บทที่ 5

การป้องกันโครงข่ายจากความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง บนพื้นฐานโครงสร้างแบบวงแหวน

5.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวน (Protection) จากการที่ข่ายเชื่อมโยงใด ๆ บนเส้นใยแสงทำงาน (Working Fiber) เกิดความเสียหาย (Single-link Failure) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ทราฟฟิกที่เคยส่งบนข่ายเชื่อมโยงนั้นถูกรบกวนได้ การป้องกันโครงข่ายจะทำโดยการเผื่อความจุสำรอง (Spare Capacity) ส่วนหนึ่งในโครงข่ายให้เพียงพอต่อการรองรับทราฟฟิกที่ถูกรบกวนได้ทุก ๆ กรณี ดังนั้นจึงต้องมีการวางเส้นใยแสงสำรองเพิ่ม (Spare Fiber) อันจะส่งผลให้ต้นทุนของโครงข่ายสูงขึ้น

การป้องกันโครงข่ายเป็นขั้นตอนที่ทำหลังจากออกแบบโครงข่ายเพื่อรองรับทราฟฟิกปกติเสร็จสิ้นแล้ว และจะทำในวงแหวนที่เลือกแต่ละวงจนครบ ต้นทุนในการป้องกันโครงข่าย (Spare Cost) จึงหาได้จากความจุสำรองที่ต้องเผื่อในวงแหวนแต่ละวงรวมกัน และต้นทุนรวมของโครงข่าย (Total Cost) จึงมีค่าเท่ากับต้นทุนของโครงข่ายในการรองรับทราฟฟิกปกติรวมกับต้นทุนในการป้องกันโครงข่าย

5.2 วิธีการป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวน

การป้องกันโครงข่าย คือ การจัดหาวิถีสำรอง (Spare Path) ให้แก่ทราฟฟิกแต่ละค่าในวงแหวนเพื่อป้องกันผลกระทบจากความเสียหาย วิถีสำรองในที่นี้หมายถึงทั้งเส้นทางสำรอง (Spare Route) และความยาวคลื่นสำรอง (Spare Wavelength) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการป้องกันโครงข่ายในระบบที่ใช้วงแหวนแบบ Bi-directional ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี แตกต่างกันตรงเส้นทางที่จัดให้วิถีสำรองสำหรับทราฟฟิกที่ถูกรบกวนเมื่อมีข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย [17]

5.2.1 การจัดเส้นทางในการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection

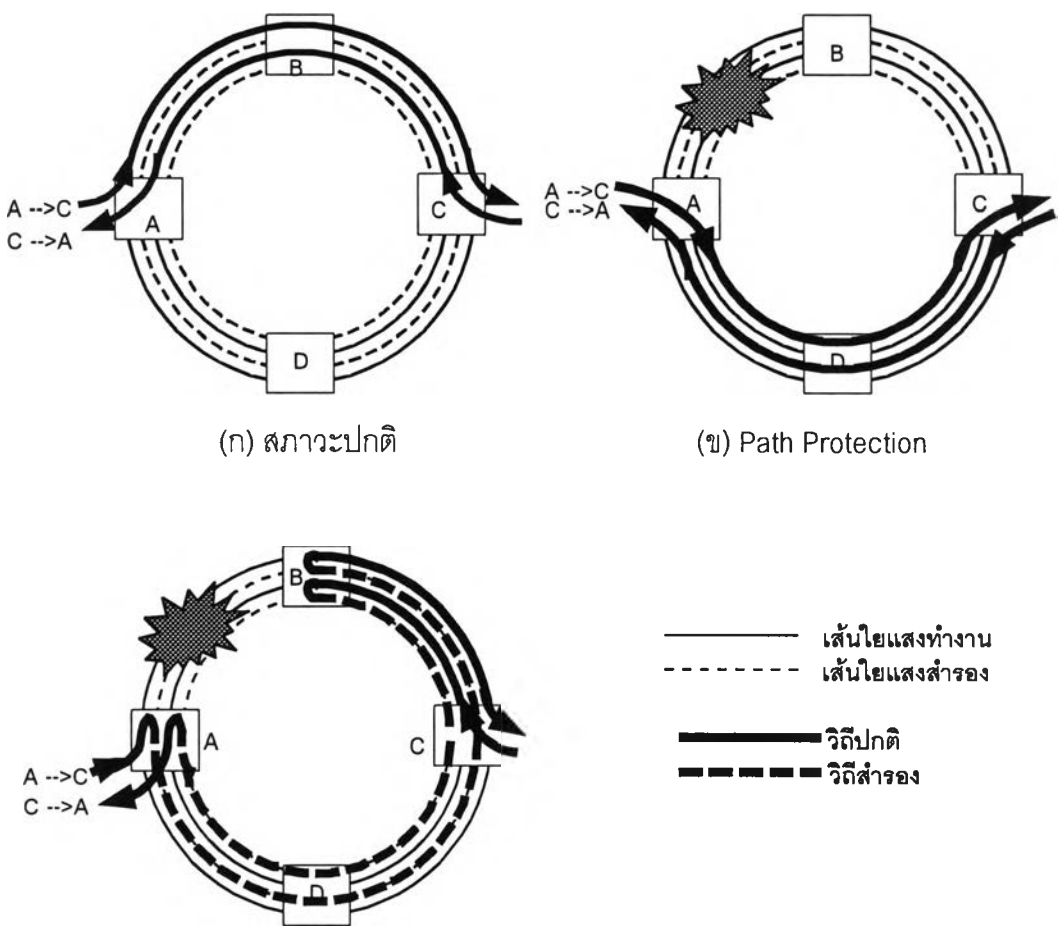
การจัดเส้นทางในการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection มีหลักการ คือ เมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง ทราฟฟิกที่ถูกรบกวนบนข่ายเชื่อมโยงนั้นจะถูกจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งหมดจากโนดต้นทางไปถึงโนดปลายทาง เนื่องจากเส้นทางที่เป็นไปได้ระหว่างคู่โนดหนึ่ง ๆ ในวงแหวนมี 2 เส้นทางเท่านั้น คือ ในทิศตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา เส้นทางที่จัดใหม่จึงอยู่ในทิศตรงกันข้ามกับเส้นทางเดิมเสมอ โดยโนดต้นทางจะเปลี่ยนการส่งสัญญาณไปใช้เส้นทางตรงกันข้ามบนเส้นใยสำรองที่ได้เผื่อไว้และโนดปลายทางก็จะเปลี่ยนทิศทางในการรับสัญญาณใหม่

5.2.2 การจัดเส้นทางในการป้องกันโครงข่ายแบบ Span Protection

การจัดเส้นทางในการป้องกันโครงข่ายแบบ Span Protection มีหลักการ คือ ทราฟฟิกที่ถูกรบกวนบนข่ายเชื่อมโยงจะถูกจัดเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงเฉพาะข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเท่านั้น เมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยง โนดที่อยู่ติดกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายจะวนสัญญาณกลับไปในทิศตรงกันข้ามบนเส้นใยสำรอง (Loop Back) จนกระทั่งเมื่อสัญญาณส่งมาถึงโนดที่ติดกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายอีกด้าน สัญญาณข้อมูลก็จะถูกวนกลับอีกครั้งหนึ่งจากเส้นใยแสงสำรองกลับไปบนเส้นใยแสงทำงานดังเดิม ดังนั้นในวิธีนี้โนดต้นทางและปลายทางไม่จำเป็นต้องรับรู้และเปลี่ยนเส้นทางส่งเหมือนในวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection ทำให้กลไกการกู้ทราฟฟิกรวดเร็วกว่าวิธีแรก แต่อย่างไรก็ตาม การวนสัญญาณกลับจะทำเพื่อหลีกเลี่ยงข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเท่านั้น ดังนั้นในวงแหวนที่มีขนาด n โนด สัญญาณที่ถูกวนกลับจะต้องอ้อมเป็นระยะทางถึง n-1 ข่ายเชื่อมโยง ทำให้สัญญาณที่ส่งเกิดการประวิงเวลามากกว่าในวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection นอกจากนั้นวิถีสำรองจะมีส่วนหนึ่งอยู่บนเส้นใยแสงทำงานและมีอีกส่วนหนึ่งอยู่บนเส้นใยแสงสำรอง หากความยาวคลื่นที่จัดสรรให้บนเส้นใยแสงทั้ง 2 เส้นมีค่าไม่ตรงกัน จะต้องมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่โนดด้วย

รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการจัดเส้นทางในการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection และ Span Protection ในโครงข่ายรูปวงแหวนที่ใช้ระบบ Bi-directional จากรูป ในสภาวะปกติทราฟฟิกระหว่างโนด A และโนด C จะถูกส่งบนเส้นทาง A-B-C หากใช้วิธีการจัดเส้นทางแบบ Path Protection เมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยง A-B ทราฟฟิกที่ถูกส่งจากโนด A ไปโนด C จะเปลี่ยนไปใช้เส้นทาง A-D-C บนเส้นใยแสงสำรอง

แต่หากใช้วิธีการจัดเส้นทางแบบ Span Protection สัญญาณจะถูกวนกลับไปบนข่ายเชื่อมโยง A-D-C-B บนเส้นใยแสงสำรองเพื่อหลีกเลี่ยงข่ายเชื่อมโยง A-B สังเกตว่าเส้นทาง A-D-C-B-C จะเป็นเส้นทางสำรองเฉพาะกรณีที่ข่ายเชื่อมโยง A-B เสียหายเท่านั้น หากในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงอื่นเสียหาย เส้นทางสำรองจะเปลี่ยนไป เช่น หากข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเป็น B-C เส้นทางสำรองจะเปลี่ยนไปเป็น A-B-A-D-C ดังนั้นการจัดเส้นทางในวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Span Protection จึงมีความยุ่งยากกว่าวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection ในขณะที่เส้นทางสำรองสำหรับทราฟฟิกค่าหนึ่งในวิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection จะเป็นเส้นทางเดียวกันไม่ขึ้นกับตำแหน่งของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย



(ก) สภาวะปกติ (ข) Path Protection

(ค) Span Protection

รูปที่ 5.1 การจัดเส้นทางเพื่อป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวน
แบบ Path Protection และ Span Protection

5.3 การจัดสรรความยาวคลื่นสำรอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรอง (หรือความจุสำรอง) ให้แก่เส้นทางที่ได้จัดไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.1 ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี แยกตามเส้นใยแสงที่เป็นแหล่งของความยาวคลื่นสำรอง วิธีทั้ง 2 ได้แก่ การสำรองบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก [17] และวิธีที่จะเสนอใหม่ คือ การสำรองบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อน

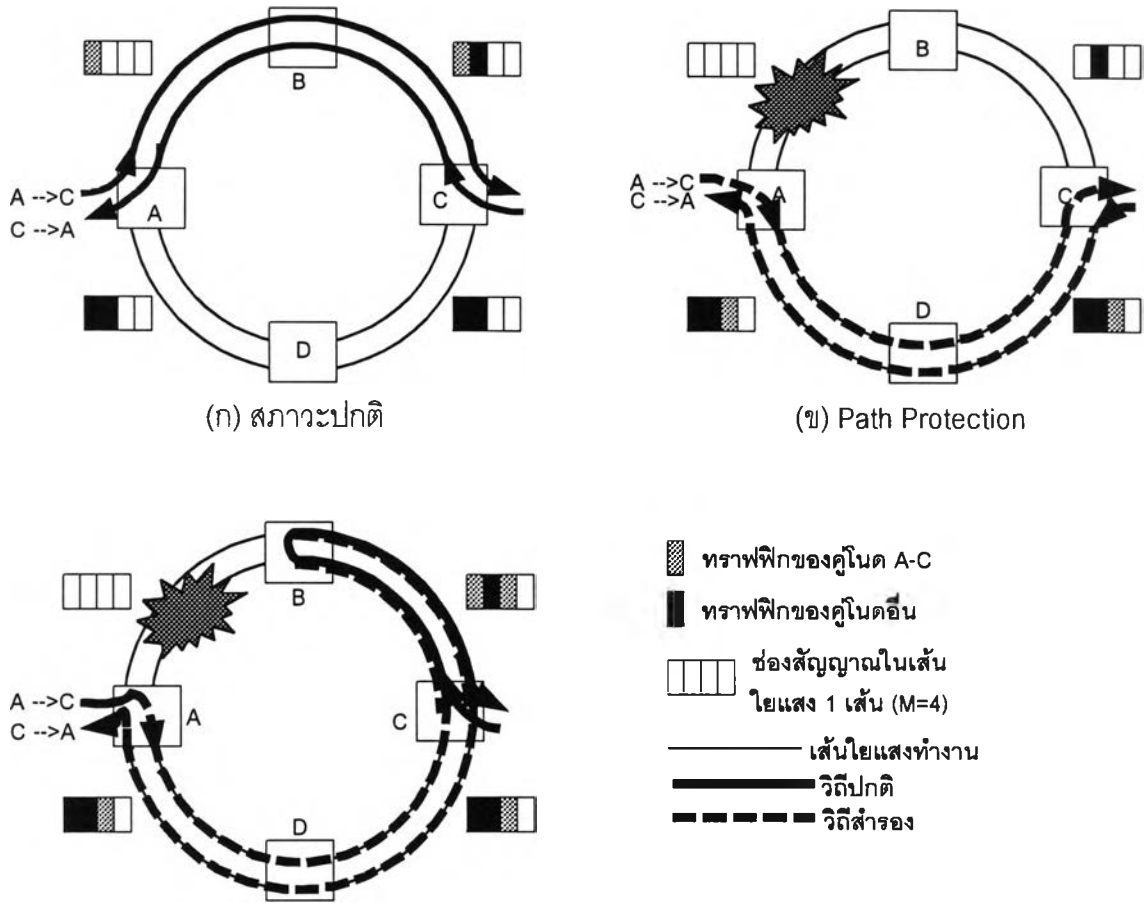
5.3.1 การสำรองบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก

ในสำรองความจุวิธีนี้ ความจุได้จากเส้นใยแสงอีกชุดที่วางเพิ่มเพื่อใช้เป็นเส้นใยสำรองโดยเฉพาะ การป้องกันโครงข่ายไม่ว่าจะด้วยวิธีการจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection หรือ Span Protection จะทำบนเส้นใยแสงชุดใหม่ทั้งหมดโดยไม่เกี่ยวข้องกับเส้นใยแสงทำงานที่วางอยู่แล้ว วิธีสำรองความจุแบบนี้มีตัวอย่างเช่นในรูปที่ 5.1

5.3.2 การสำรองบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อน

การสำรองความจุวิธีนี้ ความจุได้มาจากทั้งความยาวคลื่นค่าอื่น ๆ ที่อยู่ในชุดของเส้นใยแสงทำงานที่วางอยู่แล้วในระบบและจากเส้นใยแสงชุดที่วางลงไปใหม่ในระบบด้วย โดยอาศัยข้อสังเกตที่ว่าในสภาวะปกติ วงแหวนบางวงที่รองรับทราฟฟิกจะมีการใช้ประโยชน์ทรัพยากรไม่ถึง 100% คือ จะมีความจุเหลือในเส้นใยแสงทำงานบางเส้น โดยเฉพาะหากมีจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์กันในเส้นใยแสง (M) ค่าสูง ๆ เช่น 4 หรือ 8 เพื่อให้ความจุที่เหลือนี้ถูกใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด จะกำหนดความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานให้เส้นทางสำรองก่อน ถ้าไม่เพียงพอจึงวางเส้นใยแสงสำรองเส้นใหม่เพิ่มเข้าไปในระบบ รูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างของการจัดสรรความจุด้วยวิธีสำรองบนเส้นใยแสงทำงานก่อนให้ทราฟฟิกซึ่งใช้เส้นทาง A-B-C และเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง A-B หากใช้วิธีการจัดเส้นทางแบบ Path Protection ทราฟฟิกจาก A ไป C ซึ่งเดิมถูกส่งในทิศตามเข็มนาฬิกาจะถูกสำรองบนเส้นใยแสงทำงานอีกเส้นที่ส่งในทิศทวนเข็มนาฬิกา หากเป็นวิธีการจัดเส้นทางแบบ Span Protection ทราฟฟิกเฉพาะในข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายจะถูก loop back โดยใช้เส้นใยแสงทำงานอีกเส้นที่อยู่ในทิศทางตรงกันข้าม และใช้ช่องสัญญาณที่เหลือจากการใช้งานก่อนสังเกตว่าวิธีนี้ ทราฟฟิกส่วนที่อยู่ในข่ายเชื่อมโยงอื่นที่ไม่ถูกรบกวนจะยังคงถูกส่งไปบนความจุค่าเดิมตามปกติโดยไม่ต้องจัดสรรความจุสำรองให้ทราฟฟิกในส่วนนี้ ในตัวอย่างนี้จะเห็นว่าการใช้จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์กันในเส้นใยแสง (M) ตั้งแต่ 4 ค่าขึ้นไปจะทำให้มี

ช่องสัญญาณในเส้นใยแสงทำงานเหลือมากพอสำหรับความจุสำรอง ดังนั้นจึงไม่ต้องเพิ่มเส้นใยแสงสำรองเข้าไปในระบบอีก



(ก) สภาวะปกติ

(ข) Path Protection

(ค) Span Protection

รูปที่ 5.2 การสำรองความจุบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อน

เนื่องจากความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน เพื่อให้การใช้ทรัพยากรมีประสิทธิภาพที่สุด ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การจัดสรรความจุสำรองให้แก่ทราฟฟิกแต่ละค่าแบบ Shared คือ ความจุสำรองที่เผื่อให้ทราฟฟิกแต่ละค่าอาจใช้เป็นความจุสำรองของทราฟฟิกค่าอื่น ๆ ได้ ตราบใดที่ทราฟฟิกเหล่านั้นไม่ใช้ความจุนั้นในเหตุการณ์เดียวกัน การจัดสรรอีกแบบซึ่งจะเผื่อความจุต่างหากให้ทราฟฟิกแต่ละค่าแยกกัน เรียกว่า การจัดสรรแบบ Dedicated จะไม่นำมาใช้ในที่นี้เนื่องจากเป็นวิธีที่ต้องการความจุสำรองในโครงข่ายสูงมาก

จากที่กล่าวมาทั้งหมด การจัดสรรความจุสำรองเพื่อป้องกันโครงข่ายในวงแหวนแต่ละวงที่จะใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จึงแบ่งได้เป็น 4 วิธี คือ

1. Path Protection on Shared Fiber (PSF)

   - เป็นการจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection
   - เป็นการสำรองความจุบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก

2. Path Protection on Shared Wavelength (PSW)

   - เป็นการจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection
   - เป็นการสำรองความจุบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อน

3. Loop Back on Shared Fiber (LSF)

   - เป็นการจัดเส้นทางสำรองแบบ Span Protection
   - เป็นการสำรองความจุบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก

4. Loop Back on Shared Wavelength (LSW)

   - เป็นการจัดเส้นทางสำรองแบบ Span Protection
   - เป็นการสำรองความจุบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อน

5.4 ความจำเป็นของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นต่อการป้องกันโครงข่าย

ในการจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่เส้นทางสำรอง อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นอาจถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถของโนด โดยมีวัตถุประสงค์เดียวกับการจัดสรรความยาวคลื่นในสภาวะปกติ คือ ลดปัญหาที่ไม่สามารถจัดสรรความยาวคลื่นค่าเดียวกันให้ตลอดเส้นทาง (Wavelength Blocking) หรือกรณีที่การจัดสรรความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดเส้นทางทำให้ประสิทธิภาพใช้ทรัพยากรของระบบด้อยลง

ในระบบที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น เส้นทางสำรองทั้งเส้นทางจะต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกัน ในขณะที่หากมีอุปกรณ์ชนิดนี้ เส้นทางสำรองอาจใช้ความยาวคลื่นต่างกันได้ในแต่ละช่วงเชื่อมโยงหากมีอุปกรณ์ชนิดนี้ ในวิทยานิพนธ์จึงจะพิจารณาความจำเป็นของการติดตั้งอุปกรณ์ชนิดนี้ที่โนดในทุกวิธีของการจัดสรรความจุสำรอง คือ PSF, PSW, LSF และ LSW

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ในการจัดเส้นทางแบบ Span Protection เส้นทางสำรองทั้งเส้นทางไม่ได้อยู่บนเส้นใยแสงเส้นเดียวกันทั้งหมด ระบบจึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ณ โนดที่ทำหน้าที่วนสัญญาณกลับเพื่อแปลงค่าความยาวคลื่นบนเส้นใยแสง

ทำงานและเส้นใยแสงสำรอง หากไม่มีการแปลงผันความยาวคลื่นดังกล่าวจะต้องใช้ความยาวคลื่นให้ตรงกันในเส้นใยแสงทั้ง 2 เส้น จึงอาจเกิดปัญหา wavelength blocking ได้ ส่งผลให้ต้องมีการวางเส้นใยแสงเพิ่มเข้าไปในระบบ จึงอาจทำให้ต้นทุนรวมของโครงข่ายสูงขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของการขาดแคลนอุปกรณ์ชนิดนี้ที่มีต่อความจุสำรองที่ต้องเผื่อให้โครงข่าย วิธีการจัดสรรความจุสำรองที่ได้ศึกษาเพิ่มเติมมี 2 วิธี คือ

1. Loop Back on Shared Fiber without Wavelength Conversion (LSF_NWC)
2. Loop Back on Shared Wavelength without Wavelength Conversion (LSW_NWC)

วิธี LSF_NWC และ LSW_NWC มีหลักการเดียวกันกับวิธี LSF และวิธี LSW ตามลำดับ เพียงแต่กำหนดให้ไม่มีอุปกรณ์แปลงความยาวคลื่นที่โนด

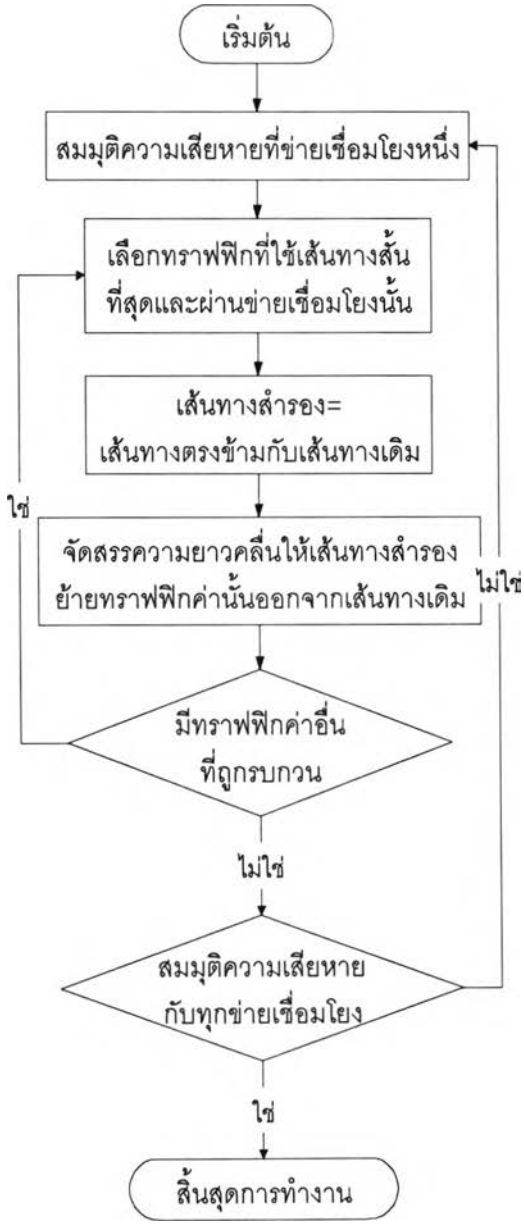
5.5 อัลกอริทึมการจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่าย

การจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่าย คือ การจัดวิถีใหม่ให้แก่ทราฟฟิกแต่ละค่าที่ถูกรบกวนเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงที่ทราฟฟิกค่านั้นใช้อยู่ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า การจัดวิถีใหม่ประกอบด้วย ขั้นตอนการจัดเส้นทางสำรองและการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองเช่นเดียวกับการจัดวิถีในสภาวะปกติที่ไม่มีความเสียหาย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจัดเส้นทางสำรองในการป้องกันโครงข่ายทั้งวิธี Path Protection และ Span Protection จากนั้นในหัวข้อ 5.5.3 จึงจะกล่าวถึงอัลกอริทึมการจัดสรรความยาวคลื่นบนเส้นทางสำรองให้แก่ทราฟฟิกแต่ละค่าต่อไป

5.5.1 อัลกอริทึมการจัดสรรความจุสำรองในป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection

การจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection เริ่มจากการสมมุติเหตุการณ์ที่เกิดความเสียหายขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งทีละข่ายเชื่อมโยง ทราฟฟิกแต่ละค่าที่ใช้เส้นทางผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้นจะถูกย้ายทั้งเส้นทาง ไปวางบนเส้นทางสำรองซึ่งเป็นเส้นทางที่อยู่ตรงข้ามกับเส้นทางเดิม โดยจะต้องวางเส้นทางสำรองที่ยาวที่สุดก่อน ดังนั้นจึงต้องย้ายทราฟฟิกที่ใช้เส้นทางเดิมที่สั้นที่สุดเป็นอันดับแรก เนื่องจากทราฟฟิกที่ใช้เส้นทางเดิมสั้นที่สุดจะใช้เส้นทางสำรองที่ยาวที่สุด ต่อไปจึงจัดสรรความยาวคลื่นให้ทราฟฟิกค่านั้น เมื่อ

ดำเนินขั้นตอนทั้งหมดข้างต้นจนครบกับทราฟฟิกทุกค่าแล้ว จึงสมมุติเหตุการณ์ความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงอื่นจนครบทุกข่ายเชื่อมโยงในวงแหวน รูปที่ 5.3 แสดงผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection



รูปที่ 5.3 ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Path Protection

5.5.2 อัลกอริทึมการจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Span Protection

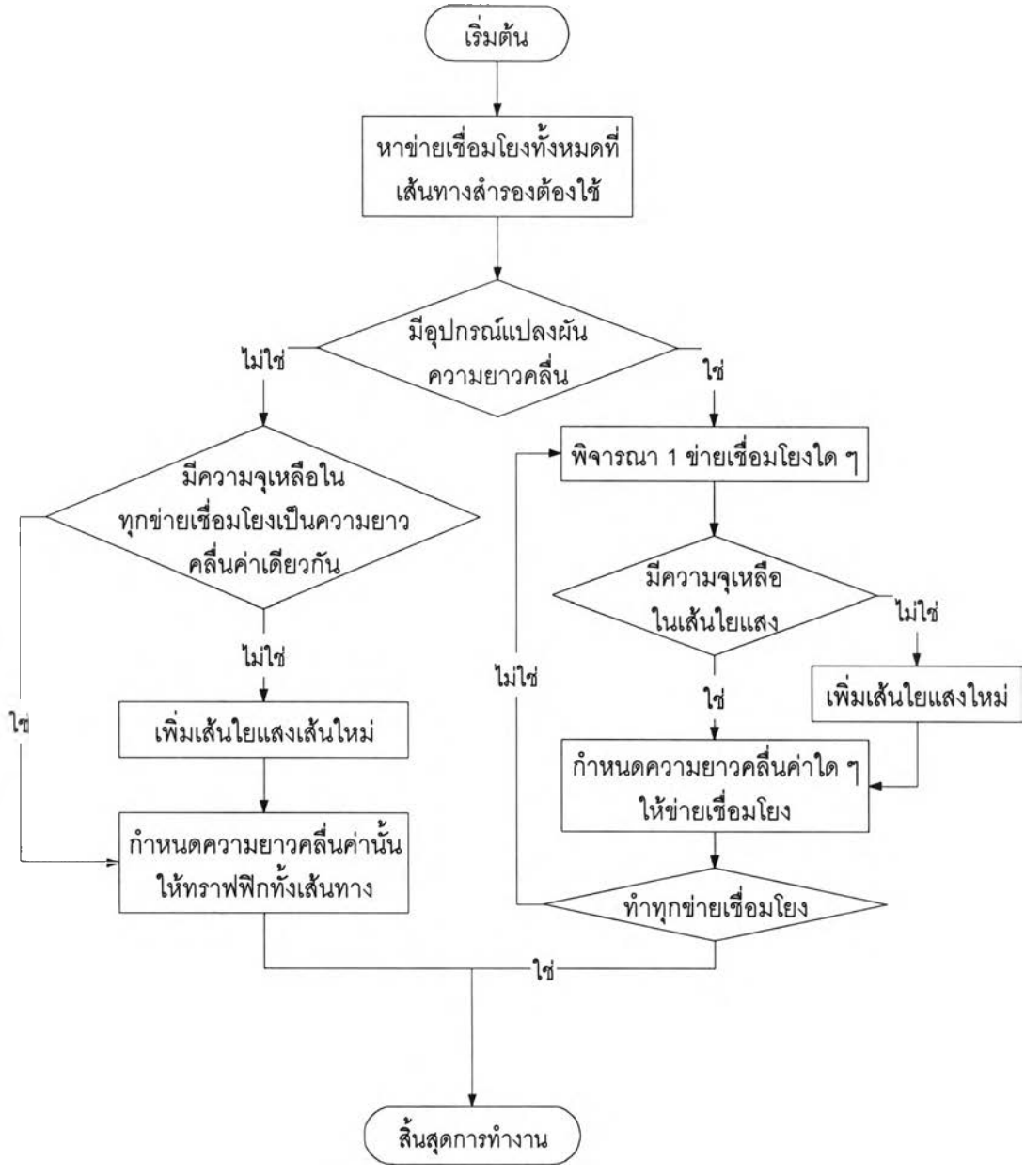
การจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Span Protection เริ่มจากการสมมุติเหตุการณ์ที่เกิดความเสียหายขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงข่ายหนึ่ง ทราฟฟิกทุกค่าเฉพาะที่ส่งในข่ายเชื่อมโยงข่ายนั้นจะต้องถูกย้ายไปวางบนเส้นทางที่อยู่ตรงข้ามกับข่ายเชื่อมโยง ดังนั้นในวงแหวนที่มี n ข่ายเชื่อมโยง เส้นทางสำรองจะมีความยาว n-1 ข่ายเชื่อมโยงคงที่ รูปที่ 5.4 แสดงผังงานของการจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่ายแบบ Span Protection

รูปที่ 5.4 ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรความจุสำรอง
ในการป้องกันโครงข่ายแบบ Span Protection

5.5.3 อัลกอริทึมการจัดสรรความยาวคลื่นให้เส้นทางสำรอง

การจัดสรรความยาวคลื่นให้เส้นทางสำรองที่ได้กำหนดไว้ จะเริ่มจากการพิจารณาหาความจุสำรองสำหรับข่ายเชื่อมโยงที่ใช้รองรับเส้นทางนั้นทั้งหมด หากใช้วิธีสำรองความจุบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก (วิธี PSF หรือ LSF) จะพิจารณาความจุในเส้นใยแสงสำรองชุดที่วางเข้าไปใหม่ แต่หากใช้วิธีสำรองบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อน (วิธี PSF หรือ วิธี LSF) จะพิจารณาความจุในเส้นใยแสงทำงานก่อน หากไม่เพียงพอจึงเพิ่มเส้นใยแสงเส้นใหม่เข้าในระบบ

หลังจากนั้น ในการจัดสรรความยาวคลื่นในเส้นใยแสงให้แต่ละข่ายเชื่อมโยงที่รองรับเส้นทางที่พิจารณาอยู่ จะต้องหาความยาวคลื่นให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของวิธีที่ใช้ในการป้องกันโครงข่ายและสอดคล้องกับข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ หากเป็นระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่จัดสรรให้แต่ละข่ายเชื่อมโยงอาจเป็นค่าใดก็ได้ แต่หากเป็นระบบที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จะต้องจัดสรรความยาวคลื่นค่าเดียวกันให้แก่ทุกข่ายเชื่อมโยง โดยเฉพาะในการจัดเส้นทางสำรองแบบ Span Protection ที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ในการ loop back สัญญาณ (วิธี LSF_NWC หรือ LSW_NWC) ความยาวคลื่นที่ต้องกำหนดให้เส้นทางสำรองจะต้องเป็นค่าเดียวกับที่ใช้ในเส้นทางเดิมอีกด้วย หากไม่สามารถจัดสรรความยาวคลื่นค่าเดียวกันให้แก่ทุกข่ายเชื่อมโยงได้ จะต้องเพิ่มเส้นใยแสงเส้นใหม่เข้าไปในระบบอีก และเมื่อจัดสรรความยาวคลื่นให้เส้นทางสำรองจนครบในทุกข่ายเชื่อมโยงแล้ว จึงดำเนินการจัดสรรความจุสำรองให้วงแหวนวงอื่นต่อไปจนครบทุกวง ผังงานของอัลกอริทึมการจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่เส้นทางสำรองของทราฟฟิกเป็นดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ผังงานการจัดสรรความยาวคลื่น
ให้เส้นทางสำรองของทราฟฟิก

5.6 การทดสอบและวิเคราะห์

การวิเคราะห์ในบทนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาวิธีการป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวเป็นหลัก ซึ่งเป็นพื้นฐานของการออกแบบโครงข่ายโดยใช้โครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง การวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ ในส่วนแรก จะศึกษาการจัดสรรความจุสำรองเพื่อป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวนทั้ง 4 วิธี คือ PSF, PSW, LSF และ LSW โดยจะเปรียบเทียบความจุสำรองที่ต้องเผื่อในแต่ละวิธีเพื่อหาวิธีการจัดเส้นทางและวิธีการสำรองความจุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง ในส่วนถัดไปจะเป็นการพิจารณาความจำเป็นของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อการจัดสรรความจุสำรองแต่ละวิธี

5.6.1 การวิเคราะห์วิธีการจัดสรรความจุสำรองในการป้องกันโครงข่ายรูปวงแหวน

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ผลของวิธีการจัดสรรความจุสำรองทั้ง 4 วิธี คือ PSF, PSW, LSF และ LSW โดยจะพิจารณาผลกระทบจากจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ (M), ลักษณะของทราฟฟิกในสภาวะปกติและขนาดของวงแหวนที่มีต่อวิธีการจัดสรรความจุสำรองแต่ละวิธี

ในการทดสอบจะทดลองจัดสรรความจุสำรองบนวงแหวน 2 แบบ คือ วงแหวนที่มีขนาด 4 โนดและ 5 โนด โดยใช้ทราฟฟิกแบบ Uniform ที่มีขนาดเป็น 3 และจะทดลองแปรค่า M ไป 8 ค่า คือ 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 และ 128 ความจุสำรองที่ต้องการจากการจัดสรรความจุสำรองแต่ละวิธีในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 5.1 และ 5.2 ซึ่งจะแสดงทั้งจำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการและต้นทุนรวมของโครงข่ายเมื่อมีการเผื่อความจุสำรองไว้แล้ว ทดสอบบนวงแหวนขนาด 4 และ 5 โนด ตามลำดับ จำนวนเส้นใยแสงที่ต้องใช้ดังแสดงในตารางที่ หมายถึง จำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการในสภาวะปกติ + จำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการเพื่อป้องกันความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง

ตารางที่ 5.1 จำนวนเส้นใยแสงและต้นทุนของโครงข่าย 4 โนด ทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 3 เมื่อใช้วิธีจัดสรรความจุสำรองแต่ละวิธี ในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

M	PSF		PSW		LSF		LSW	
	เส้นใยแสงที่ต้องการ*	ต้นทุน	เส้นใยแสงที่ต้องการ*	ต้นทุน	เส้นใยแสงที่ต้องการ*	ต้นทุน	เส้นใยแสงที่ต้องการ*	ต้นทุน
1	7+7	56	7+5	48	7+7	56	7+5	48
2	4+4	64	4+2	48	4+4	64	4+2	48
4	2+2	64	2+1	48	2+2	64	2+1	48
8	1+1	64	1+1	64	1+1	64	1+1	64
16	1+1	128	1+0	64	1+1	128	1+0	64
32	1+1	256	1+0	128	1+1	256	1+0	128
64	1+1	512	1+0	256	1+1	512	1+0	256
128	1+1	1024	1+0	512	1+1	1024	1+0	512

* มีค่าเท่ากับ (จำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการในสภาวะปกติ) + (จำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการ)

ตารางที่ 5.2 จำนวนเส้นใยแสงและต้นทุนของโครงข่าย 5 โนด ทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 3 เมื่อใช้วิธีจัดสรรความจุสำรองแต่ละวิธี ในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

M	PSF		PSW		LSF		LSW	
	เส้นใยแสงที่ต้องการ*	ต้นทุน	เส้นใยแสงที่ต้องการ*	ต้นทุน	เส้นใยแสงที่ต้องการ*	ต้นทุน	เส้นใยแสงที่ต้องการ*	ต้นทุน
1	9+9	90	9+9	90	9+9	90	9+9	90
2	5+5	100	5+4	90	5+5	100	5+4	90
4	3+3	120	3+2	100	3+3	120	3+2	100
8	2+2	160	2+1	120	2+2	160	2+1	120
16	1+1	160	1+1	160	1+1	160	1+1	160
32	1+1	320	1+0	160	1+1	320	1+0	160
64	1+1	640	1+0	320	1+1	640	1+0	320
128	1+1	1280	1+0	640	1+1	1280	1+0	640

จากทั้ง 2 ตาราง จะพบว่าจำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการในสภาวะปกติเสมอ ในกรณีที่เส้นใยแสงมีจำนวนเท่ากันจะเกิดขึ้นเมื่อใช้วิธีสำรองความจุบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก (PSF และ LSF) ส่วนในกรณีที่เส้นใยแสงที่ต้องสำรองมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนเส้นใยแสงในสภาวะปกติจะเกิดขึ้นเมื่อใช้วิธีสำรองความจุบนเส้นใยแสงทำงานก่อน (PSW และ LSW) และไม่ว่าจะใช้วิธีจัดเส้นทางแบบ Path Protection หรือ Span Protection จำนวนเส้นใยแสงก็ยังคงไม่มีความแตกต่างกัน

ในวิธี PSF และ LSF การที่จำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการมีค่าเท่ากับจำนวนเส้นใยแสงในสภาวะปกติ อธิบายได้ดังนี้ จำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการในสภาวะปกติจะหาได้จากความต้องการความจุในข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกหนาแน่นที่สุดในวงแหวน แต่เมื่อมีการเผื่อความจุสำรอง จะมีการย้ายทราฟฟิกไปยังเส้นทางสำรองซึ่งเป็นเส้นทางในทิศตรงข้ามกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเสมอ ดังนั้นความจุสำรองที่ต้องเผื่อในกรณีที่เลวร้ายที่สุด คือ ข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกหนาแน่นที่สุดเกิดความเสียหาย จึงขึ้นอยู่กับความจุที่ต้องการในข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกหนาแน่นที่สุดเช่นเดียวกันกับในสภาวะปกติ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในกรณีที่สำรองความจุบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก (PSF และ LSF) จำนวนความยาวคลื่นและจำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการทั้งในสภาวะปกติ และเมื่อที่เกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งจึงมีค่าเท่ากัน คือ 7, 4 และ 2 เส้น เมื่อใช้ M=1, 2 และ 4 ตามลำดับ ในกรณีที่เป็นวงแหวนขนาด 4 โนด และ เท่ากับ 9, 5, 3 และ 2 เส้น เมื่อใช้ M=1, 2, 4 และ 8 ตามลำดับ ในกรณีที่เป็นวงแหวนขนาด 5 โนด และเมื่อ M สูงขึ้น ความจุในเส้นใยแสงแต่ละเส้นจะมีค่ามากเส้นใยแสงปกติและเส้นใยแสงสำรองที่ใช้รองรับทราฟฟิกจึงเหลือเพียงอย่างละ 1 เส้น ดังจะเห็นได้ว่า เส้นใยแสงรวมที่ต้องการในระบบจะมีจำนวน 2 เส้นคงที่ไปตลอด ที่ M ตั้งแต่ 8 และ 16 เป็นต้นไป ในวงแหวนขนาด 4 และ 5 โนด ตามลำดับ

ส่วนในวิธี PSW และ LSW จะพบว่า จำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการจะน้อยกว่าในวิธี PSF และ LSF แสดงว่าการสำรองบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อนสามารถลดจำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการได้ โดยในวงแหวนขนาด 5 โนด ตั้งแต่ค่า M=2 เป็นต้นไป จำนวนเส้นใยแสงสำรองจะลดลงกว่าจำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการในสภาวะปกติ คิดเป็น 20%, 33% และ 50% ที่ M=2, 4 และ 8 ตามลำดับ อธิบายได้ว่า ที่ M ค่าสูง ๆ ความจุในเส้นใยแสงแต่ละเส้นจะมาก และมีช่องสัญญาณเหลือในเส้นใยแสงทำงานที่สามารถนำไปใช้ในการป้องกันโครงข่ายได้มาก ความต้องการเส้นใยแสงทั้งเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองของระบบจึงลดลง ส่งผลให้จำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ประหยัดเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์มากขึ้น

และเมื่อ M มีค่าสูงมากกว่า 32 เป็นต้นไป ความจุที่เหลือในเส้นใยแสงทำงานที่วางอยู่แล้วจะมีค่ามากพอในการรองรับความจุสำรองทั้งหมด จึงไม่ต้องการเส้นใยแสงสำรองเพิ่มอีกเลย

จากที่อธิบายมาทั้งหมด สรุปได้ว่า เมื่อทราฟฟิกเป็นแบบ Uniform การสำรองบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก จำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการจะเท่ากับความต้องการในสภาวะปกติ ในทั้งการจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection และ Span Protection แต่เมื่อใช้วิธีสำรองบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อน จำนวนเส้นใยแสงสำรองนี้จะลดลงได้โดยเฉพาะที่ M ค่าสูงยิ่งขึ้น วิธีนี้ยิ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรในเส้นใยแสงที่ต่ำให้ดีขึ้นได้ โดยจากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าต้นทุนเมื่อใช้วิธี PSW และ LSW จะประหยัดกว่า PSF และ LSF อยู่ 14.3%, 25%, 25% ที่ M=1, 2, 4 ตามลำดับ และ 50% ที่ M ตั้งแต่ 8 ขึ้นไป ในวงแหวนขนาด 4 โนด และจะประหยัดกว่าอยู่ 10%,17%, 25% ที่ M=2, 4, 8 ตามลำดับ และ 50% ที่ M ตั้งแต่ 16 ขึ้นไป ในวงแหวนขนาด 5 โนด

เรื่องต่อไปจะพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการจัดเส้นทางแบบ Path Protection กับ Span Protection ในแง่ของความยาวของเส้นทางสำรองนับเป็นจำนวนข่ายเชื่อมโยง ตารางที่ 5.3 แสดงความยาวเส้นทางสำรองในวงแหวนขนาด n ข่ายเชื่อมโยงเมื่อความยาวของเส้นทางปกติยาว a ข่ายเชื่อมโยง

ตารางที่ 5.3 ความยาวของเส้นทางสำรองนับเป็นข่ายเชื่อมโยง เมื่อใช้การจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection และ Span Protection

วิธีจัดเส้นทางสำรอง	ความยาวเส้นทางปกติ	ความยาวเส้นทางสำรอง			ความยาวเส้นทางสำรองรวม - ความยาวเส้นทางปกติ
		ในเส้นใยแสงทำงาน	ในเส้นใยแสงสำรอง	ความยาวรวม	
Path Protection	a	0	n-a	n-a	n-2a
Span Protection	a	a-1	n-1	n+a-2	n-2

จากตารางจะเห็นว่าถ้าใช้การจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection ทราฟฟิกจะถูกย้ายไปใช้เส้นทางสำรองซึ่งเป็นเส้นทางตรงข้ามทั้งเส้นทาง ความยาวเส้นทางสำรองจึงเป็น n-a ข่ายเชื่อมโยง แต่หากเป็นการจัดเส้นทางแบบ Span Protection ทราฟฟิกจะยังคงส่งใน

เส้นใยแสงทำงานเดิมเป็นความยาว a-1 ข่ายเชื่อมโยง ส่วนทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายจะถูกย้ายไปเส้นทางตรงข้ามกับข่ายเชื่อมโยงนั้น ดังนั้นระยะทางที่สัญญาณถูกส่งบนเส้นใยแสงสำรองจึงมีความยาว n-1 ข่ายเชื่อมโยงเสมอ

หากเปรียบเทียบการจัดเส้นทางสำรองวิธี Path Protection และ Span Protection ในกรณีที่ความยาวเส้นทางปกติเป็น 1 ข่ายเชื่อมโยง (a=1) ความยาวเส้นทางสำรองในทั้ง 2 วิธีจะเท่ากัน คือ n-1 ข่ายเชื่อมโยง ทำให้ระยะทางที่สัญญาณต้องถูกส่งในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเสียหายมากกว่าระยะทางที่สัญญาณถูกส่งในสภาวะปกติ คือ n-2 ข่ายเชื่อมโยงเท่ากันทั้ง 2 วิธี แต่เมื่อเส้นทางปกติยาวขึ้น (a>1) เส้นทางสำรองในวิธี Path Protection จะมีความยาวผกผันกับความยาวเส้นทางปกติ โดยถ้าเส้นทางปกติยาวกว่าความยาวครึ่งหนึ่งของขนาดวงแหวน เส้นทางสำรองจะสั้นกว่าเส้นทางปกติ จนเมื่อเส้นทางปกติยาว n-1 ข่ายเชื่อมโยง (a=n-1) เส้นทางสำรองจะยาวเพียง 1 ข่ายเชื่อมโยงเท่านั้น ซึ่งต่างจากในวิธี Span Protection ความยาวของเส้นทางสำรองจะเป็น n+a-2 ข่ายเชื่อมโยง ซึ่งขึ้นกับความยาวเส้นทางปกติเช่นเดียวกัน แต่แนวโน้มจะตรงข้ามกับวิธี Path Protection คือ เมื่อเส้นทางปกติยาวขึ้นเส้นทางสำรองจะยาวขึ้นด้วย จนเมื่อเส้นทางปกติยาว n-1 ข่ายเชื่อมโยง เส้นทางสำรองจะมีความยาวสูงสุด คือ 2n-3 ข่ายเชื่อมโยง ซึ่งเกือบเป็น 2 เท่าของขนาดวงแหวน ดังนั้นหากการสำรองความจุมีการคำนึงถึงความยาวเส้นทางเป็นสำคัญ ควรใช้วิธีการจัดเส้นทางแบบ Path Protection เนื่องจากความยาวเส้นทางสำรองสั้นกว่า โดยเฉพาะเมื่อวงแหวนมีขนาดใหญ่ขึ้น (n มีค่ามาก) ระยะทางที่สัญญาณจะยิ่งไกลขึ้น

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สรุปได้ว่า การตัดสินใจเลือกวิธีการจัดสรรความจุสำรองเพื่อป้องกันโครงข่าย จะต้องพิจารณาทั้งวิธีการจัดเส้นทางสำรองและวิธีการสำรองความจุ โดยเมื่อเปรียบเทียบวิธีการจัดเส้นทางสำรองระหว่างวิธี Path Protection กับ Span Protection ในด้านระยะทางที่สัญญาณข้อมูลจะต้องส่งในสภาวะที่เกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง พบว่าวิธี Path Protection จะให้ระยะทางที่สั้นกว่า ส่วนวิธีการสำรองความจุที่จะทำให้ประหยัดเส้นใยแสงได้มากกว่า คือ การสำรองบนเส้นใยแสงทำงานก่อน

5.6.2 ความจำเป็นของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อการป้องกันโครงข่าย

เรื่องสุดท้ายที่จะวิเคราะห์ คือ ความจำเป็นของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นต่อการป้องกันโครงข่าย ในการทดสอบจะใช้ทราฟฟิกแบบ Uniform ขนาดเป็น 3 บนวงแหวน 2 แบบ

คือ วงแหวนขนาด 4 และ 5 โนด ตารางที่ 5.4 และ 5.5 แสดงจำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการในการรองรับทราฟฟิกทั้งหมดทั้งในสภาวะปกติและเมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเมื่อใช้ค่า M ต่าง ๆ กัน ทดสอบบนวงแหวนขนาด 4 และ 5 โนด ตามลำดับ จำนวนเส้นใยแสงดังแสดงในตาราง หมายถึง จำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการในสภาวะปกติ + จำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการเพื่อป้องกันความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง

พิจารณาตารางที่ 5.4 ซึ่งเป็นวงแหวนขนาด 4 โนด จำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการเมื่อใช้วิธีการสำรองความจุบนเส้นใยแสงอีกชุดหนึ่ง ไม่ว่าจะใช้การจัดเส้นทางแบบ Path Protection (PSF) หรือ Span Protection (LSF) พบว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่มีผลต่อจำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการ โดยจะเห็นว่าเส้นใยแสงที่ต้องการมีจำนวนเท่ากันทั้งในกรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ส่วนเมื่อใช้วิธีการสำรองบนความจุที่เหลือของเส้นใยแสงทำงานก่อน (PSW และ LSW) จะพบว่าจำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการของวิธี PSW เมื่อไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสูงกว่าเมื่อมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นอยู่ 1 เส้นที่ M=1, 2 และ 4 ในวิธี LSW_NWC จำนวนเส้นใยแสงสำรองจะสูงกว่าวิธี LSW อยู่ 1 เส้นที่ M=1, 2 และ 4 เช่นเดียวกัน แสดงว่าความขาดแคลนอุปกรณ์ชนิดนี้ส่งผลให้จำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการสูงขึ้นในการสำรองความจุบนเส้นใยแสงทำงานก่อน เนื่องจากในเส้นใยแสงทำงาน ความจุที่เหลือส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นไม่ต่อเนื่องสำหรับใช้กับเส้นทางทั้งเส้นทาง หากระบบไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ในทางตรงกันข้ามหากมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ความจุส่วนนี้จะสามารถนำมาใช้รองรับเส้นทางสำรองของทราฟฟิกได้ จึงทำให้เส้นใยแสงที่ต้องเพิ่มเข้าไปใหม่มีจำนวนลดลง

พิจารณาตารางที่ 5.5 ซึ่งแสดงจำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการของวงแหวนขนาด 5 โนด จะเห็นว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ส่งผลต่อจำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการในวิธีจัดสรรความจุสำรองแบบ PSF, PSW และ LSF แต่เมื่อไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จำนวนเส้นใยแสงสำรองที่ต้องการในวิธี LSW จะมากขึ้นกว่าในกรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นอยู่ 1 เส้น

ตารางที่ 5.4 จำนวนเส้นใยแสงของโครงข่าย 4 โนด ทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 3 เมื่อใช้วิธีจัดสรรความจุสำรองแต่ละวิธี ทั้งในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

M	มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น				ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น			
	PSF	PSW	LSF	LSW	PSF	PSW	LSF_NWC	LSW_NWC
1	7+7	7+5	7+7	7+5	7+7	7+6	7+7	7+6
2	4+4	4+2	4+4	4+2	4+4	4+3	4+4	4+3
4	2+2	2+1	2+2	2+1	2+2	2+2	2+2	2+2
8	1+1	1+1	1+1	1+1	1+1	1+1	1+1	1+1
16	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+1
32	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+1
64	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+1
128	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+1

ตารางที่ 5.5 จำนวนเส้นใยแสงของโครงข่าย 5 โนด ทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 3 เมื่อใช้วิธีจัดสรรความจุสำรองแต่ละวิธี ทั้งในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

M	มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น				ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น			
	PSF	PSW	LSF	LSW	PSF	PSW	LSF_NWC	LSW_NWC
1	9+9	9+9	9+9	9+9	9+9	9+9	9+9	9+9
2	5+5	5+4	5+5	5+4	5+5	5+4	5+5	5+5
4	3+3	3+2	3+3	3+2	3+3	3+2	3+3	3+3
8	2+2	2+1	2+2	2+1	2+2	2+1	2+2	2+2
16	1+1	1+1	1+1	1+1	1+1	1+1	1+1	1+1
32	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+1
64	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+1
128	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+0	1+1	1+1

การที่อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นส่งผลเฉพาะในวิธี LSW แต่ไม่ส่งผลต่อวิธี PSW เหมือนในวงแหวนขนาด 4 โนด เนื่องจากในการจัดเส้นทางแบบ Span Protection เส้นทางสำรองจะอยู่บนทั้งเส้นใยแสงทำงานและบนเส้นใยแสงสำรอง หากไม่มีการแปลงผันความยาวคลื่น ณ โนดที่ทำหน้าที่วนสัญญาณกลับ ความยาวคลื่นในทั้งเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองจำเป็นต้องมีค่าตรงกัน แต่ความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นไม่ตรงกับความยาวคลื่นเดิมที่รองรับทราฟฟิกปกติ ดังนั้นในวิธีสำรองบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานก่อนที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะประสบกับปัญหา Wavelength Blocking ได้ง่าย ทำให้ต้องเพิ่มเส้นใยแสงสำรองเส้นใหม่เข้าไปในระบบ อย่างไรก็ตาม ปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้นกับการจัดเส้นทางแบบ Path Protection เนื่องจากทราฟฟิกที่ถูกรบกวนจะถูกย้ายทั้งเส้นทางโดยไม่มีข้อบังคับเรื่องความยาวคลื่นต้องตรงกัน และจากการที่ในบทความ [11] ได้สรุปไว้ว่า ในการจัดเส้นทางให้ทราฟฟิกในสภาวะปกติ ถ้าเป็นวงแหวนที่มีขนาด (จำนวนโนด) เป็นเลขคี่ ความจุในเส้นใยแสงจะสามารถจัดได้เต็ม คือ ความยาวคลื่นทุกค่าในเส้นใยแสงสามารถจัดให้ใช้รองรับทราฟฟิกทั้งหมดจนไม่มีความจุเหลือในเส้นใยแสงทำงานสำหรับรองรับเส้นทางสำรองในวิธี PSW ได้อีก ดังนั้นวิธีสำรองบนเส้นใยแสงทำงานก่อนจะต้องการช่องสัญญาณเพิ่มเสมอ แม้ว่าจะเป็นระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นก็ตาม

จากที่กล่าวมา สรุปความสำคัญของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ว่า อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมีประโยชน์เฉพาะในการสำรองความจุบนเส้นใยแสงทำงานก่อน และเมื่อในเส้นใยแสงทำงานยังคงมีความจุเหลือเพียงพอที่จะรองรับเส้นทางสำรองได้ ทั้งนี้ เมื่อมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะทำให้สามารถนำความจุที่เหลือในเส้นใยแสงทำงานในการรองรับเส้นทางสำรองได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถช่วยประหยัดความจุที่ต้องเพิ่มได้อีก โดยทั่วไป อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมีความสำคัญกับการจัดเส้นทางแบบ Span Protection เสมอ เนื่องจากสามารถขจัดปัญหาที่ต้องใช้ความยาวคลื่นในเส้นทางให้ค่าตรงกัน (Wavelength Blocking) ได้

อย่างไรก็ตาม การจัดสรรความยาวคลื่นในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่ทราฟฟิกปกติก่อนจะจัดสรรความยาวคลื่นสำหรับการป้องกันโครงข่าย หากมีวิธีที่จัดสรรความยาวคลื่นไปพร้อมกันทั้งในเส้นทางปกติและเส้นทางสำรองควบคู่กันไปอย่างเหมาะสม อาจขจัดปัญหา Wavelength Blocking ในกรณีข้างต้นได้ โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นอีก