D. Grover, *Mesh-Based Survivable Networks Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networking*, Prentice Hall, 2004.
- [2] H. Luo, H. Yu, L. Li and S. Wang, On protecting dynamic multicast sessions in survivable mesh WDM networks, in *ICC '06, IEEE International Conference on Communications*, 2006, pp. 835-840.
- [3] H. Luo, L. Li, H. Yu and S. Wang, Achieving Shared Protection for Dynamic Multicast Sessions in Survivable Mesh WDM Networks, in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, pp.83-95.
- [4] L. Liao, L. Li and S. Wang, Multicast protection scheme in survivable WDM optical networks, in *Journal of Network and Computer Applications*, 2008, pp. 303-316
- [5] P. Pan, G. Swallow and A. Atlas, Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP Tunnels, in *IETF RFC 4090*, 2005.
- [6] K. Mochizuki, M. Shimizu and S. Yasukawa, Multicast Tree Algorithm Minimizing the Number of Fast Reroute Protection Links for P2MP-TE Networks, in *IEEE Global Telecommunication Conference, GLOBECOM '06*, 2006, pp.1-5.
- [7] M. Pickavet, P. Demeeter, D. Colle, D. Staessens, B. Puype, L. Depre and I. Lievens, Recovery in Multilayer Optical Networks, in *Journal of Lightwave Technology*, 2006, pp.122- 134.
- [8] B. Rajagopalan, D. Pendarakis, D. Saha, R. S. Ramamoorthy and K. Bala, IP over optical networks: Architectural aspects, in *IEEE Commun. Mag.*, 2000, vol.38, pp.94-102.
- [9] M. Jeong, C. Qiao, Y. Xiong, H. C. Cankaya and M. Vandenhoute, Tree-shared multicast in optical burst-switched WDM networks, in *Journal of Lightwave Technology*, 2003, pp. 13-24.
- [10] A. Capone, G. Carello and R. Matera, Multi-layer Network Design with Multicast Traffic and Statistical Multiplexing, in *Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM*, 2007, pp. 2565 - 2570.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพรพงศ์ ชิวชรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2528 จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรของ นายพงศ์รัตน์ และ นางพรทิพย์ ชิวชรัตน์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในปีการศึกษาถัดมา ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สังกัดห้องปฏิบัติการโทรคมนาคม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย