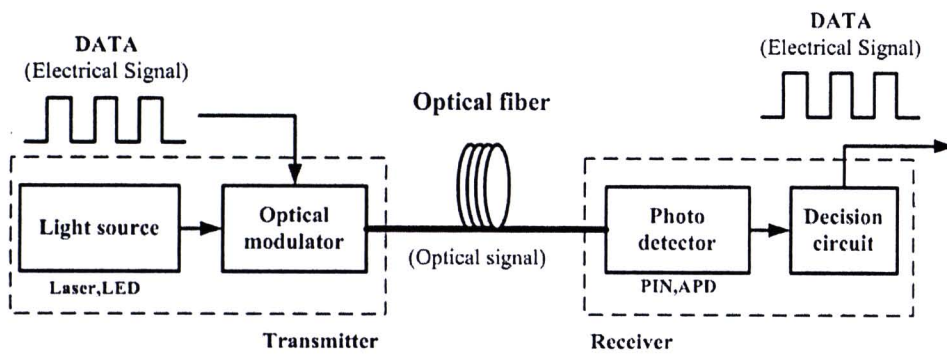


บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการสื่อสารทางแสง

เนื้อหาของทฤษฎีที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 6 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะกล่าวถึงระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงขั้นพื้นฐาน การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะไกลรวมไปถึงการแนะนำให้รู้จักว่าอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องมีในระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงอย่างคร่าวๆ สำหรับส่วนที่สองเป็นการแนะนำถึงทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงซึ่งได้แก่ การลดทอนกำลังสัญญาณ และผลกระทบของดิสเพอร์ชัน สำหรับส่วนที่สามเป็นการแนะนำทฤษฎีเบื้องต้นของเส้นใยแสงและมาตรฐานของเส้นใยแสงที่ใช้ใน PON ส่วนที่สี่เป็นการแนะนำมาตรฐานต่างๆ ของ PON ส่วนที่ห้าเป็นการอธิบายระบบ OCDMA-PON และสุดท้ายจะกล่าวถึงเทคนิคในการจัดการดิสเพอร์ชันเพื่อลดผลดิสเพอร์ชันที่มีต่อสัญญาณที่เดินทางไปในเส้นใยแสง

2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

ในระบบสื่อสารแบบใช้สายสัญญาณนั้น เส้นใยแสงได้ถูกนำมาใช้เป็นสื่อสัญญาณอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ โดยทั่วไประบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1 ซึ่งจะประกอบด้วย องค์ประกอบหลัก ๆ คือ อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง (optical transmitter) เส้นใยแสง (optical fiber) และอุปกรณ์รับสัญญาณแสง (optical receiver)

การมอดูเลตสัญญาณแสงมีอยู่ สองประเภทหลัก ๆ คือ การมอดูเลตภายนอก (external modulation) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (light source) และอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ

(modulator) แยกออกจากกัน ส่วนอีกประเภทจะเป็นการมอดูเลตโดยตรง (direct modulation) ซึ่งแหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะรวมอยู่เป็นอุปกรณ์เพียงชุดเดียว

เส้นใยแสงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำสัญญาณแสงจากต้นทางไปยังปลายทาง เส้นใยแสงที่ใช้งานอยู่จะเป็นโหมดเดียว single-mode fiber (SMF) ซึ่งมีราคาสูง แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำ (attenuation coefficient) ส่วนแบบ multi-mode fiber (MMF) ซึ่งมีราคาถูกกว่า SMF แต่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสูงกว่า SMF อีกทั้งแบบ DSF ซึ่งจะมีคุณสมบัติพิเศษ คือ กระจายความยาวคลื่น zero dispersion จะเป็นค่าเดียวกับความยาวคลื่นที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังงานต่ำที่สุด (1550 nm) และ NZ-DSF ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้ในระบบมัลติเพล็กซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น

อุปกรณ์รับสัญญาณแสง ประกอบด้วยอุปกรณ์สองชนิดคือ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (photodetector) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้เป็น positive intrinsic negative junctions (PIN) และ Avalanche photodiode (APD) ส่วนองค์ประกอบที่สองของอุปกรณ์รับสัญญาณแสงคือ วงจรตัดสินใจ (decision circuit) ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าสัญญาณขาออกควรจะเป็นบิต '0' หรือ '1' ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า decision threshold ภายในวงจรตัดสินใจ

2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

เนื่องจากสัญญาณแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังนั้นสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงย่อมมีความสัมพันธ์กับสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) โดยเริ่มต้นพิจารณาการเดินทางของสัญญาณแสงจากสมการความหนาแน่นกระแส และสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จนท้ายที่สุด จะได้สมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงเป็นไปดังสมการ (2.1) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเงอร์ (nonlinear Schrödinger equation: NLSE) [28]

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

โดยที่ A เป็นกรอบคลื่น (envelope) ของสัญญาณ, α เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (attenuation coefficient) β_2 เป็นค่า group-velocity dispersion (GVD), γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear coefficient), z เป็นระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใย

แสง และ T เป็นกรอบเวลาอ้างอิงที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม (v_g) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$T = t - \frac{z}{v_g} \quad (2.2)$$

โดยที่ t เป็นเวลาจริง เมื่อพิจารณาพจน์ทางขวามือของสมการ (2.1) ที่แสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณ A พจน์แรกคือการลดทอนกำลังสัญญาณ (α) ซึ่งเพิ่มมากขึ้นตามระยะทางของเส้นใยแสง นั่นคือเมื่อสัญญาณเดินทางไปในเส้นใยแสงจะทำให้กำลังงานของสัญญาณแสงลดต่ำลง แต่เราสามารถชดเชยกำลังงานของสัญญาณได้ด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง สำหรับพจน์ที่สอง คือ GVD (β_2) เป็นส่วนที่ส่งผลให้สัญญาณพัลส์ขยายกว้างออก และสำหรับพจน์สุดท้ายคือ ผลของปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงที่ทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง และยังส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออกอีกด้วย โดยที่ความรุนแรงของปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูงสุด (peak power) ของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง ทั้งนี้สามารถแยกคิดปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อรูปร่างของสัญญาณได้ดังนี้

2.2.1 การสูญเสียกำลังของสัญญาณ (fiber attenuation)

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

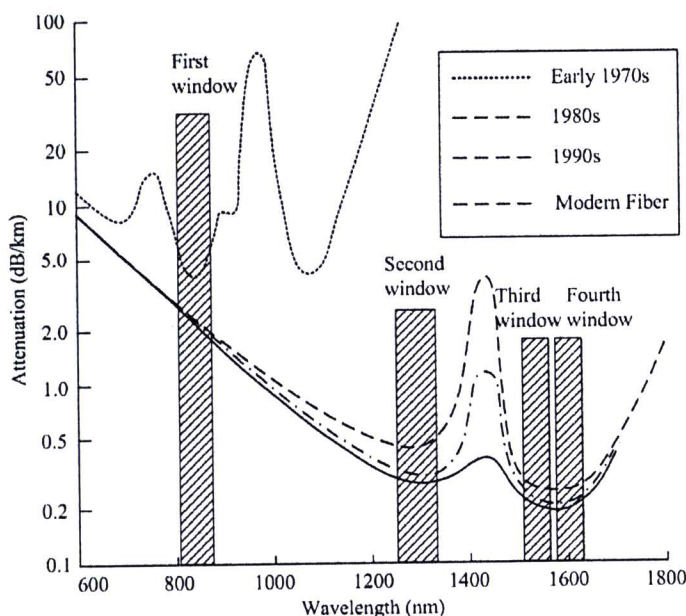
แสงที่เดินทางในเส้นใยแสงจะถูกลดทอนพลังงานแบบเอกซ์โพเนนเชียลไปตามระยะทางหนึ่งๆ โดยมีสมการแสดงการลดทอนกำลังสัญญาณดังนี้

$$P(L) = P(0) - \alpha L \quad (2.3)$$

โดยที่ $P(0)$ คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล [dB]

$P(L)$ คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะ L กิโลเมตร [km] จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล [dB]

α คือ ค่าคงตัวของการลดทอนที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล/กิโลเมตร [dB/km]



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนกำลังงาน และความยาวคลื่นที่ผลิตมาตั้งแต่

ปีค.ศ. 1970 [1]

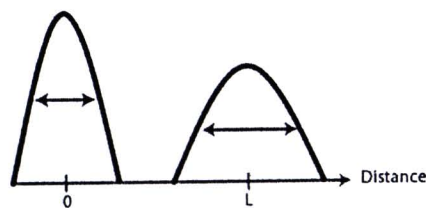
โดยที่ค่าคงตัวการลดทอน α นั้นจะแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงเส้นโค้งทั้ง 3 เส้น โดยเส้นบนสุดซึ่งเป็นเส้นประ แสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงปลายยุค 80 และล่างสุดเป็นเส้นทึบซึ่งแสดงถึงเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (first window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกา และจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความขึ้น และผลของ Rayleigh scattering ซึ่งทำให้อัตราลดทอนสัญญาณมีค่าสูงดังเส้นประในรูป หลังจากนั้นก็มี การพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณในยุค ที่ 2 (Second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการลดทอน สัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ในช่วงปลายปี 1977 Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (Third window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm ซึ่งมี อัตราการลดทอนสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการใช้งานนั้นถ้าเป็นการส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN เป็นต้น เราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งข้อมูลทางไกลจะใช้ ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (Fourth window) ให้เปลี่ยนไปใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm ซึ่งไม่ได้มีอัตราการลดทอนสัญญาณที่ลดลง แต่

อาจจะทำให้ความยุ่งยากในการส่งสัญญาณระยะทางไกลหรือระบบการสื่อสารสัญญาณแบบมีการมัลติเพล็กซ์หลายความยาวคลื่นลดลง

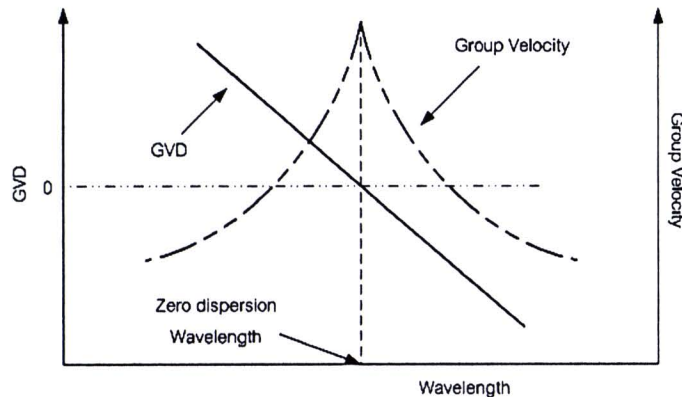
2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion)

การเกิดดิสเพอร์ชัน (dispersion) ในเส้นใยแสง มีสองประเภทด้วยกัน คือ inter-modal dispersion สำหรับ MMF และ intra-modal dispersion หรือ chromatic dispersion สำหรับ SMF ในการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงระยะไกล เมื่อส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (SMF) ผลของการกระจายตามความถี่ของเส้นใยแสงจะเด่นชัดเนื่องจากสัญญาณแสงประกอบขึ้นด้วยหลายความถี่ซึ่งแต่ละความถี่มีค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่ต่างกัน ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้จะทำให้แสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันซึ่งจะทำให้พัลส์สัญญาณมีการขยายตัวออก (broadening) และเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ทั้งนี้เราจะเลือกใช้ SMF ในการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงเพราะว่า SMF สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตที่สูงกว่าเนื่องจากแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลกว้างกว่ารวมไปถึงอัตราการสูญเสียกำลังงานที่น้อยกว่า ดังนั้นดิสเพอร์ชันที่ส่งผลกระทบต่อระบบจะเป็นแบบ chromatic dispersion

สาเหตุของการเกิด chromatic dispersion คือคุณสมบัติของความเร็วกลุ่มมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละความยาวคลื่น ทำให้สัญญาณพัลส์ที่ประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกันเป็นผลให้สัญญาณพัลส์ที่ปลายทางขยายออก ซึ่งการขยายออกของสัญญาณพัลส์จะส่งผลให้ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณพัลส์ลดลงด้วยดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลของดิสเพอร์ชันต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

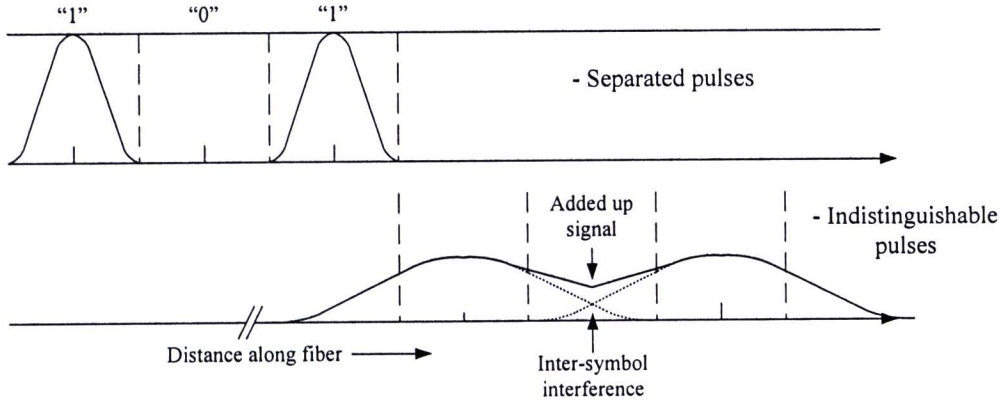


รูปที่ 2.4 การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงตัวอย่างการแจกแจงความเร็วกลุ่ม และ GVD เทียบกับความยาวคลื่นซึ่งเห็นได้ว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกัน และจะมีค่าสูงสุดที่ zero-dispersion wavelength

เราสามารถแบ่งช่วงของดิสเพอร์ชันในรูปที่ 2.4 ออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ ดิสเพอร์ชันปกติ (normal dispersion) ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 > 0$ โดยในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีความเร็วกลุ่มมากกว่า ดิสเพอร์ชันผิดปกติ (anomalous dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 < 0$ ในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมี β_2 ความเร็วกลุ่มน้อยกว่า และดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (zero dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า $\beta_2 = 0$ โดยสัญญาณที่มีความยาวคลื่นนี้จะมีค่าความเร็วกลุ่มสูงที่สุด

GVD จะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของสัญญาณพัลส์อย่างมากในกรณีที่มีการส่งสัญญาณพัลส์เป็นขบวนออกไปในเส้นใยแสงเป็นระยะทางไกล ๆ และสัญญาณพัลส์ที่อยู่ติดกันจะมีโอกาสเลื่อมกันมากขึ้น (overlap) จนทำให้เกิด inter-symbol interference (ISI) และอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจ (error decision) ว่าสัญญาณแสงที่วิ่งเข้ามาควรจะเป็น บิต '1' หรือ บิต '0' ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิด Inter-symbol interference (ISI)

รูปที่ 2.5 แสดงถึงการเกิด ISI ที่เกิดจากการขยายตัวของสัญญาณพัลส์ โดยเริ่มแรกส่งสัญญาณแบบมอดูเลตความเข้มแสงด้วยบิต '1', '0', '1' ตามลำดับ สัญญาณพัลส์ระหว่างบิตแยกออกจากกันอย่างชัดเจน เมื่อสัญญาณพัลส์เดินทางในเส้นใยแสงผลของ GVD ทำให้สัญญาณพัลส์ขยายออก จนกระทั่งเกิด ISI ผลของ ISI ทำให้กำลังงานของสัญญาณในช่วงเวลา (time slot) บิต '0' เพิ่มขึ้น และอาจทำให้ตรวจจับสัญญาณผิดพลาดจากบิต '0' กลายเป็นบิต '1' หากว่าสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมาเลยค่าขอบเขตที่เครื่องตรวจจับสัญญาณกำหนดไว้

เราสามารถคำนวณการขยายตัวของสัญญาณพัลส์เนื่องจาก chromatic dispersion โดยพิจารณาให้ τ แทนการประวิงแพร่กระจาย (propagation delay) ที่ความถี่ ω [23]

$$\tau = \frac{L}{v_g} \quad (2.4)$$

โดยที่ L แทนความยาวของเส้นใยแสงหน่วยกิโลเมตร [km]

v_g แทนความเร็วกลุ่ม (group velocity) ตรงกันที่ความถี่ ω เท่ากับ $v_g = \frac{1}{\beta_1} = \frac{\partial \omega}{\partial \beta}$

β แทนด้วยค่าคงที่การแพร่กระจาย (propagation constant) และ $\beta_1 = \frac{\partial \omega}{\partial \beta}$

จากสมการที่ (2.4) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \tau}{\partial \omega} = L \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{1}{v_g} \right) = L \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = L \beta_2 \quad (2.5)$$

เมื่อ $\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}$ ถ้าสัญญาณมีความกว้างสเปกตรัมความถี่เท่ากับ $\Delta \omega$ ดังนั้นความแตกต่างการประวิงแพร่กระจายในแต่ละส่วนประกอบของสเปกตรัมสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (2.6)

$$\Delta \tau = \left| \frac{\partial \tau}{\partial \omega} \right| \Delta \omega = \left| \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right| L \Delta \omega = |\beta_2| L \Delta \omega \quad (2.6)$$

การขยายตัวของสัญญาณพัลส์สามารถเขียนในรูปของสัมประสิทธิ์ GVD D (ps/km/nm) ได้ดังสมการที่ (2.7)

$$D = \frac{1}{L} \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = \frac{1}{L} \frac{\partial \tau}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial \omega}{\partial \lambda} = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{2\pi c}{\lambda} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \quad (2.8)$$

โดยที่ λ คือความยาวคลื่นหน่วยนาโนเมตร [nm]

c คือ ความเร็วของสุญญากาศเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที [m/s]

เมื่อนำสมการที่ (2.8) ไปแทนค่าในสมการที่ (2.7) จะได้ว่า [30]

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.9)$$

ดังนั้นเราสามารถคำนวณการขยายตัวของสัญญาณพัลส์ในรูปของ D โดยนำสมการที่ (2.9) ที่ได้ไปแทนค่าลงในสมการที่ (2.7) ได้ดังนี้

$$\Delta \tau = |D| \Delta \lambda L \quad (2.10)$$

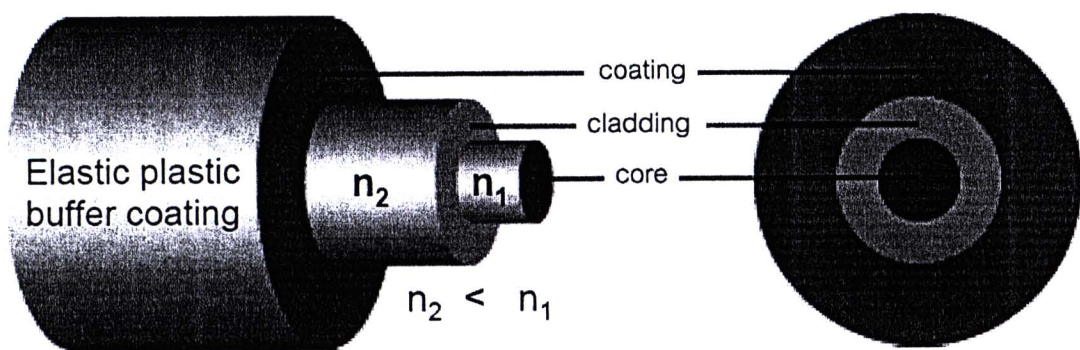
เมื่อ $\Delta \lambda$ แทนความกว้างสเปกตรัมของสัญญาณแสง

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับเส้นใยแสง

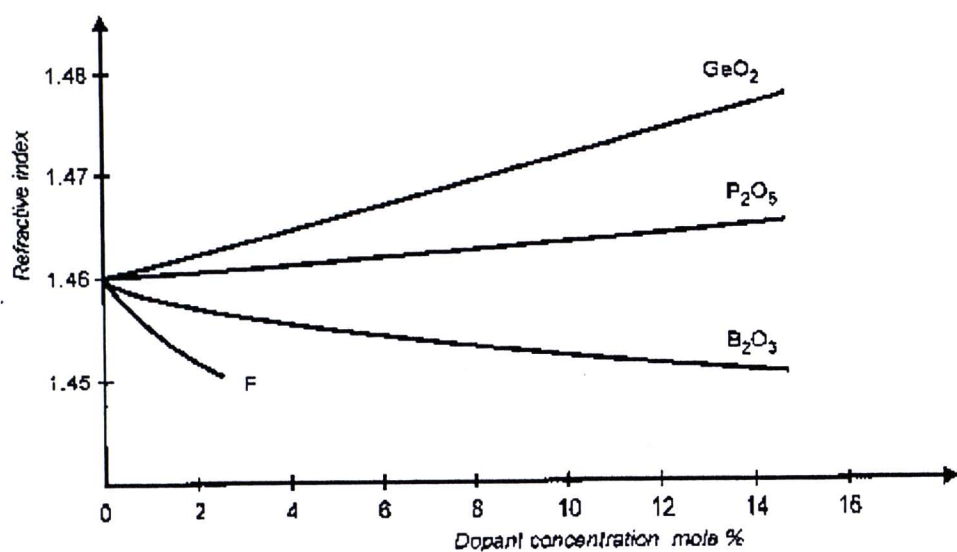
เส้นใยแสงเป็นสื่อสัญญาณที่ใช้ในระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงซึ่งอาศัยทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงผลิตจากวัสดุที่เป็นฉนวน (dielectric) เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือพลาสติก (plastic optical fiber: POF) ทั้งนี้เส้นใยแสงที่ทำจาก SiO_2 นั้นมีค่าการลดทอนของสัญญาณซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาที่ก่อให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่น้อยกว่าเส้นใยแสงที่ทำจากพลาสติก จึงนิยมใช้เส้นใยแสงที่ทำจาก SiO_2 ในการส่งสัญญาณในระยะทางที่ใกล้ๆ (short transmission) ไปจนถึงระยะทางไกล (long haul transmission) ที่ใช้เส้นใยแสงที่มีค่าการลดทอนของสัญญาณที่น้อยมากๆ

เส้นใยแสงประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือแกนกลาง (core) และวัสดุหุ้ม (cladding) โดยที่ค่าดัชนีหักเหของ core สูงกว่าค่าดัชนีหักเหของ cladding อยู่เล็กน้อย เพื่อให้สัญญาณแสงที่ส่งมาในเส้นใยแสงเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในเส้นใยแสง ไม่เกิดการสะท้อนออกไปนอกเส้นใยแสง ทำให้แสงสามารถเดินทางผ่านเส้นใยแสงไปได้เป็นระยะทางไกลๆ โดยที่มีการสูญเสียพลังงานของแสงที่น้อยมาก รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของเส้นใยแสงและค่าดัชนีหักเหของ

core และ cladding ของเส้นใยแสง การสร้างเส้นใยแสงให้มีค่าดัชนีหักเหของ core และ cladding ที่ต่างกันทำได้โดยการใส่สารเจือปน (dopant) [1] เช่น ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (Phosphorus pentoxide: P_2O_5) หรือเจอร์มาเนียมไดออกไซด์ (Germanium dioxide: GeO_2) ลงไปใน SiO_2 เพื่อให้ค่าดัชนีหักเหมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย หรือใส่สารไดโบรอนไตรออกไซด์ (Diboron trioxide: B_2O_3) ลงไปใน SiO_2 เพื่อให้ค่าดัชนีหักเหมีค่าลดลงเล็กน้อย ดังนั้นการสร้างเส้นใยแสงจึงอาจใช้ core ที่ทำจาก $GeO_2 - SiO_2$ หรือ $P_2O_5 - SiO_2$ และ cladding ที่ทำจาก SiO_2 หรือใช้ core ที่ทำจาก SiO_2 หรือ $GeO_2 - B_2O_3 - SiO_2$ และ cladding ที่ทำจาก $B_2O_3 - SiO_2$ ตามลำดับ รูปที่ 2.7 แสดงค่า refractive index ของ SiO_2 เมื่อถูกเจือปนด้วยสารเจือปนด้วยสารชนิดต่างๆ



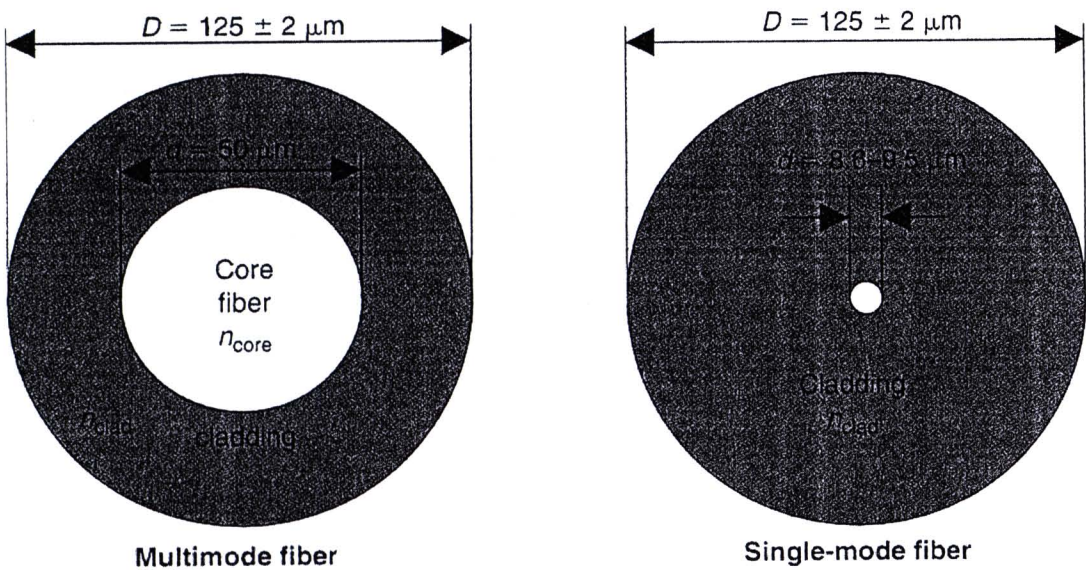
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบและค่าดัชนีหักเหของ core และ cladding ในเส้นใยแสง



รูปที่ 2.7 ค่า refractive index ของ SiO_2 ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อถูกเจือปนด้วยสารชนิดต่างๆ [1]

เส้นใยแสงแบ่งตามจำนวนของโหมดในการสื่อสารสัญญาณได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

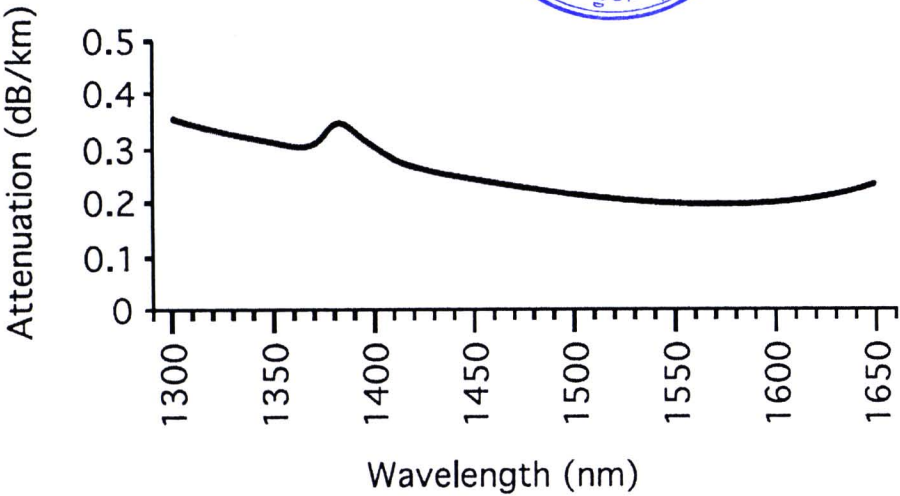
- 1. เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว (single-mode fiber: SMF) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ core ประมาณ $8.6\text{-}9.5\pm0.6\text{ }\mu\text{m}$ และขนาดมีเส้นผ่านศูนย์กลางของ cladding ประมาณ $125\pm1\text{ }\mu\text{m}$ [20] ซึ่งขนาดของ core ที่เล็กมากทำให้แสงสามารถเดินทางในเส้นใยแสงชนิดนี้ได้เพียงเส้นทางเดียว (มีโหมดการเดินทางของแสงโหมดเดียว) จึงทำให้การสไปลซ์ (splice) สายเข้าด้วยกัน และส่งสัญญาณแสงผ่าน SMF ทำได้ยากและต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีราคาแพงเช่นเลเซอร์ไดโอด ในทางกลับกัน SMF สามารถรองรับแบนด์วิดท์ได้กว้างมากและได้รับผลกระทบจาก chromatic dispersion เท่านั้น
- 2. เส้นใยแสงชนิดหลายโหมด (multi-mode fiber: MMF) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ core ประมาณ $50\pm3\text{ }\mu\text{m}$ หรือ $62.5\pm2.5\text{ }\mu\text{m}$ และขนาดมีเส้นผ่านศูนย์กลางของ cladding ประมาณ $125\pm2\text{ }\mu\text{m}$ [20] ซึ่งขนาดของ core ที่ใหญ่กว่า SMF ทำให้แสงสามารถเดินทางผ่านเส้นใยแสงชนิดนี้ได้หลายเส้นทาง (มีโหมดการเดินทางของแสงหลายโหมด) ทำให้ได้รับผลกระทบของ chromatic dispersion และ intermodal dispersion แต่การ splice และการส่งสัญญาณแสงผ่าน MMF ทำได้ง่ายกว่า SMF และสามารถใช้ LED ซึ่งมีราคาถูกกว่าเลเซอร์ไดโอดเป็นแหล่งกำเนิดแสงได้ด้วย โดยรูปที่ 2.8 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ core และ cladding ของเส้นใยแสงทั้งสองประเภท



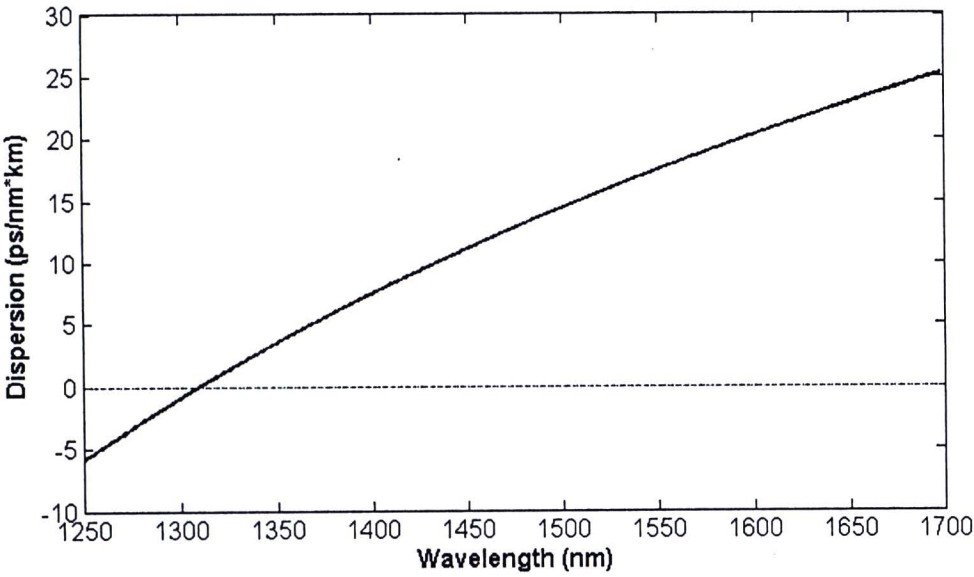
รูปที่ 2.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ core และ cladding ของเส้นใยแสง MMF และ SMF [c]

มาตรฐานที่กำหนดคุณลักษณะของเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน คือ มาตรฐาน ITU-T Recommendation G.652 (standard single-mode fiber) [20] ซึ่งมาตรฐานของ SMF ที่มี zero-dispersion wavelength เท่ากับ 1310 nm ใช้งานได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm แต่สามารถใช้ได้กับความยาวคลื่นที่ 1550 nm ได้ มาตรฐาน G.652 ยังแบ่งออกเป็น ชนิด (type) G.652.A, G.652.B, G.652.C และ G.652.D ซึ่งสำหรับระบบ PON จะใช้เส้นใยแสงตามมาตรฐาน G.652.C และ G.652.D ซึ่งเป็นเส้นใยแสงที่ลดผลของอนุภาคของน้ำที่อยู่ในเส้นใยแสงเพื่อใช้รองรับการสื่อสารสัญญาณ CWDM (low-water-peak fiber for CWDM)

มาตรฐาน G.652.C นั้นมีคุณสมบัติคล้ายกับมาตรฐาน G.652.A สำหรับการนำไปใช้ประยุกต์เข้ากับมาตรฐาน ITU-T G.957 (optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy) และ G.691 (optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers) ไปจนถึง STM-16 เช่นเดียวกันกับ 10 Gbit/s ระยะทาง 40 km (ethernet) และ STM-256 สำหรับ ITU-T G.693 (optical interfaces for intra-office systems) แต่สามารถส่งสัญญาณแสงเพิ่มขึ้นได้ในช่วงความยาวคลื่น 1360 nm ถึง 1530 nm ซึ่งตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงตามมาตรฐาน G.652.C โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 1,550 nm เท่ากับ 0.3 dB/km ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,310 nm เท่ากับ 0 ps/nm·km และค่า polarization mode dispersion (PMD) สูงสุดเท่ากับ 0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ซึ่งรูปที่ 2.9 และ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการลดทอนสัญญาณแสงและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด G.652.C ที่ความยาวคลื่นต่างๆตามลำดับ [36]



รูปที่ 2.9 ค่าอัตราการลดทอนกำลังของสัญญาณแสงของเส้นใยแสง G.652.C



รูปที่ 2.10 ค่าดิสเพอร์ชันของสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของเส้นใยแสงชนิด G.652.C

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงมาตรฐาน G.652.C

Fiber attribute		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6-9.5 μ m
	Tolerance	$\pm$ 0.6 μ m
Cladding Diameter	Nominal	125.0 μ m
	Tolerance	$\pm$ 1 μ m
Core Concentricity error	Maximum	0.6 μ m
Cladding noncircularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1550 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient	λ_{0min}	1300 nm
	λ_{0max}	1324 nm
	S_{0max}	0.092 ps/nm ² x km
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.4 dB/km
	Maximum at 1383 nm $\pm$ 3 nm	(Note 3)
	Maximum at 1550	0.3 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD	0.5 ps/ $\sqrt{km}$
NOTE 1 – According to 6.2, a maximum PMD _Q value on uncabled is specified in order		

to support the primary requirement on cable PMD_c.

NOTE 2 - This wavelength region can be extended to 1260 nm by adding 0.07 dB/km induced Rayleigh scattering loss to the attenuation value at 1310 nm. In this case, the cable cut-off wavelength should not exceed 1250 nm.

NOTE 3 - The sampled attenuation average at this wavelength shall be less than or equal to the maximum value specified for the range, 1310 nm to 1625 nm, after hydrogen ageing according to IEC 60793-2-50 regarding the B1.3 fibre category.

คุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652.D นั้นคล้ายกันกับคุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652.B ที่ใช้สำหรับอัตราการรับส่งข้อมูลที่เร็วขึ้นถึงระดับของ STM-64 เช่น ITU-T Recs G.691 and G.692 หรือ STM-256 สำหรับบางแอปพลิเคชันใน ITU-T Recs G.693 and G.959.1 ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากค่า chromatic dispersion ด้วย มาตรฐานดังกล่าวสามารถส่งสัญญาณแสงได้เพิ่มขึ้นได้ในช่วงความยาวคลื่น 1360 nm ถึง 1530 nm ซึ่งตารางที่ 2.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงตามมาตรฐาน G.652.D โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 1,550 nm เท่ากับ 0.3 dB/km ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,310 nm เท่ากับ 0 ps/nm·km และค่า polarization mode dispersion (PMD) สูงสุดเท่ากับ 0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงมาตรฐาน G.652.D

Fiber attribute		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6-9.5 μ m
	Tolerance	$\pm$ 0.6 μ m
Cladding Diameter	Nominal	125.0 μ m
	Tolerance	$\pm$ 1 μ m
Core Concentricity error	Maximum	0.6 μ m
Cladding noncircularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1550 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient	$\lambda_{0\min}$	1300 nm
	$\lambda_{0\max}$	1324 nm
	$S_{0\max}$	0.092 ps/nm ² x km
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.4 dB/km
	Maximum at 1383 nm $\pm$ 3 nm	(Note 3)
	Maximum at 1550 nm	0.3 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD	0.20 ps/ $\sqrt{km}$

NOTE 1 – According to 6.2, a maximum PMD_Q value on uncabled is specified in order to support the primary requirement on cable PMD_Q .

NOTE 2 - This wavelength region can be extended to 1260 nm by adding 0.07 dB/km induced Rayleigh scattering loss to the attenuation value at 1310 nm. In this case, the cable cut-off wavelength should not exceed 1250 nm.

NOTE 3 - The sampled attenuation average at this wavelength shall be less than or equal to the maximum value specified for the range, 1310 nm to 1625 nm, after hydrogen ageing according to IEC 60793-2-50 regarding the B1.3 fibre category.

2.4 **ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (PON)**

เทคโนโลยี FTTH เป็นโครงข่ายเข้าถึงที่ให้บริการการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงมาก โดยใช้ PON ในการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐาน (central office: CO) ของผู้ให้บริการเข้ากับส่วนของผู้ใช้บริการด้วยเส้นใยแสงและอุปกรณ์แบบพาสซีฟซึ่งไม่ต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าในการทำงานในการประมวลสัญญาณ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงสามารถลดความซับซ้อนของระบบและค่าใช้จ่ายในส่วนของการบำรุงรักษาและซ่อมแซมอุปกรณ์ ทำให้สามารถให้บริการการสื่อสารความเร็วสูงด้วยค่าบริการที่ต่ำได้ ข้อดีของ PON ที่เหนือกว่าเทคโนโลยีที่ใช้สายดีเกิลยวคู่ นั่นคือการใช้เส้นใยแสงเป็นสายนำสัญญาณซึ่งมีอัตราสูญเสียกำลังของสัญญาณที่น้อย สามารถรองรับแบนด์วิดท์ได้มากกว่า และไม่มีสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และด้วยประสิทธิภาพของ PON ที่พัฒนาจนสามารถรับส่งข้อมูลได้เร็วถึง 10 Gbps ในระยะทางให้บริการ 20 km จึงคาดว่าโครงข่าย FTTH จะสามารถให้บริการการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงและรองรับแอปพลิเคชันใหม่ๆ ในอนาคตได้ [9],[24]

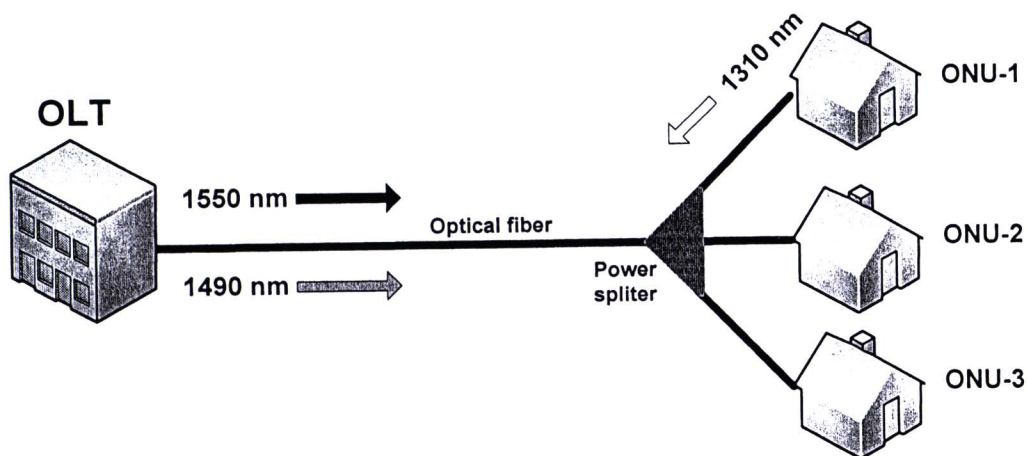
2.4.1 **โครงสร้างของ PON**

อุปกรณ์ของ PON ที่ใช้สำหรับโครงข่าย FTTH ประกอบไปด้วย OLT ที่ตั้งอยู่ที่สถานีฐาน ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายเข้าถึงและโครงข่ายหลัก (backbone network) ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณแสงผ่านโครงข่าย FTTH ควบคุมกำลังของสัญญาณที่ส่งและรับ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ควบคุมการเข้าใช้ตัวกลาง (media access control: MAC) ของผู้ใช้บริการสำหรับการส่งข้อมูลแบบอัปสตรีม (upstream traffic)

optical network unit (ONU) เป็นส่วนที่แปลงสัญญาณแสงกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์ของผู้ใช้บริการ เช่น คอมพิวเตอร์ หรือโทรศัพท์ นอกจากนี้ยังเป็นส่วนที่ทำงานร่วมกับ OLT ในการใช้ MAC protocol ด้วย

อุปกรณ์แบ่งพลังงานแสงแบบพาสซีฟ (passive optical power splitter) เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ระหว่าง OLT และ ONU ทำหน้าที่แบ่งพลังงานแสงออกเป็นหลายๆส่วนเพื่อแจกจ่ายไปยังแต่ละ ONU ทำให้ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ OLT เท่ากับจำนวน ONU ซึ่ง splitter มีอัตราการแบ่งสัญญาณ (split ratio) ต่างกันไป เช่น 1:4 1:8 1:16 1:32 1:64 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของ PON ที่ใช้

การเชื่อมต่อของ PON มีรูปแบบการเชื่อมต่อของโครงข่ายเป็นแบบ point-to-multipoint ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งใช้เส้นใยแสงมาตรฐาน ITU-T G.652.C, D ในการเชื่อมต่อทั้งหมด



รูปที่ 2.11 รูปแบบการเชื่อมต่อของ PON

2.4.2 มาตรฐานของ FTTX

มาตรฐานของ FTTX ปัจจุบันนี้มีใช้กันอยู่ 3 มาตรฐานด้วยกัน คือ [7]

- (1) Broadband PON (BPON) เป็นไปตามมาตรฐาน ITU-T G.983.x พัฒนามาจาก APON (ATM PON) ซึ่งใช้โปรโตคอล ATM ในการรับส่งข้อมูล ซึ่งมีอัตรารับส่งข้อมูล 622 Mbps สำหรับการส่งข้อมูลแบบดาว์นสตรีม และ 155 Mbps สำหรับการส่งข้อมูลแบบอัปสตรีม มี splitting ratio สูงสุดที่ 1:32 และสามารถให้บริการได้ในระยะทางประมาณ 20 km
- (2) Gigabit PON (GPON) เป็นไปตามมาตรฐาน ITU-T G.984.x ใช้โปรโตคอล ATM หรือ Ethernet ในการรับส่งข้อมูล มีอัตรารับส่งข้อมูล 1.25 Gbps ทั้งการส่งข้อมูล

แบบดาวนีสตริมและอพลตริม หรือ 2.5 Gbps สำหรับการส่งข้อมูลแบบดาวนีสตริม และ 1.25 Gbps สำหรับการส่งข้อมูลแบบอพลตริม มี spiltting ratio สูงสุดที่ 1:32 (อาจได้ถึง 1:64) และสามารถให้บริการได้ในระยะทาง 20-60 km

- (3) Ethernet PON (EPON) เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.3ah ใช้โปรโตคอล Ethernet ในการรับส่งข้อมูล มีอัตรารับส่งข้อมูล 1.25 Gbps ทั้งการส่งข้อมูลแบบ ดาวนีสตริมและอพลตริม มี spiltting ratio สูงสุดที่ 1:16 (อาจได้ถึง 1:32) และสามารถให้บริการได้ในระยะทาง 10-20 km

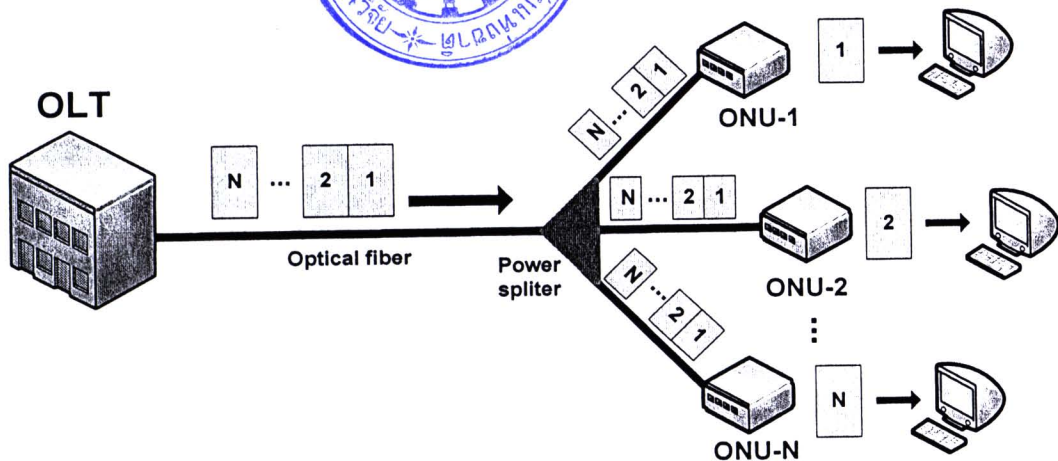
ทั้งนี้ใช้ความยาวคลื่น 1490 ± 10 nm สำหรับทราฟฟิกแบบดาวนีสตริมและ 1310 ± 50 nm สำหรับทราฟฟิกแบบอพลตริม ทั้งนี้ใช้ความยาวคลื่น 1555 ± 5 nm ในการส่งสัญญาณวิดีโอและ โทรทัศน์

- (4) 10G-EPON เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.3av สามารถรับส่งข้อมูลได้สูงถึง 10 Gbps ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.4.5

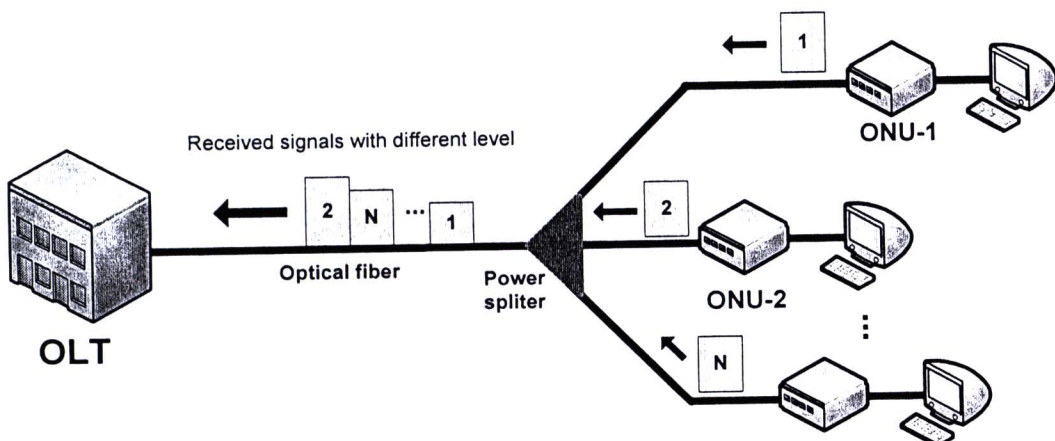
2.4.3 หลักการทำงานเบื้องต้น

สำหรับการส่งข้อมูลแบบดาวนีสตริม OLT จะส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสง และข้อมูลดังกล่าว จะถูกกระจาย (broadcast) ที่ splitter ไปยัง ONU ทุกตัว โดยกำลังของสัญญาณแสงจะถูกแบ่ง ให้กับผู้ใช้บริการที่แต่ละ ONU จำนวน N ราย รูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ส่งมาจาก OLT จะถูกส่งไปยัง ONU ทุกตัว ในขณะที่แต่ละ ONU จะสามารถรับข้อมูลที่มีการระบุ address ถึง ONU ตัวนั้นเท่านั้น สำหรับข้อมูลอื่นๆที่มีการระบุ address ไม่ตรงกันก็จะถูกกำจัดทิ้งไป

สำหรับการส่งข้อมูลแบบอพลตริม ONU แต่ละตัวจะติดต่อสื่อสารกับ OLT เพียงตัวเดียว เพื่อให้ OLT ทำการจัดสรรช่องสัญญาณให้แก่แต่ละ ONU ใช้ในการส่งข้อมูล ซึ่งการใช้ช่องสัญญาณ ดังกล่าวเป็นการเข้าถึงแบบแบ่งเวลา (TDMA) โดยที่แต่ละ ONU จะได้รับการจัดสรรช่วงเวลาในการส่งข้อมูลที่ต่างกัน ทำให้ข้อมูลของแต่ละ ONU ไม่เกิดการชนกัน รูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นว่า ข้อมูลที่ส่งจาก ONU แต่ละตัวจะได้รับการจัดสรรช่วงเวลาในการส่งที่ต่างกัน และที่ OLT ก็มีการออกแบบระบบให้สามารถรับสัญญาณที่มีกำลังของสัญญาณที่ไม่เท่ากันอันเนื่องมาจาก ระยะห่างระหว่าง OLT กับ ONU แต่ละตัว [21]



รูปที่ 2.12 การส่งข้อมูลจาก OLT ไปยังแต่ละ ONU



รูปที่ 2.13 การส่งข้อมูลจาก ONU แต่ละตัวไปยัง OLT

2.4.4 Link power budget

ในการหาระยะทางให้บริการไกลสุดของ PON หาได้จากค่าอัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณแสงทั้งหมดระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณแสงที่ยอมรับได้หรือเรียกว่า link power budget ในการออกแบบระบบ PON นั้นจะต้องออกแบบให้ค่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณทั้งหมดมีค่าไม่เกิน link power budget โดยสามารถคำนวณค่า link power budget ได้จากสมการที่ (2.11)

$$P_T = P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum l_c + \sum l_s + \sum l_{other} + G_{margin} \quad (2.11)$$

โดย P_T คือ ค่า link power budget ทั้งหมด

P_{Tx} คือ ค่ากำลังส่งของสัญญาณที่ตัวส่งสัญญาณแสง [dBm]

- P_{Rx} คือ ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่เครื่องรับ [dBm]
- α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยแสง [dB/km]
- L คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่สามารถให้บริการได้ [km]
- l_c คือ ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากตัวต่อ (connector) [dB]
- l_s คือ ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากการสไปลซ์ (splice) [dB]
- l_{other} คือ ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากกรณีอื่นๆที่พิจารณา [dB]
- G_{margin} คือ ค่า system margin ที่เผื่อไว้สำหรับระบบ [dB]

ทั้งนี้มาตรฐานของ PON ได้กำหนดระดับ (class) ของค่า link power budget ไว้เพื่อที่จะได้สามารถเลือกออกแบบระบบ PON ได้อย่างเหมาะสมกับงบประมาณการลงทุนโครงข่ายหรือคุณภาพของการให้บริการ โดย class ในการออกแบบ link power budget ของมาตรฐาน GPON แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่า link power budget ของ PON

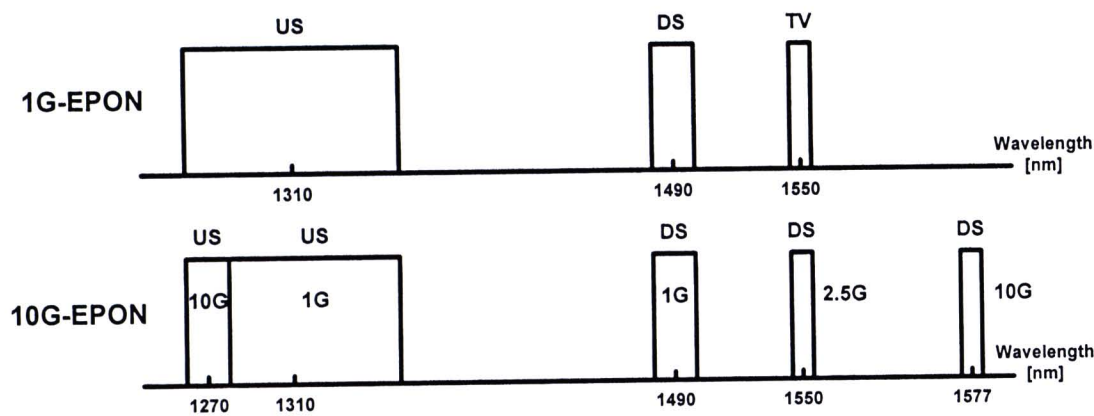
class	link power budget (dB)
A	20
B	25
C	30

2.4.5 มาตรฐาน 10G-EPON

มาตรฐาน 10G-EPON หรือ IEEE802.3av เป็นมาตรฐานที่ได้รับการพัฒนาจาก EPON (หรือ 1G-EPON) ให้สามารถส่งข้อมูลทั้งแบบดาว์นสตรีมและอัพสตรีมได้เร็วยิ่งขึ้นด้วยอัตราบิต 10 Gbps หรือส่งข้อมูลแบบดาว์นสตรีมด้วยอัตราบิต 10 Gbps และส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมด้วยอัตราบิต 1 Gbps ซึ่งได้เริ่มประกาศใช้ตั้งแต่เดือนกันยายน ค.ศ. 2009 เป็นต้นมา[35] ด้วยอัตราบิตข้อมูลที่มหาศาล นอกจากจะนำมาใช้กับโครงข่ายเข้าถึงที่สามารถให้บริการโทรทัศน์ความละเอียดสูง (high definition television: HDTV) ที่อัตราบิตประมาณ 10 Mbps หรือโทรทัศน์สามมิติ (3D-TV) ที่อัตราบิต 50 Mbps ได้แล้ว ยังสามารถนำโครงข่าย 10G-EPON ไปใช้เป็น backhaul สำหรับโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G Wi-Fi หรือ Wi-MAX ได้อีกด้วย

ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของ 10G-EPON ก็คือสามารถใช้ร่วมกับโครงข่าย GPON หรือ EPON ที่มีอยู่เดิมได้ โดยการจัดสรรความยาวคลื่นในการส่งสัญญาณใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.14 กล่าวคือ

การส่งข้อมูลแบบดาว์นสตรีมความเร็ว 1.25 Gbps จะใช้ความยาวคลื่น 1,490 nm การส่งข้อมูลแบบดาว์นสตรีมความเร็ว 2.5 Gbps จะใช้ความยาวคลื่น 1,550 nm และการส่งข้อมูลแบบดาว์นสตรีมความเร็ว 10 Gbps จะใช้ความยาวคลื่น 1,577 nm สำหรับการส่งข้อมูลแบบอัปสตรีมความเร็ว 1.25 Gbps จะใช้ความยาวคลื่น 1,310 nm และการส่งข้อมูลแบบอัปสตรีมความเร็ว 10 Gbps จะใช้ความยาวคลื่น 1,270 nm ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 การจัดสรรความยาวคลื่นของ 10G-EPON

สำหรับค่า link power budget ของ 10G-EPON แบ่งเป็น 3 class ได้แก่ PR10 PR20 และ PR30 สำหรับระบบ 10G-EPON ที่มีอัตราบิต 10 Gbps สำหรับการส่งข้อมูลแบบดาว์นสตรีมและอัปสตรีม หรือ PRX10 PRX20 และ PRX30 สำหรับระบบ 10G-EPON ที่มีอัตราบิตสำหรับการส่งข้อมูลแบบดาว์นสตรีมเท่ากับ 10 Gbps และอัตราบิตสำหรับการส่งข้อมูลแบบอัปสตรีมเท่ากับ 1 Gbps ทั้งนี้ค่า link power budget ของทั้ง 3 class จะต้องไม่เกิน 20 24 และ 29 dB ตามลำดับ

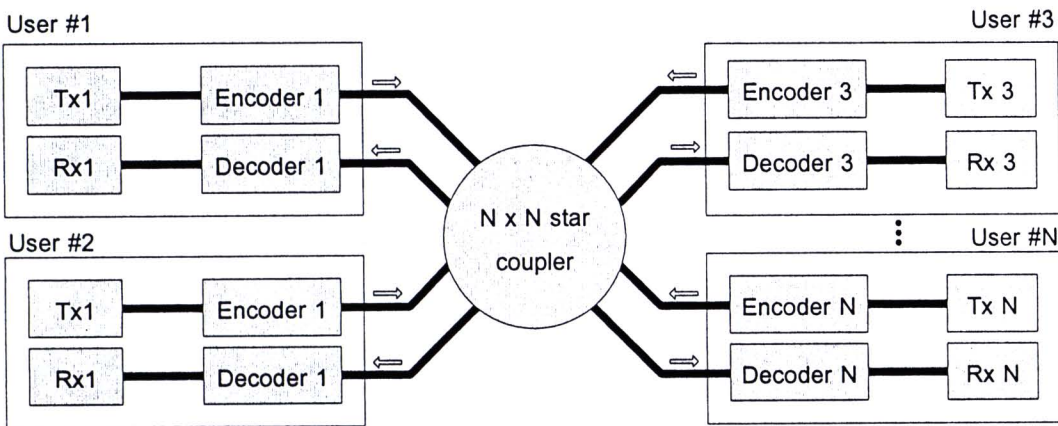
2.5 ระบบซีดีเอ็มเอแสง

ระบบซีดีเอ็มเอแสงหรือ OCDMA เป็นวิธีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงความยาวคลื่นเดียวกันที่มาจากผู้ให้บริการ N ราย บนโครงข่ายเดียวกันพร้อมๆกันโดยไม่เกิดการชนกันของข้อมูล เนื่องจากมีการเข้ารหัสสัญญาณแสงของผู้ให้บริการแต่ละรายด้วยรหัส (code) ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งรหัสแต่ละชุดดังกล่าวสามารถที่จะดึงข้อมูลของผู้ให้บริการแต่ละรายกลับคืนมาได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่ข้อมูลของผู้ใช้รายอื่นก็จะถูกกำจัดทิ้งไป ทำให้ผู้ให้บริการแต่

ละรายสามารถรับส่งข้อมูลได้ตลอดเวลาโดยไม่ต้องมีการแย่งใช้ช่องสัญญาณทางเวลา (access without contention) ส่งผลให้ผู้ให้บริการแต่ละรายสามารถใช้แบนด์วิธของตัวเองได้อย่างเต็มที่

2.5.1 โครงสร้างของระบบ OCDMA

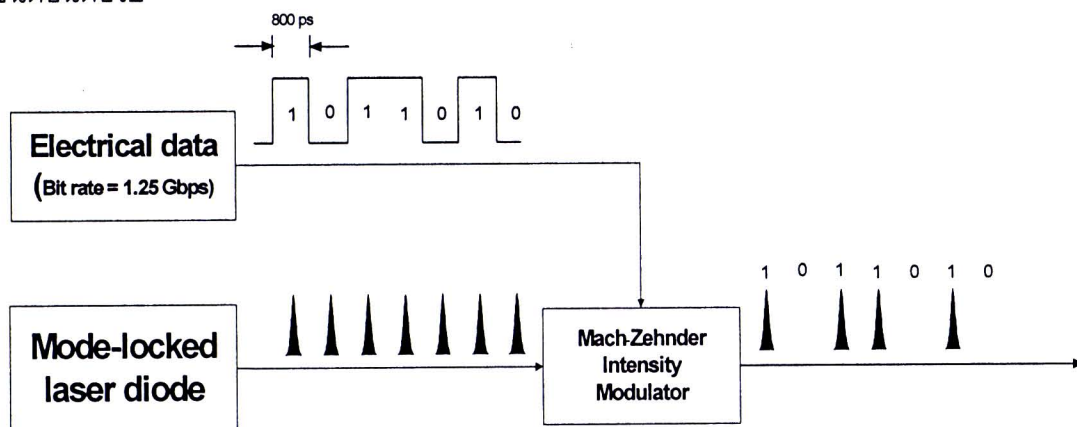
สำหรับโครงสร้างของระบบ OCDMA อย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.15 ผู้ให้บริการจำนวน N รายจะมีตัวส่งสัญญาณแสงตัวที่ใช้ความยาวคลื่นเดียวกัน ซึ่งสัญญาณแสงที่ออกจากตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวจะถูกเข้ารหัสทางแสงด้วย encoder ที่มีรหัส (code) ที่แตกต่างกันออกไป จากนั้นสัญญาณแสงจะถูกรวมเข้าด้วยกันและแบ่งพลังงานแสงไปยังผู้ให้บริการแต่ละรายด้วย $N \times N$ star splitter โดยที่ผู้ให้บริการแต่ละรายจะมี decoder ที่สามารถถอดรหัสสัญญาณแสงเพื่อดึงข้อมูลของตัวเองกลับมาได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่ข้อมูลของผู้ให้บริการรายอื่นก็จะถูกกำจัดทิ้งไป



รูปที่ 2.15 ระบบ OCDMA อย่างง่าย

สำหรับตัวส่งสัญญาณแสงแต่ละตัวนั้น จะใช้โหมดล็อกเลเซอร์ไดโอด (mode-locked laser diode: MLLD) ในการสร้างพัลส์แสงที่แคบมากๆ (ultra-short optical pulse) ภายในระยะเวลา 1 คาบของอัตราบิตข้อมูลที่จะส่งไป และมีความถี่ในการสร้างพัลส์แสงดังกล่าวเท่ากับอัตราบิตข้อมูลที่จะนำมามอดูเลตเข้าด้วยกัน รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างการมอดูเลตสัญญาณแสงที่สร้างจาก MLLD เข้ากับสัญญาณไฟฟ้าแบบไม่กลับสู่ศูนย์ (non-return to zero: NRZ) ของระบบซีดีเอ็มเอแสงแบบ coherent time-spreading โดยที่สัญญาณไฟฟ้ามีอัตราข้อมูลเท่ากับ 1.25 Gbps หรือใช้เวลา 800 ps ในการส่งบิต 1 บิต ในขณะที่ MLLD จะสร้างพัลส์แสงที่มีขนาดเล็กมาก ด้วยอัตราการสร้างพัลส์แสงเท่ากับ 1.25 GHz หรือสร้างพัลส์แสงทุกๆ 800 ps นั่นเอง

ดังนั้นเมื่อมอดูเลตสัญญาณทั้งสองเข้าด้วยกันด้วยอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณแบบความเข้มแสง บิต “1” จะแสดงด้วยพัลส์แสงที่แคบมากในช่วงคาบของบิตนั้นๆ ในขณะที่บิต “0” ก็จะไม่มีการแสดงแสงในช่วงคาบของบิตดังกล่าว ซึ่งสัญญาณแสงที่ถูกมอดูเลตแล้วก็จะถูกเข้ารหัสทางแสงในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2.16 การมอดูเลตสัญญาณแสงเข้ากับสัญญาณไฟฟ้าที่ตัวส่งสัญญาณของระบบ OCDMA

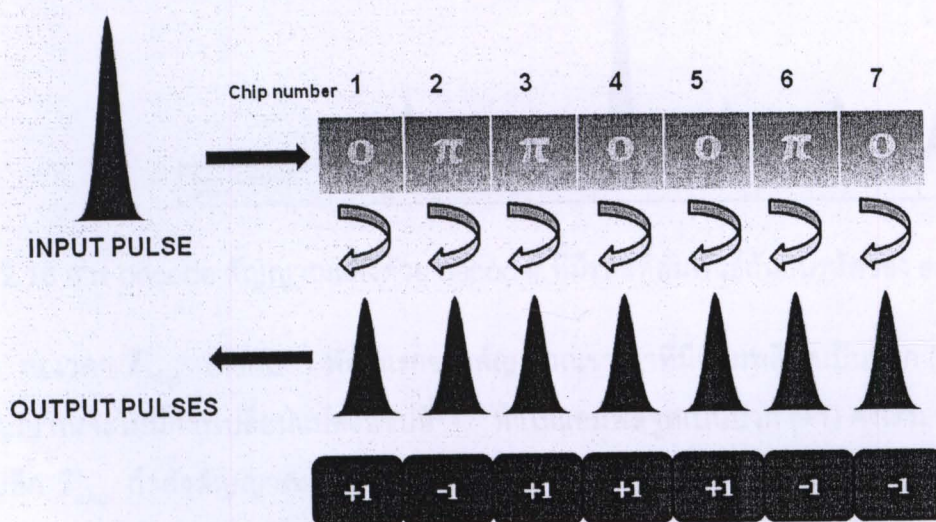
2.5.2 วิธีการเข้ารหัสและการถอดรหัส (En/decoding scheme)

การเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณ OCDMA มีด้วยกันหลายวิธีดังที่กล่าวมา แต่วิธีที่ได้รับความนิยมก็คือวิธีการแผ่ทางเวลา (time-spreading OCDMA: TS-OCDMA) โดยใช้ super-structure fiber bragg grating (SSFBG) เป็นตัว encoder และ decoder เนื่องจากมีค่า insertion loss ที่ต่ำและมีราคาถูก นอกจากนี้สามารถสร้างรหัสที่มีความยาวมากได้โดยที่อุปกรณ์มีขนาดกะทัดรัด

SSFBG คือ FBG ที่มีค่าดัชนีหักเหของการมอดูเลชัน (refractive index modulation) เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และมีโครงสร้างของดัชนีหักเหของการมอดูเลชัน (refractive index modulation profile) เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของ FBG ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังสามารถใส่ตัวเลื่อนเฟสสัญญาณแสง (phase shift) ลงไปที่แต่ละส่วน (segment) ของ SSFBG หรือชิป (chip) ทำให้สามารถเปลี่ยนเฟสของสัญญาณแสงที่เข้ามาได้ (0 หรือ π) ดังนั้นเฟสของสัญญาณแสงที่ถูกสะท้อนของมาจากแต่ละ segment ของ SSFBG จะถูกกำหนดด้วยลำดับของ phase shift ของ SSFBG นั้นๆ ซึ่งนิยมใช้รหัสโกลด์ (gold code) ที่เป็นรหัสที่ใช้ในระบบ asynchronous CDMA ที่มีค่า correlation ที่ดีอยู่แล้ว [16] เมื่อส่งสัญญาณแสงเป็นพัลส์ที่แคบมาก (ultra short optical pulse) 1 ลูกเข้าไปใน encoder ที่มีจำนวนชิปเท่ากับ N สัญญาณที่ออกจาก encoder จะเป็นพัลส์จำนวน N ลูกเรียงออกมาอย่างต่อเนื่องกัน โดยที่พัลส์แต่ละลูกจะมีเฟสที่ถูกเปลี่ยนแปลงไปตามลำดับการเลื่อนเฟสใน encoder

รูปที่ 2.17 แสดงวิธีการ encode สัญญาณแสงด้วยวิธี coherent time-spreading โดยใช้ SSFBG เป็น encoder กล่าวคือสัญญาณแสงขาเข้าเป็นพัลส์ที่แคบมากจะถูกส่งมายัง encoder ที่มีจำนวนชิปเท่ากับ 7 และมีลำดับการเลื่อนเฟสเป็นไปตาม gold code ที่มีความยาวเท่ากับ 7 เช่นเดียวกัน โดยลำดับของการเลื่อนเฟสคือ $0\pi\pi\pi00\pi$ ตามลำดับ

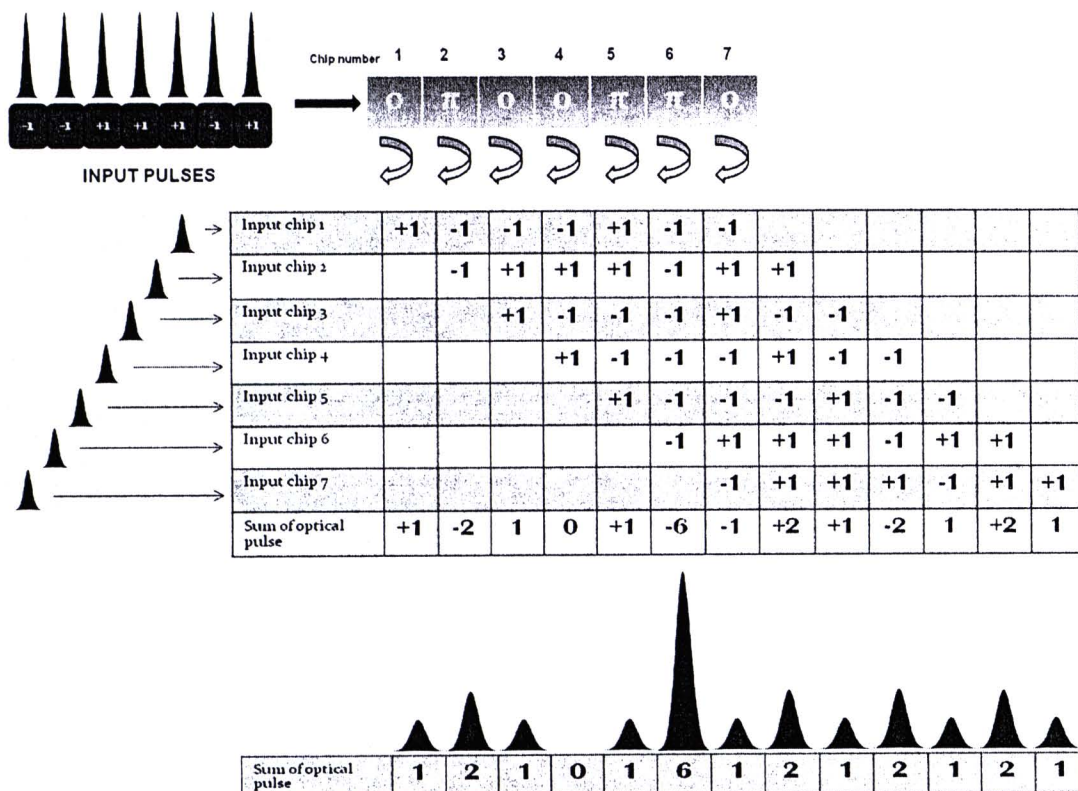
เมื่อสัญญาณแสงเดินทางมายังชิปที่ 1 เฟสของสัญญาณแสงจะไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากค่าของตัวเลื่อนเฟสในชิปที่ 1 เท่ากับ 0 เรเดียน เมื่อพิจารณาสัญญาณแสงดังกล่าวในเชิงแอมพลิจูดของสัญญาณแสงดังกล่าวจะมีแอมพลิจูดเป็นบวก (+1) ซึ่งกำลังของสัญญาณส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนออกมาในขณะที่กำลังของสัญญาณส่วนที่เหลือจะผ่านไปยังชิปที่สอง ซึ่งมีค่าของตัวเลื่อนเฟสเท่ากับ π เรเดียน หรือ 180 องศา เมื่อมองในเชิงแอมพลิจูด สัญญาณที่ผ่านชิปที่ 2 นี้จะมีแอมพลิจูดเป็นลบ (-1) (อย่างไรก็ตามเมื่อมองในเชิงความเข้มแสงแล้วสัญญาณแสงทั้ง 2 พัลส์มีลักษณะที่เหมือนกันเพียงแต่มีเฟสตรงข้ามกันเท่านั้น) กำลังของสัญญาณแสงส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนออกไป และกำลังส่วนที่เหลือก็จะผ่านไปยังชิปที่ 3 ที่มีค่าของตัวเลื่อนเฟสเท่ากับ π เรเดียน หรือ 180 องศาทำให้เฟสของสัญญาณแสงที่เข้ามายังชิปที่ 3 เลื่อนออกไปอีก π เรเดียน หรือ 180 องศา รวมเป็น 2π เรเดียน หรือ 360 องศา นั่นคือเมื่อมองในเชิงแอมพลิจูด สัญญาณแสงดังกล่าวจะมีแอมพลิจูดเป็นบวก (+1) อีกครั้ง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนสัญญาณแสงสะท้อนกลับมาทั้งหมดที่ชิปที่ 7 ดังนั้นสัญญาณแสงที่สะท้อนออกมาหลังจากผ่าน encoder ดังกล่าวจะมีพัลส์ในเชิงแอมพลิจูดเท่ากับ +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1 เรียงออกมาตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้เวลาเป็นสัญญาณแสงถูกแผ่ออกในทางเวลา (time-spreading) นั่นเอง



รูปที่ 2.17 การ encode สัญญาณแสงด้วยวิธี coherent time-spreading



สำหรับการ decode สัญญาณแสงนั้นอาศัยกระบวนการ match-filtering โดยใช้ decoder ที่มีรหัสที่สัมพันธ์กันกับรหัสของ encoder นั่นคือลำดับของการเลื่อนเฟสของสัญญาณของ decoder จะตรงกันข้ามกับลำดับของการเลื่อนเฟสของ encoder [37] เช่น encoder มีลำดับการเลื่อนเฟสเป็น $\pi 0 \pi \pi$ ดังนั้น decoder จะต้องมีการเลื่อนเฟสเป็น $\pi \pi 0 \pi$ จึงจะทำให้ decoder สามารถ recover สัญญาณแสงที่ถูกแผ่ออกจากเวลากลับมาได้เหมือนเดิม รูปที่ 2.18 แสดงการ decode สัญญาณแสงด้วย decoder ที่มีรหัสที่สัมพันธ์กันกับรหัสของ encoder ในรูปที่ 1 ซึ่งนั่นหมายความว่าลำดับของการเลื่อนเฟสของ decoder คือ $0 \pi 0 0 \pi \pi 0$ โดยที่สัญญาณขาเข้าของ decoder ก็คือสัญญาณขาออกจาก encoder ในรูปที่ 2.17 นั่นเอง

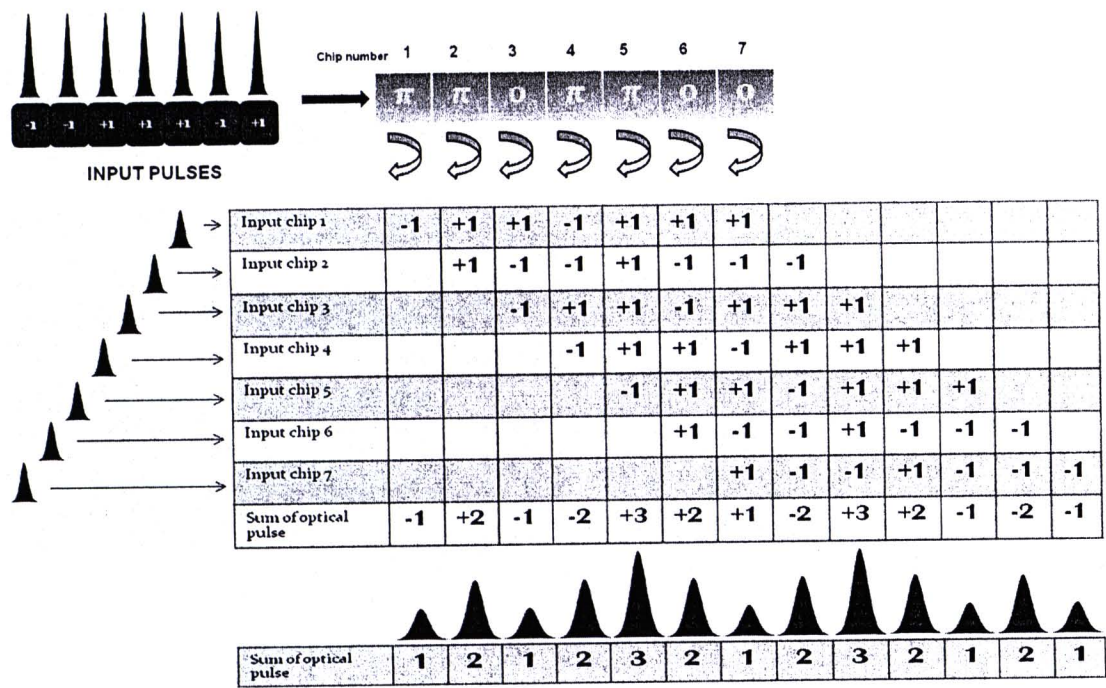


รูปที่ 2.18 การ decode สัญญาณแสงด้วย decoder ที่มีรหัสที่สัมพันธ์กันกับรหัสของ encoder

ณ เวลา T_{chip} เท่ากับ 1 พัลส์แรกของสัญญาณขาเข้าที่มีแอมพลิจูดเป็นบวก (+1) เฟสของสัญญาณจะไม่มีเปลี่ยนแปลงที่ชิปที่ 1 ทำให้แอมพลิจูดเป็นบวก (+1) คงเดิม เมื่อเวลาผ่านไปอีก T_{chip} กำลังสัญญาณแสงของพัลส์แรกที่เพิ่งถูกเลื่อนเฟสก็จะถูกสะท้อนออกมาส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือก็จะผ่านไปยังชิปที่ 2 ในขณะเดียวกันพัลส์ลูกที่สองของสัญญาณขาเข้าก็จะเข้ามายังชิปที่ 1 และถูกเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงตามตัวเลื่อนเฟสที่แต่ละตำแหน่งของชิปเป็นเช่นนี้เรื่อยไปจนพัลส์ทุกลูกของสัญญาณขาเข้าสะท้อนครบทั้ง 7 ชิปของ decoder เมื่อเสร็จสิ้น

กระบวนการดังกล่าวแล้ว ผลรวมของสัญญาณแสงในเชิงแอมพลิจูดและเชิงความเข้มแสงดังแสดงในรูปที่ 2.18 กล่าวคือ จะเกิดพัลส์ที่มีกำลังของสัญญาณที่สูงที่มีลักษณะคล้ายสัญญาณแสงก่อนการ encode เนื่องมาจากสัญญาณแสงที่ถูกแผ่อกในทางเวลาที่ encoder นั้นถูกแผ่กลับอย่างถูกต้องโดย decoder ที่มีรหัสที่สัมพันธ์กับ encoder เรียกพัลส์ที่ถูกแผ่กลับอย่างถูกต้องว่าดังกล่าวว่า auto-correlation peak (ACP) ทั้งนี้เมื่อใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปมากขึ้น จะยังทำให้ ACP ที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณแสงก่อนการ encode

เมื่อเปลี่ยนรหัสของ decoder เป็น $\pi\pi0\pi\pi00$ ซึ่งมีลำดับการเลื่อนเฟสที่ไม่สัมพันธ์กันกับรหัสของ encoder (ลำดับไม่ตรงกันข้ามกัน) รูปที่ 2.19 แสดงผลลัพธ์ของการ decode สัญญาณแสงด้วย decoder ที่มีลำดับการเลื่อนเฟสเป็น $\pi\pi0\pi\pi00$ กล่าวคือ พัลส์ที่เกิดจากผลรวมของการสะท้อนกลับที่ชิปทั้ง 7 ของ decoder จะมีกำลังของสัญญาณที่ต่ำตลอด เนื่องจาก decoder ไม่สามารถแผ่กลับสัญญาณแสงดังกล่าวให้เหมือนเดิมได้เนื่องจากมีรหัสที่ไม่สัมพันธ์กันกับ encoder เรียกพัลส์ที่เกิดจากการแผ่กลับอย่างไม่ถูกต้องว่า cross-correlation peak (CCP) ทั้งนี้เมื่อใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปมากขึ้น ก็จะทำให้ CCP ที่ได้มีค่าน้อยลง



รูปที่ 2.19 การ decode สัญญาณแสงด้วย decoder ที่มีรหัสไม่สัมพันธ์กันกับรหัสของ encoder

2.6 การจัดการดิสเพอร์ชัน(Dispersion management)

เนื่องจากการส่งสัญญาณแสงด้วยวิธี coherent time-spreading OCDMA ที่มีอัตราบิตสูงๆและใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปมากๆ โดยจำนวนชิปหาได้จาก (2.12)

$$N_{chip} = 2^L - 1 \quad (2.12)$$

โดย L คือจำนวนชิปที่รีจิสเตอร์ที่ใช้ในการสร้าง gold code

พิจารณาตัวอย่างระบบ OCDMA ที่มีอัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps และให้ L เท่ากับ 9 จะได้จำนวนชิปของ gold code เท่ากับ 511 ชิป ดังนั้นในการ encode สัญญาณด้วย encoder ที่ใช้ gold code ดังกล่าวจะได้พัลส์แสงจำนวน 511 ลูกเรียงกันออกมาตามลำดับในเวลา 1 บิต เมื่อส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูลเท่ากับ 1.25 Gbps ก็จะมีพัลส์เรียงกันออกไปเท่ากับ $511 \times 1.25 = 638.75$ Gchip/s หรือชิปแต่ละชิปจะมีคาบเวลาเท่ากับ 1.56 ps ซึ่งหมายความว่าในการส่งสัญญาณแสงดังกล่าวที่ความยาวคลื่น 1,490 nm ผ่านเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวแบบ G.652C ซึ่งค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ 13.79 ps/nm·km จะทำให้พัลส์แสงแต่ละลูกขยายออกในทางเวลามากถึง 8 เท่า ทำให้เกิดปัญหาการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter-symbol interference: ISI) ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

การจัดการดิสเพอร์ชันทำได้โดยการนำเอาเส้นใยแสงที่ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อบดเชยค่าดิสเพอร์ชันและทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามสมการ (2.13)

$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \quad (2.13)$$

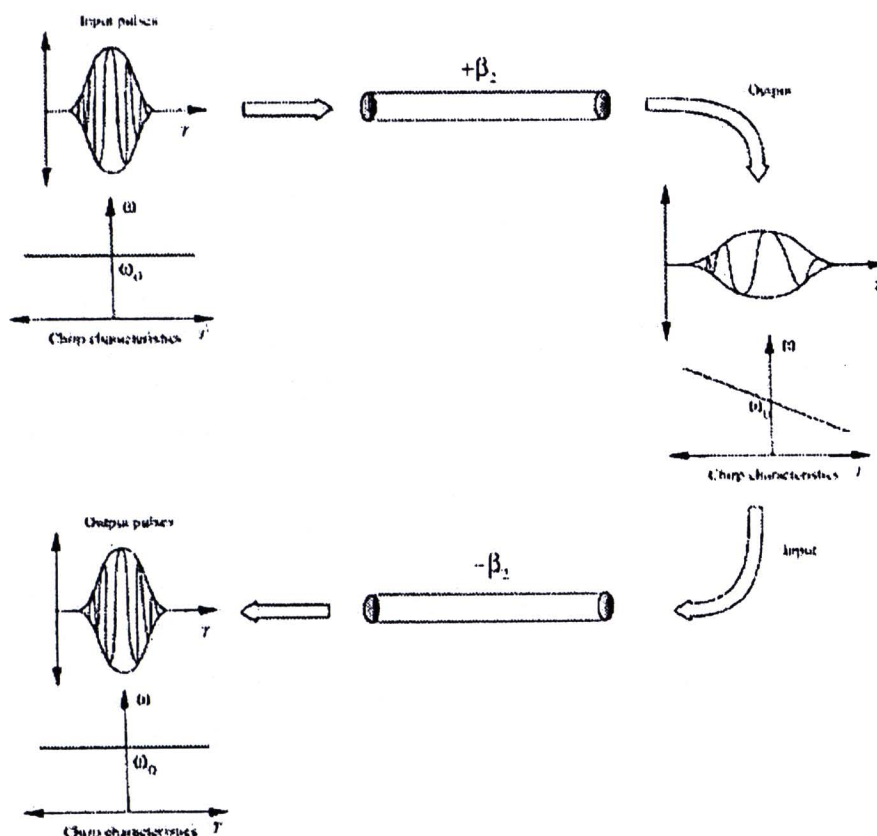
โดย D_1 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [ps/nm·km]

D_2 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [ps/nm·km]

L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [km]

L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [km]

เทคนิคการชดเชยความเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากดิสเพอร์ชันด้วยเทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันเป็นดังรูปที่ 2.20 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี D_1 ที่มีค่าเป็นบวก จะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชันด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า D_2 ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการชดเชยดิสเพอร์ชัน ส่งผลให้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้

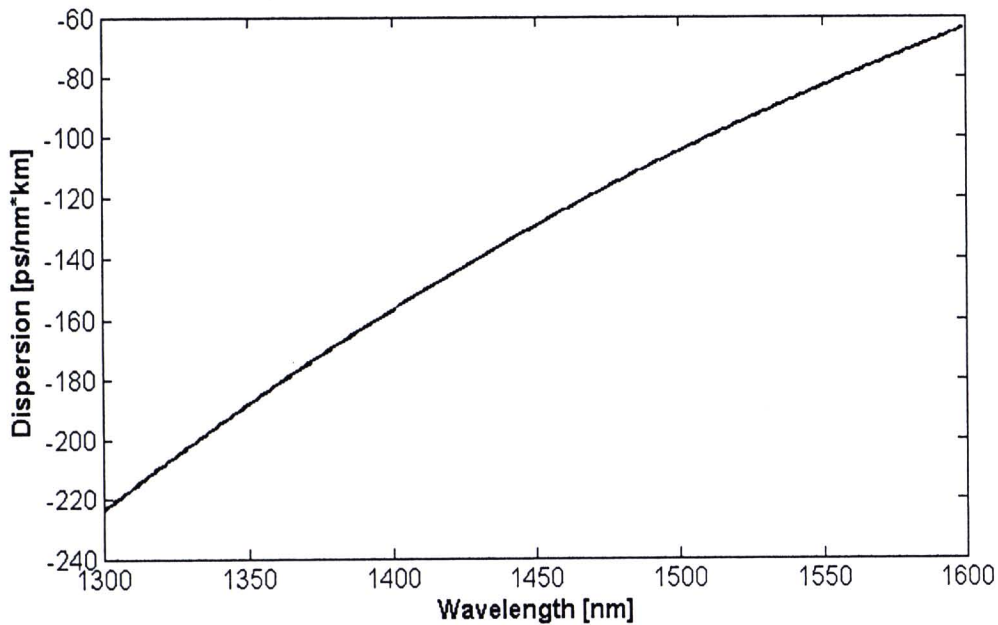


รูปที่ 2.20 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชัน

2.6.1 ประเภทของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

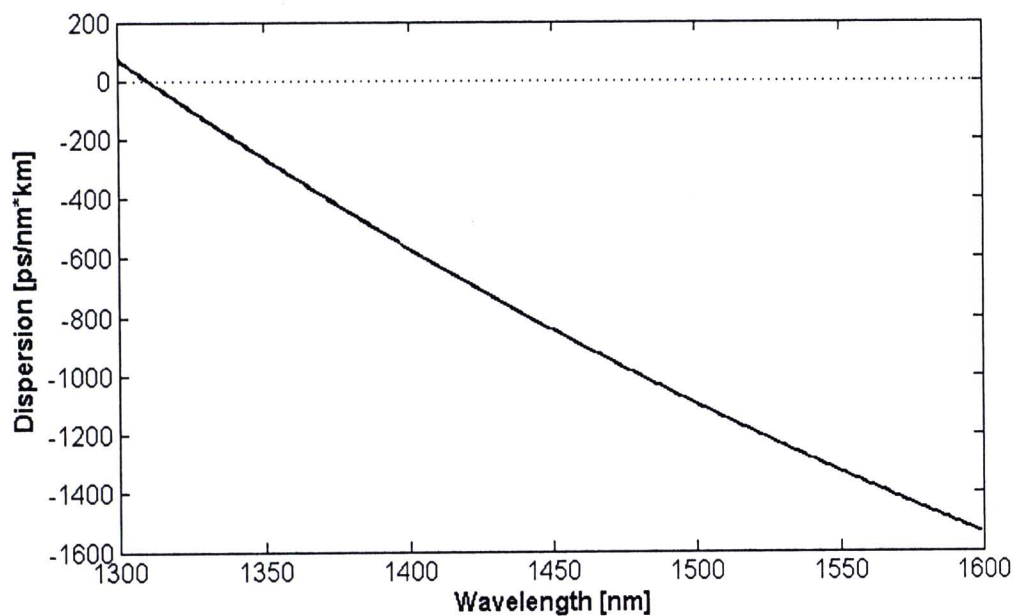
หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ใช้กันทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิดคือ

- 1) เส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชันแบบไม่ชดเชยความชันของดิสเพอร์ชัน (Non-slope compensated dispersion compensating fiber: NSC-DCF) เป็นเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันเป็นลบ แต่มีค่าความชันของดิสเพอร์ชันเป็นบวก กล่าวคือค่าดิสเพอร์ชันจะเป็นจำนวนลบที่น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เส้นใยแสงชนิดนี้สามารถชดเชยผลของดิสเพอร์ชัน ณ ความยาวคลื่นในช่วงของความยาวคลื่นที่ใช้งานในเส้นใยแสงชนิด G.652 ให้เท่ากับศูนย์ได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นอื่นๆหลังจากทำการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันแล้วจะไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากเส้นใยแสงชนิดนี้มีค่าความชันของดิสเพอร์ชันเป็นบวก จึงไม่สามารถชดเชยดิสเพอร์ชันได้ 100%



รูปที่ 2.21 ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด NSC-DCF

2) เส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชันแบบชดเชยความชันของดิสเพอร์ชัน (Slope compensated dispersion compensating fiber: SC-DCF) เป็นเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันเป็นลบ และมีค่าความชันของดิสเพอร์ชันเป็นลบเช่นกัน กล่าวคือค่าดิสเพอร์ชันจะเป็นจำนวนลบที่มากขึ้นเรื่อยๆเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยเส้นใยแสงชนิดนี้สามารถชดเชยผลของดิสเพอร์ชันได้ตลอดช่วงของความยาวคลื่นที่ใช้งานในเส้นใยแสงชนิด G.652 ได้ 100%



รูปที่ 2.22 ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SC-DCF

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ SC-DCF ในการชดเชยผลของดิสเพอร์ชันในระบบ OCDMA เนื่องจาก SC-DCF สามารถชดเชยดิสเพอร์ชันสะสมและความชันของดิสเพอร์ชันได้ 100% ได้