แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 9
โครงข่ายเส้นใยนำแสง

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. รูปแบบโครงข่ายเส้นใยนำแสง
2. การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์
3. โครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบ SONET/SDH และ PON
4. โครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบเอฟทีทีเอ็กซ์ (FTTX)

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบายรูปแบบโครงข่ายเส้นใยนำแสงได้
2. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบายหลักการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ได้
3. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบายโครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบ SONET/SDH PON และเอฟทีทีเอ็กซ์ได้ (FTTX)

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอนประจำบท

1. วิธีสอน

1.1 วิธีสอนแบบบรรยาย

1.2 วิธีสอนแบบอภิปราย

1.3 วิธีสอนแบบเน้นค้นคว้าหาความรู้ด้วยตนเอง

2. กิจกรรมการเรียนการสอน

2.1 ผู้สอนบรรยายเนื้อหาที่เกี่ยวกับ หลักการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์โครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบ SONET/SDH PON และเอฟทีทีเอ็กซ์ได้ (FTTX)

2.2 ผู้สอนมีการตั้งคำถามระหว่างการสอน

2.3 มีการมอบหมายแบบฝึกหัดให้ผู้เรียนได้ทำเป็นการบ้าน

2.4 มีการมอบหมายหัวข้อให้ผู้เรียนได้ไปอ่านล่วงหน้า

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอน รายวิชาการสื่อสารทางแสง
2. เว็บไซต์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
3. แบบฝึกหัดท้ายบทเรียบ
4. เครื่องคำนวณ

การวัดผลและการประเมินผล

1. การเข้าชั้นเรียน ความตรงต่อเวลา และความตั้งใจในระหว่างเรียน
2. การส่งแบบฝึกหัด การบ้านและการนำเสนอรายงาน
3. การสอบกลางภาค
4. การสอบปลายภาค
5. การค้นคว้าเพิ่มเติมตามหัวข้อที่ได้รับมอบหมาย

บทที่ 9
โครงข่ายเส้นใยนำแสง

การพัฒนาโครงข่ายเส้นใยนำแสงมีมาอย่างต่อเนื่องจากอดีต 30 ปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน เส้นใยนำแสงเหมาะสำหรับการส่งสัญญาณความเร็วสูงใช้ได้กับการส่งสัญญาณทุกประเภทเช่น สัญญาณเสียง ภาพ และข้อมูล เทคโนโลยีโครงข่ายเส้นใยนำแสงมีพัฒนาไปเร็วมาก เพื่อรองรับระบบสื่อสารยุคที่ 5 และระบบสื่อสารอินเทอร์เน็ต มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของโครงข่ายที่ใช้งานบนโลกเป็นโครงข่ายเส้นใยนำแสง เพราะโครงข่ายเส้นใยนำแสงมีประสิทธิภาพ ความเร็ว ความคุ้มค่าการลงทุน และความน่าเชื่อถือของระบบดีกว่าโครงข่ายประเภทอื่น ๆ วิวัฒนาการโครงข่ายเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ยุคด้วยกัน

ยุคแรกเป็นโครงข่ายที่เชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (point-to-point) เช่นโครงข่าย SDH (synchronous digital hierarchy) หรือโครงข่าย SONET (synchronous optical network) วงจรเชื่อมต่อจะเป็นแบบเซอร์กิตสวิตช์ (circuit switching) ลักษณะการส่งข้อมูลแบบเซอร์กิตสวิตช์จะต้องสร้างเส้นทางก่อนการส่ง และเมื่อส่งข้อมูลเสร็จแล้วถึงจะมีการยกเลิกเส้นทาง ในระหว่างการส่งข้อมูล สถานีลูกข่ายอื่น ๆ ไม่สามารถใช้เส้นทางนี้ได้ จนมาถึงปี 1990

ยุคที่สอง ใช้เทคนิคการหาเส้นทางแบบความยาวคลื่น เป็นการหาเส้นทางในย่านความถี่แสง (wavelength routing technique) ซึ่งจะเร็วกว่าการหาเส้นทางในย่านความถี่ต่ำ และมีการพัฒนาการมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณแบบ WDM (wavelength division multiplex) ไปเป็น DWDM (dense wavelength division multiplex) ค่าความเร็วสูงสุดสำหรับโครงข่ายเส้นใยนำแสงยุคที่สองคือ 40 Gbps แต่ข้อด้อยของโครงข่ายเส้นใยนำแสงยุคที่สองคือมีความยืดหยุ่นน้อย เมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นการปรับปรุงข้อมูลอัลกอริทึมในการหาเส้นทางในโครงข่ายทำได้ยากขึ้น

ยุคที่สามใช้วงจรเชื่อมต่อจะเป็นแบบการสลับกลุ่มข้อมูลทางแสง (optical packet switching) ร่วมกับการมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณแบบ DWDM ค่าความเร็วสูงสุดสำหรับโครงข่ายเส้นใยนำแสงยุคที่สองคือ 160 Gbps และปัจจุบันการพัฒนาโครงข่ายเส้นใยนำแสงจะมุ่งไปสู่การทำงานของวงจรเชื่อมต่อจะเป็นแบบเบิร์ตสวิตช์ (optical burst switching) และมีการปรับปรับปรุงข้อมูลอัลกอริทึมในการหาเส้นทางในโครงข่ายแบบปรับตัวได้ (dynamic network) และใช้หลักการเชื่อมต่อวงจรร่วมกันระหว่างเซอร์กิตสวิตช์กับเบิร์ตสวิตช์หรือกำหนดให้เป็นแบบวงจรเชื่อมต่อแบบร่วมหรือไฮบริดสวิตช์

9.1 รูปแบบโครงข่ายเส้นใยนำแสง

รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างสถานีในโครงข่ายสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบหลัก ๆ คือ แบบบัส (bus), แบบริง (ring), แบบสตาร์ (star) และแบบเมช (mesh) โครงข่ายแบบบัสการส่งเฟรมข้อมูลระหว่างโหนดจะเป็นแบบสองทางพร้อมกันผ่านตัวคู่ต่อแบบสี่ทาง (four-port couplers) โดยเฟรมที่ส่งจะมีเลขที่อยู่ของปลายทาง (address) เพียงโหนดเดียวที่สามารถเข้าถึงเฟรมได้ โครงข่ายแบบริงเฟรมข้อมูลที่ส่งจะเป็นแบบวงกลมทิศทางเดียว และมีเฟรมโทเกนเพื่อกำหนดที่อยู่ระหว่างผู้รับกับผู้ส่งและจองช่องสัญญาณ แบบที่สองคือโครงข่ายแบบสตาร์ รูปแบบการส่งเฟรมจะต้องมีผู้ควบคุมหรือศูนย์กลาง (sever) เพื่อควบคุมการส่งแฟรมระหว่างโหนด และโครงข่ายแบบเมชการส่งเฟรมของแต่ละโหนดจะเป็นอิสระจากกัน เป็นโครงข่ายที่มีความยืดหยุ่นมากที่สุด แต่จะมีความซับซ้อนในการวางโครงข่ายมากที่สุดเพราะต้องใช้สายส่งสัญญาณจำนวนมากและมีค่าการติดตั้งระบบสูง

ระบบแบบเมชจะมีเสถียรภาพมากที่สุดในรูปแบบการเชื่อมต่อทั้งหมด ฉะนั้นการวางโครงข่ายแบบเมชจะเหมาะกับโหนดระดับบน (core routers) และมีจำนวนโหนดน้อย ๆ ส่วนการวางโครงข่ายแบบสตาร์และแบบบัสจะเหมาะกับโครงข่ายที่มีจำนวนโหนดมาก ๆ และระยะทางไม่ไกลมากซึ่งพอสรุปได้ว่า 1. โครงข่ายแบบสตาร์ (star) เหมาะกับระยะทาง 1-20 km (access or users)

2. โครงข่ายแบบริง (ring) เหมาะกับระยะทาง 10-100 km (metropolitan)

3. โครงข่ายแบบเมช (mesh) เหมาะกับระยะทาง 100-1000 km (long-haul)

การวางลำดับชั้นของโครงข่ายเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับคือ ระดับล่างสุดคือสถานีลูกข่าย (node และ access) ระดับกลาง metropolitan (เขตเมือง หรือ จังหวัด)และระดับบน long-haul (เขตภูมิภาค หรือ ประเทศ) และในกรณีโครงข่ายเส้นใยนำแสงแบ่งตามเขตพื้นที่มี 4 ระดับคือ

1. โครงข่ายขนาด pico-cell เชื่อมต่อภายในอาคาร
2. โครงข่ายขนาด micro-cell เชื่อมต่อภายในเขตเมือง
3. โครงข่ายขนาด macro-cell เชื่อมต่อภายในขอบเขตจังหวัด
4. โครงข่ายขนาด world-cell เชื่อมต่อภายในประเทศและระหว่างประเทศ

9.2 การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์

การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์เป็นเทคนิคการส่งข้อมูลของสถานีลูกข่ายจำนวนมากโดยใช้สายส่งเพียงคู่สายเดียวเพื่อเป็นการประหยัดสายส่ง และเพิ่มประสิทธิภาพการงานใช้ความกว้างแถบความถี่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด การทำงานเบื้องต้นของตัวมัลติเพล็กซ์คือด้านภาคส่งจะทำการรวบรวมช่องสัญญาณจำนวนหลาย ๆ ช่องสัญญาณแล้วส่งผ่านสายส่ง (เส้นใยนำแสง) และเมื่อถึงภาครับ

ตัวดีมัลติเพล็กซ์จะทำการขยายหรือกระจายช่องสัญญาณกลับมาเหมือนเดิม เทคนิคการมัลติเพล็กซ์ (มักซ์) และดีมัลติเพล็กซ์ (ดีมักซ์) ในโครงข่ายเส้นใยนำแสงมีหลายแบบด้วยกันคือ

1. การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OTDM (optical time division multiplexing)

2. การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OSCM (optical sub-carrier multiplexing)

3. การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OOFDM (optical orthogonal frequency division multiplexing)

4. การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM (wavelength division multiplexing)

5. การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ DWDM (dense wavelength division multiplexing)

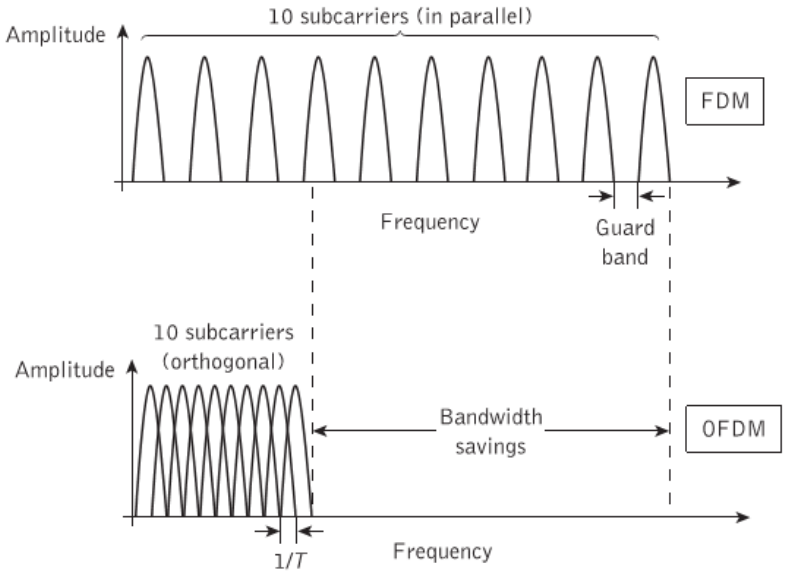
6. การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ CWDM (coarse wavelength division multiplexing)

7. การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OWDM (optical code division multiplexing)

8. การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ไฮบริด (hybrid multiplexing)

ในกรณีแรกการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OTDM จากข้อจำกัดความเร็วสูงสุดของอุปกรณ์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะอยู่ที่ประมาณ 100 GHz การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OTDM จะใช้สัญญาณนาฬิกา (สัญญาณไฟฟ้า) 40 GHz การรวมและการแยกช่องสัญญาณจะใช้การแบ่งช่วงเวลา (time division) ถ้าแถบความถี่ฐานหรือสัญญาณเบสแบนส์แบบ RZ ที่ความเร็ว 40 Gbps และรวม 4 ช่องสัญญาณ (four-channel OTDM) ซึ่งความเร็วระดับ 160 Gbps จะเป็นพัลส์กำลังงานแสงผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว และพัลส์แสงที่ส่งจะใช้ค่าความยาวคลื่นเดียว (single wavelength) และทางด้านรับจะทำการแยกช่องสัญญาณโดยใช้การแบ่งช่วงเวลาเช่นเดียวกัน อัตราส่วนการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบสี่ต่อหนึ่ง (4:1)

แบบที่สองคือการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบคลื่นพาหะย่อย OSCM (optical sub-carrier multiplexing) โดยใช้หลักการรวมและการแยกช่องสัญญาณแบบแบ่งช่วงความถี่ (frequency division) จะใช้หลักการรวมและการแยกช่องสัญญาณแบบแบ่งช่วงความถี่ย่านไมโครเวฟโดยใช้ VCO (voltage control oscillator) ควบคู่กับเทคนิคการกล้ำสัญญาณความถี่ต่ำเช่น เสียง ภาพ เข้ากับความถี่ย่านไมโครเวฟ สำหรับระบบแบบแอนะล็อกใช้หลักการกล้ำสัญญาณแบบ AM, FM และ PM และถ้าเป็นสัญญาณดิจิทัล เทคนิคการกล้ำสัญญาณจะเป็นแบบ ASK, FSK และ PSK หรือการกล้ำสัญญาณแบบ AM–VSB (vestigial sideband or FM techniques) ช่องสัญญาณที่ผ่านการรวมแล้ว จะกล้ำสัญญาณกับคลื่นพาห์แสง (optical signal) แบบความเข้มกำลังงานคลื่น IM/DD (intensity modulation and direct detection) อีกครั้งหนึ่ง



ภาพที่ 9.1 การรวมช่องสัญญาณแบบ OFDM เทียบกับแบบ FDM
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 769)

พัลส์แสงที่ผ่านการกล้ำสัญญาณแล้วจะถูกส่งผ่านเส้นใยนำแสงโดยทั่วไปจะใช้เส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว จนถึงภาครับช่องสัญญาณจะถูกแยกแบบแบ่งช่วงความถี่เช่นเดียวกันกับภาคส่งและทำการแยกสัญญาณข้อมูลออกจากคลื่นพาห์ย่านไมโครเวฟ ตามเทคนิคการกล้ำสัญญาณแต่ละแบบ การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OSCM จะเหมาะสำหรับการส่งสัญญาณประเภท CATV (cable TV) หรือ HDTV (high definition television)

แบบที่สามคือการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OOFDM (optical orthogonal frequency division multiplexing) เป็นเทคนิคการรวมและการแยกช่องสัญญาณแบบหลายความถี่คลื่นพาหะดังแสดงในภาพที่ 9.1 ความแตกต่างระหว่างระบบแบบ FDM กับ OFDM จากภาพจะเห็นว่าในกรณีที่ช่วงความถี่เท่ากันจำนวนช่องสัญญาณแบบ OFDM จะมากกว่าแบบ FDM เนื่องจากไม่ต้องสูญเสียช่วงความถี่ป้องกันการซ้อนทับหรือการเหลื่อมล้ำ (guard band)

การรวมช่องสัญญาณแบบ OFDM คลื่นพาห์แต่ละช่องสัญญาณจะตั้งฉากกันในโดเมนเวลา (frequency orthogonal) โดยใช้หลักการอินเฟส I (in phase) และเฟสตั้งฉาก Q (quadrature phase) การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OOFDM ใช้หลักการรวมและแยกช่องสัญญาณอยู่ในย่านความถี่ต่ำ (radio frequency: RF) กระบวนการทำงานจะเริ่มจากที่ภาคส่ง แต่ละช่องสัญญาณจะผ่านตัวกล้ำสัญญาณแบบ QAM (quadrature amplitude modulation) และประมวลผลแบบ IFFT (inverse Fourier transform) ผ่านการเรียงบิตจากขนานเป็นอนุกรม (parallel to serial) และวงจร

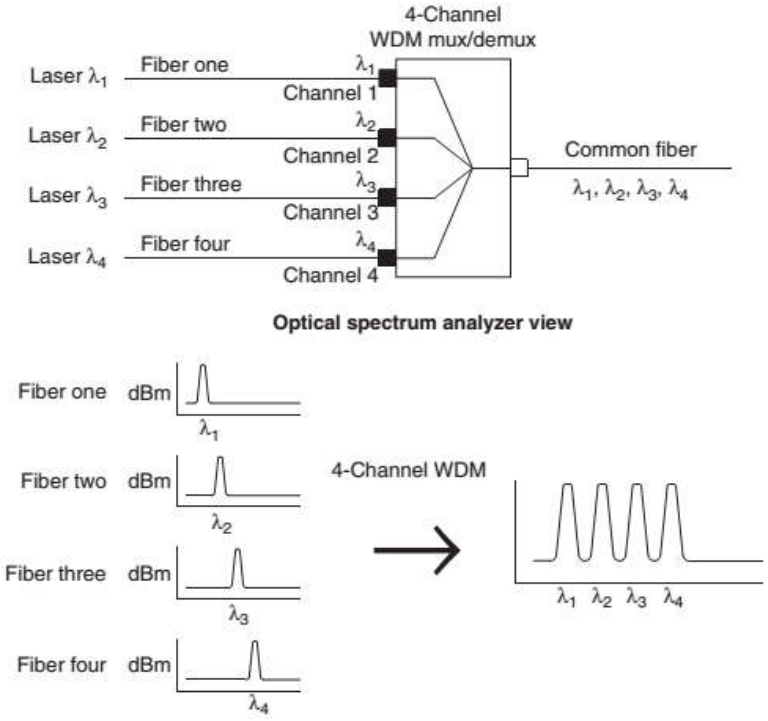
แปลงจากดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (D/A) และผ่านวงจรคูณสัญญาณแบบตั้งฉาก I ($\cos(2\pi f_{RF}t)$) และ Q ($\sin(2\pi f_{RF}t)$) สัญญาณคลื่นพาห์ I และ Q จะใช้ความถี่เดียวกันแต่ต่างเฟสกัน 90 องศา ร่วมกับการไอบัสกระแสตรง (D. C. component) โดยใช้ DFB เลเซอร์ (distributed feedback laser) เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบของพัลส์ความเข้มกำลังงานแสง (intensity modulation: IM) โดยใช้ตัวกรองสัญญาณแบบ MZM (Mach-Zehnder modulator) ผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว

ส่วนลำดับทำงานของภาครับจะตรงกันข้ามกับภาคส่งและเพิ่มวงจรปรับแต่งสัญญาณอีควอไรเซอร์ ก่อนเข้าสู่วงจรถอดสัญญาณแบบ QAM และกระจายช่องสัญญาณให้เหมือนกับภาคส่ง ข้อสังเกตของการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OOFDM ขบวนการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์จะอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ (RF: radio frequency) ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานได้ ค่าความเร็วสูงสุดที่ระบบการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OOFDM สามารถส่งได้คือ 12 Gbps ใช้เส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวที่ความยาวคลื่น 1,550 nm ระยะทางสูงสุด 400 km การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบ WDM และ DWDM สามารถรวมและแยกช่องสัญญาณได้ที่ความความถี่สูง (optical signal) หรือความยาวคลื่นแสง (optical wavelength) จะแตกต่างจากการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OOFDM รูปแบบการรวมและแยกช่องสัญญาณทางความยาวคลื่นแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

1. แบบทางเดียว (simplex) เป็นการส่งที่ใช้หนึ่งความยาวคลื่น
2. แบบสองทาง (duplex) เป็นการส่งที่ใช้สองความยาวคลื่น
3. แบบร่วม (multiplex) เป็นการส่งที่ใช้หลายความยาวคลื่น

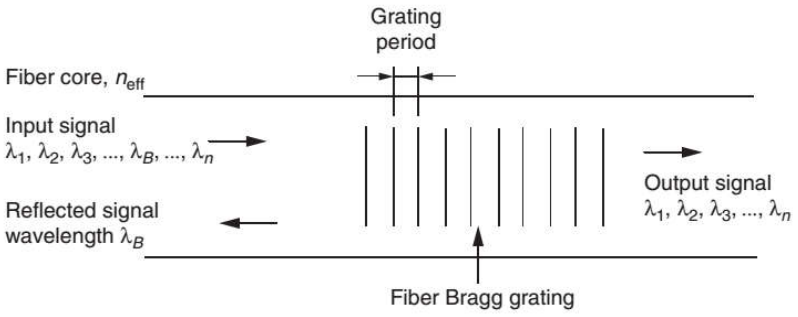
ในกรณีที่ใช้ความยาวคลื่นต่างกันสามารถที่จะส่งร่วมกันผ่านเส้นใยนำแสงเส้นเดียวได้ เทคนิคการรวมและแยกช่องสัญญาณโดยใช้ค่าความยาวคลื่นต่างกัน เรียกว่าการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นหรือดับบริวดีเอ็ม (WDM: wavelength division multiplexing) แต่ละช่องสัญญาณจะมีค่าความยาวคลื่นศูนย์กลาง (center frequency) และความยาวคลื่นด้านข้าง (gaud band) เพื่อป้องกันการซ้อนทับหรือการเหลื่อมล้ำระหว่างกันของแต่ละช่องสัญญาณ

หลักการพื้นฐานการมัลติเพล็กซ์แบบ WDM ดังแสดงในภาพที่ 9.2 แหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่มีช่วงความยาวคลื่นแคบ (narrow line width injection laser source) หรือ ELED (edge-emitting LED) ที่มีค่าความยาวคลื่นประมาณ 63 nm การเลื่อนแถบความยาวคลื่นจะใช้แผ่นแกรดติง (diffraction grating) เลื่อนทีละช่วงโดยแบ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นละ 3.65 nm โดยทั่วไประบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงจะใช้การสื่อสารแบบ full duplex มากกว่าแบบ half duplex หรือ simplex ในกรณีการสื่อสารแบบสองทาง (full duplex) ถ้าใช้เส้นใยนำแสงเส้นเดียวจะต้องใช้ความคลื่นต่างกันเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนระหว่างช่องสัญญาณ แต่ถ้าใช้ความยาวคลื่นค่าเดียว ด้านส่งกับด้านรับต้องใช้สายอย่างละเส้นโดยทั่วไปในระบบส่งข้อมูลความเร็วสูง มักจะแยกสายด้ายส่งกับสายด้านรับออกจากกัน



ภาพที่ 9.2 การมัลติเพล็กซ์แบบ WDM

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 168)



ภาพที่ 9.3 หลักการสะท้อนกลับของคลื่นแสงบนแผ่นเกรตติงแบบแบล็ก

ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 774)

การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM นำไปใช้หลายระบบส่งข้อมูลเช่น SONET, SDH, GigE, 10GigE และอื่น ๆ สำหรับการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM จะมี 4 แบบด้วยกันคือ

1. แบบ FBG (fiber Bragg grating),
2. แบบ AWG (array waveguide grating)
3. แบบ TFF (thin-film filter) และ

4. แบบ DF (diffraction grating filter)

กรณีแรกเป็นการรวมและแยกความยาวคลื่นแบบ FBG (fiber Bragg grating) ถูกคิดค้นโดย William Lawrence Bragg ใช้หลักการสะท้อนกลับของคลื่นแสงในตัวกลางที่มีค่าดรรชนีการหักเหในท่อนำคลื่นแบบลำดับชั้นตามระยะในการวางแผ่นเกรตติง (grating period) ดังแสดงในภาพที่ 9.3 การสะท้อนกลับของคลื่นแสงที่สัมพันธ์กับระยะห่างการวางแผ่นเกรตติงแบบแบล็กดังสมการ

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{eff} \tag{9.1}$$

โดยที่ λ_B คือค่าความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับ (μs)

T คือระยะการวางแผ่นเกรตติงแบบแบล็ก (μm)

n_{eff} คือค่าดรรชนีการหักเหของคอร์

เมื่อคลื่นแสงเดินทางผ่านตัวกรองความยาวคลื่นแบบแบ็ลกร่วมกับเซอร์คูเลเตอร์ (circulator) จะมีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวที่จะสะท้อนกลับ สำหรับการแยกความยาวคลื่นจะวางชุดแผ่นสะท้อนคลื่นแบบแบล็กไว้ด้านหลังเซอร์คูเลเตอร์ ส่วนการรวมความยาวคลื่นจะวางชุดแผ่นสะท้อนคลื่นแสงแบบแบล็กไว้ด้านหน้าเซอร์คูเลเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 9.4 จากภาพเป็นการมัลติเพล็กซ์ (รวมความยาวคลื่น) และดีมัลติเพล็กซ์ (แยกความยาวคลื่น) จำนวน 1 ช่องสัญญาณและ 3 ช่องสัญญาณตามลำดับ

การสูญเสียกำลังงานคลื่นแสงของแผ่นสะท้อนคลื่นแสงแบบแบล็กและเซอร์คูเลเตอร์ประมาณ 0.1 dB ต่อแผ่น ข้อดีและข้อด้อยของเทคโนโลยีมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM ที่ใช้แผ่นสะท้อนคลื่นแบบ FBG

1. แผ่นสะท้อนคลื่นแบบ FBG จะมีทิศทางการทำงาน

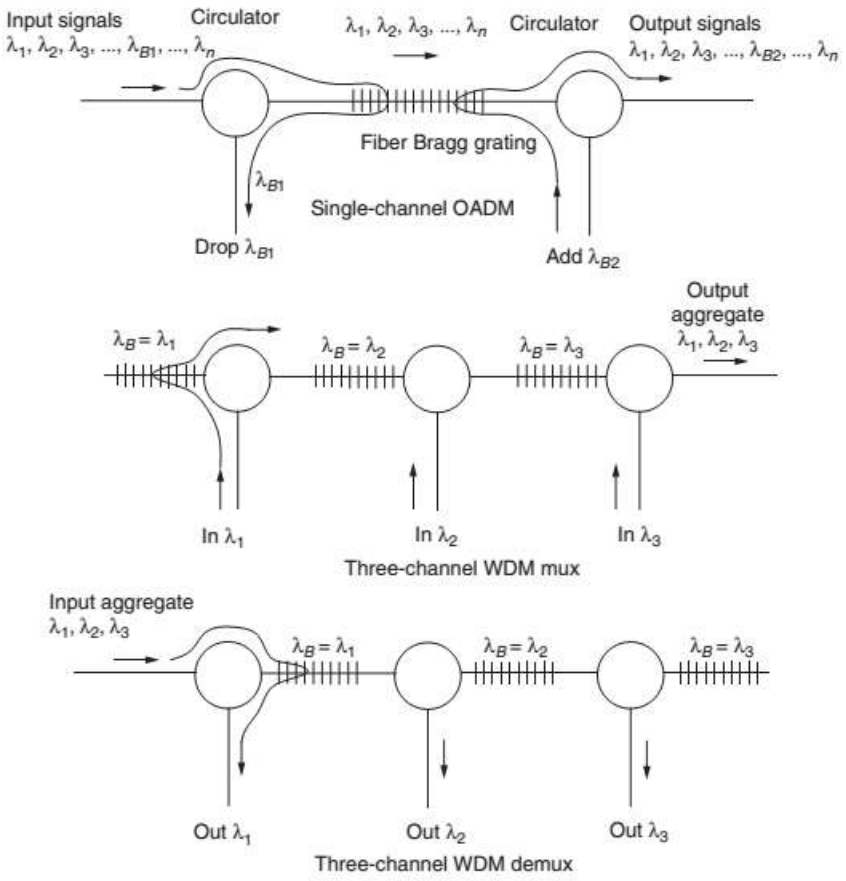
2. แผ่นสะท้อนคลื่นแบบ FBG จะทำงานแบบแพสซีฟเมื่อเชื่อมต่อกับเซอร์คูเลเตอร์

3. ค่าอัตราการลดทอน (insertion loss) ของแผ่นสะท้อนคลื่นแบบ FBG ปกติจะน้อยกว่า 1 dB แต่จะเพิ่มขึ้นถ้านำมาต่ออนุกรมกัน (cascade)

4. แผ่นสะท้อนคลื่นแบบ FBG จะมีค่าช่วงแถบความถี่แต่ละช่องสัญญาณมากกว่า 50 GHz และถ้าความเร็วของสัญญาณข้อมูลมากกว่า 10 Gbps จะมีค่าการขยายออกของพัลส์แสงที่ค่อนข้างสูง

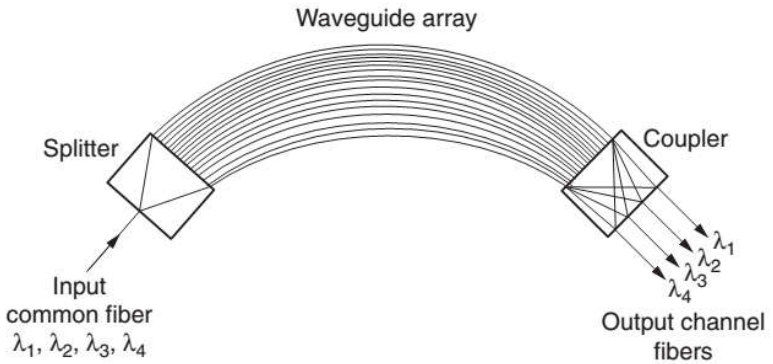
5. แผ่นสะท้อนคลื่นแบบ FBG เหมาะกับมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM ที่จำนวนช่องสัญญาณน้อยกว่า 40 ช่องสัญญาณ

การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM เทคนิคที่สองใช้การรวมและแยกความยาวคลื่นโดยใช้ท่อนำคลื่นแบบอาร์เรย์ AWG (array waveguide grating) ท่อนำคลื่นแบบ AWG จะใช้หลักการแยกคลื่นโดยใช้ความยาวท่อนำคลื่นต่อแบบอาร์เรย์ร่วมกับตัวแยกคลื่น (splitter) และตัวคู่ต่อ (coupler) ดังแสดงในภาพที่ 9.5



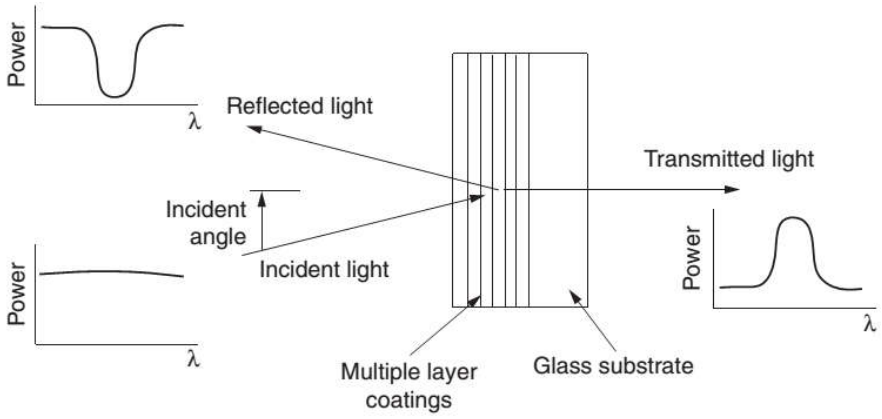
ภาพที่ 9.4 หลักการรวมและแยกความยาวคลื่นแต่ละช่องสัญญาณ

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 171)



ภาพที่ 9.5 การรวมและแยกความยาวคลื่นแบบ AWG

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 173)



ภาพที่ 9.6 แผ่นกรองคลื่นแสงแบบฟิล์มบาง TTF
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 173)

ท่อนำคลื่นแบบ AWG สามารถสร้างเป็นแบบแผ่นวงจรรวมโฟโตนิกส์ได้ (photonic integrate circuit : PIC) ซึ่งจะมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ท่อนำคลื่นแบบ AWG สามารถแยกและรวมทุกความยาวคลื่นได้พร้อมกัน คุณลักษณะของเทคนิคการรวมและแยกความยาวคลื่นโดยใช้ท่อนำคลื่นแบบอาร์เรย์ AWG คือ

1. ท่อนำคลื่นแบบอาร์เรย์ AWG จะเป็นท่อนำคลื่นแบบโปร่งแสงฉะนั้นค่าความยาวสายโดยรวมจะเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การขยายออกของพัลส์เพิ่มมากขึ้น

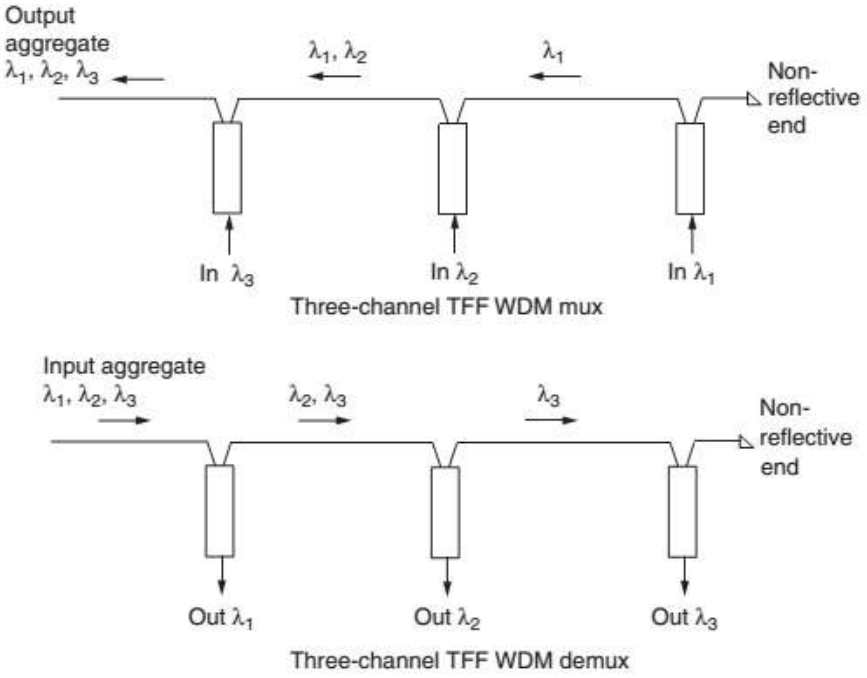
2. ท่อนำคลื่นแบบอาร์เรย์ AWG จะมีค่าลดทอนกำลังงานคงที่ประมาณ 4-5 dB และไม่สัมพันธ์กับจำนวนช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้น

3. ท่อนำคลื่นแบบอาร์เรย์ AWG จะไวต่ออุณหภูมิประมาณ 10 pm/°C ฉะนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

4. ท่อนำคลื่นแบบอาร์เรย์ AWG มีค่าช่วงแถบความถี่ที่เหมาะสมแต่ละช่องสัญญาณประมาณ 12.5-200 GHz

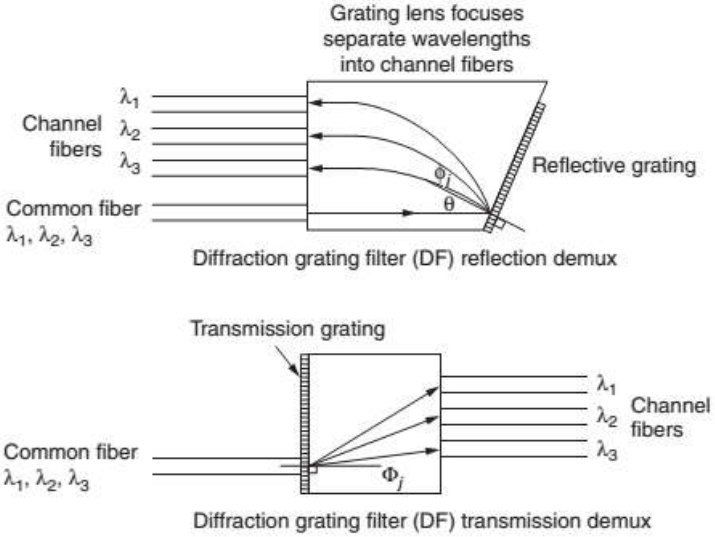
5. ท่อนำคลื่นแบบอาร์เรย์ AWG สามารถแยกและรวมความยาวคลื่นได้มากกว่า 40 ช่องสัญญาณ

แบบที่สามเป็นเทคโนโลยีมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM ที่ใช้แผ่นกรองแบบฟิล์มบาง TTF (thin-film filter) แสดงดังภาพที่ 9.6 เป็นแผ่นกรองคลื่นแสงแบบแบนด์แคบ (narrow band) ใช้หลักการสะท้อนคลื่นเช่นเดียวกับแผ่นสะท้อนคลื่นแบบ FBG แผ่นกรองคลื่นแบบฟิล์มบาง TTF จะมีหลายชั้น (multi-layer coating) และมีแก้วเป็นซับสเตรต (glass substrate) ความหนาของแผ่นฟิล์มบางจะเป็นตัวกำหนดย่านคลื่นแสงสะท้อนกลับและส่งผ่าน จากภาพที่ 9.7 เป็นการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบใช้แผ่นกรอง TTF ขนาด 3 ช่องสัญญาณ ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)



ภาพที่ 9.7 การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบใช้แผ่นกรอง TTF

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 174)



ภาพที่ 9.8 การรวมและแยกความยาวคลื่นโดยใช้แผ่นเลี้ยวเบนคลื่นแสงแบบ DF

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 175)

คุณสมบัติของแผ่นกรองคลื่นแสงแบบ TTF คือ

1. แผ่นกรองคลื่นแสงแบบ TTF มีความไวต่ออุณหภูมิต่ำประมาณ 0.3 pm/°C

2. แผ่นกรองคลื่นแสงแบบ TTF สามารถทำงานได้สองทิศทาง (bidirectional)

3. แผ่นกรองคลื่นแสงแบบ TTF มีค่าลดทอนกำลังงานต่ำน้อยกว่า 1 dB ต่อ 1 แผ่นกรอง

4. การทำงานของแผ่นกรองคลื่นแสงแบบ TTF จะเป็นแบบแพสซิฟทั้งหมด สามารถใช้ได้ทั้งโครงข่ายแบบ WDM และ OADM (optical add/drop module)

5. ค่าความยาวคลื่นแต่ละช่องสัญญาณสามารถควบคุมได้โดยการปรับมุมตกกระทบ จำนวนช่องสัญญาณที่สามารถมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ได้น้อยกว่า 40 ช่องสัญญาณและค่าความกว้างแถบความถี่แต่ละช่องสัญญาณประมาณ 50 GHz

ส่วนภาพที่ 9.8 เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบที่สี่ใช้แผ่นเลี้ยวเบนคลื่นแสงแบบ DF (diffraction grating filter) ร่วมกับแผ่นสะท้อนคลื่นเกรตติง (reflective grating) ค่าความยาวคลื่นแต่ละช่องสัญญาณสามารถควบคุมได้โดยการปรับมุมตกกระทบลงบนแผ่นสะท้อนคลื่นเกรตติง ดังแสดงในภาพ ค่าความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับค่ามุมตกกระทบสำหรับแผ่นกรองแบบ DF จะเป็นดังสมการ

$$m\lambda_j f_s = \sin\theta + \sin\phi_j \tag{9.2}$$

$$m\lambda_j f_s = \sin\Phi_j \tag{9.3}$$

$$f_s = 1/(grating\ period) \tag{9.4}$$

โดยที่ λ_j คือค่าความยาวคลื่นที่เลี้ยวเบนกลับ (μm)

f_s คือค่าความถี่ของแผ่นเกรตติง (spatial frequency of the grating) (lines/μm)

m คือค่าลำดับการเลี้ยวเบน

θ คือมุมตกกระทบในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (rad)

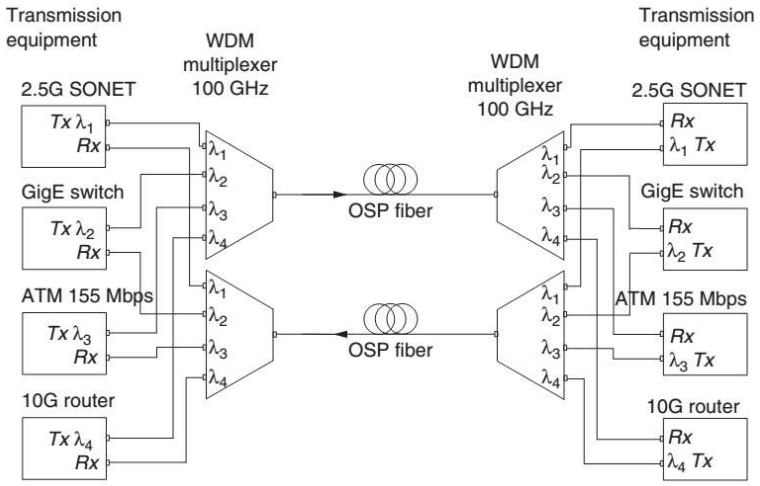
ϕ_j คือมุมสะท้อนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (rad)

Φ_j คือมุมส่งผ่านในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเทียบกับแนวตั้งฉาก (surface normal) (rad)

คุณสมบัติของแผ่นเลี้ยวเบนคลื่นแสงแบบ DF (diffraction grating filter) คือ

1. แผ่นเลี้ยวเบนคลื่นแสงแบบ DF มีความไวต่ออุณหภูมิต่ำ

2. แผ่นเลี้ยวเบนคลื่นแสงแบบ DF สามารถทำงานได้สองทิศทาง (bidirectional)



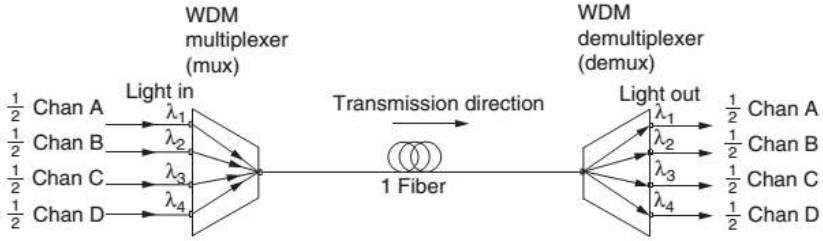
ภาพที่ 9.9 การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM ขนาด 4 ช่องสัญญาณ
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 177)

3. แผ่นเลี้ยวเบนคลื่นแสงแบบ DF มีค่าลดทอนกำลังงานแสง (insertion loss) ประมาณ 4 dB ที่ 56 ช่องสัญญาณ และค่าความกว้างแถบความถี่ 100 GHz และค่าลดทอนกำลังงานแสงจะสัมพันธ์กับจำนวนช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้น

4. แผ่นเลี้ยวเบนคลื่นแสงแบบ DF จะเป็นแบบแพสซิฟทั้งหมด (complete passive) สามารถใช้ได้ทั้งโครงข่ายแบบ WDM และ OADM ช่วงความถี่ระหว่างช่องสัญญาณประมาณ 50 GHz

ส่วนเชื่อมต่อการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM ในโครงข่ายเส้นใยนำแสงจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือส่วนภายในอาคาร (transmission equipment) และส่วนภายนอกอาคาร (outside plant) ดังแสดงในภาพที่ 9.9 ระบบที่สามารถเชื่อมต่อกับการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM เช่น 2.5G SONET, GigE switch, ATM (asynchronous transfer mode), 10G router มาตรฐานความเร็วของอุปกรณ์ในระบบเช่น เราท์เตอร์ (router), สวิตช์ (switch) และ SONET gear ที่เชื่อมต่อกับตัวมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM ระดับ 3 Gbps จนถึง 100 Gbps (SFP, XFP, GBICs and Xenpaks) และค่าความกว้างแถบความถี่ของช่องสัญญาณจะอยู่ที่ 50 GHz, 100 GHz, 200 GHz ที่ค่าความยาวคลื่นศูนย์กลาง 1,310 nm และ 1,550 nm ในกรณีที่ภาคส่งและภาครับมีตัวมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์อยู่ในหน่วยเดียวกันเรียกว่าทรานส์ซิฟเวอร์ (transceiver) ระยะความยาวเส้นใยนำแสงส่วนภายนอกอาคาร (outside plant) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะคือ

1. ระยะทางโครงข่ายเส้นใยนำแสง 600 – 1000 km เรียกว่า long-haul
2. ระยะทางโครงข่ายเส้นใยนำแสง 1000 – 2000 km เรียกว่า ELH (extended long-haul)
3. ระยะทางโครงข่ายเส้นใยนำแสง 2000 - 4000 km เรียกว่า UHL (ultra-long-haul)



ภาพที่ 9.10 ระบบ unidirectional 4λ WDM
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 180)

โดยทั่วไประบบการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM ถ้ามีการสูญเสีย 0.22 dB/km และค่าการสูญเสียจากการแทรกสอด 6 dB และมีค่าเผื่อกำลังงาน 28 dB ระยะทางที่ระบบสามารถทำงานได้น้อยกว่า 100 km

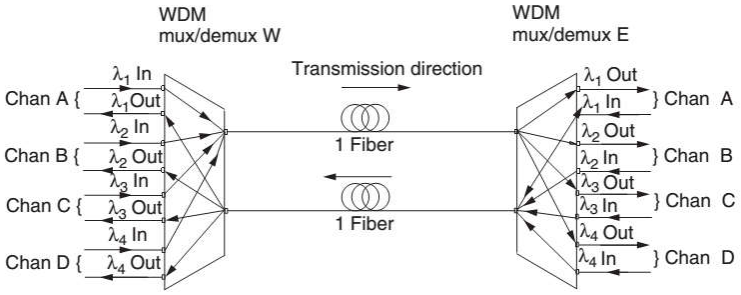
ชนิดของระบบการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM จะมี 2 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ ระบบ Simple WDM และระบบ Basic WDM สำหรับระบบ Simple WDM จะมีจำนวนช่องสัญญาณ 8 ช่องสัญญาณและเป็นแบบแพสซิฟใช้ในโครงข่าย SDH, SONET และ GigE ส่วนระบบ Basic WDM รูปแบบการส่งสัญญาณข้อมูล สามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบใหญ่ ๆ ดังแสดงในภาพที่ 9.10 ถึง 9.13 คือ

1. แบบ unidirectional 4λ WDM
2. แบบ unidirectional 4-channel mux/demux WDM
3. แบบ Bidirectional 4λ WDM
4. แบบ Universal 4λ WDM

ระบบแบบสองทิศทางโดยใช้เส้นใยนำแสงเส้นเดียวจะต้องใช้คลื่นพาห์แสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน หรือในทางตรงกันข้ามถ้าใช้ความยาวคลื่นแสงค่าเดียวจะต้องใช้เส้นใยนำแสงสองเส้นหรือมากกว่า การเปลี่ยนค่าระหว่างความยาวคลื่นแสงกับความถี่แสงในการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM ในกรณีแรกการเปลี่ยนความถี่แสงในหน่วย (GHz) ไปเป็นความยาวคลื่นแสงในหน่วย (nm) จะสัมพันธ์กับสมการ

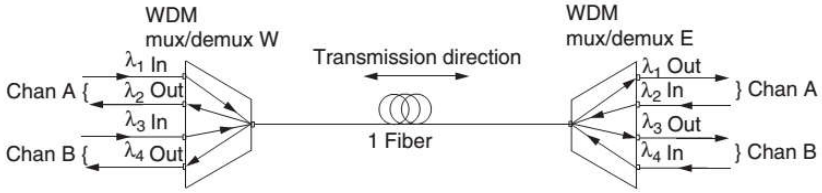
$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} \tag{9.5}$$

$$\Delta\lambda = c \times \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} \right) \tag{9.6}$$



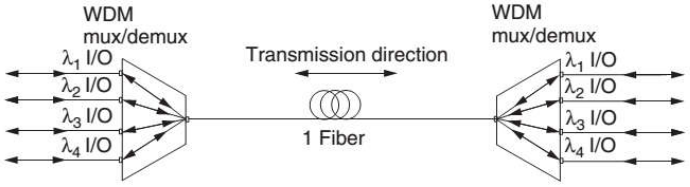
ภาพที่ 9.11 ระบบ unidirectional 4-channel mux/demux WDM

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 180)



ภาพที่ 9.12 ระบบ Bidirectional 4λ WDM

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 180)



ภาพที่ 9.13 ระบบ Universal 4λ WDM

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 180)

$$\Delta\lambda = c \times \left(\frac{1}{f_c - \delta f} - \frac{1}{f_c + \delta f} \right) \tag{9.7}$$

$$\Delta\lambda = 2c \times \left(\frac{1}{2f_c - \Delta f} - \frac{1}{2f_c + \Delta f} \right) \tag{9.8}$$

ในกรณีที่สองการเปลี่ยนความยาวคลื่นแสงในหน่วย (nm) ไปเป็นความถี่แสงในหน่วย (GHz) จะสัมพันธ์กับสมการ

$$\Delta f = c \times \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \tag{9.9}$$

$$\Delta f = 2c \times \left(\frac{1}{2\lambda_c - \Delta\lambda} - \frac{1}{2\lambda_c + \Delta\lambda} \right) \tag{9.10}$$

และถ้าใช้ค่าประมาณ

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \Delta\lambda \approx \frac{\lambda_c^2 (f_1 - f_2)}{c} \tag{9.11}$$

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda \approx \frac{\lambda_c^2}{c} \Delta f \tag{9.12}$$

$$\delta\lambda = \frac{\Delta\lambda}{2} \tag{9.13}$$

$$\delta f = \frac{\Delta f}{2} \tag{9.14}$$

โดยที่ c คือค่าความเร็วคลื่นแสงในสุญญากาศ (m/s)

λ_c คือค่าความยาวคลื่นแสงศูนย์กลาง (Center wavelength) (nm)

$\delta\lambda$ คือครึ่งความกว้างสเปคตรัม (half optical signal spectral width) (nm)

$\Delta\lambda$ คือความกว้างความยาวคลื่นแสง (optical signal spectral width) (nm)

f_c คือค่าความถี่คลื่นแสงศูนย์กลาง (Center frequency) (GHz)

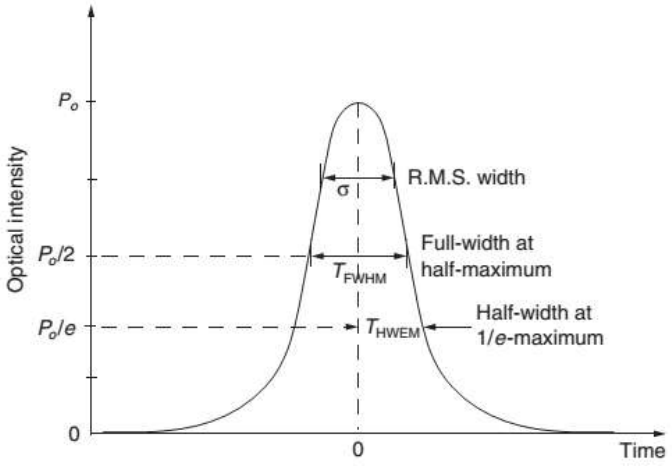
δf คือครึ่งความกว้างสเปคตรัม (half optical signal spectral width) (GHz)

Δf คือความกว้างความถี่คลื่นแสง (optical signal spectral width) (GHz)

พัลส์แสงในทางปฏิบัติจะเป็นแบบเกาส์เซียนดังแสดงในภาพที่ 9.14 จากภาพการแจกแจงพัลส์แสงแบบเกาส์เซียนสามารถแสดงดังสมการ

$$E(t) = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{T_{HWEM}} \right)^2 \right) \tag{9.15}$$

$$P(t) = P_0 \exp\left(-\left(\frac{t}{T_{HWEM}} \right)^2 \right) \tag{9.16}$$



ภาพที่ 9.14 พัลส์แสงแบบเกาส์เซียน
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 372)

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} T_{HWEM} \tag{9.17}$$

$$\sigma = \frac{1}{2\sqrt{2\ln 2}} T_{FWHM} \tag{9.18}$$

$$T_{FWHM} = \left(2\sqrt{\ln 2}\right) T_{HWEM} \tag{9.19}$$

โดยที่ $E(t)$ คือค่าแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าของพัลส์แสง (V/m)

P_0 คือค่ากำลังงานสูงสุดของพัลส์แสง (W)

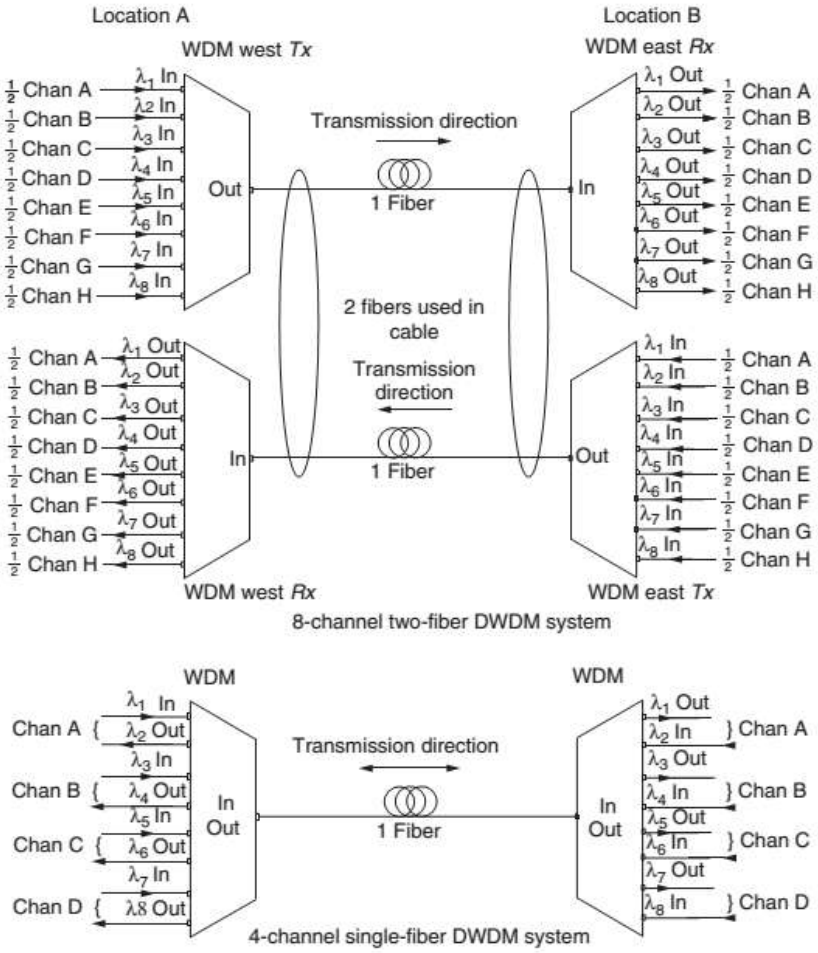
t คือค่าเวลา (s)

σ คือค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความกว้างกำลังงานพัลส์แสง (s)

T_{HWEM} คือค่าเวลาครึ่งความกว้างพัลส์กำลังงานแสงที่จุด 1/e (s)

T_{FWHM} คือค่าเวลาความกว้างพัลส์กำลังงานแสงที่จุด -3 dB (s)

ปัจจุบันเทคโนโลยี WDM ถูกพัฒนาออกเป็น 3 แบบ คือ แบบ DWDM, CWDM และ Cross-Band WDM การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ DWDM (dense wavelength division multiplexing) จะมีช่วงความถี่คลื่น (channel spacing) น้อยกว่า 1000 GHz หรือช่วงความยาวคลื่นน้อยกว่า 8 nm โดยทั่วไปช่วงความถี่คลื่นน้อยกว่า 200 GHz หรือช่วงความยาวคลื่นน้อยกว่า 1.6 nm ความถี่ศูนย์กลางจะอยู่ที่ 200, 100, 50, 25 และ 12.5 GHz รูปแบบการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ DWDM ขนาด 8 ช่องสัญญาณแสดงดังภาพที่ 9.15



ภาพที่ 9.15 การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ DWDM
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 173)

การคำนวณช่วงความถี่แต่ละช่องสัญญาณ โดยมี f_c เป็นความถี่ศูนย์กลาง (center frequency) และ n เป็นจำนวนเต็มบวก และจำนวนเต็มลบ รวมถึงค่าศูนย์ด้วย การคำนวณค่าความถี่คลื่นแสงแต่ละช่องสัญญาณในหน่วย (THz) โดยมีค่าความถี่ศูนย์กลางอยู่ที่ 200, 100, 50, 25 และ 12.5 GHz ตามมาตรฐาน ITU-T จะเป็นดังสมการ

ค่าความถี่ศูนย์กลาง 200 GHz $f_c = 193.10 + n \times 0.20$ (9.20)

ค่าความถี่ศูนย์กลาง 100 GHz $f_c = 193.10 + n \times 0.10$ (9.21)

ค่าความถี่ศูนย์กลาง 50 GHz $f_c = 193.10 + n \times 0.05$ (9.22)

ค่าความถี่ศูนย์กลาง 25 GHz $f_c = 193.10 + n \times 0.025$ (9.23)

ค่าความถี่ศูนย์กลาง 12.5 GHz $f_c = 193.10 + n \times 0.0125$ (9.24)

และ $$\lambda_c = \frac{c}{f_c}$$ (9.25)

โดยที่ f_c คือความถี่ศูนย์กลางตามมาตรฐาน ITU-T (THz)

λ_c คือความยาวคลื่นศูนย์กลาง (nm)

n คือเป็นค่าจำนวนเต็มบวก ลบ และศูนย์ เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เลื่อนแถบความถี่

c คือความเร็วคลื่นแสงในสุญญากาศ (m/s)

ค่าความจุของช่องสัญญาณสำหรับการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ DWDM โดยใช้ทฤษฎีของแชนนอน (Shannon theorem) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$R_{\max} = B_0 \log_2(OSNR + 1)$$ (9.26)

โดยที่ $R_{\max}$ คือความเร็วข้อมูลสูงสุดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณได้ (Gbps)

B_0 คือค่าความกว้างแถบความถี่ของช่องสัญญาณ (optical channel pass band) (GHz)

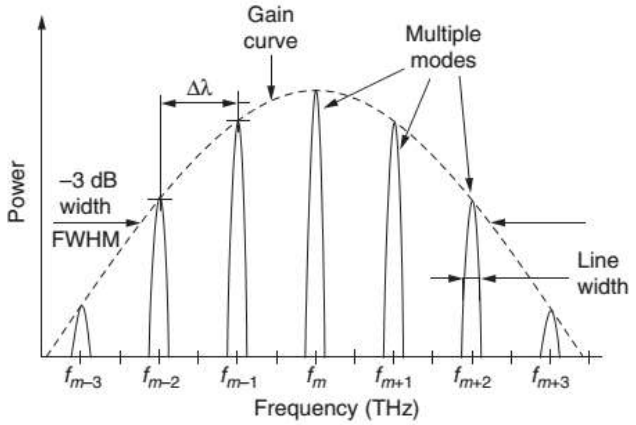
$OSNR$ คืออัตราส่วนกำลังงานแสงต่อกำลังงานสัญญาณรบกวน (channel optical signal to noise ratio)

ในระบบการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ตัวกำเนิดแสงที่นิยมจะเป็นเลเซอร์มากกว่าแอลอีดี แสงเลเซอร์ และพัลส์แสงเลเซอร์ส่วนใหญ่เป็นแบบ MLM (multiple-longitudinal mode) ดังแสดงในภาพที่ 9.16 ค่าความยาวคลื่น ($\Delta\lambda$) และความถี่แสงเลเซอร์ที่ถูกผลิตขึ้น (f_m) จะสอดคล้องกับสมการ

$$f_m = \frac{mc}{2nL_{FP}}$$ (9.27)

$$\Delta f = f_m - f_{m-1} = \frac{c}{2nL_{FP}}$$ (9.28)

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL_{FP}}$$ (9.29)



ภาพที่ 9.16 ลักษณะพัลส์แสงเลเซอร์ Fabry-Perot
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 173)

โดยที่ Δf คือช่วงความถี่ระหว่างพัลส์แสง (spacing between modes) (Hz)

f_m คือช่วงความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) (Hz)

$\Delta\lambda$ คือช่วงความยาวคลื่น (spacing between modes) (m)

λ คือความยาวคลื่น (mode wavelength) (m)

L_{FP} คือความยาวช่องคาวิตีของเลเซอร์แบบ Fabry-Perot (FB cavity length) (m)

n คือค่าดรรชนีการหักเหของวัสดุที่ใช้ทำช่องคาวิตีของเลเซอร์แบบ Fabry-Perot

m คือค่าจำนวนเต็มบวก โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ 1280

c คือความเร็วคลื่นแสงในสุญญากาศ (m/s)

จำนวนโหมดแสงเลเซอร์ที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความยาวช่องคาวิตีของเลเซอร์แบบ Fabry-Perot และค่าดรรชนีการหักเหของวัสดุที่ใช้ทำช่องคาวิตี ผลกระทบเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเลเซอร์แบบFabry-Perot และความเร็วคลื่นแสงที่ไม่เท่ากันของแต่ละโหมดคลื่น (different group velocities) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\delta_{mpn} = -5\log(1 - Q^2\sigma_{mpn}^2) \tag{9.30}$$

$$\sigma_{mpn} = \frac{k}{\sqrt{2}}[1 - \exp(-(\pi RL\sigma_\lambda CD)^2)] \tag{9.31}$$

โดยที่ δ_{mpn} คือค่าสัญญาณรบกวนหรือค่าการสูญเสียกำลังงงานแสง (noise penalty) (dB)

Q คือค่าแฟคเตอร์คิว (Q-factor) เป็นพารามิเตอ์ที่สัมพันธ์กับค่า BER (bit error rate)

σ_{mpn} คือค่ารากกำลังสองเฉลี่ยสัญญาณรบกวนที่ภาครับสาเหตุมาจากค่า MPN (mode partition noise) (W)

k คือค่าแฟคเตอร์ MPN (mode partition noise) อยู่ระหว่าง 0 ถึง หนึ่ง โดยทั่วไปกำหนดเท่ากับ 0.8

R คือค่าความเร็วในการส่งข้อมูล (Tbps)

σ_{λ} คือค่ารากกำลังสองเฉลี่ยความกว้างพัลส์กำลังงานแสงที่จุด -3 dB (RMS spectral line width) (nm) โดยปกติ $\sigma_{\lambda} = 0.425\lambda_{FWHM}$

CD คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายออกของพัลส์แสงแบบโครมาติก (chromatic dispersion coefficient) (ps/nm.km)

L คือค่าความยาวเส้นใยนำแสง (km)

พารามิเตอร์ของพัลส์เลเซอร์ที่สำคัญในการนำไปใช้ในการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณคือ

1. กำลังงานแสงต่ำสุด (minimum output power) เป็นค่าเฉลี่ยกำลังงานแสงต่ำสุดที่วัดได้ที่ปลายสาย (dBm)

2. กำลังงานแสงสูงสุด (maximum output power) เป็นค่าเฉลี่ยกำลังงานแสงสูงสุดที่วัดได้ที่ปลายสาย (dBm)

3. ความกว้างแถบสเปคตรัม (spectral width) เป็นความกว้างสเปคตรัมของพัลส์แสงอาจจะผ่านการกล้ำสัญญาณหรือไม่ผ่านการกล้ำสัญญาณกับสัญญาณข้อมูล คิดที่จุด -3 dB จากค่าสูงสุด (peak optical power) (FWHM)

4. ความกว้างเส้นสเปคตรัม (line spectrum) เป็นความกว้างสเปคตรัมที่พิจารณาเฉพาะแถบสเปคตรัมช่วงเดียว (a single longitudinal mode of a laser) (GHz) หรือ (MHz)

5. ความยาวคลื่นแสง (wavelength) เป็นความยาวคลื่นศูนย์กลาง (center wavelength)

6. ช่วงห่างช่องสัญญาณ (channel spacing) เป็นช่วงห่างระหว่างความยาวคลื่นศูนย์กลางกับช่องสัญญาณข้างเคียง (adjacent channels) (nm)

7. อัตราส่วน SMSR (side-mode suppression ratio) เป็นอัตราส่วนกำลังงานแสงระหว่างโหลบคลื่นหลัก (main mode) กับโหลบคลื่นข้างเคียง (side mode)

8. อัตราส่วนเอ็กซ์ทรินชัน (extinction ratio) เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังงานพัลส์แสงบิตหนึ่ง (one bit) กับกำลังงานพัลส์แสงศูนย์ (zero bit)

9. ข้อกำหนดการขยายออกพัลส์ (dispersion penalty) เป็นข้อกำหนดการขยายออกพัลส์แสงที่แปรผันตรงกับระยะทางหรือความยาวเส้นใยนำแสง เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดค่าความเร็วสูงสุดในการส่งข้อมูล (BER) และสัมพันธ์กับค่า SNR (ps/nm)

10. อัตราการทนกำลังงานแสงเลเซอร์ย้อนกลับ (tolerable back reflection) เป็นปรากฏการณ์ที่พัลส์เลเซอร์เคลื่อนที่ผ่านเส้นใยนำแสงที่ไม่สม่ำเสมอ จะมีกำลังงานแสงบางส่วนสะท้อนกลับมายังตัวกำเนิด ซึ่งถ้าค่ากำลังงานแสงเลเซอร์ย้อนกลับมีค่ามาก อาจทำอันตรายต่อตัวกำเนิดได้

11. ค่าการเลื่อนความยาวคลื่น (wavelength drift) เป็นการเลื่อนค่าความยาวคลื่นจากค่าความยาวคลื่นศูนย์กลางเนื่องจากอุณหภูมิ โดยทั่วไปประมาณ 0.08 nm/°C

12. ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ RIN และ RIN OMA (relative intensity noise) เป็นค่าความเข้มกำลังงานสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวกำเนิดเลเซอร์ จากการเคลื่อนที่ของโฟตอนแบบสุ่มในกระบวนการปล่อยแสงแบบธรรมชาติ (spontaneous emissions) ค่า RIN จะมีหน่วยเป็น 1/Hz ดังสมการ

$$RIN = \frac{P_n^2}{P_L^2 \times B_m} \tag{9.32}$$

$$RIN_{dB} = 10\log(RIN) \tag{9.33}$$

โดยที่ RIN คือค่าสัญญาณรบกวนแบบ relative ขณะยังไม่กล้ำสัญญาณ (1/Hz)

RIN_{dB} คือค่าสัญญาณรบกวนแบบ relative ในหน่วย dB ขณะยังไม่กล้ำสัญญาณ (dB/Hz)

P_n คือค่ากำลังงานสัญญาณรบกวนเฉลี่ยที่ตัวรับขณะยังไม่กล้ำสัญญาณ (W)

P_L คือค่ากำลังงานที่ตัวรับขณะยังไม่กล้ำสัญญาณ (W)

B_m คือค่าความกว้างแถบความถี่ที่เทียบเท่าสัญญาณรบกวน (noise equivalent bandwidth) (Hz)

และถ้าพัลส์แสงเลเซอร์ถูกกล้ำกับสัญญาณแบสแบนด์ ค่าความเข้มกำลังงานสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวกำเนิดเลเซอร์

$$RINOMA = \frac{P_{nm}^2}{P_s^2 + B_m} \tag{9.34}$$

$$P_{nm} = \frac{(P_{n1} + P_{n0})}{2} \tag{9.35}$$

$$RINOMA_{dB} = 10\log(RINOMA) \tag{9.36}$$

โดยที่ P_{nm} คือค่ากำลังงานสัญญาณรบกวนเฉลี่ยที่พัลส์เลเซอร์กล้ำกับสัญญาณแบสแบนด์

P_{n1} คือค่ากำลังงานเฉลี่ยสัญญาณรบกวนขณะส่งพัลส์หนึ่ง (“1”)

P_{n0} คือค่ากำลังงานเฉลี่ยสัญญาณรบกวนขณะส่งพัลส์ศูนย์ (“0”)

P_s คือค่ากำลังงานเฉลี่ยสัญญาณไฟฟ้าเบสแบนด์ที่ภาครับ (โฟโตไดโอด) (w)

B_m คือค่าความกว้างแถบความถี่สมมูลสัญญาณรบกวน (Hz)

$RINOMA$ คือค่าสัญญาณรบกวนแบบ Relative ที่ผ่านการกล้ำสัญญาณแล้ว (1/Hz)

$RINOMA_{dB}$ คือค่าสัญญาณรบกวนแบบ Relative ที่ผ่านการกล้ำสัญญาณแล้วในหน่วย dB

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนแบบ Relative ($RINOMA$) กับอัตราส่วนกำลังงานแสงต่อกำลังงานสัญญาณรบกวน OSNR (optical signal to noise ratio) จะเป็นดังสมการ

$$OSNR = \frac{\alpha_{ss}}{RINOMA \times B_r} \tag{9.37}$$

$$OSNR_{dB} = 10\log(\alpha_{ss}) - 10\log(B_r) - RINOMA_{dB} \tag{9.38}$$

โดยที่ $OSNR$ คืออัตราส่วนกำลังงานแสงต่อกำลังงานสัญญาณรบกวนของพัลส์เลเซอร์

$OSNR_{dB}$ คืออัตราส่วนกำลังงานแสงต่อกำลังงานสัญญาณรบกวนของพัลส์เลเซอร์ในหน่วย dB

B_r คือความกว้างแถบความถี่สมมูล (resolution bandwidth) (Hz)

α_{ss} คือค่าแฟคเตอร์แสดงค่าสหสัมพันธ์ขั้วคลื่น (polarization correlation) ระหว่างคลื่นแสงเลเซอร์ที่ปล่อยแบบธรรมชาติ (spontaneous emissions) กับคลื่นแสงเลเซอร์ที่ปล่อยแบบบังคับ (stimulated emissions) ถ้าค่า $\alpha_{ss} = 1$ แสดงว่าไม่มีค่าสหสัมพันธ์ขั้วคลื่นและถ้าค่า $\alpha_{ss} = 4$ แสดงว่ามีค่าสหสัมพันธ์ขั้วคลื่นแบบตรงกัน (same orientation) ค่า α_{ss} จะค่อนข้างที่จะคำนวณยาก โดยทั่วไปกำหนดเท่ากับ 1

ตัวอย่างจากสมการ (9.25) ถ้าค่าความกว้างแถบความถี่ของช่องสัญญาณ (B_0) เท่ากับ 62 GHz และอัตราส่วนกำลังงานแสงต่อกำลังงานสัญญาณรบกวน ($OSNR$) เท่ากับ 126 (21 dB) จะได้ค่าความเร็วข้อมูลสูงสุดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณได้คือ 433 Gbps แต่ถ้าค่าความกว้างแถบความถี่ของช่องสัญญาณ (B_0) ลดลงค่าความเร็วข้อมูลสูงสุดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณได้ก็จะลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งค่าความเร็วข้อมูลสูงสุดจากสมการ (9.25) เป็นเพียงค่าในทางทฤษฎีเท่านั้น ในทางปฏิบัติจะต่ำกว่านี้ นอกจากค่าความเร็วข้อมูลสูงสุดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณได้ $R_{\max}$ สำหรับบอกความสามารถของระบบ ค่าประสิทธิภาพสเปคตรัมกำลังงานแสงต่อบิตในหน่วย bps/Hz ก็สามารถใช้บอกสมรรถนะของระบบได้เช่นกัน ดังสมการ

$$S = \frac{R}{B_s} \tag{9.39}$$

โดยที่ S คือประสิทธิภาพเชิงปริมาณข้อมูลข่าวสาร (spectral efficiency) (bps/Hz)

R คือความเร็วข้อมูลสูงสุดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณได้ (Gbps)

B_s คือความกว้างแถบความถี่ช่องสัญญาณ DWDM ตามมาตรฐาน ITU-T (GHz)

ค่าประสิทธิภาพเชิงปริมาณข้อมูลข่าวสาร (Spectral efficiency) (bps/Hz) ของการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ DWDM ที่ความเร็วข้อมูลสูงสุดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณ (R) ค่าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 ประสิทธิภาพเชิงปริมาณข้อมูลข่าวสารของ DWDM ตามมาตรฐาน ITU-T

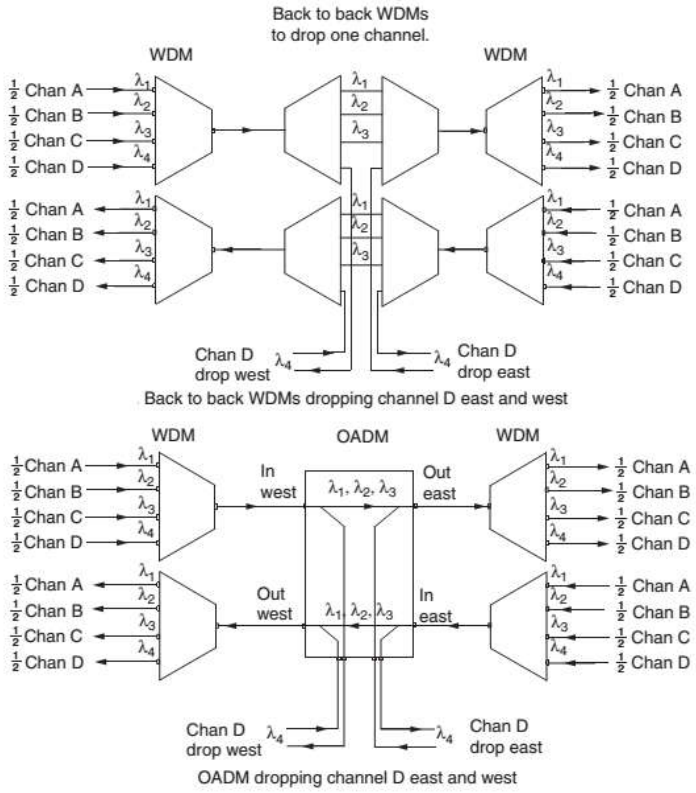
ความกว้างแถบความถี่ช่องสัญญาณ DWDM (GHz)	ประสิทธิภาพเชิงปริมาณข้อมูลข่าวสาร (bps/Hz)			
	ความเร็ว 2.5 Gbps	ความเร็ว 10 Gbps	ความเร็ว 40 Gbps	ความเร็ว 100 Gbps
2500 GHz	0.001	0.004	0.16	0.04
200 GHz	0.013	0.05	0.2	0.5
100 GHz	0.025	0.1	0.4	1
50 GHz	0.05	0.2	0.8	2
25 GHz	0.1	0.4	1.6	4
12.5 GHz	0.2	0.8	3.2	8

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 186)

การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ DWDM ที่มีพอร์ตเชื่อมต่อระหว่างทางหรือระหว่างภาคส่งกับภาครับจะกำหนดให้เป็นการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OADM (optical add/ drop module) ดังแสดงในภาพที่ 9.17 การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM ที่สามารถลดขนาดช่องความถี่แต่ละช่องสัญญาณประมาณ 20 nm หรือ 2500 GHz เรียกว่าการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ CWDM (coarse wavelength division multiplexing) การแบ่งแถบความถี่และความยาวคลื่นของ CWDM แสดงดังภาพที่ 9.18 ลักษณะที่สำคัญการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ CWDM คือ

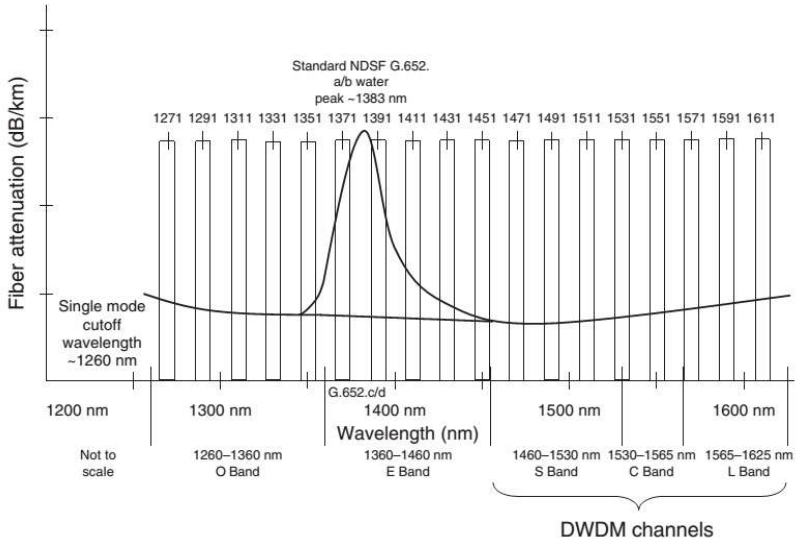
1. สามารถออกแบบให้ระบบ CWDM มีราคาถูกกว่าระบบ DWDM เนื่องจากตัวกำเนิดแสง (เลเซอร์) ของระบบ CWDM ไม่ต้องการระบบรักษาอุณหภูมิ (cooling control circuitry)

2. ระบบแบบ CWDM ใช้งานในย่านความยาวคลื่น 1,271 nm ถึง 1,451 nm ซึ่งความยาวคลื่นย่านนี้จะเกิดการเลื่อนของพัลส์แสงน้อย (laser drift) เมื่อเทียบกับย่านความยาวคลื่น 1,451 nm ถึง 1,611 nm ของระบบ DWDM



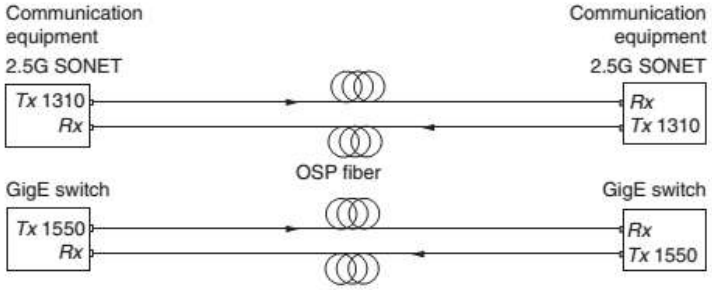
ภาพที่ 9.17 การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OADM

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 173)



ภาพที่ 9.18 แถบความถี่และความยาวคลื่นของ CWDM

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 191)



ภาพที่ 9.19 การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ในโครงข่าย 2.5G SONET และ GigE switch
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 199)

3. ระบบแบบ CWDM สามารถกล้ำสัญญาณเข้ากับ DFB (distributed feedback laser) ได้โดยตรงโดยใช้เทคโนโลยี VCSEL (vertical cavity surface emitting laser)
ช่องสัญญาณ การหาค่าสูญเสียรวมทั้งระบบสำหรับการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ CWDM จะเป็นดังสมการ

$$\Gamma_T = 2 \times IL_{CWDM} + \Gamma_{fiber} \tag{9.40}$$

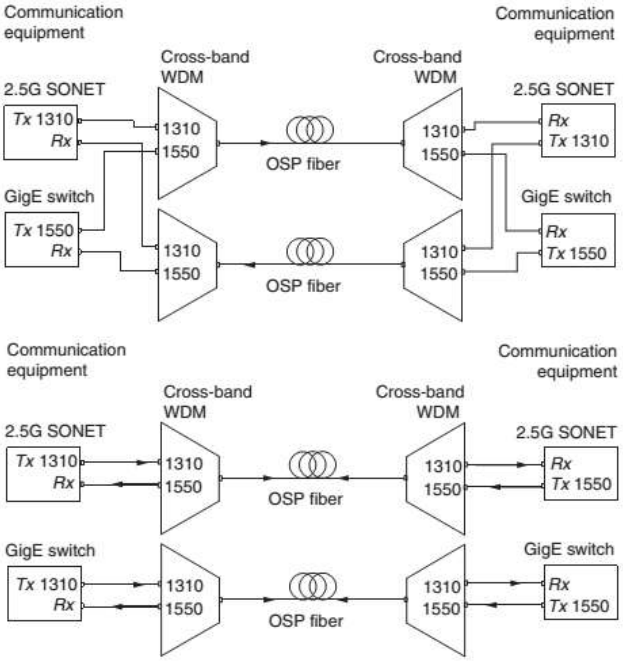
โดยที่ Γ_T คือค่าการสูญเสียกำลังงานแสงรวม (dB)

Γ_{fiber} คือค่าการสูญเสียกำลังงานแสงในเส้นใยนำแสง (dB)

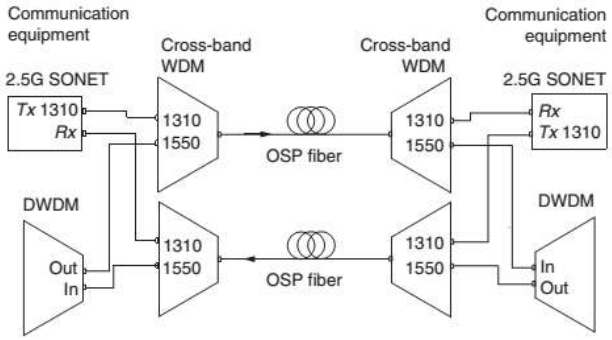
IL_{CWDM} คือค่าสูญเสียกำลังงานแสงจากการแทรกสอด (insertion loss) ภายใน CWDM (dB)

การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ที่ใช้ความยาวคลื่นแสงภาคส่งกับภาครับที่แตกต่างกันหรือคนละย่านกัน เรียกการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบนี้ว่า cross-Band WDM ซึ่งย่านความยาวคลื่นแสงที่ใช้งานปัจจุบันคือ

1. ความยาวคลื่นย่าน 850 ช่วงความยาวคลื่น 800 – 910 (nm)
2. ความยาวคลื่นย่าน O ช่วงความยาวคลื่น 1,260 – 1,360 (nm)
3. ความยาวคลื่นย่าน E ช่วงความยาวคลื่น 1,360 – 1,460 (nm)
4. ความยาวคลื่นย่าน S ช่วงความยาวคลื่น 1,460 – 1,530 (nm)
5. ความยาวคลื่นย่าน C ช่วงความยาวคลื่น 1,530 – 1,565 (nm)
6. ความยาวคลื่นย่าน L ช่วงความยาวคลื่น 1,565 – 1,625 (nm)
7. ความยาวคลื่นย่าน U ช่วงความยาวคลื่น 1,625 – 1,675 (nm)

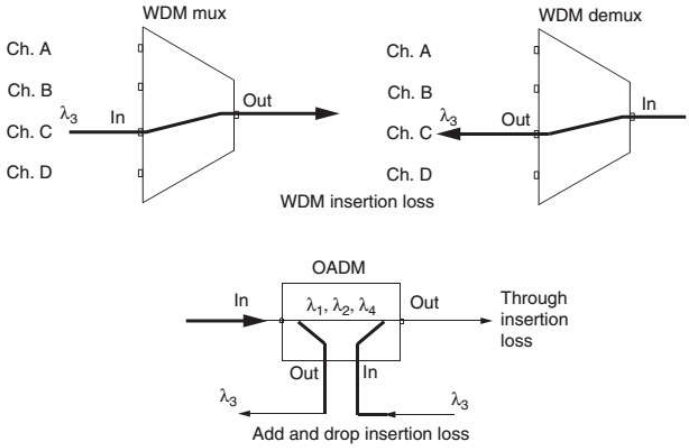


ภาพที่ 9.20 การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ cross-Band WDM
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 199)



ภาพที่ 9.21 ระบบ cross-Band WDM ระหว่าง 2.5G SONET กับ DWDM
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 200)

ตัวอย่างการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ดังแสดงในภาพที่ 9.19 เป็นการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ในโครงข่าย 2.5G SONET และ GigE switch โดยหลักการพื้นฐานสองระบบนี้ถ้าทำงานแบบแยกอิสระจากกัน จะใช้เส้นใยนำแสงทั้งหมด 4 เส้น แต่ถ้าใช้หลักการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ cross-Band WDM จะลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงเหลือ 2 เส้น ดังแสดงในภาพที่ 9.20 และ 9.21



ภาพที่ 9.22 การสูญเสียแบบแทรกสอด (insertion loss)
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 201)

การสูญเสียกำลังงานแสงในการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ WDM, DWDM, CWDM และ cross-Band WDM จะมีค่าสูญเสียกำลังงานแสงหลัก ๆ ดังนี้

1. การสูญเสียกำลังงานแสงแบบแทรกสอด (insertion loss) ถูกวัดในหน่วย dB เป็นการสูญเสียกำลังงานแสงในกรณีที่ใช้พอร์ตร่วมกันและใช้ค่าความยาวคลื่นเดียวกันระหว่างด้านส่งกับด้านรับ ดังแสดงในภาพที่ 9.22 พารามิเตอร์ที่สำคัญของลักษณะการแยกกำลังงานแสงใน WDM (isolation) ดังแสดงในภาพที่ 9.23

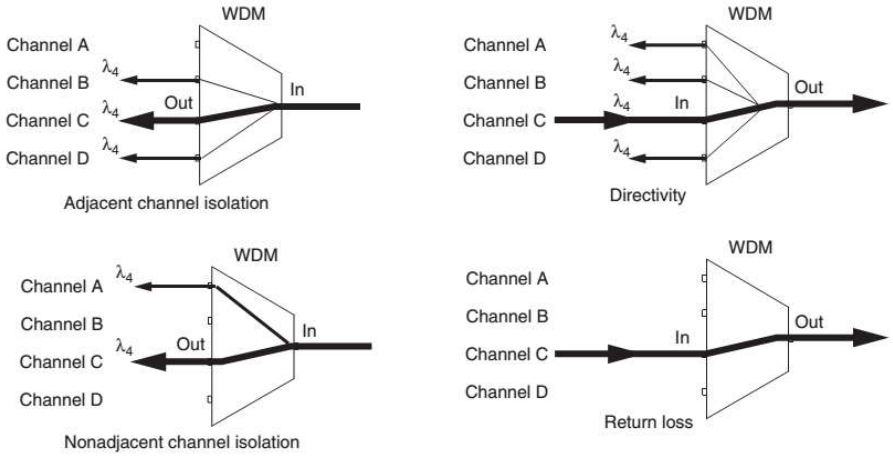
2. channel (passband) ripple or Flatnees เป็นค่าความแตกต่างจากยอดถึงยอด (peak-to-peak) ของ insertion loss ช่วงแถบผ่านความยาวคลื่น (channel passband) โดยทั่วไปจะน้อยกว่า 0.5 dB

3. channel loss uniformity เป็นการสูญเสียแบบ insertion loss สูงสุดรวมทุกช่องสัญญาณในหน่วย dB

4. channel wavelength เป็นค่าความยาวคลื่นศูนย์กลางในแต่ละช่องสัญญาณ

5. channel spacing เป็นช่วงห่างความถี่หรือความยาวคลื่นจากความถี่ศูนย์กลางถึงความถี่ศูนย์กลางช่องสัญญาณข้างเคียง ตามมาตรฐาน ITU-T ในกรณีของ DWDM จะเท่ากับ 200, 100, 50 และ 25 GHz ส่วนกรณีของ CWDM จะเท่ากับ 20 nm

6. channel passband เป็นช่วงความถี่ผ่านที่วัดจากความถี่ศูนย์กลางและลดลงด้านข้าง 0.5 หรือ 3 dB ทั้งสองด้านของความถี่ศูนย์กลาง



ภาพที่ 9.23 การแยกกำลังงานแสงใน WDM (isolation)
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 203)

7. adjacent channel isolation ค่ากำลังงานแสงรั่วไหลระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียงในหน่วย dB

8. nonadjacent channel isolation ค่ากำลังงานแสงรั่วไหล (power leakage) แบบข้ามช่องสัญญาณในหน่วย dB

9. directivity (multiplexer) เป็นค่ากำลังงานแสงสูงสุดที่สะท้อนกลับไปยังช่องสัญญาณอื่น ๆ ในหน่วย dB

10. return loss เป็นค่ากำลังงานแสงสูงสุดที่สะท้อนกลับไปยังช่องสัญญาณตัวเอง ในหน่วย dB

11. chromatic dispersion เป็นอัตราการขยายออกของพัลส์แสงแบบโครมาติก ในหน่วย ps/nm

12. polarization mode dispersion เป็นอัตราการขยายออกของพัลส์แสงเชิงโหมดของขั้วคลื่นในหน่วย ps โดยทั่วไปจะเท่ากับ 0.1 ps

13. polarization dependent loss

ในการออกแบบโครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบ WDM, DWDM นอกจากการสูญเสียกำลังงานแสงแบบแทรกสอด, การสูญเสียแบบ channel isolation และการสูญเสียแบบ return loss แล้ว ยังมีสาเหตุอื่น ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการสูญเสียกำลังงานแสงและความผิดเพี้ยนของพัลส์แสง เช่น

1. คุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear fiber)

2. การผสมคลื่นแบบ FWM (four-wave mixing)

3. การกล้ำสัญญาณเชิงเฟสภายในตัวเองและการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสแบบไขว้ข้าม (self-phase modulation and cross-phase modulation)

4. การแตกกระเจิงแบบรามาน (SRS) และบริยูแอง (SBS) (stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering)

5. ปรากฏการความไม่เป็นเชิงเส้นแบบ intra-channel nonlinear effects

โดยทั่วไปจะสมมุติฐานให้เส้นใยนำแสงมีคุณสมบัติเชิงเส้น (linear fiber) เพื่อให้ง่ายในการออกแบบระบบ แต่ในทางปฏิบัติเส้นใยนำแสงที่ระยะทางไกล ๆ และค่ากำลังงานแสงที่ส่งมากกว่า 3 dB อาจจะสร้างความไม่เป็นเชิงเส้นของกำลังงานแสงที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงได้ (interaction causes) ความแตกต่างกำลังงานที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงแบบเชิงเส้นกับแบบไม่เป็นเชิงเส้น (linear and nonlinear) ค่าความเข้มกำลังงานคลื่นแสงต่อพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของเส้นใยนำแสงดังสมการ (9.41)

$$\Pi = \frac{P_{sig}}{A_{eff}} \tag{9.41}$$

โดยที่ Π คือค่าความเข้มกำลังงานแสงต่อพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง (dBm/μm^2)

P_{sig} คือกำลังงานแสงที่ส่งเข้าสู่เส้นใยนำแสง (dBm)

A_{eff} คือพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง (μm^2)

นอกจากพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง (μm^2) แล้ว ความยาวประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง (effective length) L_{eff} ก็ส่งผลให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นกำลังงานแสงเช่นเดียวกัน ผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นมีผลต่อกำลังงานแสงที่ส่งตลอดความยาวเส้นใยนำแสง สามารถแสดงดังสมการ (9.42) ถึงสมการ (9.47)

$$L_{eff} = \frac{\int_0^L P(z)dz}{P_{in}} \tag{9.42}$$

$$P(z) = P_{in}e^{-\alpha z} \tag{9.43}$$

$$L_{eff} = \frac{1-\exp(-\alpha L)}{\alpha} \tag{9.44}$$

$$L_{eff} = \frac{1-\exp(-\alpha L)}{\alpha}\frac{L_T}{L} \tag{9.45}$$

$$L_{eff} = \frac{1}{\alpha} \tag{9.46}$$

$$L_T = N \times L \tag{9.47}$$

โดยที่ L_{eff} คือความยาวประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง (effective length) (km)

L คือความยาวแต่ละช่วงของเส้นใยนำแสง (span length) (km)

L_T คือความยาวทั้งหมดของเส้นใยนำแสง (total link length) (km)

N คือจำนวนช่วงของเส้นใยนำแสงตามความยาวประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง

$P(z)$ คือกำลังงานแสงของเส้นใยนำแสงที่ระยะทาง z (mW)

P_{in} คือกำลังงานแสงที่ส่งเข้าสู่เส้นใยนำแสง (mW)

α คือสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยนำแสง (1/km) ถ้าอยู่ในหน่วย dB, $\alpha_{dB} = 4.343\alpha$ โดยทั่วไปเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวที่ความยาวคลื่น 1,550 nm จะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยนำแสงโดยประมาณ $\alpha = 0.048$ dB/km หรือ $\alpha_{dB} = 0.21$ dB/km จากสมการ (9.46) จะได้ความยาวประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง $L_{eff} = 1/0.048$ ประมาณ 21 km

ฉะนั้นผลของความไม่เป็นเชิงเส้นจะอยู่ในช่วงความยาว 21 km แรกเท่านั้นซึ่งเป็นช่วงที่ค่าความเข้มกำลังงานแสงสูงสุดเพราะใกล้กับตัวส่ง ความไม่เป็นเชิงของเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีคือ 1.) Kerr effect และ 2.) Raman scattering และ Brillouin scattering ในกรณีแรกผลกระทบจากปรากฏการเคอร์ (Kerr effect) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานแสง (signal power) กับค่าดรรชนีการหักเหของเส้นใยนำแสง (คอร์) ซึ่งค่าดรรชนีการหักเหของเส้นใยนำแสงจะเป็นผลรวมระหว่างค่าดรรชนีการหักเหขณะที่พัลส์แสงมีค่ากำลังงานสูงกับค่าดรรชนีการหักเหขณะที่พัลส์แสงมีค่ากำลังงานต่ำ ๆ เคลื่อนที่ผ่าน ความไม่เป็นเชิงเส้นจากปรากฏการเคอร์ (Kerr effect) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$n(\omega, E) = n_{eff}(\omega) + n_2 E^2 = n_{eff}(\omega) + n_2 \frac{P}{A_{eff}} \tag{9.48}$$

$$\beta_P = \beta_0 + \gamma P \tag{9.49}$$

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \tag{9.50}$$

โดยที่ $n(\omega, E)$ คือค่าดรรชนีการหักเหประสิทธิผลของคอร์ที่ระดับความเข้มกำลังงานแสงสูง (m^2/W)

E คือค่าความเข้มกำลังงานสนามไฟฟ้า (v/m)

$n_{eff}(\omega)$ คือค่าดรรชนีการหักเหประสิทธิผลของคอร์ที่ระดับความเข้มกำลังงานแสงต่ำ (m^2/W)

n_2 คือค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นหรือสัมประสิทธิ์ปรากฏการเคอร์ (m^2/W)

P คือค่ากำลังงานแสง (optical signal power) (W)

A_{eff} คือค่าพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของคอร์ (m^2)

β_P คือค่าพารามิเตอร์การแผ่กระจายคลื่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (rad/m)

β_0 คือค่าพารามิเตอร์การแผ่กระจายคลื่นแบบเชิงเส้น (rad/m)

γ คือค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น $(Wm)^{-1}$

λ คือค่าความยาวคลื่นศูนย์กลางของเลเซอร์ (m)

ในช่องสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ DWDM ที่มีค่าความเข้มกำลังงานแสงสูง ๆ ปรากฏการเคอร์ (Kerr effect) สามารถสร้างปรากฏการที่เรียกว่าการรวมกันแบบสี่คลื่น FWM (four-wave mixing) ของสัญญาณได้ (signal mixing) เช่นเดียวกับคลื่นย่านวิทยุ (radio frequency mixing) ค่าองค์ประกอบความถี่ศูนย์กลางที่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่ f_{IM} (inter-modulation products) ดังสมการ

$$f_{IM} = N_1 f_1 + N_2 f_2 + N_3 f_3 + \ldots \tag{9.51}$$

$$IM_{order} = \sum_{1}^{M} |N_i| \tag{9.52}$$

โดยที่ f_{IM} คือค่าองค์ประกอบความถี่ศูนย์กลางสัญญาณที่สร้างขึ้นมาใหม่ (THz)

f_i คือค่าความถี่ศูนย์กลางของช่องสัญญาณที่ i ของระบบ DWDM โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง M (generated signal component center frequency) (THz)

N_i คือค่าสัมประสิทธิ์จำนวนเต็ม ค่าบวก (+) ค่าลบ (-) และ 0 โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง M

M คือค่าจำนวนความถี่ศูนย์กลางของ DWDM ทั้งหมดที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสง

IM_{order} คือค่าลำดับการรวมกันของสัญญาณ

ในกรณีที่ N เท่ากับ $0, \pm 1$ และ ± 2 เกิดการรวมกันแบบสี่คลื่น FWM (four wave mixing) จากสมการ (9.51) ซึ่งค่าผลรวม N_i เท่ากับ 3

ค่าความถี่ที่ส่งในช่องสัญญาณ DWDM จะมี 3 ความถี่คือ f_1, f_2 และ f_3 ผลของปรากฏการเคอร์ (Kerr effect) สามารถสร้างปรากฏการ การรวมกันแบบสี่คลื่น FWM (four-wave mixing) ภายในช่องสัญญาณและสร้างความถี่ใหม่ 9 ความถี่ (generated signal components) ดังสมการ (9.53) ถึง (9.61)

$$f_{123} = f_1 + f_2 - f_3 = f_{213} = f_2 + f_1 - f_3 \tag{9.53}$$

$$f_{321} = f_3 + f_2 - f_1 = f_{231} = f_2 + f_3 - f_1 \tag{9.54}$$

$$f_{312} = f_3 + f_1 - f_2 = f_{132} = f_1 + f_3 - f_2 \quad (9.55)$$

$$f_{112} = f_1 + f_1 - f_2 = 2f_1 - f_2 \quad (9.56)$$

$$f_{113} = f_1 + f_1 - f_3 = 2f_1 - f_3 \quad (9.57)$$

$$f_{221} = f_2 + f_2 - f_1 = 2f_2 - f_1 \quad (9.58)$$

$$f_{223} = f_2 + f_2 - f_3 = 2f_2 - f_3 \quad (9.59)$$

$$f_{331} = f_3 + f_3 - f_1 = 2f_3 - f_1 \quad (9.60)$$

$$f_{332} = f_3 + f_3 - f_2 = 2f_3 - f_2 \quad (9.61)$$

โดยที่ f_1, f_2, f_3 คือค่าความถี่ศูนย์กลางของแต่ละช่องสัญญาณที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกันในหน่วย THz

f_{ijk} คือค่าความถี่ที่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่ที่มาแทรกสอดกับค่าความถี่ศูนย์กลางแต่ละช่องสัญญาณที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกันในหน่วย THz

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความยาวคลื่นคือ $\lambda_m = c / f_m$ จากภาพที่ 9.24 เป็นการแสดงตัวอย่างระบบ DWDM ขนาด 3 ช่องสัญญาณและมีค่าความกว้างแถบความถี่ 100 GHz มีความถี่ศูนย์กลางอยู่ที่

$\lambda_1 = 1550.12$ (nm) ช่องสัญญาณที่ 34

$\lambda_2 = 1550.92$ (nm) ช่องสัญญาณที่ 33

$\lambda_3 = 1551.72$ (nm) ช่องสัญญาณที่ 32

การสร้างความถี่ใหม่ของปรากฏการณ์ FWM โดยใช้ความสัมพันธ์ $\lambda_m = c / f_m$ จะได้ความถี่ใหม่ 9 ความถี่คือ

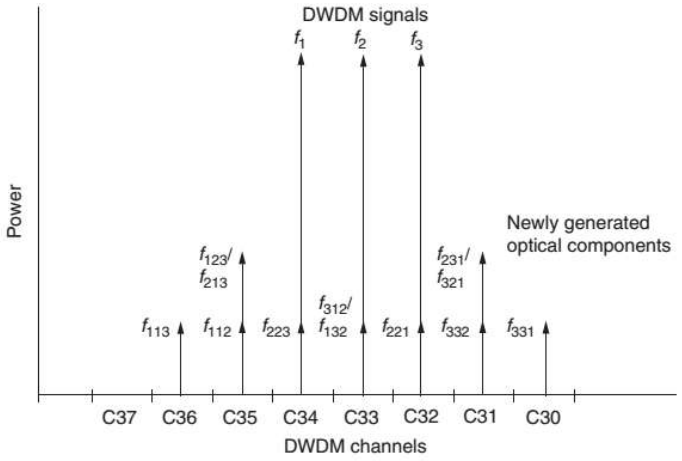
$\lambda_{113} = 1548.52$ ช่องสัญญาณ 36

$\lambda_{123} = 1549.32$ ช่องสัญญาณ 35

$\lambda_{112} = 1549.32$ ช่องสัญญาณ 35

$^*\lambda_{223} = 1550.12$ ช่องสัญญาณ 34

$^*\lambda_{312} = 1550.92$ ช่องสัญญาณ 33



ภาพที่ 9.24 การสร้างความถี่ใหม่ของปรากฏการณ์ FWM
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 220)

$^{*}\lambda_{221} = 1551.72$ ช่องสัญญาณ 32

$\lambda_{332} = 1552.52$ ช่องสัญญาณ 31

$\lambda_{321} = 1552.52$ ช่องสัญญาณ 31

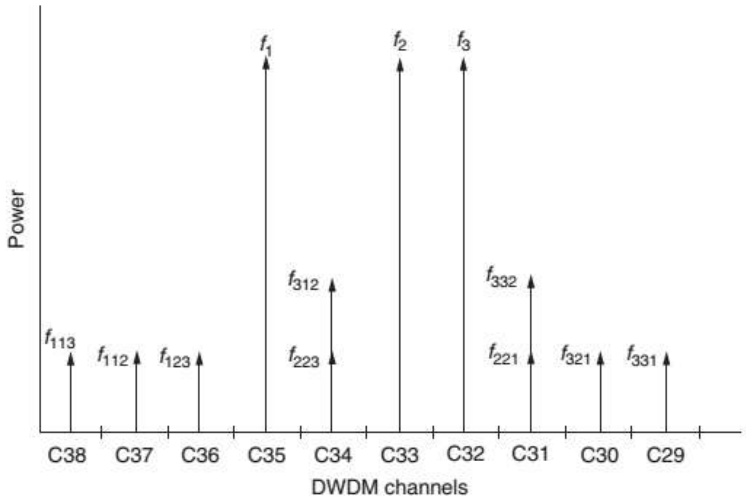
$\lambda_{331} = 1553.32$ ช่องสัญญาณ 30

โดยที่ λ_{ijk} คือค่าความยาวคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ที่เข้ามาแทรกสอด (generated interfering wavelength) (nm)

$^{*}\lambda_{312}, ^{*}\lambda_{221}, ^{*}\lambda_{223}$ คือค่าความยาวคลื่นที่เข้าไปแทรกสอดกับความยาวคลื่นศูนย์กลางแต่ละช่องสัญญาณโดยตรง (direct interfere) (nm) ความยาวคลื่น $^{*}\lambda_{223} = 1550.12$, $^{*}\lambda_{312} = 1550.92$ และ $^{*}\lambda_{221} = 1551.72$ คือค่าความยาวคลื่นที่เข้าไปแทรกสอดกับความยาวคลื่นศูนย์กลางแต่ละช่องสัญญาณโดยตรง (direct interfere) (nm) จำนวนองค์ประกอบคลื่นทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้จากปรากฏการณ์ FWM ในช่องสัญญาณ DWDM จะเพิ่มแบบเลขยกกำลัง (exponential) จะเป็นดังสมการ

$$N_{IM} = \frac{M^2(M-1)}{2} \tag{9.62}$$

โดยที่ N_{IM} คือค่าจำนวนองค์ประกอบคลื่นทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้จากปรากฏการณ์ FWM (four wave mixing)



ภาพที่ 9.25 การจัดช่องสัญญาณแบบเว้นช่วงแถบความถี่คู่
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 223)

M คือค่าจำนวนความยาวคลื่นศูนย์กลาง (center frequencies) ทั้งหมดที่ถูกส่งผ่านในเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกัน

อันดับการเกิดองค์ประกอบคลื่นใหม่นอกจากอันดับสามแล้ว ยังมีอันดับที่เพิ่มขึ้นอื่น ๆ เช่นอันดับ 5 และอับดับ 7 ดังสมการ

$$f_{1234} = f_1 + f_2 + f_3 - 2f_4 \qquad \text{อันดับ 5} \qquad (9.63)$$

$$f_{12345} = f_1 + f_2 + f_3 - f_4 - f_5 \qquad \text{อันดับ 5} \qquad (9.64)$$

$$f_{1234} = 2f_1 + f_2 - f_3 - 3f_4 \qquad \text{อันดับ 7} \qquad (9.65)$$

ผลกระทบจากปรากฏการณ์ FWM (four wave mixing) จะส่งผลต่อระบบคือ ความถี่ที่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่จะแทรกสอดกับความถี่หลัก (center frequencies) ส่งผลให้ค่า OSNR (optical signal to noise ratio) ลดลงและเกิดความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะช่องสัญญาณ DWDM แบบแบนด์แคบ (narrow band DWDM) และมีกำลังงานพัสล์แสงสูง วิธีที่ใช้ลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ FWM จะประกอบด้วย 1.) ใช้เส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว เช่น SSMF (ITU-T G.652) 2.) ควบคุมกำลังงานพัลส์แสงที่ส่งและ 3.) การจัดช่องสัญญาณแบบเว้นช่วงแถบความถี่คู่ (space signal channels unevenly) ดังแสดงในภาพที่ 9.25 จากภาพเป็นการลดผลกระทบของ FWM โดยการจัดช่องสัญญาณแบบเว้นช่วงแถบความถี่คู่ โดยมีค่าความยาวคลื่นศูนย์กลางอยู่ที่

$\lambda_1 = 1549.32$ ช่องสัญญาณ 35

$\lambda_2 = 1550.92$ ช่องสัญญาณ 33

$\lambda_3 = 1551.72$ ช่องสัญญาณ 32

ผลของปรากฏการณ์ FWM ได้สร้างความถี่ใหม่ 9 ความถี่คือ

$\lambda_{113} = 1546.92$ ช่องสัญญาณ 38

$\lambda_{112} = 1547.72$ ช่องสัญญาณ 37

$\lambda_{123} = 1548.52$ ช่องสัญญาณ 36

$\lambda_{312} = 1550.12$ ช่องสัญญาณ 34

$\lambda_{223} = 1550.12$ ช่องสัญญาณ 34

$\lambda_{332} = 1552.52$ ช่องสัญญาณ 31

$\lambda_{221} = 1552.52$ ช่องสัญญาณ 31

$\lambda_{321} = 1553.32$ ช่องสัญญาณ 30

$\lambda_{331} = 1554.12$ ช่องสัญญาณ 29

โดยที่ λ_{ijk} คือค่าความยาวคลื่นใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นในหน่วย (nm) จะเห็นว่าค่าความยาวคลื่นใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะไม่แทรกสอดกับค่าความยาวคลื่นศูนย์กลางที่มีอยู่เดิม ส่วนเทคนิคการลดผลกระทบของปรากฏการณ์ FWM โดยใช้วิธีควบคุมกำลังงานพัลส์แสงที่ส่ง

ในโครงข่ายที่ไม่มีตัวขยายกำลังงานแสงระหว่างภาคส่งกับภาครับ ค่ากำลังงานความถี่คลื่นใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจากปรากฏการณ์ FWM ที่ส่งผลต่อค่า OSNR (optical signal to noise ratio) ของระบบ ค่ากำลังงานแสงที่ถูกต้องจากปรากฏการณ์ FWM สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการคลื่นของชอร์ดิงเจอร์ (Schrodinger wave equation) ภายใต้เงื่อนไขทุกความถี่หรือความยาวคลื่นมีขั้วคลื่นเหมือนกัน (same polarization) ซึ่งเป็นการพิจารณาสภาวะที่ปรากฏการณ์ FWM ส่งผลต่อค่า OSNR (optical signal to noise ratio) ของระบบมากที่สุดดังสมการ

$$P_{ijk} = \frac{\eta}{9} d^2 \gamma^2 P_i P_j P_k L_{eff}^2 \exp(-\alpha L) \tag{9.66}$$

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \tag{9.67}$$

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2}\left[1 + \frac{4\exp(-\alpha L)\sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1-\exp(-\alpha L))^2}\right] \tag{9.68}$$

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c}\Delta f_{ik}\Delta f_{jk}\left[CD_c + \frac{\lambda_k^2}{2c}(\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk})S_{fc}\right] - \gamma(P_i + P_j - P_k)\left[\frac{1-\exp(-\alpha L_{eff})}{\alpha L_{eff}}\right] \quad (9.69)$$

โดยที่

P_i, P_j, P_k คือค่ากำลังงานสูงสุดที่ต้นทางเส้นใยนำแสงของความยาวคลื่นศูนย์กลาง λ_i, λ_j และ λ_k (กรณีสัญญาณแถบความถี่ฐานแบบ NRZ ค่า $P_{ave} = P_{peak}/2$) ในหน่วย W

P_{ijk} คือค่าองค์ประกอบกำลังงานสูงสุดของความถี่ที่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่จากปรากฏการณ์ FWM ที่ความยาวเส้นใยนำแสง L โดยที่ $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$ ในหน่วย W

η คือค่าแฟคเตอร์ประสิทธิภาพของ FWM

d คือค่าอันดับการสร้างความถี่ใหม่ (degeneracy factor equals 3 for degenerate and 6 for non-degenerate FWM)

γ คือค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น $(Wm)^{-1}$

α คือค่าสัมประสิทธิ์อัตราการลดทอนของเส้นใยนำแสง (m^{-1})

L คือค่าความยาวของเส้นใยนำแสง (m)

L_{eff} คือค่าความยาวประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง (effective fiber length) (m)

n_2 คือค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของดรรชนีการหักเหของเส้นใยนำแสงมีค่าอยู่ระหว่าง 2×10^{-20} ถึง 3.5×10^{-20} m^2/W โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ 3.0×10^{-20} m^2/W

λ คือค่าความยาวคลื่นที่เป็นองค์ประกอบของ FWM

A_{eff} คือพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของคอร์ (effective area of the fiber core) (m^2)

$\Delta\beta$ คือค่าแฟคเตอร์ความพอดีทางเฟส (phase matching factor) (m^{-1})

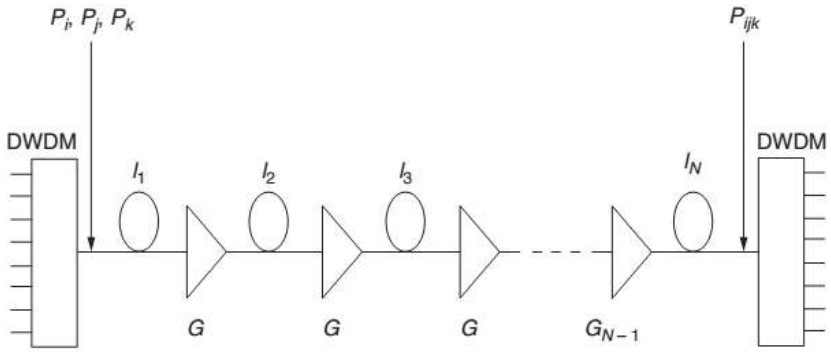
$\Delta f_{ik}, \Delta f_{jk}$ คือค่าช่วงห่างแถบความถี่แต่ละช่องสัญญาณหรือแต่ละความยาวคลื่น (channel-spacing) โดยที่ $\Delta f_{ik} = |f_i - f_k|$ และ $\Delta f_{jk} = |f_j - f_k|$ (Hz)

c คือความเร็วคลื่นแสงในสุญญากาศ (m/s)

CD_c คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายพัลส์แสงแบบโครมาติกที่ความยาวคลื่น λ_k ของ FWM ในหน่วย s^2/m หรือสามารถแปลงให้อยู่ในหน่วย $(ps/(nm.km))\times10^{-6}$

S_{fc} คือค่าความชันหรือสโลปของสัมประสิทธิ์การขยายพัลส์แสงแบบโครมาติกที่ความยาวคลื่น λ_k ของ FWM ในหน่วย s^3/m หรือสามารถแปลงให้อยู่ในหน่วย $(ps/(nm.km))\times10^3$

ในกรณีเส้นใยนำแสงมีตัวขยายกำลังงานแสงระหว่างภาคส่งกับภาครับเพื่อชดเชยการลดทอนกำลังงาน ดังแสดงในภาพที่ 9.26



ภาพที่ 9.26 ปรากฏการณ์ FWM ในเส้นใยนำแสงที่มีตัวขยายสัญญาณแบบ EDFA
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 227)

จากภาพ 9.26 ความยาวสายถูกแบ่งออกเป็น N ช่วง (N spans) เพื่อให้ง่ายในการคำนวณ กำหนดแต่ละช่วงมีความยาวเท่ากัน และตัวขยายแบบ EDFA (erbium doped fiber amplifier) จะมีจำนวน N-1 ตัว อัตราการขยายกำลังงานแสงเท่ากัน (amplifier spacing) โดยมี P_i, P_j, P_k เป็นกำลังงานแสงคลื่นพาห์หลัก (center frequency) และค่ากำลังงาน P_{ijk} เป็นกำลังงานคลื่นแสงที่สร้างขึ้นมาใหม่จากปรากฏการณ์ FWM ในโครงข่ายแบบ DWDM ค่าระดับกำลังงานจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไข $P_{ijk} \ll P_i, P_j, P_k$ ระยะการขยายกำลังงานของเส้นใยนำแสง (fiber span length) ความยาวเท่ากัน คือ $l_0 = l_1 = l_2 = ...l_N$

$$P_{mijk} = N^2 \frac{\eta_m}{9} d^2 \gamma^2 P_i P_j P_k l_{eff}^2 \exp(-\alpha l_o) \tag{9.70}$$

$$l_{eff} = \frac{1-\exp(-\alpha l_o)}{\alpha} \tag{9.71}$$

$$\eta_m = \frac{\alpha^2}{N^2(\alpha^2 + \Delta\beta_m^2)}\left[1 + \frac{4\exp(-\alpha l_o)\sin^2(\Delta\beta_m l_o/2)}{(1-\exp(-\alpha l_o))^2}\right] \times \left[\frac{\sin^2(N\Delta\beta_m l_o/2)}{\sin^2(\Delta\beta_m l_o/2)}\right] \tag{9.72}$$

$$\Delta\beta_m = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c}\Delta f_{ik}\Delta f_{jk}\left[CD_c + \frac{\lambda_k^2}{2c}(\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk})S_{fc}\right] \tag{9.73}$$

โดยที่ P_{mijk} คือค่ากำลังงานความถี่ใหม่ที่เกิดจากปรากฏการณ์ FWM ที่เกิดแทรกสอดกับความยาว

คลื่นศูนย์กลาง λ_{ijk} เมื่อโครงข่ายมีตัวขยายกำลังงานแสงระหว่างทาง

N คือจำนวนช่วงระยะทางเส้นใยนำแสง (number of spans in the fiber link)

l_0 คือค่าความยาวเส้นใยนำแสงที่ใช้ขยายสัญญาณ (fiber span length) (m)

l_{eff} คือค่าความยาวเส้นใยนำแสงประสิทธิผล (effective span length) (m)

η_m คือค่าแฟคเตอร์ประสิทธิภาพของ FWM เมื่อตัวขยายกำลังงานแสงถูกใช้ในโครงข่าย (FWM efficiency factor)

$\Delta\beta_m$ คือค่าแฟคเตอร์ความเข้ากันได้เชิงเฟสของแต่ละองค์ประกอบคลื่นที่ถูกสร้างขึ้น (พิจารณาในแบบเชิงเส้น) (phase matching factor) (l/m)

ในโครงข่ายแบบ DWDM จำนวนความถี่ศูนย์กลางหรือจำนวนช่องสัญญาณในระบบจะมีมากกว่า 3 และ 6 ช่องสัญญาณ ในทางปฏิบัติโครงข่ายแบบ DWDM จะมีจำนวนความถี่ศูนย์กลางหรือจำนวนช่องสัญญาณในระบบ 3, 6, 8, 16, 32, 40 และ 80 ช่องสัญญาณ

นอกจากผลกระทบจากปรากฏการณ์ FWM ที่จำกัดค่าความเร็วสูงสุดของระบบ DWDM แล้ว ปรากฏการณ์การกล้ำสัญญาณเชิงเฟสตัวเอง SPM (self-phase modulation) และการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสข้ามช่องสัญญาณ XPM (cross-phase modulation) เนื่องมาจากปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) ก็มีผลต่อค่าความเร็วสูงสุดของระบบเช่นเดียวกัน การกล้ำสัญญาณเชิงเฟสตัวเอง SPM เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของดรรชนีการหักเหแสงในคอร์ของเส้นใยนำแสงจนเกิดการเลื่อนเฟสของพัลส์แสงที่เดินทางผ่านเส้นใยนำแสง ค่าการเลื่อนเฟสจะเป็นดังสมการ (phase shift)

$$\Delta\Phi_{SPM} = \gamma P_0 L_{eff} \tag{9.74}$$

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \tag{9.75}$$

โดยที่ $\Delta\Phi_{SPM}$ คือค่าการเลื่อนเฟสในเส้นใยนำแสงที่ความยาว L (phase shift of the optical signal after propagation a distance L)

γ คือค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear efficiency) $(Wm)^{-1}$

P_0 คือค่ากำลังงานแสงอินพุต (input signal power) (W)

L_{eff} คือความยาวประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง (fiber's effective length) (m)

การเลื่อนเฟสคืออัตราการเปลี่ยนแปลงเฟส ($\Delta\Phi_{SPM}$) เทียบกับเวลาที่แปรผันตามระยะทางหรือความยาวเส้นใยนำแสงดังสมการ (9.76)

$$\Delta\omega = -\frac{d\Delta\Phi_{SPM}}{dt} = -\gamma\frac{dP}{dt}L_{eff} \tag{9.76}$$

โดยที่ $\Delta\omega$ คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสในเส้นใยนำแสงที่ความยาว L (phase shift of the optical signal after propagation a distance) (s^{-1})

ถ้าค่าดรรชนีการหักเหแสงคอร์เพิ่มมากขึ้น การเลื่อนเฟสจะส่งผลให้ความถี่ลดลง และในทางตรงกันข้าม ถ้าค่าดรรชนีการหักเหแสงคอร์ลดลง การเลื่อนเฟสจะส่งผลให้ความถี่สูงขึ้นจากค่าความถี่ศูนย์กลาง กรณีรูปร่างพัลส์แสงที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงเป็นแบบเกาส์เซียน (Gaussian pulse) และมีค่าความถี่เชิร์ฟเริ่มต้น C_0 (laser chirp parameter) เท่ากับศูนย์ ($C_0 = 0$) การขยายออกของพัลส์แสงแบบโครมาติก (chromatic dispersion) ที่สัมพันธ์กับแฟคเตอร์การกล้ำสัญญาณเชิงเฟสตัวเอง SPM สามารถประมาณค่าได้ดังสมการ

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \underbrace{\beta_1 \frac{\partial A}{\partial t}}_{Group\ velocity} + \underbrace{\frac{j\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2}}_{CD\ effect} - \underbrace{\frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3 A}{\partial t^3}}_{CD\ slope} + \underbrace{\frac{\alpha}{2}A}_{Attenuation} = \underbrace{j\gamma |A|^2 A}_{SPM} \tag{9.77}$$

$$\frac{\sigma_{SPM}}{\sigma_o} = \left[1 + \frac{\sqrt{2}L_{eff}L\beta_2}{2L_{NL}\sigma_o^2} + \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}}\frac{L_{eff}^2}{L_{NL}^2}\right)\frac{L^2\beta_2^2}{4\sigma_o^4}\right]^{1/2} \tag{9.78}$$

$$L_{NL} = \frac{\lambda A_{eff}}{2\pi c} CD_c \tag{9.79}$$

$$\beta_2 = \frac{\lambda^2}{2\pi c} CD_c \tag{9.80}$$

โดยที่ σ_{SPM} คือค่าความกว้างพัลส์แสงแบบรากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) แบบเกาซ์เซียนที่ความยาว L(s)

σ_0 คือค่าความกว้างพัลส์แสงแบบรากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) แบบเกาซ์เซียนที่จุดเริ่มต้นของเส้นใยนำแสง (s)

σ_{SPM}/σ_0 คือค่าอัตราการขยายออกของพัลส์แสงเนื่องจากการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสตัวเอง SPM (self-phase modulation)

L คือค่าความยาวของเส้นใยนำแสง (fiber link length) (m)

L_{NL} คือค่าความยาวเส้นใยนำแสงช่วงไม่เป็นเชิงเส้น (fiber nonlinear link length) (m)

L_{eff} คือความยาวประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง (fiber's effective length) (m)

P_0 คือค่ากำลังงานพัลส์แสงสูงสุดที่ส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง (m)

β_2 คือค่าพารามิเตอร์ความเร็วกลุ่มพัลส์แสง (group-velocity parameter) (s^2/m)

λ คือค่าความยาวคลื่นศูนย์กลาง (center wavelength of the optical signal) (m)

CD_c คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายออกพัลส์แสงแบบโครมาติก (chromatic dispersion coefficient) ในหน่วย s/m

n_2 คือค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของดรรชนีการหักเหของเส้นใยนำแสงมีค่าอยู่ระหว่าง $2x10^{-20}$ ถึง $3.5x10^{-20}$ m^2/W โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ $3x10^{-20}$ m^2/W

A_{eff} คือค่าพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของคอร์ (effective area of the fiber core) (m^2)

สำหรับค่าอัตราการขยายออกของพัลส์แสงเนื่องจากการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสตัวเอง (σ_{SPM}/σ_0) SPM (self-phase modulation) ในหน่วย dB สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\delta_{SPM} \approx 10\log\left\{\frac{\sigma_{SPM}}{\sigma_o}\right\} \tag{9.81}$$

ส่วนปรากฏการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสแบบข้ามช่องสัญญาณ XPM (cross-phase modulation) จะคล้ายกับการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสตัวเอง SPM แต่จะต่างกันเพียงปรากฏการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสแบบข้ามช่องสัญญาณ XPM จะเกิดกับทุกความยาวคลื่นที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกัน (all optical signal propagating in the fiber) สามารถใช้สมการคลื่นของชอร์ดิงเจอร์ แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear Schrodinger equations) เพื่อประมาณค่าการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสแบบข้ามช่องสัญญาณ XPM ระหว่างสองช่องสัญญาณ (A_1) กับช่องสัญญาณ (A_2) แสดงดังสมการ

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \underbrace{\frac{j\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2}}_{CD\ effect} - \underbrace{\frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3 A_1}{\partial t^3}}_{CD\ slope} + \underbrace{\frac{\alpha}{2}A_1}_{Attenuation} = j\gamma_1\left(\underbrace{|A_1|^2}_{SPM} + \underbrace{2|A_2|^2}_{XPM}\right)A_1 \tag{9.82}$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \underbrace{\frac{j\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2}}_{CD\ effect} - \underbrace{\frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3 A_2}{\partial t^3}}_{CD\ slope} + \underbrace{\frac{\alpha}{2}A_2}_{Attenuation} = j\gamma_2\left(\underbrace{|A_1|^2}_{SPM} + \underbrace{2|A_2|^2}_{XPM}\right)A_2 \tag{9.83}$$

โดยที่ A_1 คือค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นพาห์แสงช่องสัญญาณที่ 1 ที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง z และเวลา t (V/m)

A_2 คือค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นพาห์แสงช่องสัญญาณที่ 2 ที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง z และเวลา t (V/m)

$|A_1|^2$ คือค่าความเข้มกำลังงานแสงช่องสัญญาณที่ 1 (W/m^2)

$|A_2|^2$ คือค่าความเข้มกำลังงานแสงช่องสัญญาณที่ 2 (W/m^2)

α คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยนำแสง (m^{-1})

β_2 คือค่าพารามิเตอร์ความเร็วกลุ่มพัลส์แสง GVD (s^2/m)

β_3 คือค่าความชันหรือสโลปของความเร็วกลุ่มพัลส์แสง (s^3/m)

γ_1 คือสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นช่องสัญญาณที่ 1 $(Wm)^{-1}$

γ_2 คือสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นช่องสัญญาณที่ 2 $(Wm)^{-1}$

จากสมการ (9.82) และ (9.83) เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้นกำหนดให้ความเข้มกำลังงานแสงทุกช่องสัญญาณเท่ากัน และความเร็วกลุ่มพัลส์แสงทุกช่องสัญญาณเท่ากัน ไม่มีการกระจายพัลส์แสง (zero dispersion) ซึ่งเป็นเงื่อนที่ไม่เป็นจริงในทางปฏิบัติ แต่สามารถใช้ประมาณค่าการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสแบบข้ามช่องสัญญาณ XPM ระหว่างสองช่องสัญญาณแบบคร่าว ๆ ได้ดังสมการ (9.84) และ (9.85)

$$\Delta\Phi_{XPM.j} = \gamma P_o L_{eff}(2M-1) \tag{9.84}$$

$$P_{Max.j} < \frac{\alpha}{\gamma[1-\exp(-\alpha L)](2M-1)} \tag{9.85}$$

โดยที่

$\Delta\Phi_{XPM.j}$ คือค่าการเปลี่ยนเฟสหรือการเลื่อนเฟสของช่องสัญญาณที่ j เนื่องจากการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสแบบข้ามช่องสัญญาณ XPM

$P_{Max.j}$ คือค่ากำลังงานสูงสุดที่ส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสงของช่องสัญญาณที่ j (สมมุติให้ค่ากำลังงานแสงของช่องสัญญาณทั้งหมดมีค่าเท่ากันและการขยายออกของพัลส์แสงเท่ากับศูนย์) (all channel powers are equal and zero dispersion) (W)

M คือจำนวนช่องสัญญาณหรือจำนวนความยาวคลื่นศูนย์กลางทั้งหมดที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสง

α คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยนำแสง $(m)^{-1}$

L คือค่าความยาวของเส้นใยนำแสง (m)

การเปลี่ยนเฟสหรือการเลื่อนเฟสของช่องสัญญาณที่ j เนื่องจากการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสแบบข้ามช่องสัญญาณ XPM จะสัมพันธ์กับพารามิเตอร์คือ

1. ค่ากำลังงานอินพุท (ถ้ากำลังงานพัลส์แสงที่ถูกส่งเข้าสู่เส้นใยนำแสงสูงโอกาสที่จะเกิดการเลื่อนเฟสข้ามช่องสัญญาณก็จะสูงมากขึ้นไปด้วย)

2. การเว้นช่วงระยะห่างความยาวคลื่นระหว่างช่องสัญญาณ (ถ้าเว้นช่วงระยะห่างความยาวคลื่นระหว่างช่องสัญญาณมากโอกาสที่จะเกิดการเลื่อนเฟสข้ามช่องสัญญาณก็จะน้อยลง)

3. ค่าการขยายออกพัลส์แสง (fiber dispersion)

4. พื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของคอร์ (ถ้าพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของคอร์ใหญ่โอกาสที่จะเกิดการเลื่อนเฟสข้ามช่องสัญญาณก็จะน้อยลง)

ในโครงข่ายเส้นใยนำแสงนอกจากผลกระทบของปรากฏการณ์ FWM, การกล้ำสัญญาณเชิงเฟสตัวเอง SPM (self-phase modulation) และการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสข้ามช่องสัญญาณ XPM (cross-phase modulation) ยังมีการกระเจิงพัลส์แสงแบบกระตุ้น (stimulated) ที่ส่งผลต่อค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของโครงข่ายเส้นใยนำแสง การกระเจิงพัลส์แสงแบบกระตุ้นแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

1. การกระเจิงพัลส์แสงแบบรามาน (stimulated Raman scattering)
2. การกระเจิงแบบบริยูแอง (stimulated Brillouin scattering)

การกระเจิงพัลส์กำลังงานแสงเกิดจากการส่งพัลส์แสงเลเซอร์กำลังงานสูงผ่านเส้นใยนำแสง ที่มีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ จนเกิดการแตกกระเจิงคลื่นแสง ถ้าความถี่ของคลื่นแสงที่แตกกระเจิงมีความถี่เดียวกับเลเซอร์ที่มากระตุ้น จะเป็นการกระเจิงแบบเลรีย์ (Rayleigh scattering) แต่ถ้าความถี่ของคลื่นแสงที่แตกกระเจิงมีความถี่แตกต่างจากกับเลเซอร์ที่มากระตุ้นจะเป็นการกระเจิงแบบรามาน (SRS) ส่วนการกระเจิงแบบบริยูแอง (SBS) เป็นการกระเจิงที่กำเนิดความถี่ใหม่ย่านเสียง (acoustical frequency) หรือความถี่ต่ำและสะท้อนกลับไปยังตัวกำเนิดเลเซอร์

ส่วนการกระเจิงแบบรามานจะเป็นการกระเจิงที่กำเนิดความถี่ย่านเดียวกับแสงเลเซอร์ที่มากระตุ้น ผลกระทบของการกระเจิงแบบบริยูแอง ถ้ากำลังงานคลื่นที่สะท้อนกลับมายังตัวกำเนิดมากพออาจจะสร้างความเสียหายต่อตัวกำเนิดเลเซอร์ได้ สำหรับโครงข่ายแบบช่องสัญญาณเดียว (single-channel system) ผลกระทบจากการกระเจิงแบบรามาน ที่ส่งผลให้ค่ากำลังงานคลื่นแสงพาห์ลดลง 3 dB สามารถคำนวณได้จากสมการ (9.86)

$$P_{th}^{SRS} \approx \frac{16A_{eff}}{g_R L_{eff}} \tag{9.86}$$

โดยที่

P_{th}^{SRS} คือค่าระดับกำลังงานพัลส์แสงที่ส่งเข้าสู่เส้นใยนำแสงแล้วผลกระทบจากการกระเจิงแบบรามานจะทำให้ค่ากำลังงานคลื่นแสงพาห์ลดลง 3 dB

g_R คือค่าสัมประสิทธิ์อัตราการขยายสูงสุดแบบรามาน (Raman peak gain coefficient) จะอยู่ในช่วง 3×10^{-14} ถึง 8×10^{-14} m/W โดยทั่วไปกำหนดค่าไว้ที่ 4.7×10^{-14} m/W

L_{eff} คือค่าความยาวประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง (m)

A_{eff} คือค่าพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของคอร์ (m^2)

สำหรับโครงข่ายแบบ WDM ในย่านความยาวคลื่น L และ C ค่าการสูญเสียกำลังงานแสงเนื่องจากการกระเจิงพัลส์แสงแบบรามาน (SRS) δ_{SRS} สามารถคำนวณได้จากสมการ (9.87) และ (9.88)

$$\delta_{SRS} = \frac{\Delta\lambda_{ch} g_R P_{ch} L_{eff} N(N-1)}{4\Delta\lambda_R A_{eff}} \tag{9.87}$$

$$\delta_{SRS}^{dB} = -10\log(1-\delta_{SRS}) \tag{9.88}$$

โดยที่ δ_{SRS} คือค่ากำลังงานสูญเสียเนื่องจากการกระเจิงพัลส์แสงแบบรามาน

$\Delta\lambda_{ch}$ คือค่าแถบความยาวคลื่นระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ WDM (m)

P_{ch} คือค่ากำลังงานแสงสูงสุดแต่ละความยาวคลื่นศูนย์กลาง (แต่ละช่องสัญญาณ) (W)

N คือจำนวนความยาวคลื่นศูนย์กลางหรือจำนวนช่องสัญญาณ

δ_{SRS}^{dB} คือค่ากำลังงานสูญเสียเนื่องจากการกระเจิงพัลส์แสงแบบรามานในหน่วย dB

ส่วนผลกระทบจากการกระเจิงแบบบริยูแอง ที่ทำให้ค่ากำลังงานคลื่นแสงพาห์ลดลง 10 % หรือ -10 dB สามารถคำนวณได้จากสมการ (9.89)

$$P_{th}^{SBS-CW} = \frac{21A_{eff}}{g_B L_{eff}}\left(\frac{\Delta f_B \otimes \Delta f_s}{\Delta f_B}\right) \tag{9.89}$$

เทอมการคอนโวลูชัน $\otimes$ (convolution) ในสมการ (9.89) สามารถใช้ค่าประมาณได้คือ

$$P_{th}^{SBS-CW} \approx \frac{21A_{eff}}{g_B L_{eff}}\left(1+\frac{\Delta f_s}{\Delta f_B}\right) \tag{9.90}$$

และผลกระทบจากการกระเจิงแบบ Brillouin ที่ทำให้ค่ากำลังงานคลื่นพาห์แสงลดลง 0.01 เปอร์เซ็นต์ หรือ -20 dB สามารถคำนวณได้จากสมการ (9.91)

$$P_{th}^{SBS-CW} \approx \frac{18A_{eff}}{g_B L_{eff}}\left(1+\frac{\Delta f_s}{\Delta f_B}\right) \tag{9.91}$$

โดยที่ P_{th}^{SBS-CW} คือค่าระดับกำลังงานพัลส์แสงที่ส่งเข้าสู่เส้นใยนำแสงแล้วผลกระทบจากการกระเจิงแบบบริยูแองจะทำให้ค่ากำลังงานคลื่นแสงพาห์ลดลง -20 dB (W)

g_B คือค่าสัมประสิทธิ์อัตราการขยายสูงสุดแบบบริยูแองจะอยู่ในช่วง 2.2×10^{-11} m/W

L_{eff} คือค่าความยาวประสิทธิผลของเส้นใยนำแสง (m)

Δf_s คือค่าความกว้างความถี่ของพัลส์เลเซอร์ขณะที่ยังไม่กล้ำสัญญาณ (W)

A_{eff} คือค่าพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของคอร์ (m^2)

9.3 โครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบ SONET/SDH

ปัจจุบันโครงข่ายเส้นใยนำแสงเป็นโครงข่ายหลักที่ใช้ส่งข้อมูลทุกประเภท เช่น โครงข่าย Ethernet, SONET (Synchronous optical network), SDH (synchronous digital hierarchy) และโครงข่ายอื่น ๆ จะมีข้อพิจารณาคร่าว ๆ คือ

1. ชนิดเคเบิลเส้นใยนำแสง สำหรับการส่งข้อมูลระยะไกล นิยมใช้ตามมาตรฐาน ITU G.655 เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายออกของพัลส์น้อย (lower dispersion coefficient) เป็นเส้นใยนำแสงแบบ NZ-DSF (non-zero dispersion shifted fiber) สำหรับส่งข้อมูลทั่วไปนิยมใช้ตามมาตรฐาน ITU G.652 เป็นเส้นใยนำแสงแบบ NDSF (non-dispersion shifted fiber) หรือต้องการลดค่าใช้จ่ายการวางระบบและไม่ต้องการความเร็วมากนัก อาจจะใช้เส้นใยนำแสงตามมาตรฐาน ITU G.653 เป็นเส้นใยนำแสงแบบ DSF (dispersion shifted fiber)

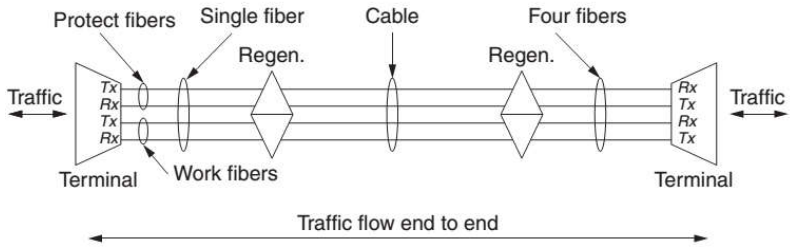
2. ลักษณะสภาพแวดล้อมที่จะวางเคเบิลเส้นใยนำแสง การติดตั้งภาคส่ง ภาครับ และอุปกรณ์ขยายสัญญาณระหว่างทาง เหตุการณ์ทั้งหมดที่สามารถสร้างความเสียหายกับเคเบิลเส้นใยนำแสงได้

3. ความยาก ง่าย ในการขยายโครงข่ายในอนาคต ความสะดวกในการดูแลระบบ ความสามารถในการวัดค่าต่าง ๆ ในโครงข่าย

4. อุปกรณ์ในระบบและการเซ็ตค่า (equipment type and configurations) เช่น วงจรอินเทอร์เน็ต (Ethernet circuit), สวิตช์ (switches) และ เราเตอร์ (routers) ระบบการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ (WDM, DWDM,...)

5. การคำนวณเพื่อหาค่าที่จำเป็นคือ

- ค่ากำลังงานแสง OSNR (optical signal to noise ratio) หรือ optical power budget เป็นค่าที่ต้องคำนวณตลอดความยาวของโครงข่าย
- ค่าการขยายพัลส์แสงแบบโครมาติก (chromatic dispersion) เป็นค่าที่จะต้องคำนวณเมื่อความเร็วการส่งข้อมูลสูงกว่า 1 Gbps หรือมากกว่า
- ค่าการขยายพัลส์แสงแบบโหมดคลื่น (polarization mode dispersion) เป็นค่าที่จะต้องคำนวณเมื่อความเร็วการส่งข้อมูลสูงกว่า 10 Gbps หรือมากกว่า
- ค่าความผิดเพี้ยนจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยนำแสง (nonlinear distortion) จะต้องพิจารณาสำหรับโครงข่าย DWDM ที่มีจำนวนช่องสัญญาณมากกว่า 40 ช่องสัญญาณขึ้นไป



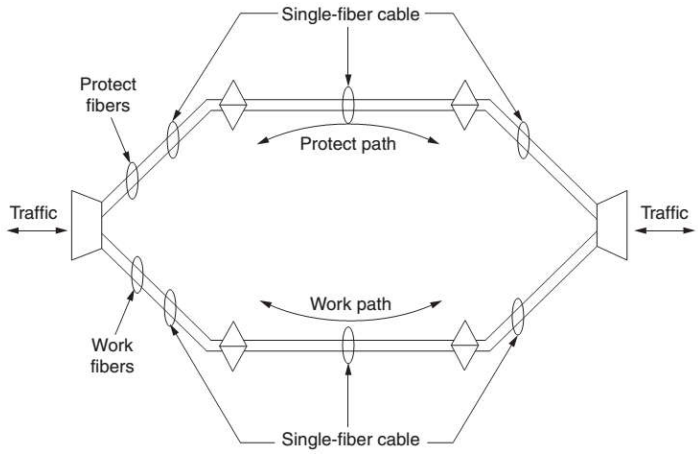
ภาพที่ 9.27 โครงสร้างแบบเชิงเส้น
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 308)

โครงข่ายแบบ SONET (Synchronous optical network) เป็นมาตรฐานโครงข่ายสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงขององค์กร ANSI (American National Standards Institute) ส่วนโครงข่ายแบบ SDH (synchronous digital hierarchy) เป็นมาตรฐานโครงข่ายสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงขององค์กร ITU (International Telecommunication Union) ลักษณะโครงสร้างของโครงข่ายแบบ SONET/SDH สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ แบบแรกคือโครงสร้างแบบเชิงเส้น (linear configuration) และแบบที่สองคือโครงสร้างแบบวงแหวน (ring configuration) ลักษณะโครงสร้างแบบเชิงเส้นจะมีหนึ่งต้นทางและหนึ่งปลายทาง ระหว่างทางอาจจะมีตัวขยายสัญญาณแสงได้ถ้าจำเป็น ดังแสดงในภาพที่ 9.27 จำนวนเส้นใยนำแสงในโครงข่ายอาจจะมี 2 หรือ 4 เส้น และระหว่างทางไม่สามารถเพิ่มและลดช่องสัญญาณได้ ส่วนเชื่อมต่อสัญญาณจะเป็น APS รูปแบบการทำงานโครงสร้างแบบเชิงเส้นคือ

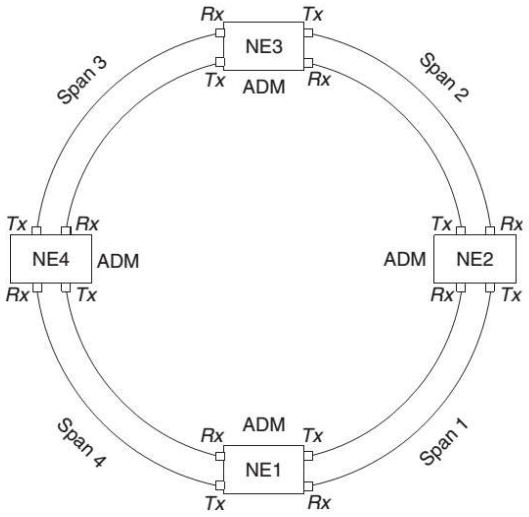
1. การทำงานแบบ 1+1 ใช้สองเส้นทางหลักในการส่งข้อมูล (two work link) แต่ถ้าเส้นทางหลักแรกชำรุดหรือผิดปกติ ภาครับจะสวิตช์ไปใช้เส้นทางหลักที่สองทันทีใช้เส้นใยนำแสงอย่างน้อย 4 เส้น

2. การทำงานแบบ 1:1 ใช้สองเส้นทางในการส่งข้อมูลคือเส้นทางส่งข้อมูลปกติ (work link) และเส้นทางสำรอง (protection link) โดยที่เส้นทางปกติใช้ส่งข้อมูลหลักส่วนเส้นทางสำรองว่างหรือใช้ส่งข้อมูลอื่น ๆ แต่ถ้าเส้นทางหลักชำรุดหรือผิดปกติ ภาครับจะสวิตช์ไปใช้เส้นทางสำรองทันที (กรณีนี้ข้อมูลที่กำลังส่งในเส้นทางสำรองจะสูญเสียไป) ใช้เส้นใยนำแสงอย่างน้อย 4 เส้น

3. การทำงานแบบ 1: n ใช้หนึ่งเส้นทางหลักในการส่งข้อมูลข้อมูลปกติ (work link) และใช้ n เส้นทางสำรอง (อาจจะมากถึง 14 เส้นทางสำรอง) แต่ถ้าเส้นทางหลักชำรุดหรือผิดปกติ ภาครับจะสวิตช์ไปใช้เส้นทางหลักที่สำรองทันที ข้อเสียของโครงสร้างแบบเชิงเส้น (linear configuration) เส้นใยนำแสงสำหรับส่งข้อมูลหลักกับเส้นใยนำแสงสำหรับส่งข้อมูลสำรอง จะถูกติดตั้งในเคเบิลเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกันหรืออยู่คู่กัน ถ้าเคเบิลถูกทำลายหรือขาด การส่งข้อมูลจะหยุดลงทันที

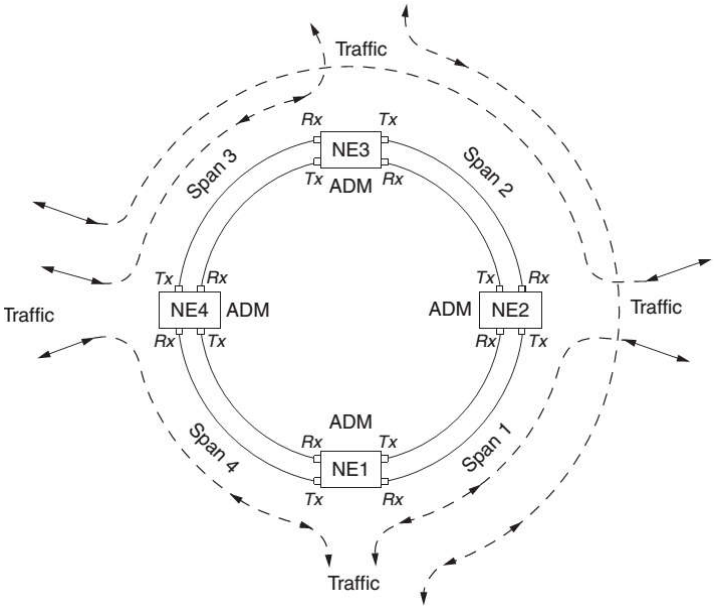


ภาพที่ 9.28 โครงสร้างแบบเชิงเส้นที่มีเส้นทางหลักและเส้นทางสำรองแยกกัน
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 309)



ภาพที่ 9.29 โครงสร้างแบบวงแหวน
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 173)

(การซ่อมแซมโครงข่ายจะต้องทำทันที) เพื่อลดผลกระทบจากเคเบิลถูกทำลาย การปรับปรุงระบบจะเพิ่มเคเบิลสำรอง (protection path) เป็นโครงสร้างแบบเชิงเส้นที่มีเส้นทางหลักและเส้นทางสำรองแยกกัน (SONET/SDH linear system with cable diversity) ดังแสดงในภาพที่ 9.28 ถ้าเคเบิลหลักชำรุดหรือผิดปกติระบบจะสวิตช์ไปใช้เคเบิลสำรองทันที (ภายในเวลา 50 ms) ส่วนโครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบวงแหวนแสดงดังภาพที่ 9.29



ภาพที่ 9.30 การทำงานโครงข่ายวงแหวนแบบ two-Fiber BLSR ring
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 311)

ข้อดีของโครงสร้างแบบเชิงเส้นจะมีความเสถียรของระบบสูงพอสมควร แต่ข้อด้อยคือระหว่างทางไม่สามารถจะเพิ่มหรือลดช่องสัญญาณได้และช่องสัญญาณถูกใช้ส่งข้อมูลอยู่ตลอดเวลา ส่วนโครงสร้างโครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบวงแหวน (ring configuration) จะประกอบด้วยจำนวนเทอร์มินอลแบบ ADM (SONET/SDH add/drop multiplexers) หลาย ๆ ตัว ต่อกันแบบวงแหวนได้มากถึง 16 ตัว (16 NE) แต่ละช่วงต่อ (span) ระหว่าง ADM สามารถเพิ่มและลดจำนวนความยาวคลื่นหรือจำนวนช่องสัญญาณได้ (adding or dropping traffic)

ตัวสวิตช์ตัดต่อช่องสัญญาณเป็นแบบ APS (automatic protection switching) ฟังก์ชันการทำงานของ APS สามารถกำหนดได้หลายรูปแบบคือ

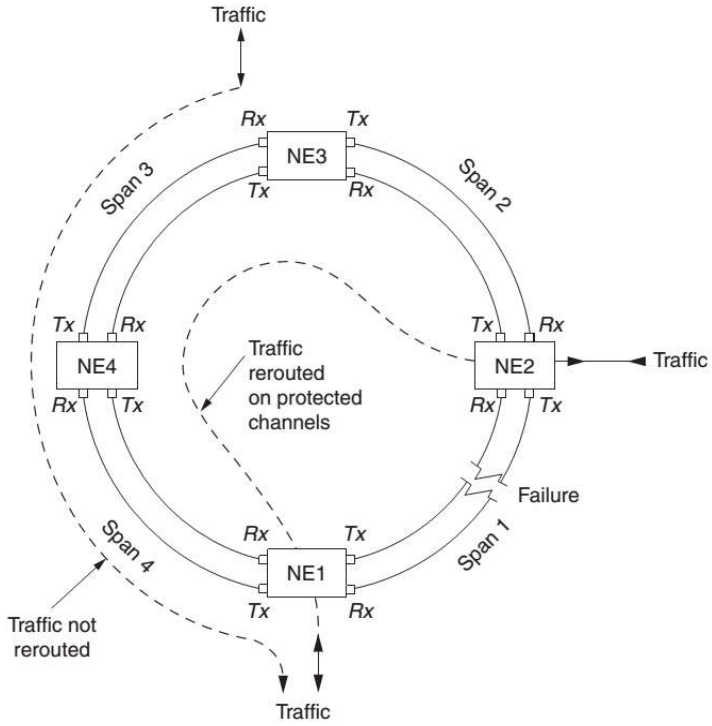
1. การทำงานแบบ BLSR (bidirectional switched ring) สามารถทำงานได้สองทิศทาง

2. การทำงานแบบ UPRS (unidirectional path switch ring) สามารถทำงานได้ทิศทางเดียว

3. การทำงานแบบ MS-SPRING (multiplexed section shared protection ring) สามารถทำงานได้แบบสลับทิศทาง

4. การทำงานแบบ SNCP (subnetwork connection protection ring) สามารถทำงานได้แบบสลับทิศทาง

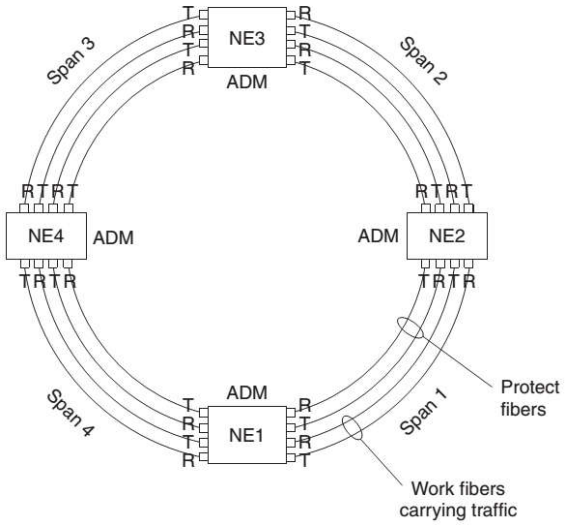
การทำงานโครงข่ายวงแหวนแบบ two-Fiber BLSR ring (bidirectional switched ring) สามารถทำงานได้แบบสองทิศทางดังแสดงในภาพที่ 9.30



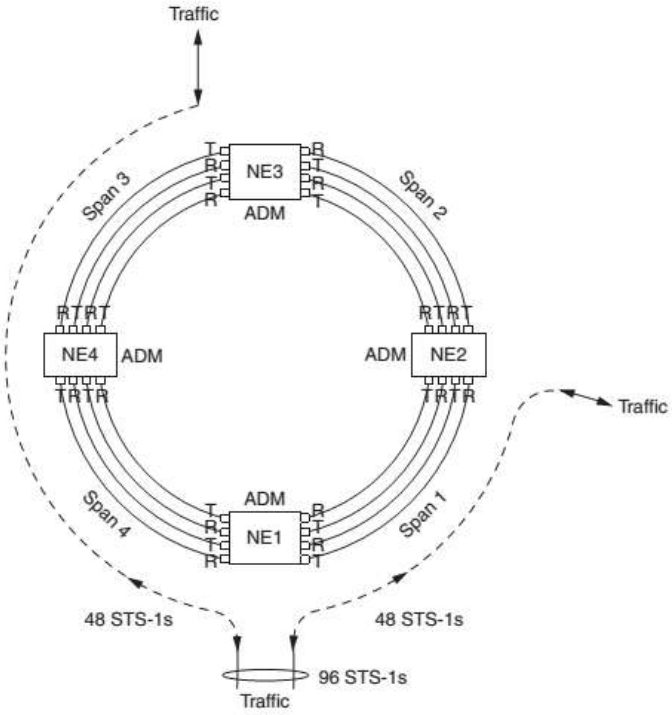
ภาพที่ 9.31 การสลับช่องสัญญาณของโครงข่ายวงแหวนแบบ two-Fiber BLSR
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 312)

เส้นใยนำแสงที่ใช้ในการทำงานแบบ BLSR อย่างน้อย 2 เส้น เส้นแรกใช้ส่งข้อมูลในทิศทางเดียว ส่วนเส้นที่สองใช้ส่งข้อมูลในทิศทางอื่น ๆ ในกรณีที่ช่องสัญญาณระหว่าง NE (terminal) หรือช่วงระยะ span เกิดขาดหรือชำรุด ในกรณีที่ช่องสัญญาณระหว่าง NE (terminal) หรือช่วงระยะ span เกิดขาดหรือชำรุด เทอร์มินอลแบบ ADM (NE) จะทำการสลับช่องสัญญาณทันทีดังแสดงในภาพที่ 9.31 จากภาพตัวอย่างเคเบิลเส้นใยนำแสงเกิดชำรุดหรือขาดในช่วง span1 เทอร์มินอลแบบ ADM จะทำการสวิตช์ไปใช้ช่วง span 2, 3 และ 4

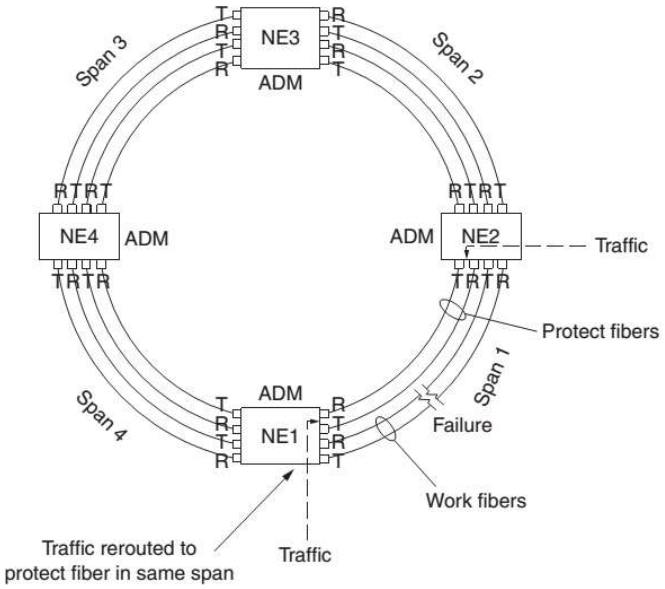
หลังจากซ่อมแซมเคเบิลเส้นใยนำแสงแล้วจึงจะสามารถกลับมาใช้งานช่วง span 1 ได้ การเพิ่มความสามารถของโครงข่ายแบบวงแหวนทำได้ โดยการเพิ่มจำนวนเคเบิลเส้นใยนำแสงในโครงข่าย ดังแสดงในภาพที่ 9.32 เป็นโครงข่ายวงแหวนแบบ SONET four-Fiber BLSR โดยใช้เส้นใยนำแสง 4 เส้น สามารถเพิ่มความจุช่องสัญญาณได้ถึง 96 STS-1s ดังแสดงในภาพที่ 9.33 และสามารถป้องกันการชำรุดของโครงข่ายได้สองทิศทาง ช่องสัญญาณหลักใช้เส้นใยนำแสง 2 เส้นและช่องสัญญาณสำรองอีก 2 เส้น



ภาพที่ 9.32 โครงข่ายวงแหวนแบบ SONET four-Fiber BLSR
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 313)

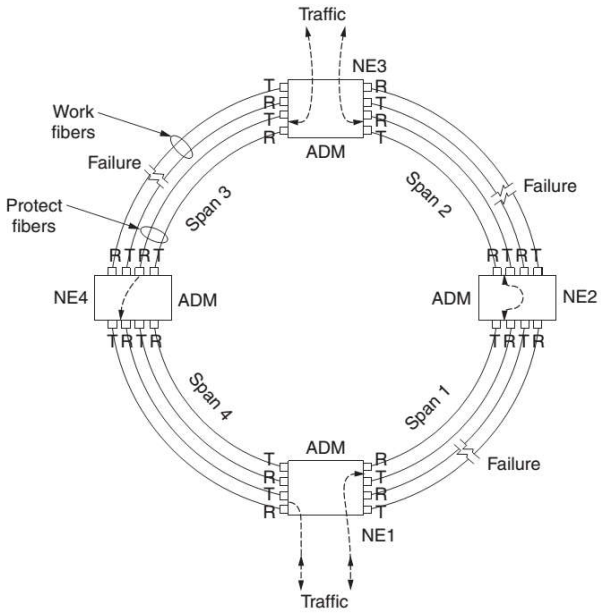


ภาพที่ 9.33 ความจุช่องสัญญาณของโครงข่ายแบบ SONET four-Fiber BLSR
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 173)



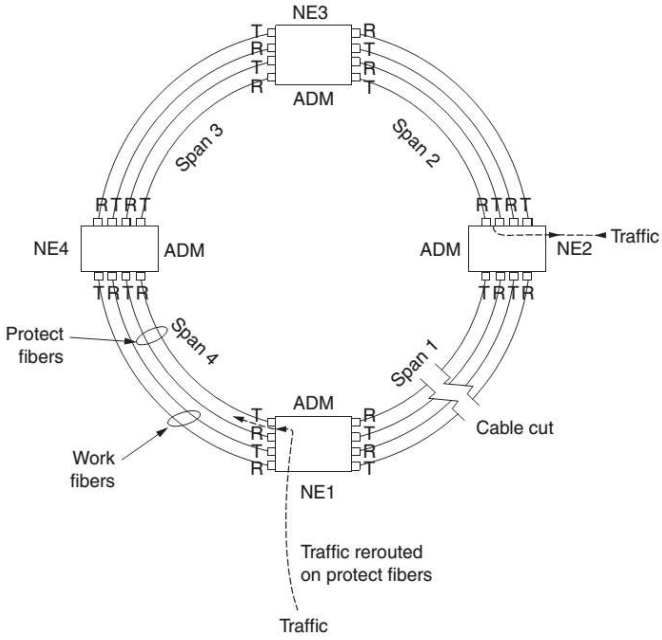
ภาพที่ 9.34 การสลับช่องสัญญาณของ four-Fiber BLSR กรณีชำรุด 1 จุด

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 173)



ภาพที่ 9.35 การสลับช่องสัญญาณของ four-Fiber BLSR กรณีชำรุดหลายจุด

ที่มา (Chomycz, 2009, p. 173)



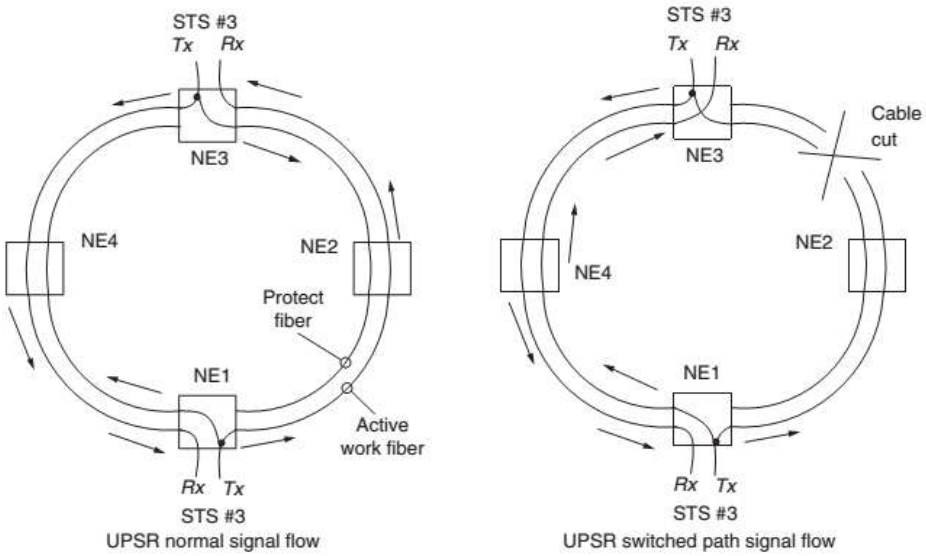
ภาพที่ 9.36 การสลับช่องสัญญาณของ four-Fiber BLSR กรณีชำรุดทั้ง span ที่มา (Chomycz, 2009, p. 173)

ในกรณีที่โครงข่ายแบบ SONET four-Fiber BLSR เกิดการชำรุด 1 จุดที่อยู่ภายใน span เดียวกันสามารถที่จะสวิตช์ไปใช้ช่องสัญญาณสำรองได้ทันที (protected fiber) โดยไม่ต้องทำการหาเส้นทางใหม่ (reroute) หรือแม้แต่เกิดการชำรุดหลายจุดที่อยู่ภายใน span เดียวกัน ก็สามารถที่จะสวิตช์ไปใช้ช่องสัญญาณสำรองได้ทันทีเช่นเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 9.34 และ 9.35 แต่ถ้าในกรณีที่โครงข่ายชำรุดหรือขาดทั้ง span จะต้องสวิตช์ไปใช้ span ใหม่ (protected fiber) และต้องทำการหาเส้นทางใหม่ (route) ดังแสดงในภาพที่ 9.36

ถ้าเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของโครงข่ายวงแหวน SONET ระหว่าง four-Fiber BLSR กับ two-Fiber BLSR คือ

1. โครงข่ายวงแหวนแบบ two-Fiber BLSR ข้อดีคือการติดตั้งลงทุนน้อยเพราะใช้เส้นใยนำแสงเพียงสองเส้น แต่ละช่องสัญญาณ STS (synchronous transport signal) สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในช่วงที่ไม่ถูกใช้งาน แต่ข้อด้อยคือความจุช่องสัญญาณของใช้ได้ครึ่งเดียว (half the OC-n capacity) เพราะที่เหลือใช้เพื่อเป็นช่องสัญญาณสำรองไม่สามารถรองรับการชำรุดของโครงข่ายหลาย ๆ จุดได้

2. โครงข่ายวงแหวนแบบ four-Fiber BLSR ข้อดีคือสามารถใช้งานได้เต็มความจุ (full OC-n traffic) สามารถรองรับการชำรุดของโครงข่ายหลาย ๆ จุดได้ แต่ละช่องสัญญาณ STS (synchronous transport signal) สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ตลอดเวลา แต่ข้อด้อยคือการติดตั้งลงทุนสูงในครั้งแรกเพราะใช้เส้นใยนำแสงอย่างน้อยสี่เส้น มีความซับซ้อนของโครงข่ายพอสมควร



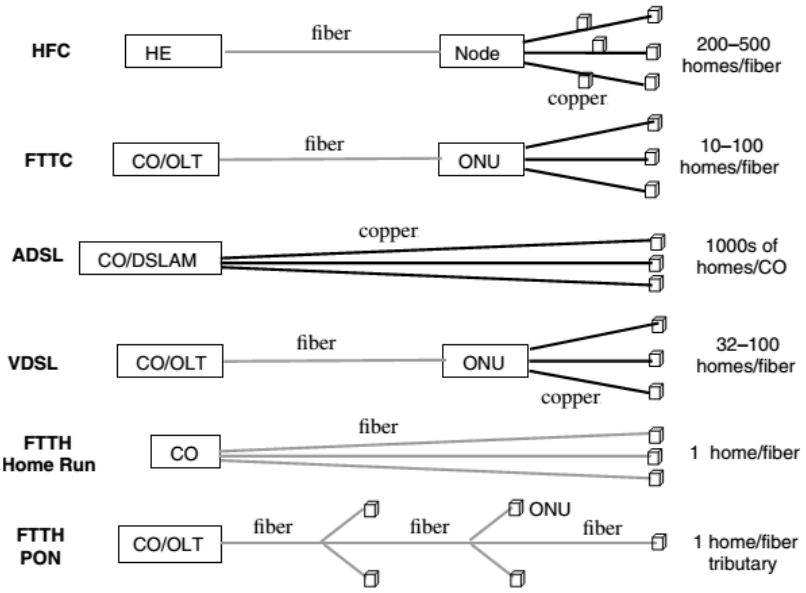
ภาพที่ 9.37 โครงข่ายวงแหวนแบบ UPSR
ที่มา (Chomycz, 2009, p. 317)

สำหรับโครงข่าย SONET วงแหวนแบบ UPSR (unidirectional path switch ring) รูปแบบการส่งข้อมูลจะเป็นแบบทิศทางเดียวดังแสดงในภาพที่ 9.37 ลักษณะการทำงานจะใช้วงแหวน 2 วง โดยแบ่งเป็นวงแหวนเส้นใยนำแสงสำหรับช่องสัญญาณหลัก (active work fiber) และวงแหวนที่สองเป็นช่องสัญญาณสำรอง (protect work fiber) การทำงานจะแบ่งทิศทางการส่งข้อมูล สำหรับช่องสัญญาณหลักจะส่งข้อมูลแบบทวนเข็มนาฬิกา (counter-clockwise) ส่วนช่องสัญญาณสำรองจะส่งข้อมูลแบบตามเข็มนาฬิกา (clockwise) แต่ถ้าเกิดการชำรุดของเส้นใยนำแสงจะสวิตช์ไปใช้ช่องสัญญาณสำรองทันทีดังแสดงในภาพที่ 9.37

9.4 โครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบเอฟทีทีเอ็กซ์ (FTTX)

โครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบเอฟทีทีเอ็กซ์ (FTTX) (fiber-to-the-curb/building/home) เป็นโครงข่ายที่ใช้เส้นใยนำแสงส่งข้อมูลแทนโครงข่ายประเภทสายทองแดง รูปแบบโครงข่ายขึ้นอยู่กับรูปแบบการให้บริการระหว่างผู้ส่งและผู้รับข้อมูล เช่น

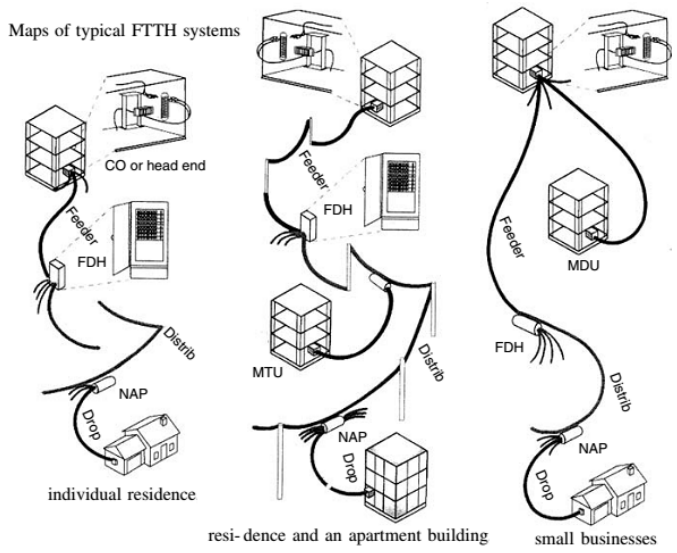
1. FTTN คือ fiber to the node/neighborhood
2. FTTC คือ fiber to the curb



ภาพที่ 9.38 วิวัฒนาการของโครงข่ายแบบ FTTH
ที่มา (Green, 2006, p. 18)

3. FTTB คือ fiber to the building
4. FTTH คือ fiber to the home
5. FTTD คือ fiber to the desktop
6. FTTO คือ fiber to the office
7. FTTF คือ fiber to the frontage
8. FTTN คือ fiber to the node

พัลส์แสงในโครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบเอฟทีทีเอ็กซ์จะถูกส่งจากต้นทางหรือศูนย์ให้บริการหลัก ผ่านอุปกรณ์ในระบบ เช่น OLT (optical line terminal) โดยใช้เคเบิลเส้นใยนำแสง ไปยังอุปกรณ์แยกกำลังงานแสงระหว่างทาง SDP/ODP (splitter distribution point/optical distribution point) หรือตู้สาขา OFCCC (outdoor fiber cross connecting cabinet) และสุดท้ายจะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ ONU/ONT (optical network unit/optical network terminal) เพื่อแยกพัลส์แสงเข้าสู่ผู้ใช้บริการ การให้บริการโครงข่ายแบบเอฟทีทีเอ็กซ์จะเป็นการสื่อสารจากหนึ่งจุดไปหลายจุด (point to multipoint) การแยกกำลังงานแสงในโครงข่าย (splitter) จะสัมพันธ์ความเร็วในการส่งข้อมูลที่เป็นมาตรฐาน PON (passive optical network) คือ



ภาพที่ 9.39 โครงสร้างของ FTTH
ที่มา (Green, 2006, p. 100)

จำนวนพอร์ตที่ตัวแยก	ความเร็วในการส่งข้อมูล
1:2	2.4 Gbps
1:4	1.2 Gbps
1:8	300 Mbps
1:16	150 Mbps
1:32	75 Mbps
1:64	35.5 Mbps

สำหรับโครงข่ายที่มีการติดตั้งมากที่สุดเป็นโครงข่ายแบบ FTTH (fiber to the home) เป็นโครงข่ายเส้นใยนำแสงที่สามารถส่งข้อมูลได้หลากหลาย เช่น สัญญาณภาพและเสียง (broadcast video: analog and digital), สัญญาณข้อมูล (text or data), สัญญาณเสียง (voice), สัญญาณแบบผสม (multimedia) จนถึงสัญญาณโทรทัศน์ความคมชัดสูง (high-definition television: HDTV) ข้อดีของ FTTH คือระบบมีความเร็วสูง (high capacity) เพราะเส้นใยนำแสงมีค่าความกว้างแถบความถี่ที่สูงมากเมื่อเทียบกับสายสัญญาณประเภทตัวนำ จากอดีตจนถึงปัจจุบันการส่งข้อมูลที่ความเร็วสูงจะมีปัจจัยสำคัญสองประการคือความสามารถของสายส่งสัญญาณและรูปแบบการส่งสัญญาณ สายส่งสัญญาณประเภทตัวนำ เช่นทองแดง สามารถใช้ส่งสัญญาณความเร็วสูงสุดไม่เกิน 40 Mbps ถ้ากรณีในโครงข่ายมีทั้งสายส่งที่เป็นแบบตัวนำผสมรวมกันกับสายส่งประเภทเส้นใยนำแสง ปัญหาคอขวดจะเกิดขึ้นทันที(last-mile bottleneck) และรูปแบบการวางโครงข่ายก็มีผลต่อความเร็วในการส่งข้อมูล

การวางโครงข่ายแบบ P2P (point-to-point) สามารถส่งข้อมูลความเร็วสูงได้ดี แต่ใช้สายส่งสัญญาณเท่ากับจำนวนลูกข่าย (home) ฉะนั้นจึงมีค่าการลงทุนวางโครงข่ายสูง

ในกรณีวางโครงข่ายแบบ P2MP (point-to-multipoint) ไม่สามารถใช้ส่งข้อมูลความเร็วสูงได้ดีนัก แต่ใช้สายส่งสัญญาณและมีค่าการลงทุนวางโครงข่ายต่ำกว่าการวางโครงข่ายแบบ P2P วิวัฒนาการของโครงข่ายแบบ FTTH (fiber to the home) ดังแสดงดังในภาพที่ 9.38 ส่วนจากภาพที่ 9.39 โครงสร้างโดยทั่วไปของโครงข่ายแบบ FTTH จะประกอบด้วย

1. CO (central office or head end) ทำหน้าที่ศูนย์กลางการส่งข้อมูล ประมวลผล จัดหาเส้นทางที่เหมาะสม (switching and routing) และอื่น ๆ ตามความจำเป็น
2. Feeder เป็นเส้นใยนำแสงความเร็วสูง ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจาก CO ไปยังชุมสายย่อย FDH
3. FDH (fiber distribution hub) เป็นชุมสายย่อยหรือฮับ เพื่อส่งต่อสัญญาณให้กับตัวแจกจ่ายสัญญาณเข้าขุมชนหรือสำนักงาน (distribution hub)
4. Distribution เป็นเส้นใยนำแสงความเร็วสูง ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจาก FDH ไปยังตัวกระจายสัญญาณ NAP
5. Distribution hub เป็นตัวกระจายสัญญาณเข้าขุมชน เพื่อส่งต่อสัญญาณให้กับตัวแจกจ่ายสัญญาณเข้าหมู่บ้าน (NAP)
6. NAP (network access points or terminals) เป็นตัวกระจายสัญญาณเข้าหมู่บ้าน เพื่อส่งต่อสัญญาณให้กับ ONU หรือ ONT
7. Drop เป็นเส้นใยนำแสงความเร็วสูง ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจาก NAP ไปยังบ้านหรือสำนักงาน
8. ONU (optical network unit) หรือ ONT (optical network terminator) เป็นอุปกรณ์กระจายสัญญาณจากสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในบ้านหรือสำนักงาน เช่น คอมพิวเตอร์, โทรศัพท์, โทรทัศน์ หรือโทรสาร เป็นต้น

การออกแบบระบบ FTTH พารามิเตอร์หลัก ๆ ที่จะต้องพิจารณาหรือคำนวณก็จะคล้ายกับโครงข่ายเส้นใยนำแสงชนิดอื่น ๆ ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ผ่านมาคือ การสูญเสียกำลังงานแสง, การกระจายแบบโครมาติก, การกระจายแบบเรลีย์, การกระเจิงแบบ SBS, การกระเจิงแบบ SRS, ความผิดเพี้ยนแบบ intermodal, ความผิดเพี้ยนแบบ SPM, ความผิดเพี้ยนแบบ CPM และความผิดเพี้ยนแบบ FWM

9.5 บทสรุป

โครงข่ายเส้นใยนำแสงมีรูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างโหนดหรือสถานีในโครงข่ายแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบหลัก ๆ คือ แบบบัส, แบบริง, แบบสตาร์และแบบเมช แต่ถ้าแบ่งรูปแบบโครงข่าย

เส้นใยนำแสงโดยแบ่งตามพื้นที่การบริการสามารถแบ่งได้เป็นโครงข่ายขนาด pico-cell, micro-cell, macro-cell และโครงข่ายขนาด world-cell เทคนิคการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ส่งข้อมูลความเร็วสูงจำนวนหลาย ๆ ช่องสัญญาณโดยใช้สายส่งสัญญาณเพียงคู่สายเดียว เพื่อเป็นการประหยัดการลงทุนในการวางระบบ รูปแบบการรวมช่องสัญญาณและการกระจายช่องสัญญาณสำหรับโครงข่ายเส้นใยนำแสง จะมีหลายรูปแบบคือการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ OTDM, OSCM, OOFDM, WDM, DWDM, CWDM, OWDM และแบบ hybrid

พารามิเตอร์หลัก ๆ ที่ต้องคำนึงในการออกแบบโครงข่ายเส้นใยนำแสง คือคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น, การผสมคลื่นแบบ FWM, การกล้ำสัญญาณเชิงเฟสภายในตัวเองและการกล้ำสัญญาณเชิงเฟสแบบไขว้ข้าม, การแตกกระเจิงแบบรามาน (SRS) และบริยูแอง (SBS) ปรากฏการ intra-channel nonlinear effects ปัจจุบันโครงข่ายเส้นใยนำแสงเป็นโครงข่ายหลักที่ใช้ส่งข้อมูลทุกประเภท เช่น โครงข่าย Ethernet, SONET, SDH และโครงข่าย FTTH

9.6 คำถามทบทวน

1. Dispersion Compensator เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แก้ปัญหาดิสเพอร์ชั่นในระบบด้วยเส้นใยนำแสงโดยทำให้พัลส์แสงที่บานออก มีความกว้างพัลส์แคบลง อุปกรณ์นี้ใช้หลักการทำงานอย่างไร
2. Thin-Film Technology ในระบบ DWDM ทำงานอย่างไร
3. อุปกรณ์ใดที่ใช้วัดความเข้มแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง เป็นช่วงกว้างติดต่อกัน
4. ตัวที่ทำหน้าที่กรองให้แสงผ่านไปได้ทีละความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่องตามที่กำหนดคือ
5. อุปกรณ์ optical coupler มีหน้าที่อะไร
6. แสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน 2 ความยาวคลื่น เดินทางร่วมกันมาตกกระทบแผ่นแก้วที่มีพื้นผิวเป็นรูปร่างคล้ายฟันเลื่อย (grating) จะทำให้เกิดเป็น optical divider ได้อย่างไร
7. การส่งข้อมูลหลายช่องสัญญาณรวมกันไปในระบบสื่อสารเดียว เรียกว่าอะไร
8. WDM ย่อมาจากคำว่าอะไร
9. WDM คืออะไร
10. ความยาวคลื่นแสงในระบบ DWDM ควรมีคุณสมบัติอย่างไร
11. DWDM ย่อมาจากคำว่าอะไร
12. CWDM ย่อมาจากคำว่าอะไร