บทที่ 2

ทฤษฎีการสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงพื้นฐาน

เนื้อหาของทฤษฎีที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์บทนี้แบ่งออกเป็น 8 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะกล่าวถึง ระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงขั้นพื้นฐาน การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะไกล รวมไปถึงการแนะนำให้รู้จักว่าอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องมีในระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงอย่างคร่าวๆ ส่วนที่ 2 จะเป็นการแนะนำถึงทฤษฎีการสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ส่วนที่ 3 จะเป็นการกล่าวถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อรูปร่างและกำลังของสัญญาณที่เดินทางผ่านเส้นใยแสงซึ่งได้แก่ การลดทอนกำลังสัญญาณ ดิสเพอร์ชั่น และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ส่วนที่ 4 จะเป็นการแนะนำให้รู้จักวิธีการมอดูเลตสัญญาณทางแสงซึ่งประกอบด้วย การมอดูเลตทางความเข้มแสงและการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค รวมไปถึงการเปรียบเทียบระหว่างข้อดีข้อเสียของการมอดูเลตทั้งสองประเภทนี้อีกด้วย ส่วนที่ 5 จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีการจัดการดิสเพอร์ชั่นด้วยการต่อกันระหว่างเส้นใยแสงสองชนิด ส่วนที่ 6 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ รวมถึงเงื่อนไขในการออกแบบ ส่วนที่ 7 จะกล่าวถึงอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง

2.1 ระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

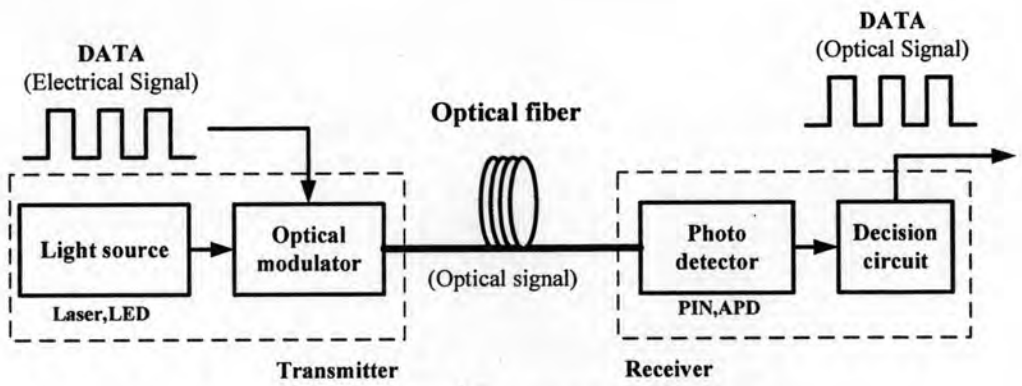
ระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงโดยทั่วไปสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1 ซึ่งจะประกอบด้วย องค์ประกอบหลักๆ คือ อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง (Optical transmitter) เส้นใยแสง (Optical fiber) และอุปกรณ์รับสัญญาณแสง (Optical receiver)

การมอดูเลตสัญญาณแสงมีอยู่ สองประเภทหลักๆ [15] คือ การมอดูเลตภายนอก (External modulation) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (Light source) และอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ (Modulator) แยกออกจากกัน ส่วนอีกประเภทจะเป็นการมอดูเลตโดยตรง (Direct modulation) ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะรวมอยู่เป็นอุปกรณ์เพียงชุดเดียว

เส้นใยแสงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำสัญญาณแสงจากต้นทางไปยังปลายทาง เส้นใยแสงที่ใช้งานอยู่จะเป็นแบบโหมดเดียวซึ่งมีราคาสูง แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำ (Attenuation coefficient) แบบ Multi-mode fiber (MMF) ซึ่งมีราคาถูกกว่า SMF แต่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสูงกว่า SMF แบบ DSF ซึ่งจะมีคุณสมบัติพิเศษ คือ ณ ความยาวคลื่นที่มี

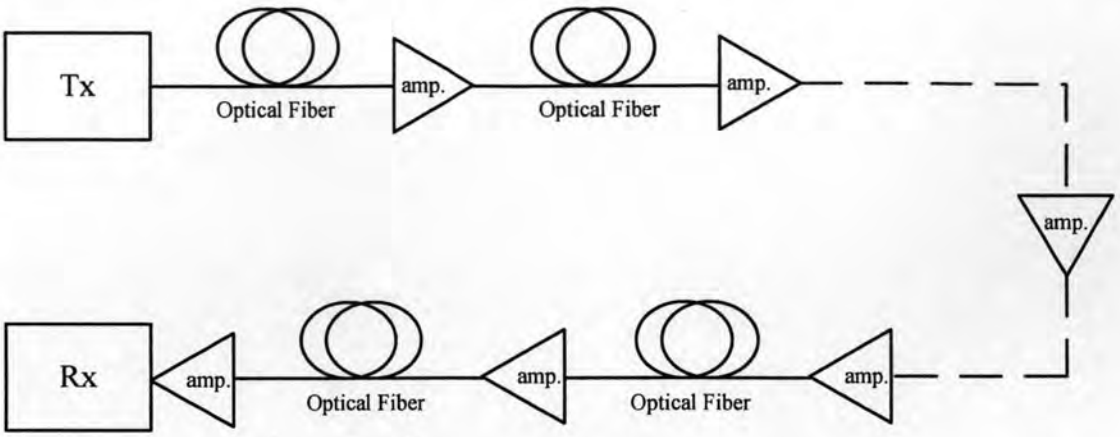
ค่าดิสเพอร์ชั่นเป็นศูนย์ จะเป็นค่าเดียวกับความยาวคลื่นที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนกำลังงานต่ำที่สุด (1550 nm) และ NZ-DSF ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้ในระบบมัลติเพล็กซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น

อุปกรณ์รับสัญญาณแสง ประกอบด้วยอุปกรณ์สองชนิดคือ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (Photo detector) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้เป็น Positive, intrinsic, negative junctions (PIN) และ Avalanche photodiode (APD) ส่วนองค์ประกอบที่สองของอุปกรณ์รับสัญญาณแสงคือ วงจรตัดสิน (Decision circuit) ทำหน้าที่ตัดสินว่าสัญญาณขาออกควรจะเป็นบิต '0' หรือ '1' ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Decision threshold ภายในวงจรตัดสิน



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

สำหรับระบบการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงระยะไกล (Long-haul transmission system) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ามีอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (Optical amplifier) หรืออุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) วางคั่นระหว่างทางเป็นช่วงๆ เนื่องจากมีการสูญเสียกำลังงานเกิดขึ้นในเส้นใยแสง โดยจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณทางแสงในแต่ละย่านความยาวคลื่น (Optical attenuation coefficient: α dB/km) ทำให้กำลังงานสัญญาณแสงลดลงและอาจจะเป็นผลให้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (Optical detector) ไม่สามารถตรวจจับกำลังงานแสงได้ สำหรับค่ากำลังงานต่ำสุดที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงจะสามารถแปลงกำลังงานแสงเป็นกำลังงานไฟฟ้าได้คือค่าสภาพความไว (Sensitivity) ซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ



รูปที่ 2.2 ระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะทางไกล

2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

เนื่องจากสัญญาณแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังนั้นสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงย่อมมีความสัมพันธ์กับสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) โดยเริ่มต้นพิจารณาการเดินทางของสัญญาณแสงจากสมการความหนาแน่นกระแสและสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จนท้ายที่สุด จะได้สมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงเป็นไปดังสมการที่ (2.1) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเงอร์ (Nonlinear Schrödinger equation: NLSE) [16]

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

โดยที่ A เป็นกรอบคลื่น (Envelope) ของสัญญาณ, α เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation constant), β_2 เป็นค่า Group-velocity dispersion (GVD), γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear coefficient), z เป็นระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง และ T เป็นกรอบเวลาอ้างอิงที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม (v_g) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.2)

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

โดยที่ t เป็นเวลาจริง เมื่อพิจารณาพจน์ทางขวามือของสมการที่ (2.1) ที่แสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณ A พจน์แรกคือการลดทอนกำลังสัญญาณ (α) ซึ่งเพิ่มมากขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแสง นั่นคือเมื่อสัญญาณเดินทางไปในเส้นใยแสงจะทำให้กำลังงานของสัญญาณแสงลดต่ำลง แต่เราสามารถชดเชยกำลังงานของสัญญาณได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง สำหรับพจน์ที่สอง คือ GVD (β_2) เป็นส่วนที่ส่งผลให้สัญญาณพัลส์ขยายกว้างออก และสำหรับพจน์สุดท้าย คือ ผลของปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ไม่เป็น

เชิงเส้นภายในเส้นใยแสงที่ทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง และยังส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออกอีกด้วย โดยที่ความรุนแรงของปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูงสุด (Peak power) ของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปร่างและกำลังของสัญญาณ

จากหัวข้อที่ 2.2 จะเห็นว่าสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง จะมีรูปร่างและกำลังของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากปัจจัยหลัก 3 ประการ คือ การลดทอนกำลังสัญญาณ ดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสง และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง เพื่อที่จะดูผลกระทบของแต่ละปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยข้างต้นต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง เราสามารถแยกพิจารณาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสัญญาณได้ ดังนี้

2.3.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (Fiber attenuation loss)

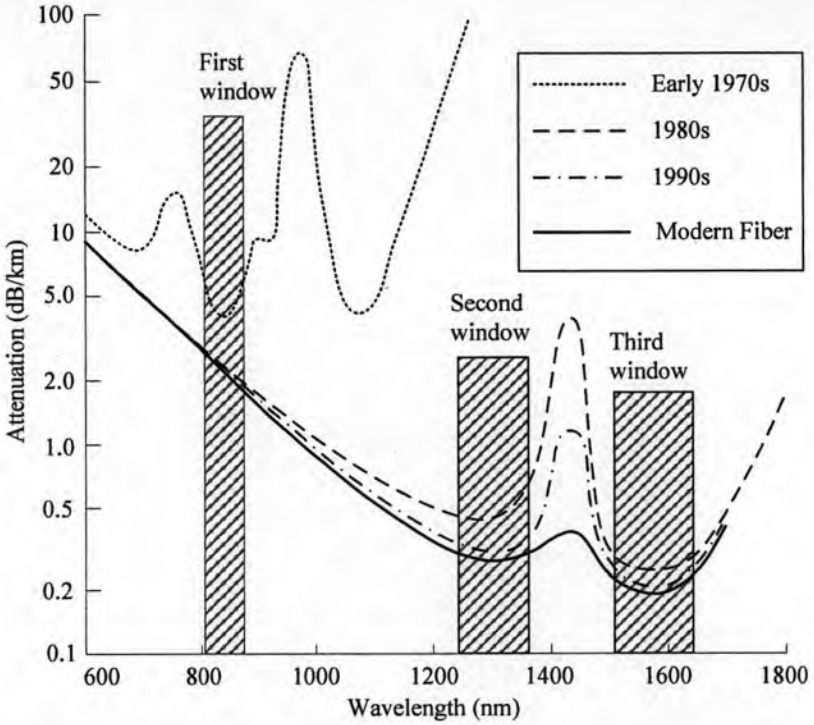
อัตราการลดทอนกำลังสัญญาณของแสงที่เดินทางในเส้นใยแสง เป็นส่วนสำคัญของการกำหนดคุณลักษณะการออกแบบโครงข่ายทางแสง เนื่องจากสามารถกำหนดกำลังงานที่ออกจากเครื่องส่งสัญญาณแสง ให้มีค่าเหมาะสมกับระยะทางในการสื่อสาร, ความไวของเส้นใยแสง และปริมาณการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง โดยที่การลดทอนกำลังสัญญาณในเส้นใยแสง เกิดจาก 3 สาเหตุหลัก คือ การดูดซึม (Absorption) ที่เกิดจากคุณสมบัติของวัสดุเอง, การกระเจิง (Scattering) ที่เกิดจากทั้งคุณสมบัติของวัสดุและความไม่สมบูรณ์ของท่อนำคลื่น และการแพร่รังสี (Radiation) ที่เกิดจากรูปทรงของเส้นใยแสง

แสงที่เดินทางในเส้นใยแสงจะถูกลดทอนพลังงานแบบเอกซ์โพแนนเชียลไปตามระยะทาง โดยที่ให้ $P(0)$ คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB), $P(L)$ คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะ L จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) และ α คือ ค่าคงตัวของการลดทอนที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล/กิโลเมตร (dB/km) จะได้อัตราการลดทอนกำลังสัญญาณของแสงในหน่วยของเดซิเบลดังสมการที่ (2.3)

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

โดยที่ ค่าคงตัวการลดทอน α นั้น จะแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงเส้นโค้งทั้ง 3 เส้น โดยเส้นบนสุดซึ่งเป็นเส้นประ แสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงปลายยุค 80 และล่างสุดเป็นเส้นทึบซึ่งแสดงถึงเส้นใยแสงในยุค

ปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (First window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกา และจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความชื้นและผลของ Rayleigh scattering ซึ่งทำให้อัตราลดทอนสัญญาณมีค่าสูงดังเส้นประในรูป หลังจากนั้นก็มีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณในยุคที่ 2 (Second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการ



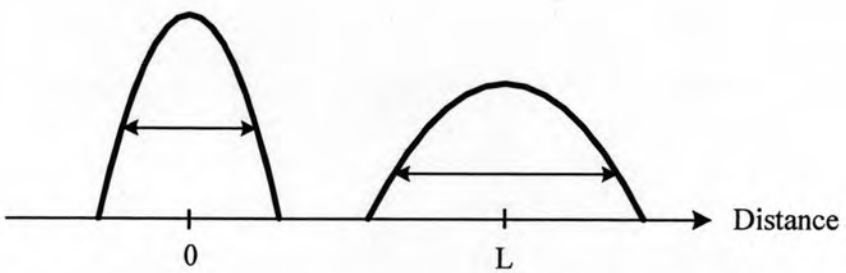
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนกำลังสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่นของสัญญาณ

ลดทอนสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ในช่วงปลายปี 1977 Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (Third window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm ซึ่งมีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการใช้งานนั้น ถ้าเป็นการส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN เป็นต้น เราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (Forth window) โดยมีการเพิ่มการใช้งานในความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm ซึ่งไม่ได้มีอัตราการลดทอนสัญญาณที่ลดลง แต่อาจจะทำให้ความยุ่งยากในการส่งสัญญาณระยะทางไกลหรือระบบการสื่อสัญญาณแบบมีการมัลติเพล็กซ์หลายความยาวคลื่นลดลง

2.3.2 *ดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสง (Fiber dispersion)*

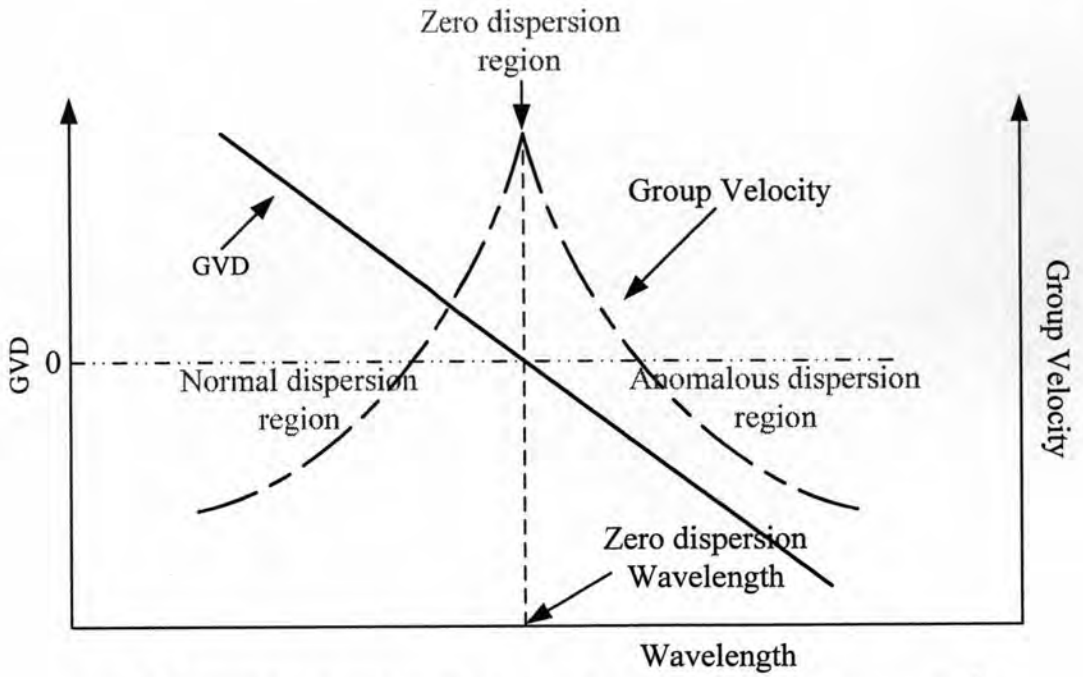
โดยทั่วไปดิสเพอร์ชั่น (Dispersion) ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสง มีสองประเภทด้วยกัน คือ Inter-modal dispersion สำหรับ MMF และ Chromatic dispersion สำหรับ SMF ในการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงระยะไกล เราจะเลือกใช้ SMF เพราะ SMF สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตที่สูงกว่าเนื่องจากแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลกว้างกว่า รวมไปถึงอัตราการสูญเสียกำลังงานที่น้อยกว่า ดังนั้นดิสเพอร์ชั่นที่ส่งผลกับระบบจะเป็นแบบ Chromatic dispersion

Chromatic dispersion เกิดจากคุณสมบัติของความเร็วกลุ่มมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละความยาวคลื่น ทำให้สัญญาณพัลส์ที่ประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน เป็นผลให้สัญญาณพัลส์ที่ปลายทางขยายออก ซึ่งการขยายออกของสัญญาณพัลส์จะส่งผลให้ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณพัลส์ลดลงด้วยดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลของดิสเพอร์ชั่นต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

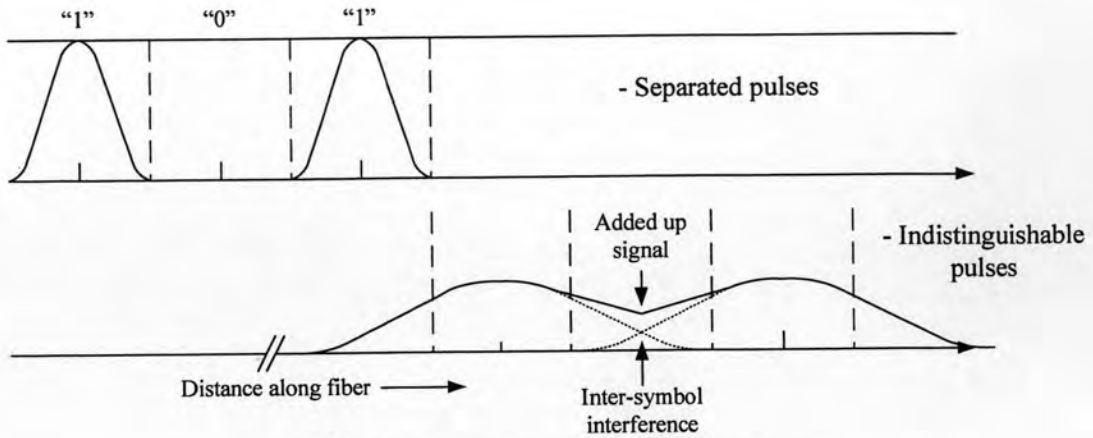
รูปที่ 2.5 แสดงถึงตัวอย่างการแจกแจงความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น ซึ่งเห็นได้ว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกันและจะมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชั่นเป็นศูนย์



รูปที่ 2.5 การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD (β_2) เทียบกับความยาวคลื่น

เราสามารถแบ่งช่วงของดิสเพอร์ชั่นในรูปที่ 2.5 ออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงดิสเพอร์ชั่นปกติ (Normal dispersion) ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 > 0$ โดยในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีความเร็วกลุ่มน้อยกว่า ช่วงดิสเพอร์ชั่นผิดปกติ (Anomalous dispersion) ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 < 0$ ในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีความเร็วกลุ่มมากกว่า และช่วงดิสเพอร์ชั่นเป็นศูนย์ (Zero dispersion) ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 = 0$ โดยสัญญาณที่ความยาวคลื่นนี้จะมีค่าความเร็วกลุ่มสูงที่สุด

GVD จะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของสัญญาณพัลส์อย่างมากในกรณีที่มีการส่งสัญญาณพัลส์เป็นขบวนออกไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทางไกลๆ และสัญญาณพัลส์ที่อยู่ติดกันจะมีโอกาสเลื่อมกันมากขึ้น (Overlap) จนทำให้เกิด Inter-symbol interference (ISI) และอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจ (Error decision) ว่าสัญญาณแสงที่วิ่งเข้ามาควรจะเป็น บิต '1' หรือ บิต '0' ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิด Inter-symbol interference

รูปที่ 2.6 แสดงถึงการเกิด ISI ที่เกิดจากการขยายตัวออกของสัญญาณพัลส์ โดยเริ่มแรกส่งสัญญาณแบบมอดูเลตวามเข้มแสงด้วยบิต '1', '0', '1' ตามลำดับ สัญญาณพัลส์ระหว่างบิตแยกออกจากกันอย่างชัดเจน เมื่อสัญญาณพัลส์เดินทางในเส้นใยแสง ผลของ GVD ทำให้สัญญาณพัลส์ขยายออก จนกระทั่งเกิด ISI ผลของ ISI ทำให้กำลังงานของสัญญาณที่ช่วงเวลา (Time slot) บิต '0' เพิ่มขึ้น และอาจทำให้ตรวจจับสัญญาณผิดพลาดจากบิต '0' กลายเป็นบิต '1' หากว่าสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมาเลยค่าขอบเขตที่เครื่องตรวจจับสัญญาณกำหนดไว้

2.3.3 *ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity)*

ปรากฏการณ์เคอร์ เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงานของสัญญาณ ทำให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยขึ้นอยู่กับกำลังงานของสัญญาณ เฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปโดยที่มีขนาดขึ้นอยู่กับกำลังงานเรียกว่า การเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear phase shift) เราสามารถแบ่งปรากฏการณ์เคอร์ ที่มีผลต่อสัญญาณเดินทางในระบบเส้นใยแสงออกเป็นสามประเภท คือ Self-phase modulation (SPM) Cross-phase modulation (XPM) และ Four-wave mixing (FWM)

2.3.3.1 Self-phase modulation (SPM)

SPM เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกันกับสัญญาณเอง อันเป็นผลทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงด้วยกำลังของตัวสัญญาณเองซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นไปดังสมการที่ (2.4)

$$\Delta\omega_{NL} = \frac{\partial\phi_{NL}(z,T)}{\partial T} \tag{2.4}$$

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

ϕ_{NL} คือ เฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

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

$$\phi_{NL} = n_2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)L|E_0|^2 = n_2 k_0 L|E_0|^2 \tag{2.5}$$

โดยที่ n_2 คือ สัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear-index coefficient)

L คือ ความยาวของเส้นใยแสง [km]

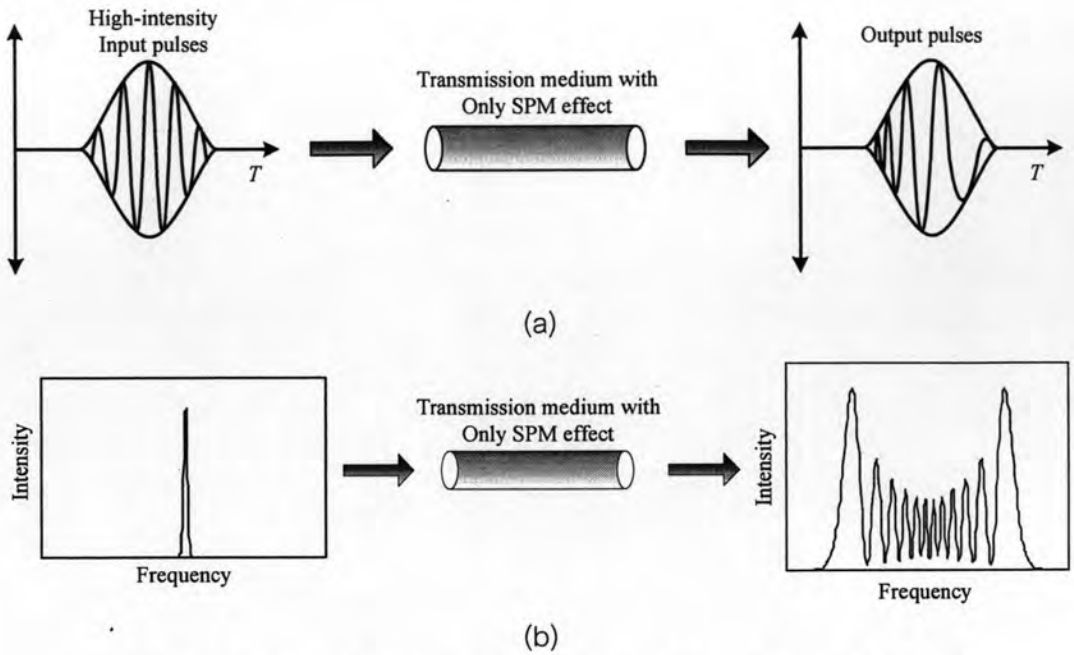
$|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสง

k_0 คือ เลขคลื่นในที่ว่าง (Free space wave number)

SPM ทำให้สเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณขยายออกและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหนี่ยวนำมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังสัญญาณสูงสุด

$$\phi_{NL,\max} = z_{eff} P_0 \gamma \tag{2.6}$$

โดยที่ P_0 เป็นกำลังงานของสัญญาณพัลส์ $\phi_{NL,\max}$ เป็นเฟสที่เลื่อนออกไปมากที่สุด ณ บริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ และ $z_{eff} = \dfrac{1-\exp(-\alpha z)}{\alpha}$ เป็นความยาวประสิทธิผลเนื่องจากการลดทอนของสัญญาณในเส้นใยแสง ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ SPM แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง ทาง (a) ความถี่ (b) สเปกตรัมสัญญาณ

รูปที่ 2.7 แสดงถึงผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง โดยในรูปที่ 2.7 (a) แสดงถึงผลของ SPM ต่อความถี่ของสัญญาณ จากรูปจะเห็นว่า SPM จะส่งผลให้ส่วนประกอบความถี่สูงของสัญญาณมีความเร็วกลุ่มน้อยกว่าส่วนประกอบความถี่ต่ำ และในรูปที่ 2.7 (b) แสดงถึงผลของ SPM ต่อสเปกตรัมของสัญญาณ จากรูปจะเห็นว่านอกจาก SPM จะทำให้ขนาดของสเปกตรัมสัญญาณแตกออกแล้ว ยังจะทำให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออกทางด้านข้างแบบสมมาตรกันด้วย

2.3.3.2 Cross-phase modulation (XPM)

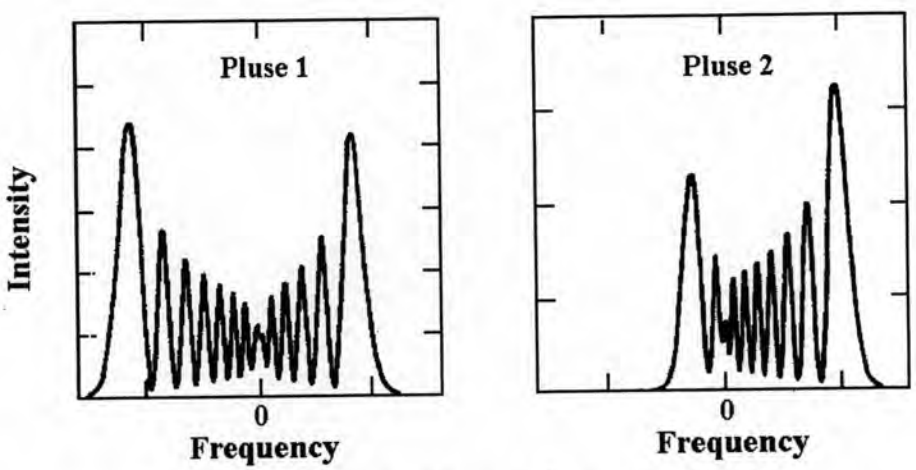
ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์ ω_1 และ ω_2 ซึ่งมีค่าต่างกัน ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ ณ ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปจากผลของ XPM ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังงานของสัญญาณแสงอื่นที่อยู่ที่คลื่นพาห์ที่มีความถี่ที่ต่างออกไป เหนี่ยวนำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนไปจากเดิม

ปกติแล้วเมื่อ 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์เป็น ω_1 และ ω_2 ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง สัญญาณแสงทั้งสองจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกัน ซึ่งการที่ความเร็วกลุ่มไม่ตรงกันนี้จะเป็นปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของสัญญาณแสงทั้งสองในปรากฏการณ์ XPM โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในช่วงที่สัญญาณแสงทั้งสองวิ่งตัดกัน ซึ่งผลของมันจะมีค่ามากกว่าของ SPM ถึง 2 เท่า โดยมีเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจาก SPM และ XPM ดังนี้

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L\left(|E_0|^2 + 2|E_1|^2\right) \tag{2.7}$$

เมื่อ $|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_1

$|E_1|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_2



รูปที่ 2.8 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

รูปที่ 2.8 แสดงถึงผลของ XPM ที่มีต่อสัญญาณแสง 2 สัญญาณแสงที่มีกำลังสัญญาณต่างกันที่เดินทางในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน โดยกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากว่ากำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 2 จากรูปจะเห็นว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณจะคล้ายกันกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณที่เกิดจากผลของ SPM แต่จะต่างกันตรงที่สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้รับผลจาก XPM จะขยายออกมากกว่า เนื่องจากผลของ XPM ต่อสัญญาณรุนแรงกว่า SPM ถึง 2 เท่า และการขยายออกยังเป็นแบบไม่สมมาตรด้วย โดยสัญญาณพัลส์ที่ 2 จะมีลักษณะการขยายออกของสเปกตรัมที่ไม่สมมาตรกว่าสัญญาณพัลส์ที่ 1 เนื่องจากกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่า ส่งผลให้สัญญาณที่พัลส์ที่ 2 ได้รับผลจาก XPM มากกว่า

2.3.3.3 Four-wave mixing (FWM)

FWM เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่ ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (Frequency matching) จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่กันและกัน การกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมา โดยเกิดจากสัญญาณพัลส์หลายๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆ กันมาผสมผสานกัน สำหรับการเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ (f_4) จากสัญญาณความถี่ f_1, f_2, f_3 ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.8)

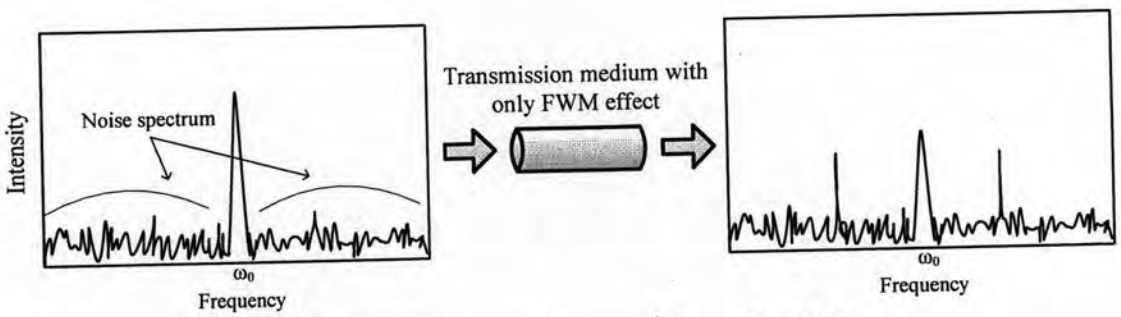
$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \tag{2.8}$$

และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (Phase matching condition) ดังนี้

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3 \tag{2.9}$$

โดยที่ k_n คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n ดังนั้นประสิทธิภาพของ FWM

ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดียว เรียกว่า Intra-channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันจนทำให้เกิด Ghost pulse ขึ้นมาในสัญญาณที่มอดูเลตทางความเข้มแสงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

จากรูปที่ 2.9 ในรูปของสัญญาณขาเข้าทางขวามือ ถ้าความถี่ของสัญญาณข้อมูลและความถี่ของสัญญาณรบกวนเป็นไปตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ตามหลักของการเกิด FWM เมื่อสัญญาณข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย เดินทางไปในเส้นใยแสง จะทำให้เกิดการถ่ายเทกำลังสัญญาณจากสัญญาณข้อมูลไปที่สัญญาณรบกวน ทำให้กำลังของสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น และกำลังของสัญญาณข้อมูลลดลง และจะมีการถ่ายเทลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ และถ้าระยะในการสื่อสัญญาณมากขึ้น สัญญาณข้อมูลอาจจะกลายเป็นสัญญาณรบกวนไปได้ในที่สุด

สำหรับผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณ จะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมาและจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่าเลื่อมกับความถี่ของสัญญาณ

ข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM

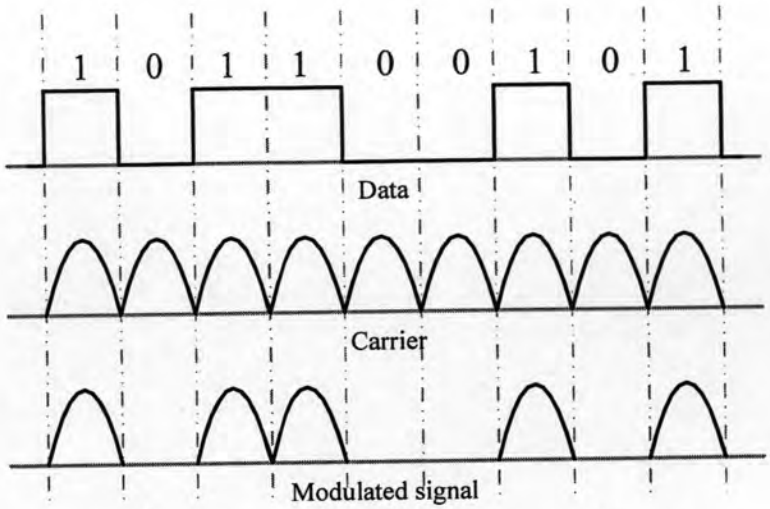
การลดปัญหาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงสามารถทำได้โดยการจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละช่ายเชื่อมโยงให้มีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นมากที่สุด เพื่อทำให้การวิ่งตัดกันของสัญญาณเนื่องจากความเร็วกลุ่มของสัญญาณที่แตกต่างกันเป็นไปได้ยากขึ้น พร้อมทั้งทำให้การจับคู่ความถี่เป็นไปได้ยากขึ้นด้วยเช่นกัน

2.4 การมอดูเลตสัญญาณทางแสง (Optical modulation)

การมอดูเลต คือ การผสมสัญญาณข้อมูลเข้ากับสัญญาณความถี่สูง เช่นคลื่นวิทยุ ทำให้เดินทางได้ไกลขึ้น และป้องกันไม่ให้สัญญาณข้อมูลถูกรบกวน การมอดูเลตสัญญาณ แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ แบบอนาล็อก (Analog signal) และแบบดิจิทัล (Digital signal) ซึ่งในการมอดูเลตสัญญาณทางแสงนั้นก็มีอยู่หลายวิธี เช่น การมอดูเลตทางความเข็มแสง การมอดูเลตแบบดูโอไบนารี การมอดูเลตแบบพีเอสเค และการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับหลักการมอดูเลตสัญญาณแสง 2 วิธีคือ การมอดูเลตทางความเข้มแสง และการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค ซึ่งทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันอย่างมากโดยเฉพาะความยุ่งยากซับซ้อนและความทนทานต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ โดยพื้นฐานแล้วการมอดูเลตทางความเข้มแสงนิยมใช้กันมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันเพราะว่าความไม่ยุ่งยากซับซ้อนทั้งอุปกรณ์ทางด้านส่งและทางด้านรับ แต่เมื่อไม่นานนี้ ได้มีงานวิจัยอย่างหลากหลาย [17]-[20] ที่กล่าวถึงข้อดีของการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคเมื่อเทียบกับการมอดูเลตทางความเข้มแสง อาทิเช่น ความทนทานต่อความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสง กำลังงานในการส่งสัญญาณที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับการเรียงตัวของบิตข้อมูลทำให้ผลของสัญญาณรบกวนทางเฟสที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าเท่ากันทุกบิต [10],[11] เป็นต้น

2.4.1 การมอดูเลตทางความเข้มแสง

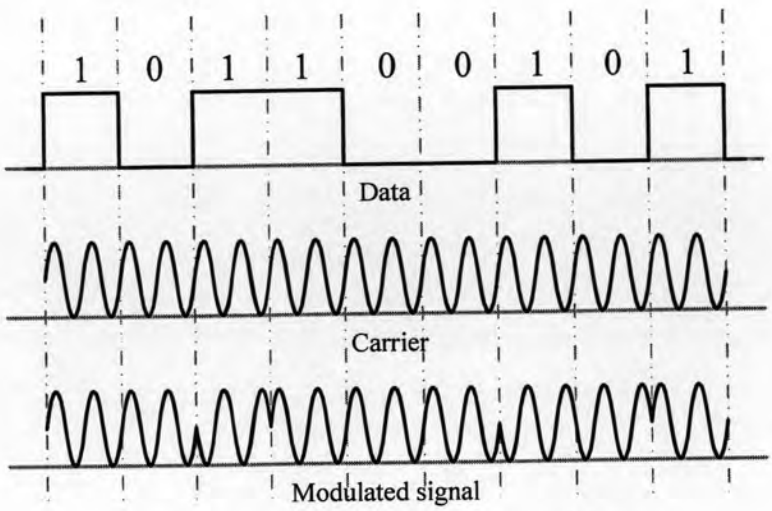
ในการมอดูเลตทางความเข้มแสง สัญญาณข้อมูลจะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังงานทางแสง สัญญาณดิจิทัล ที่เป็น '1' จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังงานค่าหนึ่ง และสัญญาณดิจิทัลที่เป็น '0' ก็จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังงานอีกค่าหนึ่ง โดยทั่วไปสัญญาณดิจิทัลที่เป็น '0' จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังงานศูนย์หรืออาจเรียกได้ว่าไม่ได้ส่งสัญญาณออกไปในช่วงเวลาที่มีสัญญาณขาเข้า (Input signal) เป็นสัญญาณดิจิทัล '0' ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การมอดูเลตสัญญาณทางความเข้มแสง

