การศึกษาความเป็นไปได้การใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสง
ในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน

นายณัฏฐา ชื่นประเสริฐสุข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FEASIBILITY STUDY ON THE EMPLOYMENT OF OPTICAL PHASE CONJUGATOR IN WDM RING NETWORKS

Mr.Nuttha Chuenprasertsuk

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้การใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน
โดย	นายณัฏฐา ชื่นประเสริฐสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์.ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.พสุ แก้วปลั่ง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ภูมิพัฒ แสงอุดมเลิศ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์.ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณัฏฐา ชื่นประเสริฐสุข : การศึกษาความเป็นไปได้การใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน. (FEASIBILITY STUDY ON THE EMPLOYMENT OF OPTICAL PHASE CONJUGATOR IN WDM RING NETWORKS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 156 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวนเพื่อชดเชยผลของดิสเพอร์ชั่นในโครงข่าย วิธีที่นำเสนอนั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับการวางทั้งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift-free) และเลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift) และทั้งบนโครงข่ายปกติและโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งมีกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น (path protection) และการทอดข้าม (span protection) วิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงนั้น ทำได้โดยการวิเคราะห์ทราฟฟิกของข้อมูลทั้งหมดและวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิกและกำหนดตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เพื่อให้ได้ตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดลองวางเครื่องสังยุคเฟสแสงทั้ง 2 ชนิด โดยใช้วิธีการที่นำเสนอ ลงบนโครงข่ายตัวอย่างที่มีทั้งหมด 6 สถานี ซึ่งมีความยาวรวม 637 กิโลเมตร ทั้งบนโครงข่ายบกติและมีข่ายเชื่อมโยงเสียหายพบว่าจำเป็นต้องใช้เครื่องสังยุคเฟสแสง 12 ตัว บนเส้นใยแสงทำงาน (working fiber) และ 12 ตัว บนเส้นใยแสงป้องกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ optical signal to noise ratio (OSNR) ในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวนโดยใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นขณะโครงข่ายทำงานปกติ ผลจากการวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อทำการเครื่องสังยุคเฟสแสง 1 ตัว 2 ตัว และ 3 ตัว ค่า OSNR จะลดลง 1.8245 dB 1.8405 dB และ 1.8940 dB ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีซึ่งไม่มีเครื่องสังยุคเฟสแสง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2550

4970300721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: OPTICAL FIBER TRANSMISSION / WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING / RING NETWORK / OPTICAL PHASE CONJUGATTION / DISPERSION COMPENSATION / SINGLE LINK FAILURE / PROTECTION SCHEME /

NUTTHA CHUENPRASERTSUK : FEASIBILITY STUDY ON THE EMPLOYMENT OF OPTICAL PHASE CONJUGATOR IN WDM RING NETWORKS. THESIS ADVISOR : PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 156 pp.

This thesis proposes a method for placing the optical phase conjugators (OPCs) in DWDM ring network in order to compensate for the accumulated fiber dispersion in the network. Our method can be applied for the placement of both wavelength-shift-free OPC and wavelength-shift OPC, in both normally operated network and network where a link failure is protected by the path protection algorithm and the span protection algorithms. Our method is implemented by analyzing all possible traffics in the network, then, finding placement ranges of OPCs, and finally determining the most suitable positions of OPCs.

By demonstrating our proposed method using both types of OPCs on a sample network which consists of 6 nodes with total length of 637 km. We found that 12 OPCs are necessary for installing in the working fiber, while 12 OPCs are required for the protection fiber. When we analyze optical-signal-to-noise ratio (OSNR) in the sample network that employs the wavelength-shift OPC, the OSNR is found to drop 1.8245 dB, 1.8405 dB, and 1.8940 dB, where 1 OPC, 2 OPCs, and 3 OPCs, respectively, are employed on a link comparing to the OSNR without OPC.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering Student's signature นัฐนา ชื่นประเสริฐสุข

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature

Academic year 2007

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จเรียบร้อยได้ก็ด้วยความเสียสละ ความอนุเคราะห์ และน้ำใจจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในการกรุณาของทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง ที่ได้ให้คำปรึกษา ให้แนวคิด และช่วยตรวจแก้ไขในส่วนที่บกพร่องต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้น จนกระทั่งเขียนวิทยานิพนธ์สำเร็จเป็นรูปเล่ม และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุก ๆ ท่าน

ขอขอบคุณโครงการเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและภาคเอกชนทางด้านการวิจัยและพัฒนา (Cooperation Project between department of electrical engineering and private sector research and development) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี (2549-2550) และทุนสนับสนุนการวิจัยจากบัณฑิตศึกษา

ขอบคุณเพื่อนทุกๆ คน ที่คอยให้คำปรึกษา และคอยให้กำลังใจและสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การ สนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4
1.3 ขั้นตอนดำเนินงาน 4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ 7
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง 7
2.1.1 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง 8
2.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปร่างและกำลังของสัญญาณ 9
2.1.2.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ (Attenuation loss) 9
2.1.2.2 ดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสง (Fiber dispersion) 11
2.1.2.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity) 14
2.2 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสง 17
2.2.1 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการสื่อสารด้วยแสงระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น 17
2.2.1.1 WDM systems and components 17
2.2.1.2 DWDM System 18
2.2.1.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ DWDM 19
2.2.1.2.2 DWDM Component 21
2.3 โครงข่าย SDH 29
2.3.1 เครือข่าย SDH แบบวงแหวน 29
2.3.2 การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่าย SDH แบบวงแหวน 30

2.3.2.1 การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่ายโดยการเปลี่ยนความยาวคลื่น (path protection) 31
2.3.2.2 การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่ายโดยการใช้เส้นใยแสงสำรอง (span protection) 31
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีการจัดการดิสเพอร์ชั่น (Dispersion management) ... 33
2.5 เครื่องสังยุคเฟสแสง (Optical Phase Conjugation) 35
2.5.1 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีเครื่องสังยุคเฟสแสง (Optical Phase Conjugation) 35
2.5.2 ชนิดของเครื่องสังยุคเฟสแสง 38
2.5.2.1 เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength shift) 38
2.5.2.2 เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น (wavelength shift free) 39
2.5.3 ประสิทธิภาพเครื่องสังยุคเฟสแสง 39
2.5.4 การจัดการดิสเพอร์ชั่นด้วยเครื่องสังยุคเฟสแสง 40
บทที่ 3 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบวงแหวน 43
3.1 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น 44
3.1.1 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ 45
3.1.1.1 การวิเคราะห์เส้นทางและทิศทางของทราฟฟิก 45
3.1.1.2 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ 47
3.1.1.3 การกำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ 50
3.1.2 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น 54
3.1.2.1 การวิเคราะห์เส้นทางและทิศทางของทราฟฟิกบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น ... 55
3.1.2.2 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น 60

3.1.2.3 การกำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น 61
3.1.3 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม 64
3.1.3.1 การวิเคราะห์เส้นทางและทิศทางของทราฟฟิกบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม 65
3.1.3.2 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม 74
3.1.3.3 การกำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม 78
3.2 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น 83
3.2.1 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ 83
3.2.1.1 การวิเคราะห์จำนวนความยาวคลื่น 83
3.2.1.2 การวิเคราะห์เส้นทางและทิศทางของทราฟฟิกบนโครงข่ายปกติ 85
3.2.1.3 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ 87
3.2.1.4 การกำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ 89
3.2.2 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น 93
3.2.2.2 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น 98
3.2.3 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม 104
3.2.3.2 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม 113

3.2.3.3 การกำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม 117
3.3 วิเคราะห์ผล OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ 124
บทที่ 4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 129
4.1 บทสรุป 129
4.2 ข้อเสนอแนะ 130
รายการอ้างอิง 131
ภาคผนวก 134
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ 135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 142

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 3.1 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่สั้นที่สุด 45
ตารางที่ 3.2 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน 47
ตารางที่ 3.3 แสดงทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง 48
ตารางที่ 3.4 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ 55
ตารางที่ 3.5 สรุปทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนแปลงจากทราฟฟิกปกติ 58
ตารางที่ 3.6 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน 59
ตารางที่ 3.7 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของ
โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย 60
ตารางที่ 3.8 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ 65
ตารางที่ 3.9 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน 71
ตารางที่ 3.10 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของ
โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย 74
ตารางที่ 3.11 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่สั้นที่สุด 85
ตารางที่ 3.12 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน 86
ตารางที่ 3.13 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของ
โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย (แบบมีความยาวคลื่นเพียงพอ) 88
ตารางที่ 3.14 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ 93
ตารางที่ 3.15 สรุปทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนแปลงจากทราฟฟิกปกติ 96
ตารางที่ 3.16 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน 97
ตารางที่ 3.17 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของ
โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย (แบบมีความยาวคลื่นเพียงพอ) 98
ตารางที่ 3.18 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ 105
ตารางที่ 3.19 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน .. 110
ตารางที่ 3.20 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของ
โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย (แบบมีความยาวคลื่นไม่เพียงพอ) 113
ตารางที่ 3.21 กำลังขยายทั้งหมดในการส่งข้อมูลและจำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใช้ 125
ตารางที่ 3.22 ค่าอัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงกับ OSNR ใน
โครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องสังยุคเฟสแสง 127

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง [18] 7
รูปที่ 2.2 ระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะทางไกล 8
รูปที่ 2.3 Optical fiber attenuation vs. wavelength [21] 10
รูปที่ 2.4 Group velocities และ GVD ในแต่ละความยาวคลื่น [20] 11
รูปที่ 2.5 Chromatic dispersion [23] 12
รูปที่ 2.6 การเกิด Inter-symbol interference [21] 13
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_2 และ D ในช่วงของดิสเพอร์ชั่น 14
รูปที่ 2.8 WDM system and components 17
รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารโทรคมนาคมแบบ DWDM 21
รูปที่ 2.10 คับเปลอร์เส้นใยแสงแบบ 2 x 2 สำหรับมัลติเพล็กซ์แสง 2 ช่องสัญญาณ 23
รูปที่ 2.11 โครงสร้างพื้นฐานของคับเปลอร์แบบระนาบ [22] 23
รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของออปติคอลฟิลเตอร์ในรูป (ก) และ Mux ในรูป (ข) [22] 24
รูปที่ 2.13 การเกิดแสงของสสารเมื่อถูกกระตุ้น [22] 26
รูปที่ 2.14 การทำงานของสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDFA [22] 27
รูปที่ 2.15 โครงสร้างพื้นฐานของ OADM [22] 27
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของ OXC ที่ใช้ Optical Planar Waveguide [22] 28
รูปที่ 2.17 โครงข่ายวงแหวนแบบ uni-directional ทิศทางตามเข็มนาฬิกา 30
รูปที่ 2.18 โครงข่ายวงแหวนแบบ bi-directional 30
รูปที่ 2.19 การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่ายโดยการเปลี่ยนความยาวคลื่น 31
รูปที่ 2.20 การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่ายโดยการใช้เส้นใยแสงสำรอง 32
รูปที่ 2.21 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชั่นเพื่อขจัดความผิดเพี้ยน 34
รูปที่ 2.22 ระบบการสื่อสัญญาณทางแสงที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ 34
รูปที่ 2.23 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตโดยกระบวนการ FWM ใน third-order nonlinear medium 36
รูปที่ 2.24 รูปแบบพลังงานของสัญญาณในการส่ง 37
รูปที่ 2.25 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น 38
รูปที่ 2.26 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบเลื่อนความยาวคลื่น 39
รูปที่ 2.27 ประสิทธิภาพของเครื่องสังยุคเฟสแสง [32] 40
รูปที่ 2.28 ระบบการสื่อสัญญาณทางแสงที่มีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงไว้ที่กึ่งกลางระบบ 40

รูปที่ 2.29 กำลังสัญญาณของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง ที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ 41
รูปที่ 3.1 การหาช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง 44
รูปที่ 3.2 โครงข่ายตัวอย่าง 45
รูปที่ 3.3 ดิสเพอร์ชั่นของ เส้นใยแสงชนิด SMF 48
รูปที่ 3.4 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา 51
รูปที่ 3.5 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา 51
รูปที่ 3.6 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว 52
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี 53
รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงเส้นทางของทราฟฟิกเมื่อข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น 55
รูปที่ 3.9 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา 62
รูปที่ 3.10 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา 62
รูปที่ 3.11 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว 63
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี 64
รูปที่ 3.13 การเปลี่ยนแปลงเส้นทางของทราฟฟิกเมื่อข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม 65
รูปที่ 3.14 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา 79
รูปที่ 3.15 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา 79
รูปที่ 3.16 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา 80
รูปที่ 3.17 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา 80
รูปที่ 3.18 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว 81
รูปที่ 3.19 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี 82
รูปที่ 3.20 แสดงจำนวนช่องความยาวคลื่นที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (3.4) 84
รูปที่ 3.21 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา 90
รูปที่ 3.22 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา 90
รูปที่ 3.23 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว 91
รูปที่ 3.24 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี 92
รูปที่ 3.25 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา 100
รูปที่ 3.26 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา 100
รูปที่ 3.27 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว 101

รูปที่ 3.28 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี 103
รูปที่ 3.29 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา 118
รูปที่ 3.30 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา..... 118
รูปที่ 3.31 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา 119
รูปที่ 3.32 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา..... 119
รูปที่ 3.33 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว 120
รูปที่ 3.34 ค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี..... 122

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

การสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ดังนั้นการพัฒนาศักยภาพของเทคโนโลยีการสื่อสาร จึงได้รับความสนใจทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพจากนักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญมากมาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอแนวทางในการพัฒนารูปแบบ และวิธีการซึ่งมีส่วนช่วยพัฒนาระบบการสื่อสารให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อทุกคนมีความต้องการในการติดต่อสื่อสารทำให้ระบบสื่อสารมีการพัฒนา จากในอดีตที่ผ่านมา การติดต่อสื่อสารจะอยู่ในรูปแบบของการส่งสัญญาณไฟฟ้าผ่านเส้นทองแดงชนิดสายคู่พันเกลียว (twisted pair) หรือ สายเคเบิลแกนร่วม (coaxial cable) ซึ่งในปัจจุบันปริมาณการส่งข้อมูล (data traffic) มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามการพัฒนาของเทคโนโลยี ส่งผลให้การสื่อสารในรูปแบบเดิมมีแบนด์วิดท์ไม่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้น และระยะทางในการติดต่อสื่อสารที่ต้องการส่งให้ได้ไกลขึ้น ทำให้มีการพัฒนาการสื่อสารทางไฟฟ้า (Electrical communication) มาเป็นการสื่อสารทางแสง (optical communication) เนื่องจากคุณสมบัติของการสื่อสารทางแสงที่มีแบนด์วิดท์ที่สูงและส่งได้ในระยะทางที่ไกลมากขึ้น ทำให้การสื่อสารทางแสงสามารถรองรับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ดีกว่าการสื่อสารรูปแบบอื่น

เส้นใยแสงเป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านสัญญาณดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางที่ใช้ส่งสัญญาณอื่นๆ จะพบว่าเส้นใยแสงมีข้อดีมากมาย [1] เช่น

1. เส้นใยแสงมีอัตราการสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแสงต่ำ ทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกล กว่าและใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณและอุปกรณ์ขยายสัญญาณน้อยกว่าการสื่อสารแบบอื่น

2. เส้นใยแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาซึ่งสามารถติดตั้งได้ง่าย จากการที่มีขนาดเล็กจึงสามารถ รวมเส้นใยแสง หลายเส้นเข้าด้วยกันเป็นสายเคเบิลทำให้ได้จำนวนเส้นที่มากขึ้น เป็นการเพิ่มช่องทางการสื่อสารให้มากขึ้นจากการใช้พื้นที่เท่าเดิม

3. เส้นใยแสงถูกผลิตมาจากวัสดุฉนวนไฟฟ้า จึงปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้มีความถูกต้องของสัญญาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสื่อประเภทอื่น ข่าวสารที่ส่งไปกับแสงจะมีตำแหน่งรับและส่งที่แน่นอน ดังนั้นการแอบลักลอบใช้สัญญาณทางแสงเพื่อดักฟังจึงไม่สามารถกระทำได้

4. เส้นใยแสงทำจากวัสดุที่ไม่มีการเจือจาง และการออกแบบสายเคเบิลของเส้นใยแสงมีความต้านทานต่อทั้งอุณหภูมิและความชื้น ทำให้สามารถนำเส้นใยแสงไปใช้ใต้น้ำได้และเส้นใยแสงยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานอีกด้วยซึ่งเส้นใยแสงบางเส้นมีอายุการใช้งานประมาณ 40 ปี อีกทั้งความต้องการการบำรุงรักษายังน้อยมาก

จากข้อดีที่ได้กล่าวมา เห็นได้ว่าโครงข่ายทางแสง (Optical network) ที่ใช้เส้นใยแสงเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณนั้น มีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้เป็นโครงข่ายแกนหลัก (Core network), โครงข่ายขนส่งระยะไกล (Long-haul network), โครงข่ายบริเวณกว้าง (WAN) หรือแม้กระทั่งโครงข่ายนครหลวง (MAN)

โครงข่ายแบบวงแหวนเป็นโครงข่ายที่ใช้งานอยู่อย่างแพร่หลายในโครงข่าย MAN/WAN เนื่องจากเป็นโครงข่ายที่เชื่อถือได้ (reliability) ไม่มีการชนกันของข้อมูลเพราะข้อมูลมีการเดินทางในทิศทางเดียวกัน และมีการป้องกันการล่มของโครงข่าย (Protection) ในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแบบวงแหวนมีการแบ่งการเข้าใช้ช่องสัญญาณทางเวลา (Time Division Multiplexing, TDM) ซึ่งใช้อุปกรณ์ในโครงข่ายแบบอิเล็กทรอนิกส์ ต่อมามีการแบ่งการเข้าใช้ช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM) ทำให้สามารถใช้อุปกรณ์แบบแพสซีฟและสามารถส่งข้อมูลอนาล็อกได้ (analog) แต่ระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น(channel spacing) ยังห่างอยู่มาก เพื่อให้ใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงได้มีการเปลี่ยนเป็นการแบ่งการเข้าใช้ช่องสัญญาณทางความยาวคลื่นแบบหนาแน่น (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) แทน [2] โดยมีตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ งานวิจัยที่ศึกษาถึงข้อดีของ DWDM ที่สามารถกำหนดความยาวคลื่นที่ใช้ของข้อมูลทั้งแบบอัตโนมัติ (Dynamic traffic) และกำหนดค่าเอง (static traffic) ในการสื่อสารในโครงข่าย [3] สามารถทำงานร่วมกับการเชื่อมต่ออื่นได้ เช่น การสื่อสารผ่านดาวเทียม เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบ เป็นต้น [4] งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันการล่มของระบบ DWDM เช่น การหากระบวนวิธี (algorithm) เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางการเชื่อมต่อที่ชำรุด การจัดสรรการใช้งานความยาวคลื่น [5], [6] เป็นต้น ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการวางเครื่องขยายสัญญาณทางแสงในระบบ DWDM แบบวงแหวน [7]

แต่ด้วยความต้องการอัตราข้อมูลที่ยังมีอยู่อย่างไม่จำกัด ทำให้ยังคงมีการพัฒนาโครงข่ายทางแสงอย่างต่อเนื่อง แต่ถ้าจะทำการเปลี่ยนแปลงทั้งโครงข่ายจะต้องลงทุนสูง ดังนั้นจึงเน้นไปที่การพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายแทน อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายปัจจุบันมี 2 ประเภท ได้แก่ อุปกรณ์แบบกัมมันต์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Active component) และอุปกรณ์แบบอกัมมันต์หรืออุปกรณ์ที่ไม่ใช้พลังงานในการทำงาน (passive component) แต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นมีความเร็วต่ำ จึงเริ่มมีการหันมาใช้อุปกรณ์แบบแพสซิฟ ซึ่งรองรับข้อมูลที่มีความเร็วสูงขึ้นและระยะทางในการส่งไกลขึ้น แต่ก็จะมีผลกระทบอื่นตามมา เช่น การลดทอนของสัญญาณ (Attenuation), การขยายออกของสัญญาณ (Dispersion) และความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) แต่เราสามารถจัดการผลกระทบได้

การลดทอนสัญญาณเราสามารถจัดการด้วยการวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) เช่น การใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบอีดีเอฟเอ (EDFA) เป็นต้น สำหรับการจัดการดิสเพอร์ชั่นนั้นมีการใช้ Dispersion Compensating Fiber (DCF) วางเป็นรายคาบเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชั่นทุกจุดในโครงข่ายไม่เกินค่าที่กำหนด[8] และมีการใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงในการจัดการดิสเพอร์ชั่นโดยการวางในตำแหน่งกึ่งกลางของโครงข่ายเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสง และหลังออกจาเครื่องสังยุคเฟสแสงหักล้างกันหมด อีกทั้งยังสามารถจัดการความไม่เป็นเชิงเส้นได้ด้วย มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในระบบการสื่อสารทางแสงเพื่อลดดิสเพอร์ชั่น[9] ,[10] การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในระบบการสื่อสารทางแสงที่ใช้เส้นใยแสงแบบ DSF เพื่อลดดิสเพอร์ชั่นได้หลายความยาวคลื่นพร้อมกัน [11] การออกแบบการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในการส่งระยะทางไกล[12] โดยถ้าต้องการจัดการดิสเพอร์ชั่นก็จะนำเครื่องสังยุคเฟสแสงวางที่กึ่งกลางของระบบ ช่วงในการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงนั้นวางได้ 2 ช่วง คือ ช่วง Normal dispersion และช่วงกลางๆ ของ Anomalous dispersion ถ้าวางนอกจาสองช่วงนี้จะทำให้ค่า Eye penalty สูง การศึกษาการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบแอนาลอก [13] เช่น เพิ่มความยาวของการเชื่อมต่อ ลดดิสเพอร์ชั่น เป็นต้น การศึกษาการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงเพื่อลด Nonlinear noise จาก เครื่องขยายสัญญาณทางแสงในระบบสื่อสารระยะทางไกล[14] การศึกษาการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงเพื่อลดผลจากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยสรุปว่าตำแหน่งของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงไม่จำเป็นต้องอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางแต่เป็นตำแหน่งที่ทำให้ Power ทั้งสองข้างสมมาตรกัน [15] การศึกษาการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงเพื่อลด Nonlinear phase noise ในระบบการสื่อสารแบบระยะไกลยิ่งที่ใช้การมอดูเลตแบบ Phase Shift Keying (PSK) [16] และล่าสุดนี้ได้มีการใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงในระบบสื่อสารทางไกลแบบ DWDM เพื่อลดปัญหาของทั้งดิสเพอร์ชั่นและความไม่เป็นเชิงเส้นของ

เส้นใยแสง [17] แต่การใช้งานทั้งหมดนั้นเป็นการใช้งานในระบบการสื่อสารในระยะทางไกล และยังไม่มีงานวิจัยใดนำความสามารถนี้มาใช้ในโครงข่ายทางแสง จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้นจึงน่าจะนำเครื่องสังยุคเฟสแสงมาใช้ในโครงข่าย

สำหรับการจัดการดิสเพอร์ชั่น การใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจ แต่จนปัจจุบันเครื่องสังยุคทางแสงยังคงมีการนำมาใช้ในการสื่อสารแบบไกลยิ่งและไม่เคยมีการนำความสามารถของอุปกรณ์มาใช้ในโครงข่ายทางแสงแบบวงแหวนเลย

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาและนำเสนอวิธีการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสทางแสงในโครงข่ายดีดับเบิลดีเอ็มแบบวงแหวน เพื่อลดผลของดิสเพอร์ชั่น โดยวางในตำแหน่งที่ใกล้กับสถานีมากที่สุด สำหรับการวางในโครงข่ายวงแหวนต้องคำนึงถึง ระยะทาง และทิศทางของทราฟฟิก แล้วหาตำแหน่งในการวางจากทราฟฟิกทั้งหมด และกำหนดตำแหน่งในการวางที่เหมาะสมเพื่อลดผลของดิสเพอร์ชั่นให้มากที่สุดและใช้จำนวนของอุปกรณ์เท่าเดิม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสง(Optical Phase Conjugation, OPC) ในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน และกำหนดตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงเพื่อชดเชยดิสเพอร์ชั่น เพื่อลดผลของดิสเพอร์ชั่นในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งโครงข่ายทำงานปกติ และมีการล้มเหลวไม่เกิน 1 ข่ายเชื่อมโยง และศึกษาผลของ (Optical signal to noise ratio, OSNR) เมื่อวางเครื่องสังยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่าย

1.3 ขั้นตอนดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อส่งแสงผ่านเส้นใยแสงโดยเฉพาะผลของดิสเพอร์ชั่นรวมทั้งการแก้ไขดิสเพอร์ชั่นในโครงข่าย
2. ศึกษาคุณสมบัติโครงข่ายแบบวงแหวน พร้อมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายแบบวงแหวน
3. ศึกษาความแตกต่างของการแบ่งการใช้งานช่องสัญญาณแบบ TDM, WDM และ DWDM
4. ศึกษาคุณสมบัติของเครื่องสังยุคเฟสแสง การทำงาน ความสามารถ และตัวอย่างการนำไปใช้งานของอุปกรณ์

5. ศึกษาวิธีการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบวงแหวน
6. คิดวิธีคำนวณหาจำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใช้ ให้ใช้จำนวนน้อยที่สุดบนโครงข่ายวงแหวนตัวอย่าง
7. วิเคราะห์หาตำแหน่งทั้งหมดในการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงที่เป็นไปได้ ที่ทำให้ค่าดิสเพอร์ชั่นไม่เกินดิสเพอร์ชั่นที่กำหนดและใช้จำนวนอุปกรณ์เท่ากับจำนวนน้อยที่สุดที่ได้คิดไว้
8. กำหนดตำแหน่งที่วางอุปกรณ์จากตำแหน่งที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชั่นต่ำที่สุด
9. ปรับปรุงวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงให้ใช้ได้กับโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น (path protection)
10. ปรับปรุงวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงให้ใช้ได้กับโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม (Span Protection)
11. ปรับปรุงวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงให้ใช้ได้กับระบบเมื่อความยาวคลื่นมีการเปลี่ยนแปลง (Shift wavelength) เนื่องจากการใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงจะทำให้ความยาวคลื่นของสัญญาณเปลี่ยนแปลง
12. ปรับปรุงวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น (shift wavelength) ให้ใช้ได้กับโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น (path protection)
13. ปรับปรุงวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น (shift wavelength) ให้ใช้ได้กับโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม (span Protection)
14. วิเคราะห์ผล Optical signal-to-noise ratio (OSNR) ของระบบหลังจากที่ได้มีการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสง เพราะเครื่องสังยุคเฟสแสงจะทำให้ค่า OSNR ลดลงอย่างมาก
15. เรียบเรียงรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดลองวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงกับโครงข่ายวงแหวนแบบดับเบิลยูดีเอ็มเท่านั้น
2. ศึกษาวิธีการวางเครื่องวังยุคเฟสแสงนี้ใช้เพื่อจัดการผลของดิสเพอร์ชั่นในโครงข่ายเท่านั้น
3. ทดลองวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงกับโครงข่ายที่ไม่มีผลของปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้น
4. กำหนดจำนวนช่องสัญญาณ, ระยะทางในข่ายเชื่อมโยงต่าง ๆ ของโครงข่ายและระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ เป็นตัวแปรเพื่อใช้ในการใช้คำนวณวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง
5. กำหนดให้กรณีมีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย เกิดเฉพาะกรณีที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย 1 ข่ายเชื่อมโยง เท่านั้น
6. กำหนดกลไกการกู้คืนสัญญาณเป็น กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น และ การทอดข้าม เท่านั้น
7. กำหนดผลการทดลองด้วยการคำนวณเท่านั้น โดยมิได้ทำการทดลองกับระบบจริง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ในโครงข่าย DWDM แบบวงแหวน
2. ออกแบบการคำนวณวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง สำหรับโครงข่ายแบบปกติและมีความเสียหาย
3. พัฒนาและทดสอบผลการทำงานของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ในโครงข่าย DWDM แบบวงแหวนในสภาพการทำงานแบบต่างๆ
3. ตีพิมพ์และนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติ

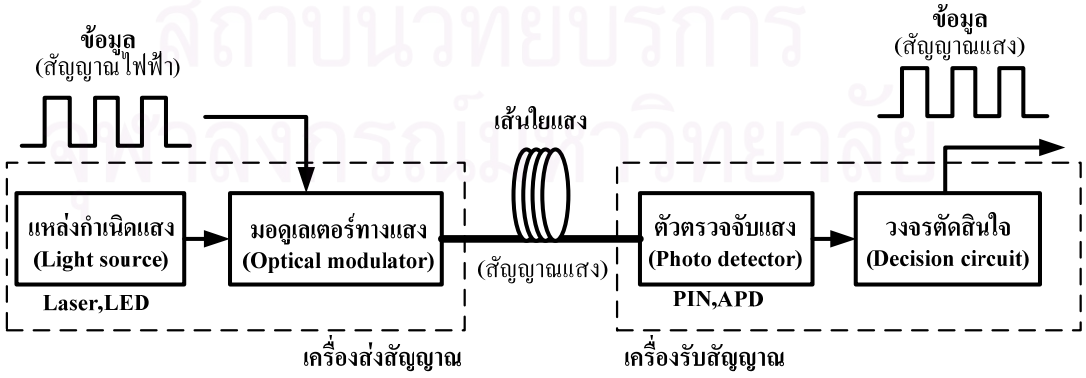
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

ปัจจุบัน การสื่อสารทางแสงเข้ามามีบทบาทสำหรับการสื่อสารมากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีความเร็วในการส่งข้อมูลสูง และช่องสัญญาณในการมากกว่าการสื่อสารแบบเก่า อีกทั้งไม่ได้รับผลการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณภายนอก ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ จึงมีการพัฒนาการส่งสัญญาณทางแสงจากระบบ WDM แบบเดิม ให้เป็นระบบ DWDM ซึ่งมีการมัลติเพล็กซ์แสงเข้าไปในช่องสัญญาณเดียวกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งให้มากยิ่งขึ้น แต่ในการส่งโดยรวมแสงหลายความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน จะมีผลให้เมื่อส่งสัญญาณในระยะทางไกลเกิดปัญหาได้ เนื่องจาก แสงจะเกิดการบานออก และอาจทำให้ไปรบกวน สัญญาณแสงของช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้กัน ทำให้การส่งข้อมูลผิดเพี้ยนไป ดังนั้น จึงมีการนำเครื่องสังยุคเฟสแสงเข้ามาใช้ในระบบเพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ ดังนั้น จึงมีการนำเครื่องสังยุคเฟสแสง เข้ามาใช้ในระบบเพื่อแก้ไขปัญหาการบานออกของสัญญาณ แต่การวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ยังทำให้พลังงานของสัญญาณมีค่าลดลง ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาเพื่อหาตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ในโครงข่ายที่เหมาะสม โดยในบทนี้ กล่าวถึงพื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง และการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ จากนั้นได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานสำหรับเครื่องสังยุคเฟสแสง และแนวทางคำนวณตำแหน่งสำหรับเครื่องสังยุคเฟสแสง ในโครงข่าย

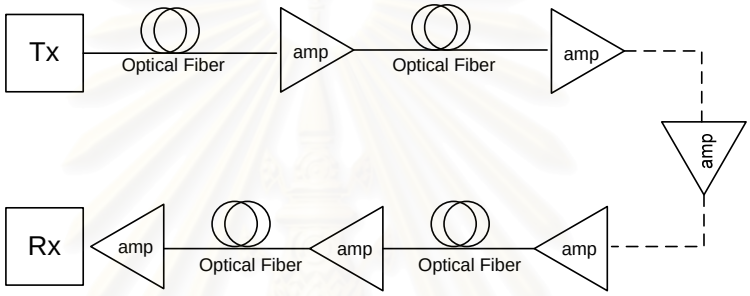
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงโดยทั่วไปสามารถแสดงให้เห็นดัง รูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ คือ เครื่องส่งสัญญาณแสง (Optical transmitter) เส้นใยแสง (Optical fiber) และเครื่องรับสัญญาณแสง (Optical receiver)



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง [18]

สำหรับระบบการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงระยะไกล (Long-haul transmission) แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ามีอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (Optical amplifier) หรือ อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) วางคั่นระหว่างทางเป็นช่วงๆ เนื่องจากการสูญเสียกำลังงานที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสงโดยจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณทางแสงในแต่ละย่านความยาวคลื่น (Optical attenuation coefficient: α dB/km) ทำให้กำลังงานสัญญาณแสงลดลงและอาจจะเป็นผลให้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (Optical detector) ไม่สามารถตรวจจับกำลังงานแสงได้ สำหรับค่ากำลังงานต่ำสุดที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงจะสามารถแปลงกำลังงานแสงเป็นกำลังงานไฟฟ้าได้คือค่าสภาพไว (Sensitivity) ซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ



รูปที่ 2.2 ระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะทางไกล

2.1.1 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

เนื่องจากสัญญาณแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังนั้นสมการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงย่อมมีความสัมพันธ์กับสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) โดยเริ่มต้นพิจารณาการเดินทางของสัญญาณแสง จากสมการความหนาแน่นกระแสและสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จนท้ายที่สุด จะได้สมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงเป็นไปดังสมการที่ (2.1) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเจอร์ (Nonlinear Schrödinger equation, NLSE) [19] [20]

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i\gamma |A|^2 A \qquad (2.1)$$

โดยที่ A เป็นกรอบคลื่น (Envelope) ของสัญญาณ, α เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Constant), β_2 เป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าจีวีดี (Group-velocity dispersion, GVD), γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear coefficient), z เป็นระยะทางที่สัญญาณแสง

เดินทางในเส้นใยแสง และ T เป็นกรอบอ้างอิงเวลาที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม (v_g) ซึ่งสามารถแสดงดังในสมการที่ (2.2)

$$T = t - \frac{z}{v_g} \tag{2.2}$$

โดยที่ t เป็นเวลาจริง เมื่อพิจารณาพจน์ทางขวามือของสมการที่ (2.2) ซึ่งแสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณ พจน์แรกคือการสูญเสีย (Loss) กำลังสัญญาณ ซึ่งมากขึ้นไปตามระยะทางของเส้นใยแสง แต่สามารถชดเชยกำลังสัญญาณได้ด้วยเครื่องขยายสัญญาณแสง สำหรับพจน์ที่สอง คือ GVD (β_2) ซึ่งส่งผลให้สัญญาณพัลส์ขยายกว้างออก และสำหรับพจน์สุดท้าย คือ ผลของปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงที่ทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง และส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออกอีกด้วย โดยที่ความรุนแรงของปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูงสุด (Peak power) ของสัญญาณ ในหัวข้อถัดไปเป็นการแยกพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณดังที่ได้กล่าวมาแล้วอย่างละเอียด

2.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปร่างและกำลังของสัญญาณ

2.1.2.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ (Attenuation loss)

เป็นการสูญเสียค่ากำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากการที่แสงเดินทางในเส้นใยแสงเป็นระยะทางหนึ่งๆ โดย มีสมการแสดงการลดทอนกำลังสัญญาณ ดังนี้

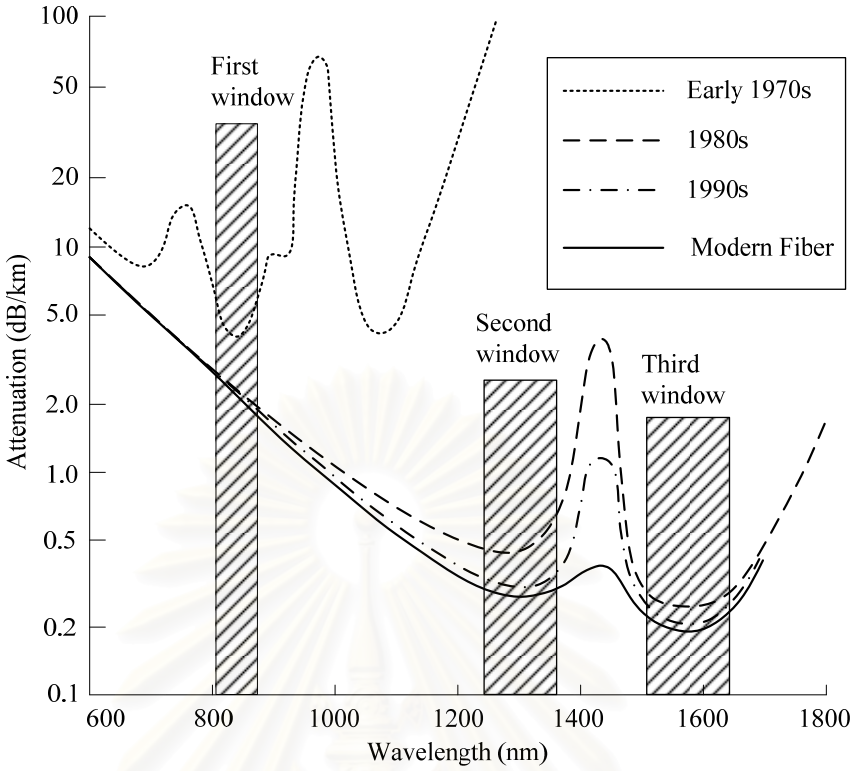
$$P(L) = P(0) - \alpha L \tag{2.3}$$

โดยที่ $P(L)$ คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะ L จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ (dB)

$P(0)$ คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณ (dB)

α คือ ค่าคงตัวของการลดทอน (dB/km)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

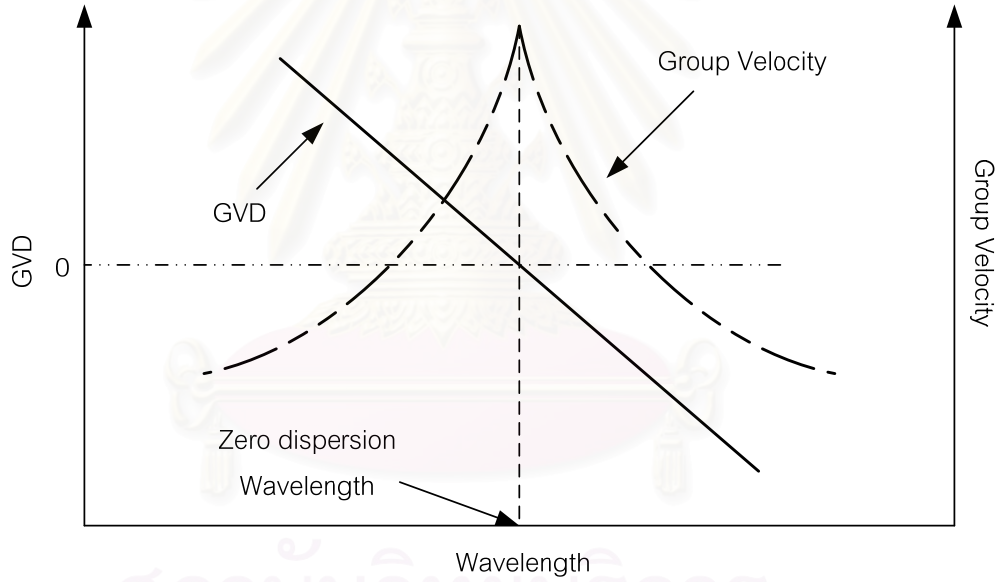


รูปที่ 2.3 Optical fiber attenuation vs. wavelength [21]

สำหรับค่าคงตัวการลดทอน α นั้นแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงเส้นโค้งทั้ง 3 เส้นโดยเส้นบนสุดซึ่งเป็นเส้นประแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงปลายยุค 80 และล่างสุดเส้นทึบซึ่งแสดงถึงเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (first window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกาและจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความชื้นและผลของ Rayleigh scattering ซึ่งทำให้อัตราสูญเสียสัญญาณมีค่าสูงดังเส้นประในรูปที่ 2.3 หลังจากนั้นก็มีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการสูญเสียสัญญาณในยุคที่ 2 (second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ในช่วงปี 1977 Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (third window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm และยังแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการใช้งานนั้นถ้าเป็นการส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN เป็นต้น เราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งผ่านข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (forth window) ซึ่งเพิ่มการใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm

2.1.2.2 ดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสง (Fiber dispersion)

สัญญาณทางแสงจะเกิดการผิดเพี้ยนมากขึ้นเมื่อเดินทางไปตามเส้นใยแสง การผิดเพี้ยนนี้เป็นผลมาจาก intramodal dispersion และ intermodal delay effects โดยการผิดเพี้ยนเหล่านี้สามารถอธิบายด้วยการตรวจสอบความเร็วกลุ่ม (group velocities) ของโหมดการเดินทาง (guided modes) ซึ่งความเร็วกลุ่มนี้คือความเร็วของพลังงานในแต่ละโหมดที่เดินทางในเส้นใยแสง รูปที่ 2.4 เป็นการแสดงตัวอย่างของความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม (group velocity dispersion : GVD) เทียบกับความยาวคลื่นซึ่งเห็นได้ว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกันและจะมีค่าสูงสุดที่ Zero-dispersion wavelength GVD เป็นปรากฏการณ์ที่สัญญาณแสงหนึ่งๆ ประกอบด้วยหลายความถี่ ทำให้องค์ประกอบแต่ละความถี่นั้นมีความเร็วกลุ่มต่างกัน จึงทำให้แต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงมาถึงปลายทางในเวลาที่แตกต่างกัน จึงทำให้สัญญาณแสงขยายความกว้างออกไปเมื่อมาถึงปลายทาง



รูปที่ 2.4 Group velocities และ GVD ในแต่ละความยาวคลื่น [20]

Intramodal dispersion หรือ Chromatic dispersion เป็นการขยายตัวออกของพัลส์ที่เกิดขึ้นในโหมดเดียว (Single mode) เมื่อส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (Single mode fiber: SMF) ผลของดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงจะเด่นชัดเนื่องจากสัญญาณแสงประกอบขึ้นด้วยหลายความถี่ซึ่งแต่ละความถี่มีค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่ต่างกัน ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้จะทำให้แสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้พัลส์สัญญาณมีการขยายตัวออก (broadening) และเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน เวลาที่ใช้ในการเดินทางคือ

$$\tau = \frac{L}{v_g} = L\frac{\delta\beta}{\delta\omega} = \frac{L}{C}\frac{\delta\beta}{\delta K} \tag{2.4}$$

โดย L คือ ระยะทาง (km)

V_g คือ Group velocity $K = \frac{2\pi}{\lambda}$

จากสมการที่ (2.4) จะได้ความเร็วกลุ่มเท่ากับ

$$\Delta\tau = L\beta_2\Delta\omega \tag{2.5}$$

$$\beta_2 = \frac{\delta^2\beta}{\delta\omega^2} = \frac{\delta\beta_1}{\delta\omega} = \frac{\delta\left(\frac{1}{v_g}\right)}{\delta\omega} \tag{2.6}$$

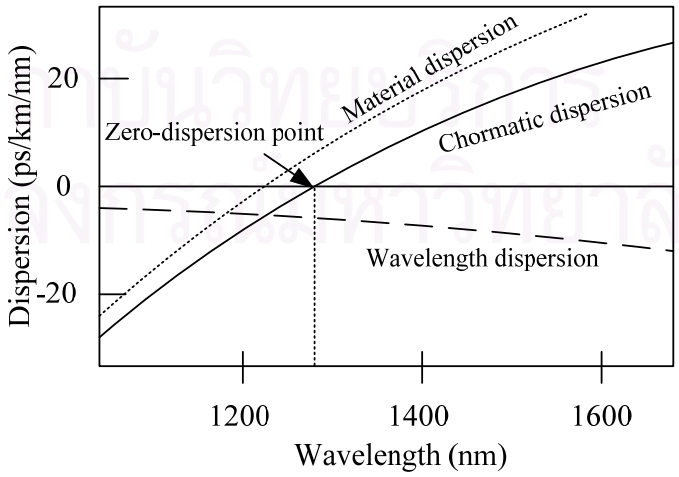
β_2 คือ Group velocity dispersion : GVD parameter

ถ้าเขียนอยู่ในรู้ความยาวคลื่นจะได้

$$\Delta\tau = \frac{\delta\left(\frac{1}{v_g}\right)}{\delta\lambda}\Delta\lambda = DL\Delta\lambda \tag{2.7}$$

$$D = \frac{\delta\left(\frac{1}{v_g}\right)}{\delta\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2 \tag{2.8}$$

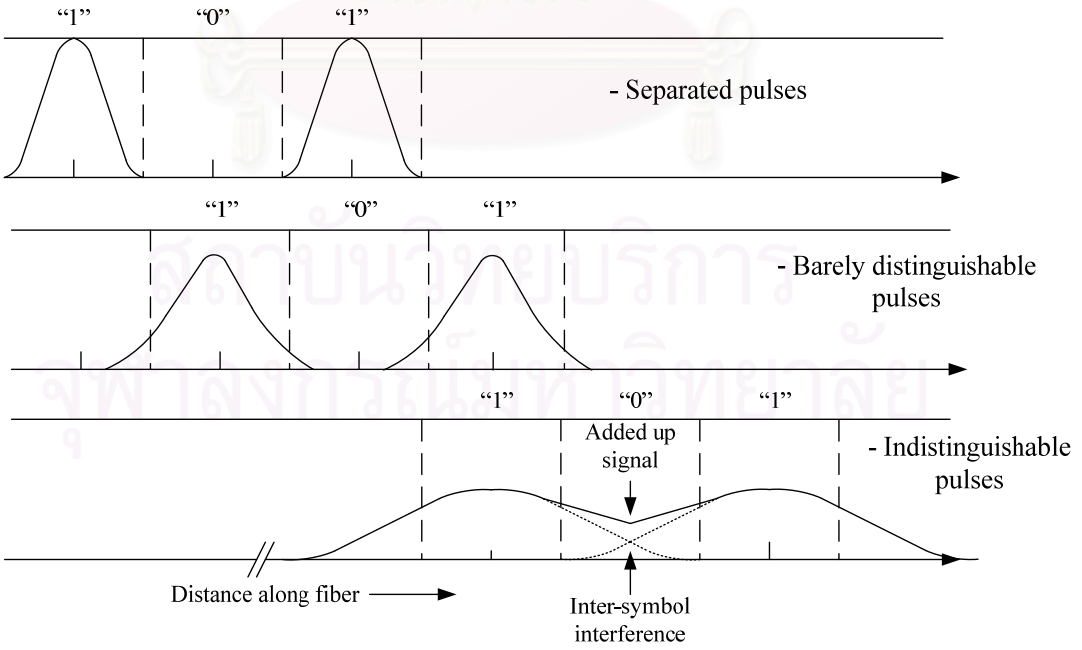
โดย D คือ Dispersion (ps/nm/km)



รูปที่ 2.5 Chromatic dispersion [23]

Chromatic dispersion เป็นผลรวมของดิสเพอร์ชั่นจากวัสดุ (material dispersion) อันเนื่องมาจากวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแสงและดิสเพอร์ชั่นจากท่อนำคลื่น (waveguide dispersion) ซึ่งเป็นผลจากลักษณะรูปร่างของเส้นใยแสง รูปที่ 2.5 แสดงค่าดิสเพอร์ชั่นที่แตกต่างกันไปตามความยาวคลื่นของแสง การส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1310 nm สำหรับ SMF: ITU-T G.652 ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชั่นเป็นศูนย์ (zero-dispersion point) จะหลีกเลี่ยงผลของดิสเพอร์ชั่นได้ ยิ่งไปกว่านั้นได้มีการปรับปรุงเพื่อให้เกิดค่าดิสเพอร์ชั่นเป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราการลดทอนต่ำ เราเรียกเส้นใยแสงประเภทนี้ว่า Dispersion shifted fiber (DSF: ITU-T G.653) และ เส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชั่นไม่เป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm เราเรียกเส้นใยแสงประเภทนี้ว่า Non-zero dispersion shift fiber (NZDSF: ITU-T G.655)

อย่างไรก็ตาม ในระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นซึ่งสัญญาณแสงประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นรวมอยู่ด้วยกัน แม้จะมีการเลือกความยาวคลื่นหนึ่งให้เกิดค่าดิสเพอร์ชั่นเป็นศูนย์ความยาวคลื่นอื่นๆที่เหลือย่อมได้รับผลจากดิสเพอร์ชั่นค่าต่างๆ แตกต่างกันไป ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณในช่องสัญญาณที่ต่างกัน (Signal distortion) และรุนแรงไม่เท่ากันอันเนื่องมาจากค่าความชันของเส้นโค้งดิสเพอร์ชั่น (Dispersion slope) โดยการผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการซ้อนทับกันของพัลส์สัญญาณซึ่งถ้าไม่ทำการแก้ไขจะทำให้ข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้ รูปที่ 2.6 เป็นการแสดงการเกิด Inter-symbol interference (ISI) จากผลดิสเพอร์ชั่น



รูปที่ 2.6 การเกิด Inter-symbol interference [21]

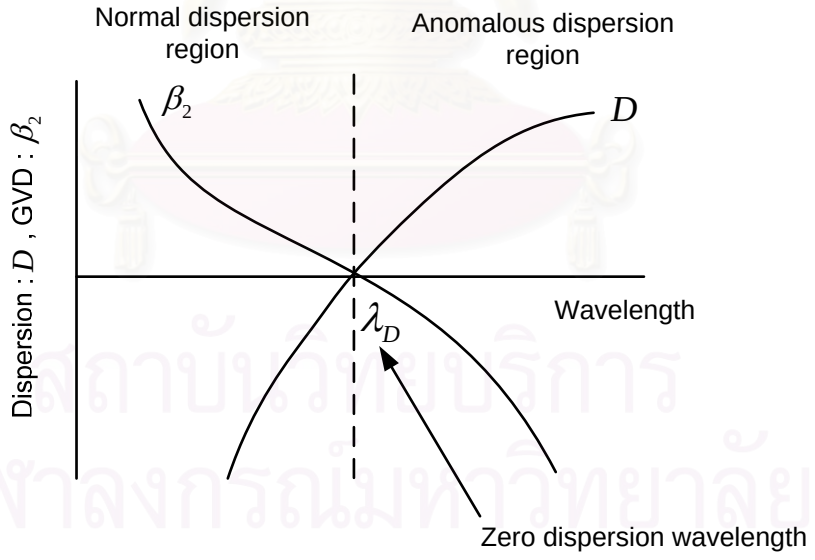
ส่วน intermodal delay เป็นผลของแต่ละโหมดการเดินทางของแสงในตัวกลางมีความแตกต่างกันของค่าความเร็วกลุ่มที่ความถี่เดียวกันซึ่งเกิดในเส้นใยแสงแบบหลายโหมด (Multi-mode fiber : MMF) ซึ่งมีผลรุนแรงกว่า SMF

การแบ่งช่วงของดิสเพอร์ชั่น แบ่งเป็น 2 ช่วงคือ Normal dispersion, Anomalous dispersion ดังรูปที่ 2.7

Normal dispersion region คือบริเวณที่ส่วนประกอบของความยาวคลื่นยาวสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าส่วนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า จะมีค่า $D<0$ และ $\beta_2>0$

Anomalous dispersion region คือบริเวณที่ส่วนประกอบของความยาวคลื่นสั้นสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าส่วนที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า จะมีค่า $D>0$ และ $\beta_2<0$

Zero dispersion wavelength คือ จุดที่ดิสเพอร์ชั่นเท่ากับศูนย์ $D=0$ และ $\beta_2=0$ ใน Single mode fiber (SMF) zero dispersion wavelength อยู่ที่ 1310 nm และใน Dispersion-shifted fiber (DSF) zero dispersion wavelength อยู่ที่ 1550 nm



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_2 และ D ในช่วงของดิสเพอร์ชั่น

2.1.2.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity)

Kerr effect เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ค่าดัชนีหักเห เปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงานของสัญญาณทำให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นอยู่กับกำลังงานของ

สัญญาณ เฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปโดยที่มีขนาดขึ้นอยู่กับกำลังงานเรียกว่า การเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear phase shift) เราสามารถแบ่งปรากฏการณ์ Kerr effect ที่มีผลต่อสัญญาณเดินทางในระบบเส้นใยแสงออกเป็นสามประเภทคือ Self-phase modulation (SPM) Cross-phase modulation (XPM) และ Four-wave mixing (FWM)

1.) Self-Phase Modulation (SPM) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกันกับสัญญาณเอง อันเป็นผลทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงด้วยกำลังของตัวสัญญาณเองซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นไปดังสมการที่ (2.9)

$$\Delta\omega_{NL} = \frac{\partial\phi_{NL}(z,T)}{\partial T} \tag{2.9}$$

โดยที่ $\Delta\omega_{NL}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสต่อหน่วยเวลา

ϕ_{NL} คือ เฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งค่า $\phi_{NL}(z,T)$ สามารถคำนวณได้จาก

$$\phi_{NL} = n_2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)L\left|E_0\right|^2 = n_2 k_0 L\left|E_0\right|^2 \tag{2.10}$$

โดยที่ n_2 คือ สัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear-index coefficient)

L คือ ความยาวของเส้นใยแสง (km)

$\left|E_0\right|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสง

k_0 คือ เลขคลื่นในที่ว่าง (free space wave number)

SPM ทำให้สเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณขยายออกและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหนี่ยวนำมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังงานแสงสูงสุด

2.) Cross-Phase Modulation (XPM) ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์ ω_1 และ ω_2 ซึ่งมีค่าต่างกัน ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ ณ ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปจากผลของ XPM ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังงานของสัญญาณแสงอื่นที่อยู่ที่คลื่นพาห์มีความถี่ที่ต่างออกไปเหนี่ยวนำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนไปจากเดิม

ปกติแล้วเมื่อ 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์เป็น ω_1 และ ω_2 ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง นอกจากทั้ง 2 สัญญาณแสงจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกันซึ่งการที่ความเร็วกลุ่มไม่ตรงกันนี้

จะเป็นปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของทั้ง 2 สัญญาณแสงในปรากฏการณ์ XPM โดยปรากฏการณ์ นี้จะเกิดขึ้นช่วงที่สัญญาณแสงทั้งสองวิ่งตัดกัน ซึ่งผลของมันจะมีค่ามากกว่าของ SPM ถึง 2 เท่าโดยมีเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจาก SPM และ XPM ดังสมการที่ (2.11)

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L\left(\left|E_0\right|^2 + 2\left|E_1\right|^2\right) \tag{2.11}$$

เมื่อ $\left|E_0\right|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_1

$\left|E_1\right|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_2

3.) Four Wave Mixing (FWM) เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไข การจับคู่ความถี่ (frequency matching) จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังข้ามให้แก่กันและกัน การกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมา โดยเกิดจากสัญญาณพัลส์หลายๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆกันมาผสมผสานกัน สำหรับการเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ (f_4) จากสัญญาณความถี่ f_1, f_2, f_3 ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.12)

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \tag{2.12}$$

และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (Phase matching condition) ดังนี้

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3 \tag{2.13}$$

โดยที่ k_n คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n ดังนั้นประสิทธิภาพของ FWM

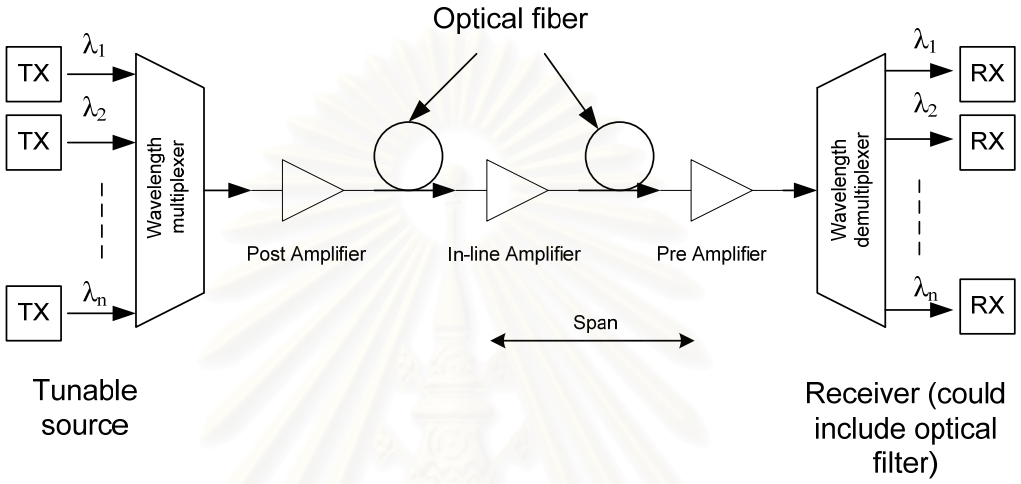
ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดียว เรียกว่า Intra-channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันจนทำให้เกิด Ghost pulse ขึ้นมาในสัญญาณที่มอดูเลตแบบ On-off keying (OOK) สำหรับผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณ จะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมา และจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่าเลื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้น แต่ว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM

การลดปัญหาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงสามารถทำได้โดยการจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละช่ายเชื่อมโยงให้มีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นมากที่สุดเพื่อทำให้การวิ่งตัดกันของสัญญาณเนื่องจากความเร็วกลุ่มของสัญญาณที่แตกต่างกันเป็นไปได้ยากขึ้นพร้อมทั้งทำให้การจับคู่ความถี่เป็นไปได้ยากขึ้นด้วยเช่นกัน

2.2 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสง

2.2.1 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการสื่อสารด้วยแสงระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงคามยาวคลื่น

2.2.1.1 WDM systems and components



รูปที่ 2.8 WDM system and components

จากประสิทธิภาพของเส้นใยแสงที่มีความกว้างของแบนด์วิดท์มหาศาลทำให้เราสามารถเลือกใช้ช่วงความยาวคลื่นได้ตั้งแต่ 800 nm ถึง 1,600 nm [23] ซึ่งมีจำนวนความยาวคลื่นมากมายเพียงพอกับการใช้งานที่หลากหลายของโครงข่ายทั้งการส่งข้อมูล, ภาพ, และเสียงด้วยอัตราการส่งข้อมูลความเร็วสูง การที่จะใช้ประโยชน์ของจำนวนความยาวคลื่นที่มากมายขนาดนี้ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นไปอีกนั้นต้องมีการใช้เทคโนโลยี WDM [24], [25] ข้อมูลแต่ละชุดจะครอบครองสัญญาณแสงในแต่ละความยาวคลื่นโดยระบบและองค์ประกอบของ WDM เป็นดังรูปที่ 2.8 มีสัญญาณจำนวน *N* ความยาวคลื่นจะถูกมัลติเพล็กซ์และส่งไปตามเส้นใยแสงเส้นเดียวและอุปกรณ์ที่ปลายทางจะเลือกรับในความยาวคลื่นที่ต้องการ ในช่วงแรกระบบ WDM จะเป็นการส่งความยาวคลื่นเพียง 2, 4, 8, 12, และ 16 ความยาวคลื่นโดยใช้ส่งสัญญาณในระยะทางสั้นๆ เทคโนโลยีในระยะถัดมาคือ coarse WDM (CWDM) และ dense WDM (DWDM) โดยการวิวัฒนาการของเทคโนโลยี จะเกี่ยวข้องกับขีดจำกัดของระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่น เทคโนโลยี CWDM ทั่วไปแล้วจะมีระยะห่างของความยาวคลื่นอยู่ที่ 20 nm (3000 GHz) มีจำนวนความยาวคลื่นอยู่ที่ 18 ความยาวคลื่นและถูกจำกัดอยู่ที่พิสัยความยาวคลื่น 1270 nm ถึง 1610 nm ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.2 ส่วนเทคโนโลยี DWDM นั้นปรกติจะมีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นอาจจะอยู่ที่ 200, 100, 50, หรือ 25 GHz โดยมีจำนวนช่องสัญญาณให้สามารถ

ใช้ได้จำนวนนับร้อยช่องสัญญาณ ตามอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีใช้งานและสามารถส่งสัญญาณไปได้หลายพันกิโลเมตรโดยต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณตามเส้นทาง ทำให้ระหว่างการเดินทางของสัญญาณผ่านเส้นใยแสงจะต้องมีการขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง

เราสามารถแบ่งลักษณะการใช้งานอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงได้ดังนี้

1.) Post amplifier : วางไว้ก่อนเข้าสายส่งเพื่อเพิ่มกำลังของสัญญาณ

2.) Line amplifier : วางไว้ระหว่างสายส่งสัญญาณเป็นช่วงๆ เพื่อชดเชยการลดทอนสัญญาณเนื่องจากเส้นใยแสง

3.) Preamplifier : ทำการขยายสัญญาณเพื่อปรับสัญญาณให้ดีขึ้นก่อนเข้าอุปกรณ์รับสัญญาณ

ส่วนระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (span) นั้นเราต้องไม่กำหนดให้มีระยะทางมากเกินไปจนกำลังสัญญาณถูกลดทอนลง ทำให้อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงไม่สามารถตรวจจับได้หรือทำให้อัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวนทางแสง (Optical signal-to-noise Ratio: OSNR) มีค่าต่ำซึ่งจะ แสดงถึงประสิทธิภาพที่ไม่ดีของระบบ

2.2.1.2 DWDM System

ระบบ DWDM เป็นชื่อย่อของระบบ Dense Wavelength Division Multiplexing ซึ่งพัฒนามาจากระบบสื่อสาร ทางแสงด้วยเส้นใยแสงที่แต่เดิมใช้เพียงแสงสีเดียวหรือแสงที่มีค่าความยาวคลื่นคงที่เพียงค่าเดียว เช่น 1.33 หรือ 1.55 ไมครอน เป็นต้น เมื่อนึกถึงระบบสื่อสารข้อมูลหลายช่องสัญญาณในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงนำแสงที่เห็นกันในรอบ ทศวรรษที่ผ่านมา มักจะนึกถึงระบบ TDM/PCM (Time division multiplex / pulse code modulation) ที่ใช้ระบบสายส่งที่เป็นสายทองแดง และระบบ SDH/SONET (Synchronous digital hierarchy / Synchronous optical network) ที่ใช้เส้นใยแสงในระบบสายส่ง ซึ่งระบบ SDH/SONET นี้สามารถส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วหลายระดับ ตัวอย่างเช่น ความเร็วที่อัตรา 2.5 Gb/s ซึ่งเป็นของระบบ STM-16 ที่ใช้ระบบสายส่ง OC-48 ระบบสื่อสารที่ความเร็วขนาดนี้ถือว่า เร็วมากแล้ว เมื่อเทียบกับระบบสื่อสารในบ้านเรา ซึ่งระบบ STM-16 นี้ใช้เส้นใยแสงเพียงเส้นเดียว (หรือคู่เดียวในระบบรับส่ง) โดยใช้แสงเพียงความยาวคลื่นเดียว (เช่น 1.55 ไมครอน) เป็นคลื่นพาห์สำหรับส่งข้อมูลหลายช่องสัญญาณที่ถูกจัดรวมกันด้วยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ (Multiplex) ซึ่งทำงานด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ธรรมชาติของมนุษย์ต้องมีการพัฒนา แม้ว่าระบบสื่อสารจะส่งข้อมูลได้เร็วถึง 2.5 Gb/s ซึ่งเร็วมากพอที่จะส่งข้อมูลที่เป็นเนื้อหาของหนังสือ และเอกสารทุกเล่มภายในหอสมุดแห่งชาติของ

เราได้หมดภายในเวลาเพียงไม่กี่นาที วิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ทั้งหลายก็ยังไม่พอใจ ยังพยายามที่จะคิดหาวิธีเพิ่มความเร็วมากขึ้นไป ก็พอจะสรุปได้ว่า การเพิ่มความเร็วในการส่งข้อมูลคงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้ระบบสายส่งที่เป็นเส้นใยแสงได้แน่ และถ้าจำเป็นต้องใช้เส้นใยแสงอยู่ ก็พอมีวิธีการหลักๆ อยู่ 2 วิธี คือ

•เพิ่มอัตราเร็วจากระบบเดิมที่ใช้อยู่ ซึ่งระบบเดิมยังคงสามารถพัฒนาให้มีขีดการทำงานเพิ่มขึ้นได้อีก ดังเช่นที่เห็นอยู่ก็มากถึง 40 Gb/s แต่สุดท้ายอัตราเร็วในการพัฒนาอาจช้าลงและไม่แน่นอน เพราะถูกจำกัดด้วยตัวของเทคโนโลยีเอง โดยเฉพาะความเร็วในการทำงานของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะทำให้ระบบมีราคาแพงขึ้นมากหลายเท่าเลยทีเดียว

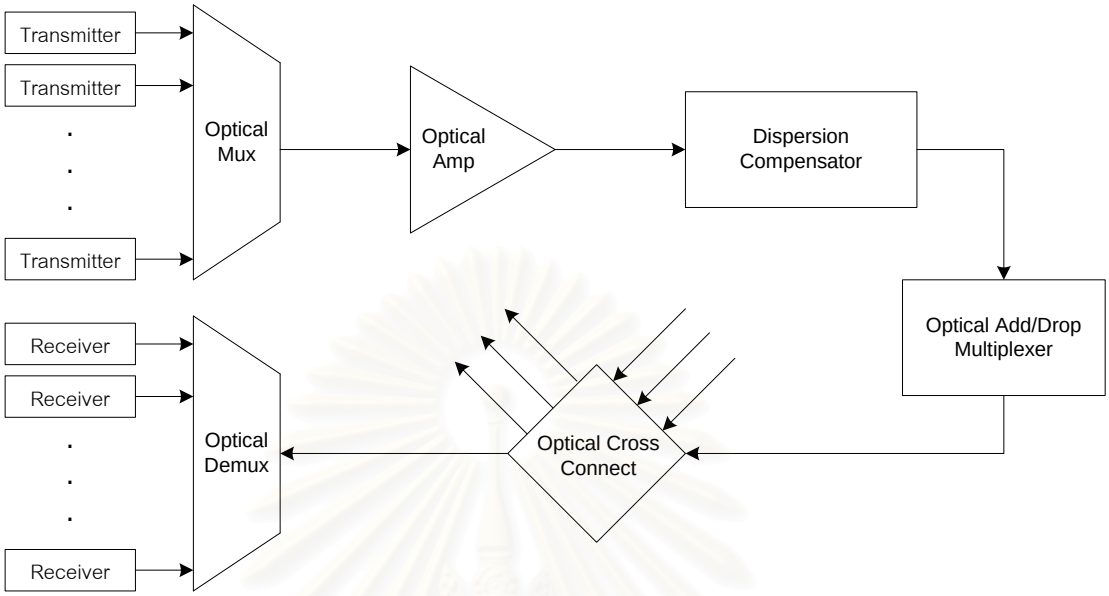
•เพิ่มจำนวนความยาวคลื่นแสงในเส้นใยแสงเส้นเดิม เทคนิคนี้สามารถกระทำได้เลยโดยอาศัยเทคโนโลยีที่มีอยู่เดิม อีกทั้งเส้นใยแสงเดิมในระบบก็ยังพอสามารถรองรับขีดการทำงานนี้ได้ ซึ่งจากแนวคิดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของระบบสื่อสัญญาณแบบ WDM หรือ Wavelength division multiplexing ซึ่งพัฒนามาเป็น DWDM ในปัจจุบัน

2.2.1.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ DWDM

ในระบบ WDM เดิม มักนิยมใช้แสงที่ความยาวคลื่น 1.33 และ 1.55 ไมครอน แทนช่องสัญญาณอิสระรวมกันทางแสงแล้วส่งไปในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน ซึ่งวิธีนี้ทำให้ไม่สามารถเพิ่มช่องสัญญาณที่อยู่ในเทอมของความยาวคลื่นแสงได้มากนัก เพราะแสงในแต่ละช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกันมาก จะมีค่าการลดทอนสัญญาณไม่เท่ากัน ทำให้ระยะทางสูงสุดที่สามารถส่งข้อมูลได้ ไม่เท่ากันด้วย ผลลัพธ์ก็คือ ในระบบสื่อสารทางไกลมากๆ ต้องใช้สถานีทวนสัญญาณ (repeater) แยกกันสำหรับแต่ละความยาวคลื่น เป็นผลทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น และระบบมีความยุ่งยาก การแก้ปัญหาทำได้โดยเลือกช่องสัญญาณให้มีค่าความยาวคลื่นแสงใกล้ๆ กัน โดยเป็นแสงในในช่วงของหน้าต่างความยาวคลื่นแสงค่าหนึ่ง เช่น ในระบบปัจจุบัน มักจะเลือกช่องหน้าต่างความยาวคลื่นแสงในช่วง 1.55 ไมครอน และความยาวคลื่นแสงของแต่ละช่องสัญญาณจะมีช่วงห่างกัน (channel spacing) ไม่มาก อาจไม่ถึง 1 ไมครอน หรือมากกว่า 1 ไมครอน เล็กน้อย เช่นระบบ DWDM ระบบหนึ่งมี 8 ช่องสัญญาณ อาจประกอบไปด้วยความ ยาวคลื่นแสง 1550, 1551, 1552, ⋯, 1557 ไมครอน ซึ่งหมายถึงมีช่วงของ channel spacing เท่ากับ 1 ไมครอน เป็นต้น การที่กำหนดให้ channel spacing มีค่าน้อยๆ นั่นหมายถึงการเพิ่มโอกาสให้มีอัตราการส่งข้อมูลหรือบิตเรต (bitrate) เพิ่มมากขึ้นด้วย

ถ้าจะมองถึงโครงสร้างพื้นฐานโดยรวมของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงแบบ DWDM ก็อาจสรุปเป็นบล็อกหลักๆ ได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นระบบสื่อสารแบบทางเดียว (simplex) เริ่มจาก Transmitter ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนข้อมูลทางไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงแล้วส่งเข้าสู่เส้นใยแสง Transmitter หนึ่งชุดจะส่งแสงออกมา 1 ความยาวคลื่น ถือเป็น 1 ช่องสัญญาณ ซึ่งข้อมูลแสงหนึ่งช่องสัญญาณนี้ อาจถูกมัลติเพล็กซ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ให้มีบิตเรตสูงมากๆ เช่น 2.5 Gb/s หรือ 10 Gb/s มาแล้ว จากนั้นแสงทุกช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกัน จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยกระบวนการทางแสงด้วย Optical Multiplexer (Mux) เพื่อส่งไปยังปลายทางด้วยเส้นใยแสงเพียงเส้นเดียว ข้อมูลที่เดินทางในระหว่างเส้นทางจะถูกลดทอนสัญญาณทำให้แสงมีค่าความเข้มแสงอ่อนลง จึงต้องมีสถานีทวนสัญญาณที่เป็น Optical Amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณพร้อมกัน ให้มีขนาดความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไปไกลๆ ได้สัญญาณข้อมูลที่ส่งในระบบมักเป็นสัญญาณข้อมูลแบบดิจิตอลในลักษณะของพัลส์ข้อมูล ซึ่งสัญญาณพัลส์ที่เดินทางในเส้นใยแสง จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าดิสเพอร์ชั่น (dispersion) ทำให้สัญญาณพัลส์เกินการบานออก ผลลัพธ์ก็คือเป็นตัวจำกัดปริมาณข้อมูลหรือทำให้บิตเรตสูงสุดของระบบลดลง ดังนั้นระบบ DWDM จึงต้องมีอุปกรณ์ Dispersion compensator เพื่อทำหน้าที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทางอยู่เสมอ อย่าลืมว่าระบบ DWDM มีความยาวคลื่นแสงหลายค่า ผลของดิสเพอร์ชั่นที่เกิดย่อมมีผลกระทบกับทุกช่องสัญญาณด้วย ยิ่งระบบมีจำนวนช่องสัญญาณมาก ก็ต้องยิ่งให้ความดูแลและเอาใจใส่กับ ผลกระทบของดิสเพอร์ชั่นมากขึ้นด้วยในระบบโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่หรือโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูง เรามักจะนึกถึงระบบ SDH/SONET เพราะเป็นระบบที่คุ้นเคยกัน ซึ่งถ้าเทียบกับโครงการขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทยก็คือโครงการ TNEP (Telephone network expansion) ในระบบ SDH/SONET นี้ โครงข่ายจะถูกจัดให้มีโครงสร้างเป็นลูป (Loop) หรือวงแหวน (ring) โดยในช่วงระหว่างสถานีระบบสามารถขยายการติดต่อเข้ากับสถานีอื่นได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Add/Drop ซึ่งระบบ DWDM เองก็ต้องมีอุปกรณ์ชนิดนี้เหมือนกัน เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับระบบเดิมที่มีอยู่ก่อนได้ โดยการทำงานของอุปกรณ์ตัวนี้ จะเป็นระบบทางแสงล้วนๆ อุปกรณ์ตัวนี้จึงมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Optical Add/Drop หรือบางคนอาจเรียกย่อๆ ว่า OADM ซึ่งย่อมาจาก Optical Add/Drop Multiplexer ในทำนองเดียวกัน สถานีสื่อสารบางสถานีที่ทำหน้าที่เป็นชุมสายขนาดใหญ่ จะต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตัดต่อหรือเลือกเส้นทางของทางเดินข้อมูลในระบบให้ไปสู่ปลายทางอื่นๆ ในโครงข่ายที่ซับซ้อนได้ อุปกรณ์ตัวนี้เรียกว่า Cross connect ซึ่งในระบบ DWDM ก็จะมีอุปกรณ์ตัวนี้เหมือนกันแต่จะทำงานในเชิงแสงทั้งหมดเรียกว่า Optical cross connect หรือเรียกย่อๆ ว่า OXC เมื่อข้อมูลเดินทางถึงปลายทาง สัญญาณแสงที่รวมทุกช่องสัญญาณมาก็จะถูกแยกออกให้เป็นช่องสัญญาณเดี่ยวตามค่าความยาวคลื่นแสงด้วยอุปกรณ์เชิงแสงที่เรียกว่า Optical

demultiplexer ซึ่งมักมีหลักการทำงานตรงข้ามกับ Optical multiplexer หรือทำงานเหมือนกันก็ได้ เพียงแต่จะเพิ่มอุปกรณ์บางอย่างเข้าไปเพื่อให้ได้ฟังก์ชั่นทำงานตามต้องการ



รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารโทรคมนาคมแบบ DWDM

2.2.1.2.2 DWDM Component

ระบบ DWDM เป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถใช้กับระบบสื่อสารได้ทั้งระบบเล็กและใหญ่ จะสื่อสารกันแบบ point-to-point ก็ได้ จะใช้กับระบบ LAN ก็ได้ หรือจะใส่เข้าไปในโครงข่ายขนาดใหญ่อย่าง SDH/SONET ก็สามารถทำได้ โดยในการใช้งานแต่ละงานอาจมีอุปกรณ์ (component) ที่ประกอบเป็นระบบมากน้อยต่างกัน ทั้งที่เป็นอุปกรณ์ประเภทแพสซีฟ (passive component) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ต้องมีการป้อนพลังงานจากภายนอก และอุปกรณ์ประเภทแอ็กทีฟ (active component) ที่สามารถทำงานได้เลยโดยไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก component ของระบบ DWDM มีหลายตัวที่อาจดูแล้วค่อนข้างใหม่อยู่บ้าง

Transmitter

ในส่วนของตัวส่งสัญญาณแสงเลเซอร์ไดโอด (LD: Laser diode) LD ที่ใช้ต้องมีค่าความกว้างแถบสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกหรือที่เรียกว่าไลน์วิดธ์ (linewidth) แคบๆ ทั้งนี้เพื่อลดผลของการเกิด Chromatic dispersion ในระบบ DWDM ไลน์วิดธ์ของ LD ต้องมีค่าแคบมากๆ โดยจะต้องไม่มากไปกว่าระยะ channel spacing มิฉะนั้นจะเกิดการรบกวน (interference) ระหว่างช่องสัญญาณ ถ้า channel spacing ของระบบมีค่า 1 นาโนเมตร แหล่งกำเนิดแสงต้องเป็น LD ที่มี linewidth น้อยกว่า 1 นาโนเมตร ด้วย LD ที่มีสเป็กแบบนี้มีราคาสูง จากความต้องการตรงนี้ ทำ

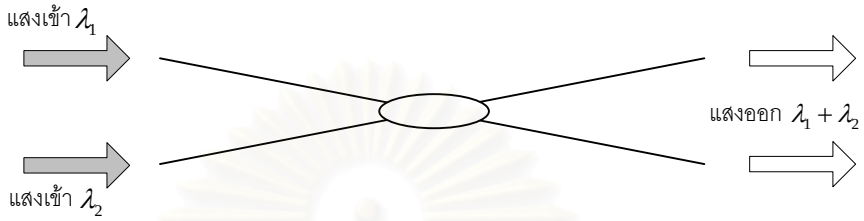
ให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) สำหรับ LD แบบใหม่ๆ ร่วมกับเทคโนโลยีของการกรองแสงด้วยฟิลเตอร์ทางแสง ทำให้ได้ไลน์วิดธ์แคบๆ สมใจ เพื่อใช้กับระบบDWDM ในเชิงพาณิชย์ได้ แล้วในช่วงแรกๆ ของการทดลองวิจัย เขาไปหาแหล่งกำเนิดแสงที่มีค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกันมากๆ มาจากไหน คำตอบก็คือ ในการทดลองวิจัยมักจะใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดปรับค่าได้ (tunable laser source) ซึ่งมีราคาแพงมาก การมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเข้ากับแสง เรามักคุ้นเคยกันดีกับเทคนิคทางวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรสวิตชิ่ง ซึ่งจะเรียกเทคนิคนี้ว่า การมอดูเลตแบบภายใน (internal modulation) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคการมอดูเลตเพื่อรวมข้อมูลเข้ากับแสง ในรูปของสัญญาณแสงโดยตรง เทคนิคนี้เรียกว่า การมอดูเลตแบบภายนอก (external modulation) ลองนึกดูว่าแสงเดินทางอยู่ในตัวกลางหนึ่งซึ่งอาจเป็นอากาศ หรือภายในเส้นใยแสง หรือท่อแก้วแบบระนาบ (optical planar waveguide) ในช่วงหนึ่งที่ถูกกระทำให้ตำแหน่งที่แสงเดินทางในช่วงนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพบางประการ ทำให้ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางในช่วงที่แสงเดินทางนั้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของแสงที่เดินทางถูกเปลี่ยนแปลงไปด้วย หากเราสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหนี้ได้ ก็จะสามารถควบคุมคุณสมบัติของแสงที่เดินทางได้ด้วยเช่นกัน ในทางปฏิบัติ จะใช้สัญญาณข้อมูลไฟฟ้าที่ต้องการสื่อสารเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห ผลลัพธ์ก็คือแสงถูกมอดูเลตเข้ากับข้อมูลทางไฟฟ้านั้นหลังจากที่แสงเดินทางผ่านออกจากส่วนของตัวกลางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ตรงนี้อาจจะยากที่จะเข้าใจลึกซึ้งสำหรับคนที่เพิ่งได้ยินครั้งแรก เอาเป็นว่า เมื่อตัวกลางที่แสงเดินทางช่วงหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหซึ่งควบคุมโดยสัญญาณข้อมูล แสงที่เดินทางออกจากตัวกลางในช่วงนั้น จะมีสัญญาณข้อมูลผสมรวมเข้ามาด้วยโดยทั่วไปอุปกรณ์ในการมอดูเลตแบบภายนอกนี้จะแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ อุปกรณ์ประเภทอิเล็กโตรออปติกส์ (Electro-optic devices) ซึ่งอาศัยสนามไฟฟ้าในการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของท่อนำสัญญาณแสงโดยตรง และ อุปกรณ์ประเภทอะคูสโตออปติกส์ (Acousto-Optic Devices) ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของท่อนำสัญญาณแสง โดยที่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลนี้ถูกควบคุมด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง

Multiplexer (Mux)

มัลติเพล็กเซอร์ (Mux) ที่ใช้ในการรวมแสงหลายช่องสัญญาณมีหลายลักษณะ ดังเช่น

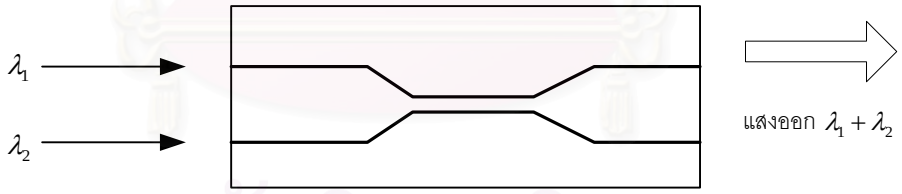
- คับเปลอร์เส้นใยแสง (optical fiber coupler) เป็นการรวมแสงจากแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงโดยตรง พิจารณาดูรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นตัวอย่างของคับเปลอร์เส้นใยแสงแบบ 2x2 สัญญาณแสงสองช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะถูกส่งเข้าสู่เส้นใยแสงต่างเส้นกัน เมื่อแสงเดิน

ทางผ่านคับเปลอร์ แสงทั้งสองความยาวคลื่นจะถูกรวมกันหลังจากเดินทางออกจากคับเปลอร์ ในทางปฏิบัติ อาจเลือกใช้แสงขาออกเพียงเส้นเดียว ในกรณีที่ต้องการรวมแสงหลายช่องสัญญาณ ก็ออกแบบให้คับเปลอร์มีจำนวนเส้นใยแสงด้านอินพุตให้เท่ากับจำนวนช่องสัญญาณตามต้องการ โดยอาจกำหนดให้เส้นใยแสงขาออกมีเพียงเส้นเดียวก็ได้ อุปกรณ์ชนิดคับเปลอร์เส้นใยแสงนี้ ถือเป็นอุปกรณ์ประเภทแพสซีฟ (passive device) คือสามารถทำงานได้ทันทีเลย

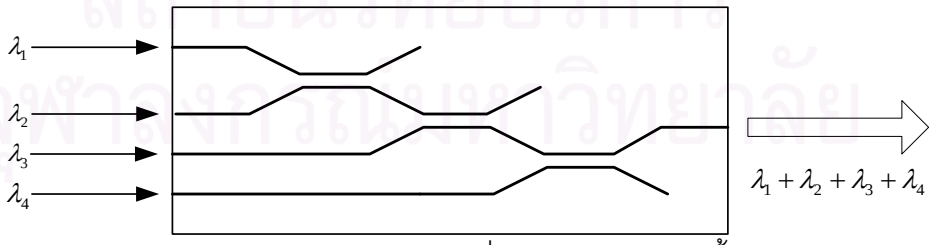


รูปที่ 2.10 คับเปลอร์เส้นใยแสงแบบ 2 x 2 สำหรับมัลติเพล็กซ์แสง 2 ช่องสัญญาณ

• คัปเปลอร์แบบระนาบ (optical planar coupler) มีหลักการทำงานเหมือนคับเปลอร์เส้นใยแสง เพียงแต่ท่อนำสัญญาณแสงจะเป็นแบบระนาบ ไม่ได้เป็นเส้นใยแสง ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.11 (ก) ซึ่งแสดงท่อนำสัญญาณเป็นเส้นหนาฝังตัวอยู่บนแผ่นฐานรูปสี่เหลี่ยมที่อาจเป็นแผ่นแก้ว สไลด์หรือแผ่นเวเฟอร์ จากรูปจะเห็นว่าการทำงานของมันเพื่อคับปลิ้งแสง เกิดในช่วงที่ท่อนำแสงอยู่ใกล้กันเป็นระยะทางช่วงหนึ่ง หากต้องการให้คับเปลอร์ทำงานรวมช่องสัญญาณแสงหลายช่อง อาจเพิ่มโครงสร้างของมันให้มีความซับซ้อนขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข) ขนาดของคับเปลอร์แบบระนาบมักมีขนาดเล็กกว่านิ้วก้อยของเราเสียอีก



(ก) 2x2 คับเปลอร์แบบระนาบ

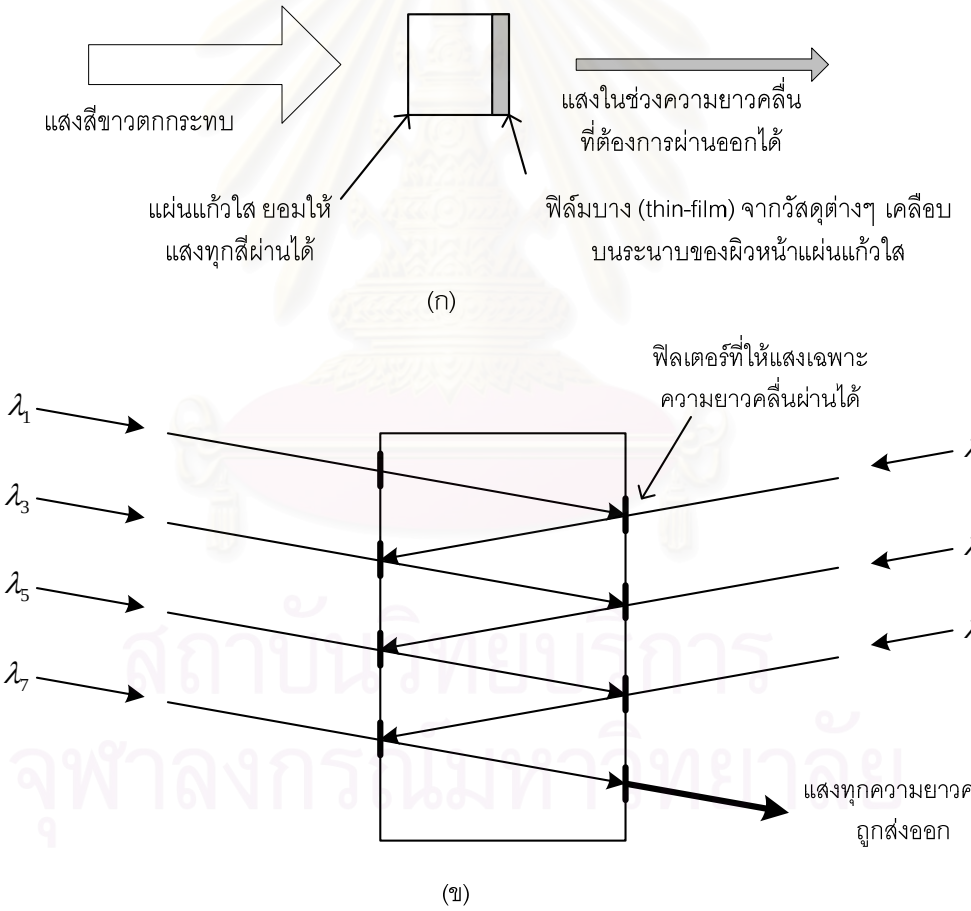


(ข) คับเปลอร์แบบระนาบที่มีโครงสร้างซับซ้อนขึ้น

รูปที่ 2.11 โครงสร้างพื้นฐานของคับเปลอร์แบบระนาบ [22]

• ออปติคอลฟิลเตอร์ (optical filter) เป็นการรวมแสงเมื่อตัวกลางแสงเป็นอากาศ หลักการทำงานพื้นฐานของมันแสงดังรูปที่ 2.12 (ก) ซึ่งใช้เทคโนโลยีของฟิล์มบาง (thin film) ที่ทำ

จากวัสดุที่กำหนด เคลือบลงบนผิวระนาบของแผ่นแก้วใส ซึ่งการเคลือบฟิล์มบางนี้อาจมีหลายชั้น และแต่ละชั้นอาจใช้วัสดุที่ไม่เหมือนกัน ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ ทำให้แสงที่เดินทางผ่านบางความยาวคลื่นถูกบล็อกกั้นไว้ ในขณะที่แสงบางความยาวคลื่นสามารถเดินทางผ่านออกไปได้ ถ้ามองดูเผินๆ ก็คล้ายกับหลักการทำงานของตัวดีมัลติเพล็กซ์ (demultiplexer) นั่นเอง จากคุณสมบัติตรงนี้ ถ้านำมาจัดโครงสร้างเป็นกล่องเล็กๆ ดังรูปที่ 2.12 (ข) โดยภายในกล่องเป็นตัวกลางที่แสงทุกความยาวคลื่นผ่านได้ ที่ข้างกล่องจะจะช่องให้แสงผ่านโดยจะมีออปติคอลฟิลเตอร์ปิดกั้นไว้ ฟิลเตอร์นี้ออกแบบให้เฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการผ่านได้เท่านั้น ถ้าเป็นแสงย่านความยาวคลื่นอื่นจะเกิดการสะท้อน ทำให้ที่เอาต์พุตสุดท้ายเกิดเป็นแสงรวมที่มีทุกความยาวคลื่น (ทุกช่องสัญญาณ) ส่งออก และพร้อมที่จะเดินทางสู่ปลายทางต่อไปเทคโนโลยีของฟิล์มบางนี้ อาจใช้เคลือบที่หน้าตัดตอนปลายของเส้นใยแสง เพื่อทำให้เส้นใยแสงเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเป็นฟิลเตอร์ไปด้วยก็ได้



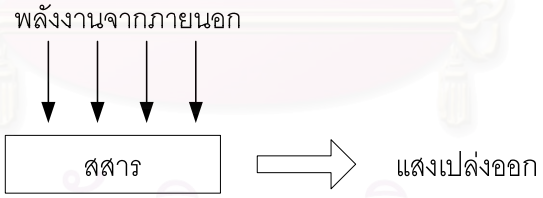
รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของออปติคอลฟิลเตอร์ในรูป (ก) และ Mux ในรูป (ข) [22]

• อื่นๆ เช่น เกรดติ้งเส้นใยแสง (fiber grating) ท่อนำแสงระนาบแบบอาร์เรย์ (array planar optical waveguides) เป็นต้น (รายละเอียดไม่ขอกล่าวในที่นี้ เพราะเนื้อหามากพอสมควร)

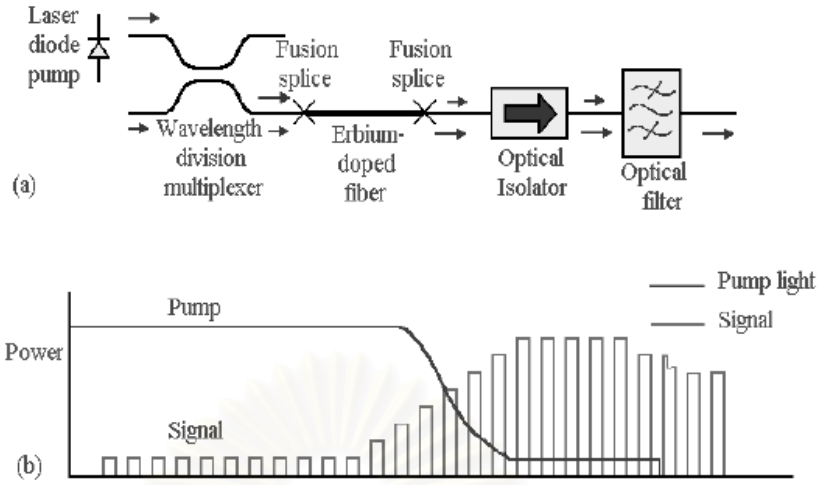
Optical Amplifier (OA)

หลักการทำงานของสถานีขยายสัญญาณแสงหรือ Optical amplifier มีหลักการในทำนองเดียวกับการสร้างแสงเลเซอร์ ซึ่งอาศัยหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่ใช้การกระตุ้นพลังงานจากภายนอกเข้าไปในสสาร แล้วทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมของมันเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากธรรมชาติของอิเล็กตรอน มันจะไม่สามารถดำรงอยู่ในสภาวะอื่นที่ไม่ใช่สภาวะเดิมของมันได้ มันจึงต้องหาทางกลับบ้านของมัน และจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกที่ป้อนให้ก่อนหน้านั้น มันจึงต้องคายพลังงานส่วนเกินนั้นออกมาในรูปของพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่น ขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของสสารเพื่อทำให้อิเล็กตรอนกลับสู่สภาวะเดิมได้ หากเราเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมพลังงานส่วนเกินที่อิเล็กตรอนคายออกก็จะกลายเป็นพลังงานของแสงตามที่เราต้องการได้ดังแสดงในรูปที่ 2.13 หากเราสร้าง optical amplifier ให้เกิดขึ้นบนเส้นใยแสงได้เลย จะเรียกว่าเป็น Optical fiber amplifier (OFA) หรือเรียกสั้นๆ ว่า fiber amplifier วัสดุที่สามารถเปล่งแสงสีเดียวกับแสงที่ใช้ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสง ในกระบวนการของ Fiber amplifier มีหลายชนิด เช่น ธาตุเออร์เบียม (Erbium) จะให้แสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน และธาตุนีโอดีเมียม (Neodymium) จะให้แสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 1.33 ไมครอน เป็นต้น ในทางปฏิบัติเส้นใยแสงชนิดพิเศษจะถูกสร้างขึ้นให้มีส่วนประกอบของสารเหล่านี้อยู่ในส่วนของคอร์ของเส้นใยแสง ในระบบสื่อสารปัจจุบันมักเลือกใช้ธาตุเออร์เบียมผสมเข้ากับเนื้อแก้วในส่วนของคอร์ของเส้นใยแสง ทำให้เส้นใยแสงชนิดนี้ถูกเรียกว่า Erbium-Doped Fiber หรือ EDF ซึ่งโครงสร้างทางกายภาพจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเส้นใยแสงธรรมดาทั่วไป และเมื่อนำ EDF มาใช้ในการขยายสัญญาณแสงจะเรียกว่า Erbium-Doped Fiber amplifier หรือ EDFA แสงที่เดินทางผ่านเส้นใยแสงชนิด EDF จะมีพฤติกรรมเหมือนเดินทางในเส้นใยแสงทั่วไปคือเกิดการลดทอนสัญญาณและเกิด dispersion ตามปรกติ โดยจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ กับสัญญาณข้อมูล แต่ถ้าทำการกระตุ้นเส้นใยแสงพิเศษนี้ด้วยการป้อนพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร ให้กับ EDF ข้อมูลแสงที่ความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน ที่เดินทางผ่านเข้าไปใน EDF จะถูกทำให้มีพลังงานเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากการรวมกันทางความเข้มแสงของสัญญาณเดิมที่นำข้อมูล กับสัญญาณแสงที่เปล่งออกมาใหม่จากการกระตุ้นพลังงานเข้าไป (ซึ่งแสงทั้งสองนี้ต้องมีขนาดความยาวคลื่นที่ตรงกัน) จึงเสมือนกับการขยายสัญญาณข้อมูลแสงที่เดินทางในระบบสายส่งให้มีความเข้มแข็งแสงเพิ่มขึ้น พร้อมที่จะเดินทางไปใน

ระยะทางที่ไกลออกไปได้รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDF ต่อแทรกเข้าไปในระบบสายส่ง ข้อมูลแสงในระบบสื่อสารที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน จะเดินทางผ่านคับเปลอร์เส้นใยแสง (fiber coupler) ออกไป ในขณะที่สัญญาณอินพุตอีกทางหนึ่งของคับเปลอร์เส้นใยแสง จะถูกป้อนด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 980 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมในการกระตุ้น EDF แสงทั้งสองที่เดินทางรวมกันออกจากคับเปลอร์ในช่วงของเส้นใยแสงธรรมดาจะไม่มีอะไรเกิดขึ้น ข้อมูลแสงเดิมก็ยังคงมีความเข้มแสงไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในส่วนของEDF แสงที่มีความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้มีพลังงานที่สูงขึ้น เรียกว่าเป็นการปั๊ม (pump) และเมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาเพื่อรักษาสภาวะของตัวมัน จะได้แสงที่มีความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน เมื่อรวมกับข้อมูลแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากัน ก็จะทำให้สัญญาณพัลส์แสงมีค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นตามความยาวของ EDF และสามารถเดินทางเข้าไปในเส้นใยแสงธรรมดาที่เป็นสายส่งได้ต่อไป ในขณะเดียวกันพลังงานของแสงที่นำมาปั๊ม (ที่ 980 นาโนเมตร) ก็จะมีค่าลดลงและจางหายไปในที่สุด อย่างไรก็ตาม ขนาดความยาวของ EDF ที่มีค่ามากๆ มิได้หมายความว่าจะทำให้ความสามารถในการขยายสัญญาณแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเสมอด้วย แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดความยาวที่เหมาะสมค่าหนึ่งเท่านั้น อุปกรณ์ Optical Isolator ที่เห็นในรูปทำหน้าที่ควบคุมทิศทางของแสงให้เดินทางไปในทิศทางที่ต้องการและไม่สะท้อนกลับมารบกวนระบบ Isolator นี้จะมีหรือไม่มีก็ได้แล้วแต่สภาพโดยรวมของระบบและการใช้งานในทางปฏิบัติ ระบบ OFA ที่เป็น EDFA มักจะมีขนาดเล็ก



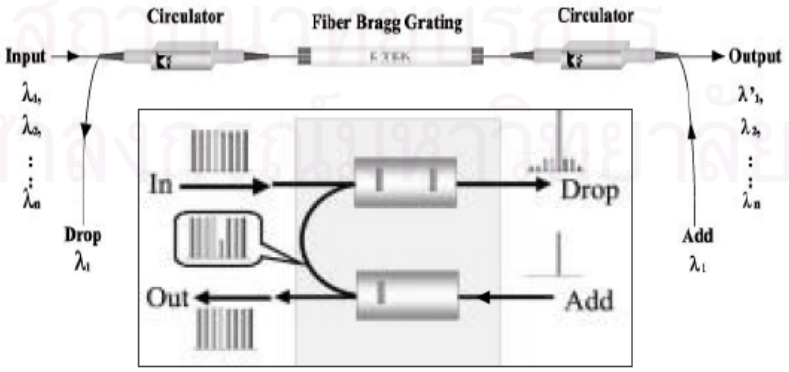
รูปที่ 2.13 การเกิดแสงของสสารเมื่อถูกกระตุ้น [22]



รูปที่ 2.14 การทำงานของสถานีทวนสัญญาณแสงที่ใช้ EDFA [22]

Optical Add/Drop Multiplexer (OADM)

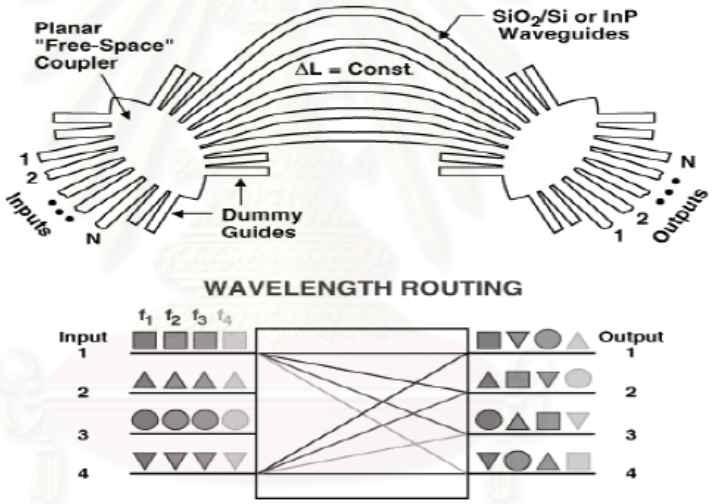
OADM ทำหน้าที่ให้สถานีในระบบสื่อสารสามารถรับข้อมูลแสงเฉพาะช่องสัญญาณที่กำหนด และใส่ข้อมูลไปยังปลายทางโดยใช้ช่องสัญญาณ (ความยาวคลื่นแสง) ที่กำหนดด้วยเช่นกัน อีกทั้ง OADM ยังสามารถแทรกเพิ่มเข้าไปในสายส่งเดิมในช่วงระหว่างสถานีได้อีกด้วย หลักการทำงานพื้นฐานของ OADM แสดงด้วยรูปอุปกรณ์จริงในรูปที่ 2.15 ซึ่งจะใช้ FBG เป็นอุปกรณ์หลักในการเลือกช่องสัญญาณที่ FBG สะท้อนความยาวคลื่นแสงกลับผ่าน circulator เพื่อ drop ช่องสัญญาณออกไป ในทำนองเดียวกัน ข้อมูลในช่องสัญญาณจะถูกส่งออกหรือ add เข้าไปที่อีกด้านหนึ่งของ FBG ซึ่งแสงจะเดินทางผ่าน circulator ผ่านเข้าไปใน FBG แล้วสะท้อนกลับผ่าน circulator ส่งออกไปยังปลายทาง ลักษณะของ FBG และ circulator ที่เป็นเส้นใยแสงในทางปฏิบัติ มีความยาวของอุปกรณ์เพียง 5-15 เซนติเมตร เท่านั้น



รูปที่ 2.15 โครงสร้างพื้นฐานของ OADM [22]

Optical Cross Connect (OXC)

OXC เปรียบเสมือนกับสถานีรถโดยสารต่างจังหวัดตามหัวเมืองใหญ่ๆ (เมื่อถนนเปรียบเสมือนเส้นทางเส้นใยแสง) ซึ่งเป็นจุดที่ผู้โดยสารสามารถเลือกเปลี่ยนเส้นทางรถโดยสารเพื่อเดินทางไปยังปลายทางที่ต้องการได้ โครงสร้างของ OXC ค่อนข้างซับซ้อน เพราะมักเกี่ยวข้องกับโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่ รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ OXC แบบหนึ่ง ในลักษณะของท่อนำแสงแบบระนาบ (optical planar waveguide) ที่มีทางเดินแสงขาเข้า หลายช่องสัญญาณ เมื่อแสงเดินทางผ่านไปในช่วงกลางที่โค้งและมีลักษณะขนานกัน แสงจะเกิดการคับปลิ้ง (coupling) ระหว่างท่อหนึ่งไปสู่อีกท่อหนึ่งที่ต้องการแล้วออกไปยังปลายทางได้ ทั้งนี้คุณสมบัติการคับปลิ้งแสงจะขึ้นกับความยาวของท่อนำแสง ลักษณะความโค้ง ระยะที่ท่อนำแสงห่างกัน ไปจนถึงค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่เป็นท่อนำแสงและฐาน (substrate) เป็นต้น ซึ่งการออกแบบ OXC แบบนี้ให้ทำงานตามที่กำหนด



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของ OXC ที่ใช้ Optical Planar Waveguide [22]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 โครงข่าย SDH

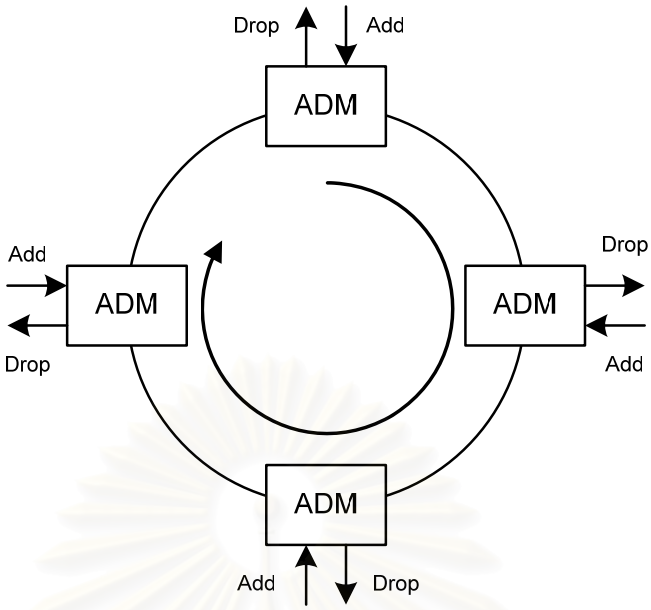
SDH (Synchronous Digital Hierarchy) เป็นมาตรฐานสากลของเครือข่ายสื่อสัญญาณความเร็วสูง เป็นเครือข่ายที่มีความทันสมัยมากในการสื่อสัญญาณและการบริหารจัดการเครือข่าย เทคโนโลยีของ SDH ช่วยให้ network operator สามารถตอบสนองความต้องการใช้ capacity ของช่องสัญญาณของลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว เครือข่าย SDH สามารถถูกออกแบบสร้างให้มีความสามารถในการฟื้นตัวเองได้อย่างอัตโนมัติในกรณีที่มีปัญหาขัดข้องเกิดขึ้นกับเครือข่าย ทำให้เครือข่ายมีความสามารถในการใช้การได้(availability)ที่สูงขึ้น การจัดโครงสร้างการมัลติเพล็กซ์ของสัญญาณ SDH ได้ช่วยให้สามารถต่อไขว้ (cross-connect) ช่องสัญญาณ low-order ที่อยู่ภายในช่องสัญญาณ high-order ได้โดยไม่จำเป็นต้องดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณทั้งหมดออกก่อน [33]

2.3.1 เครือข่าย SDH แบบวงแหวน

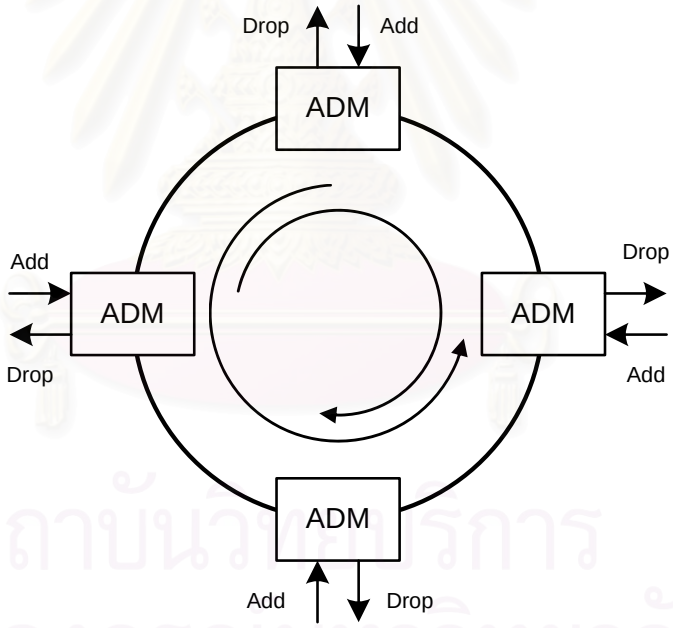
ระบบโครงข่ายวงแหวนของ SDH เกิดจากการเชื่อมโยงโหนดต่างๆเข้าด้วยกันเป็นลูปปิด แต่ละโหนดจะมี add-drop multiplexer (ADM) หน้าที่หลักของ ADM คือ การเพิ่มและดึงช่องสัญญาณในสายออกมาใช้งานได้

เครือข่ายแบบวงแหวนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ uni-directional และ bi-directional ขึ้นกับทิศทางการวิ่งของทราฟฟิกในภาวะปกติ ถ้าเป็นโครงข่ายวงแหวนแบบ uni-directional ทราฟฟิกใช้งานจะวิ่งรอบวงแหวนในทิศทางเดียวกันเท่านั้น ตัวอย่างอย่างเช่น ทิศทางตามเข็มนาฬิกาดัง รูปที่ 2.17 แต่ถ้าเป็นโครงข่ายวงแหวนแบบ bi-directional ทราฟฟิกที่รับและส่งจะมีทั้งสองทิศทางคือทั้งทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิการูปที่ 2.18

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.17 โครงข่ายวงแหวนแบบ uni-directional ทิศทางตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.18 โครงข่ายวงแหวนแบบ bi-directional

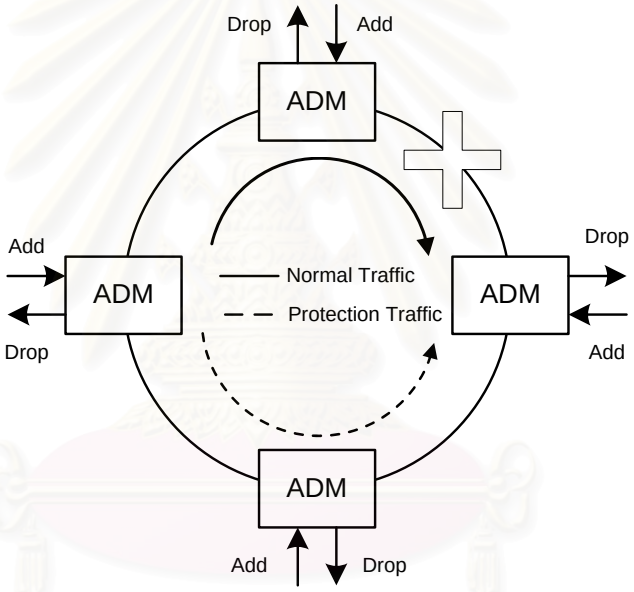
2.3.2 การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่าย SDH แบบวงแหวน

การนำโครงข่าย SDH มาใช้ร่วมกับเส้นใยแสงทำให้ทราฟฟิกที่วิ่งในเครือข่ายมีปริมาณสูงมาก จึงจำเป็นต้องมีระบบป้องกันเครือข่ายที่ดีเพื่อไม่ให้ได้รับผลกระทบมากนักจากผลเสียที่อาจ

เกิดขึ้นได้ แนวทางในการป้องกันมีได้หลายหนทาง วิธีการป้องกันที่นิยมใช้กันมาก 2 วิธีในระบบแบบวงแหวน คือ

2.3.2.1 การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่ายโดยการเปลี่ยนความยาวคลื่น (path protection)

การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่ายโดยการเปลี่ยนความยาวคลื่น คือ เมื่อเกิดการขาดของเส้นใยแสงขึ้นสถานีทุกสถานีจะสามารถรับรู้เส้นทางที่ขาดได้และในการส่งข้อมูลจะทำการเปลี่ยนเส้นทางใหม่ดัง รูปที่ 2.19 ซึ่งในการส่งข้อมูลในเส้นทางใหม่นั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงช่องความยาวคลื่นของสัญญาณและส่งไปในเส้นใยแสงปกติ ซึ่งในกรณีนี้โครงข่ายที่จะทำการป้องกันจะต้องมีช่องความยาวคลื่นที่ยังเหลือว่างสำหรับในการส่งข้อมูล

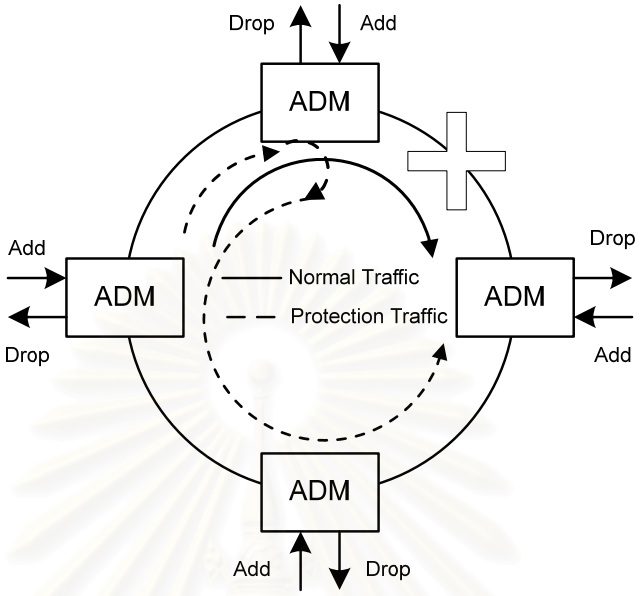


รูปที่ 2.19 การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่ายโดยการเปลี่ยนความยาวคลื่น

2.3.2.2 การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่ายโดยการใช้เส้นใยแสงสำรอง (span protection)

การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่ายโดยการใช้เส้นใยแสงสำรอง คือ เมื่อเกิดการขาดของเส้นใยแสงขึ้นสถานีที่อยู่ติดกับข่ายเชื่อมโยงที่ขาดเท่านั้นที่รับรู้เส้นทางที่ขาดและเมื่อข้อมูลเดินทางมาถึงสถานีที่มีข่ายเชื่อมโยงขาด สถานีนั้นจะเปลี่ยนเส้นทางของข้อมูลจากเส้นใยแสงปกติไปยังเส้นใยแสงสำรองในทิศทางตรงกันข้ามดัง รูปที่ 2.20 ซึ่งในการส่งข้อมูลในเส้นทางใหม่นั้นใช้เส้นใยแสงคนละเส้นกับเส้นใยแสงปกติ จึงไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนช่องความยาวคลื่นในการส่ง

แต่ข้อมูลนั้นจะเดินทางในโครงข่ายไกลกว่าการป้องกันการล้มเหลวของโครงข่ายโดยการเปลี่ยนความยาวคลื่น



รูปที่ 2.20 การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่ายโดยการใช้เส้นใยแสงสำรอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีการจัดการดิสเพอร์ชั่น (Dispersion management)

ในระบบที่สัญญาณข้อมูลแบบดิจิตอลในลักษณะของพัลส์ข้อมูล ซึ่งสัญญาณพัลส์ที่เดินทางในเส้นใยแก้ว จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าดิสเพอร์ชั่น (dispersion) ทำให้สัญญาณพัลส์เกินการบานออก ผลลัพธ์ก็คือเป็นตัวจำกัดปริมาณข้อมูลหรือทำให้บิตเรตสูงสุดของระบบลดลง ดังนั้นระบบ DWDM จึงต้องมีอุปกรณ์ Dispersion Compensator เพื่อทำหน้าที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทางอยู่เสมอ ผลของดิสเพอร์ชั่นที่เกิดย่อมมีผลกระทบกับทุกช่องสัญญาณด้วย ยิ่งระบบมีจำนวนช่องสัญญาณมาก ก็ต้องยิ่งให้ความดูแลและเอาใจใส่กับผลกระทบของดิสเพอร์ชั่นมากขึ้นด้วยในระบบโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่หรือโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูง

เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชั่นทำโดยการนำเอาเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชั่นที่ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชั่นและทำให้ค่าดิสเพอร์ชั่นเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่ (2.14)

$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \qquad (2.14)$$

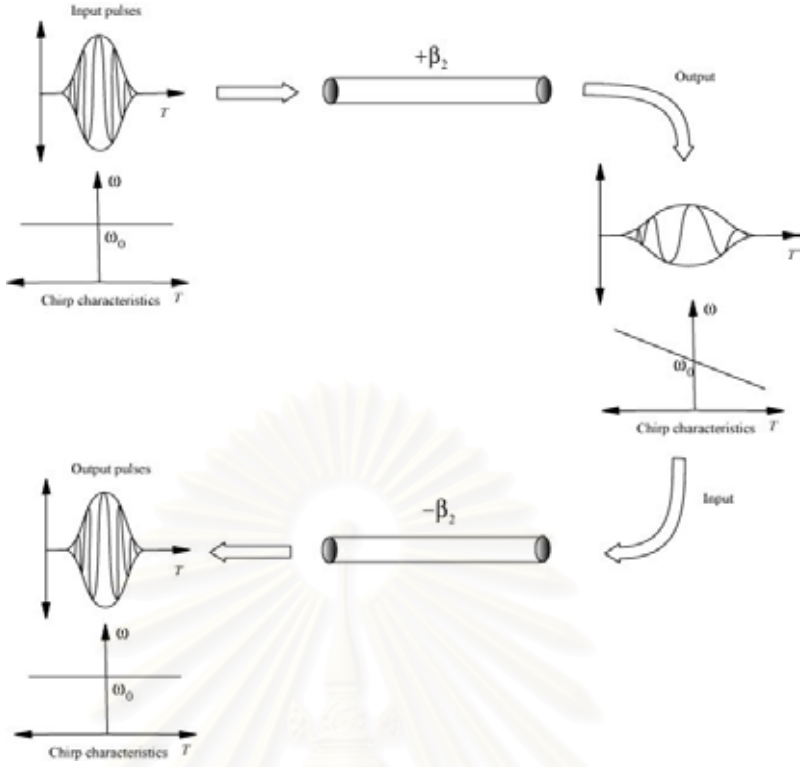
โดย D_1 คือ ค่าดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ (ps/km/nm)

D_2 คือ ค่าดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชั่น (ps/km/nm)

L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ (km)

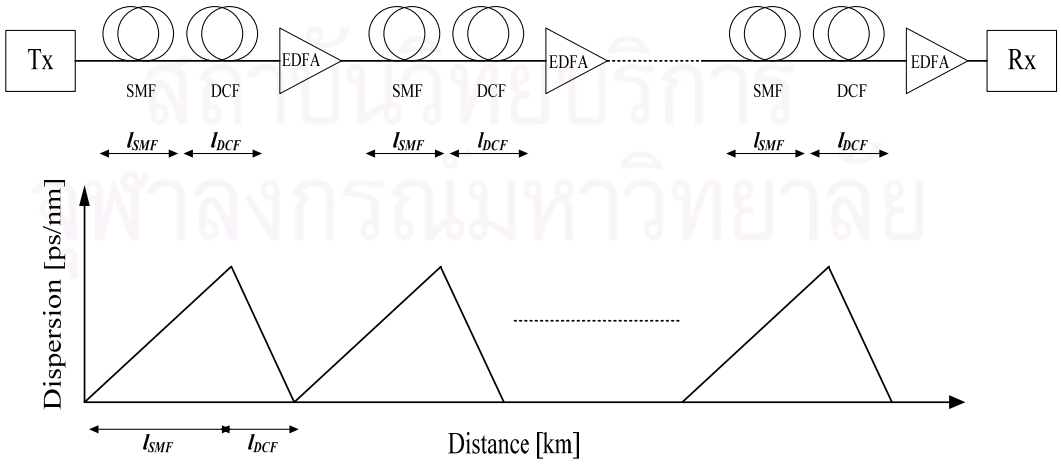
L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชั่น (km)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.21 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชั่นเพื่อขจัดความผิดเพี้ยน

รูปที่ 2.21แสดงถึงวิธีการขจัดความผิดเพี้ยนที่เกิดจากดิสเพอร์ชั่นด้วยเทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชั่น ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี GVD (β_2) ที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชั่นด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า β_2 ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการชดเชยดิสเพอร์ชั่น ส่งผลให้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ โดยในระบบการสื่อสัญญาณจริงจะมีการต่อการชดเชยดิสเพอร์ชั่นตามที่ได้กล่าวมาเป็นรายคาบดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ระบบการสื่อสัญญาณทางแสงที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ

จากรูปที่ 2.22 จะเห็นว่าการใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ถึงแม้ในระหว่างการสื่อสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าดิสเพอร์ชั่นขึ้นลงตลอดเวลา แต่ค่าดิสเพอร์ชั่นเฉลี่ยรวมของทั้งระบบจะมีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้สัญญาณที่เดินทางไปถึงที่ภาครับไม่เกิดความผิดเพี้ยนเนื่องจากผลของดิสเพอร์ชั่น

เราสามารถแปลงค่าดิสเพอร์ชั่นกับ GVD ได้ดังสมการที่ (2.15)

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2 \qquad (2.15)$$

โดยที่ D คือ ค่าดิสเพอร์ชั่น (ps/km/nm)

c คือ ค่าคงที่ความเร็วแสงในสุญญากาศ = 2.99739x10^8 m/s

λ คือ ค่าความยาวคลื่น (nm)

β_2 คือ ค่า GVD (ps^2/km)

นอกจากนี้การที่ทำการวางความยาวคลื่นโดยให้มีค่าดิสเพอร์ชั่นไม่เป็นศูนย์ยังช่วยลดผลเสียจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง เนื่องจากการมีค่าดิสเพอร์ชั่นจะส่งผลทำให้เกิดการลดลงของค่ากำลังสัญญาณสูงสุด (Peak power) ของสัญญาณ เมื่อมีค่ากำลังสัญญาณสูงสุดไม่สูงนัก ดังนั้นดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่ากำลังสัญญาณมีค่าสูงก็จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่ากำลังของสัญญาณ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบนั้นก็ยังทำได้เพียงช่วยลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากดิสเพอร์ชั่นเท่านั้น ยังไม่สามารถลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้ ดังนั้นสัญญาณที่เดินทางในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ก็ยังได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงอยู่

2.5 **เครื่องสังยุคเฟสแสง** (Optical Phase Conjugation)

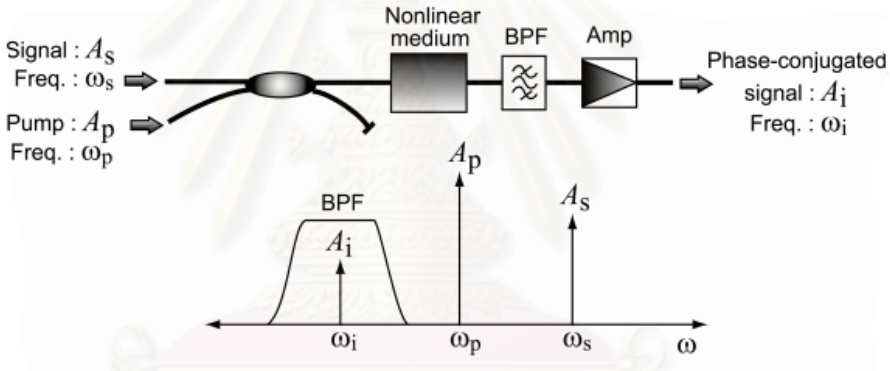
2.5.1 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีเครื่องสังยุคเฟสแสง (Optical Phase Conjugation)

วิธีการคอนจูเกตสัญญาณ เป็นทางเลือกทางหนึ่งที่สามารถชดเชยรูปคลื่นสัญญาณที่เกิดการขยายออกและการไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดความเพี้ยนขึ้น โดยการวางเครื่องเครื่องสังยุคเฟสแสง (optical phase conjugator) ไว้ที่กึ่งกลางระบบ เมื่อสัญญาณถูกปล่อยออกจากตัวส่งให้เดินทางในเส้นใยแสง รูปคลื่นสัญญาณจะเกิดความเพี้ยนขึ้นในฝั่งครึ่งแรกของระบบแต่จะสามารถกลับมาเป็นรูปคลื่นสัญญาณเดิมที่ไม่มีความเพี้ยนเกิดขึ้นที่เครื่องรับสัญญาณได้ โดยมีเงื่อนไขที่ว่า

คุณสมบัติย่อยในสายส่งของทั้งสองฝั่งของระบบจะต้องมีความสมมาตร เมื่อมองจากจุดกึ่งกลางของระบบ เครื่องสังยุคเฟสแสงนั้นสามารถสร้างสัญญาณคอนจูเกตได้โดยใช้หลักการจากกระบวนการ Four-Wave Mixing (FWM) ในตัวกลางที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่สาม (third-order nonlinear medium) ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างรุนแรง โดยเมื่อสัญญาณเข้าทำปฏิกิริยากับสัญญาณจากภายนอกที่ใส่เข้าไปที่เรียกว่าสัญญาณปั๊ม(Pump) ที่มีกำลังสูง ใน third-order nonlinear medium แล้วจะเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ขึ้นมาที่เรียกว่า idler wave โดยกระบวนการ FWM ซึ่ง idler wave เป็นคอนจูเกตกับสัญญาณเข้า ดังรูปที่ 2.23 สมการที่ (2.16)

$$2h\omega_p = h\omega_s + h\omega_i \tag{2.16}$$

โดยสมการที่ (2.16) หมายถึงพลังงานโฟตอนของสัญญาณปั๊มถูกแยกออกมาเพื่อเสริมสัญญาณที่ส่งเข้าและสร้าง Idle wave ที่เป็นคอนจูเกตกับสัญญาณที่ส่งเข้า



รูปที่ 2.23 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตโดยกระบวนการ FWM ใน third-order nonlinear medium

วิธีการลดผลของดิสเพอร์ชั่นของเครื่องสังยุคเฟสแสง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Nonlinear Schrodinger สมการที่ (2.17)

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - \frac{i}{2}\beta_2\frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i\gamma|A|^2 A \tag{2.17}$$

โดยที่ α คือ attenuation coefficient (dB/km)

β_2 คือ GVD coefficient (dispersion)

γ คือ nonlinearity coefficient

z คือ ระยะทาง

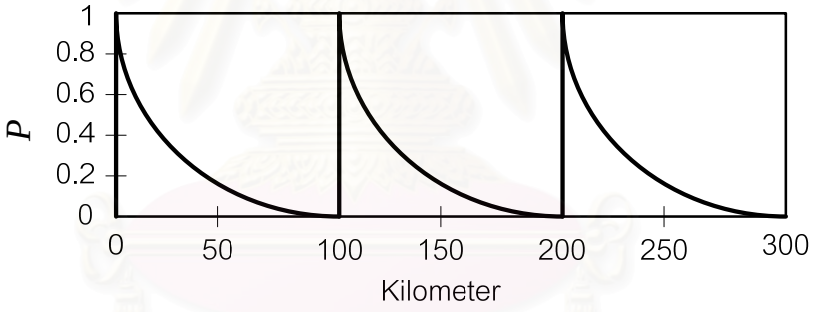
T คือ กรอบเวลาอ้างอิงเทียบกับความเร็วกลุ่ม

A คือ amplitude of the electric field

เมื่อสัญญาณผ่านเครื่องสังยุคเฟสแสงก็จะได้ สมการที่ (2.18) [12]

$$\frac{\partial A^*}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A^* + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A^*}{\partial T^2} - i\gamma \left|A^*\right|^2 A^* \qquad (2.18)$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณเดินทางไประยะทางหนึ่งก็จะเกิดดิสเพอร์ชั่นดูจากค่า β_2 และเมื่อผ่านเครื่องสังยุคเฟสแสงก็จะสังยุคเฟสทำให้เครื่องหมายหน้าจำนวนเชิงซ้อนกลับค่า จึงเปลี่ยนจาก β_2 เป็น $-\beta_2$ และเมื่อเดินทางต่อไปในเส้นใยแสงเส้นเดิมค่า β_2 ก็จะหักล้างกันจนหมด ทำให้มีดิสเพอร์ชั่น และเครื่องสังยุคเฟสแสงก็สามารถจัดการความไม่เป็นเชิงเส้นได้ จากสมการ nonlinear Schrodinger จะเห็นได้ว่า nonlinearity coefficient γ ก็สามารถลดได้ด้วยเช่นกัน คือ Self-Phase Modulation (SPM) แต่ก็ไม่ได้สามารถลดได้ทั้งหมด เนื่องจาก SPM เกิดจากพลังงานของสัญญาณ แต่ในระบบรูปแบบของกำลังส่งไม่สมมาตรดังรูปที่ 2.24 ทำให้ลดผลของ SPM ได้ไม่ทั้งหมด



รูปที่ 2.24 รูปแบบพลังงานของสัญญาณในการส่ง

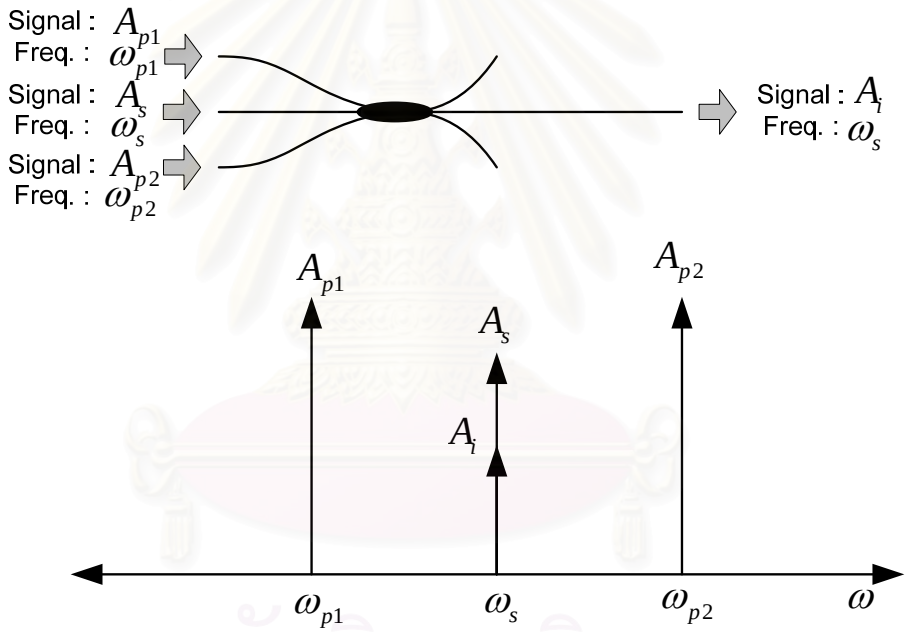
ในการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบนั้น สามารถชดเชยผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้น และ ดิสเพอร์ชั่นในระบบที่มีระยะสั้นได้อย่างดี แต่ในระบบที่มีระยะยาวจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบของสัญญาณกำลัง (periodic power variation) และ การแกว่งไป-มาของค่า dispersion ตลอดทั้งระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณที่เพี้ยนขึ้นที่เครื่องรับ

2.5.2 ชนิดของเครื่องสังยุคเฟสแสง

ในวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวกับเครื่องสังยุคเฟสแสง 2 ชนิด คือ ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength shift) และ ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น (wavelength shift free) ซึ่งในหัวข้อนี้จะอธิบายถึง หลักการทำงาน และการคอนจูเกตสัญญาณ WDM ในแต่ละความยาวคลื่น

2.5.2.1 เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength shift)

เครื่องสังยุคเฟสแสงนี้ใช้ปรากฏการณ์ FWM ในการสร้างสัญญาณคอนจูเกต แต่เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นนี้ต้องการให้สัญญาณคอนจูเกตเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณข้อมูลเดิม ดังนั้นในการสร้างสัญญาณคอนจูเกตเราจึงต้องทำการใช้ปั๊มพลังงาน 2 ปั๊ม ที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ดังรูปที่ 2.25

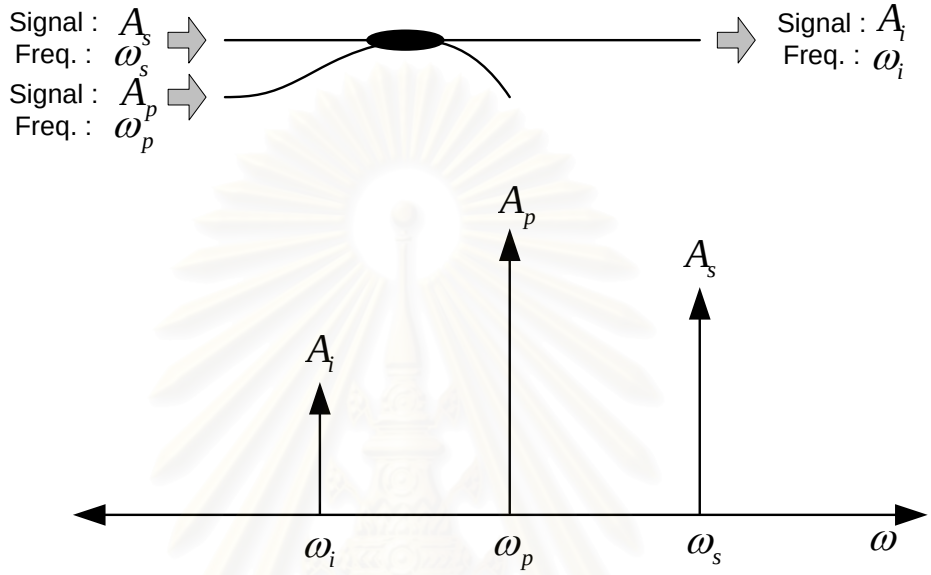


รูปที่ 2.25 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.25 ปั๊มพลังงานตัวที่ 1 อยู่ที่ความยาวคลื่น ω_{p1} และปั๊มพลังงานตัวที่ 2 อยู่ที่ความยาวคลื่น ω_{p2} เมื่อความยาวคลื่นของปั๊มพลังงานทั้ง 2 สอดคล้องกันตามปรากฏการณ์ FWM และความยาวคลื่นเหมาะสมกัน จะทำให้ความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตเป็นความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นของสัญญาณข้อมูลที่ ω_s แต่กำลังของสัญญาณจะลดลง

2.5.2.2 เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น (wavelength shift free)

โดยปกติเครื่องสังยุคเฟสแสงจะเป็นชนิดเลื่อนความยาวคลื่นเนื่องจากในกระบวนการสร้างสัญญาณคอนจูตเกตทำได้ง่ายกว่า คือ ใช้ปั๊มพลังงานเพียง 1 ปั๊ม ในการสร้างสัญญาณคอนจูเกต ดังรูปที่ 2.26

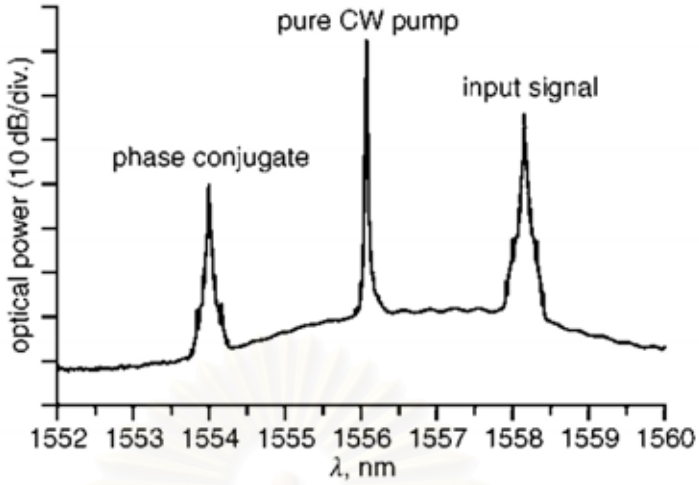


รูปที่ 2.26 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบเลื่อนความยาวคลื่น

จาก รูปที่ 2.26 จะเห็นว่ามีการใช้ปั๊มพลังงานเพียง 1 ปั๊มเท่านั้น โดยจะทำการปั๊มที่ความยาวคลื่น ω_p ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ส่งผลให้เกิดสัญญาณคอนจูเกตขึ้น แต่สัญญาณคอนจูเกตที่ได้จะมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปคือความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตจะเกิดขึ้นที่อีกด้านหนึ่งของปั๊มพลังงาน การใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นจะได้สัญญาณคอนจูเกตที่มีกำลังมากกว่าใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น

2.5.3 ประสิทธิภาพเครื่องสังยุคเฟสแสง

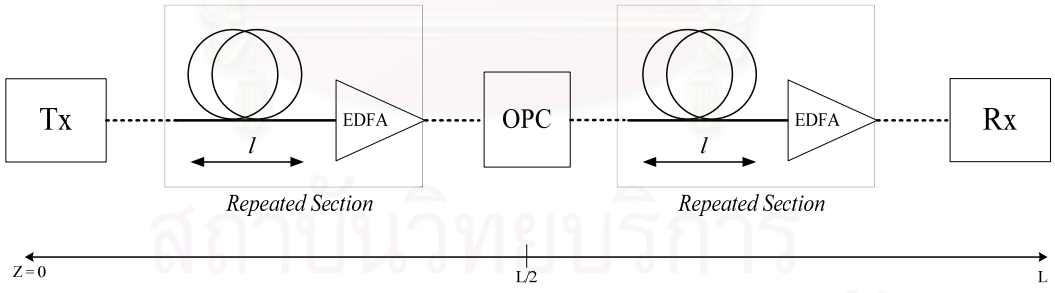
กำลังสัญญาณที่ได้จากเครื่องสังยุคเฟสแสงจะมีค่าต่ำกว่ากำลังสัญญาก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสง ลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์ FWM ทำให้สัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นนั้นมีพลังงานน้อยกว่าสัญญาณที่เข้าไปในเครื่องสังยุคเฟสแสง จากการจำลองระบบที่มีการส่งระยะทาง 75 กิโลเมตร ส่งข้อมูลที่ความยาวคลื่น 1558.16 nm และมีเครื่องสังยุคเฟสแสงที่มีปั๊มพลังงานที่ 1556 nm ได้ประสิทธิภาพของเครื่องสังยุคเฟสแสงดังรูปที่ 2.27 ซึ่งมีค่าประมาณ -14.5 dB [32]



รูปที่ 2.27 ประสิทธิภาพของเครื่องสังยุคเฟสแสง [32]

2.5.4 การจัดการดิสเพอร์ชั่นด้วยเครื่องสังยุคเฟสแสง

วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบเป็นทางเลือกทางหนึ่งที่สามารถชดเชยรูปคลื่นสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดความผิดเพี้ยนขึ้น โดยการวางอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณไว้ที่กึ่งกลางระบบดัง รูปที่ 2.28 เมื่อสัญญาณถูกปล่อยออกจากตัวส่งให้เดินทางในเส้นใยแสง รูปคลื่นสัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นในฝั่งครึ่งแรกของระบบแต่จะสามารถกลับมาเป็นรูปคลื่นสัญญาณเดิมที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นที่เครื่องรับสัญญาณได้ โดยมีเงื่อนไขที่ว่า คุณสมบัติย่อยในสายส่งของทั้งสองฝั่งของระบบจะต้องมีความสมมาตรเมื่อมองจากจุดกึ่งกลางของระบบ

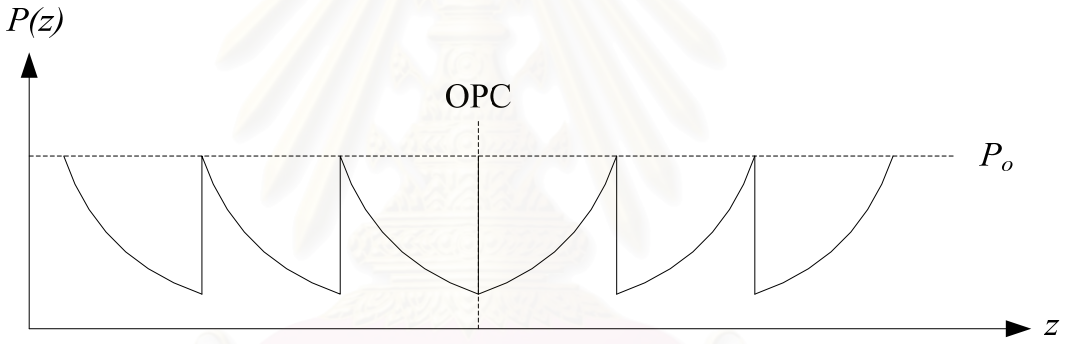


รูปที่ 2.28 ระบบการสื่อสัญญาณทางแสงที่มีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงไว้ที่กึ่งกลางระบบ

จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณเดินทางไประยะทางหนึ่งจะได้รับผลจากดิสเพอร์ชั่น β_2 และเมื่อผ่านอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณก็จะเกิดการกลับเฟส นั่นคือ พจน์ที่เป็นส่วนจินตภาพ (Imaginary part) จะมีการเปลี่ยนเครื่องหมายจากลบเป็นบวก จากบวกเป็นลบ ดังจะเห็นได้จากที่พจน์ที่เป็นส่วนของดิสเพอร์ชั่นและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีการกลับเครื่องหมายหน้าพจน์ และเมื่อเดินทางต่อไปในเส้นใยแสงเส้นเดิมในช่วงครึ่งหลัง ซึ่งจะได้รับผลจากดิสเพอร์ชั่นค่าเดียวกับครึ่งแรกที่เป็นค่าบวก ก็จะเกิดการหักล้างกัน ทำให้พจน์ของดิสเพอร์ชั่นหายไป

นอกจากนั้นอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณยังสามารถจัดการความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้อีกด้วย แต่ไม่สามารถลดได้ทั้งหมด เนื่องจากค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงในช่วงแรกและช่วงหลังของการส่งสัญญาณไม่สมมาตรกัน เหตุเพราะค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงขึ้นกับกำลังสูงสุดของสัญญาณ ถึงแม้กำลังสูงสุดของสัญญาณจะสมมาตรกันดังรูปที่ 2.29 แต่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเอกซ์โพแนนเชียลของกำลังสัญญาณยังส่งผลต่อความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ทำให้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบไม่สามารถลดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้ทั้งหมด

ในการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบนั้นสามารถชดเชยผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง และดิสเพอร์ชั่นในระบบที่มีระยะสั้นได้อย่างดี แต่ในระบบที่มีระยะยาวจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับ การเปลี่ยนแปลงเป็นรายคาบของสัญญาณกำลัง (Periodic power variation) และการแกว่งไป-มาของค่าดิสเพอร์ชั่นตลอดทั้งระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณที่เพี้ยนขึ้นที่เครื่องรับ [26]



รูปที่ 2.29 กำลังสัญญาณของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง
ที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ

เงื่อนไขที่สำคัญในการออกแบบเพื่อให้คุณสมบัติของการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบนั้นมีประสิทธิภาพสูงคือ

1. ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง ต้องสั้นกว่าระยะที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Nonlinearity length)
2. ค่าดิสเพอร์ชั่นนั้นต้องอยู่ในบริเวณดิสเพอร์ชั่นปกติ (สองเงื่อนไขนี้ใช้กำจัดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเป็นรายคาบของสัญญาณกำลัง)
3. ในส่วนต่างๆ ของเส้นใยแสงจะต้องมีค่าคงที่เฉลี่ยทั้งระบบของค่าดิสเพอร์ชั่นยาวกว่าระยะที่มีผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้น (เงื่อนไขนี้ใช้กำจัดผลกระทบของการแกว่งไป-มาของค่าดิสเพอร์ชั่น)

กำลังของสัญญาณที่เกี่ยวข้องและดิสเพอร์ชั่นทั้งสองด้านของอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณต้องเป็นแบบสมมาตร (เงื่อนไขนี้เพื่อให้อุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณทำการคอนจูเกตได้สมบูรณ์)

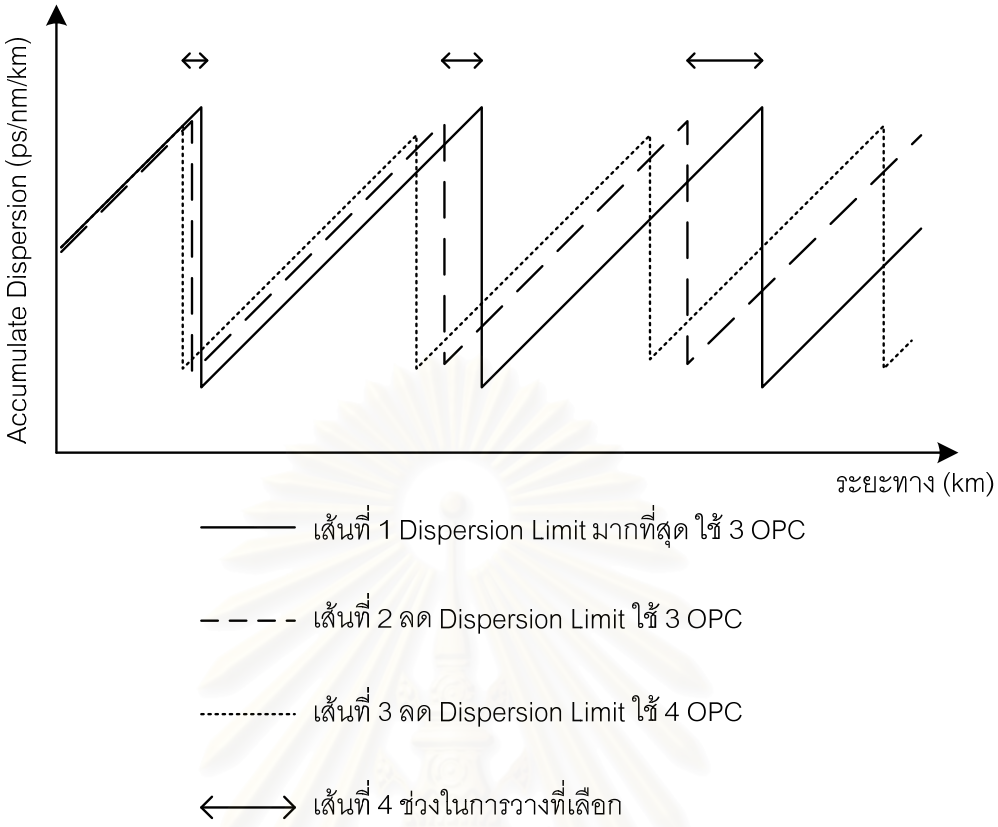
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบวงแหวน

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการศึกษาการนำเครื่องสังยุคเฟสแสงมาใช้ในระบบโครงข่าย โดยเริ่มต้นศึกษาการทำงานของเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ในระบบโครงข่าย 3 แบบ คือ โครงข่ายเชื่อมโยงปกติ โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายกรณีมีช่องความยาวคลื่นเหลือเพียงพอ และโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายกรณีมีช่องความยาวคลื่นเหลือไม่เพียงพอ จากนั้นเป็นการศึกษาการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบต่างๆ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- **วิเคราะห์เส้นทางและทิศทางของทราฟฟิก** ในขั้นแรก ต้องทำการหาจำนวนทราฟฟิกที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการส่ง หลังจากนั้นทำการ หาระยะทางที่สั้นที่สุดในการส่งข้อมูลของแต่ละทราฟฟิก
- **วิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง** ทำการหาช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของทุกๆ ทราฟฟิกโดยพิจารณาเฉพาะความยาวคลื่นที่มีดิสเพอร์ชั่นมากที่สุด เนื่องจากค่าดิสเพอร์ชั่นที่มากที่สุดจะส่งผลกับโครงข่ายมากกว่าความยาวคลื่นอื่นและเครื่องสังยุคเฟสแสงนั้นสามารถทำการชดเชยผลของดิสเพอร์ชั่นในทุกความยาวคลื่นพร้อมกันได้ เราสามารถหาช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้จากการคำนวณดิสเพอร์ชั่นสะสมโดยใช้ค่าดิสเพอร์ชั่นลิมิตมากที่สุดแล้วทำการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงเราจะได้จำนวนและตำแหน่งในการวางดังรูปที่ 3.1 เส้นที่ 1 จากนั้นลดค่าดิสเพอร์ชั่นลิมิตลงแล้วทำการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงอีกครั้งเราจะได้จำนวนและตำแหน่งดังรูปที่ 3.1 เส้นที่ 2 ถ้าจำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสงยังเท่าเดิมทำการลดค่าดิสเพอร์ชั่นลิมิตลงจนกระทั้งจำนวนของเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใช้เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.1 เส้นที่ 3 จากตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงจากดิสเพอร์ชั่นลิมิตมากที่สุดจนกระทั่งน้อยที่สุดที่ยังใช้จำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสงเท่าเดิม คือช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงดังรูปที่ 3.1 เส้นที่ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 การหาช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง

- **กำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสง** นำช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่คำนวณได้ทุกช่วงมาหาช่วงที่มีการซ้อนทับกันมากที่สุดทุกๆ ช่วงที่จำเป็นต้องมีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ต่อจากนั้นจึงวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในตำแหน่งที่อยู่ใกล้สถานีที่ส่งมากที่สุดหรือจุดที่สะดวกที่สุดต่อการวาง เพื่อให้ดิสเพอร์ชั่นสะสมมีค่าน้อยที่สุด

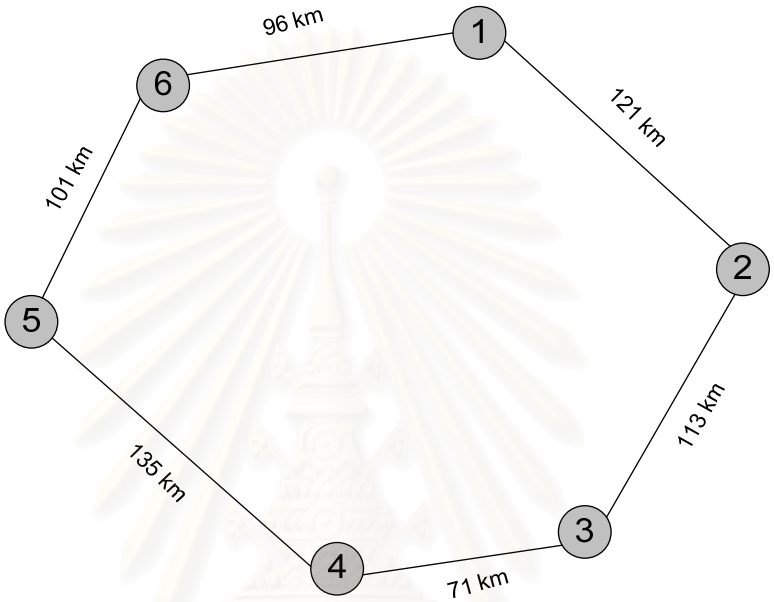
โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนที่ได้กล่าวมาจะขอยกตัวอย่างบนโครงข่ายตัวอย่างดังรูปที่ 3.2 เพื่อง่ายในการทำความเข้าใจและนำไปใช้งาน

3.1 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น

ในการเริ่มต้นวางเครื่องสังยุคเฟสแสงจะเริ่มทำการศึกษาจากเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น เพื่อควบคุมจำนวนตัวแปรในการวาง เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นจะมีปั๊มพลังงาน 2 ตำแหน่งเพื่อสร้างสัญญาณคอนจูเกตให้เกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดิมดังรูปที่ 2.25 และทำการวางลงบนโครงข่ายตัวอย่าง

3.1.1 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

การศึกษาวิธีการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสทางแสงเพื่อจัดวางในโครงข่ายแบบวงแหวนทำได้โดยการทดสอบกับโครงข่ายตัวอย่างดัง รูปที่ 3.2 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 6 เส้นใยแสง ส่งข้อมูลสองทิศทาง โดยวิธีที่ได้ศึกษาและนำเสนอนี้มีทั้งหมด 3 ขั้นตอนในการหาตำแหน่งวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ดังนี้



รูปที่ 3.2 โครงข่ายตัวอย่าง

3.1.1.1 การวิเคราะห์เส้นทางและทิศทางของทราฟฟิก

ในขั้นแรก ต้องทำการหาจำนวนทราฟฟิกที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการส่งซึ่งมีจำนวนเท่ากับ $N \times (N-1)$ แบบ โดย N คือจำนวนสถานีทั้งหมด หลังจากนั้นทำการคำนวณหาระยะทางที่สั้นที่สุดในการส่งข้อมูลของแต่ละทราฟฟิก ซึ่งจากตัวอย่างโครงข่ายเราสามารถหาความเป็นไปได้ในการส่งทั้งหมดมี $6 \times 5 = 30$ การส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายตัวอย่างนี้โดยการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่สั้นที่สุด

1 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km
1 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km	2 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km

1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนนาฬิกา ระยะทาง 217 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 135 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 135 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่1 ไปยังสถานีที่4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1

และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิกย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิกย่อย คือ ระหว่างสถานีที่1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิกใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุด จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 3.2 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังตารางที่ 3.2

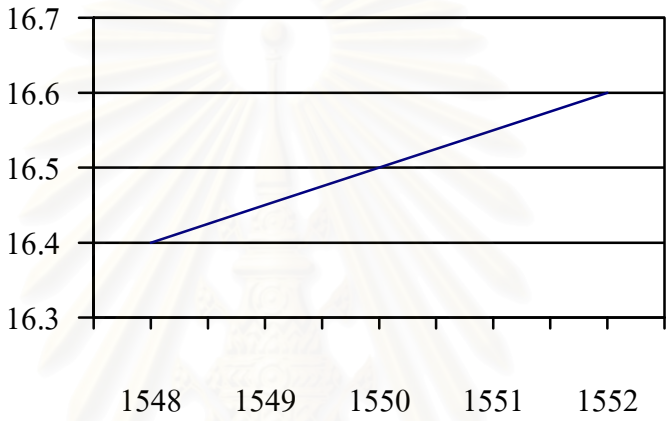
ตารางที่ 3.2 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km

3.1.1.2 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

การจัดการดิสเพอร์ชั่นของเครื่องสังยุคเฟสแสงนั้นขึ้นอยู่ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ ดังนั้นระยะห่างแต่ละตำแหน่งของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงจึงมีผลต่อการจัดการดิสเพอร์ชั่น ในการจัดการดิสเพอร์ชั่นเราจะเลือกค่าดิสเพอร์ชั่นของความยาวคลื่นที่มีผลมากที่สุดในโครงข่าย ซึ่งถ้าความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชั่นมากที่สุดของสัญญาณ ไม่เกินค่าจำกัดของดิสเพอร์ชั่น (D_{max}) ความยาวคลื่นอื่นๆ ก็สามารถผ่านไปได้ด้วยเช่นกัน สำหรับทุกๆ ค่าของทราฟฟิกซึ่งเราหาได้จากขั้นตอนที่ 1 แล้ว จะนำแต่ละทราฟฟิกมาหาช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง โดยไม่ให้ดิสเพอร์

ชั่นเกินค่าที่กำหนดและใช้จำนวนน้อยที่สุด จากการทดลองในตัวอย่างโครงข่าย ซึ่งระบบทำการส่งข้อมูลด้วยความยาวคลื่นทั้งหมด 5 ความยาวคลื่น โดยความยาวคลื่นกลางอยู่ที่ 1550 nm มีระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น 0.8 nm โดยโครงข่ายตัวอย่างใช้ เส้นใยแสงชนิด Single-mode fiber (SMF,G.652) ซึ่งมีดิสเพอร์ชั่น (D_2) 16.5 ps/km/nm มีความชันดิสเพอร์ชั่น (D_3) 0.05 ps/km/nm^2 ที่ 1550 nm และมีค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมไม่เกิน 1600 ps/nm [27] ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชั่นดังรูปที่ 3.3 จากความยาวคลื่นทั้งหมด 5 ความยาวคลื่น เราจะเลือกความยาวคลื่นดังนี้ 1548.4 1549.2 1550 1550.8 และ 1551.6 nm ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ดิสเพอร์ชั่นของ เส้นใยแสงชนิด SMF

จากความยาวคลื่น 1548.4 1549.2 1550 1550.8 และ 1551.6 nm รวมทั้งจากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชั่นมากที่สุดคือความยาวคลื่น 1551.6 nm เราสามารถหาค่าดิสเพอร์ชั่นสูงสุดจากสมการที่ (3.1)

$$D = 16.5 + (1.6 \times 0.05) = 16.58 \qquad (3.1)$$

จากระยะทางและค่าดิสเพอร์ชั่นที่คำนวณได้ จากตารางที่ 3.2 เราสามารถหาช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ดัง ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง

1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 48-96 และ 183-288	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km เลือกวางที่กม.ที่ 44-96
1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา	2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา

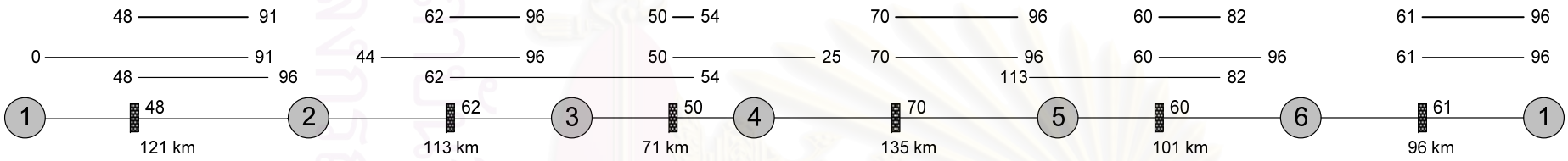
ระยะทาง 197 km เลือกวางที่กม.ที่ 51-96	ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 61-96 และ 186-288
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km เลือกวางที่กม.ที่ 69-96 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-96 และ 184-288	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 48-96 และ 183-288 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km เลือกวางที่กม.ที่ 70-96
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 60-96 และ 197-288 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km เลือกวางที่กม.ที่ 55-96	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km เลือกวางที่กม.ที่ 61-96 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-96 และ 184-288

เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสงแล้ว นำทุกช่วงที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับตำแหน่งบนโครงข่ายตัวอย่าง เพื่อหาจุดวางที่เหมาะสม รูปที่ 3.4 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา และรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา โดยในการกำหนดตำแหน่งของเครื่องสังยุคเฟสแสง ในโครงข่ายนั้น มีข้อกำหนดว่าทุกๆ ช่วงระหว่างสถานีย่อยระหว่างเส้นทางหลัก หรือก็คือ ภายในทราฟฟิกย่อยของแต่ละช่วงนั้นต้องมีการติดตั้งเครื่องสังยุคเฟสแสง เพื่อไม่ให้ค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมมีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนดในแต่ละช่วงย่อยมีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงลงไปเพื่อไม่ให้ดิสเพอร์ชั่นสะสมเกินขอบเขต ตัวอย่างเช่น จากสถานีที่ 1 ส่งข้อมูลไปยังสถานีที่ 2 ทิศทางตามเข็มนาฬิกา เราจะได้ช่วงในการวางคือ กิโลเมตรที่ 48-96 ของข้อมูลจากสถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 และ กิโลเมตรที่ 0-91 ของข้อมูลจากสถานีที่ 5 ส่งไปสถานีที่ 2 เราจะเลือกช่วงในการวางที่ซ้อนทับกัน นั่นก็คือ กิโลเมตรที่ 48-91 เป็นช่วงที่ร่วมกันทั้งหมด ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาและ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

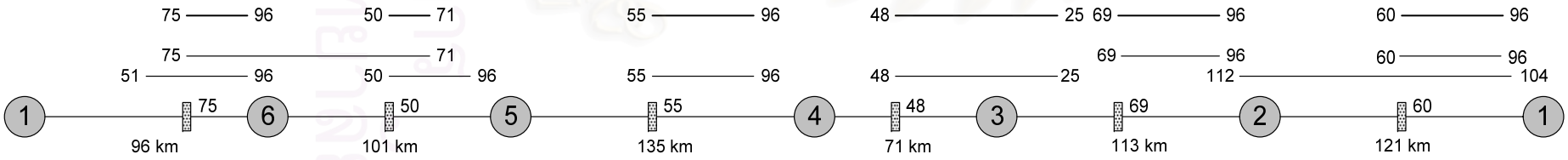
3.1.1.3 การกำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

ในการส่งข้อมูลด้วยโครงข่ายแบบวงแหวนนั้น ผู้ใช้มีโอกาสนำสัญญาณข้อมูลไปใช้งานจากทุกตำแหน่งใดๆ ในโครงข่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการออกแบบให้สัญญาณในระบบมีค่าดิสเพอร์ชั่นต่ำสุดตลอดระยะทางการส่ง ดังนั้นการคำนวณหาตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสง นะโครงข่ายควรเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมกับข้อกำหนดดังกล่าวด้วย จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 3.2 จะพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด คือ ตำแหน่งที่อยู่ใกล้สถานีที่ส่งมากที่สุด อย่างในตัวอย่างจากสถานีที่ 1 ถึงสถานีที่ 2 ช่วงที่สามารถวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้คือ 48-91 เราต้องเลือกตำแหน่งที่ 48 เป็นจุดที่ห่างจากสถานีที่ 1 น้อยที่สุด และทำซ้ำกับทุกๆ ช่วงจะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด แสดงไว้ในรูปที่ 3.6

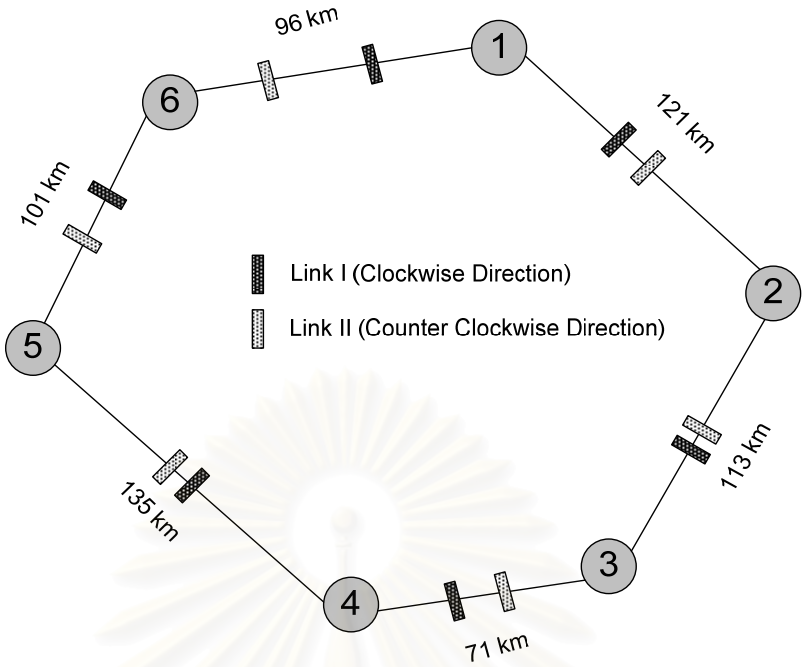
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.5 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.6 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากที่ได้กล่าวมา จะพบว่า ตำแหน่งที่เหมะสมที่สุดสำหรับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง สามารถแสดงได้รูปที่ 3.6 โดยตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสง สำหรับกรณีมีการส่งข้อมูลแบบตามเข็มแสดงได้ด้วย Link 1 และ สำหรับกรณีมีการส่งข้อมูลแบบตามเข็มแสดงได้ด้วย Link 2 ซึ่งสรุปตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายได้ดังนี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 48

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 62

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 75

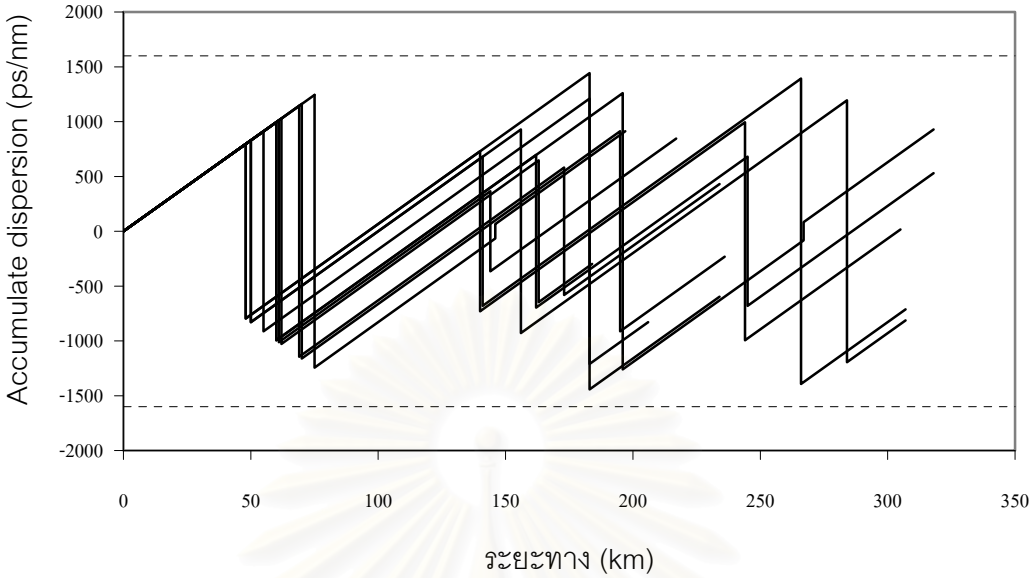
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 55

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 48

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 60



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี

หลังจากที่ได้ดำเนินการทั้ง 3 ขั้นตอนจนได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด เราได้ตรวจสอบการทำงานของทราฟฟิก 30 ทราฟฟิก ซึ่งเป็นจำนวนทราฟฟิกทั้งหมดที่เป็นไปได้ โดยการหาค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมและทำการเปรียบเทียบกับค่าดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด เราคำนวณค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมโดยเริ่มต้นจากสถานีเริ่มต้นเดินทางเป็นจนถึงเครื่องสังยุคเฟสแสง จะได้ค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมตามสมการที่ (3.2)

$$D_{acc} = D \times L \tag{3.2}$$

โดย D_{acc} คือ ดิสเพอร์ชั่นสะสม accumulate dispersion (ps/nm)

D คือ ค่าดิสเพอร์ชั่น (ps/nm/km)

L คือ ระยะทาง (km)

เมื่อถึงตำแหน่งที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงจะทำให้ค่าดิสเพอร์ชั่นเปลี่ยนไปตามสมการที่ (3.3)

$$D_{acc-out} = -D_{acc-in} \tag{3.3}$$

โดย D_{acc-in} คือ ดิสเพอร์ชั่นสะสมก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสง (ps/nm)

$D_{acc-out}$ คือ ดิสเพอร์ชั่นสะสมหลังออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสง (ps/nm)

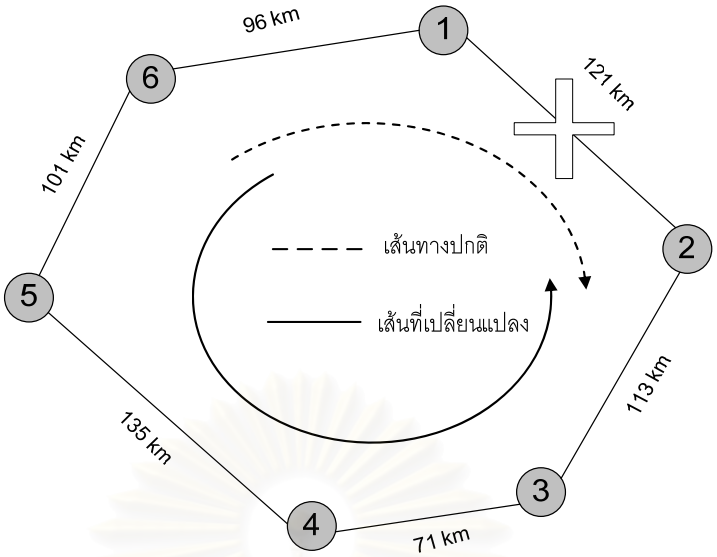
และทำการคำนวณหาดิสเพอร์ชั่นสะสมต่อไปตามสมการที่ (3.2) และ (3.3) จะถึงสถานีปลายทาง จะได้ดัง

รูปที่ 3.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่เกิดขึ้นในทราฟฟิกทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน –1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

3.1.2 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

จากที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.1.1 ซึ่งเป็นการศึกษาการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ในกรณีโครงข่ายปกติ ในหัวข้อถัดไป เราได้ศึกษากรณีที่โครงข่ายมีการเสียหายเกิดขึ้น ซึ่งการเกิดการเสียหายมีผลต่อการส่งข้อมูลในระบบ เนื่องจากเส้นทางของโครงข่ายจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังนั้นในการศึกษาการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายจึงซับซ้อนกว่ากรณีโครงข่ายปกติ เนื่องจากไม่สามารถคาดเดาตำแหน่งที่ข่ายเชื่อมโยงจะเกิดการเสียหายขึ้นได้ เราจึงทำการจำลองการเสียหายทีละส่วน และการศึกษาการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายในขั้นแรก ในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ระบบจะนำข้อมูลที่ต้องส่งผ่านบริเวณที่ลิงค์เสียหายมาทำการส่งข้อมูลในลิงค์ที่ไม่เกิดการเสียหายแทน คือส่งไปในทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นทางที่เสียหาย ระบบจะทำการเปลี่ยนจากความยาวคลื่นหลักมาเป็นความยาวคลื่นสำรอง ในการส่งข้อมูลแทน ซึ่งจะทำให้ระยะทางในการส่งเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังตัวอย่าง ถ้าเกิดการล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงระหว่างสถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 จะทำให้ ทราฟฟิกที่ส่งจาก สถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 แบบตามเข็มนาฬิกา(ระยะทางสั้นที่สุด)ไม่สามารถส่งได้ ระบบจะทำการเปลี่ยนความยาวคลื่นและส่งในทิศทางตรงกันข้ามคือ ทวนเข็มนาฬิกา(ระยะทางยาวที่สุด) แทนดังรูปที่ 3.8 ทำให้ระยะทางเปลี่ยนแปลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงเส้นทางของทราฟฟิกเมื่อข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

3.1.2.1 การวิเคราะห์เส้นทางและทิศทางของทราฟฟิกบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นใยแสง เมื่อทำการจำลองการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km (จากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km
1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km
1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา	4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา

ระยะทาง 330 km	ระยะทาง 401 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km
3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

จากตารางที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานี

ที่1 ไปยังสถานีที่4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิกย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิกย่อย คือ ระหว่างสถานีที่ 1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิกใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุดในกลุ่มที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 3.2 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกันได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สรุปทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนแปลงจากทราฟฟิกปกติ

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km

5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km
5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km	6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

จาก ตารางที่ 3.5 แสดงเส้นทางการส่งข้อมูลที่ตัดเส้นทางการคำนวณที่ซ้ำซ้อนลง จากนั้นในการคำนวณตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง จะคำนวณจากระยะทางระหว่างสถานีส่งที่มีการส่งไกลที่สุดเช่นเดียวกับการคำนวณการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ ซึ่งสามารถแสดงเส้นทางที่มีการส่งไกลที่สุดได้ดัง ตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km
3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km	4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km
5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

3.1.2.2 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

จากสมการที่ (3.1) ค่าดิสเพอร์ชั่นเป็น 16.58 และระยะทางจากตารางที่ 3.6 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 และ 332-480
3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 และ 332-480 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 232-288 และ 374-480	4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 232-288 และ 374-480 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480
5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km เลือกวางที่กม.ที่ 38-96,	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km เลือกวางที่กม.ที่ 38-96,

152-288 และ 344-480	152-288 และ 344-480

เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่นนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และก็นำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสม ดัง

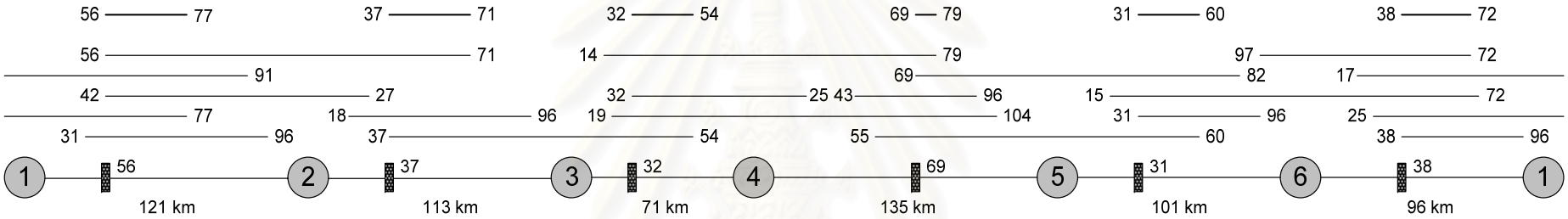
รูปที่ 3.9 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา และ

รูปที่ 3.10 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาและ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

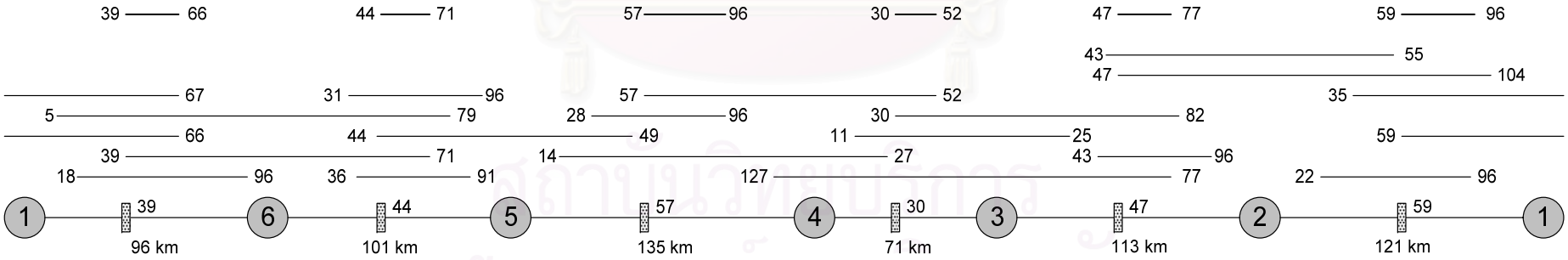
3.1.2.3 การกำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

เช่นเดียวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อโยง จะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.11

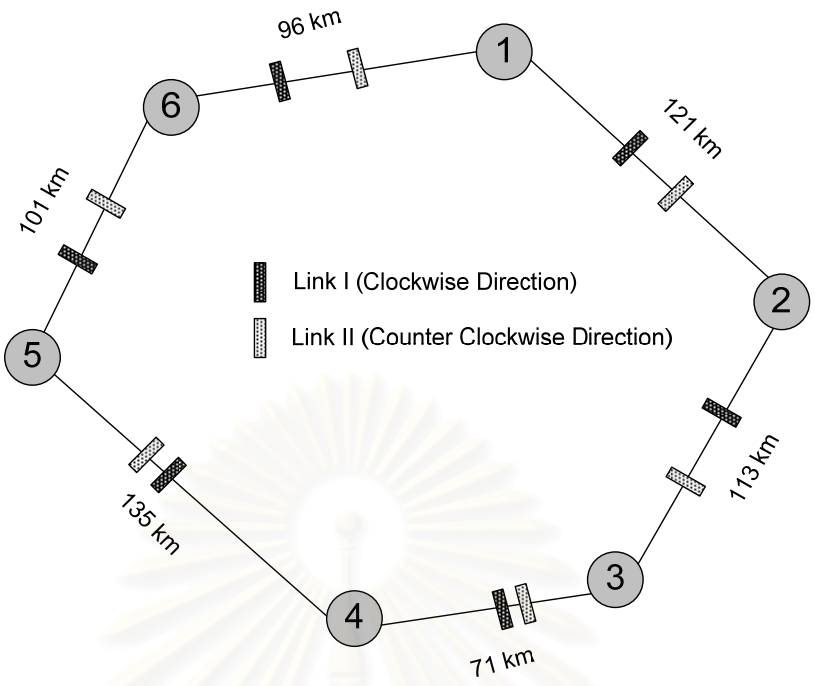
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.10 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.11 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 3.11 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่จุดใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศตรงข้ามกับความเสียหายนั้นโดยใช้ความยาวคลื่นสำรองในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ดังนี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 56

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 37

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 32

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 31

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 38

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 39

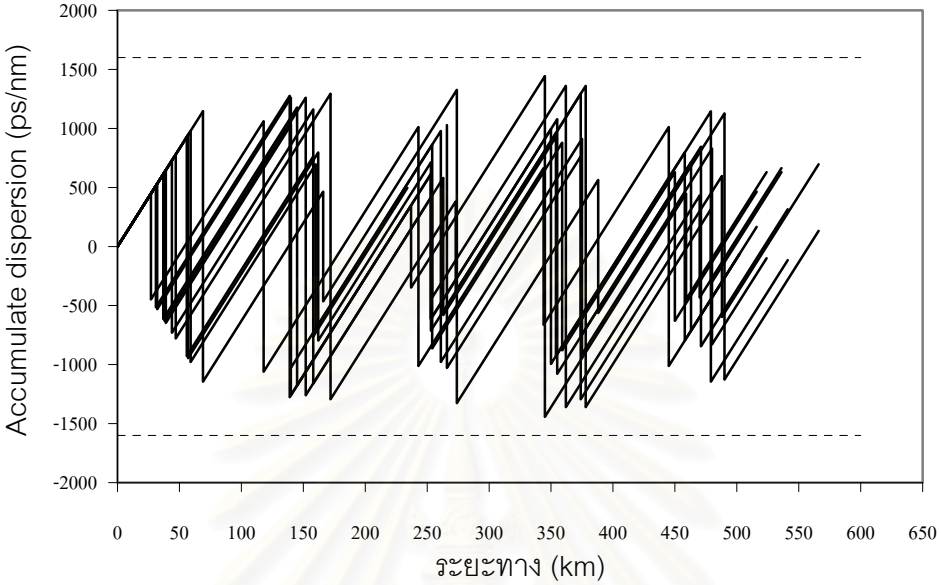
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 44

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 57

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 30

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 47

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 59

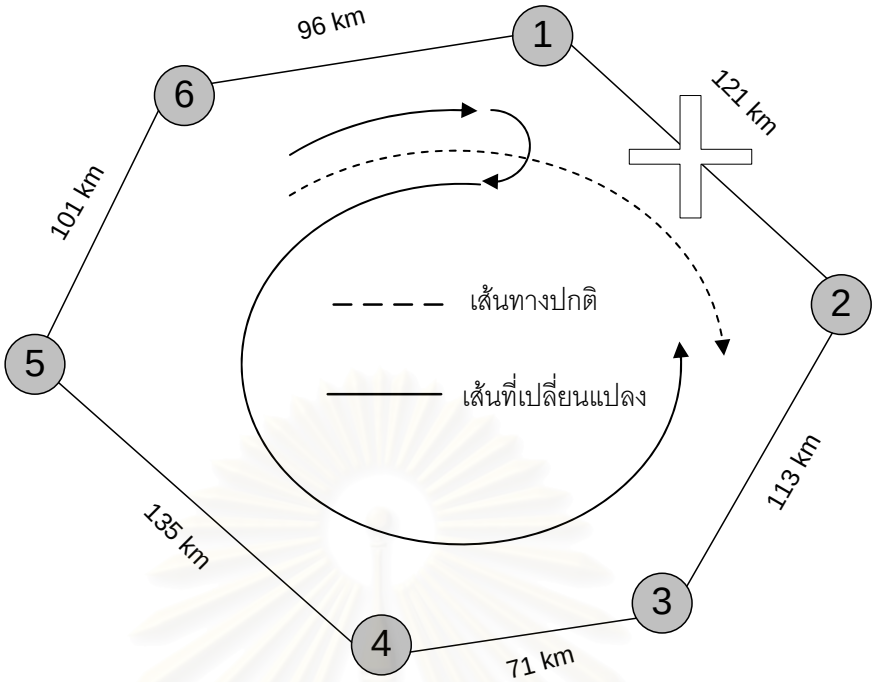


รูปที่ 3.12 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี

จากกระบวนการขั้นต้น หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุกทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชั่นที่จำกัดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชั่นสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชั่นที่กำหนดดังรูปที่ 3.12

3.1.3 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งทำการส่งข้อมูลด้วยเส้นใยแสงสำรองในทิศทางตรงข้ามแทนการส่งในเส้นใยแสงหลักดังเช่นในหัวข้อ 3.1.2 โดยระบบจะทำการส่งข้อมูลด้วยเส้นใยแสงสำรองในทิศทางตรงข้าม ซึ่งเป็นเส้นใยแสงซึ่งมีการติดตั้งคู่ขนานกับเส้นใยแสงปกติเพื่อใช้งานในขณะที่เส้นใยแสงหลักไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยการเปลี่ยนเส้นใยแสงไปใช้เส้นใยแสงสำรองจะเกิดขึ้นที่สถานีอยู่ใกล้ตำแหน่งที่เส้นใยแสงเกิดการเสียหาย ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.13 ซึ่งเส้นใยแสงเกิดการเสียหายระหว่างสถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 สถานีที่ 1 จะทำการเปลี่ยนเส้นทางการส่งข้อมูลไปยังทิศทางตรงข้ามโดยทำการทอดข้าม ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลในทิศทางตรงข้าม โดยใช้เส้นใยแสงสำรองในการส่งข้อมูลแทนการเปลี่ยนไปใช้ความยาวคลื่นที่เหลือในเส้นใยแสงหลักดังกรณีการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น



รูปที่ 3.13 การเปลี่ยนแปลงเส้นทางของทราฟฟิกเมื่อข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

3.1.3.1 การวิเคราะห์เส้นทางและทิศทางของทราฟฟิกบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นใยแสง เมื่อทำการจำลองการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ เป็นระยะทาง 96 km (จากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1) และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็นระยะทาง 516 (จากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) รวมทั้ง 2 เส้นทาง ได้ระยะทางรวม 612 km ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใย	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย

แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม 1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 403 กม 1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 332 กม	แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม 2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 319 กม 2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 420 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม 1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม 2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ

และเส้นทางทวนเข็มบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 574 กม	และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 453 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 403 กม 3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 474 กม 4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม 3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 431 กม 3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้น	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 332 กม 4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 453 กม 4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น

ใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 330 กม	ใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 472 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 401 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 431 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 532 กม
5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 440 กม 5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 319 กม 5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 330 กม 6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 401 กม 6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย

แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 440 กม 1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม	แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 561 กม 2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม 5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 521 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม 6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 420 กม

จาก ตารางที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่1 ไปยังสถานีที่ 4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิกย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิกย่อย คือ ระหว่างสถานีที่1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิกใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุด ในกลุ่มที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 3.2 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทาง 2 เส้นใยแสงพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม	4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม
5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3.2 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

จากสมการที่ (3.1) ค่าดิสเพอร์ชั่นเป็น 16.58 และระยะทางจากตารางที่ 3.9 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม เลือกวางที่กม.ที่ 70-96, 246-288 และ 430-480	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม เลือกวางที่กม.ที่ 14-96, 124-288, 316-480 และ 508-672
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม เลือกวางที่กม.ที่ 82-96, 260-288, 452-480 และ 644-672	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม เลือกวางที่กม.ที่ 65-96, 228-288 และ 420-480

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็ม	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็ม

นาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม เลือกวางที่กม.ที่ 77-96, 260-288 และ 458-480	นาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 334-480
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็ม นาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 และ 334-480	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็ม นาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม เลือกวางที่กม.ที่ 58-96, 212-288 และ 404-480

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็ม นาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม เลือกวางที่กม.ที่ 64-96, 224-288, 416-480 และ 608-672	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็ม นาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม เลือกวางที่กม.ที่ 5-96, 105-288, 298-480 และ 490-672
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็ม นาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 182-288 และ 374-480	4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็ม นาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 182-288 และ 374-480
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็ม นาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม เลือกวางที่กม.ที่ 14-96, 125-288, 318-480 และ 512-672	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็ม นาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม เลือกวางที่กม.ที่ 65-96, 226-288, 418-480 และ 610-672

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม เลือกวางที่กม.ที่ 47-96, 190-288 และ 382-480	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480
5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม เลือกวางที่กม.ที่ 61-96, 219-288 และ 412-480

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม เลือกวางที่กม.ที่ 73-96, 248-288 และ 440-480	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม เลือกวางที่กม.ที่ 7-96, 110-288, 302-480 และ 494-672
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม เลือกวางที่กม.ที่ 35-96, 166-288, 358-480 และ 550-672	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม เลือกวางที่กม.ที่ 3-96, 100-288, 290-480 และ 486-672
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม

เลือกวางที่กม.ที่ 38-96,152-288 และ 344-480	เลือกวางที่กม.ที่ 38-96, 152-288 และ 344-480

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

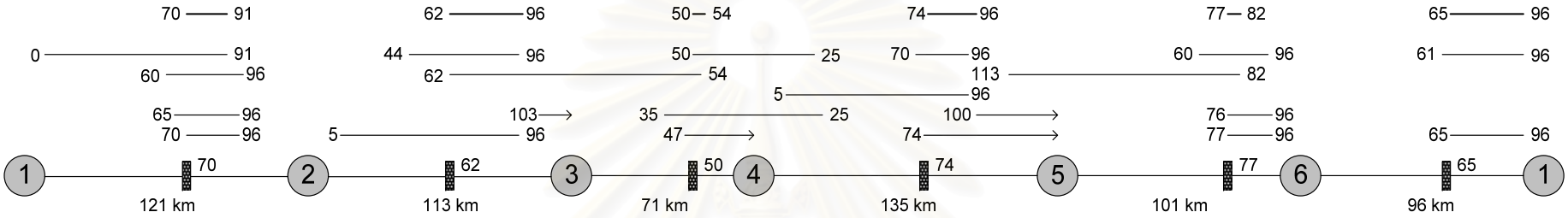
1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม เลือกวางที่กม.ที่ 61-96, 218-288 และ 410-480
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม เลือกวางที่กม.ที่ 76-96, 258-288 และ 450-480	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480

เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้ามนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และนำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสมดัง รูปที่ 3.14 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 3.15 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 3.16 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง และรูปที่ 3.17 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงสำรอง ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง และ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง

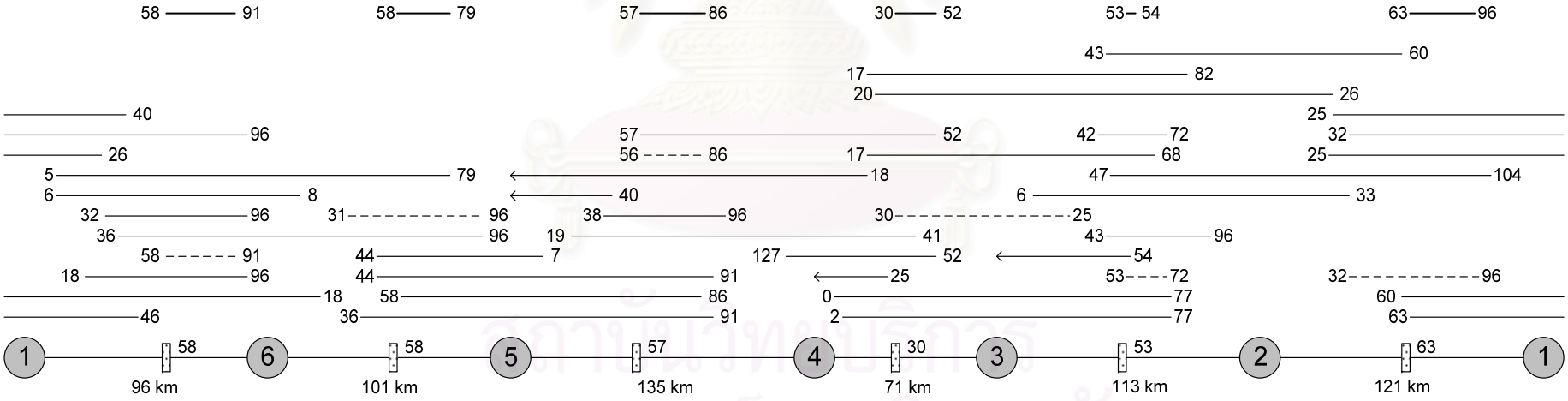
3.1.3.3 การกำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

เช่นเดียวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อโยง จะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.18

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

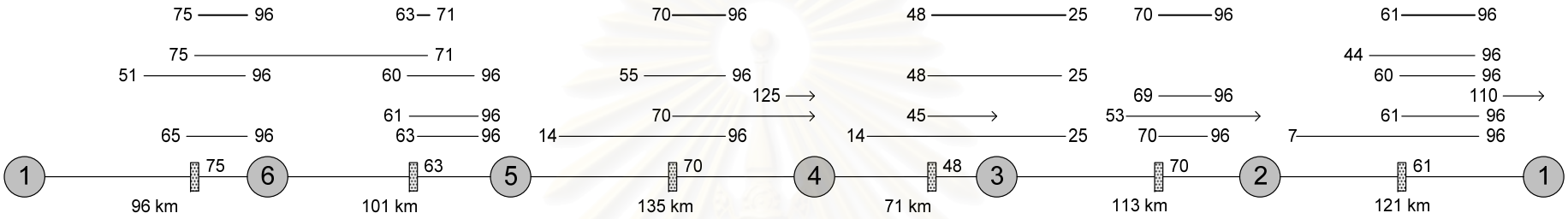


รูปที่ 3.14 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา

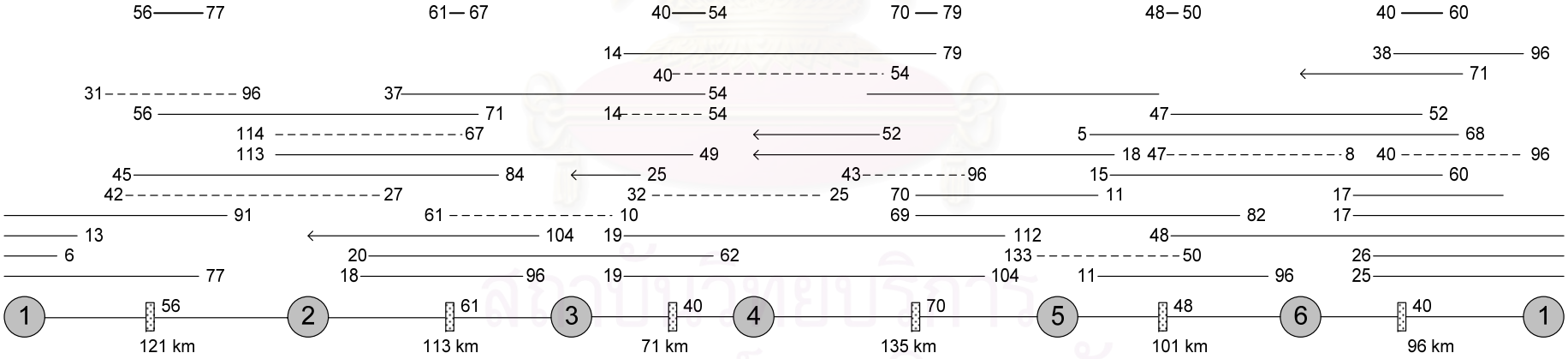


รูปที่ 3.15 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา

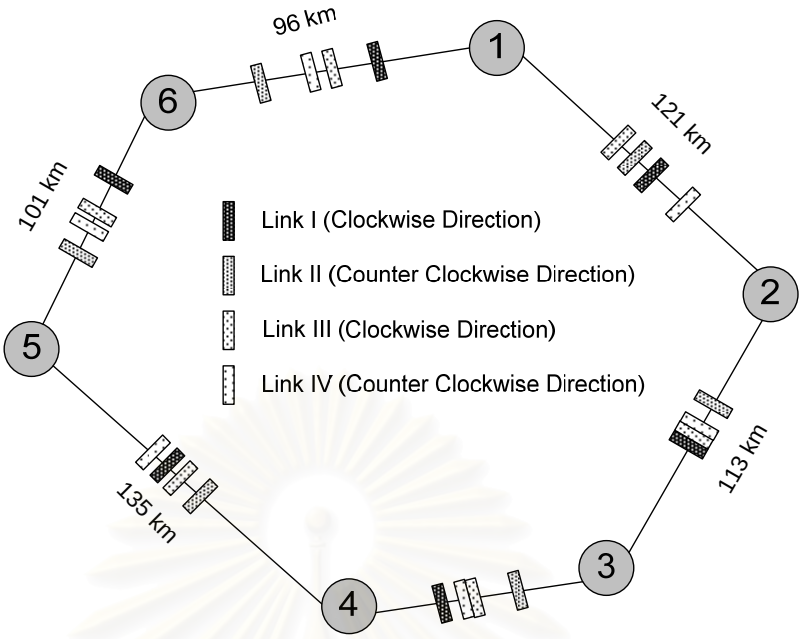
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.16 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.17 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.18 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 3.18 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่จุดใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศทางที่ยังทำงานได้อยู่บนเส้นทางปกติและใช้เส้นใยแสงสำรองสำรองกับเส้นทางที่เสียหายในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้นี้

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 62

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 74

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 77

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 65

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 75

เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 63

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 48

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 56

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 40

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 48

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 40

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 58

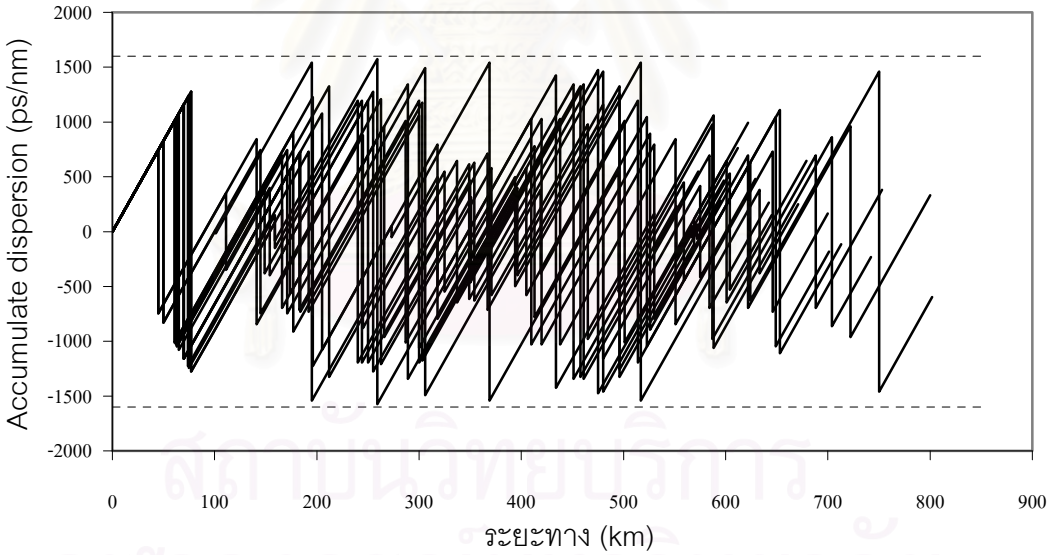
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 58

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 57

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 30

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 53

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 63



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี

จากกระบวนการขั้นต้น หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุกทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชั่นที่จำกัดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชั่นสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด เราสามารถแสดงกราฟของค่าดิสเพอร์ชั่นที่เกิดระหว่างเส้นทางการส่งทุกๆทราฟฟิกได้ดังรูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่เกิดขึ้นในทราฟฟิกทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน –1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

3.2 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในหัวข้อ 3.1 มาแล้ว แต่เครื่องสังยุคเฟสแสงที่มีใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนั้นเป็นชนิดเลื่อนความยาวคลื่น ซึ่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นจะมีปั๊มพลังงาน 1 ตำแหน่งและทำให้ได้สัญญาณคอนจูเกตที่ความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงจากเดิมดังรูปที่ 2.26 ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลงในโครงข่ายตัวอย่างเดิม

3.2.1 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

จากโครงข่ายเดิมดัง รูปที่ 3.2 ที่มีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 6 เส้นใยแสง ซึ่งวิธีที่ได้ศึกษาและนำเสนอนี้มีทั้งหมด 4 ขั้นตอนในการหาตำแหน่งวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ดังนี้

3.2.1.1 การวิเคราะห์จำนวนความยาวคลื่น

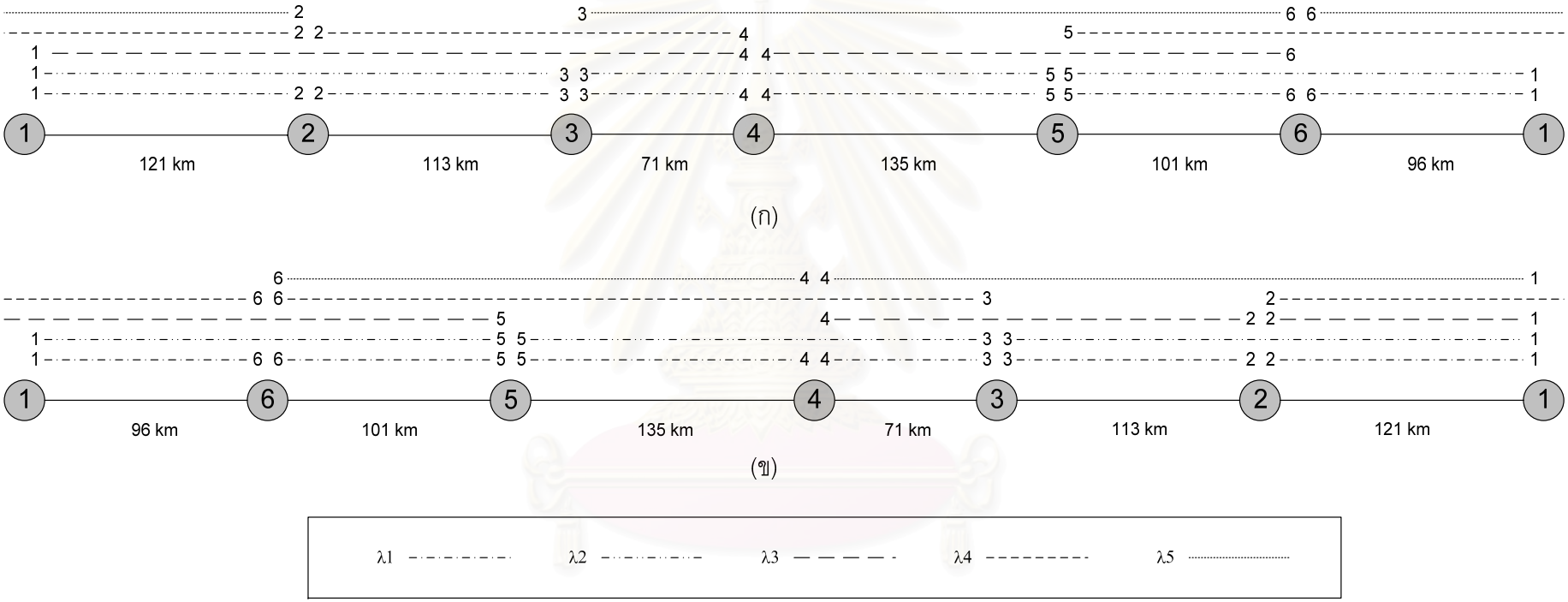
เราจะทำการหาจำนวนช่องความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้ในการส่งข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.4) [28]

$$W = \begin{cases} \dfrac{N^2-1}{8} & N \text{ odd} \\ \dfrac{N^2+4}{8} & N/2 \text{ odd} \\ \dfrac{N^2}{8} & N/2 \text{ even} \end{cases} \tag{3.4}$$

โดยที่ W คือ จำนวนช่องความยาวคลื่นที่ใช้ (ช่อง)

N คือ จำนวนสถานีในโครงข่าย (สถานี)

จากการคำนวณด้วยค่า N = 6 สถานี จะได้จำนวนช่องความยาวคลื่น 5 ช่อง และสามารถแจกแจงได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แสดงจำนวนช่องความยาวคลื่นที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (3.4)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1.2 การวิเคราะห์เส้นทางและทิศทางของทราฟฟิกบนโครงข่ายปกติ

จำนวนทราฟฟิกทั้งหมดของการส่งมีจำนวนเท่ากับ $N \times (N-1)$ โดย N คือจำนวนสถานีทั้งหมด หลังจากนั้นจะทำการหาระยะทางที่สั้นที่สุดในการส่งข้อมูลของแต่ละทราฟฟิก ซึ่งจากตัวอย่างโครงข่ายเราสามารถหาความเป็นไปได้ในการส่งทั้งหมดมี 6x5 = 30 แบบในการส่ง โดยเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด และได้ผลตามตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่สั้นที่สุด

1 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km 1 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km 2 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนนาฬิกา ระยะทาง 217 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 135 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km

5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 135 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km

จากตารางที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิกย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และสถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และสถานีที่4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิกย่อย คือ ระหว่างสถานีที่1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิกใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุดจากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 3.2 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km

3.2.1.3 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

การจัดการดิสเพอร์ชั่นของเครื่องสังยุคเฟสแสงนั้นขึ้นอยู่ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ ดังนั้นระยะห่างแต่ละตำแหน่งของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงจึงมีผลต่อการจัดการดิสเพอร์ชั่น ในการจัดการดิสเพอร์ชั่นเราจะเลือกค่าดิสเพอร์ชั่นของความยาวคลื่นที่มีผลมากที่สุดในโครงข่าย ซึ่งถ้าความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชั่นมากที่สุดของสัญญาณ ไม่เกินค่าจำกัดของดิสเพอร์ชั่น (D_{max}) ความยาวคลื่นอื่นๆ ก็สามารถผ่านไปได้ด้วยเช่นกัน สำหรับเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นนั้น ดิสเพอร์ชั่นก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงและดิสเพอร์ชั่นหลังออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงนั้นจะไม่เท่ากัน จากจำนวนความยาวคลื่นจากสมการที่ (3.4) ในโครงข่ายตัวอย่างจำเป็นต้องใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 5 ความยาวคลื่น ตาม ITU Grid Specification [29] เราจะเลือกค่าความยาวคลื่นทั้ง 10 ความยาวคลื่น คือ 5 ความยาวคลื่นเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสง ดังนี้ 1553.73, 1552.93, 1552.12, 1551.32 และ 1550.52 และ 5 ความยาวคลื่นหลังจากผ่านเครื่องสังยุคเฟสแสง ดังนี้ 1549.72, 1548.91, 1548.11, 1547.32 และ 1546.52 จากนั้นหาค่าดิสเพอร์ชั่นจาก ITU-T Recommendation [30] จากสมการที่ (3.5) ค่า D_{1550} เท่ากับ 17 ps/nm/km ค่า S_{1550} เท่ากับ 0.056 ps/nm^2/km คำนวณหาค่าดิสเพอร์ชั่นของความยาวก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ค่าดังนี้ 17.208, 17.164, 17.118, 17.073 และ 17.029 ตามลำดับ และคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชั่นของความยาวหลังออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ค่าดังนี้ 16.984, 16.938, 16.894, 16.849 และ 16.805 ตามลำดับ ค่าดิสเพอร์ชั่นที่มีผลมากที่สุดก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสง คือ 17.208 และค่าดิสเพอร์ชั่นที่มีผลมากที่สุดหลังออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสง คือ 16.984 จากค่าทั้ง 2 และระยะทางจาก ตารางที่ 3.12 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดัง ตารางที่ 3.13

$$D_{Link}(\lambda) = D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550) \tag{3.5}$$

โดย D_{1550} คือ chromatic dispersion coefficient ที่ 1550 nm (ps/nm/km)

S_{1550} คือ chromatic dispersion slope coefficient (ps/nm^2/km)

λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

ตารางที่ 3.13 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย (แบบมีความยาวคลื่นเพียงพอ)

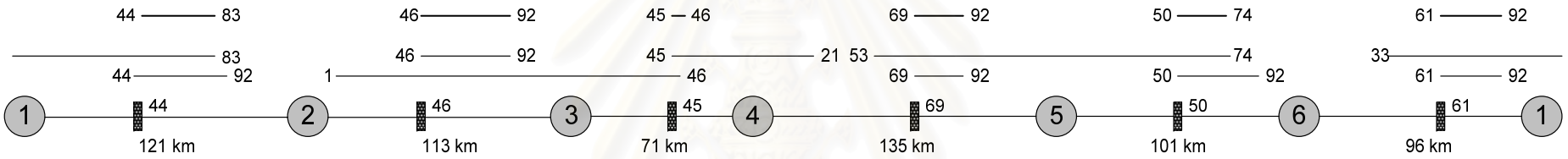
1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 44-92 และ 122-280 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km เลือกวางที่กม.ที่ 51-92	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km เลือกวางที่กม.ที่ 46-92 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-92 และ 134-280
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km เลือกวางที่กม.ที่ 67-92 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 45-92 และ 124-280	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 44-92 และ 122-280 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km เลือกวางที่กม.ที่ 69-92
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-92 และ 124-280 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km เลือกวางที่กม.ที่ 56-92	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km เลือกวางที่กม.ที่ 61-92 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 45-92 และ 124-280

เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นของโครงข่ายปกตินี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นของโครงข่ายปกติ แต่เปลี่ยนค่าดิสเพอร์ชั่นที่ใช้ในการคำนวณจาก 16.58 เป็น 17.208 และ 16.984 จากนั้นจึงนำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสม ดังรูปที่ 3.21 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา และรูปที่ 3.22 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาและ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

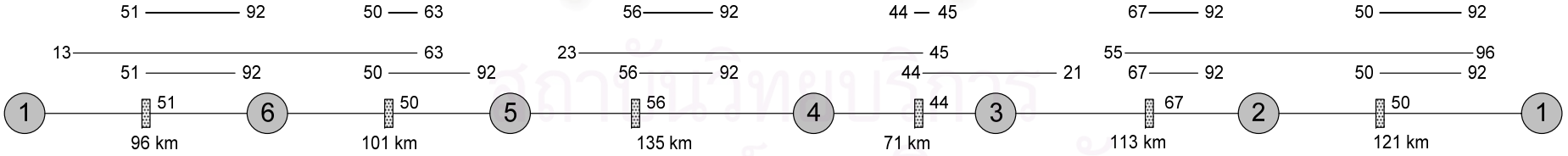
3.2.1.4 การกำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

เช่นเดียวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด และทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อมโยง จะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.23

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

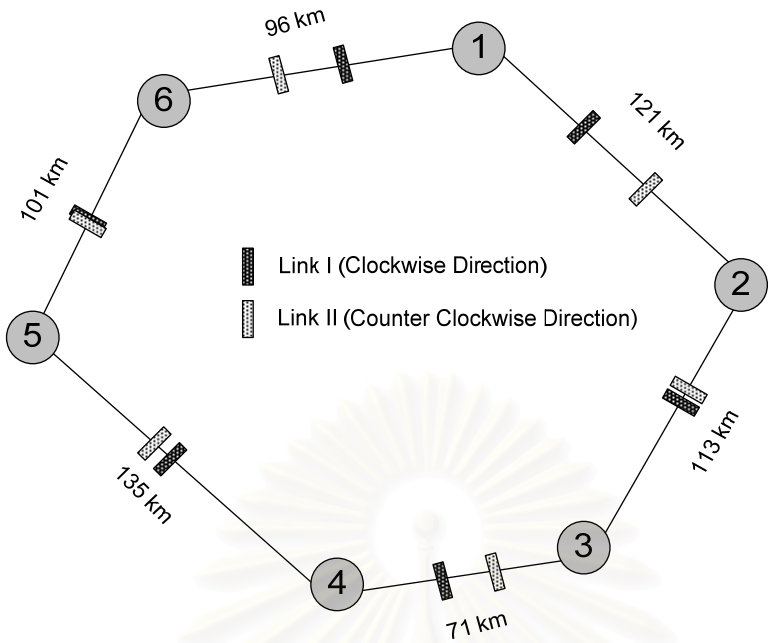


รูปที่ 3.21 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.22 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.23 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 3.23 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายปกติที่ใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ดังนี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 44

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 46

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 45

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 51

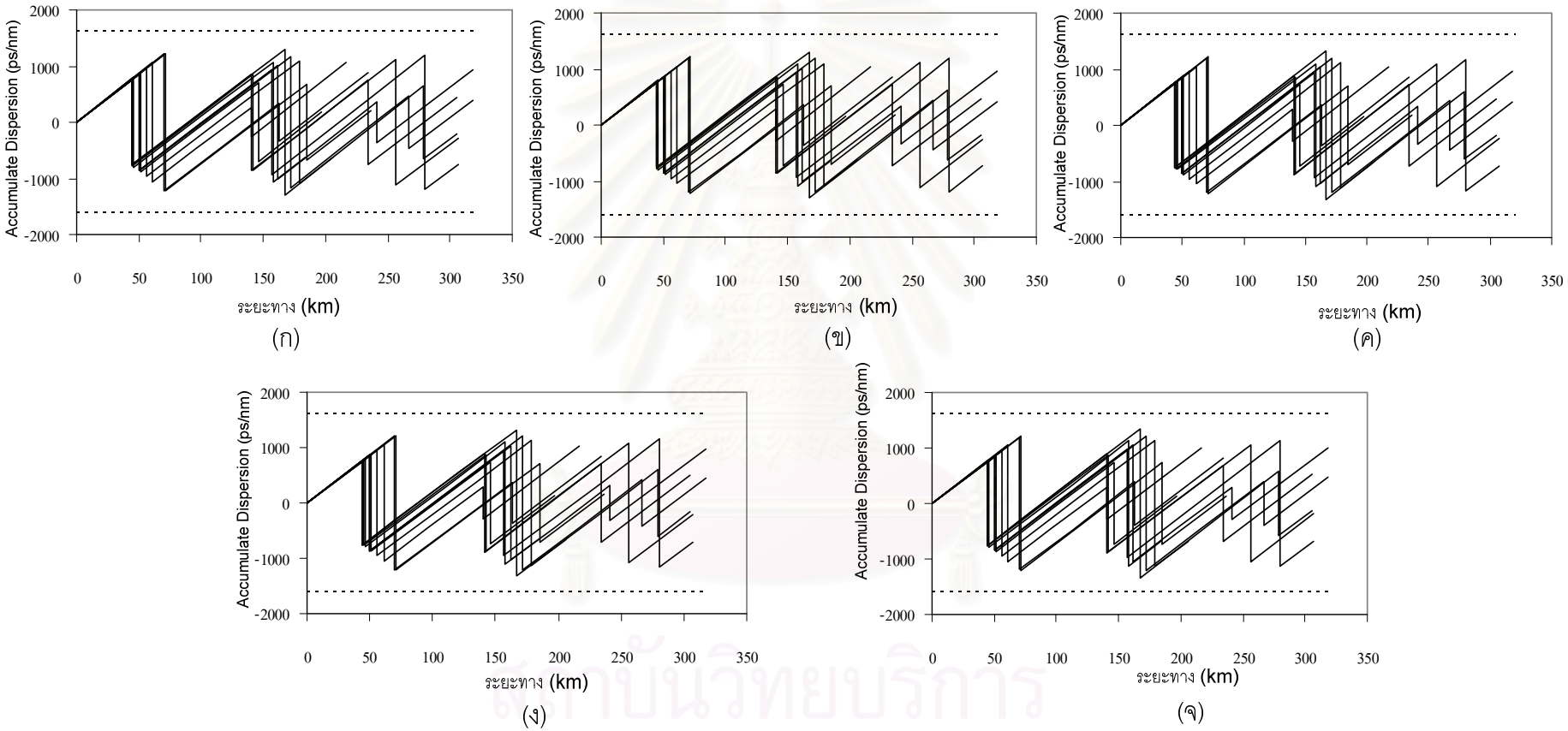
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 56

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 44

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 67

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 50



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลังจากที่ได้ดำเนินการทั้ง 4 ขั้นตอนจนได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด และได้ตรวจสอบทราฟฟิกทั้งหมดและทุกความยาวคลื่นที่ใช้งาน โดยการคำนวณค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมและทำการเปรียบเทียบกับค่าดิสเพอร์ชั่นที่กำหนดได้ดังรูปที่ 3.24 โดย รูป ก แสดงความยาวคลื่น 17.208 และ 16.805 รูป ข แสดงความยาวคลื่น 17.164 และ 16.849 รูป ค แสดงความยาวคลื่น 17.118 และ 16.894 รูป ง แสดงความยาวคลื่น 17.073 และ 16.938 และรูป จ แสดงความยาวคลื่น 17.029 และ 16.984 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่เกิดขึ้นในทราฟฟิกทุกเส้นทางและทุกความยาวคลื่นมีค่าไม่เกิน –1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

3.2.2 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

หลังจากที่ทำการวางบนโครงข่ายปกติ ต่อไปเราจะทำการศึกษากรณีที่โครงข่ายเกิดการเสียหายซึ่งกลไกการกู้คืนข้อมูลเป็นไปตามหัวข้อที่ 3.1.2

3.2.2.1 การวิเคราะห์เส้นทางและทิศทางของทราฟฟิกบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นใยแสง เมื่อทำการจำลองการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km (จากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km
1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km
1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา	2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา

ระยะทาง 332 km	ระยะทาง 420 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km	4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km

3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km
3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

จากตารางที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่1 ไปยังสถานีที่4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิกย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิกย่อย คือ ระหว่างสถานีที่1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิกใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุดในกลุ่มที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 3.2 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกันได้ดังตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 สรุปทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนแปลงจากทราฟฟิกปกติ

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา

ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	ระยะทาง 502 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

จาก ตารางที่ 3.15 แสดงเส้นทางการส่งข้อมูลที่ตัดเส้นทางการคำนวณที่ซ้ำซ้อนลง จากนั้น ในการคำนวณตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง จะคำนวณจากระยะทางระหว่างสถานีส่งที่มีการส่งไกลที่สุดเช่นเดียวกับการคำนวณการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ ซึ่งสามารถแสดงเส้นทางที่มีการส่งไกลที่สุดได้ดังดังตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km
3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km	4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km
5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

3.2.2.2 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

จากสมการที่ (3.5) ได้ค่าดิสเพอร์ชั่นก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงเท่ากับ 17.208 และค่าดิสเพอร์ชั่นหลังออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงเท่ากับ 16.849 และระยะทางจากตารางที่ 3.16 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.17 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย (แบบมีความยาวคลื่นเพียงพอ)

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92 165-280 และ 370-464
3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92 165-280 และ 370-464 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464	4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464
5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

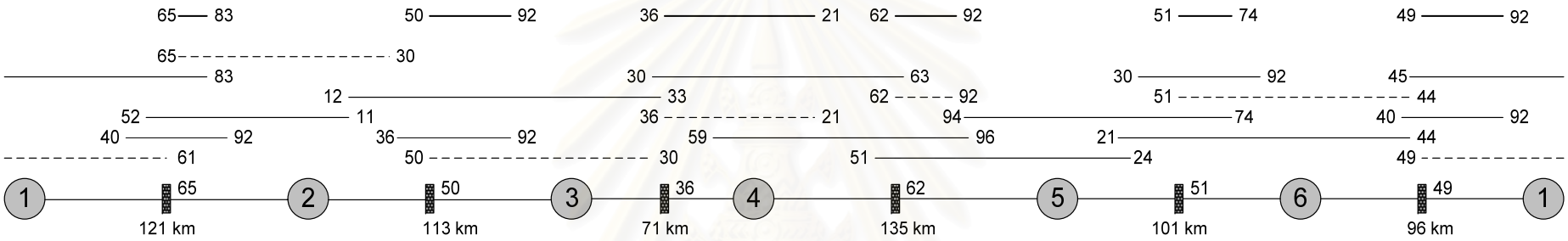
เลือกวางที่กม.ที่ 39-92, 172-280 และ 370-464	เลือกวางที่กม.ที่ 39-92, 172-280 และ 370-464

เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่นนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และก็นำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสม ดังรูปที่ 3.25 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา และรูปที่ 3.26 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาและ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

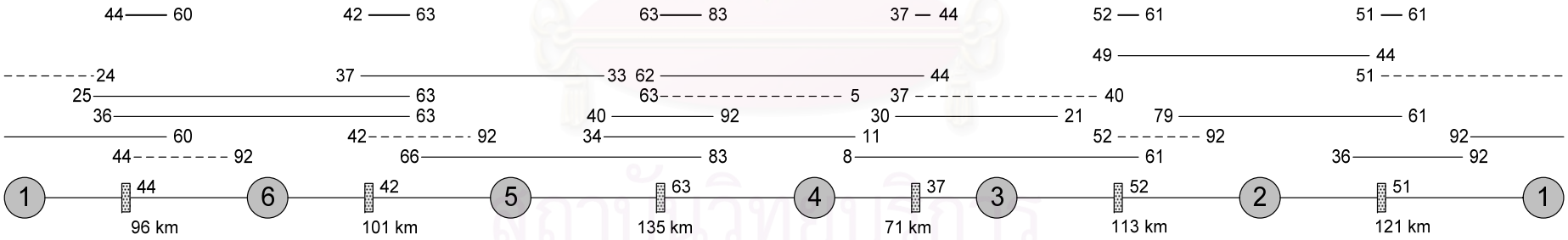
3.2.2.3 การกำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

เช่นเดียวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อโยง จะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.27

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

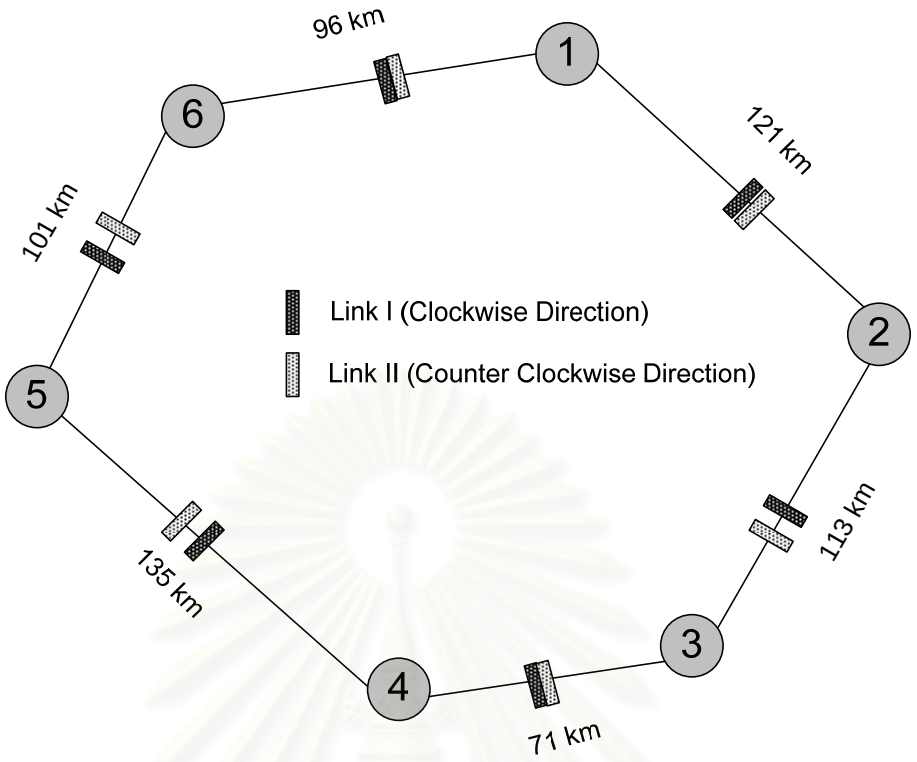


รูปที่ 3.25 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.26 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.27 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 3.27 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่ข่ายเชื่อโยงใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศตรงข้ามกับความเสียหายนั้นโดยใช้ความยาวคลื่นสำรองในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ดังนี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 ⟶ 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 65

เส้นใยแสงจาก 2 ⟶ 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 3 ⟶ 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 36

เส้นใยแสงจาก 4 ⟶ 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 62

เส้นใยแสงจาก 5 ⟶ 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 51

เส้นใยแสงจาก 6 ⟶ 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 49

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 ⟶ 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 44

เส้นใยแสงจาก 6 ⟶ 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 42

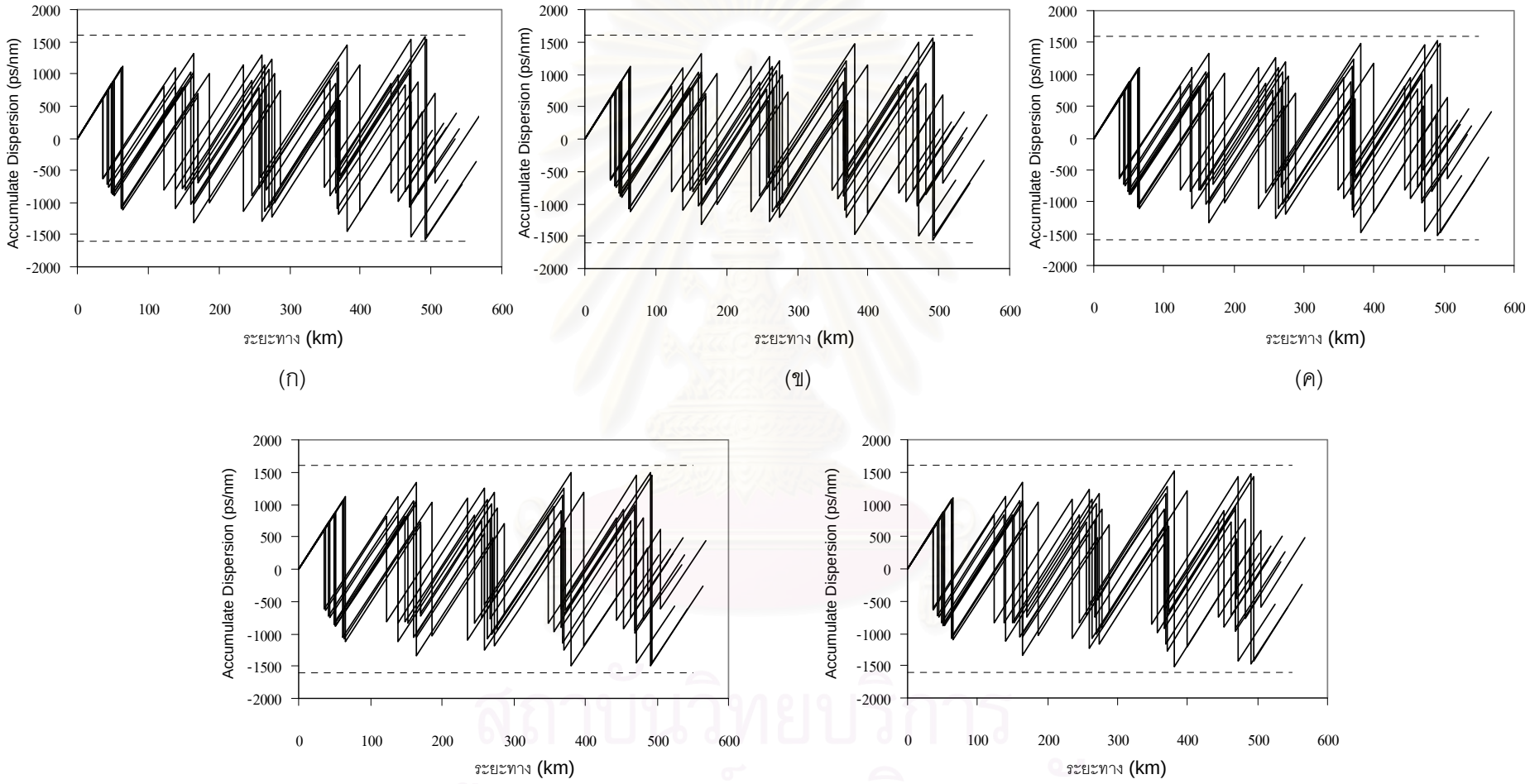
เส้นใยแสงจาก 5 ⟶ 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 63

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 37

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 52

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 51

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.28 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากกระบวนการขั้นต้น หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุกทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชั่นที่จำกัดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชั่นสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด เราสามารถแสดงกราฟของค่าดิสเพอร์ชั่นที่เกิดระหว่างเส้นทางการส่งทุกๆ ทราฟฟิกได้ดังรูปที่ 3.28 โดย รูป ก แสดงความยาวคลื่น 17.208 และ 16.805 รูป ข แสดงความยาวคลื่น 17.164 และ 16.849 รูป ค แสดงความยาวคลื่น 17.118 และ 16.894 รูป ง แสดงความยาวคลื่น 17.073 และ 16.938 และรูป จ แสดงความยาวคลื่น 17.029 และ 16.984 และจะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่เกิดขึ้นในทราฟฟิกทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน –1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

3.2.3 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งทำการส่งข้อมูลด้วยเส้นใยแสงสำรองในทิศทางตรงข้ามแทนการส่งในเส้นใยแสงหลักดังเช่นในหัวข้อ 3.2.2 โดยรายละเอียดของกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้ามได้ใช้หลักการเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.1.3

3.2.3.1 การวิเคราะห์เส้นทางและทิศทางของทราฟฟิกบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นใยแสง เมื่อทำการจำลองการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ เป็นระยะทาง 96 km (จากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1) และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็นระยะทาง 516 (จากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) รวมทั้ง 2 เส้นทาง ได้ระยะทางรวม 612 km ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 3.18

ตารางที่ 3.18 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม 1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 403 กม 1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 332 กม	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม 2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 319 กม 2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 420 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ

และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม 1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 574 กม	และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม 2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 453 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 403 กม 3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 474 กม 4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม 3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้น	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 332 กม 4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น

ใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 431 กม	ใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 453 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 330 กม	4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 472 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 401 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 431 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 532 กม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 440 กม 5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 319 กม 5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 330 กม 6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 401 กม 6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง

เป็น ระยะทาง 536 กม	เป็น ระยะทาง 536 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 440 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 561 กม
1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 521 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 420 กม

จาก ตารางที่ 3.18 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่1 ไปยังสถานีที่ 4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิกย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิกย่อย คือ ระหว่างสถานีที่1 ไปยัง สถานีที่ 2

และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิกใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุด ในกลุ่มที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 3.2 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทาง 2 เส้นใยแสงพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังตารางที่ 3.19

ตารางที่ 3.19 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น

ใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม	ใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม	4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม
5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น ใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม	แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.3.2 การวิเคราะห์ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

จากสมการที่ (3.5) ได้ค่าดิสเพอร์ชั่นก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงเท่ากับ 17.208 และค่าดิสเพอร์ชั่นหลังออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงเท่ากับ 16.849 และระยะทางจากตารางที่ 3.19 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 3.20

ตารางที่ 3.20 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย (แบบมีความยาวคลื่นไม่เพียงพอ)

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม เลือกวางที่กม.ที่ 82-92, 260-280 และ 445-464	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม เลือกวางที่กม.ที่ 25-92, 144-280, 328-464 และ 516-651
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม เลือกวางที่กม.ที่ 85-92, 260-280, 450-464 และ 630-651	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม เลือกวางที่กม.ที่ 73-92, 241-280 และ 425-464

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม เลือกวางที่กม.ที่ 89-92, 274-280 และ 458-464	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 165-280 และ 352-464
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 165-280 และ 352-464	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม เลือกวางที่กม.ที่ 64-92, 223-280 และ 407-464

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม เลือกวางที่กม.ที่ 75-92, 245-280, 429-464 และ 617-651	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม เลือกวางที่กม.ที่ 15-92, 124-280, 308-464 และ 496-651
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464	4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม

เลือกวางที่กม.ที่ 25-92, 144-280, 328-464 และ 516-651	เลือกวางที่กม.ที่ 76-92, 247-280, 431-464 และ 619-651

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม เลือกวางที่กม.ที่ 54-92, 201-280 และ 385-464	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464
5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม เลือกวางที่กม.ที่ 68-92, 231-280 และ 415-464

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม เลือกวางที่กม.ที่ 84-92, 264-280 และ 449-464	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม เลือกวางที่กม.ที่ 18-92, 130-280, 314-464 และ 502-651
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม เลือกวางที่กม.ที่ 46-92, 187-208, 371-464 และ 558-651	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม เลือกวางที่กม.ที่ 11-92, 116-280, 300-464 และ 488-651
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้น	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้น

ใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92,172-280 และ 370-464	ใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92,172-280 และ 370-464

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม เลือกวางที่กม.ที่ 68-92, 231-280 และ 415-464
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม เลือกวางที่กม.ที่ 89-92, 274-280 และ 458-464	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464

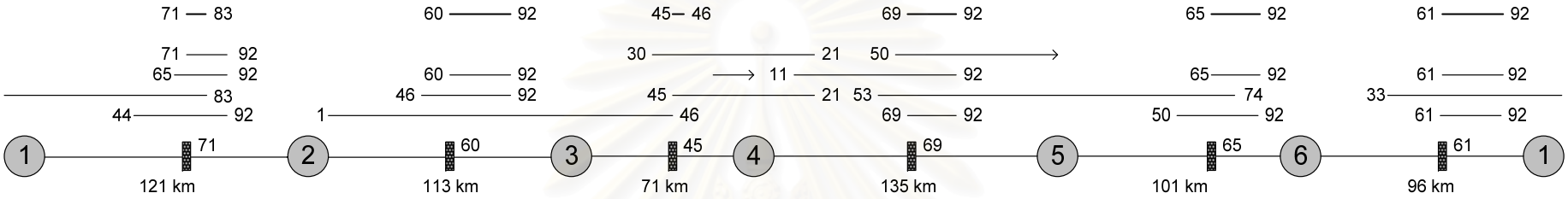
เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้ามนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และนำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสมดังรูปที่ 3.29 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 3.30 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 3.31 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง และรูปที่ 3.32 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงสำรอง ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวน

เข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง และ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง

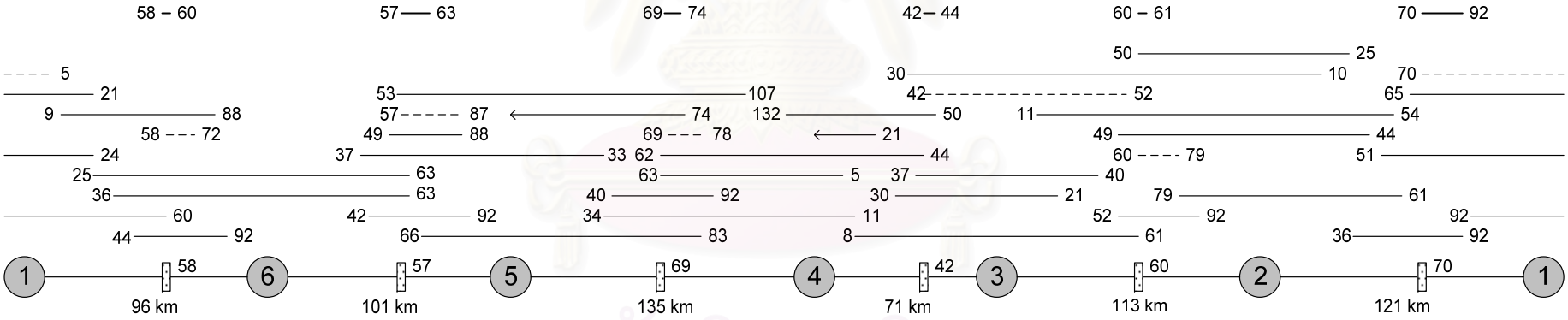
3.2.3.3 การกำหนดตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

เช่นเดียวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อโยง จะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.33

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

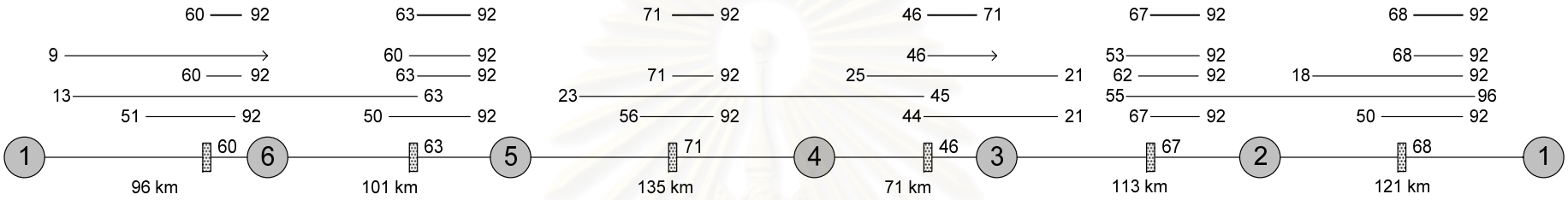


รูปที่ 3.29 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา

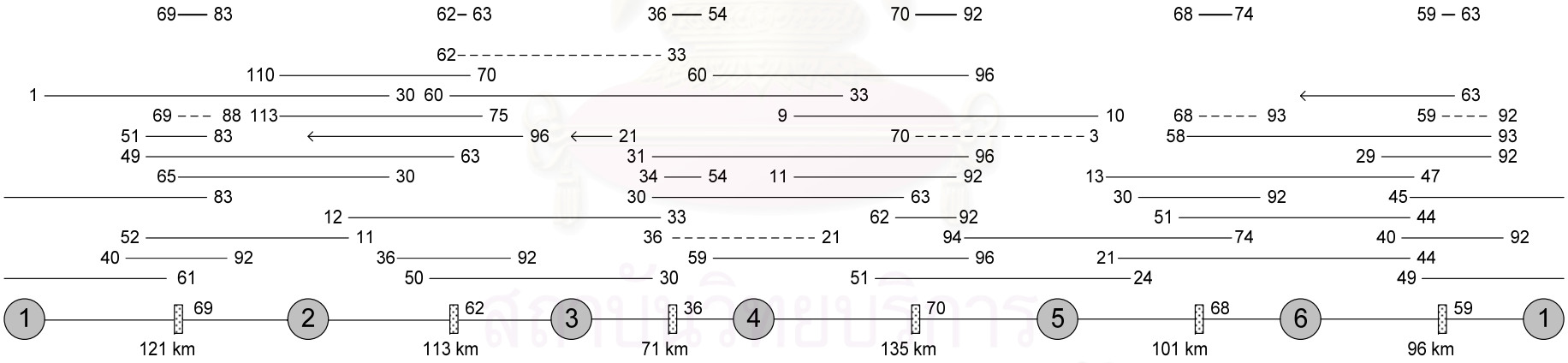


รูปที่ 3.30 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

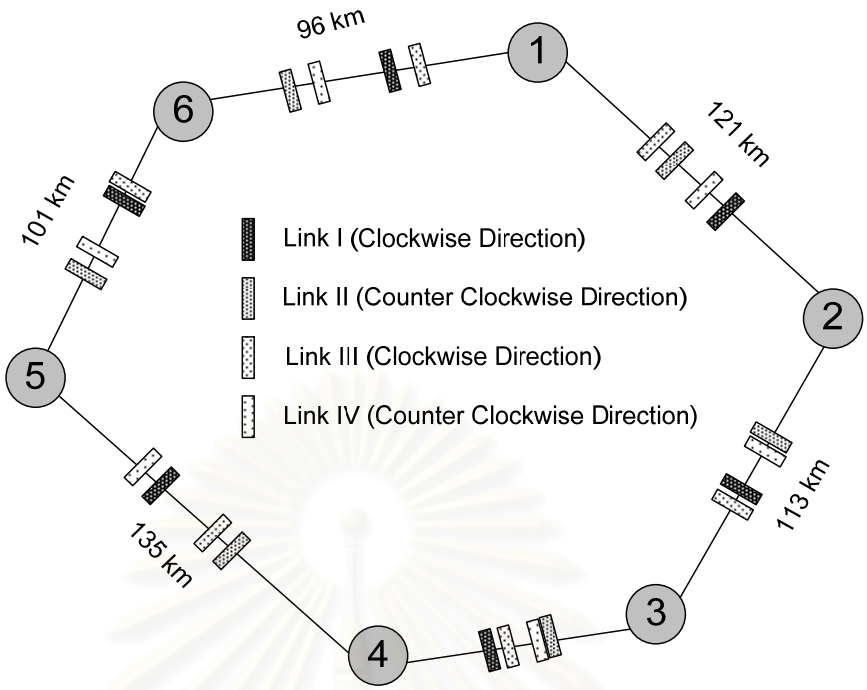


รูปที่ 3.31 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.32 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.33 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 3.33 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศทางที่ยังทำงานได้อยู่บนเส้นทางปกติและใช้เส้นใยแสงสำรองสำรองกับเส้นทางที่เสียหายในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้นี้

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 71

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 45

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 65

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 63

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 71

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 46

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 67

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 68

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 62

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 36

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 68

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 59

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 58

เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 57

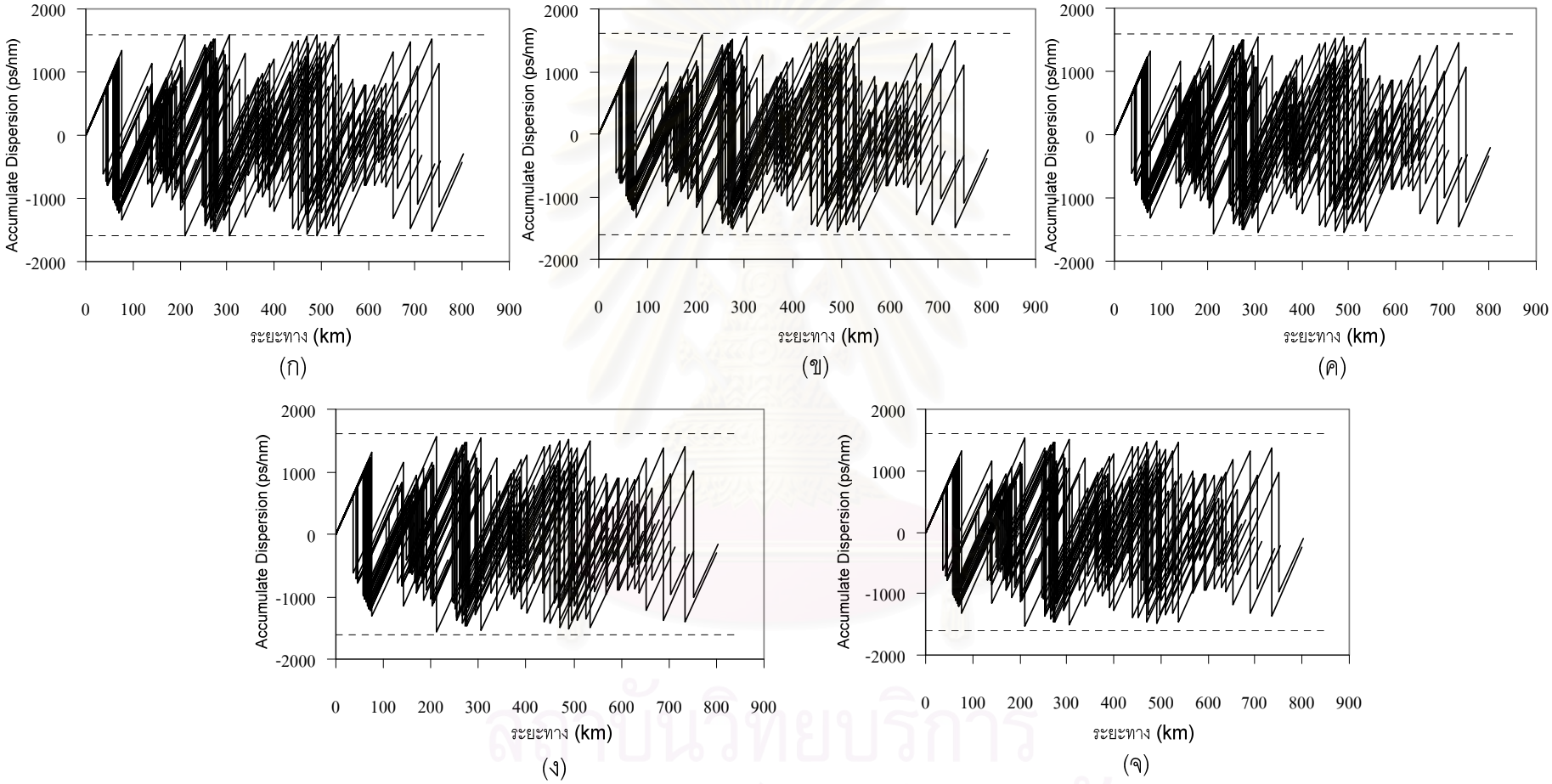
เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 42

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.34 ค่าดิสเพอร์ชั่นของทุกเส้นทางและทุกสถานี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากกระบวนการขั้นต้น หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุกทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชั่นที่จำกัดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชั่นสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด เราสามารถแสดงกราฟของค่าดิสเพอร์ชั่นที่เกิดระหว่างเส้นทางการส่งทุกๆทราฟฟิกได้ดังรูปที่ 3.34 โดย รูป ก แสดงความยาวคลื่น 17.208 และ 16.805 รูป ข แสดงความยาวคลื่น 17.164 และ 16.849 รูป ค แสดงความยาวคลื่น 17.118 และ 16.894 รูป ง แสดงความยาวคลื่น 17.073 และ 16.938 และรูป จ แสดงความยาวคลื่น 17.029 และ 16.984 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่เกิดขึ้นในทราฟฟิกทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน –1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 วิเคราะห์ผล OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

เมื่อเราวางเครื่องสังยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่ายจะทำให้กำลังสัญญาณที่ได้จากเครื่องสังยุคเฟสแสงลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์ FWM ทำให้สัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นนั้นมีพลังงานน้อยกว่าสัญญาณที่เข้าไปในเครื่องสังยุคเฟสแสง เราจึงต้องใส่เครื่องขยายสัญญาณเพิ่มเติมจากเดิม ซึ่งเครื่องขยายสัญญาณนี้นอกจากจะขยายสัญญาณข้อมูลแล้วยังจะขยายของสัญญาณรบกวนด้วย เป็นผลทำให้ค่า OSNR ของระบบลดลง [32] ในหัวข้อนี้เราจึงจะศึกษาว่าการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่ายจะทำให้ค่า OSNR เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

OSNR คือ อัตราส่วนของสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณรบกวนซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.6)

$$OSNR = \frac{P_{in}}{2n_{sp}(G-1)\cdot hf \cdot \Delta f} \tag{3.6}$$

โดยที่ P_{in} คือ Power input

n_{sp} คือ Spontaneous emission factor

G คือ Amplifier Gain

hf คือ Plank's constant มีค่าเท่ากับ 6.62x10-34

Δf คือ Bandwidth of the measurement มีค่าเท่ากับ 12.5 GHz

แต่ในวิทยานิพนธ์นี้เราจะพิจารณาที่อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงกับ OSNR ในโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องสังยุคเฟสแสง ได้ดัง สมการที่ (3.7)

$$\frac{OSNR_{New}}{OSNR_{Old}} = 10\log\frac{(G_{link}-n)}{(G_{link}-n)+n(G_{opc}-1)} \quad (\text{dB}) \tag{3.7}$$

โดยที่ G_{link} คือ กำลังขยายทั้งหมดของเครื่องขยายสัญญาณที่ต้องใช้ในการส่งข้อมูล (dB)

G_{opc} คือ กำลังขยายของเครื่องขยายสัญญาณที่นำมาชดเชยสัญญาณที่ลดลงจากเครื่องสังยุคเฟสแสง (dB)

n คือ จำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสง

จากโครงข่ายรูปที่ 3.2 และระยะทางจากตารางที่ 3.11 เราสามารถหาค่ากำลังขยายสัญญาณก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงโดยคำนวณจากสมการที่ (3.8) ได้ดังตารางที่ 3.21

$$G = \alpha \times L \tag{3.8}$$

โดยที่ G คือ กำลังขยายสัญญาณ (dB)

α คือ attenuation coefficient เท่ากับ 0.275 dB/km [30]

L คือ ระยะทาง (km)

ตารางที่ 3.21 กำลังขยายทั้งหมดในการส่งข้อมูลและจำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใช้

1 → 2 ระยะทาง 121 km ใช้กำลังขยาย 33.275 dB ใช้ OPC 1 ตัว 1 → 3 ระยะทาง 234 km ใช้กำลังขยาย 64.35 dB ใช้ OPC 2 ตัว 1 → 4 ระยะทาง 305 km ใช้กำลังขยาย 83.875 dB ใช้ OPC 3 ตัว 1 → 5 ระยะทาง 197 km ใช้กำลังขยาย 54.175 dB ใช้ OPC 2 ตัว 1 → 6 ระยะทาง 96 km ใช้กำลังขยาย 26.4 dB ใช้ OPC 1 ตัว	2 → 1 ระยะทาง 121 km ใช้กำลังขยาย 33.275 dB ใช้ OPC 1 ตัว 2 → 3 ระยะทาง 113 km ใช้กำลังขยาย 31.075 dB ใช้ OPC 1 ตัว 2 → 4 ระยะทาง 184 km ใช้กำลังขยาย 50.6 dB ใช้ OPC 2 ตัว 2 → 5 ระยะทาง 318 km ใช้กำลังขยาย 87.45 dB ใช้ OPC 3 ตัว 2 → 6 ระยะทาง 217 km ใช้กำลังขยาย 59.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว
3 → 1 ระยะทาง 234 km ใช้กำลังขยาย 64.35 dB ใช้ OPC 2 ตัว 3 → 2 ระยะทาง 113 km ใช้กำลังขยาย 31.075 dB ใช้ OPC 1 ตัว 3 → 4 ระยะทาง 71 km	4 → 1 ระยะทาง 305 km ใช้กำลังขยาย 83.375 dB ใช้ OPC 3 ตัว 4 → 2 ระยะทาง 184 km ใช้กำลังขยาย 50.6 dB ใช้ OPC 2 ตัว 4 → 3 ระยะทาง 71 km

ใช้กำลังขยาย 19.525 dB ใช้ OPC 1 ตัว 3 → 5 ระยะทาง 206 km ใช้กำลังขยาย 56.65 dB ใช้ OPC 2 ตัว 3 → 6 ระยะทาง 307 km ใช้กำลังขยาย 84.425 dB ใช้ OPC 3 ตัว	ใช้กำลังขยาย 19.525 dB ใช้ OPC 1 ตัว 4 → 5 ระยะทาง 135 km ใช้กำลังขยาย 37.125 dB ใช้ OPC 1 ตัว 4 → 6 ระยะทาง 236 km ใช้กำลังขยาย 64.9 dB ใช้ OPC 2 ตัว
5 → 1 ระยะทาง 197 km ใช้กำลังขยาย 54.175 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 2 ระยะทาง 318 km ใช้กำลังขยาย 87.45 dB ใช้ OPC 3 ตัว 5 → 3 ระยะทาง 206 km ใช้กำลังขยาย 56.65 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 4 ระยะทาง 135 km ใช้กำลังขยาย 37.125 dB ใช้ OPC 1 ตัว 5 → 6 ระยะทาง 101 km ใช้กำลังขยาย 27.775 dB ใช้ OPC 1 ตัว	6 → 1 ระยะทาง 96 km ใช้กำลังขยาย 26.4 dB ใช้ OPC 1 ตัว 6 → 2 ระยะทาง 217 km ใช้กำลังขยาย 59.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 3 ระยะทาง 307 km ใช้กำลังขยาย 84.425 dB ใช้ OPC 3 ตัว 6 → 4 ระยะทาง 236 km ใช้กำลังขยาย 64.9 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 5 ระยะทาง 101 km ใช้กำลังขยาย 27.775 dB ใช้ OPC 1 ตัว

จากสมการที่ (3.7) เมื่อเราแทนค่ากำลังขยายและจำนวนเครื่องยุคเฟสแสงจากตารางที่ 3.21 และแทนค่ากำลังขยายที่นำมาชดเชยสัญญาณที่ลดลงจากเครื่องสังยุคเฟสแสง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15.3 dB [16] [31] [32] เราจะได้ค่า อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงกับ OSNR ในโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องสังยุคเฟสแสง ได้ดังตารางที่ 3.22

ตารางที่ 3.22 ค่าอัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงกับ OSNR ในโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องสังยุคเฟสแสง

1 → 2 อัตราส่วน OSRN -1.528 dB ใช้ OPC 1 ตัว 1 → 3 อัตราส่วน OSRN -1.687 dB ใช้ OPC 2 ตัว 1 → 4 อัตราส่วน OSRN -1.918 dB ใช้ OPC 3 ตัว 1 → 5 อัตราส่วน OSRN -1.92 dB ใช้ OPC 2 ตัว 1 → 6 อัตราส่วน OSRN -1.94 dB ใช้ OPC 1 ตัว	2 → 1 อัตราส่วน OSRN -1.528 dB ใช้ OPC 1 ตัว 2 → 3 อัตราส่วน OSRN -1.689 dB ใช้ OPC 1 ตัว 2 → 4 อัตราส่วน OSRN -2.066 dB ใช้ OPC 2 ตัว 2 → 5 อัตราส่วน OSRN -1.852 dB ใช้ OPC 3 ตัว 2 → 6 อัตราส่วน OSRN -1.799 dB ใช้ OPC 2 ตัว
3 → 1 อัตราส่วน OSRN -1.687 dB ใช้ OPC 2 ตัว 3 → 2 อัตราส่วน OSRN -1.689 dB ใช้ OPC 1 ตัว 3 → 4 อัตราส่วน OSRN -2.484 dB ใช้ OPC 1 ตัว 3 → 5 อัตราส่วน OSRN -1.880 dB ใช้ OPC 2 ตัว 3 → 6 อัตราส่วน OSRN -1.907 dB ใช้ OPC 3 ตัว	4 → 1 อัตราส่วน OSRN -1.927 dB ใช้ OPC 3 ตัว 4 → 2 อัตราส่วน OSRN -2.066 dB ใช้ OPC 2 ตัว 4 → 3 อัตราส่วน OSRN -2.484 dB ใช้ OPC 1 ตัว 4 → 5 อัตราส่วน OSRN -1.448 dB ใช้ OPC 1 ตัว 4 → 6 อัตราส่วน OSRN -1.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว
5 → 1 อัตราส่วน OSRN -1.952 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 2 อัตราส่วน OSRN -1.852 dB ใช้ OPC 3 ตัว 5 → 3 อัตราส่วน OSRN -1.880 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 4 อัตราส่วน OSRN -1.448 dB ใช้ OPC 1 ตัว 5 → 6 อัตราส่วน OSRN -1.858 dB	6 → 1 อัตราส่วน OSRN -1.94 dB ใช้ OPC 1 ตัว 6 → 2 อัตราส่วน OSRN -1.799 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 3 อัตราส่วน OSRN -1.907 dB ใช้ OPC 3 ตัว 6 → 4 อัตราส่วน OSRN -1.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 5 อัตราส่วน OSRN -1.858 dB

ใช้ OPC 1 ตัว	ใช้ OPC 1 ตัว

จาก ตารางที่ 3.22 เมื่อเรานำอัตราส่วน OSNR มาหาค่าเฉลี่ย โดยแยกตามจำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใช้ จะได้ค่าดังนี้

เครื่องสังยุคเฟสแสง 1 ตัว ลด OSNR ลง -1.8245 dB

เครื่องสังยุคเฟสแสง 2 ตัว ลด OSNR ลง -1.8405 dB

เครื่องสังยุคเฟสแสง 3 ตัว ลด OSNR ลง -1.8940 dB

จะเห็นได้ว่าการใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่ายจะทำให้มี OSNR ลดลง โดยที่จำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสง 1 ตัว มีค่า OSRN ที่ลดลง น้อยกว่าใช้เครื่องสังยุคเฟสแสง 2 ตัว และ 3 ตัว ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวนเพื่อจัดการลดผลของดิสเพอร์ชั่นในโครงข่ายที่สนใจ 3 แบบ คือ โครงข่ายที่ทำงานปกติ โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายและใช้กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบเปลี่ยนความยาวคลื่น (path protection) และโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายและใช้กลไกการกู้คือสัญญาณแบบการทอดข้าม (span protection) ซึ่งทั้ง 3 โครงข่ายจะใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength shift free) โดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ทราฟฟิกในระบบทั้งทิศทางและระยะทางที่ข้อมูลต้องเดินทางจากต้นทางไปยังปลายทาง ต่อจากนั้นจึงทำการหาช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงและกำหนดตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าดิสเพอร์ชั่นสะสมของแต่ละทราฟฟิกว่าเกินจากค่าดิสเพอร์ชั่นที่กำหนดไว้หรือไม่ เมื่อทำการวิเคราะห์โครงข่ายทั้ง 3 แบบ โดยใช้เครื่องสังยุคเฟสทางแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแล้ว ต่อมาจะทำการวิเคราะห์โครงข่ายทั้ง 3 แบบ โดยใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น (wavelength shift) ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์จะเป็นเช่นเดียวกันกับแบบที่ใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น แต่ต้องทำการวิเคราะห์จำนวนช่องความยาวคลื่นที่จำเป็นต้องใช้ก่อนที่จะวิเคราะห์ทราฟฟิกในระบบทั้งหมด และได้ทำการทดลองวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงทั้ง 2 ชนิด ลงบนโครงข่ายตัวอย่างที่มีทั้งหมด 6 สถานีและ 6 เส้นใยแสง มีการส่งข้อมูล 2 ทิศทาง (bi-direction) และมีความยาวรวม 637 กิโลเมตร เมื่อทดลองบนโครงข่ายบกติและมีข่ายเชื่อมโยงเสียหายพบว่าจำเป็นต้องใช้เครื่องสังยุคเฟสแสง 6 ตัว บนเส้นใยแสงที่ส่งข้อมูลทิศทางตามเข็มนาฬิกา และ 6 ตัว บนเส้นใยแสงที่ส่งข้อมูลทิศทางทนเข็มนาฬิกา

เนื่องจากในระบบที่มีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง สัญญาณที่ออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงจะมีกำลังสัญญาณลดลงมากกว่าการจัดการดิสเพอร์ชั่นแบบอื่น จึงต้องมีการใช้เครื่องขยายสัญญาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเครื่องขยายสัญญาณนั้นนอกจากจะขยายสัญญาณข้อมูลแล้วยังขยายสัญญาณรบกวนในระบบด้วย มีผลทำให้ OSNR ของระบบลดลง ด้วยเหตุนี้เราจึงทำการวิเคราะห์ค่า OSNR ในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวนโดยใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นขณะโครงข่ายทำงานปกติ ผลจากการวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อทำการเครื่องสังยุคเฟสแสง 1 ตัว 2 ตัว และ 3 ตัว ค่า OSNR จะลดลง 1.8245 dB 1.8405 dB และ 1.8940 dB ตามลำดับ

4.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาในโครงข่ายแบบดีดับเบิ้ลยูดีเอ็มแบบวงแหวน แต่ระบบโครงข่ายมีหลายแบบ ทั้ง Peer-to-Peer, Mesh, Star เป็นต้น ซึ่งระบบแบบ Peer-to-Peer Long Haul ได้มีผู้ศึกษาไปแล้ว และยังเหลือบางระบบที่ยังไม่มีใครศึกษา เช่น Mesh เป็นต้น จึงสมควรจะมีการนำไปใช้ประยุกต์ใช้ในการหาในระบบ Mesh เพื่อให้การวางเครื่องสังยุคเฟสครอบคลุมทุกๆระบบการสื่อสารที่มีในปัจจุบัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] Bob Chomycz. Fiber Optic Installer's Field Manual. McGraw Hill, 2000.

[2] Fujits. Tutorial DWDM prerequisite training. Fujitsu, 2002.

[3] Detlef Stoll, Patrick Leisching, Harald Bock, and Alexander Richter, SIEMENS AG. *Metropolitan DWDM: A Dynamically Configurable Ring for the KomNet Field Trial in Berlin.* IEEE Communications Magazine, February 2001.

[4] D. D. Kouvatsos, C. V. Mouchos, A. S. Tsokanos. *Performance Modelling of a DWDM Ring Optical Network with Wavelength Conversion and Satellite Support*, Performance Modeling and Engineering Group University of Bradford.

[5] Hanxi Zhang and Oliver Yang. *Finding Protection Cycles in DWDM Networks*. IEEE, 2002.

[6] Henning Hinderthur and Lars Friedrich. Scaling Protection to the Needs of Metro Optical Networking. IEEE, 2005.

[7] Tran AV, Tucker RS, Boland NL. Amplifier placement methods for metropolitan WDM ring networks, *J. Lightwave Tech.*, 22, 11 (Nov 2004): 2509-2522.

[8] Govind P. Agrawal. Lightwave Technology Telecommunication System, John Willey & Suns.

[9] Shigeki Watanabe. Generation of Optical Phase-Coniugate Waves and Compensation for Pulse Shape Distortion in a Single-Mode Fiber, *J. Lightwave Tech.*, 2, 12 (Dec 1994): 2139-2146.

[10] Shigeki Watanabe. Exact Compensation for both Chromatic Dispersion and Kerr Effect in a Transmission Fiber Using Optical Phase Conjugation, *J. Lightwave Tech.*, 14, 3 (Mar 1996): 243-248.

[11] Senfar Wen. Optical Phase Conjugation of Multiwavelength Signals in a Dispersion-Shifted Fiber, *J. Lightwave Tech.*, 5, 7 (Jul 1997): 1061-1070.

[12] Chaloemphon Lorattanasane, Kazuro Kikuchi. Design Theory of Long-Distance Optical Transmission Systems Using Midway Optical Phase Conjugation, *J. Lightwave Tech.*, 15, 6, (Jun 1997): 948-955.

[13] Francisco Ramos and Javier Marti. RF Response of Analog Optical Links Employing Optical Phase Conjugation, *J. Lightwave Tech.*, 19, 6 (Jun 2001): 842-846.

[14] Xuefeng Tang and Zongyan Wu. Nonlinear Noise Amplification in Optical Transmission Systems With Optical Phase Conjugation, *J. Lightwave Tech.*, 23, 5 (May 2005): 1866-1873.

[15] Paolo Minzioni, Francesco Alberti, and Alessandro Schiffini. Techniques for Nonlinearity Cancellation Into Embedded Links by Optical Phase Conjugation, *J. Lightwave Tech.*, 23, 8 (Aug 2005): 2364-2370.

[16] S. L. Jansen, D. van den Borne, B. Spinnler, S. Calabrò, H. Suche, P. M. Krummrich, W. Sohler, G.-D. Khoe, and H. de Waardt. Optical Phase Conjugation for Ultra Long-Haul Phase-Shift-Keyed Transmission, *J. Lightwave Tech.*, 24, 1 (Jan 2006): 54-64.

[17] S. L. Jansen, D. van den Borne, P. M. Krummrich, S. Spalter, G.-D. Khoe and H. de Waardt. Long-Haul DWDM Transmission Systems Employing Optical Phase Conjugation, *Selected topics in quantum electronics J.*, 12, 4 (Jul-Aug 2006): 505-520.

[18] B. Ramamurthy, B. Mukherjee, Design of Optical WDM Networks. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 2001.

[19] B. Ramamurthy, and J. P. Jue, Fibers, lasers, receivers and amplifiers. In Sivalingam, K. M. and Subramaniam, S., editors, Optical WDM Networks: Principles and Practice, chapter 2. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 2000.

[20] B. Mukherjee, Optical Communication Networks. McGraw-Hill, New York, NY, 1997.

[21] นายณัฐพล กุลสุวรรณ์, “การแปลงเชิงแสงทั้งหมดของการมอดูเลตสัญญาณแบบเปิดปิดเป็นพีเอสเค โดยอาศัยครอสเฟสมอดูเลชัน” (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549)

[22] รองศาสตราจารย์ ดร. อธิคม ฤกษบุตร, เทคโนโลยี DWDM : เส้นทางขนานสำหรับการเพิ่ม Bit Rate [Online]. แหล่งที่มา: http://www.cme.mut.ac.th/article/DWDM.pdf

[23] G.Keiser, Optical fiber communications (3rd ed.), McGraw Hill, 2000.

[24] B. Ramamurthy, and J. P. Jue. Fibers, lasers, receivers and amplifiers. In Sivalingam, K. M. and Subramaniam, S., editors, *Optical WDM Networks: Principles and Practice,* chapter 2. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 2000.

[25] B. Mukherjee. *Optical Communication Networks*. McGraw-Hill, New York, NY, 1997.

[26] A. Yariv, D. Fekete, and D. M. Pepper, “Compensation for Channel Dispersion by Nonlinear Optical Phase Conjugation”, *Opt. Lett.*, vol. 4, pp. 52-54, 1979.

[27] N. Antoniades, Aleksandra Boskovic, Ioannis Tomkos, Nicholas Madamopoulos, Mirim Lee, Ioannis Roudas, David Pastel, Manish Sharma, and Michael J. Yadlowsky. Performance engineering and topological design of metro WDM opticalnetworks using computer simulation. *IEEE J. Sel. Areas Commun*, 20 (Jan 2002): 149-165.

[28] Thomas E. Stern, Krishna Bala. Multiwavelength Optical Network A Layered Approach, A Prentice Hall PTR Publication, 1999.

[29] BaySpec, Inc, ITU Grid Specification. [Online]. แหล่งที่มา: http://www.bayspec.com/pdf/ITU-DWDM.pdf

[30] ITU-T Recommendation, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable [Online]. แหล่งที่มา: http://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-200506-I/en [2005, June]

[31] Pasu Kaewplung and Kazuro Kikuchi. Simultaneous Cancellation of Fiber Loss, Dispersion,and Kerr Effect in Ultralong-Haul Optical Fiber Transmission by Midway Optical Phase Conjugation Incorporated With Distributed Raman Amplification. *J. Lightwave Tech.*, 25, 10 (Oct 2007): 3035-3050

[32] J.H. Lee, C.H. Kim, Y.-G. Han, S.B. Lee, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara, N. Sugimoto and K. Kikuchi. Bismuth nonlinear fibre-based optical phase conjugator without SBS-induced efficiency limitation and its application to dispersion compensation in transmission link. *Electronics Letter,* 42,5 (Mar 2006)

[33] พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบูลย์, การวางแผนโครงข่าย SDH [Online]. แหล่งที่มา: http://www.cewmedia.com

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 2 ฉบับ

- บทความวิชาการในงานประชุม The Optoelectronics and Communications Conference/Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC 2007) จัดขึ้นที่ Pacifico Yokohama ณ ประเทศญี่ปุ่น ในวันที่ 9-13 กรกฎาคม 2550 ในชื่อบทความเรื่อง *Employment of Optical Phase Conjugators in Transparent DWDM Single-Ring Network*
- บทความวิชาการในงานประชุม International Conference on Telecommunication, Industry, and Regulatory Development (ICTIR) 2007 จัดขึ้นที่ Plaza Athenee Hotel ณ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในวันที่ 19-21 สิงหาคม 2550 ในชื่อบทความเรื่อง *Optimized Dispersion Compensations in Upgrade Optical Metro-Ring Networks*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Employment of Optical Phase Conjugators in Transparent DWDM Single-Ring Network

Nuttha Chuenprasertsuk[1] and Pasu Kaewplung[2]
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
E-mail: [1]JugjunG@Gmail.com, [2]Pasu.K@chula.ac.th

Abstract **- The employment of optical phase conjugator (OPC) in DWDM single-ring network is studied. We propose an algorithm that can ensure the minimum number of OPC, as well as the most suitable position in the network.**

I. Introduction

The SONET/SDH-based ring topology has been widely employed as metro-area networks (MANs) owing to its provision of reliability, superior protection and restoration schemes. However, the exponential increase in transmission capacity nowadays demands for the migration from the legacy time-division multiplexed (TDM)-based technology to the transparent dense-wavelength-division multiplexing (DWDM) scheme over the incumbent SONET/SDH ring networks. When an optical signal remains in optical domain during the transmission in a network that has relatively long links, signal power attenuation, dispersion, and the Kerr effect become main sources of signal distortion. For compensating the fiber attenuation, the optimum amplifier placement for the transparent ring network has been already studied [1]. However, an attractive method for overcoming the dispersion and the Kerr effect in the ring network still has never been reported.

For dispersion compensation, the optical phase conjugation technique is very interesting since the Kerr effect is by-product reduced by performing optical phase conjugation [2], [3]. Nevertheless, up to now, the optical phase conjugation has been focused only on long-haul point-to-point applications, and has never been extended its performance to any scales of optical networks [4], [5].

In this paper, we propose, for the first time in our knowledge, a practical algorithm for the optimum placement of optical phase conjugators (OPCs) in DWDM single-ring network in order to overcome the dispersion. By applying our propose algorithm to a sample network consisted of 6 nodes with total length of 637 km, 12 OPCs are necessary for all communication traffic to be able to transmit in the network within a dispersion limit.

II. Algorithm for OPC Placement

The network sample for demonstrating our algorithm is shown in Fig. 1. The network is consisted of 6 nodes, 5 links, and the communication in the network can be bidirectional. Our algorithm can be explained in 3 main steps.

A. Find all possible traffics

The total number of traffic, which is the shortest path, between any 2 nodes is $N\times(N\text{-}1)$ where N is number of nodes in network. From the sample network, we show all possible traffics in term of distances from sources to destinations in Table 1.

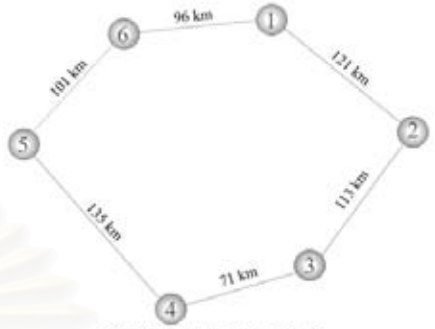


Fig. 1: Sample ring network

Table 1: All possible shortest path traffics from sample network

1→2 121 km	2→1 121 km	3→1 234 km
1→3 234 km	2→3 113 km	3→2 113 km
1→4 305 km	2→4 184 km	3→4 71 km
1→5 197 km	2→5 318 km	3→5 206 km
1→6 96 km	2→6 217 km	3→6 307 km
4→1 305 km	5→1 197 km	6→1 96 km
4→2 184 km	5→2 318 km	6→2 217 km
4→3 71 km	5→3 206 km	6→3 307 km
4→5 135 km	5→4 135 km	6→4 236 km
4→6 236 km	5→6 101 km	6→5 101 km

B. Find placement ranges of OPC

In the dispersion compensation mechanism using the optical phase conjugation, the accumulated dispersion along the length of the fiber before the OPC is cancelled by the amount of the accumulated dispersion along the fiber length after the signal is phase-conjugated by the OPC. Thus, among the different dispersion values resulted from the wavelengths used in the network, we must choose the maximum dispersion value for determining the locations of OPC since the channel wavelength that exhibits the maximum dispersion will always reach the maximum dispersion tolerance D_{max} at the distance shorter than other channels. Next, for each traffic obtained from step *A*, we explore the possible range of the location of OPCs with the constraint that both the accumulated dispersion values entering the OPCs and the destination must be less than D_{max}, and at the same time the possible location range of OPCs must yield the minimum number of OPC. This procedure will be repeated for obtaining the location ranges of OPCS for all possible traffics in the network.

For our sample network, we assign 5 wavelengths centered at 1550 nm with spacing of 0.8 nm. The standard single-mode fiber (SMF, G.652) with the fiber dispersion (D_2) equals to 16.5 ps/km/nm, and the dispersion slope (D_3) of 0.05 ps/ km/nm^2, both at 1550 nm, is used for

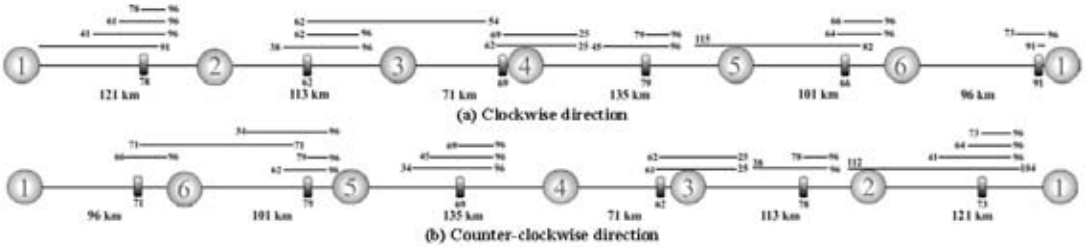


Fig. 2: Maps of the OPC location ranges for all traffics.

signal transmission. As a result, the maximum channel dispersion can be calculated by using D_2 and D_3, and is 16.58 ps/km/nm. With $D_{max} = \pm 1600$ ps/nm, Table 2 shows the possible range of location for installing the OPCs, in term of distance from source to destination, correspondingly to each possible traffic shown in Table 1.

Table 2: All possible ranges for placing OPC in the paths from Table 1

1→2 41-96	2→1 41-96	3→1 78-96
1→3 78-96	2→3 38-96	3→2 38-96
1→4 61-96, 183-288	2→4 62-96	3→4 no need OPC
1→5 66-96	2→5 64-96, 192-288	3→5 69-96
1→6 no need OPC	2→6 73-96	3→6 62-96, 186-288
4→1 61-96, 183-288	5→1 66-96	6→1 no need OPC
4→2 62-96	5→2 64-96, 192-288	6→2 73-96
4→3 no need OPC	5→3 69-96	6→3 62-96, 186-288
4→5 45-96	5→4 45-96	6→4 79-96
4→6 79-96	5→6 34-96	6→5 34-96

Figure 2 shows the map contains all location ranges of OPC for all traffics in (a) clockwise and (b) counter-clockwise directions. Since the installed OPCs have to support all traffics in the network, the placement location of OPCs in a link between two nodes must be within the intersected product of the location ranges given by all traffics existed in that link. For example, on the link between Node #1 and #2 in the clockwise direction (Fig. 2(a)), we have the location range of OPCs equal to 41-96 km from the traffic from Node #1 to #2, the range of 78-96 km from Node #1 to #3, the range of 61-96 km from Node#1 to #4, and the range of 192-288 km from Node#5 to #2 (equivalent to 91 km from Node #6 to #1 added with 91 km from Node #1 to #2). Therefore, the intersection among these ranges results in the range of 78-91 km. This range of distance is the location range suitable for installing the OPC in the link between Node #1 and #2. By performing this procedure, we finally have 12 OPCs for the sample network. (6 OPCs on clockwise and 6 OPCs on counter-clockwise).

C. Choose the OPC positions, which yields the minimum accumulated dispersion at nodes

In the ring topology, signal may be dropped at arbitrary nodes. Hence, within the possible range for placing the OPC, we should choose the OPC position, which yields the minimum accumulated dispersion at node. The optimum position to achieve the lowest accumulated dispersion at node is always the minimum boarder of the OPC location range. For example, the optimum position is 78 km for the link between Node #1 and #2.

III. Verification

Figure 3 shows the accumulated dispersion of all traffics in the sample networks when the OPCs are placed following our algorithm. From Fig. 3, we can observe clearly that, for all traffic, the accumulated dispersion at any point in the network is less than D_{max}, which is indicated by dashed lines. This mention that the use of OPCs incorporated with our placement algorithm can cause the ring network to be operated transparently under the limit dispersion.

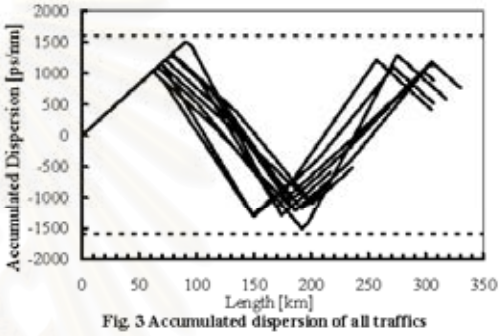


Fig. 3 Accumulated dispersion of all traffics

IV. Conclusion

An algorithm for the placement of OPC in single ring network was proposed for the first time to our knowledge. Our algorithm can be employed for overcoming the dispersion and the Kerr effect of all wavelengths when the installed ring network is upgraded to support the transparent DWDM signal transmission. Our algorithm is also simple and practical without the necessity of solving the optimization problems.

Reference

[1] Tran AV, Tucker RS, Boland NL, "Amplifier placement methods for metropolitan WDM ring networks" *J. Lightwave Tech.*, vol. 22, no. 11, pp 2509-2522 , Nov 2004

[2] Shigeki Watanabe, "Exact Compensation for both Chromatic Dispersion and Ken Effect in a Transmission Fiber Using Optical Phase Conjugation", *J. Lightwave Tech.*, vol. 14, no. 3, pp. 243-248, Mar. 1996.

[3] Chaloemphon Lorattanasane and Kazuro Kikuchi, *Member, IEEE*, "Design Theory of Long-Distance Optical Transmission System Using Midway Optical Phase Conjugation", *J. Lightwave* Tech., vol 15, no. 6, pp. 948-955 , June 1997

[4] S. L. Jansen, D. van den Borne, B. Spinnler,S. Calabrò, H. Suche, P. M. Krummrich, W. Sohler, G.-D. Khoe, and H. de Waardt, "Optical Phase Conjugation for Ultra Long-Haul Phase-Shift-Keyed Transmission", *J. Lightwave* Tech., vol. 24, no. 1, Jan 2006

[5] Paolo Minzioni, Francesco Alberti, and Alessandro Schiffini, "Techniques for Nonlinearity Cancellation Into Embedded Links by Optical Phase Conjugation", vol. 23, no. 8, August 2005

Optimized Dispersion Compensations in Upgrading Optical Metro-Ring Networks

Nuttha Chuenprasertsuk[1], Ismaeane Mohara[2] and Pasu Kaewplung[3]
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
E-mail: [1]JugjunG@Gmail.com, [2]Yamala29@hotmail.com and [3]Pasu.K@chula.ac.th

Abstract **- The employment of optical phase conjugator (OPC) and dispersion compensating unit (DCU) for upgrading optical metro-ring networks is studied. We propose an algorithm that can ensure the minimum number of OPC and DCU as well as the most suitable position in the network.**

I. Introduction

The SONET/SDH-based ring topology has been widely employed as metro-area networks (MANs) owing to its provision of reliability, superior protection and restoration schemes. However, the exponential increase in transmission capacity nowadays demands for the migration from the legacy time-division multiplexed (TDM)-based technology to the transparent dense-wavelength-division multiplexing (DWDM) scheme over the incumbent SONET/SDH ring networks. When an optical signal remains in optical domain during the transmission in a network that has relatively long links, signal power attenuation, dispersion, and the Kerr effect become main sources of signal distortion. For compensating the fiber attenuation, the optimum amplifier placement for the transparent ring network has been already studied [1]. However, an attractive method for overcoming the dispersion and the Kerr effect in the ring network still has never been reported.

For dispersion compensation, the optical phase conjugation technique is very interesting since the Kerr effect is by-product reduced by performing optical phase conjugation [2], [3]. Nevertheless, up to now, the optical phase conjugation has been focused only on long-haul point-to-point applications, and has never been extended its performance to any scales of optical networks [4], [5]. By applying our propose algorithm to a sample network consisted of 6 nodes with total length of 637 km, 12 OPCs are necessary for all communication traffic to be able to transmit in the network within a dispersion limit.

In order to overcome the dispersion, we propose, for the first time introduces an optimal algorithm for placing the dispersion compensating unit (DCU). Our algorithm can support both non-slope-compensated (NS) and slope-compensated (SC) DCUs, and can ensure the minimum number of DCUs. We assign a part of the optical pan-European network (OPEN) [6] with the total length of 1,882 km as a 4-ring-intersected sample network, as shown in Fig. 1. By applying our algorithm, we show that for the channel spacing range of 0.2 nm - 1.0 nm, the required total number of DCUs for 9-channel signal is 44 for both NSC- and SC-DCUs.

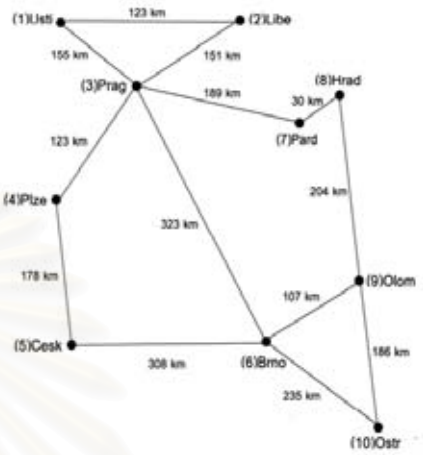


Fig. 1: Part of OPEN [7] that is used as sample network.

II. Algorithm for OPC Placement

The network sample for demonstrating our algorithm is shown in Fig. 2. The network is consisted of 6 nodes, 5 links, and the communication in the network can be bidirectional. Our algorithm can be explained in 3 main steps.

A. Find all possible traffics

The total number of traffic, which is the shortest path, between any 2 nodes is $N\times(N\text{-}1)$ where N is number of nodes in network. From the sample network, we show all possible traffics in term of distances from sources to destinations in Table 1.

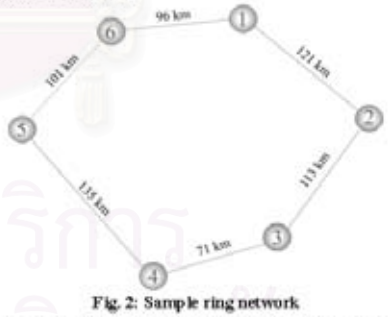


Fig. 2: Sample ring network

Table 1: All possible shortest path traffics from sample network

1→2 121 km	2→1 121 km	3→1 234 km
1→3 234 km	2→3 113 km	3→2 113 km
1→4 305 km	2→4 184 km	3→4 71 km
1→5 197 km	2→5 318 km	3→5 206 km
1→6 96 km	2→6 217 km	3→6 307 km
4→1 305 km	5→1 197 km	6→1 96 km
4→2 184 km	5→2 318 km	6→2 217 km
4→3 71 km	5→3 206 km	6→3 307 km
4→5 135 km	5→4 135 km	6→4 236 km
4→6 236 km	5→6 101 km	6→5 101 km

B. Find placement ranges of OPC

In the dispersion compensation mechanism using the optical phase conjugation, the accumulated dispersion along the length of the fiber before the OPC is cancelled by the amount of the accumulated dispersion along the fiber length after the signal is phase-conjugated by the OPC. Thus, among the different dispersion values resulted from the wavelengths used in the network, we must choose the maximum dispersion value for determining the locations of OPC since the channel wavelength that exhibits the maximum dispersion will always reach the maximum dispersion tolerance D_{max} at the distance shorter than other channels. Next, for each traffic obtained from step *A*, we explore the possible range of the location of OPCs with the constraint that both the accumulated dispersion values entering the OPCs and the destinations must be less than D_{max}, and at the same time the possible location range of OPCs must yield the minimum number of OPC. This procedure will be repeated for obtaining the location ranges of OPCS for all possible traffics in the network.

For our sample network, we assign 5 wavelengths centered at 1550 nm with spacing of 0.8 nm. The standard single-mode fiber (SMF, G.652) with the fiber dispersion (D_2) equals to 16.5 ps/km/nm, and the dispersion slope (D_3) of 0.05 ps/ km/nm^2, both at 1550 nm, is used for signal transmission. As a result, the maximum channel dispersion can be calculated by using D_2 and D_3, and is 16.58 ps/km/nm. With $D_{max} = \pm 1600$ ps/nm, Table 2 shows the possible range of location for installing the OPCs, in term of distance from source to destination, correspondingly to each possible traffic shown in Table 1.

Table 2: All possible ranges for placing OPC in the paths from Table 1

1→2 41-96	2→1 41-96	3→1 78-96
1→3 78-96	2→3 38-96	3→2 38-96
1→4 61-96, 183-288	2→4 62-96	3→4 no need OPC
1→5 66-96	2→5 64-96, 192-288	3→5 69-96
1→6 no need OPC	2→6 73-96	3→6 62-96, 186-288
4→1 61-96, 183-288	5→1 66-96	6→1 no need OPC
4→2 62-96	5→2 64-96, 192-288	6→2 73-96
4→3 no need OPC	5→3 69-96	6→3 62-96, 186-288
4→5 45-96	5→4 45-96	6→4 79-96
4→6 79-96	5→6 34-96	6→5 34-96

Figure 2 shows the map contains all location ranges of OPC for all traffics in (a) clockwise and (b) counter-clockwise directions. Since the installed OPCs have to support all traffics in the network, the placement location of OPCs in a link between two nodes must be within the intersected product of the location ranges given by all traffics existed in that link. For example, on the link between Node #1 and #2 in the clockwise direction (Fig. 2(a)), we have the location range of OPCs equal to 41-96 km from the traffic from Node #1 to #2, the range of 78-96 km from Node #1 to #3, the range of 61-96 km from Node#1 to #4, and the range of 192-288 km from Node#5 to #2 (equivalent to 91 km from Node #6 to #1 added with 91 km from Node #1 to #2). Therefore, the intersection among these ranges results in the range of 78-91 km. This range of distance is the location range suitable for installing the OPC in the link between Node #1 and #2. By performing this procedure, we finally have 12 OPCs for the sample network. (6 OPCs on clockwise and 6 OPCs on counter-clockwise).

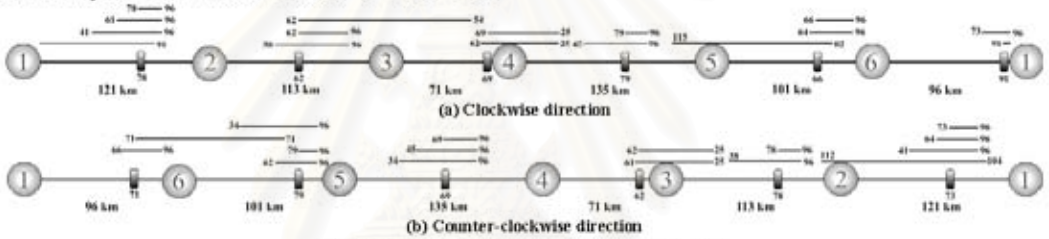


Fig 3: Maps of the OPC location ranges for all traffics.

C. Choose the OPC positions, which yields the minimum accumulated dispersion at nodes

In the ring topology, signal may be dropped at arbitrary nodes. Hence, within the possible range for placing the OPC, we should choose the OPC position, which yields the minimum accumulated dispersion at node. The optimum position to achieve the lowest accumulated dispersion at node is always the minimum boarder of the OPC location range. For example, the optimum position is 78 km for the link between Node #1 and #2.

III. Verification

Figure 3 shows the accumulated dispersion of all traffics in the sample networks when the OPCs are placed following our algorithm. From Fig. 3, we can observe clearly that, for all traffic, the accumulated dispersion at any point in the

network is less than D_{max}, which is indicated by dashed lines. This mentions that the use of OPCs incorporated with our placement algorithm can help the ring network to be operated transparently under the limit dispersion.

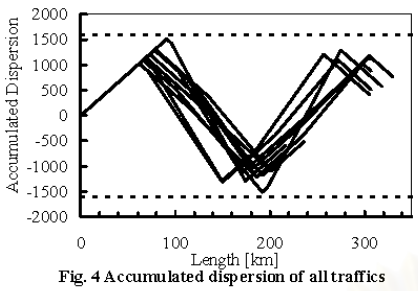


Fig. 4 Accumulated dispersion of all traffics

IV. Optimum DCU placement algorithm

Our algorithm consists of 4 steps as follows:

Step1: Communication light paths between any two nodes.
Let the communication between any two nodes can be bidirectional, in this step, the possible light paths between any two nodes are generated, and finally only the shortest paths are selected for signal transmission

Step 2: Generate the constraints.
First, we assign a group of wavelengths which will be used in the network. The number of wavelength can be larger, smaller, or equivalent to the number of node. Then, the following constraints are generated.
(A) Path Constraints

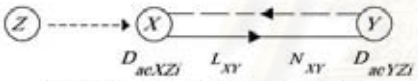


Fig. 5: Light path between adjacent nodes

The path constraint for optimum DCU placement is

$$D_{acXZi} + (D_i \times L_{XY}) + (D_{COMPi} \times N_{XY}) = D_{acYZi} \quad (1)$$

According to Eq. (1), for a path started from node X to node Y with the length of $L_{XY}(X \neq Y)$, the accumulated dispersion (D_{acXZi}) from node Z of signal at wavelength i (λ_i) will increase with the amount of $D_i \times L_{XY}$, where D_i is the dispersion at λ_i of the transmission fiber of the path. At the same time, the accumulated dispersion will be compensated by the amount of $D_{COMPi} \times N_{XY}$ where D_{COMPi} is the dispersion of DCU at λ_i and N_{XY} is the number of DCU on path XY. Finally, we obtain the total accumulated dispersion at the output of node Y equals to D_{acYZi}.
(B) Maximum dispersion constraints.
For each wavelength, it is required that the accumulated dispersion at any point in the network should not exceed the maximum acceptable accumulated dispersion D_{max} [8]. Therefore, we have the constraint,

$$-D_{max} \leq D_{acYZi} \leq D_{max} \quad (2)$$

(C) Integrality constraints
For each path XY, N_{XY} must be an integer.

(D) Objective function

$$Minimize(N) \quad (3)$$

Where N is total number of DCU in the network

Step 3: Solve the constraint equations.
Since our problem is a type of mixed-integer linear programming (MILP), this optimization problem can be solved by the soft wares such as X-Press.MP and C-plex. As a result from solving the problem, the number of DCU in each link and the accumulated dispersion at every node is obtained.

Step 4: Place the DCUs.
The DCUs are placed in the network at a position where at least one wavelength exhibits the accumulated dispersion that reaches D_{max}.

V. Optimal DCUs placement in sample network

For demonstrating our algorithm in really existing network, we use part of OPEN as a sample network as shown in Fig. 1. Our sample network is assumed to operate as ring topology and is consisted of 4-intersected rings with 10 nodes, 13 links, and has the total length of 1,882 km. For transmission fiber, the standard single-mode fiber (SMF, G.652), which exhibits the dispersion (D) of 16.5 $ps/nm/km$ and the dispersion slope (D') of 0.05 $ps/nm^2/km$ at 1,550 nm [9]. We employ 2 types of DCUs: the NS-DCU that has D of $(-82) ps/nm/km$ with D' of 0.25 $ps/nm^2/km$ both at 1,550 nm, and the length of the NS-DCU can perfectly compensate for the accumulated dispersion of the 100-km-transmitted length of G.652 fiber, and the SC-DCUs that has same characteristics as the NS-DCU except the reverse sign of the dispersion slope [5]. Next, we assign the group of 9 wavelengths with the center wavelength located at 1,550.12 nm. Following the procedures described in section 2, we obtain the minimum number of DCU and the appropriate location of DCUs in the network. By varying the channel spacing ($\Delta\lambda$) from 0.2 nm to 1.4 nm, we compare the total number of both types of DCUs that requires in the sample network in Table 1. From Table 1, the total number of DCUs equals to 44 for both types of DCUs although $\Delta\lambda$ increases from 0.2 nm to 1.0 nm. These results indicate that we can use the NS-DCU to obtain the same network performance as using the SC-DCU. This significantly helps reducing the cost of the network

because the NS-DCU is usually less expensive than the SC-DCU. For $\Delta\lambda$ = 1.2-1.4 nm, the number of NS-DCU necessary for the network becomes greater than that of SC-DCU due to large over- and under-compensation.

VI. Conclusion

An algorithm for the placement of OPC and DCU for upgrading transparent DWDM optical metro-ring networks was proposed for the first time to our knowledge. Our algorithm can be employed for overcoming the dispersion and the Kerr effect of all wavelengths when the installed ring network is upgraded to support the transparent DWDM signal transmission with the minimum number of OPC and DCU. Our algorithm is also simple and practical without the necessity of solving the optimization problems.

Acknowledgement

This work is supported by the cooperation project between the Department of Electrical Engineering and private sector for research and development.

Reference

[1] Tran AV, Tucker RS, Boland NL,."Amplifier placement methods for metropolitan WDM ring networks",*J. Lightwave Tech.*,vol. 22, no. 11, pp 2509-2522 , Nov 2004

[2] Shigeki Watanabe, "Exact Compensation for both Chromatic Dispersion and Ken Effect in a Transmission Fiber Using Optical Phase Conjugation", *J. Lightwave Tech.*, vol. 14, no. 3, pp. 243-248, Mar. 1996.

[3] Chaloemphon Lorattanasane and Kazuro Kikuchi, *Member, IEEE*, "Design Theory of Long-Distance Optical Transmission System Using Midway Optical Phase Conjugation", *J. Lightwave* Tech., vol 15, no. 6, pp. 948-955 , June 1997

[4] S. L. Jansen, D. van den Borne, B. Spinnler,S. Calabrò, H. Suche, P. M. Krummrich, W. Sohler, G.-D. Khoe, and H. de Waardt, "Optical Phase Conjugation for Ultra Long-Haul Phase-Shift-Keyed Transmission", *J. Lightwave* Tech., vol. 24, no. 1, Jan 2006

[5] Paolo Minzioni, Francesco Alberti, and Alessandro Schiffini, "Techniques for Nonlinearity Cancellation Into Embedded Links by Optical Phase Conjugation", vol. 23, no. 8, August 2005

[6] N. Antoniades, I. Roudas, G. Ellinas, J. Amin,. "Transport Metropolitan Optical Networking: Evolving Trends in the Architecture Design and Computer Modeling," IEEE Journal of Light wave Technology 22 (Nov 2004): 2653-2670

[7] www.ces.net/doc/2003/research /optnet.html

[8] N. Antoniades, et.Al., "Performance Engineering and Topological Design of Metro WDM Optical Network Using Computer Simulation,"IEEEJ. On selected area in communication,.20(Jan 2002), No.1..

[9] Data. Sheet of PowerForm™ DCM ® Modules for SMF, C-Band: Avanex, 2005.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฏฐา ชื่นประเสริฐสุข เกิดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527 อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย