บทที่ 2

แนวทางที่ใช้ในการออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง

2.1 กล่าวนำ

การออกแบบโครงข่าย WDM ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการสร้างวิถี (Path) การต่อระหว่างโนด (Node) ต่าง ๆ ในโครงข่ายที่ต้องการติดต่อถึงกันในระบบที่ใช้ช่องสัญญาณ WDM เพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกของผู้ใช้ในระบบได้ทั้งหมด ในการสร้างเส้นทางดังกล่าว จะต้องวางเส้นใยแสงในโครงข่าย โดยต้องมีการกำหนดทั้งเส้นทาง (Route) และช่องสัญญาณ (Optical Channel) ซึ่งจะกำหนดเป็นความยาวคลื่นในเส้นใยแสง (Wavelength) ให้แก่ทราฟฟิกแต่ละค่า ในโครงข่าย WDM โดยมากเส้นใยแสงที่ใช้ในการออกแบบมักจะมีจำนวนช่องสัญญาณหรือจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ใน 1 เส้นจำกัดเป็น 2, 4, 8, 16 หรือ 32 ความยาวคลื่น

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในการออกแบบบนพื้นฐานโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง, การคำนวณต้นทุนของโครงข่าย, แบบจำลองทราฟฟิกและโครงข่ายที่จะใช้ในการทดสอบ และส่วนสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์อัลกอริทึมการออกแบบโครงข่ายเบื้องต้น

2.2 ชนิดของโครงข่ายรูปวงแหวน

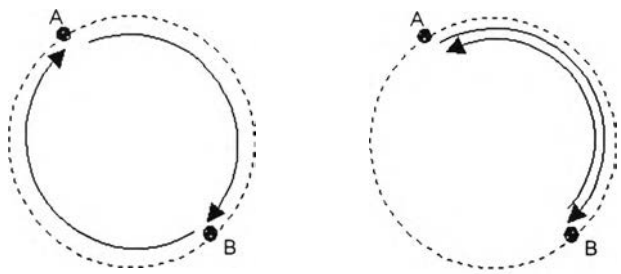
ในส่วนแรกนี้จะกล่าวถึงโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีการใช้ในการออกแบบโครงข่ายในปัจจุบัน [12], [17] แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ วงแหวนแบบ Uni-directional และ Bi-directional โดยมีความแตกต่างอยู่ที่ทิศทางการส่งข้อมูลระหว่างคู่โนดและจำนวนเส้นใยแสงที่ใช้ในระบบ

2.2.1 วงแหวนแบบ *Uni-directional*

ในโครงข่ายวงแหวนชนิดนี้ ข้อมูลทั้งหมดของทุกคู่โนดจะถูกส่งในทิศทางเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นข้อมูลที่ถูกส่งระหว่างโนดหนึ่งไปยังอีกโนดหนึ่งในขาไปจะใช้เส้นทางหนึ่ง ส่วนในขากลับจะใช้อีกเส้นทางหนึ่งบนเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน ดังนั้นจึงใช้เส้นใยแสงเพียง 1 เส้นสำหรับข้อมูลแต่ละค่าในสภาวะปกติ

2.2.2 วงแหวนแบบ *Bi-directional*

ในโครงข่ายวงแหวนชนิดนี้ ข้อมูลที่ถูกส่งระหว่างโนดหนึ่งไปยังอีกโนดหนึ่งขาไปจะใช้เส้นทางเดียวกันกับในขากลับ แต่จะส่งในทิศทางตรงข้าม จึงต้องวางเส้นใยแสง 2 เส้น แต่ละเส้นรองรับข้อมูลของผู้ใช้ในแต่ละทิศทาง



(ก) (ข)

รูปที่ 2.1 (ก) การส่งข้อมูลระหว่างคู่โนด A-B ในวงแหวนแบบ Uni-directional
(ข) การส่งข้อมูลระหว่างคู่โนด A-B ในวงแหวนแบบ Bi-directional

รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างการจัดเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนด A กับโนด B เปรียบเทียบระหว่างโครงข่ายรูปวงแหวนทั้ง 2 แบบ ในรูปที่ 2.1 (ก) เป็นวงแหวนแบบ Uni-directional ข้อมูลจะถูกส่งได้ในทิศทางเดียวเท่านั้น จากตัวอย่าง คือ ทิศทางตามเข็มนาฬิกา ข้อมูลจากโนด A ไปโนด B จึงถูกส่งไปในวงแหวนชุดเดียวกันแต่บนเส้นทางต่างจากข้อมูลที่ส่งจากโนด B กลับมายังโนด A ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายชนิดนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีการจัดเส้นทางให้ทราฟฟิกแต่ละค่า

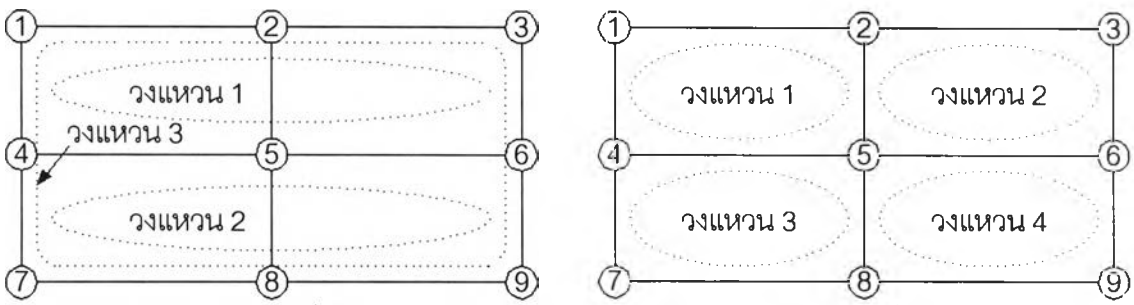
ส่วนในรูปที่ 2.1 (ข) เป็นการส่งข้อมูลในวงแหวนแบบ Bi-directional ข้อมูลทั้งขาไปและขากลับของคู่โนด A และ B ถูกส่งไปในเส้นทางเดียวกันบนเส้นใยแสงต่างชุดกัน ชุดหนึ่งใช้ในการส่งข้อมูลขาไปในทิศทางหนึ่งและอีกชุดหนึ่งใช้สำหรับส่งข้อมูลขากลับในทิศทางตรงข้าม เนื่องจากเส้นทางระหว่างคู่โนดหนึ่ง ๆ ในวงแหวนมี 2 เส้นทาง คือ เส้นทางที่สั้นกว่าและเส้นทางที่ยาวกว่า (เส้นทางทั้ง 2 อาจยาวเท่ากันได้) คู่โนดหนึ่ง ๆ จึงอาจเลือกใช้เส้นทางใดก็ได้ในการรองรับทราฟฟิก โดยส่วนมากในการออกแบบจะเลือกเส้นทางเพื่อให้จำนวนเส้นใยแสงรวมที่ต้องการในวงแหวนต่ำสุด วงแหวนชนิดนี้จึงสามารถออกแบบให้ประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรดีกว่าวงแหวนแบบ Uni-directional ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วงแหวนแบบ Bi-directional ในการออกแบบโครงข่าย

2.3 เทคนิคที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง

การออกแบบด้วยโครงสร้างแบบหลายวงแหวนโดยทั่วไปแบ่งออกตามการจัดเส้นทางให้ทราฟฟิกและการส่งสัญญาณบนวงแหวน [10] เป็น 2 เทคนิคใหญ่ ๆ

เทคนิคที่ 1 เส้นทางใด ๆ ที่ใช้รองรับทราฟฟิกจะต้องอยู่บนวงแหวนเพียงวงเดียว

เทคนิคที่ 2 เส้นทางใด ๆ ที่ใช้รองรับทราฟฟิกไม่จำเป็นต้องอยู่บนวงแหวนวงเดียว สัญญาณสามารถถูกส่งผ่านวงแหวนหลาย ๆ วงได้



รูปที่ 2.2 เทคนิคในการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง

ความแตกต่างระหว่างเทคนิคทั้ง 2 แบบส่งผลกับการเลือกวงแหวนให้โครงข่ายมีลักษณะแตกต่างกันออกไป รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการเลือกวงแหวนโดยใช้เทคนิคแต่ละเทคนิค ในเทคนิคที่ 1 วงแหวนจำนวน 3 วงถูกเลือกเพื่อรองรับทราฟฟิกของทุก ๆ คู่โนด ทราฟฟิกของคู่โนดแต่ละคู่จะถูกรองรับโดยวงแหวนเพียงวงเดียวเท่านั้น เช่น ทราฟฟิกระหว่างคู่โนด 1 และ 9 จะต้องถูกรองรับโดยวงแหวนที่ 3 เท่านั้น ในขณะที่เทคนิคที่ 2 เส้นทางที่รองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โนด 1 และ 9 สามารถวางลงบนวงแหวนมากกว่า 1 วง โดยจะมีการส่งผ่านสัญญาณกันระหว่างวงแหวน ณ โนดร่วมของวงแหวนทั้ง 2 วง เช่น หากทราฟฟิกระหว่างคู่โนด 1 และ 9 ถูกส่งบนเส้นทางที่ผ่านวงแหวนที่ 1 และวงแหวนที่ 4 สัญญาณต้องถูกส่งผ่านระหว่างวงแหวนทั้ง 2 วงที่โนด 5 เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกันจะเห็นว่า วงแหวนที่เลือกสำหรับเทคนิคที่ 1 บางวงจะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะรองรับเส้นทางระหว่างคู่โนดที่อยู่ห่างไกลกันได้ ในขณะที่วงแหวนในเทคนิคที่ 2 อาจมีขนาดเล็กเพราะแต่ละวงไม่จำเป็นต้องรองรับเส้นทางระหว่างคู่โนดได้ตลอดทั้งเส้นทาง การออกแบบในเทคนิคที่ 2 จึงกระทำได้ง่ายกว่าเทคนิคที่ 1

แต่เมื่อพิจารณาในแง่อุปกรณ์ที่ต้องการที่แต่ละโนดในโครงข่าย จะพบว่าการส่งผ่านสัญญาณในเทคนิคแบบที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้จึงต้องมีความซับซ้อน คือ จะต้องมีสวิตช์ที่โนดต่าง ๆ ที่มี

วงแหวนผ่านมากกว่า 1 วงเพื่อใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ ในขณะที่ในเทคนิคที่ 1 การควบคุมจัดการในวงแหวนแต่ละวงมีความอิสระต่อกัน จึงต้องการอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และการควบคุมจัดการในวงแหวนแต่ละวงสามารถกระทำได้ง่ายกว่าในเทคนิคที่ 2 ดังนั้นเพื่อออกแบบโครงข่ายที่ระบบมีความซับซ้อนน้อยที่สุด วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้เทคนิคที่ 1 ในการออกแบบโครงข่าย คือ เส้นทางที่ใช้รองรับทราฟฟิกต้องอยู่บนวงแหวนเพียงวงเดียว ไม่อนุญาตให้ส่งสัญญาณผ่านวงแหวนหลาย ๆ วง และทราฟฟิกทุกค่าของคู่โนดเดียวกันจะต้องถูกกระจายลงบนวงแหวนเดียวกัน

2.4 ค่าต้นทุนของโครงข่าย (Network Cost)

ก่อนจะกล่าวถึงขั้นตอนในการออกแบบโครงข่าย พารามิเตอร์สำคัญที่ต้องนิยาม คือ ค่าต้นทุนของโครงข่าย ต้นทุนจะใช้เป็นตัววัดการใช้ทรัพยากรของโครงข่ายที่ได้ออกแบบไว้ การออกแบบที่ดีควรให้โครงข่ายที่มีค่าต้นทุนต่ำ

เนื่องจากทรัพยากรของโครงข่ายมีความหมายรวมถึงทั้งความต้องการเส้นใยแสงและความต้องการช่องสัญญาณภายในเส้นใยแสงนั้นด้วย ในการคำนวณค่าต้นทุนดังกล่าวจึงต้องทราบค่าจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้ในวงแหวนแต่ละวง (N_λ) และจำนวนช่องสัญญาณหรือจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์กันในเส้นใยแสงแต่ละเส้น (M) เนื่องจากในวงแหวนแต่ละวงจะต้องถูกวางจำนวนเส้นใยแสงเป็นจำนวนเท่า ๆ กันทุกข่ายเชื่อมโยง N_λ จึงมีค่าเท่ากับทราฟฟิกสูงสุด ณ ข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกหนาแน่นที่สุดบนวงแหวนนั้น ทั้ง 2 ค่านี้จะถูกนำมาคำนวณหาจำนวนเส้นใยแสงที่ต้องวางบนวงแหวนแต่ละวง ($fiber_i$) ซึ่งจะมีค่าเป็น $\lceil N_\lambda / M \rceil$ เมื่อ $\lceil x \rceil$ แทนจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับ x

ต้นทุนของวงแหวนแต่ละวง ($RingCost_i$) มีค่าแปรผันตรงกับขนาดของวงแหวน จึงนิยามจากจำนวนโนดในวงแหวนวงนั้น ($Node_i$) คูณด้วยผลคูณระหว่างจำนวนเส้นใยแสงที่วางบนวงแหวนแต่ละวงกับจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์กันในเส้นใยแสง ต้นทุนจึงมีหน่วยเป็น Fiber-span Wavelength ดังสมการที่ (2.2) เมื่อคำนวณหาต้นทุนของวงแหวนแต่ละวงได้แล้ว ต้นทุนของโครงข่ายสามารถคำนวณได้จากผลรวมต้นทุนของวงแหวนทุกวง ดังสมการที่ (2.1) เมื่อ *Nring* คือ จำนวนวงแหวนที่ถูกเลือกเพื่อรองรับทราฟฟิกในโครงข่าย โดยจะมีค่าสูงสุดไม่เกินจำนวนคู่โนดที่มีทราฟฟิกกระจายอยู่ในโครงข่ายนั้น ส่วนขนาดของวงแหวนเฉลี่ย ($Ringsize_{av}$) ซึ่งเป็นค่าที่จะใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบในภายหลังจะมีค่าดังสมการที่ (2.3) คำนวณจากผลรวมของขนาดวงแหวนที่เลือกเพื่อรองรับทราฟฟิกหารด้วยจำนวนวงแหวนทั้งหมดที่เลือก

$$Network\ Cost = \sum_{i=1}^{Nring} RingCost_i \quad (2.1)$$

$$RingCost_i = fiber_i \times M \times Node_i \quad (2.2)$$

$$Ringsize_{av} = \frac{\sum_{i=1}^{Nring} Node_i}{Nring} \quad (2.3)$$

2.5 การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ Exhaustive Search

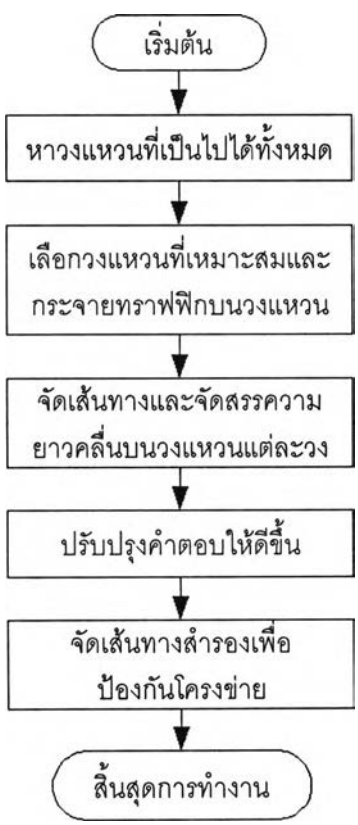
ก่อนจะกล่าวถึงการออกแบบโครงข่ายโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม จะกล่าวถึงการนำการค้นหาคำตอบแบบ Exhaustive Search มาใช้ในการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง การค้นหาคำตอบโดยใช้ Exhaustive Search มีหลักการ คือ ค้นหาคำตอบทุกกรณีที่เป็นไปได้ แล้วทำการเปรียบเทียบเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด ในการนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบโครงข่าย คำตอบที่ได้จึงเป็นคำตอบที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุดอย่างแท้จริง วิธีนี้จึงมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ถึงลักษณะของการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงได้ดี โดยส่วนของการวิเคราะห์ถึงผลของการออกแบบโครงข่ายและข้อจำกัดของวิธีนี้จะได้นำเสนอในท้ายบทต่อไป ผังงานของอัลกอริทึมนี้เป็นดังรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 ผังงานของอัลกอริทึมการออกแบบโดยใช้ Exhaustive Search

ในอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบแบบ Exhaustive Search แบ่งออกได้เป็นหลายขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการหาวงแหวนทุกวงที่สามารถรองรับทราฟฟิกของคู่โนดแต่ละคู่ เพื่อนำมาจัดประกอบกันเป็นชุดของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ก่อนที่จะหาต้นทุนของคำตอบแต่ละแบบจนครบ สุดท้ายจะเปรียบเทียบหาคำตอบที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุดเป็นคำตอบของการออกแบบต่อไป ผังงานของอัลกอริทึมนี้เป็นดังรูปที่ 2.3

2.6 การออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธีโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม ซึ่งได้มีการดัดแปลงมาจาก [10] เพื่อให้เหมาะสมกับปัญหา แบ่งออกเป็นหลายขั้นตอนดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม

คู่โนด (Ring Selection) ในขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างทราฟฟิกของคู่โนดแต่ละคู่กับวงแหวนที่เลือกเพื่อรองรับทราฟฟิก จากนั้นจะเป็นการกระจายทราฟฟิกของคู่โนดบนวงแหวนที่ถูกเลือกทีละวงจนครบทั้งชุดของวงแหวนที่เลือก ในขั้นตอนนี้ทราฟฟิกทั้งหมดของคู่โนดจะต้องถูกกระจายลงบนวงแหวนเพียงวงเดียว เนื่องจากใช้เทคนิคการออกแบบแบบที่ 1 ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 2.3

ขั้นตอนถัดไปเป็นการจัดวิถี โดยการกำหนดเส้นทางให้แก่ทราฟฟิกของคู่โนดแต่ละค่าที่ถูกกระจายลงบนวงแหวนและจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่เส้นทางนั้น (Wavelength Allocation) เนื่องจากต้นทุนของโครงข่ายขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นใยแสง ณ ข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกหนาแน่นที่สุด ขั้นตอนนี้จึงมีจุดประสงค์ คือ ทราฟฟิกที่จัดวิถีทั้งหมดจะต้องกระจายกันอย่างได้ดุลบนวงแหวน เพื่อให้ไม่มีเส้นใยแสง ณ ข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งจำนวนมากเกินไป จากขั้นตอนนี้ทำให้ทราบจำนวนความยาวคลื่นที่ต้องใช้ในวงแหวนแต่ละวง ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหาจำนวนเส้นใยแสงและต้นทุนของโครงข่ายที่ต้องใช้ทั้งหมด วงแหวนที่ถูกเลือกและความสัมพันธ์ระหว่างวงแหวนแต่ละวงกับทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดที่ได้จากขั้นตอนนี้ รวมทั้งค่าต้นทุนที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายนี้จะถูกบันทึกไว้เป็นคำตอบเบื้องต้นของการออกแบบ

ขั้นตอนต่อไปเป็นการปรับปรุงคำตอบหรือการออกแบบที่ได้ให้ดีขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรในวงแหวนแต่ละวงให้คุ้มค่ามากขึ้น โดยจะทดลองย้ายทราฟฟิกของบางคู่โนดจากวงแหวนเดิมไปกระจายลงบนวงแหวนอื่นที่มีทราฟฟิกกระจายอยู่แล้ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรในเส้นใยแสงของวงแหวนที่ใช้รองรับทราฟฟิกให้สูงขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้ต้นทุนของโครงข่ายลดลง ขั้นตอนนี้จะทำวนซ้ำ (Iterative) ไปจนกระทั่งได้คำตอบที่น่าพอใจหรือไม่มีการพัฒนาของคำตอบให้เห็นแล้ว

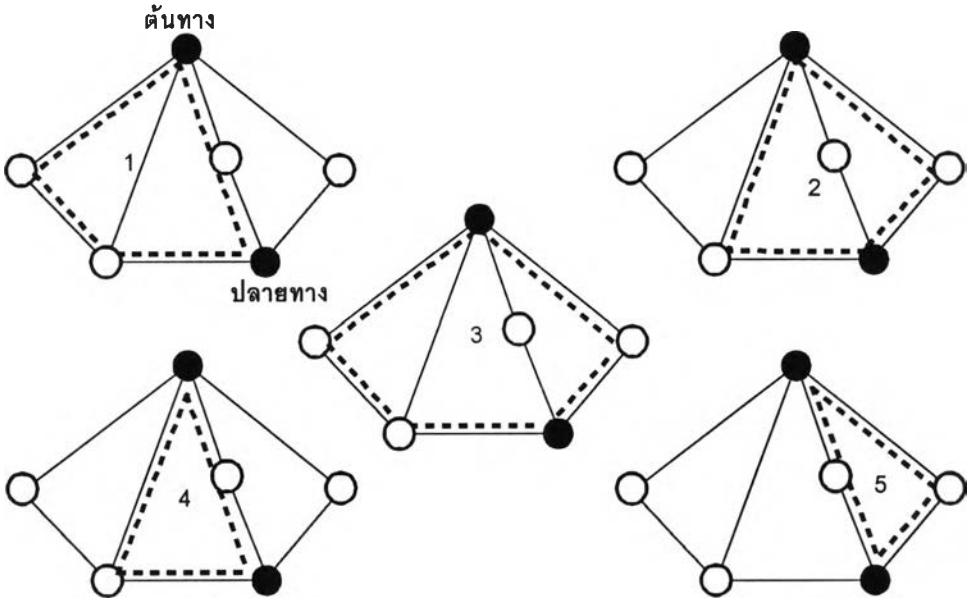
ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการป้องกันโครงข่ายที่ได้ออกแบบไว้แล้วจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ ในโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง การเผื่อความจุสำรองจะทำในวงแหวนแต่ละวงแยกจากกัน ความจุสำรองที่ต้องเผื่อในวงแหวนแต่ละวงจะถูกคำนวณ โดยอาศัยการจัดสรรเส้นทางสำรองและความยาวคลื่นสำรองให้ทราฟฟิกแต่ละค่า เพื่อให้ทราฟฟิกไม่ถูกรบกวนจากสภาพที่เกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง

ขั้นตอนต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงแนวทางในการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงเท่านั้น หัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนอย่างละเอียด ขั้นตอนที่จะกล่าวถึงอย่างละเอียดในบทนี้ ได้แก่ ขั้นตอนการเลือกวงแหวนที่

เหมาะสมและกระจายทราฟฟิกลงบนวงแหวน, ขั้นตอนการจัดสรรเส้นทาง และจัดสรรความยาวคลื่นจะใช้อัลกอริทึมจาก [11] ส่วนขั้นตอนที่เหลือ ได้แก่ ขั้นตอนการปรับปรุงการออกแบบให้ดีขึ้นและการจัดเส้นทางและความยาวคลื่นสำรองเพื่อป้องกันโครงข่าย จะกล่าวถึงอย่างละเอียดในบทที่ 3 และบทที่ 5 ต่อไปตามลำดับ

2.6.1 การเลือกวงแหวนที่เหมาะสมและการกระจายทราฟฟิกลงบนวงแหวน

การเลือกชุดของวงแหวนที่จะมารองรับทราฟฟิกเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดและเป็นขั้นตอนแรกที่ต้องมีการตัดสินใจ เนื่องจากต้องเลือกวงแหวนออกมาจำนวนหนึ่งจากชุดของวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกทั้งหมดระหว่างคู่โนด เนื่องจากคู่โนดแต่ละคู่สามารถสร้างเส้นทางต่อถึงกันได้หลากหลายบนวงแหวนต่าง ๆ กัน วงแหวนที่เป็นตัวเลือกจึงมีจำนวนมาก รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างวงแหวนที่เป็นตัวเลือกในการรองรับทราฟฟิกระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทาง จากรูป วงแหวนที่สามารถรองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โนดมีทั้งหมด 5 กรณี อัลกอริทึมการออกแบบจะต้องตัดสินใจเลือกวงแหวนมา 1 วงจากตัวเลือกที่เป็นไปได้ทั้งหมด



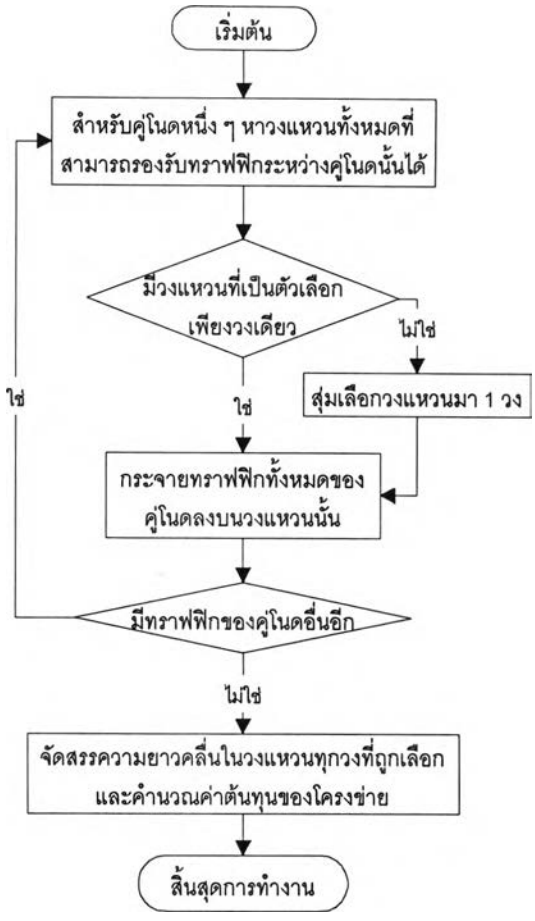
รูปที่ 2.5 ตัวเลือกวงแหวนที่ใช้รองรับทราฟฟิกระหว่างโนดต้นทางและปลายทาง

การเลือกวงแหวนโดยลองทดสอบกับทุกกรณีที่เป็นไปได้หรือ Exhaustive Search เป็นวิธีที่จะสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimum) แต่ทำไม่ได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากหากโครงข่ายมีความซับซ้อนมากขึ้น ชุดของคำตอบจะมีจำนวนมากจนยากที่จะทดสอบกับทุกชุด

ได้ ส่วนวิธีการหาคำตอบด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) มักมีจำนวนตัวแปรมากและต้องใช้เวลานานในการแก้ปัญหา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจำกัดชุดของวงแหวนที่พิจารณาให้เล็กลงโดยเลือกพิจารณาเฉพาะวงแหวนบางวงเท่านั้น โดยในส่วนนี้จะนำเสนออัลกอริทึมการเลือกวงแหวน 2 แบบ คือ การเลือกวงแหวนแบบสุ่ม (Random) และการเลือกวงแหวนโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม (Heuristic Algorithm) ในส่วนนี้จึงเสนออัลกอริทึมการเลือกวงแหวนทั้ง 2 แบบดังกล่าว หลังจากนั้นในท้ายบทนี้ จะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของทั้ง 2 วิธี

2.6.1.1 การเลือกวงแหวนแบบสุ่ม (Random Ring)

ในวิธีการนี้ สำหรับทราฟฟิกของคู่โนดหนึ่ง ๆ จะสุ่มเลือกวงแหวน 1 วงจากชุดของวงแหวนทั้งหมดที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่สามารถรองรับเส้นทางระหว่างคู่โนดได้ โดยไม่คำนึงถึงความยาวของเส้นทาง, ขนาดของวงแหวนและความเหมาะสมของวงแหวนนั้น เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคที่ 1 คือ เส้นทางระหว่างคู่โนดจะต้องกระจายอยู่บนวงแหวนเพียงวงเดียวเท่านั้น และทราฟฟิกทุกค่าของคู่โนดจะต้องถูกกระจายวงบนวงแหวนที่เลือกเพียงวงเดียว ในขั้นตอนกระจายทราฟฟิกจึงกระจายทราฟฟิกทั้งหมดของคู่โนดลงบนวงแหวนที่เลือกเพียงวงเดียว ก่อนที่จะทำขั้นตอนต่อไป คือ การจัดวิถี และคำนวณหาต้นทุนของโครงข่าย ผังงานของการเลือกวงแหวนแบบสุ่มแสดงดังรูปที่ 2.6

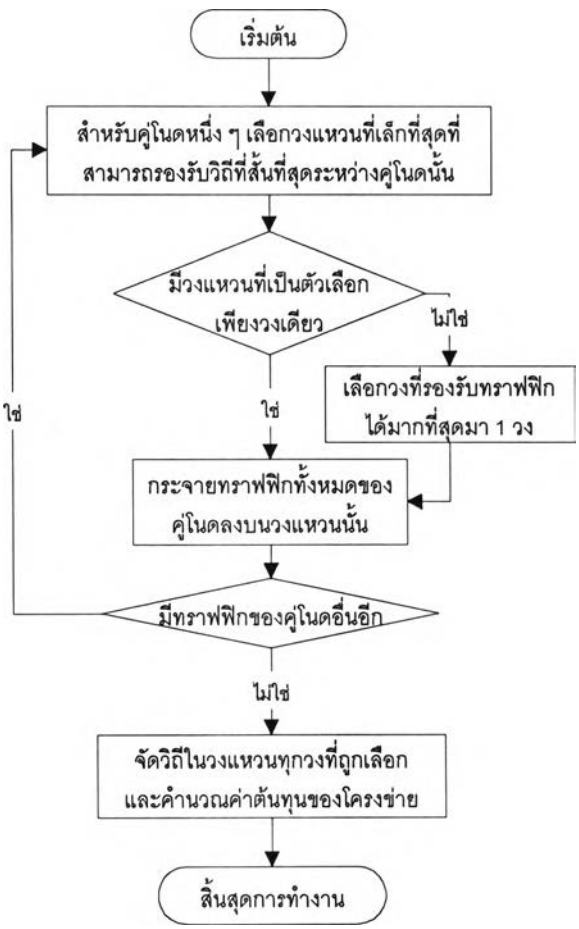


รูปที่ 2.6 ผังงานของการเลือกวงแหวนแบบสุ่ม

2.6.1.2 การเลือกวงแหวนโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม (Heuristic Algorithm)

ในวิธีการนี้ สำหรับทราฟฟิกของแต่ละคู่โนด จะพิจารณาเฉพาะวงแหวนที่สามารถรองรับเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างคู่โนดได้ (Shortest-Route Ring) และเป็นวงแหวนที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่านั้น (Shortest Ring) เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดทำให้ใช้ทรัพยากรซึ่งในที่นี้หมายถึงเส้นใยแสงนับความยาวเป็นฮอปน้อยที่สุด ดังนั้นวงแหวนที่เลือกควรต้องรองรับเส้นทางที่สั้นที่สุดของคู่โนดได้ ประกอบกับค่าต้นทุนของวงแหวนแต่ละวงขึ้นอยู่กับขนาดของวงแหวนที่เลือก ดังนั้นการเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กจะประหยัดต้นทุนของโครงข่ายมากกว่าการเลือกวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ การเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถรองรับเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างคู่โนดจึงน่าจะทำให้การใช้ทรัพยากรในวงแหวนที่เลือกคุ้มค่าที่สุด รูปที่ 2.7 แสดงผังงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมการเลือกวงแหวนแบบ Shortest-Route Shortest Ring (SRSR)

จากผังงาน การเลือกวงแหวนแบบ SRSR นี้จะกระทำกับคู่โนดทีละคู่จนครบทุกคู่ สำหรับคู่โนดหนึ่ง ๆ หากมีวงแหวนที่สอดคล้องตามข้อกำหนดมากกว่า 1 วง เพื่อให้จำนวนวงแหวนที่ถูกเลือกโดยรวมทั้งโครงข่ายน้อยที่สุด จะพิจารณาเลือกวงแหวนที่สามารถรองรับคู่โนดได้เป็นจำนวนมากที่สุดมา 1 วง เมื่อการเลือกวงแหวนนี้กระทำจนครบทุกคู่โนดแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจึงทำการจัดวิถีลงบนวงแหวนแต่ละวง จากนั้นจึงคำนวณหาต้นทุนของโครงข่ายตามวิธีที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 2.4



รูปที่ 2.7 ผังงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมการเลือกวงแหวน
แบบ Shortest-Route Shortest Ring

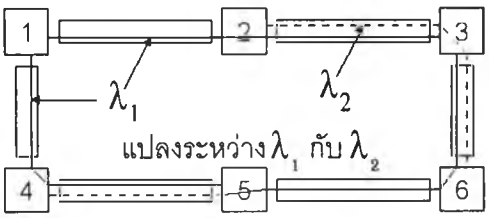
2.6.2 อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter)

ก่อนจะกล่าวถึงการจัดวิถี จะกล่าวถึงความสำคัญของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นก่อน เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่มีความสัมพันธ์กับขั้นตอนการจัดสรรความยาวคลื่นและส่งผลต่อต้นทุนของโครงข่ายโดยตรง

ในระบบที่ใช้การมัลติเพลกซ์แบบ WDM เส้นทาง (Route) หนึ่ง ๆ ที่รองรับทราฟฟิกจะได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดเส้นทาง ตราบใดที่เส้นทางนั้นไม่ถูกจัดสรรความยาวคลื่นค่าเดียวกับเส้นทางอื่นซึ่งจะทำให้สัญญาณกวนกัน อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นซึ่งมีหน้าที่แปลงความยาวคลื่นของสัญญาณข้อมูลจากค่าหนึ่งไปเป็นอีกค่าหนึ่งจึงมีความสำคัญในกรณีที่ไม่สามารถจัดสรรความยาวคลื่นค่าเดียวกันให้ตลอดทั้งเส้นทาง (Wavelength blocking) หรือกรณีที่การจัดสรรความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดเส้นทาง ทำให้ประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรของระบบด้อย เป็นต้น ในระบบที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น เส้นทางจะได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดเส้นทาง เรียกว่าเส้นทางนั้นมีข้อจำกัดด้านความต่อเนื่องทางความยาวคลื่น (Wavelength-Continuity Constraint)

สำหรับกรณีที่นำอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมาเสริมขีดความสามารถของโนดจะทำให้ปัญหาของการจัดสรรความยาวคลื่นในการรองรับทราฟฟิกกระทำได้ง่ายขึ้น เพราะไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการใช้ความยาวคลื่นเดียวตลอดเส้นทางอีกต่อไป ระบบที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมักจะมีประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรด้อยกว่าระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เพื่อให้เห็นถึงประโยชน์ของอุปกรณ์ชิ้นนี้ จะยกตัวอย่างที่กล่าวข้างต้นในรูปที่ 2.8 ทราฟฟิกระหว่างคู่โนด 1-3 และ 1-5 ถูกจัดสรรความยาวคลื่นค่า λ_1 และทราฟฟิกระหว่างคู่โนด 2-6 ถูกจัดสรรความยาวคลื่น λ_2 หากต้องการสร้างช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งช่องระหว่างคู่โนด 3-4 จะเห็นว่าไม่สามารถใช้ความยาวคลื่น λ_1หรือ λ_2 ได้เลย จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นขึ้นอีก 1 ความยาวคลื่น (λ_3) รวมเป็น 3 ความยาวคลื่น แต่ถ้ามีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะสามารถใช้เส้นทาง 3-6-5-4 โดยต้องมีการแปลงผันความยาวคลื่นที่โนด 5 ซึ่งทำให้จำนวนความยาวคลื่นที่ต้องการเหลือเพียง 2 ค่าเท่านั้น การวิเคราะห์ถึงประโยชน์ของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นต่อการพัฒนาของต้นทุนโครงข่ายทั้งในสภาวะปกติและต่อต้นทุนของการป้องกันโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหาย จะได้กล่าวถึงในบทที่ 5 และ 6 ต่อไป



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

2.6.3 การจัดวิถีให้ทราฟฟิกแต่ละค่า

การจัดวิถี คือ การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้แก่ทราฟฟิกแต่ละค่า เป็นขั้นตอนสำคัญในการออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง ในโครงสร้างวงแหวนแบบ Bi-directional เส้นทางที่เป็นไปได้ในการรองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โนดคู่หนึ่งมีให้เลือก 2 เส้นทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกาและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกา และเนื่องจากในโครงข่าย WDM ข้อมูลจะถูกส่งไปในความยาวคลื่นแต่ละค่าแยกจากกันบนเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน ดังนั้นจะต้องเลือกว่าความยาวคลื่นค่าใดที่จะใช้รองรับทราฟฟิกค่านั้น ดังนั้นเมื่อมีความต้องการที่จะกระจายทราฟฟิกค่าหนึ่งลงบนวงแหวนที่เลือก สิ่งที่อัลกอริทึมการจัดวิถีต้องกำหนดให้แก่ทราฟฟิกค่านั้น คือ

1. เส้นทาง (ในทิศทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา)
2. เส้นใยแสง (เส้นใดในแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่จะใช้รองรับเส้นทาง)
3. ความยาวคลื่น (ความยาวคลื่นค่าใดบนเส้นใยแสงที่เลือก)

เมื่อมีทราฟฟิกหลาย ๆ ค่าต้องการจะกระจายลงบนวงแหวนวงหนึ่งร่วมกัน หลังจากอัลกอริทึมการจัดวิถีได้กำหนดเส้นทาง, เส้นใยแสงและความยาวคลื่นบนเส้นใยแสงให้แก่ทราฟฟิกครบทุกค่าแล้ว จะให้ผลลัพธ์เป็นจำนวนความยาวคลื่น และจำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการเพื่อรองรับทราฟฟิกทั้งหมดที่กระจายบนวงแหวนแต่ละวง จำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการบนวงแหวนแต่ละวงจะถูกนำไปใช้คำนวณหาค่าต้นทุนของโครงข่ายต่อไป อัลกอริทึมการจัดวิถีที่ดีจะต้องสามารถจัดวิถีให้จำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการมีค่าต่ำสุดได้

ในวงแหวนวงหนึ่ง การเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดสำหรับรองรับทราฟฟิกค่าหนึ่ง ๆ คือ การใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด เนื่องจากจะใช้ทรัพยากรน้อยที่สุด แต่ทราฟฟิกทุกค่าบนวงแหวนไม่สามารถใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดพร้อม ๆ กันได้ทุกค่า เพราะอาจจะทำให้ความต้องการเส้นใยแสงของบางข่ายเชื่อมโยงมีค่าสูงโดดเด่นกว่าข่ายเชื่อมโยงอื่น ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าสูง อัลกอริทึมการจัดวิถีจึงต้องมีขั้นตอนการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ยาวกว่าให้แก่ทราฟฟิกบางค่า เพื่อให้ความต้องการเส้นใยแสงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงบนวงแหวนมีจำนวนพอ ๆ กัน อันจะทำให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าต่ำสุดได้ อัลกอริทึมที่จะใช้ในการจัดวิถีซึ่งจะใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นฮิวริสติกอัลกอริทึมซึ่งจะนำมาจาก [11]

บทความ [11] มีการจำลองปัญหาการจัดวิถีในวงแหวน 1 วง การแก้ปัญหาในบทความใช้ทั้งวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และฮิวริสติกอัลกอริทึม ผลการทดสอบใน

บทความได้แสดงให้เห็นว่าการจัดวิถีให้ใช้ทรัพยากรน้อยที่สุดสามารถทำโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่อย่างไรก็ตาม การหาคำตอบด้วยวิธีนี้จะใช้ระยะเวลานานมากและสามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้เฉพาะกรณีที่วงแหวนขนาดเล็กเท่านั้น เนื่องจากความซับซ้อนของชุดอสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้ไม่สามารถหาคำตอบได้ภายในเวลาที่เหมาะสม ผลการทดสอบในบทความพบว่าฮิวริสติกอัลกอริทึมซึ่งถูกนำเสนอในบทความนี้สามารถจัดวิถีได้ภายในเวลาที่เหมาะสมและให้ผลทัดเทียมกัน การออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาและเลือกใช้วิธีการจัดวิถีด้วยฮิวริสติกอัลกอริทึม H3 และ H4 ซึ่งใช้กับการจัดวิถีในโครงข่าย WDM ที่ใช้โครงสร้างวงแหวนแบบ Bi-directional ดังที่เสนอในบทความ [11] และในวิทยานิพนธ์นี้จะไม่เสนอวิธีใหม่ในการจัดวิถีอีก สำหรับฮิวริสติกอัลกอริทึม H3 และ H4 มีลักษณะดังนี้

1. ***อัลกอริทึม H3***

ใช้ในการจัดวิถีบนวงแหวนแบบ Bi-directional ในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

2. ***อัลกอริทึม H4***

ใช้ในการจัดวิถีบนวงแหวนแบบ Bi-directional ในระบบที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

2.7 แบบจำลองทราฟฟิกที่ใช้ทดสอบ

ทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดที่จะใช้ทดสอบการออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ นิยามให้เป็นความต้องการช่องสัญญาณเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลจากโนดหนึ่งไปยังอีกโนดหนึ่ง และมีลักษณะคงตัวไม่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา (Static) ค่าต้นทุนที่คำนวณด้วยวิธีที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.4 จึงเป็นต้นทุนในการส่งข้อมูลระหว่างคู่โนดเพียงด้านเดียว แต่ในความเป็นจริง ข้อมูลระหว่างคู่โนดจะมีทั้ง 2 ทิศทาง คือ ทั้งขาไปและขากลับ ซึ่งในระบบวงแหวนแบบ Bi-directional ทราฟฟิกทั้งขาไปและขากลับจะใช้เส้นทางเดียวกันบนวงแหวน ดังนั้นค่าต้นทุนเพื่อให้ส่งข้อมูลได้ทั้ง 2 ทิศทางจึงสามารถคำนวณได้โดยมีค่าเป็น 2 เท่าของค่าต้นทุนในการส่งข้อมูลด้านเดียว อนึ่ง ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่าต้นทุนของการส่งข้อมูลด้านเดียวทั้งหมด

แบบจำลองทราฟฟิกที่ใช้ทดสอบการออกแบบ กำหนดให้มีค่าคงตัวไม่เปลี่ยนแปลง (Static) มี 2 แบบ คือ ทราฟฟิกแบบ Uniform และทราฟฟิกแบบ Non-uniform ทราฟฟิกแบบ Uniform มีลักษณะ คือ คู่โนดแต่ละคู่ต้องการช่องสัญญาณเพื่อเชื่อมต่อเป็นจำนวนเท่า ๆ กันทุก

คู่โนดและมีค่าไม่เท่ากับ 0 ค่าของทราฟฟิกจะมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มบวก เช่น ทราฟฟิกแบบ Uniform ที่มีขนาดเป็น 5 หมายความว่าคู่โนดแต่ละคู่ต้องการช่องสัญญาณในการติดต่อถึงกันจำนวน 5 ช่อง จึงต้องสร้างวิถีจำนวน $5 \times {}^{n}C_{2} = 5 \times \frac{n(n-1)}{2}$ วิถี เพื่อรองรับทราฟฟิกทั้งหมดในโครงข่าย เมื่อ n คือ จำนวนโนดของโครงข่าย ส่วนทราฟฟิกแบบ Non-uniform มีลักษณะ คือ ความต้องการช่องสัญญาณของแต่ละคู่โนดไม่จำเป็นต้องเท่ากันหรือในบางคู่อาจมีค่าเป็น 0 ได้

ตัวอย่างของแบบจำลองทราฟฟิกทั้งแบบ Uniform และ Non-uniform ของโครงข่ายขนาด 5 โนด แสดงดังในรูปที่ 2.9 ตัวเลขในแถวแรกและสดมภ์แรก คือ หมายเลขโนด ส่วนตัวเลขที่อยู่ในตารางหมายถึงทราฟฟิกของคู่โนด

โนด	1	2	3	4	5
1	0	3	3	3	3
2	3	0	3	3	3
3	3	3	0	3	3
4	3	3	3	0	3
5	3	3	3	3	0

ทราฟฟิกแบบ Uniform

โนด	1	2	3	4	5
1	0	2	1	0	7
2	2	0	3	5	2
3	1	3	0	4	1
4	0	5	4	0	5
5	7	2	1	5	0

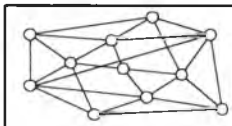
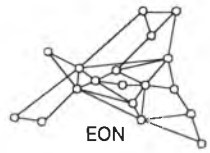
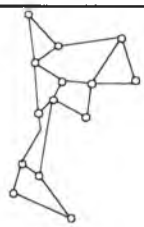
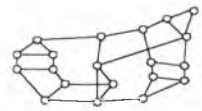
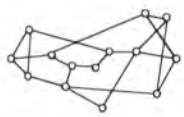
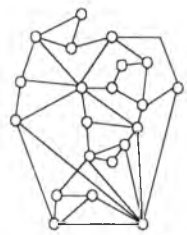
ทราฟฟิกแบบ Non-uniform

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างแบบจำลองทราฟฟิกของโครงข่ายที่มี 5 โนด

2.8 แบบจำลองโครงข่ายที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการออกแบบ

โครงข่ายที่ใช้ในการทดสอบอัลกอริทึมการออกแบบมี 6 โครงข่าย ได้แก่ EUROCore, THAINet, NSFNet, EON, ARPANet และ UKNet โดยเป็นโครงข่ายที่มีผู้จำลองขึ้นจากโครงข่ายที่ใช้งานจริงและมีบทความทางวิชาการ [9] นำไปในการทดสอบการออกแบบโครงข่าย โทโพโลยีทางกายภาพ (Physical Topology), จำนวนโนด และจำนวนข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของโครงข่ายที่จำลองเพื่อใช้ทดสอบอัลกอริทึมการออกแบบ

โครงข่าย	จำนวนโนด	จำนวนข่ายเชื่อมโยง	โครงข่าย	จำนวนโนด	จำนวนข่ายเชื่อมโยง
 EUROCore	11	25	 EON	18	35
 THAINet	14	20	 ARPANet	20	31
 NSFNet	14	21	 UKNet	21	39

ในการออกแบบโครงข่ายและเปรียบเทียบต้นทุนที่ได้จากโครงข่ายแบบต่าง ๆ โดยปกติเราไม่สามารถใช้จำนวนโนดหรือจำนวนข่ายเชื่อมโยงค่าใดค่าหนึ่งโดด ๆ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโครงข่ายต่าง ๆ ได้ โดยโครงข่ายที่มีขนาดเท่ากันอาจมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่แตกต่างกันออกไป หรือโครงข่ายอาจมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงเท่ากันบนโครงข่ายขนาดต่างกันก็ได้ เพื่อให้การเปรียบเทียบเป็นไปด้วยความสะดวกยิ่งขึ้น ตัวแปรหนึ่งซึ่งถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อใช้ในเป็นตัวแทนของทั้งจำนวนข่ายเชื่อมโยงและขนาดของโครงข่าย คือ ค่า Connectivity (C) ซึ่งมีนิยามเท่ากับจำนวนข่ายเชื่อมโยงเฉลี่ยที่อยู่ติดกับโนด สามารถหาได้จากสมการที่ (2.4) และมีหน่วยเป็นข่ายเชื่อมโยงต่อโนด เมื่อ L คือ จำนวนข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย, N คือ จำนวนโนดของโครงข่าย

$$C = \frac{2L}{N} \tag{2.4}$$

โครงข่าย EUROCore, THAINet NSFNet, EON, ARPANet และ UKNet จึงมีค่า Connectivity เป็น 4.55, 2.86, 3.00, 3.89, 3.10 และ 3.71 ข่ายเชื่อมโยงต่อโนดตามลำดับ จะเห็นว่าโครงข่ายที่มีขนาดเล็กเช่น EUROCore อาจมี Connectivity สูงเมื่อเทียบกับโครงข่ายขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงเมื่อเทียบกับขนาดของโครงข่ายสูง เป็นต้น

2.9 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

2.9.1 การทดสอบอัลกอริทึมการออกแบบโดยใช้ Exhaustive Search

การทดสอบอัลกอริทึมการออกแบบโดยใช้ Exhaustive Search จะทดสอบบนโครงข่ายจำลองที่ได้สร้างขึ้นหลาย ๆ แบบซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 4 ถึง 8 โนด ที่มีการสุ่มวางข่ายเชื่อมโยงลงบนโครงข่ายจนได้โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงตามต้องการ โครงข่ายที่จะนำมาทดสอบ คือ โครงข่ายที่มีจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้น้อยที่สุด ผลการทดสอบกับทราฟฟิกแบบ Uniform ที่มีขนาดเป็น 1 ที่ M=1 เป็นดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวน โดยใช้ Exhaustive Search ทดสอบบนเครื่อง Pentium III 667 MHz ที่มี RAM 128 MB

โนด	จำนวนข่ายเชื่อมโยง	จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้	จำนวนวงแหวนที่เลือก	ขนาดวงแหวนเฉลี่ย (โนด)	ต้นทุน (Fiber-span Wavelength)	เวลาคำนวณ (นาที)
4	4	1	1	4.00	12	*
	5	48	3	3.33	10	*
	6	15,625	2	4.00	8	0:38
5	5	1	1	5.00	15	*
	6	384	2	4.50	14	0:01
	7	32,400	3	4.33	13	1:33
	8	64,512,000	∞	∞	∞	∞
6	6	1	1	6.00	24	*
	7	6,144	1	6.00	24	0:23
	8	1,749,600	∞	∞	∞	∞
7	7	1	1	7.00	42	*
	8	196,608	2	6.50	39	24:06
	9	283,435,200	∞	∞	∞	∞
8	8	1	1	8.00	56	*
	9	12,852,912	∞	∞	∞	∞

หมายเหตุ * หมายถึง ใช้เวลาน้อยกว่า 1 วินาที

∞ หมายถึง ใช้เวลานานมากในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด

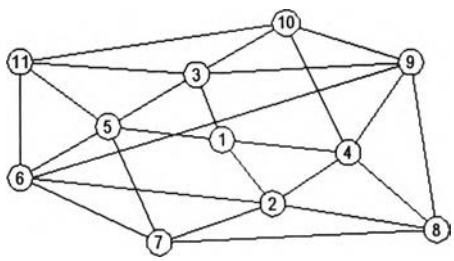
จากตาราง เมื่อพิจารณาโครงข่ายที่มีขนาดเท่ากัน (มีจำนวนโนดเท่ากัน) พบว่าโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงจำนวนมากจะมีต้นทุนที่ต่ำกว่า โครงข่ายที่มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อยที่สุดจะมีต้นทุนสูงที่สุด สังเกตว่าโครงข่ายในกรณีนี้มีลักษณะโทโพโลยีเป็นวงแหวนวงเดียวที่เชื่อมต่อทุกโนดเข้าด้วยกัน ทราฟฟิกทุกค่าจะต้องถูกกระจายลงบนวงแหวนนี้ เส้นทางที่รองรับทราฟฟิกแต่ละค่าจะยาว จึงเป็นสาเหตุทำให้ต้องใช้เส้นใยแสงจำนวนมากในการรองรับทราฟฟิก ส่งผลให้ต้นทุนสูงที่สุดในโครงข่ายที่มีขนาดเท่า ๆ กัน เมื่อโครงข่ายมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงมากขึ้น จะมีวงแหวนที่มีขนาดเล็กลงให้เป็นตัวเลือกได้มากขึ้น ทราฟฟิกของคู่โนดจึงสามารถกระจายบนวงแหวนที่มีขนาดเล็กลงได้มากกว่ากรณีแรก ต้นทุนของโครงข่ายจึงลดลง จากจุดนี้ทำให้สรุปได้ตรงกับผลสรุปแนวทางการเลือกวงแหวนใน [10] ได้ว่าในการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวน เพื่อให้วงแหวนแต่ละวงที่รองรับทราฟฟิกมีขนาดเล็ก จะต้องเลือกวงแหวนหลาย ๆ วงเพื่อรองรับทราฟฟิกทั้งหมดของโครงข่ายมากกว่าวงแหวนเพียงวงเดียวที่มีขนาดใหญ่ และยิ่งจำนวนข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายมากขึ้น ยิ่งเป็นผลดีกับการออกแบบโครงข่าย

เมื่อพิจารณาจำนวนคำตอบทั้งหมด จะพบว่าเมื่อโครงข่ายมี Connectivity สูงขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลกับเวลาที่ใช้คำนวณเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อโครงข่ายมีความซับซ้อนมากขึ้น คือ มี Connectivity สูงกว่า 2.8, 2.33, 2.29 และ 2.25 ในโครงข่ายขนาด 5, 6, 7 และ 8 โนด ตามลำดับ จะมีจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้สูงมาก ทำให้ไม่สามารถหาคำตอบได้ภายในเวลา 5 ชั่วโมง ทั้งนี้ ทำให้สรุปได้ว่าการใช้ Exhaustive Search ในการค้นหาคำตอบ เป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดเล็ก ไม่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่และมี Connectivity สูงขึ้นได้ ดังนั้นในการออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงในโครงข่ายที่มีขนาดมากกว่า 5 โนด จะต้องนำ Heuristic มาใช้ในการออกแบบ แม้ว่าคำตอบที่ได้อาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดเหมือนที่ได้จาก Exhaustive Search ก็ตาม

2.9.2 การเปรียบเทียบการออกแบบเมื่อใช้วิธีการเลือกวงแหวนเบื้องต้นโดยการสุ่มและโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม

ในหัวข้อนี้จะนำผลที่ได้จากอัลกอริทึมการเลือกวงแหวนเบื้องต้น 2 แบบที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2.6.1 ได้แก่ การเลือกวงแหวนแบบสุ่ม และการเลือกวงแหวนโดยใช้ฮิวริสติก SRSR มาเปรียบเทียบกันในด้านต้นทุนของโครงข่ายเพื่อวิเคราะห์หาวิธีที่ดีกว่าในการนำไปใช้กับขั้นตอนการปรับปรุงการออกแบบให้ดีขึ้นในบทที่ 3 ต่อไป

การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ใช้ออกแบบโครงข่าย จะจำลองการออกแบบบนโครงข่ายที่มี Connectivity สูง ในที่นี้จะใช้โครงข่าย EUROCore ซึ่งมีขนาด 11 โนด ดังรูปที่ 2.10 เนื่องจากโครงข่ายนี้มี Connectivity สูง คือ 4.55 ข่ายเชื่อมโยงต่อโนด จึงมีจำนวนวงแหวนที่เป็นตัวเลือกในการออกแบบมาก ซึ่งเหมาะสมแก่การใช้ในการออกแบบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมแบบต่าง ๆ ที่ใช้ออกแบบโครงข่ายได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.10 โครงข่าย EUROCore

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าต้นทุนและจำนวนวงแหวนที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายเมื่อใช้การเลือกวงแหวนแบบสุ่ม เมื่อทดสอบกับทราฟฟิกแบบ Uniform ที่มีปริมาณต่าง ๆ กันตั้งแต่ 1 ถึง 17 จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแสงแต่ละเส้น (M) จะทดสอบกับ 4 ค่า คือ 1, 2, 4 และ 8 เมื่อพิจารณาจำนวนวงแหวนจากตารางที่ถูกเลือกโดยวิธีนี้จะเห็นว่ามีจำนวนมาก คือ 53 วงเกือบเท่ากับจำนวนคู่โนดที่มีในโครงข่ายทั้งหมดซึ่งเท่ากับ $^{11}C_2$ = 55 คู่โนด หมายความว่าทราฟฟิกของคู่โนดแต่ละคู่จะถูกกระจายลงบนวงแหวนที่ไม่ซ้ำกันเลย วงแหวนแต่ละวงรองรับทราฟฟิกของคู่โนดเพียงคู่เดียวเป็นส่วนใหญ่ ต้นทุนของโครงข่ายจึงขึ้นกับการกระจายของทราฟฟิกและการจัดวิถีในวงแหวนแต่ละวงเป็นหลัก เนื่องจากข้อกำหนดที่ว่าทราฟฟิกของคู่โนดหนึ่ง ๆ จะต้องกระจายอยู่ในวงแหวนเพียงวงเดียวทั้งหมด ในกรณีที่วงแหวนแต่ละวงรองรับทราฟฟิกของคู่โนดเพียงคู่เดียว ในการจัดวิถีในวงแหวนเพื่อให้จำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการในวงแหวนแต่ละวงมีค่าน้อยที่สุด จึงต้องแบ่งทราฟฟิกของคู่โนดนั้นเป็น 2 ส่วนเท่ากันหรือให้มีค่าพอ ๆ กัน ครึ่งหนึ่งของทราฟฟิกจะกระจายบนเส้นทางที่สั้นกว่า และอีกครึ่งหนึ่งกระจายบนเส้นทางที่ยาวกว่าเพื่อให้ทราฟฟิกในทุกข่ายเชื่อมโยงมีความสมดุลกัน ทราฟฟิกที่เป็นค่าคู่จะสามารถถูกแบ่งไปในเส้นทางทั้ง 2 เส้นทางได้เท่า ๆ กัน ในขณะที่ทราฟฟิกที่เป็นค่าคี่จะไม่สามารถแบ่งทราฟฟิกให้เท่ากันได้ จึงมีความจุเหลือและมีความต้องการความยาวคลื่นเท่ากับกรณีที่ทราฟฟิกเป็นค่าคู่ที่มากกว่าอยู่ 1 ค่า จากตารางจะเห็นว่าทั้ง 2 กรณีดังกล่าวให้ค่าต้นทุนที่ใกล้เคียงกันในทุก ๆ กรณี การเลือกวงแหวนวิธีนี้จึงทำให้โครงข่ายที่มีทราฟฟิกค่าคี่มีประสิทธิภาพด้อยเสมอ

ตารางที่ 2.3 คำตอบเบื้องต้นที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายเมื่อใช้วิธีการเลือกวงแหวนแบบสุ่ม

ปริมาณทราฟฟิก	M=1		M=2		M=4		M=8	
	ต้นทุน	วงแหวน	ต้นทุน	วงแหวน	ต้นทุน	วงแหวน	ต้นทุน	วงแหวน
U1	467	53	924	53	1848	53	3696	53
U2	481	53	924	53	1848	53	3696	53
U3	953	53	962	53	1848	53	3696	53
U4	962	53	962	53	1848	53	3696	53
U5	1434	53	1886	53	1924	53	3696	53
U6	1443	53	1886	53	1924	53	3696	53
U7	1915	53	1924	53	1924	53	3696	53
U8	1924	53	1924	53	1924	53	3696	53
U9	2396	53	2848	53	3772	53	3848	53
U10	2405	53	2848	53	3772	53	3848	53
U11	2877	53	2886	53	3772	53	3848	53
U12	2886	53	2886	53	3772	53	3848	53
U13	3358	53	3810	53	3848	53	3848	53
U14	3367	53	3810	53	3848	53	3848	53
U15	3839	53	3848	53	3848	53	3848	53
U16	3848	53	3848	53	3848	53	3848	53
U17	4320	53	4772	53	5696	53	7544	53

หมายเหตุ Ux คือ ทราฟฟิกแบบ Uniform ที่มีขนาดเป็น x

เมื่อพิจารณาผลกระทบจากการเพิ่มปริมาณทราฟฟิกและการเปลี่ยนค่าจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์กันในเส้นใยแสง (M) จะพบว่าค่าต้นทุนจะมีการเปลี่ยนแปลงทุก ๆ ค่าของทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นที่ M=1 แต่เมื่อ M เพิ่มขึ้นเป็น 2, 4 และ 8 ต้นทุนจะมีการเปลี่ยนแปลงทุกครั้งที่ปริมาณทราฟฟิกเพิ่มขึ้นจากค่าคู่เป็นค่าคี่ และยิ่ง M มีค่ามากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของต้นทุนจะช้ากว่าที่ M มีค่าน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการที่เส้นใยแสง 1 เส้นที่มีจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแสง 1 เส้นเท่ากับ M หากมีทราฟฟิกของคู่โนดเพียงคู่เดียวกระจายอยู่บนวงแหวน วงแหวนนั้นจะสามารถรองรับทราฟฟิกได้สูงสุดเท่ากับ 2M ดังนั้นค่าทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นจาก 2M เป็น 2M+1 ทำให้ไม่สามารถวางทราฟฟิกลงไปในวงแหวนโดยใช้เส้นใยแสงเดิมที่มีอยู่ได้อีก จำเป็นต้องเพิ่มเส้นใยแสงใหม่เข้าไปในวงแหวน ต้นทุนของ

โครงข่ายจึงเพิ่มขึ้นอย่างมาก ณ จุดที่ทราฟฟิกเพิ่มขึ้นจาก 2M เป็น 2M+1 ดังนั้นที่ M มีค่าสูง ๆ เช่น 8 ความจุในเส้นใยแสงจะมากกว่า ทำให้การเพิ่มขึ้นของค่าต้นทุนตามทราฟฟิกช้ากว่าที่ M น้อย ๆ

การเพิ่มขึ้นของต้นทุนในการเลือกวงแหวนแบบสุ่มนี้จึงขึ้นกับทั้งทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นและจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแสง (M) การเลือกวงแหวนแบบนี้ทำให้จำนวนวงแหวนที่ถูกเลือกมีจำนวนมาก คือ จะซ้ำกันน้อยมาก ในกรณีที่เลวร้ายที่สุด จำนวนวงแหวนจะมีค่าเท่ากับจำนวนคู่โนด คือ $\frac{n \times (n-1)}{2}$ เมื่อ n คือ ขนาดของโครงข่าย (โนด)

เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนและจำนวนวงแหวนที่ได้จากการเลือกวงแหวนโดยใช้ฮิวริสติกแบบ SRSR ดังแสดงในตารางที่ 2.4 จะพบว่าการเลือกวงแหวนแบบ SRSR ให้ค่าต้นทุนที่ต่ำกว่าการเลือกวงแหวนแบบสุ่มในทุก ๆ กรณี โดยต้นทุนจะต่ำกว่าอยู่ประมาณ 59-70% และจำนวนวงแหวนที่เลือกมีจำนวนลดลงเท่ากับ 35 วง นั่นแสดงว่าวงแหวนแต่ละวงรองรับทราฟฟิกของคู่โนดได้มากขึ้น เนื่องจากการเลือกวงแหวนแบบ SRSR นี้จะกำหนดให้เลือกวงแหวนที่สามารถรองรับเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างคู่โนดและเป็นวงแหวนที่เล็กที่สุด วงแหวน 1 วงซึ่งมีขนาด m โนด จะสามารถรองรับทราฟฟิกของคู่โนดตามข้อกำหนดข้างต้นได้อย่างน้อย m คู่โนด และอย่างมาก ${}^{m}C_{2}$ คู่โนด ดังนั้นวงแหวนที่เลือกจึงอาจซ้ำกันได้โดยเฉพาะวงแหวนที่มีขนาดเล็ก ประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรของวงแหวนในกรณีนี้จึงมีค่าสูงกว่าในการเลือกวงแหวนแบบสุ่ม อีกทั้งขนาดของวงแหวนที่เลือกที่มีขนาดเล็ก จึงส่งผลให้ต้นทุนของโครงข่ายลดลง แต่อย่างไรก็ตาม การเลือกวงแหวนวิธีนี้ยังคงมีลักษณะต้นทุนขึ้นอยู่กับปริมาณทราฟฟิกและค่า M คล้ายกับการเลือกแบบสุ่ม คือ ต้นทุนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นของทราฟฟิกเพียงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลงมากนักหากทราฟฟิกส่วนที่เพิ่มขึ้นมานั้นยังคงสามารถเติมเต็มในเส้นใยแสงที่มีอยู่เดิมได้ แต่เมื่อทราฟฟิกเปลี่ยนแปลงจาก 2M เป็น 2M+1 ทำให้ต้องวางเส้นใยแสงเส้นใหม่เข้าไปในโครงข่าย ต้นทุนของโครงข่ายจะสูงขึ้นอย่างมาก

ตารางที่ 2.4 คำตอบเบื้องต้นที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายเมื่อใช้วิธีการเลือกวงแหวนแบบ Shortest-Route Shortest-Ring (SRSR)

ปริมาณทราฟฟิก	M=1		M=2		M=4		M=8	
	ต้นทุน	วงแหวน	ต้นทุน	วงแหวน	ต้นทุน	วงแหวน	ต้นทุน	วงแหวน
U1	160	35	278	35	556	35	1112	35
U2	193	35	296	35	556	35	1112	35
U3	353	35	386	35	592	35	1112	35
U4	386	35	386	35	592	35	1112	35
U5	546	35	664	35	736	35	1112	35
U6	579	35	682	35	772	35	1184	35
U7	739	35	772	35	772	35	1184	35
U8	772	35	772	35	772	35	1184	35
U9	932	35	1050	35	1328	35	1472	35
U10	965	35	1068	35	1328	35	1472	35
U11	1125	35	1158	35	1364	35	1544	35
U12	1158	35	1158	35	1364	35	1544	35
U13	1318	35	1436	35	1508	35	1544	35
U14	1351	35	1454	35	1544	35	1544	35
U15	1511	35	1544	35	1544	35	1544	35
U16	1544	35	1544	35	1544	35	1544	35
U17	1704	35	1822	35	2100	35	2656	35

จากผลการทดสอบการออกแบบโครงข่ายโดยใช้การเลือกวงแหวนทั้ง 2 วิธี สรุปได้ว่าในการเลือกวงแหวนเพื่อให้ได้ต้นทุนต่ำมีแนวทางดังนี้

1. ควรเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กมากกว่าการเลือกวงแหวนที่ไม่คำนึงถึงขนาดของวงแหวน
2. ควรให้วงแหวนแต่ละวงแหวนสามารถรองรับทราฟฟิกของคู่โนดได้หลาย ๆ คู่โนด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรในวงแหวน

ถึงแม้ว่าการเลือกวงแหวนแบบ SRSR นี้ทำให้การใช้ทรัพยากรในวงแหวนแต่ละวงมีประสิทธิภาพมากกว่าการเลือกวงแหวนแบบสุ่ม แต่ต้นทุนที่ได้ยังคงมีค่าสูง ดังนั้นจึงต้องตามด้วยการปรับปรุงการออกแบบโครงข่าย เพื่อหาคำตอบที่มีค่าต้นทุนต่ำต่อไป ซึ่งมีวิธีการดังที่จะกล่าวถึงในบทที่ 3