2.4.2 การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค

กำลังงานของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแบบดีพีเอสเคจะมีขนาดเท่ากันหมดไม่ว่าจะเป็นบิต '0' หรือบิต '1' และการมอดูเลตสัญญาณทางภาคส่งจะมีการป้อนสัญญาณดิจิทัลผลต่างทางเฟสเข้าสู่อุปกรณ์มอดูเลตเฟสทำให้เฟสของสัญญาณขาออกต่างกัน 180 องศา เมื่อสัญญาณที่เข้ามาเป็นบิต '1' เท่านั้น สำหรับทางภาครับจะใช้วิธีการเปรียบเทียบความต่างเฟสระหว่างสัญญาณบิตที่อยู่ติดกัน จึงเป็นข้อดีของการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค ที่ไม่จำเป็นต้องมีการอ้างอิงเฟสระหว่างอุปกรณ์ส่งสัญญาณและอุปกรณ์ทางภาครับ ซึ่งการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค นี้จำเป็นต้องมีส่วนที่ทำหน้าที่ในการประวิงเวลาสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่งบิต (1-bit delay) เพื่อทำหน้าที่ในส่วนของการเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณบิตที่อยู่ติดกัน [11],[17]



รูปที่ 2.11 การมอดูเลตสัญญาณแบบดีพีเอสเค

จากรูปที่ 2.11 เฟสของสัญญาณคลื่นพาห์จะเปลี่ยนไปตามสัญญาณข้อมูล โดยจะมีการเปลี่ยนเฟสไป 180 องศา เมื่อสัญญาณข้อมูลที่เข้ามาเป็นบิต '1' และจะมีเฟสคงเดิมเมื่อสัญญาณที่เข้ามาเป็นบิต '0' ทั้งนี้ขนาดของสัญญาณคลื่นพาห์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2.4.3 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างการมอดูเลตทางความเข้มแสงและการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค

ความแตกต่างขั้นพื้นฐานระหว่างการมอดูเลตทางความเข้มแสงและการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค มีดังนี้คือ

1. การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค จะมีความไวในการตรวจจับสัญญาณที่ภาครับได้ดีกว่าการมอดูเลตทางความเข้มแสงอยู่ประมาณ 3 dB ในกรณีกำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณแต่ละบิตมีค่าเท่ากัน
2. การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค จะมีความทนทานต่อการกระเพื่อมของกำลังสัญญาณที่ภาครับ แต่ในทางกลับกันการกระเพื่อมของกำลังสัญญาณที่ภาครับจะมีอิทธิพลต่อการมอดูเลตทางความเข้มแสง
3. สัญญาณรบกวนทางเฟสจะมีอิทธิพลต่อการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค แต่จะไม่มีผลกระทบต่อการมอดูเลตทางความเข้มแสง

ในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะทางไกล สาเหตุหลักที่ทำให้คุณภาพสัญญาณแย่ลงคือ ดิสเพอร์ชั่น และปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสง การที่จะระบุว่าการมอดูเลตแบบไหนให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่ากัน เราต้องพิจารณาว่าการมอดูเลตแบบไหนให้ความทนทานต่อดิสเพอร์ชั่น และปรากฏการณ์เคอร์มากกว่ากัน

ในกรณีของดิสเพอร์ชั่น การมอดูเลตทั้งสองแบบไม่มีความแตกต่างกันมากเพราะว่าดิสเพอร์ชั่นจะทำให้สัญญาณพัลส์ขยายออกโดยไม่ขึ้นกับรูปแบบการมอดูเลต ส่วนกรณีของปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสง การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค จะมีความทนทานต่อปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสงมากกว่าการมอดูเลตทางความเข้มแสงเพราะกำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณข้อมูลบิต '0' และบิต '1' มีปริมาณเท่ากันดังนั้นผลของความผิดพลาดที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสงแต่ละบิตมีค่าเท่ากัน ด้วยเหตุนี้การมอดูเลตแบบดีพีเอสเคจึงไม่มีผลต่อการดีมอดูเลตด้วยความต่างเฟสที่ภาครับ

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีการจัดการดิสเพอร์ชั่น (Dispersion management)

เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชั่นทำโดยการนำเอาเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชั่นที่ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชั่นและทำให้ค่าดิสเพอร์ชั่นเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่ (2.10)

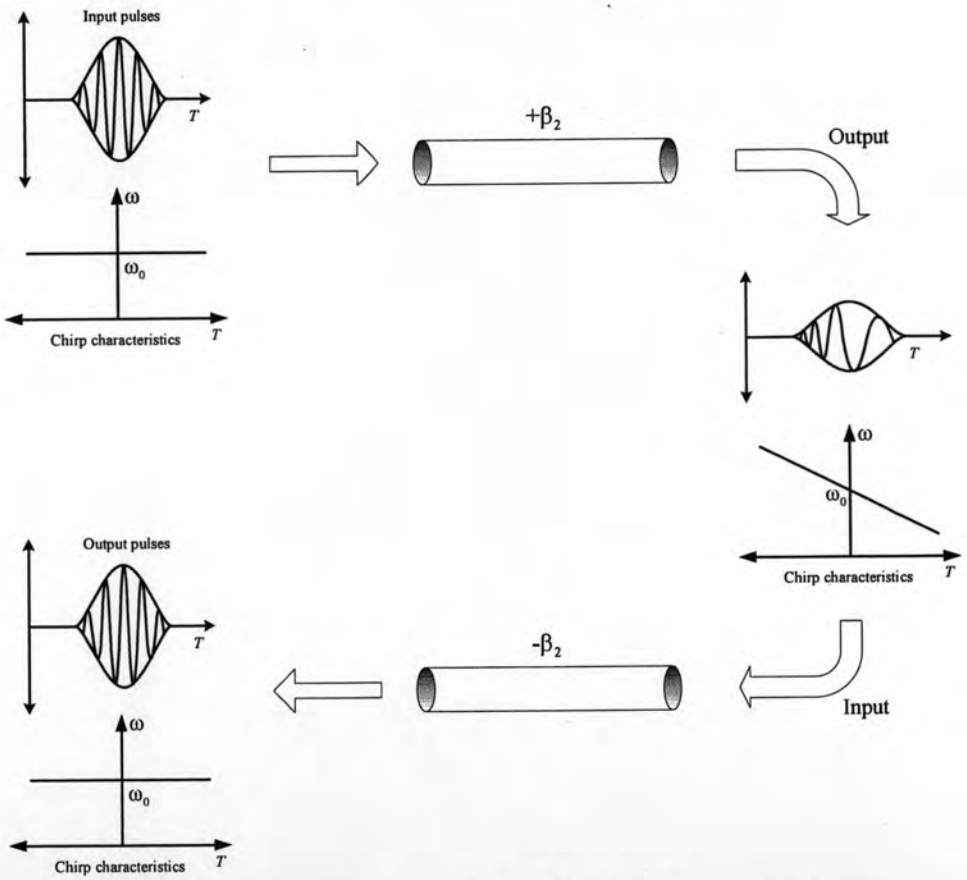
$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \tag{2.10}$$

โดย D_1 คือ ค่าดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [ps/km/nm]

D_2 คือ ค่าดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชั่น [ps/km/nm]

L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [km]

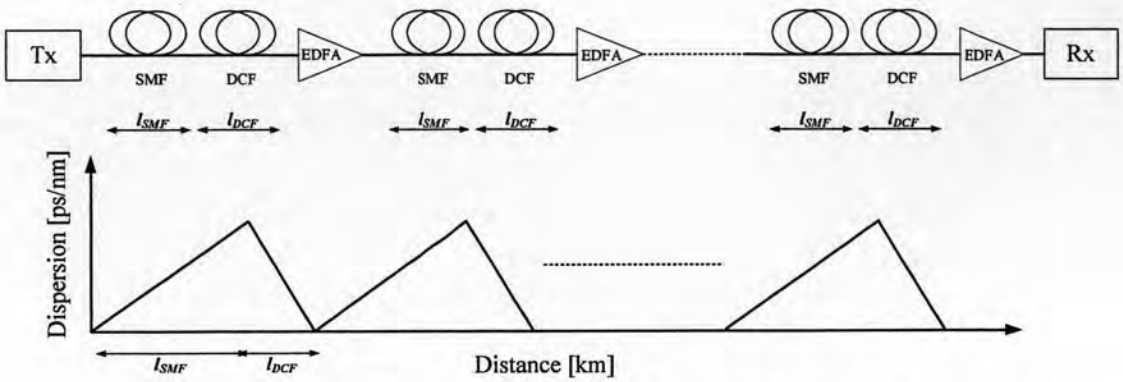
L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชั่น [km]



รูปที่ 2.12 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชั่นเพื่อขจัดความผิดเพี้ยน

รูปที่ 2.12 แสดงถึงวิธีการขจัดความผิดเพี้ยนที่เกิดจากดิสเพอร์ชั่นด้วยเทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชั่น ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี GVD (β_2) ที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชั่นด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า β_2 ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการชดเชยดิสเพอร์ชั่น ส่งผลให้สามารถแก้ไข

ความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ โดยในระบบการสื่อสัญญาณจริงจะมีการต่อการชดเชยดิสเพอร์ชั่นตามที่ได้กล่าวมาเป็นรายคาบดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระบบการสื่อสัญญาณทางแสงที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ

จากรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าการใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ถึงแม้ในระหว่างการสื่อสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าดิสเพอร์ชั่นขึ้นลงตลอดเวลา แต่ค่าดิสเพอร์ชั่นเฉลี่ยรวมของทั้งระบบจะมีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้สัญญาณที่เดินทางไปถึงที่ภาครับไม่เกิดความผิดเพี้ยนเนื่องจากผลของดิสเพอร์ชั่น

เราสามารถแปลงค่าดิสเพอร์ชั่นกับ GVD ได้ดังสมการที่ (2.11)

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2 \tag{2.11}$$

โดยที่ D คือ ค่าดิสเพอร์ชัน [ps/km/nm]

c คือ ค่าคงที่ความเร็วแสงในสุญญากาศ = 2.99739x10^8 m/s

λ คือ ค่าความยาวคลื่น [nm]

β_2 คือ ค่า GVD [ps^2/km]

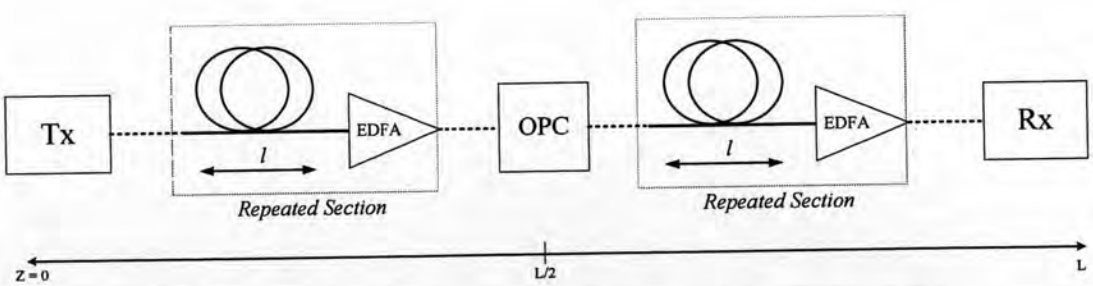
นอกจากนี้การที่ทำการวางความยาวคลื่นโดยให้มีค่าดิสเพอร์ชั่นไม่เป็นศูนย์ยังช่วยลดผลเสียจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง เนื่องจากการมีค่าดิสเพอร์ชั่นจะส่งผลทำให้เกิดการลดลงของค่ากำลังสัญญาณสูงสุด (Peak power) ของสัญญาณ เมื่อมีค่ากำลังสัญญาณสูงสุดไม่สูงนัก ดังนั้นดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่ากำลังสัญญาณมีค่าสูงก็จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่ากำลัง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

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ (Optical phase conjugation for long-haul transmission)

วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบเป็นทางเลือกทางหนึ่งที่สามารถชดเชยรูปคลื่นสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดความผิดเพี้ยนขึ้น โดยการวางอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณไว้ที่กึ่งกลางระบบดังรูปที่ 2.14 เมื่อสัญญาณถูกปล่อยออกจากตัวส่งให้เดินทางในเส้นใยแสง รูปคลื่นสัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นในฝั่งครึ่งแรกของระบบแต่จะสามารถกลับมาเป็นรูปคลื่นสัญญาณเดิมที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นที่เครื่องรับสัญญาณได้ โดยมีเงื่อนไขที่ว่า คุณสมบัติย่อยในสายส่งของทั้งสองฝั่งของระบบจะต้องมีความสมมาตรเมื่อมองจากจุดกึ่งกลางของระบบ อุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณนั้นสามารถสร้างสัญญาณคอนจูเกตได้โดยใช้หลักการจากกระบวนการ FWM ในตัวกลางที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่สาม (Third-order nonlinear medium) ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างรุนแรง โดยเมื่อสัญญาณเข้าทำปฏิกิริยากับสัญญาณจากภายนอกที่ใส่เข้าไปที่เรียกว่าสัญญาณปั๊ม (Pump signal) ที่มีกำลังสูง ใน Third-order nonlinear medium แล้วจะเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ขึ้นมาที่เรียกว่า Idler wave โดยกระบวนการ FWM ซึ่ง Idler wave เป็นคอนจูเกตกับสัญญาณเข้า ดังรูปที่ 2.15 และเป็นไปตามสมการที่ (2.12)

$$2h\omega_p = h\omega_s + h\omega_i \tag{2.12}$$

โดยสมการที่ (2.12) หมายถึง พลังงานโฟตอนของสัญญาณปั๊มถูกแยกออกมาเพื่อเสริมสัญญาณที่ส่งเข้าและสร้าง Idle wave ที่เป็นคอนจูเกตกับสัญญาณที่ส่งเข้า



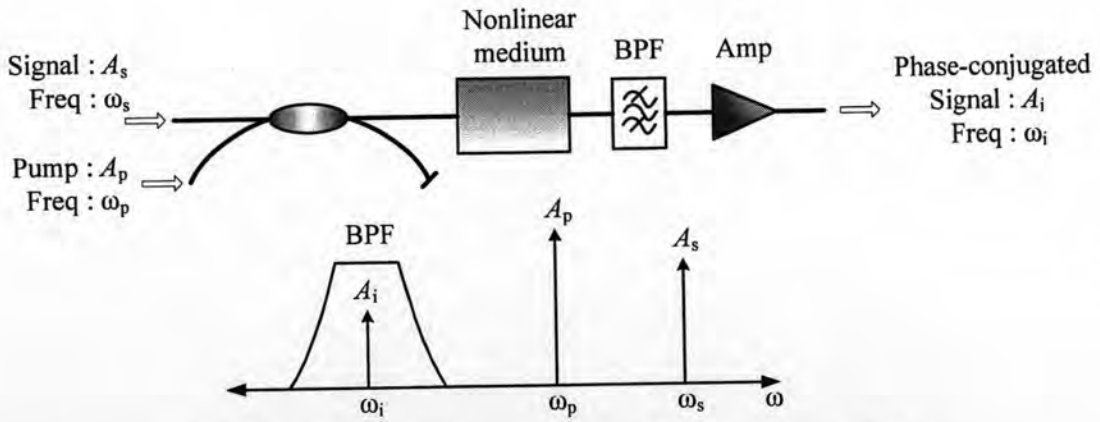
รูปที่ 2.14 ระบบการสื่อสัญญาณทางแสงที่มีการวางอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณไว้ที่กึ่งกลางระบบ

วิธีการลดผลของดิสเพอร์ชั่นของอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Nonlinear Schrödinger equation ($\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i\gamma |A|^2 A$) นั่นคือสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงในช่วงครึ่งแรกก่อนผ่านอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณจะแทนด้วย

สมการ Nonlinear Schrödinger equation และเมื่อสัญญาณเดินทางผ่านอุปกรณ์คอนจูเกต สัญญาณก็จะแทนได้ด้วยสมการที่ (2.13)

$$\frac{\partial A^*}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha A^* + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A^*}{\partial T^2} - i\gamma \left|A^*\right|^2 A^* \qquad (2.13)$$

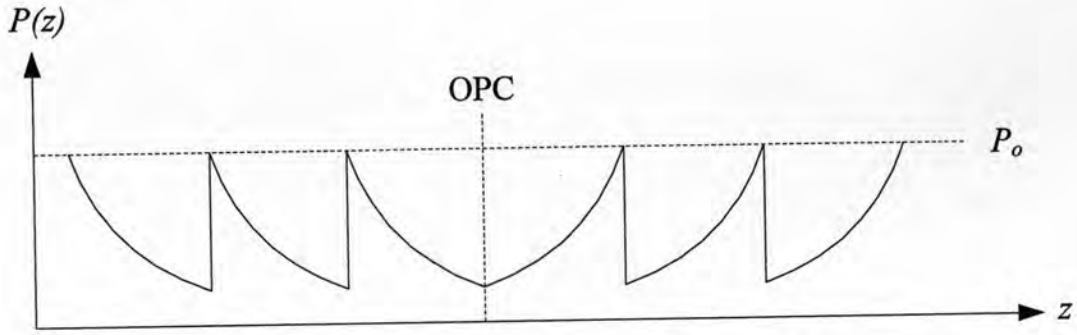
จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณเดินทางไประยะทางหนึ่งจะได้รับผลจากดิสเพอร์ชั่น β_2 และเมื่อผ่านอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณก็จะเกิดการกลับเฟส นั่นคือ พจน์ที่เป็นส่วนจินตภาพ (Imaginary part) จะมีการเปลี่ยนเครื่องหมายจากลบเป็นบวก จากบวกเป็นลบ ดังจะเห็นได้จากที่พจน์ที่เป็นส่วนของดิสเพอร์ชั่นและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีการกลับเครื่องหมายหน้าพจน์ และเมื่อเดินทางต่อไปในเส้นใยแสงเส้นเดิมในช่วงครึ่งหลัง ซึ่งจะได้รับผลจากดิสเพอร์ชั่นค่าเดียวกับครึ่งแรกที่เป็นค่าบวก ก็จะเกิดการหักล้างกัน ทำให้พจน์ของดิสเพอร์ชั่นหายไป นอกจากนั้นอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณยังสามารถจัดการความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้อีกด้วย แต่ไม่สามารถลดได้ทั้งหมด เนื่องจากค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงในช่วงแรกและช่วงหลังของการส่งสัญญาณไม่สมมาตรกัน เหตุเพราะค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงขึ้นกับกำลังสูงสุดของสัญญาณ ถึงแม้กำลังสูงสุดของสัญญาณจะสมมาตรกันดังรูปที่ 2.16 แต่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเอกซ์โพแนนเชียลของกำลังสัญญาณยังส่งผลต่อความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ทำให้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบไม่สามารถลดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้ทั้งหมด



รูปที่ 2.15 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตโดยกระบวนการ FWM ใน third-order nonlinear medium

ในการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบนั้นสามารถชดเชยผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง และดิสเพอร์ชั่นในระบบที่มีระยะสั้นได้อย่างดี แต่ในระบบที่มีระยะยาวจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับ การเปลี่ยนแปลงเป็นรายคาบของสัญญาณกำลัง (Periodic power variation)

และการแกว่งไป-มาของค่าดิสเพอร์ชั่นตลอดทั้งระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณที่เพี้ยนขึ้นที่เครื่องรับ [3]



รูปที่ 2.16 กำลังสัญญาณของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง
ที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ

เงื่อนไขที่สำคัญในการออกแบบเพื่อให้คุณสมบัติของการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบนั้นมีประสิทธิภาพสูงคือ

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

2.7 อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในเส้นใยแสง (Optical Fiber Amplifier)

ในระบบสื่อสารด้วยแสงที่ใช้เส้นใยแสงเป็นสายส่งสัญญาณ ข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจากสถานีต้นทางไปยังผู้รับหรือสถานีปลายทางจะมีความแตกต่างจากข้อมูลเริ่มต้นอยู่ 3 ประการหลัก คือ

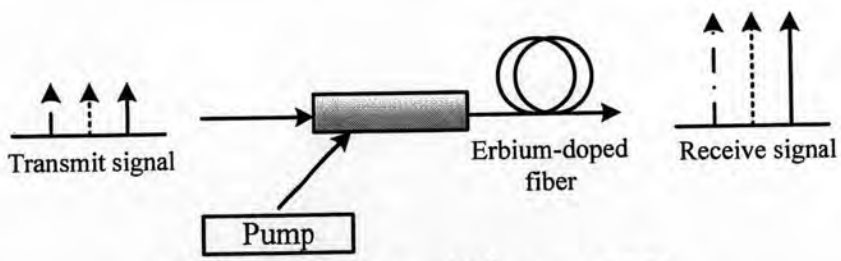
1. พัลส์ของสัญญาณจะมีขนาดเล็กลง นั่นคือ ค่าความเข้มแสง (Optical intensity) หรือกำลังความสว่างของแสงที่ได้รับจะมีค่าน้อยกว่าค่าเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติในการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงเอง เส้นใยแสงที่มีค่าการลดทอนสูง (เช่น 1 dB/km) ย่อมทำให้ค่าความเข้มแสงลดลงได้มากกว่าเส้นใยแสงที่มีค่าการลดทอนต่ำ (เช่น 0.3 dB/km) เมื่อเส้นใยแสงมีขนาดความยาวเท่ากัน

2. ความกว้างของพัลส์สัญญาณเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากการเกิดดิสเพอร์ชั่นในเส้นใยแสง โดยค่าความกว้างพัลส์ที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าแปรผันตรงกับความยาวของเส้นใยแสง กล่าวคือ ยิ่งเส้นใยแสงมีความยาวมากขึ้นเท่าไร ก็ยิ่งทำให้พัลส์มีขนาดกว้างเพิ่มขึ้นเท่านั้น

3. ลักษณะของข้อมูลพัลส์ในระบบดิจิตอลจะเปลี่ยนแปลงไป อันเป็นผลจากสัญญาณรบกวน (noise) และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง การที่สัญญาณพัลส์ของแสงที่ปลายทางมีขนาดความกว้างมากๆ และรูปแบบไม่เหมือนเดิมนั้น จะส่งผลให้อัตราเร็วบิตหรือบิตเรตมีขนาดลดลงไปด้วย

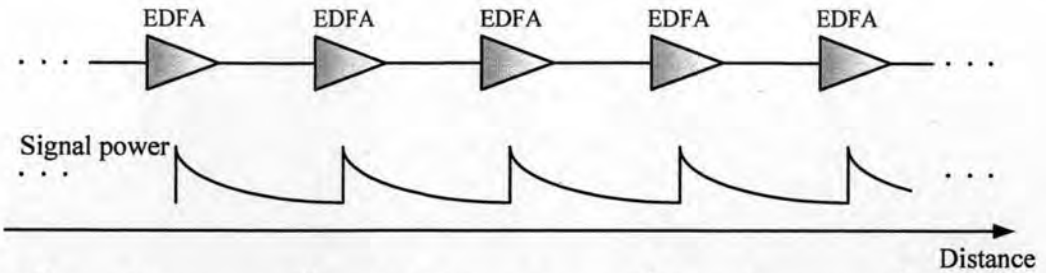
การที่จะทำให้บิตเรตหรือความเร็วในการส่งข้อมูลมีมากขึ้น ต้องทำให้ข้อมูลแสงเดินทางจากผู้ส่งไปถึงยังผู้รับได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการขัดจังหวะ กล่าวคือข้อมูลแสงต้องไม่มีการถูกเปลี่ยนกลับไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าในระหว่างการเดินทาง ในขณะเดียวกันขนาดและรูปแบบของสัญญาณข้อมูลจะต้องถูกปรับปรุงให้มีลักษณะใกล้เคียงกับข้อมูลเดิมอยู่เสมอด้วย ซึ่งด้วยเทคโนโลยีปัจจุบันสามารถกระทำได้โดยใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงโดยใช้เส้นใยแสงหรือ Optical fiber amplifier เป็นสถานีทวนสัญญาณ หลักการทำงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงอาศัยหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่ใช้การกระตุ้นพลังงานจากภายนอกเข้าไปในสสาร แล้วทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมของสสารนั้นเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (Ground state) ไปสู่สถานะกระตุ้น (Excite state) แต่เนื่องจากธรรมชาติของอิเล็กตรอนจะไม่สามารถดำรงอยู่ในสถานะอื่นที่ไม่ใช่สถานะพื้นได้ และจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกที่ป้อนให้ก่อนหน้านั้น จึงต้องคายพลังงานส่วนเกินนั้น ออกมาในรูปของพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของสสารเพื่อทำให้อิเล็กตรอนกลับสู่สถานะพื้นได้ หากเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมพลังงานส่วนเกินที่อิเล็กตรอนคายออกก็จะกลายเป็นพลังงานของแสงตามต้องการได้

หากเราสร้างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงให้เกิดขึ้นบนเส้นใยแสงได้เลย จะเรียกว่าเป็น Optical fiber amplifier (OFA) หรือเรียกสั้นๆ ว่า Fiber amplifier วัสดุที่สามารถเปล่งแสงสีเดียวกับแสงที่ใช้ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงในกระบวนการของ 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 จะมีพฤติกรรมเหมือนเดินทางในเส้นใยแสงทั่วไป คือเกิดการลดทอนสัญญาณและเกิดดิสเพอร์ชั่นตามปกติ โดยจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ กับสัญญาณข้อมูล แต่ถ้าทำการกระตุ้นเส้นใยแสงพิเศษนี้ด้วยการป้อนพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่น 980 นาโนเมตรหรือ 1480 nm ให้กับ EDF ดังรูปที่ 2.17 ข้อมูลแสงที่ความยาวคลื่น 1.55 ไมครอน ที่เดินทางผ่านเข้าไปใน EDF จะถูกทำให้มีพลังงานเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากการรวมกันทางความเข้มแสงของสัญญาณเดิมที่นำข้อมูล กับสัญญาณแสงที่เปล่งออกมาใหม่จากการกระตุ้นพลังงานเข้าไป (ซึ่งแสงทั้งสองนี้ต้องมีขนาดความยาวคลื่นที่ตรงกัน) จึงเสมือนกับการขยายสัญญาณข้อมูลแสงที่เดินทางในระบบสายส่งให้มีความเข้มแข็งแสงเพิ่มขึ้น พร้อมที่จะเดินทางไปในระยะทางที่ไกลออกไปได้



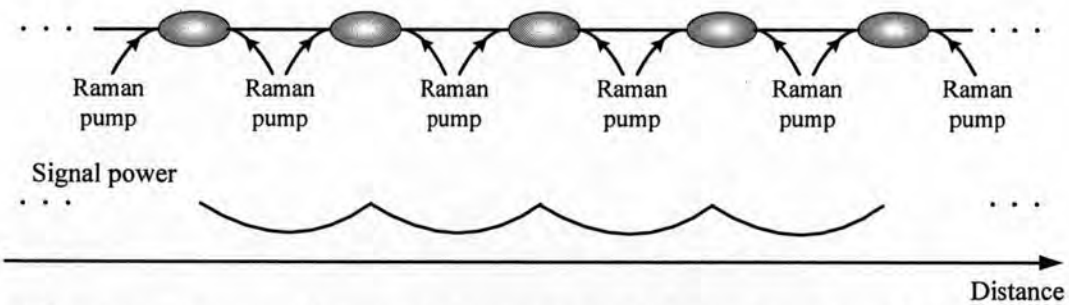
รูปที่ 2.17 ลักษณะการต่อใช้งานของ EDFA

เมื่อนำ EDFA มาใช้งานในระบบการสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงลักษณะของกำลังสัญญาณที่เกิดขึ้นจะเป็นดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกำลังของสัญญาณที่เดินทางในระบบการสื่อสัญญาณทางแสงที่ใช้ EDFA เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

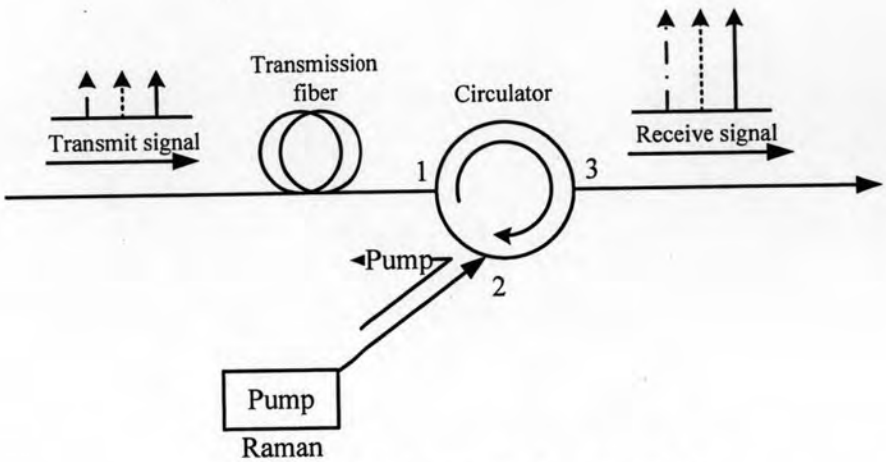
จากรูปที่ 2.18 จะเห็นว่ากำลังของสัญญาณที่เดินทางในระบบการสื่อสัญญาณทางแสงที่ใช้ EDFA เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณนั้น จะมีการลดลงแบบเอกซ์โพแนนเชียล และเมื่อผ่าน EDFA กำลังของสัญญาณก็จะมีการเพิ่มขึ้นในทันที และการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นซ้ำตลอดการสื่อสัญญาณ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในลักษณะนี้ จะทำให้สัญญาณได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงอย่างรุนแรง อันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงนั้น แปรผันโดยตรงกับกำลังของสัญญาณ ต่อมาจึงได้มีการคิดค้นอุปกรณ์ขยายสัญญาณชนิด Distributed Raman amplifier หรือ DRA ที่ให้ค่ากำลังสัญญาณที่ค่อนข้างเรียบ มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งลักษณะของกำลังสัญญาณนั้นจะขึ้นอยู่กับกำลังสัญญาณกระตุ้นที่ใส่เข้าไป



รูปที่ 2.19 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกำลังของสัญญาณที่เดินทางในระบบการสื่อสัญญาณทางแสงที่ใช้ DRA เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

การขยายสัญญาณของ DRA เกิดจากกระบวนการที่เรียกว่าการ กระเจิงของรามาน (Raman scattering) ที่ค้นพบโดย Sir Chandrasekhara ในปี ค. ศ. 1928 หลักการทำงานของ DRA คือ ลำแสงโฟตอนที่มาจากปั๊มกำลังไปกระตุ้นให้โมเลกุลของตัวกลางซึ่งก็คือเส้นใยแสง มีพลังงานสูงขึ้นและย้ายจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้น และเมื่อมีสัญญาณที่มีความยาวคลื่นที่

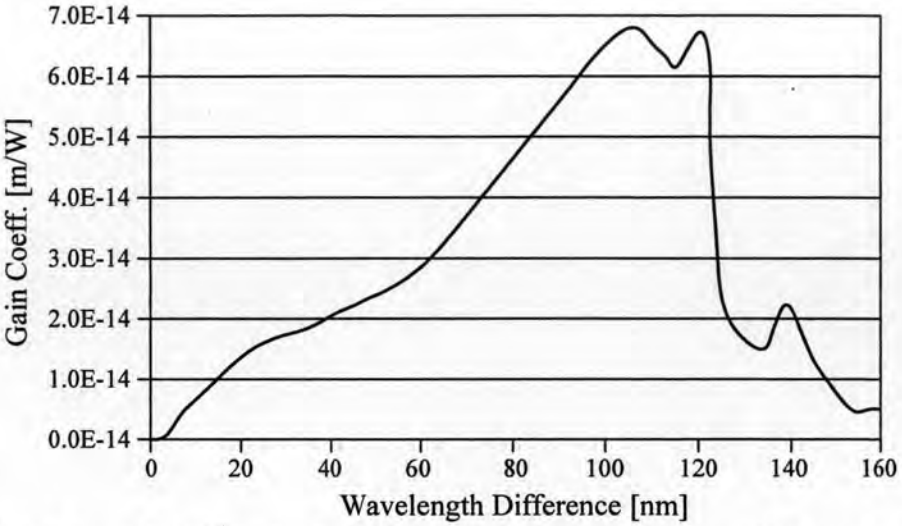
เหมาะสมผ่านเข้ามา โมเลกุลนั้นก็จะกลับสู่สถานะพื้นและถ่ายเทพลังงานไปยังสัญญาณที่ผ่านเข้ามา ทำให้สัญญาณมีกำลังที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.20 ลักษณะการต่อใช้งานของ DRA

อีกข้อดีของ DRA คือ ไม่ต้องทำการเปลี่ยนเส้นใยแสงที่ใช้ในระบบ เนื่องจากการต่อใช้งานของ DRA นั้น ทำโดยการต่อแหล่งจ่ายสัญญาณทางแสงอีกแหล่งหนึ่งเพื่อส่งสัญญาณกระตุ้นเข้าไปในเส้นใยแสงเดิมที่ใช้ในการสื่อสัญญาณดังรูปที่ 2.20 โดยสัญญาณกระตุ้นที่ส่งเข้าไปจะต้องมีความยาวคลื่นแตกต่างกับความยาวคลื่นของสัญญาณข้อมูล ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมระหว่างปั๊มกำลังและสัญญาณที่ต้องการขยาย คือ ให้ปั๊มกำลังมีความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวคลื่นของสัญญาณประมาณ 100 nm ดังรูปที่ 2.21 นอกจากนี้ DRA ยังสามารถทำการขยายสัญญาณได้พร้อมๆ กันทีละหลายความยาวคลื่น เมื่อใส่กำลังสัญญาณกระตุ้นหลายสัญญาณที่มีความยาวคลื่นและกำลังที่เหมาะสมเข้าไปในระบบ

I 2385839



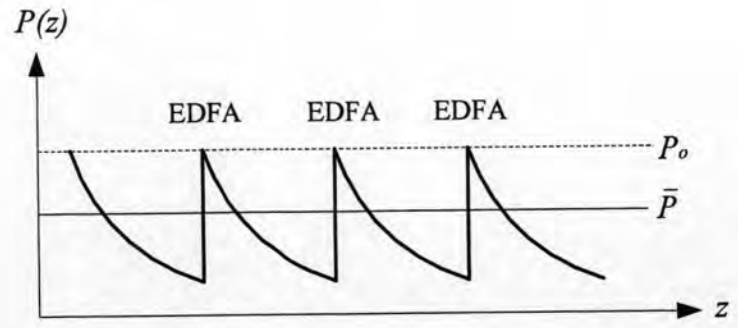
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายของ DRA กับความต่างระหว่างความยาวคลื่นของสัญญาณกระตุ้นกับความยาวคลื่นของสัญญาณข้อมูล

ความแตกต่างขั้นพื้นฐานระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงชนิด EDFA และชนิด DRA มีดังนี้คือ

1. เส้นใยแสงที่ใช้เป็นตัวกลางของ EDFA จะเป็นเส้นใยที่มีการเจือสาร (doped) ที่เรียกว่า Erbium แต่ของ DRA จะเป็นเส้นใยแสงปกติไม่มีการเจือสารใดๆ
2. EDFA จะมีอัตราขยาย (gain) ประมาณ 20 dB ซึ่งสูงกว่า DRA ที่มีค่า 4-11 dB ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังของสัญญาณกระตุ้นที่จ่ายเข้ามา
3. ช่วงความยาวคลื่นของสัญญาณกระตุ้นที่ใช้สำหรับ EDFA คือ 980 nm และ 1480 nm เท่านั้น ในขณะที่ของ DRA คือ ต่ำกว่าความยาวคลื่นของสัญญาณที่ต้องการขยาย 100 nm ดังนั้น DRA จึงมีช่วงความยาวคลื่นที่ขยายได้กว้างขวาง และหลากหลายกว่า

2.8 ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง (Path-averaged power)

เนื่องจากกำลังของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงที่ใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี หรือการคำนวณทางตัวเลข ถ้าต้องใช้ค่ากำลังสัญญาณที่เปลี่ยนไปมาเช่นนี้ จะทำให้การวิเคราะห์หรือคำนวณทำได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางในการคำนวณแทนเพื่อความรวดเร็ว โดยในการหาค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางนั้นจะกำหนดให้ระบบไม่มีผลจากดิสเพอร์ชั่น ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงและสัญญาณรบกวนอื่นๆ ดังนั้นรูปของสัญญาณจะเป็นดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 กำลังสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงในระบบสื่อสารทางแสงที่วางอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงเป็นรายคาบ

จากรูปที่ 2.22 จะเห็นว่ากำลังของสัญญาณจะลดลงแบบเอกซ์โพแนนเชียลไปตามระยะทาง และจะกลับมามีขนาดของกำลังสัญญาณเท่าเดิมเมื่อผ่านอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง ซึ่งลักษณะของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปเช่นนี้เป็นรายคาบ ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตลอดระยะการสื่อสัญญาณจึงเท่ากับค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยในหนึ่งช่วงอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ดังนั้นในการคำนวณหาค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบจึงพิจารณาในหนึ่งช่วงอุปกรณ์ขยายสัญญาณเท่านั้นก็เพียงพอ

ในการหาค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยนั้น จะเริ่มจากสมการที่ (2.14) ซึ่งเป็นสมการแสดง Envelope ของสัญญาณพัลส์เดี่ยวรูปร่าง Gaussian $A(z)$ ที่เดินทางในเส้นใยแสงซึ่งคิดผลของอัตราการลดทอนเพียงอย่างเดียว

$$A(z) = \sqrt{P_0}\exp(-\alpha z/2) \tag{2.14}$$

โดย z เป็นระยะทางที่แสงเดินทางไป กำลังสูงสุดของ $A(z,T)$ ที่เดินทางไปในเส้นใยแสง ($P(z)$) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.15)

$$P(z) = P_0\exp(-\alpha z) \tag{2.15}$$

จากสมการที่ (2.15) เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยในหนึ่งช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณตามสมการที่ (2.16)

$$\overline{P}_L = \frac{1}{l_a}\int_0^{l_a} P(z)dz \tag{2.16}$$

จะทำให้ได้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง ตามสมการที่ (2.17)

$$\overline{P}_L = P_0\left[\frac{1-\exp(-\alpha l_a)}{\alpha l_a}\right] \tag{2.17}$$

โดย $\overline{P}_L$ คือ ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณและ l_a คือ ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณ