

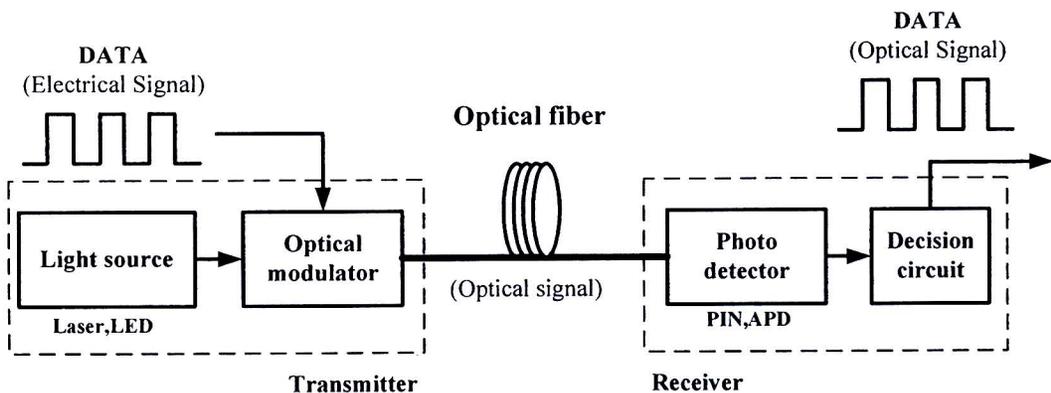
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

เนื้อหาทางทฤษฎีที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งออกเป็น 8 ส่วน ในส่วนแรกจะกล่าวถึง ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ส่วนที่สองเป็นกล่าวถึงทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ส่วนที่สามเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณเช่น การลดทอนกำลังสัญญาณ ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณ ส่วนที่สี่เป็นการอธิบายการทำงานระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสงเชิงความยาวคลื่นและอุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นในระบบ ส่วนที่ห้าเป็นการเป็นการแจกแจงโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มออกเป็นสองโครงข่ายคือ Broadcast-and-Select และ Wavelength-Routed ส่วนที่หกกล่าวถึงรายละเอียดการทำงานของโครงข่ายเมชและการป้องกันโครงข่ายจากความเสียหายของโครงข่ายลักษณะเมช ส่วนที่เจ็ดเป็นเทคนิคการแก้ไขดิสเพอร์ชัน และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน

2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงโดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ คือ เครื่องส่งสัญญาณแสง (Optical Transmitter) เส้นใยแสง (Optical Fiber) และเครื่องรับสัญญาณแสง (Optical Receiver) แสดงดังรูปที่ 2.1 [5]



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

เครื่องส่งสัญญาณแสงมีหน้าที่มอดูเลตข้อมูลก่อนส่งไปยังเส้นใยแสง การมอดูเลตสัญญาณมีสองประเภทหลักคือ การมอดูเลตภายนอก (External Modulation) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (Light Source) และอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ (Modulator) แยกออกจากกัน อีกประเภทคือ การมอดูเลตโดยตรง (Direct Modulation) นั้นแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะรวมอยู่เป็นอุปกรณ์ชุดเดียวกัน

ตัวกลางที่ใช้ในการนำสัญญาณคือเส้นใยแสง เส้นใยแสงมีรูปแบบให้เลือกใช้งานหลากหลาย ตัวอย่างเช่น SMF มีราคาสูงแต่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำ (Attenuation Coefficient) เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงแบบหลายโหมดคลื่น (Multi-Mode Fiber: MMF) ที่มีราคาถูกกว่า ส่วนเส้นใยแสงแบบ DSF มีคุณสมบัติพิเศษคือ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำสุดที่ความยาวคลื่น Zero Dispersion (1550 nm) และเส้นใยแสงแบบเลื่อนค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1550 nm ค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber (NZ-DSF) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้ในระบบมัลติเพล็กซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น

เครื่องรับสัญญาณแสงประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (Photo Detector) และวงจรตัดสินใจ (Decision Circuit) อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้เป็น Positive Intrinsic Negative Junctions (PIN) และ Avalanche Photodiode (APD) ส่วนวงจรตัดสินใจทำหน้าที่ตัดสินใจว่าสัญญาณขาออกควรจะเป็นบิต '0' หรือ '1' ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากำหนดภายในวงจรตัดสินใจ

2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

แสงที่ใช้ส่งสัญญาณเส้นผ่านเส้นใยแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังนั้นสมการที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงจะเป็นไปตามสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) โดยเริ่มพิจารณาการเดินทางของสัญญาณแสงจากสมการความหนาแน่นกระแสและสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จนท้ายที่สุดได้เป็นสมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงเป็นไปตามสมการที่ (2.1) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเจอร์ (Nonlinear Schrödinger Equation : NLSE) [29], [5]



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

- โดยที่ A คือ กรอบคลื่น (Envelope) ของสัญญาณ
 α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Constant)
 β_2 คือ ค่า Group Velocity Dispersion (GVD)
 γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Coefficient)
 z คือ ระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง
 T คือ กรอบเวลาอ้างอิงที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม (v_g) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาจริง t แสดงได้ในสมการที่ (2.2) ดังนี้

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

เมื่อพิจารณาพจน์ทางขวามือของสมการ (2.1) ถึงปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณ A พจน์แรกคือการลดทอนกำลังสัญญาณ (α) ซึ่งเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางของเส้นใยแสง แต่สามารถชดเชยกำลังสัญญาณได้ด้วยเครื่องขยายสัญญาณแสง สำหรับพจน์ที่สองคือ GVD (β_2) เป็นผลให้สัญญาณพัลส์ขยายกว้างออก และพจน์สุดท้ายคือ ผลของปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr Effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงซึ่งทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางและส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออก โดยที่ความรุนแรงของปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูงสุด (Peak Power) ของสัญญาณ

2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปร่างและกำลังของสัญญาณ

2.3.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ (Attenuation Loss)

การสูญเสียกำลังสัญญาณเป็นการสูญเสียค่ากำลังสัญญาณอันเนื่องมาจากการที่แสงเดินทางในเส้นใยแสงเป็นระยะทางหนึ่งๆ การลดทอนกำลังสัญญาณในเส้นใยแสง เกิดจาก 3 สาเหตุหลัก คือ การดูดซึม (Absorption) ที่เกิดจากคุณสมบัติของวัสดุเอง การกระเจิง (Scattering) ที่เกิดจากทั้งคุณสมบัติของวัสดุและความไม่สมบูรณ์ของท่อนำคลื่น และการแพร่



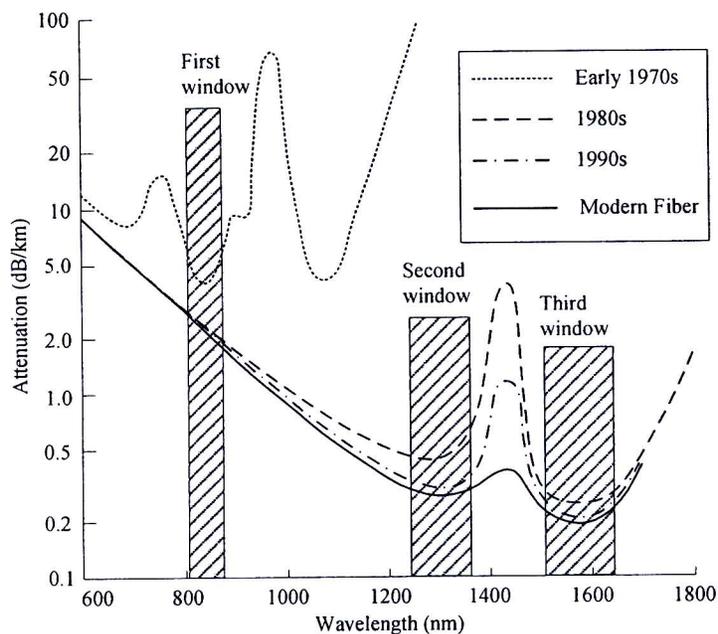
รังสี (Radiation) ที่เกิดจากรูปทรงของเส้นใยแสง โดยมีสมการแสดงการลดทอนกำลังสัญญาณ [30] ดังนี้

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

โดยที่ $P(L)$ คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะ L [km] จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

$P(0)$ คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

α คือ ค่าคงตัวของ การลดทอน [dB/km]



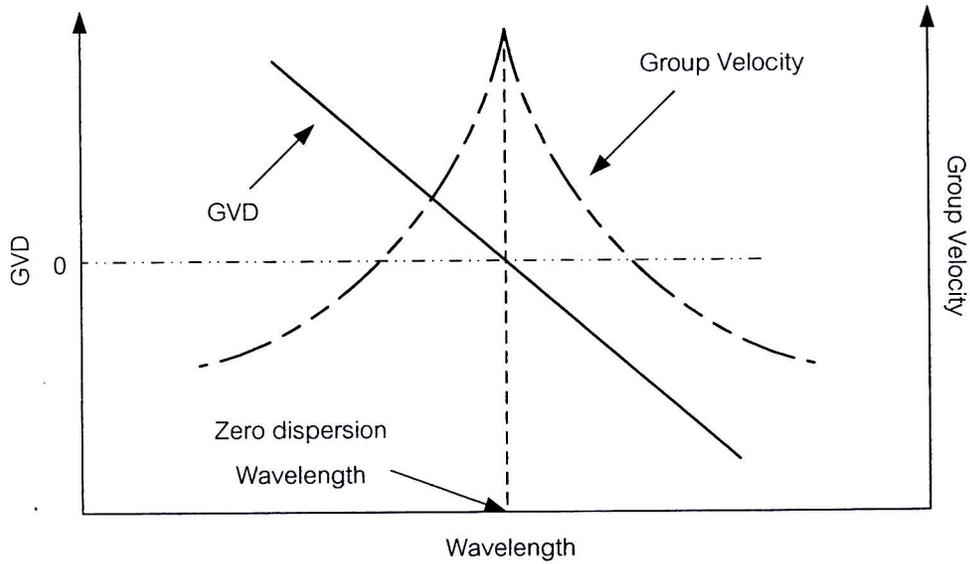
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณในเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น

เส้นโค้งทั้ง 4 เส้นแสดงให้เห็นถึงค่าคงตัวการลดทอน α มีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.2 [30] โดยเส้นที่สองจากบนสุดแสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นประสลับจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงยุค 90 และล่างเส้นที่บ่งล่างสุดซึ่งแสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน เส้นใยแสงในยุคแรกทำจากซิลิกาที่มีอัตราการลดทอนสัญญาณสูงซึ่งเกิดจากความขุ่นและผลของการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering) ทำให้

ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (First Window) ทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm หลังจากนั้นมีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณในยุคที่ 2 (Second Window) ซึ่งแสดงโดยเส้นจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km และในช่วงปี 1977 Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (Third Window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm และยังคงแสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการใช้งานประเภทส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN นั้นเราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งผ่านข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (Forth Window) ซึ่งเพิ่มการใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm [5]

2.3.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber Dispersion)

สัญญาณแสงจะเกิดการบิดเบี้ยวเมื่อเดินทางไปในเส้นใยแสงได้ระยะทางหนึ่ง การบิดเบี้ยวนี้เป็นผลมาจากดิสเพอร์ชันแบบภายในแผนคลื่น (Intramodal Dispersion) และผลการประวิงระหว่างโหมด (Intermodal Delay Effects) โดยการบิดเบี้ยวเหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยการตรวจสอบความเร็วกลุ่ม (Group Velocities) ของโหมดการเดินทาง (Guided Modes) ซึ่งความเร็วกลุ่มเหล่านี้คือความเร็วของพลังงานในแต่ละโหมดที่เดินทางในเส้นใยแสง ตัวอย่างของความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม (Group Velocity Dispersion : GVD) เทียบกับความยาวคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.3 [30] เห็นได้ชัดว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าต่างกันและมีค่าสูงสุดเมื่อค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ ทั้งนี้ GVD เป็นปรากฏการณ์ที่สัญญาณแสงหนึ่งๆ ประกอบด้วยหลายความถี่โดยองค์ประกอบแต่ละความถี่นั้นมีความเร็วกลุ่มต่างกัน ส่งผลให้แต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแสงใช้เวลาที่แตกต่างกันในการเดินทางมีผลทำให้สัญญาณแสงขยายความกว้างออกไปเมื่อมาถึงปลายทาง



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มกับการกระจายของความเร็วกลุ่ม
ในแต่ละความยาวคลื่น

โดยทั่วไปดิสเพอร์ชันที่เกิดในเส้นใยแสงมีสองประเภทได้แก่ ดิสเพอร์ชันแบบภายในแผ่นคลื่นหรือดิสเพอร์ชันภายในสีสัญญาณ (Chromatic Dispersion) ในเส้นใยแสงแบบ SMF และ ดิสเพอร์ชันระหว่างแผ่นคลื่นในเส้นใยแสงแบบ MMF

2.3.2.1 Chromatic Dispersion

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มและค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$v_g = \left[\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right]^{(-1)} = \beta_1^{(-1)} \quad (2.4)$$

$$\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = \frac{\partial \beta_1}{\partial \omega} = \frac{\partial \left(\frac{1}{v_g} \right)}{\partial \omega} \quad (2.5)$$

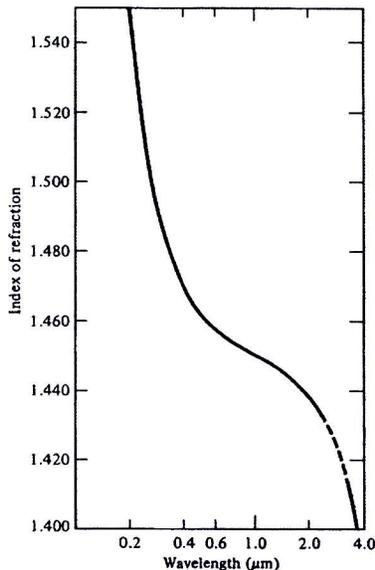
$$D = \left[\frac{(-2\pi c \beta_2)}{\lambda^2} \right] \quad (2.6)$$

โดยที่	V_g	คือ Group Velocity $K = \frac{2\pi}{\lambda}$
	β_2	คือ ค่า GVD [ps^2/km]
	D	คือ ค่าดิสเพอร์ชัน [$\text{ps}/\text{km}/\text{nm}$]
	c	คือ ค่าคงที่ความเร็วแสงในสุญญากาศมีค่าประมาณ 2.9974×10^8 m/s
	λ	คือ ค่าความยาวคลื่น [nm]

Chromatic Dispersion เป็นผลมาจาก 2 ปัจจัยหลักคือ ดิสเพอร์ชันจากวัสดุ (Material Dispersion) และ ดิสเพอร์ชันจากท่อนำคลื่น (Waveguide Dispersion) ซึ่งเป็นผลจากลักษณะรูปร่างของเส้นใยแสง

2.3.2.1.1 Material Dispersion

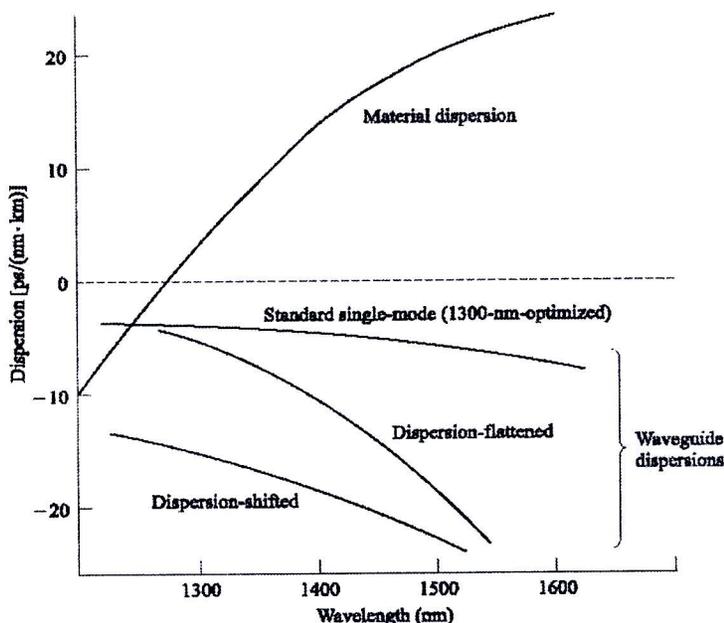
เป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแสง โดยที่ค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงแปรไปตามค่าความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.4 [30] ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้จะทำให้แสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าดัชนีหักเห

2.3.2.1.2 Waveguide Dispersion

เป็นผลจากลักษณะรูปร่างของเส้นใยแสง ทั้งนี้ Waveguide Dispersion เปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับารออกแบบเส้นใยแสงดังแสดงในรูปที่ 2.5 [30]



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันจากท่อนำคลื่น

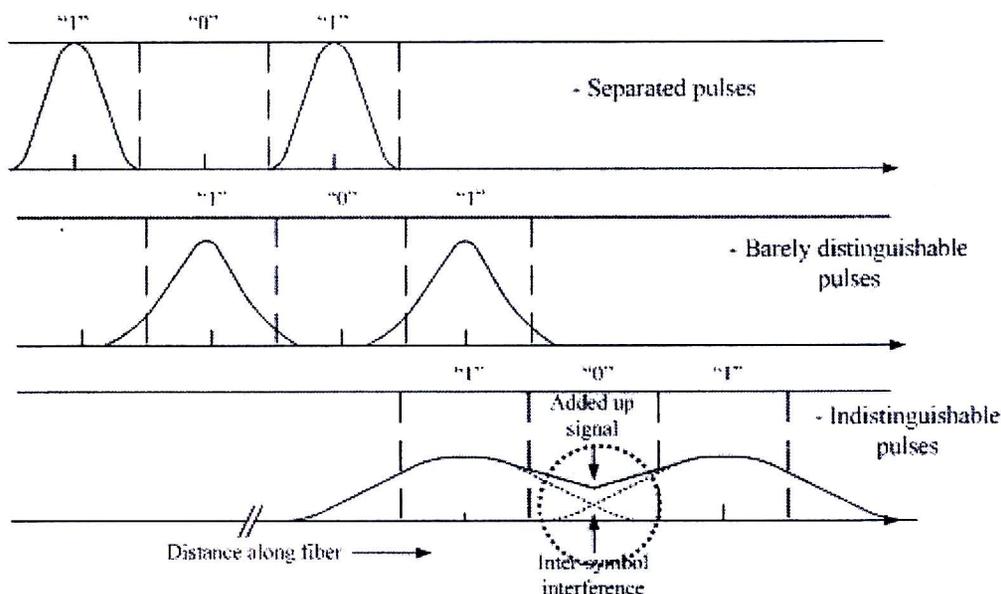
การส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1310 nm สำหรับ SMF: ITU-T G.652 ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (Zero-Dispersion Point) จะหลีกเลี่ยงผลของดิสเพอร์ชันได้ ยิ่งไปกว่านั้นได้มีการปรับปรุงเพื่อให้เกิดค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราการลดทอนต่ำ เราเรียกเส้นใยแสงประเภทนี้ว่า Dispersion Shifted Fiber (DSF: ITU-T G.653) และเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm เราเรียกเส้นใยแสงประเภทนี้ว่า Non-Zero Dispersion Shift Fiber (NZDSF: ITU-T G.655)

2.3.2.2 Inter-Modal Dispersion

Inter-Modal Dispersion เกิดในเส้นใยแสงแบบหลายโหมดและเป็นแหล่งเกิดหลักของดิสเพอร์ชัน เกิดจากแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวกันเดินทางในโหมดที่ต่างกัน ซึ่งในการเดินทางในโหมดที่ต่างแต่กันนี้มีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกันจึงทำให้สัญญาณแสงขยายความกว้างออกไปเมื่อมาถึงปลายทาง

อย่างไรก็ตามในระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นซึ่งสัญญาณแสงประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นรวมอยู่ด้วยกัน แม้จะมีการเลือกความยาวคลื่นหนึ่งให้เกิดค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ความยาวคลื่นอื่นๆ ที่เหลือย่อมได้รับผลจากดิสเพอร์ชันค่าต่างๆ แตกต่างกันไป ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของสัญญาณในช่องสัญญาณที่ต่างกัน (Signal Distortion) และรุนแรงไม่

เท่ากันอันเนื่องมาจากค่าความชันของเส้นโค้งดิสเพอร์ชัน (Dispersion Slope) โดยการบิดเบี้ยวของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการซ้อนทับกันของพัลส์สัญญาณซึ่งถ้าไม่ทำการแก้ไขจะทำให้ข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้ รูปที่ 2.6 [30] เป็นการแสดงการเกิด Inter-Symbol Interference (ISI) จากผลของดิสเพอร์ชัน



รูปที่ 2.6 พัลส์สัญญาณที่ซ้อนทับกัน

2.3.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง

ปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr Effect) เป็นปรากฏการณ์ที่ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงานของสัญญาณทำให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไป เฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปโดยที่มีขนาดขึ้นอยู่กับกำลังงานเรียกว่า การเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear phase shift) เราสามารถแบ่งปรากฏการณ์เคอร์ที่มีผลต่อสัญญาณเดินทางในระบบเส้นใยแสงออกเป็นสามประเภทคือ Self-Phase Modulation (SPM) Cross-Phase Modulation (XPM) และ Four-Wave Mixing (FWM)

2.3.3.1 Self-Phase Modulation (SPM)

SPM เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกันกับสัญญาณเองทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงด้วยกำลังของตัวเองซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นไปดังสมการที่ (2.7)

$$\Delta\omega_{NL} = \frac{\partial\phi_{NL}(z,T)}{\partial T} \quad (2.7)$$

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

ϕ_{NL} คือ เฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

โดยที่ค่า $\phi_{NL}(z,T)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$\phi_{NL} = n_2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) L |E_0|^2 = n_2 k_0 L |E|^2 \quad (2.8)$$

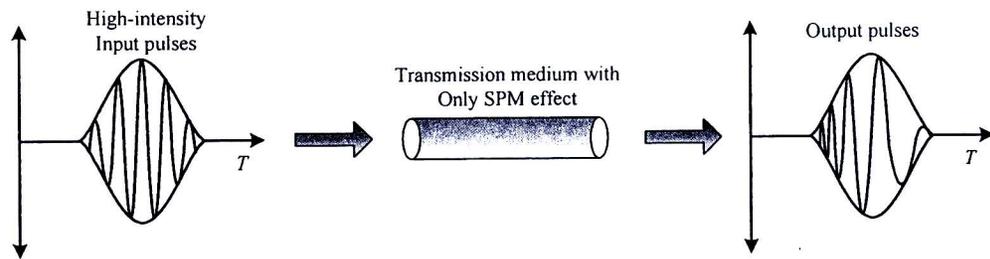
โดยที่ n_2 คือ สัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Index Coefficient) ซึ่งมีค่าประมาณ $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$

$|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสง

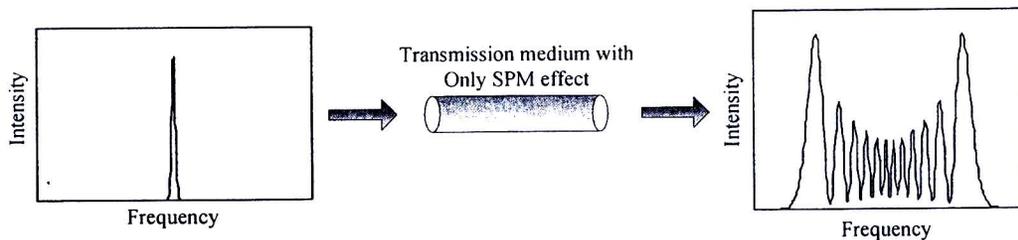
k_0 คือ เลขคลื่นในที่ว่าง (Free Space Wave Number)

SPM ทำให้สเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณขยายออกและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหนี่ยวนำมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังงานแสงสูงสุดแสดงดังรูปที่ 2.7





(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงทาง

(ก) ความถี่ (ข) สเปกตรัมสัญญาณ

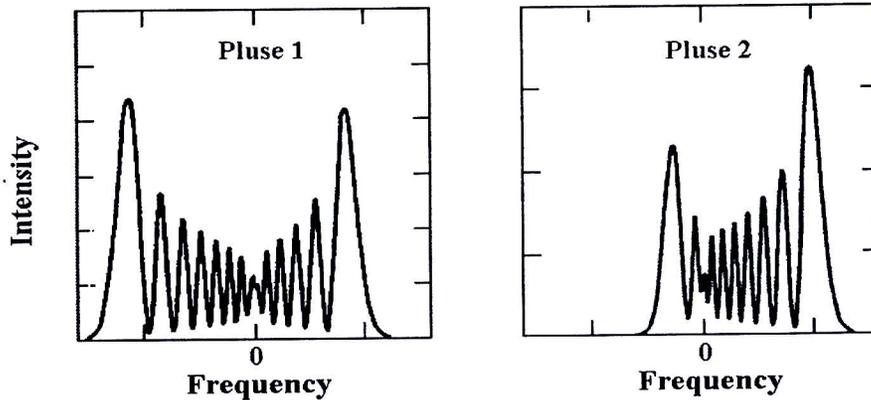
2.3.3.2 Cross-Phase Modulation (XPM)

ปรากฏการณ์ XPM จะเกิดขึ้นเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์ ω_1 และ ω_2 ซึ่งมีค่าต่างกัน ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ ณ ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปจากเดิมเนื่องจากกำลังงานของสัญญาณแสงอื่นที่อยู่ที่คลื่นพาห์มีความถี่ที่ต่างออกไป

โดยทั่วไปเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์เป็น ω_1 และ ω_2 ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง สัญญาณแสงทั้งสองจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกัน ซึ่งการที่ความเร็วกลุ่มไม่ตรงกันนี้จะเป็นปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของสัญญาณแสงทั้งสองในปรากฏการณ์ XPM โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นช่วงที่สัญญาณแสงทั้งสองวิ่งตัดกัน ผลของ XPM มีค่ามากกว่าของ SPM ถึง 2 เท่าโดยมีเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจาก SPM และ XPM ดังนี้ [31]

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L (|E_0|^2 + 2|E_1|^2) \quad (2.9)$$

โดยที่ $|E_0|^2$ 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 มากกว่ากำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 2 จากรูปจะเห็นว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณจะคล้ายกันกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณที่เกิดจากผลของ SPM แต่จะต่างกันตรงที่สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้รับผลจาก XPM จะขยายออกมากกว่าและการขยายออกยังเป็นแบบไม่สมมาตรด้วย โดยสัญญาณพัลส์ที่ 2 จะมีลักษณะการขยายออกของสเปกตรัมที่ไม่สมมาตรกว่าสัญญาณพัลส์ที่ 1 เนื่องจากกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่าส่งผลให้สัญญาณที่พัลส์ที่ 2 ได้รับผลจาก XPM มากกว่า

2.3.3.3 Four Wave Mixing (FWM)

FWM เป็นปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่ที่มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (Frequency Matching) ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่กันและกัน การกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมาเกิดจากสัญญาณพัลส์หลาย ๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่าง ๆ กันมาผสมผสานกัน โดยสัญญาณที่เกิดใหม่ต้องเป็นไปตาม

เงื่อนไขของการจับคู่ความถี่ (Frequency Matching Condition) และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (Phase Matching Condition) ดังสมการที่ (2.10) และ (2.11) ตามลำดับ

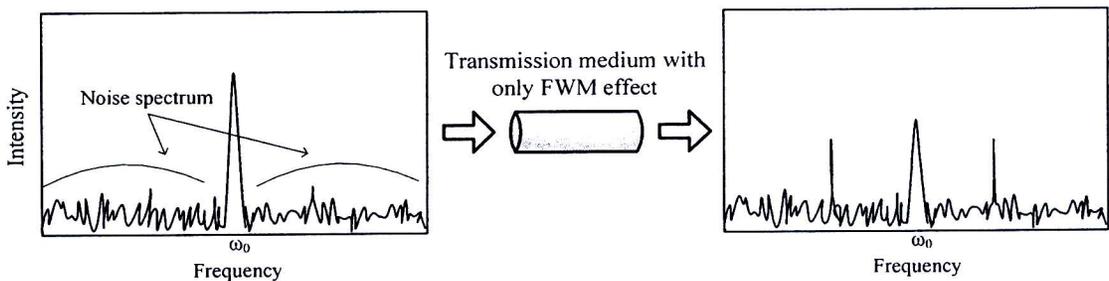
$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \quad (2.10)$$

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3 \quad (2.11)$$



โดยที่ k_n คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n

ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดียว เรียกว่า Intra Channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันจนทำให้เกิดพัลส์เงา (Ghost Pulse) ขึ้นมาในสัญญาณที่มอดูเลตทางความเข้มแสงดังรูปที่ 2.9 ถ้าความถี่ของสัญญาณข้อมูลและความถี่ของสัญญาณรบกวนทางอินพุตขวามือเป็นไปตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ตามหลักของการเกิด FWM แล้ว เมื่อสัญญาณข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่เดินทางไปในเส้นใยแสงจะทำให้เกิดการถ่ายเทกำลังสัญญาณจากสัญญาณข้อมูลไปที่สัญญาณรบกวนทำให้กำลังของสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น และกำลังของสัญญาณข้อมูลลดลง โดยที่จะมีการถ่ายเทลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ และถ้าระยะในการสื่อสารมากขึ้น สัญญาณข้อมูลอาจจะกลายเป็นสัญญาณรบกวนไปได้ในที่สุด



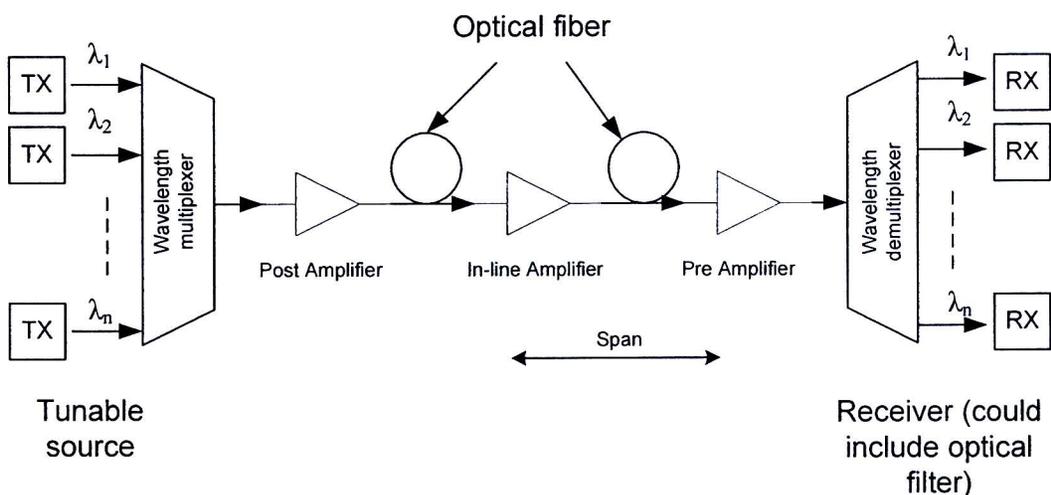
รูปที่ 2.9 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

ในกรณีผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณจะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมา และจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่าเลื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้นแต่ว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM

2.4 ระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณทางแสง

2.4.1 ระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing)

เส้นใยแสงมีแบนด์วิดท์ในการใช้งานที่มหาศาลตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่น 800 nm ถึง 1,600 nm [5] ตามที่ได้กล่าวมาซึ่งเพียงพอกับการใช้งานแบบ Triple Play ซึ่งได้แก่ บริการวิดีโอ ความละเอียดสูงบริการโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ต (Voice Over IP : VoIP) และบริการอินเทอร์เน็ตความเร็ว ทำให้มีแนวความคิดให้ข้อมูลแต่ละชุดจะถูกครอบครองโดยสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นสำหรับแต่ละช่องสัญญาณไปพร้อมกันบนเส้นใยแสงดังรูปที่ 2.10 [5] ระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นมีสัญญาณจำนวน n ความยาวคลื่นถูกมัลติเพลกซ์และส่งไปตามเส้นใยแสงเส้นเดียว การส่งผ่านสัญญาณในระยะทางไกลสามารถส่งสัญญาณไปได้หลายพันกิโลเมตรโดยจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ส่วนระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (Span) ต้องไม่ให้มีระยะทางมากเกินไปจนกำลังสัญญาณที่ถูกลดทอนลงไม่สามารถตรวจจับได้หรือทำให้อัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวนทางแสง (Optical Signal-to-Noise Ratio: OSNR) มีค่าต่ำแสดงถึงประสิทธิภาพที่ไม่ดีของระบบ [12], [10]



รูปที่ 2.10 ระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นบนเส้นใยแสง

ช่วงแรกของเทคโนโลยีระบบ WDM จะเป็นการส่งความยาวคลื่นเพียง 2, 4, 8, 12, และ 16 ความยาวคลื่นโดยใช้สัญญาณในระยะทางสั้นๆ เทคโนโลยีในระยะถัดมาคือ Coarse WDM

(CWDM) มีระยะห่างของความยาวคลื่นอยู่ที่ 20 nm (3,000 GHz) มีจำนวนความยาวคลื่นอยู่ที่ 18 ความยาวคลื่นและถูกจำกัดอยู่ที่พิสัยความยาวคลื่น 1,270 nm ถึง 1,610 nm ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.2 และ Dense WDM (DWDM) มีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นอาจจะอยู่ที่ 200, 100, 50, หรือ 25 GHz และมีจำนวนช่องสัญญาณ 16-160 ช่องสัญญาณ ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 [32]

2.4.2 ระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่น (Dense Wavelength Division Multiplexing)

ระบบการมัลติเพลกซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นแบบ DWDM พัฒนามาจากระบบสื่อสารทางแสงด้วยเส้นใยแสงที่แต่เดิมใช้เพียงแสงสีเดียวหรือแสงที่มีค่าความยาวคลื่นคงที่เพียงค่าเดียว เช่น 1330 nm หรือ 1550 nm เป็นต้น ระบบสื่อสารข้อมูลหลายช่องสัญญาณในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงที่ผ่านมาช่วงปี ค.ศ. 1900-1999 คือระบบ Time Division Multiplex / Pulse Code Modulation (TDM/PCM) ที่ใช้ระบบสายส่งที่เป็นสายทองแดง และระบบ SDH/SONET ที่ใช้เส้นใยแสงสามารถส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วหลายระดับ ตัวอย่างเช่น ความเร็วที่อัตรา 2.5 Gb/s ซึ่งเป็นของระบบ STM-16 ที่ใช้ระบบสายส่ง OC-48 เป็นต้น ถือได้ว่ามีความเร็วสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบสื่อสารแบบดั้งเดิม STM-16 นี้ใช้เส้นใยแสงเพียงเส้นเดียวและใช้แสงเพียงความยาวคลื่นเดียวเป็นคลื่นพาห้สำหรับส่งข้อมูลหลายช่องสัญญาณที่ถูกรวมกันด้วยเทคนิคการมัลติเพลกซ์ (Multiplex) ด้วยวงจรรอเล็กทรอนิกส์ แม้ว่าระบบสื่อสารจะส่งข้อมูลได้เร็วถึง 2.5 Gb/s แต่ยังมีความพยายามที่จะหาวิธีเพิ่มความเร็วมากขึ้นไปอีก ได้แก่ การเพิ่มอัตราเร็วจากระบบเดิมที่ใช้อยู่ซึ่งสามารถพัฒนาระบบเดิมให้มีขีดการทำงานเพิ่มขึ้นได้อีกถึง 40 Gb/s แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของขีดจำกัดด้านความถี่ในการทำงานของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ อีกวิธีคือการเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นในเส้นใยแสงเส้นเดิม เทคนิคนี้สามารถกระทำได้โดยอาศัยเทคโนโลยีที่มีอยู่เดิม อีกทั้งเส้นใยแสงเดิมในระบบก็ยังสามารถรองรับขีดการทำงานนี้ได้ซึ่งจากแนวคิดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของระบบสื่อสารแบบ WDM ซึ่งพัฒนามาเป็น DWDM ในปัจจุบัน [33]

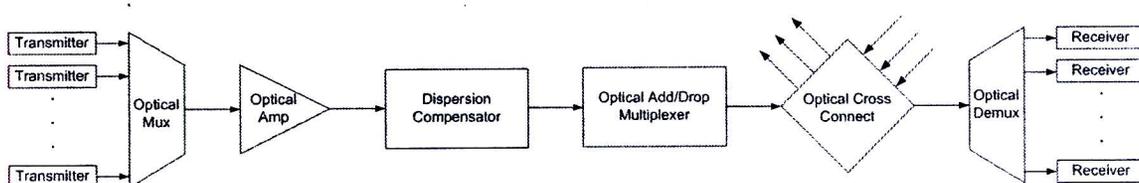
2.4.2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานในการทำงานของระบบ DWDM

ในระบบ WDM ใช้แสงที่ความยาวคลื่น 1,330 nm และ 1,550 nm แทนช่องสัญญาณอิสระรวมกันทางแสงแล้วส่งไปในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน ซึ่งวิธีนี้ทำให้ไม่สามารถเพิ่ม

ช่องสัญญาณที่อยู่ในเทอมของความยาวคลื่นแสงได้มากนักเพราะแสงในแต่ละช่องสัญญาณมีความยาวคลื่นต่างกันมากจะมีค่าการลดทอนสัญญาณไม่เท่ากัน ทำให้ระยะทางสูงสุดที่สามารถส่งข้อมูลได้มีค่าไม่เท่ากัน ผลลัพธ์คือ ในระบบสื่อสารทางไกลต้องใช้สถานีทวนสัญญาณ (Repeater) แยกกันสำหรับแต่ละความยาวคลื่นเป็นผลทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นและทำให้ระบบมีความยุ่งยาก การแก้ปัญหาทำได้โดยเลือกช่องสัญญาณให้มีค่าความยาวคลื่นแสงใกล้เคียงกัน โดยเป็นแสงในช่วงของหน้าต่างความยาวคลื่นแสงค่าหนึ่ง เช่น ในระบบปัจจุบัน มักจะเลือกช่องหน้าต่างความยาวคลื่นแสงในช่วง 1550 nm และความยาวคลื่นแสงของแต่ละช่องสัญญาณจะมีช่วงห่างกัน (Channel Spacing : CS) ประมาณ 1 nm เช่นในระบบ DWDM ระบบหนึ่งมี 8 ช่องสัญญาณ อาจประกอบไปด้วยความยาวคลื่นแสง 1550, 1551, 1552, ..., 1557 nm ซึ่งหมายถึงมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ CS เท่ากับ 1 nm การกำหนดให้ CS มีค่าน้อย หมายถึงการเพิ่มโอกาสให้มีอัตราการส่งข้อมูลหรือบิตเรตเพิ่มมากขึ้นด้วย

โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงแบบ DWDM ประเภทระบบสื่อสารแบบทางเดียว (Simplex) แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 เริ่มจากเครื่องส่งสัญญาณแสงทำหน้าที่เปลี่ยนข้อมูลทางไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงแล้วส่งไปในเส้นใยแสง เครื่องส่งสัญญาณแสงหนึ่งชุดจะส่งแสงออกมา 1 ความยาวคลื่นเรียกว่า 1 ช่องสัญญาณ จากนั้นแสงจากช่องสัญญาณต่างๆ จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยกระบวนการทางแสงด้วย Optical Multiplexer ส่งไปยังปลายทางด้วยเส้นใยแสงเพียงเส้นเดียว ข้อมูลที่เดินทางไปในเส้นใยแสงจะถูกลดทอนสัญญาณทำให้สัญญาณแสงมีความเข้มแสงน้อยลงจึงจำเป็นต้องมีเครื่องขยายสัญญาณทางแสงทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกๆ ช่องสัญญาณให้มีความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไปได้ สัญญาณข้อมูลที่ส่งโดยทั่วไปเป็นสัญญาณดิจิทัลในลักษณะของพัลส์ข้อมูล เมื่อสัญญาณพัลส์เดินทางในเส้นใยแสงจะเกิดปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันทำให้สัญญาณพัลส์บานออก ส่งผลให้ปริมาณข้อมูลหรือบิตเรตสูงสุดของระบบลดลง ดังนั้นการส่งสัญญาณในระบบ DWDM จึงต้องมีอุปกรณ์ Dispersion Compensator ที่ทำหน้าที่ปรับสัญญาณพัลส์ที่บานออกให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ผลของปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันในระบบ DWDM มีผลกระทบทุกช่องสัญญาณหรือทุกความยาวคลื่น โดยที่ระบบที่มีจำนวนช่องสัญญาณมากผลกระทบของปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันยิ่งมีมากด้วย ในระบบโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่ตัวอย่างเช่น โครงข่ายแบบ SDH/SONET มีโครงสร้างเป็นวงแหวน (Ring) หรือเมช (Mesh) ในระบบ DWDM มีอุปกรณ์ Add / Drop เพื่อให้ระบบสามารถขยายการ

ติดต่อเข้ากับสื่อสถานีอื่นได้โดยนำไปใช้กับระบบเดิมด้วย Optical Add / Drop Multiplexer (OADM) โดยการทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้เป็นการจัดการทางแสงและในระบบ DWDM สถานีที่ทำหน้าที่เป็นชุมสายขนาดใหญ่มีอุปกรณ์ Cross Connect ทำหน้าที่ตัดต่อหรือเลือกเส้นทางของข้อมูลในระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นด้วย Optical Cross Connect (OXC) เมื่อสัญญาณเดินทางถึงปลายทาง สัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณที่รวมกันอยู่จะถูกแยกออกเป็นช่องสัญญาณเดี่ยวตามค่าความยาวคลื่นแสงด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Optical Demultiplexer ซึ่งมีหลักการทำงานตรงข้ามกับ Optical Multiplexer



รูปที่ 2.11 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารแบบ DWDM

ระบบ DWDM สามารถใช้กับระบบสื่อสารได้ทั้งขนาดเล็กเช่น การสื่อสารกันแบบ Point-to-Point หรือขนาดใหญ่อย่าง Backbone Network โดยมีอุปกรณ์มากขึ้นกับขนาดของโครงข่ายทั้งที่เป็นอุปกรณ์ประเภทแอ็กทีฟ (Active Component) ที่ต้องมีการป้อนพลังงานจากภายนอกและอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ (Passive Component) ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก

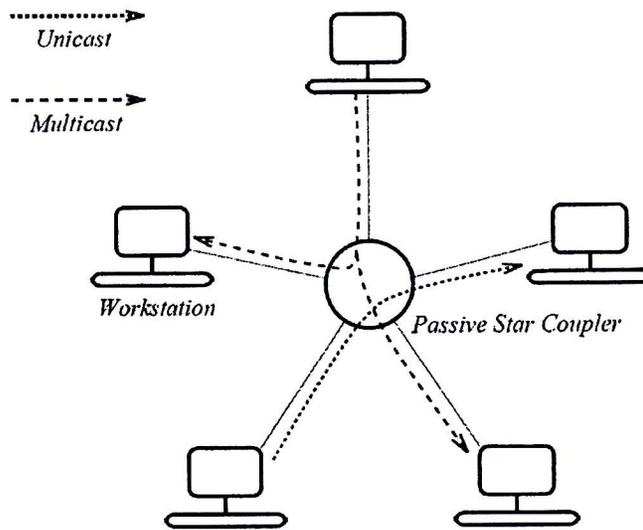
2.5 โครงสร้างโครงข่ายดับเบิลยูติเอ็่ม

โครงสร้างโครงข่ายดับเบิลยูติเอ็่มแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ Broadcast-and-Select (Local) Optical WDM Network และ Wavelength-Routed (Wide-Area) Optical Network [5]

2.5.1 Broadcast-and-Select (Local) Optical WDM Network

Broadcast-and-Select (Local) Optical WDM Network อาจถูกสร้างโดยการเชื่อมต่อโหนดด้วยเส้นใยแสงที่สามารถส่งได้สองทิศทางไปยัง Passive Star ดังรูปที่ 2.12 [5] โหนดจะส่งข้อมูลทางแสงไปยัง Star บนความยาวคลื่นใดคลื่นหนึ่ง ข้อมูลจากต้นทางหลายๆ ต้นทางจะถูกรวมกันทางแสงโดย Star จากนั้นข้อมูลจะถูกแพร่สัญญาณไปยังทุกๆ โหนดที่เหลือทั้งหมดด้วยกำลัง

สัญญาณที่เท่ากัน ที่ตัวรับจะใช้ Optical Filter กรองสัญญาณที่มีความยาวคลื่นเดียวซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ต้องการติดต่อกับตัวรับนั้น ทั้งนี้เมื่อตัวส่งสัญญาณส่งสัญญาณบนความยาวคลื่น λ_1 ตัวรับหลายตัวสัญญาณสามารถปรับความยาวคลื่นของ Filter เพื่อรับข้อมูล λ_1 นี้ได้ ทำให้ Passive Star สามารถรองรับการให้บริการแบบ Multicast ได้



รูปที่ 2.12 A Passive-Star-Based Local Optical WDM Network.

2.5.2 Wavelength-Routed (Wide-Area) Optical Network

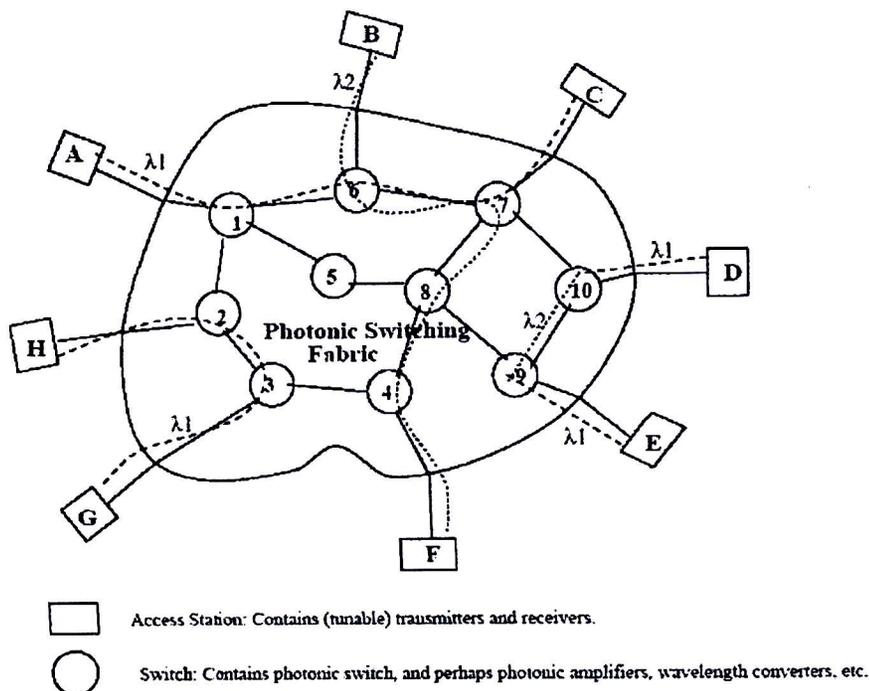
Wavelength-Routed (Wide-Area) Optical Network แสดงในรูปที่ 2.13 โครงข่ายประกอบด้วย Optical Switching เชื่อมต่อกับเส้นใยแสงในลักษณะเมชโดยผู้ใช้บริการเชื่อมต่อกับสวิตช์โดยเส้นใยแสง เมื่อรวมผู้ใช้หนึ่งคนเข้ากับสวิตช์เราจะเรียกว่า โหนด แต่ละโหนดมีตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณที่สามารถปรับความยาวคลื่นได้ แต่ในความเป็นจริงแล้วสวิตช์หนึ่งตัวสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้หลายคน

กลไกพื้นฐานของการสื่อสารในโครงข่าย Wavelength-Routed คือ Lightpath ซึ่ง Lightpath คือ ช่องทางการสื่อสารทางแสงระหว่างคู่โหนดใดๆ ในโครงข่ายซึ่งอาจครอบคลุมมากกว่า 1 ข่ายเชื่อมโยง โหนดที่ปลายทางของ Lightpath เข้าถึง Lightpath ได้ด้วยตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณที่ปรับความยาวคลื่นเป็นความยาวคลื่นของ Lightpath นั้น ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 2.13 Lightpath ถูกสร้างขึ้นระหว่างโหนด A และ โหนด C บนความยาวคลื่น λ_1 หรือ Lightpath ถูกสร้างขึ้นระหว่างโหนด B และ โหนด F บนความยาวคลื่น λ_2 และ Lightpath ถูกสร้างขึ้นระหว่าง

โหนด H และ โหนด G บนความยาวคลื่น λ_1 lightpath ระหว่างโหนด A และโหนด C วิ่งผ่านสวิตช์ 1, 6 และ 7 ตามลำดับ

ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงความยาวคลื่น Lightpath จะวิ่งบนความยาวคลื่นเดียวตลอดทั้งเส้นทางบนโครงข่ายซึ่งเรียกว่า คุณสมบัติ Wavelength-Continuity ของ Lightpath ความต้องการนี้อาจไม่จำเป็นถ้าเรามีอุปกรณ์แปลงความยาวคลื่นในระบบ ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 2.13 [5] Lightpath ระหว่างโหนด D และโหนด E เดินทางบนเส้นใยแสงจากโหนด D ไปยังสวิตช์ 10 บนความยาวคลื่น λ_1 จากนั้นถูกเปลี่ยนเป็นความยาวคลื่น λ_2 ที่ สวิตช์ 10 และเดินทางต่อไปในเส้นใยแสงระหว่างสวิตช์ 10 และสวิตช์ 9 บนความยาวคลื่น λ_2 และถูกเปลี่ยนกลับมาเป็นความยาวคลื่น λ_1 อีกครั้งที่สวิตช์ 9 จากนั้นเดินทางต่อไปบนเส้นใยแสงจากสวิตช์ 9 ไปยังโหนด E บนความยาวคลื่น λ_1

ความต้องการพื้นฐานสำคัญในโครงข่าย Wavelength-Routed คือ Lightpath 2 เส้นทางหรือมากกว่าที่เดินทางบนเส้นใยแสงเส้นเดียวกันต้องมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันจึงจะทำให้ไม่เกิดการรบกวนระหว่างกัน



รูปที่ 2.13 A Wavelength-Routed (Wide-Area) Optical WDM Network.

ในโครงข่าย Wavelength-Routed ทราฟฟิกถูกส่งสัญญาณบนช่องทางที่เรียกว่า Lightpath ซึ่งถูกส่งผ่านโหนดที่เชื่อมต่อกันด้วยเส้นใยแสง โหนดอาจต้องการ O-E-O Conversion เพื่อสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่หรือเป็นตัวต่อประสาน (Interface) ระหว่างโครงข่ายทางแสงกับ อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ในโครงข่ายแบบ Opaque เป็นการส่งสัญญาณเป็นแบบจุดต่อจุด ดังนั้นสัญญาณจึงถูกสร้างขึ้นใหม่ทุกๆ Intermediate Node ตามเส้นทางของ Lightpath โดย O-E-O Conversion ความต้องการที่จะส่งสัญญาณด้วยความเร็วที่สูงขึ้นสามารถทำได้โดยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น แต่อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายสำหรับระบบจุดต่อจุดอาจมีค่าสูงมากเนื่องด้วยจำนวนอุปกรณ์ Regenerator ที่ทุกๆ โหนด ต้นทุนดังกล่าวสามารถลดลงได้ในโครงข่ายแบบ Translucent ซึ่งเป็นโครงข่ายที่อุปกรณ์ Regenerator ถูกใช้งานที่บางโหนดแทนที่การใช้งานในทุกโหนด แต่เป้าหมายสูงสุดของการลดจำนวนทางอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์นำไปสู่การพัฒนาเป็นโครงข่ายทางแสงแบบ Transparency [34]

ในโครงข่ายทางแสงแบบ Transparency ข้อมูลถูกส่งในรูปของแสงตลอดทั้ง Lightpath ดังนั้นโครงข่ายแบบ Transparency สามารถกำจัดอุปกรณ์ O-E-O Conversion ที่มีราคาแพงได้ ยิ่งไปกว่านั้นโครงข่ายแบบ Transparency สามารถให้ความเป็น Transparency ทั้งอัตราข้อมูล รูปแบบของสัญญาณและโปรโตคอล แต่อย่างไรก็ตามคุณภาพของสัญญาณทางแสงลดต่ำลงเมื่อเดินทางผ่านอุปกรณ์ทางแสงหลายตัวตาม Lightpath จากต้นทางไปยังปลายทาง สาเหตุของการลดทอนของคุณภาพเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงและดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง เป็นต้น ดังนั้นโครงข่ายทางแสงแบบ Transparency จึงต้องมีการจัดการการลดทอนของคุณภาพสัญญาณจากผลของดิสเพอร์ชันด้วยการชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน [35]

2.6 โครงข่าย SDH

ความเป็นมาของ SDH เริ่มจากการจัดการโครงข่ายสายโทรศัพท์ เมื่อสัญญาณโทรศัพท์ได้เปลี่ยนเป็นดิจิทัล โดยช่องสัญญาณเสียงหนึ่งช่องใช้สัญญาณแถบกว้าง 64 Kb/s แต่ในอดีตการจัดมาตรฐานลำดับชั้นของเครือข่ายสัญญาณเสียงยังแตกต่างกัน เช่นในสหรัฐอเมริกา มีการจัดกลุ่มสัญญาณเสียง 24 ช่อง เป็น 1.54 Mb/s หรือที่เรารู้จักกันในนาม T1 และระดับต่อไปเป็น 63.1, 447.3 Mb/s แต่ทางกลุ่มยุโรปใช้ 64 Kb/s ต่อหนึ่งสัญญาณเสียง และจัดกลุ่มต่อไปเป็น 32

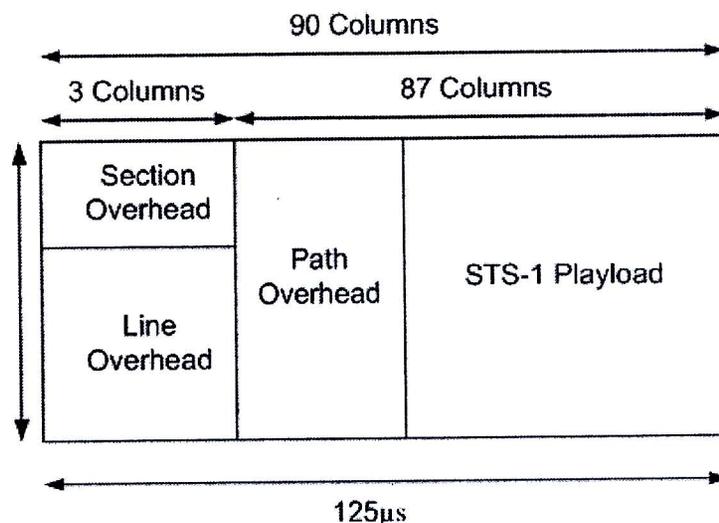
ช่องเสียงคือ 2.048 Mb/s ที่รู้จักกันในนาม E1 และจัดกลุ่มใหญ่ขึ้นเป็น 8.44, 34.36 Mb/s การวางมาตรฐานใหม่สำหรับเครือข่ายความเร็วสูงจะต้องรองรับการใช้งานต่างๆ ทั้งเครือข่ายสัญญาณโทรศัพท์และสัญญาณมัลติมีเดียอื่น ๆ เช่น สัญญาณโทรทัศน์ ข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต และที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอีกได้ คณะกรรมการจัดการมาตรฐาน SDH จึงรวมแนวทางต่าง ๆ ในลักษณะให้ยอมรับกันได้ การเน้น SDH ให้เป็นกลางที่ทำให้เครือข่ายประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ วิ่งลงตัวได้จึงเป็นเรื่องสำคัญ โดยวางแถบกว้างพื้นฐานระดับต่ำสุดไว้ที่ 51.84 Mb/s โดยที่ภายในแถบกว้างนี้จะเป็นเฟรมข้อมูลที่สามารถนำช่องสัญญาณเสียงโทรศัพท์หรือการประยุกต์อื่นใดเข้าไปรวมได้และยังรวมระดับของสัญญาณต่ำสุด 51.84 Mb/s นี้ให้สูงขึ้น เช่น ถ้าเพิ่มเป็นสามเท่าของ 51.84 ก็จะได้ 155.52 [36]

SONET/SDH เป็นมาตรฐานสากลของเครือข่ายสื่อสัญญาณความเร็วสูง เป็นเครือข่ายที่มีความทันสมัยมากในการสื่อสัญญาณและการบริหารจัดการเครือข่ายเทคโนโลยีของ SONET/SDH ช่วยให้ Network Operator สามารถตอบสนองของความต้องการใช้ความจุของช่องสัญญาณของลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว เครือข่าย SONET/SDH สามารถถูกออกแบบสร้างให้มีความสามารถในการฟื้นตัวเองได้อย่างอัตโนมัติในกรณีที่มีปัญหาขัดข้องเกิดขึ้นกับเครือข่าย ทำให้เครือข่ายมีความสามารถในการใช้งานได้ (Availability) ที่สูงขึ้น การจัดโครงสร้างการมัลติเพล็กซ์ของสัญญาณ SONET/SDH ได้ช่วยให้สามารถต่อไขว้ (Cross-Connect) ช่องสัญญาณ Low-Order ที่อยู่ภายในช่องสัญญาณ High-Order ได้โดยไม่จำเป็นต้องตีมัลติเพล็กซ์สัญญาณทั้งหมดออกก่อน [37]

2.6.1 Basic Building Block ของมาตรฐาน SONET

Basic Building Block ของมาตรฐาน SONET เรียกว่า Synchronous Transport Signal level1 (STS-1) ประกอบขึ้นด้วย 90 x 9 (Columns x Rows) STS-1 มีอัตราการส่งข้อมูล (Line Rate) เท่ากับ 51.84 Mbps และมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นด้วยการมัลติเพล็กซ์โดย Bit Interleaved Synchronous Multiplexer เป็นจำนวน N เฟรม จาก STS-1 ไปสู่ STS-N โดยที่ $N = 1, 3, 12, 24, 48, 192$ ดังนั้นอัตราการส่งข้อมูลใน STS-N มีค่าเท่ากับ $N \times 51.84$ Mbps โดยโครงสร้างในส่วนที่เป็น Overhead ส่งผลให้ความจุในการส่งผ่านข้อมูล (Transmission Capacity) ลดลง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Transmission Capacity} = 9 \times (90 - 3) \times \frac{1}{125\mu\text{s}} \times 8 \left(\frac{\text{bits}}{\text{byte}} \right) = 50.112 \text{ Mb/s}$$

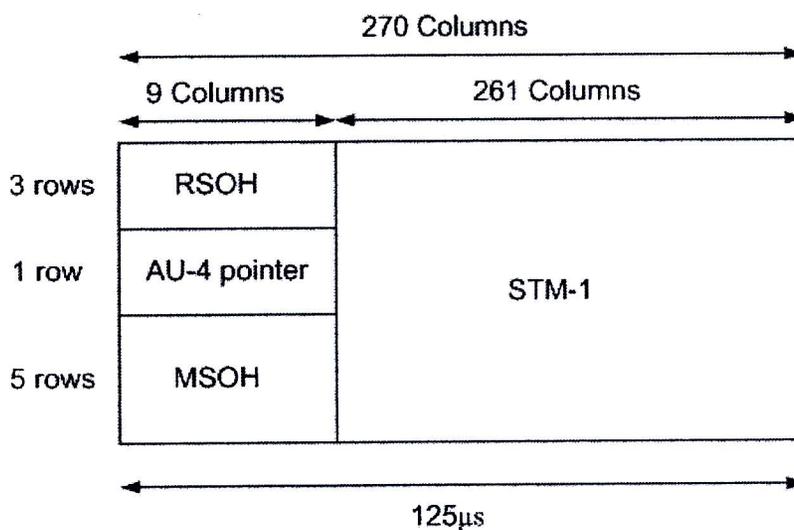


รูปที่ 2.14 Basic SONET Building Block

2.6.2 Basic Building Block ของมาตรฐาน SDH

Basic Building Block ของมาตรฐาน SDH เรียกว่า Synchronous Transport Module Level1 (STM-1) ประกอบขึ้นด้วย 270 Columns x 9 Rows STM-1 มีอัตราการส่งข้อมูล (Line Rate) เท่ากับ 155.52 Mbps และมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น เป็นจำนวน N เฟรม จาก STM-1 ไปสู่ STM-N โดยที่ N = 1, 4, 16, 64 ดังนั้นอัตราการส่งข้อมูลใน STM-N มีค่าเท่ากับ N x 155.52 Mbps (กำหนดโดยมาตรฐานของ G.707) เนื่องจากโครงสร้างในส่วนที่เป็น Overhead ส่งผลให้ความจุในการส่งผ่านข้อมูลลดลงซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Transmission Capacity} = 9 \times (270 - 9) \times \frac{1}{125\mu\text{s}} \times 8 \left(\frac{\text{bits}}{\text{byte}} \right) = 150.336 \text{ Mb/s}$$



รูปที่ 2.15 Basic SDH Building Block

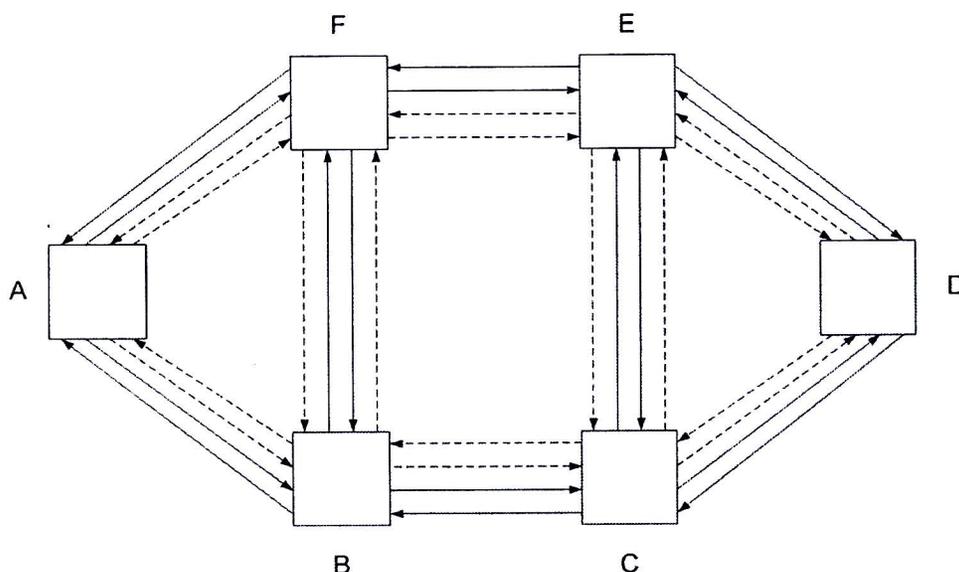
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐานแบบ SONET และ SDH

SONET Optical Carrie Level	SONET Frame Format	SDH Level and Frame Format	Line rate (Mbps)	SONET Capacity (28 T1s = T3)	SDH Capacity (63 E1s = E3)
OC-1	STS-1	-	51.84	1 x 28 T1s	1 x 21 E1s
OC-3	STS-3	STM-1	155.52	3 x 28 T1s	1 x 63 E1s
OC-12	STS-12	STM-4	622.08	12 x 28 T1s	4 x 63 E1s
OC-48	STS-48	STM-16	2,488.32	48 x 28 T1s	16 x 63 E1s
OC-192	STS-192	STM-64	9,953.28	192 x 28 T1s	64 x 63 E1s
OC-768	STS-768	STM-256	39,813.12	768 x 28 T1s	256 x 63 E1s
OC-3072	STS-3072	STM-1024	159,252.48	3072 x 28 T1s	1024 x 62 E1s

การมัลติเพลกซ์ในมาตรฐาน SDH เริ่มต้นด้วยการ Mapping สัญญาณที่มีอัตราเร็วแตกต่างกันตามความต้องการในการใช้งานแบนด์วิดท์เข้าสู่ Containers (Cs) ส่วนของ Cs จะรวมกันกับส่วนของ Path Over Head (POH) ได้เป็น Virtual Containers (Cs + POH = VCs) ยกตัวอย่างเช่น C-4 ซึ่งประกอบขึ้นด้วย 260 x 9 (Columns x Rows) รวมกันกับส่วนของ POH ได้เป็นสัญญาณ VC-4 ส่วนนี้จะรวมกันกับ AU-4 pointer ขนาด 9 Bytes ได้เป็นสัญญาณ AU-4

(AUG) จากนั้นส่วนของ Transport Overhead ซึ่งประกอบขึ้นด้วย RSOH และ MSOH จะถูกเพิ่มลงไปในสัญญาณ AU-4 ได้เป็นสัญญาณ STM-1

2.6.3 การป้องกันความเสียหายในโครงข่าย SDH ลักษณะเมฆ

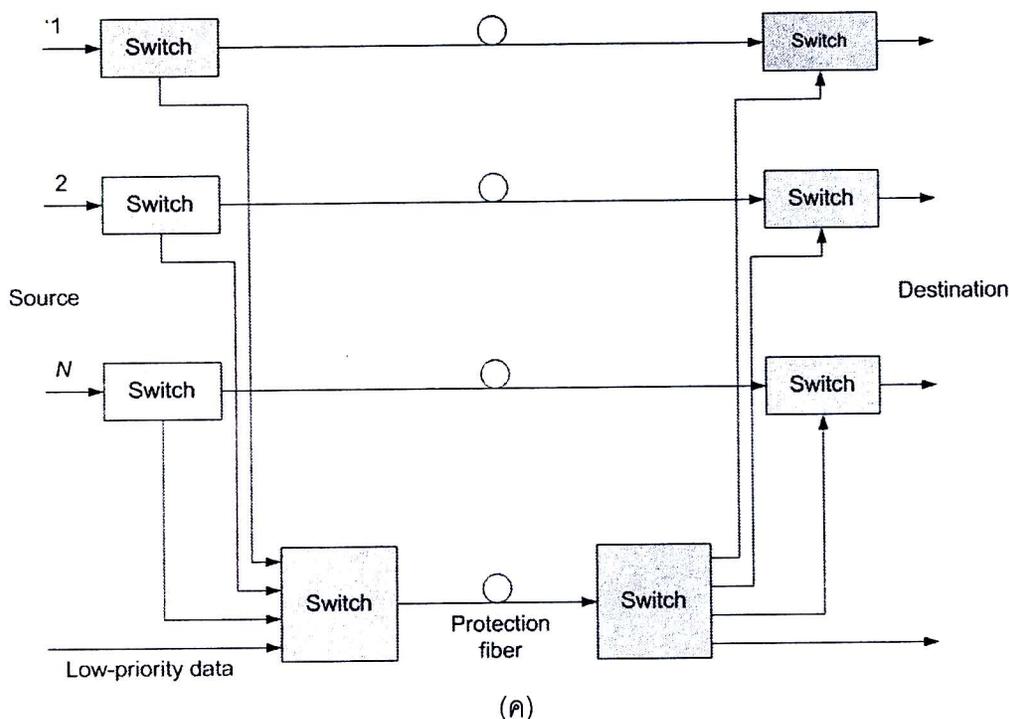
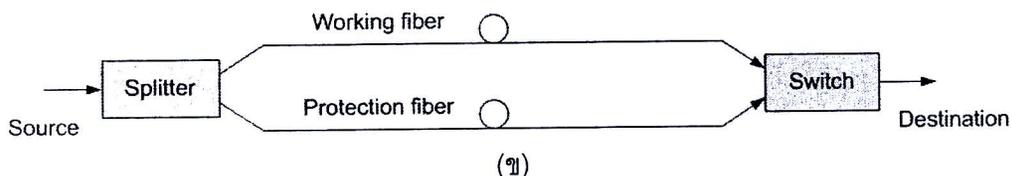
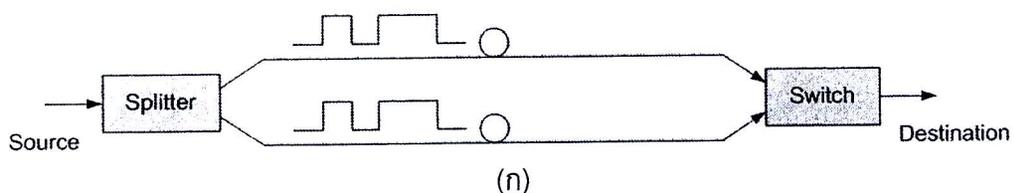


รูปที่ 2.16 โครงข่ายลักษณะเมฆประกอบไปด้วยเส้นใยแสงทำงานแทนด้วยเส้นทึบ และเส้นใยแสงสำรองแทนด้วยเส้นประ

โครงข่าย SDH ลักษณะเมฆเกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างวงลูปปิดหลายลูปดังรูปที่ 2.16 ที่แต่ละสถานีมี ADM หน้าทีหลักของ ADM คือ การเพิ่มและดึงช่องสัญญาณในสายออกมาใช้งานได้ เครือข่ายแบบเมฆประกอบด้วยเส้นใยแสงทำงาน 2 เส้นและเส้นใยแสงสำรอง 2 เส้น ทราฟฟิกสามารถรับและส่งได้ทั้งสองทิศ สำหรับการส่งผ่านสัญญาณในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติจะเลือกกระยะทางการส่งผ่านสัญญาณที่สั้นกว่า (Short Path) และเลือกกระยะทางการส่งผ่านสัญญาณที่ยาวกว่า (Long Path) สำรองไว้สำหรับการป้องกันโครงข่ายจากความเสียหายที่เกิดขึ้น กลไกการกู้คืนสัญญาณ (Restoration) ของโครงข่ายลักษณะเมฆให้ข้อดีเนื่องจาก OXC มีความสามารถเชื่อมต่อของสัญญาณทางแสงจากสัญญาณขาเข้าใดๆ ไปสัญญาณขาออกใดๆ ส่งผลให้มีความสามารถเลือกเส้นทางใหม่ (Reroute) เส้นทางหนึ่งหรือหลายเส้นทางได้อย่างชาญฉลาดและอัตโนมัติใกล้ๆ บริเวณที่เกิดความเสียหายในโครงข่าย อีกทั้งกลไกการกู้คืนสัญญาณสามารถทำได้เร็วถึง 50 ms หรือน้อยกว่า [4]

ความเสียหายสามารถเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมต่อใย โหนด และ แต่ละช่องสัญญาณของ WDM ความเสียหายของข่ายเชื่อมต่อใยเกิดเส้นใยแสงขาด ความเสียหายของโหนดอาจเกิดจาก Power Outages หรือ อุปกรณ์เสียหาย (Equipment Failures) ความเสียหายของแต่ละช่องสัญญาณอาจเกิดจากการเสียหายของอุปกรณ์เกี่ยวกับช่องสัญญาณนั้นๆ ตัวอย่างเช่น ตัวส่งสัญญาณ หรือ ตัวรับสัญญาณ เป็นต้น กลไกการป้องกันความเสียหายในเกือบทุกกรณีถูกออกแบบให้ป้องกันการเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมต่อใยใดเชื่อมต่อใยหนึ่ง (A Single Failure) ซึ่งสมมุติได้ว่าโครงข่ายถูกออกแบบดีพอให้การเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมต่อใยหลายข่ายเชื่อมต่อใยพร้อมกันเกิดขึ้นได้น้อยมาก

กลไกการป้องกันที่ใช้กับโครงข่ายเป็นการนำกลไกการป้องกันที่ใช้กับข่ายเชื่อมต่อใยจุดต่อจุดมาประยุกต์ใช้ 2 วิธีพื้นฐานของกลไกการป้องกันที่ถูกใช้กับข่ายเชื่อมต่อใยจุดต่อจุดคือ การป้องกันแบบ 1 + 1 (1 + 1 Protection) และการป้องกันแบบ 1 : 1 (1 : 1 Protection) หรือการป้องกันแบบ 1 : N (1 : N Protection) แสดงในรูปที่ 2.17 [38]



รูปที่ 2.17 เทคนิคการป้องกันความเสียหาย

แบบ (ก) 1 + 1 (ข) 1 : 1 (ค) 1 : N

ในการป้องกันแบบ 1 + 1 ทราฟฟิกถูกส่งแบบเส้นใยแสงสองเส้นที่แยกออกจากกันในเวลาเดียวกันจากต้นทางไปยังปลายทาง เส้นใยแสงเส้นหนึ่งทำหน้าที่เป็นเส้นใยแสงทำงานและอีกเส้นหนึ่งทำหน้าที่เป็นเส้นใยแสงสำรอง ปลายทางจะเลือกรับสัญญาณจากเส้นใยแสงเส้นใดเส้นหนึ่ง เมื่อเส้นใยแสงขาดปลายทางจะเปลี่ยนการรับสัญญาณไปยังเส้นใยแสงอีกเส้นได้อย่างต่อเนื่อง การป้องกันรูปแบบนี้ทำได้รวดเร็วและไม่ต้องการโปรโตคอลเพื่อสื่อสารสัญญาณระหว่างโหนดปลายทางสองโหนด

ในการป้องกันแบบ 1 : 1 เส้นใยแสงระหว่างต้นทางและปลายทางยังคงมี 2 เส้น แต่การส่งสัญญาณถูกส่งบนเส้นใยแสงทำงานเพียงเส้นเดียว ถ้าเส้นใยแสงทำงานขาด ทั้งต้นทางและปลายทางจะเปลี่ยนการส่งสัญญาณไปยังเส้นใยแสงสำรอง ในกรณีการป้องกันแบบ 1 : N เส้นใยแสงทำงาน N เส้นใช้เส้นใยแสงสำรองเส้นเดียวร่วมกัน การจัดเรียงลักษณะนี้สามารถรองรับความเสียหายที่เกิดจากเส้นใยแสงทำงานใดๆ

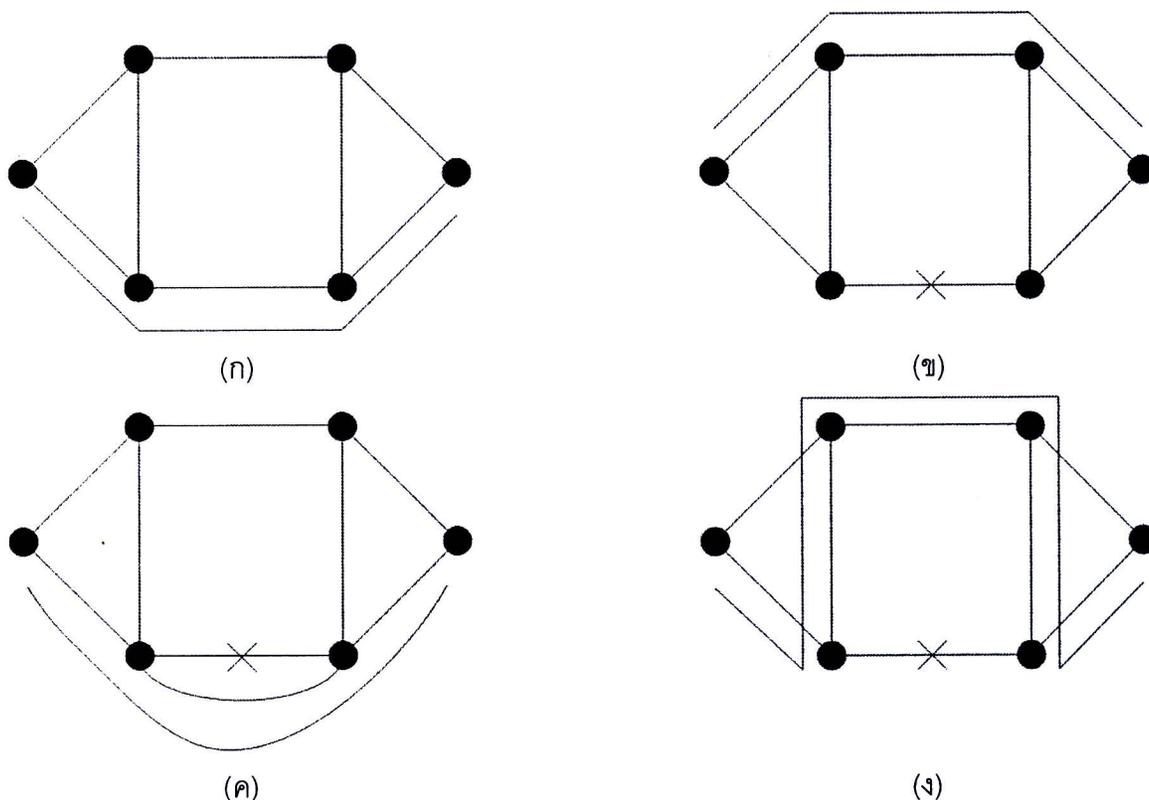
หลังจากการสับเปลี่ยนไปใช้งานเส้นใยแสงสำรองและเส้นใยแสงทำงานที่ขาดถูกซ่อมแล้ว ในการป้องกันแบบ 1 + 1 เส้นใยแสงทำงานเดิมที่ถูกซ่อมกลายเป็นเส้นใยแสงสำรองแทน ในกรณีการป้องกันแบบ 1 : N การส่งสัญญาณต้องสับเปลี่ยนกลับมาทำงานบนเส้นใยแสงทำงานเดิม

ในโครงข่ายแต่ละข่ายเชื่อมโยงสามารถเป็นเส้นทางของการส่งสัญญาณจากต้นทางที่ต่างกันไปยังปลายทางที่ต่างกัน การป้องกันสำหรับทราฟฟิกลักษณะนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ Path Switching และ Line Switching แสดงดังรูปที่ 2.18 ใน Path Switching หรือ Path Protection กลไกการกู้คืนสัญญาณของทราฟฟิกถูกจัดการโดยต้นทางและปลายทางของแต่ละทราฟฟิก ในกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายทราฟฟิกถูกเลือกเส้นทางใหม่ที่โหนดต้นทางและโหนดปลายทางตลอดเส้นทางระหว่างสองโหนด ใน Line Switching กลไกการกู้คืนสัญญาณของทราฟฟิกถูกจัดการโดยโหนดที่ปลายทางของข่ายเชื่อมโยงที่เกิดความเสียหาย

Line Switching แบ่งออกเป็น Span Protecting และ Line Protection ในกรณี Span protection ถ้าเส้นใยแสงระหว่างโหนดใดๆ ขาด ทราฟฟิกจะถูกสับเปลี่ยนไปยังเส้นใยแสงอีกเส้นบริเวณโหนดเดิมดังรูปที่ 2.18 (ค) ใน Line Protection ทราฟฟิกจะถูกสับเปลี่ยนไปยังอีกเส้นทางหนึ่งระหว่างโหนดเดิมดังรูปที่ 2.18 (ง)

เช่นเดียวกับข่ายเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด Path Protection สามารถทำได้ทั้งแบบ 1 + 1 และ 1 : N 1 + 1 Path Protection ด้อยประสิทธิภาพเพราะมีความต้องการแบนด์วิดท์ 2 เท่า สำหรับแต่ละการเชื่อมโยง 1 : N Path Protection N เส้นทางสามารถใช้หนึ่งเส้นทางสำรองร่วมกันได้ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพมากกว่า





รูปที่ 2.18 Path Switching และ Line Switching ในโครงข่ายลักษณะเมฆ

(ก) โครงข่ายทำงานปกติ (ข) กลไกการกู้คืนแบบ Path Switching หลังจากชำรุดเชื่อมโยงหนึ่งเกิดความเสียหาย (ค) Span Protection ในรูปแบบของ Line Switching (ง) Line Protection ในรูปแบบของ Line Switching

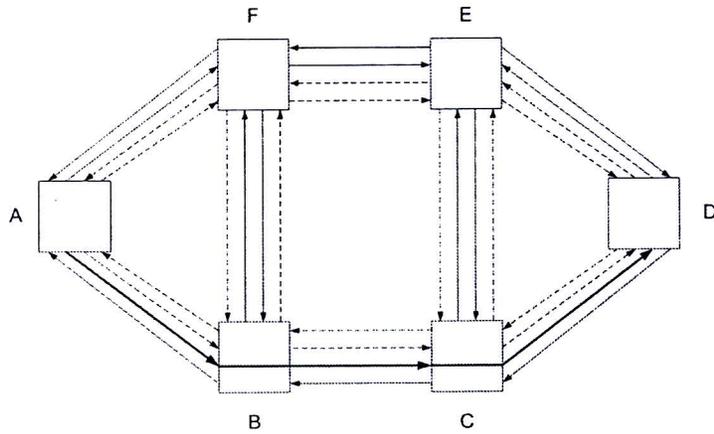
2.6.4 การป้องกันความเสียหายที่ใช้จำลองโครงข่ายในวิทยานิพนธ์

กลไกการกู้คืนสัญญาณในโครงข่ายลักษณะเมฆมีความซับซ้อนมากกว่าชำรุดเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุดและโครงข่ายแบบวงแหวน เทคนิคการป้องกันง่ายๆ วิธีหนึ่งคือ 1 : 1 Path Protection พิจารณาสองคู่โหนดบนโครงข่ายลักษณะเมฆที่เชื่อมต่อกันด้วยเส้นใยแสง 4 เส้น ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองทั้งสองทิศทาง เส้นใยแสงทั้งหมดสามารถถูกวางไว้ด้วยกัน ถ้าเส้นใยแสงเส้นใดเส้นหนึ่งถูกตัดเป็นไปได้อาเส้นใยแสงที่เหลือเส้นอื่นอาจถูกตัด [4]

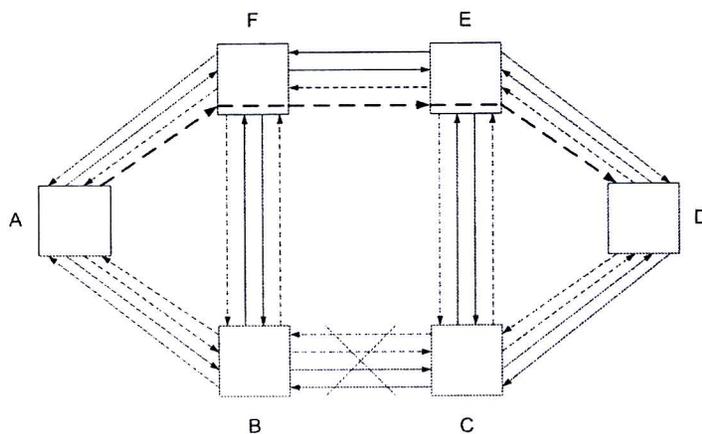
กลไกการกู้คืนสัญญาณสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.16 และ รูปที่ 2.19 ในรูปที่ 2.16 แสดงโครงข่ายลักษณะเมฆที่ประกอบไปด้วยเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง รูปที่ 2.19 (ก) แสดงเส้นทางการสื่อสารจากโหนด A ไปโหนด D ในกรณีโครงข่ายทำงานปกติ โดยสื่อสารผ่าน

ทางโนด B และ C ตามลำดับ ภายในโนดมี OXC เพื่อสับเปลี่ยนเส้นทางไปยังเส้นใยแสงสำรองได้ตามต้องการ รูปที่ 2.19 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อข่ายเชื่อมโยง BC เกิดความเสียหาย กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection จะสับเปลี่ยนเส้นทางระหว่างโนด A และโนด D ไปยังข่ายเชื่อมโยงสำรอง FE รูปที่ 2.19 (ค) แสดงให้เห็นว่าเมื่อข่ายเชื่อมโยง BC เกิดความเสียหาย กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Line Protection จะทำงานโดยโนด B จะสับเปลี่ยนเส้นทางไปยังข่ายเชื่อมโยงสำรอง BFEC และโนด C จะสับเปลี่ยนเส้นทางจากเส้นใยแสงสำรองกลับมาเส้นใยแสงทำงาน CE

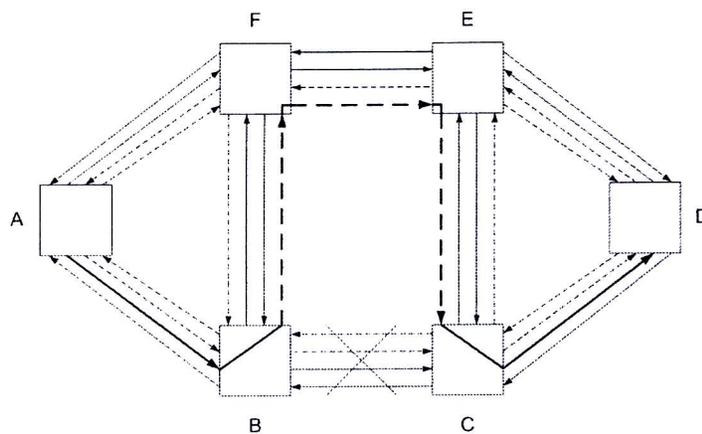
จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่ากลไกการป้องกันแบบ Line Protection ใช้ระยะทางการส่งสัญญาณมากกว่าและผ่านอุปกรณ์ OXC ที่แต่ละโนดมากกว่ากลไกการป้องกันแบบ Line Protection ถือว่าเป็นข้อดีของกลไกการป้องกันแบบ Path Protection อีกทั้งเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่งบนเส้นทางการสื่อสารในโครงข่ายแบบ Transparency โหนดต้นทางและโหนดปลายทางจะเป็นโหนดที่ตัดสินใจเลือกเส้นทางใหม่ ซึ่งคุโนระหว่างข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายนั้นไม่สามารถตัดสินใจได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้กลไกการป้องกันแบบ Path Protection



(ก)



(ข)

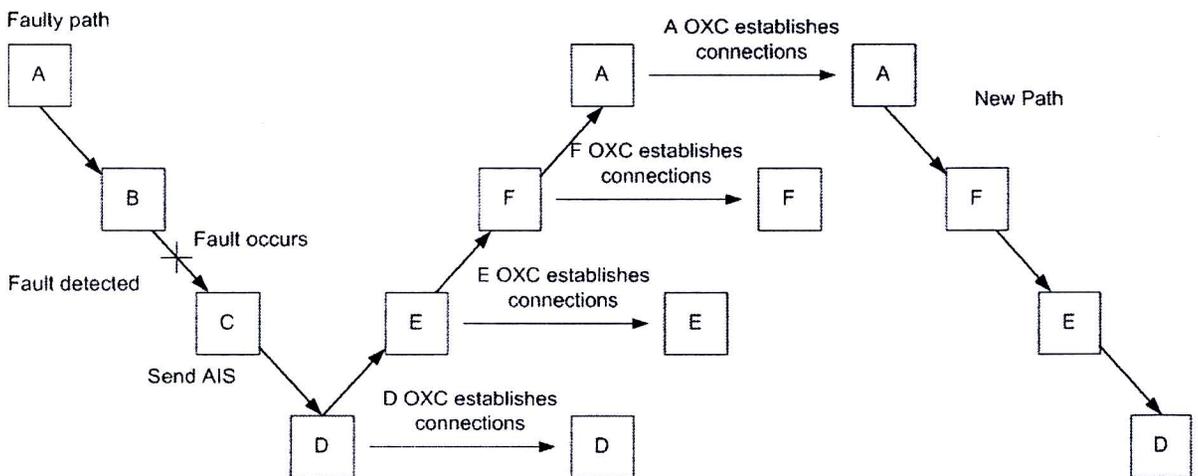


(ค)

รูปที่ 2.19 กลไกการกู้คืนสัญญาณในโครงข่ายลักษณะเมฆ เส้นใยแสงสำรองแทนด้วยเส้นประ

(ก) เส้นทางการสื่อสารจากโหนด A ไปยังโหนด D ในกรณีโครงข่ายทำงานปกติ (ข) กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยง BC เกิดความเสียหาย (ค) กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Line Protection ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยง BC เกิดความเสียหาย

พิจารณาเส้นทางการสื่อสารจากโหนด A ไปยังโหนด B ผ่านโหนด B และ โหนด C ตามลำดับ เมื่อสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด B และโหนด C เกิดความเสียหาย มี 3 เส้นทางอื่นที่สามารถใช้สื่อสารได้คือ เส้นทางที่ 1 : จากโหนด A ไปโหนด F E และ D ตามลำดับ เส้นทางที่ 2 : จากโหนด A ไปโหนด B F E และ D ตามลำดับ และ เส้นทางที่ 3 : จากโหนด A ไปยังโหนด B F E C และ D ตามลำดับ เส้นทางที่ 1 ถูกเลือกให้เป็นเส้นทางการสื่อสารเส้นทางใหม่เนื่องจากเส้นทางที่ 1 มีระยะทางน้อยที่สุด [4] รูปที่ 2.20 อธิบายเหตุการณ์จำเป็นที่เกิดขึ้นตั้งแต่ความเสียหายถูกตรวจพบไปยังการสับเปลี่ยนเส้นทางเส้นใยแสงสำรองจนถึงมีการสื่อสารบนเส้นทางใหม่ เมื่อเกิดความเสียหายเกิดขึ้นที่สายเชื่อมโยงระหว่างโหนด B และ โหนด C โหนด C จะส่งสัญญาณเตือนไปยังโหนดปลายทาง D ว่าเกิดความเสียหายเกิดขึ้นกับสายเชื่อมโยง จากนั้นโหนด D จะเลือกเส้นทางใหม่โดย OXC ที่โหนด D จะสร้างการเชื่อมต่อเส้นทางใหม่ขึ้นไปทีโหนด E โหนด F และโหนดต้นทาง A ตามลำดับ หลังจากนั้นโหนดต้นทาง A จะสื่อสารกับโหนดปลายทาง D ได้ด้วยเส้นทางใหม่



รูปที่ 2.20 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ความเสียหายถูกตรวจพบได้จนเกิดกลไกการกู้คืนสัญญาณได้เป็นเส้นทางใหม่

2.7 เทคนิคการแก้ไขชดเชยดิสเพอร์ชัน

วิธีหนึ่งที่จะชดเชยดิสเพอร์ชันคือการใช้อุปกรณ์ประเภทแพสซีฟที่เรียกว่า หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน ซึ่งภายในประกอบด้วยเส้นใยแสงที่ถูกเปลี่ยนแปลงค่าดิสเพอร์ชันเพื่อให้หักล้างค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ SMF เส้นใยแสงที่อยู่ด้านในนั้นถูกเรียกว่า DCF หรืออาจจะกล่าวสั้นๆ ได้ว่า

เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันสามารถทำได้โดยการนำเอาเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันที่ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชันและทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่ (2.12)

$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \tag{2.12}$$

โดย D_1 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ

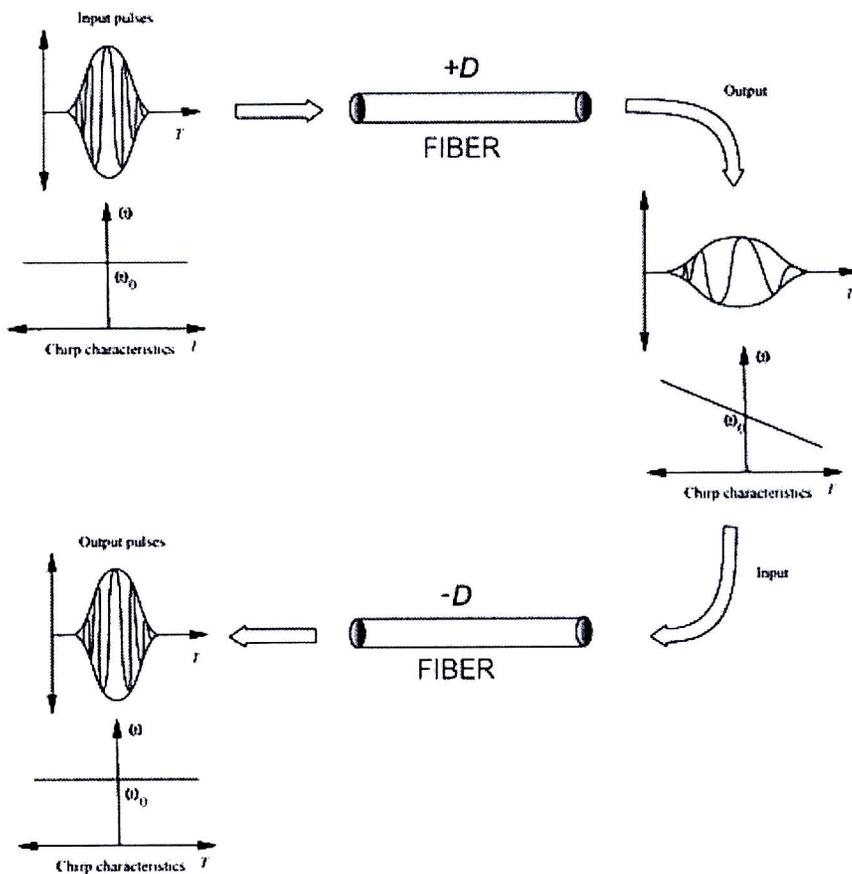
[ps/km/nm]

D_2 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน

[ps/km/nm]

L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [km]

L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [km]



รูปที่ 2.21 เทคนิคการจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน

เทคนิคการจัดความถี่ขึ้นที่เกดจากดิสเพอร์ชันด้วยเทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันเป็นดังรูปที่ 2.21 [5] ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี D ที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชันด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า D ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการชดเชยดิสเพอร์ชัน ส่งผลให้สามารถแก้ไขความถี่ของสัญญาณได้

การชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยวิธีนี้ ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์ที่บางระยะทางแต่ดิสเพอร์ชันมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ที่ทุกจุดตลอดความยาวของเส้นใยแสง

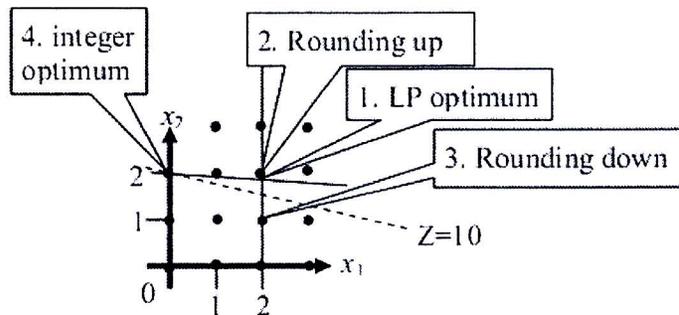
2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาค่าขีดสุด (Optimization Tools)

ปัญหาที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นปัญหาที่มีจำนวนจริงและจำนวนเต็มเข้ามาเกี่ยวข้อง อีกทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันเงื่อนไขมีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้นตรงจึงต้องใช้การแก้ปัญหาแบบ Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP) เพื่อทำ Optimization หาผลเฉลยจากสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตโดยเลือกใช้โปรแกรม Xpress MP โดยที่โปรแกรม Xpress MP ใช้วิธี Branch and Bound ในการหาผลเฉลย

2.8.1 Branch and Bound Method

โดยทั่วไปในการแก้ปัญหาค่าขีดสุดของฟังก์ชันไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของฟังก์ชันแบบเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น ตัวแปรของสมการสามารถเป็นค่าใดๆ โดยไม่จำเป็นต้องเป็นจำนวนเต็มหรือเลขฐานสอง แต่ในทางปฏิบัติปัญหาที่พบโดยส่วนมากมักจะอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันแบบจำนวนเต็มหรือฟังก์ชันแบบเลขฐานสอง การแก้ปัญหาโดยวิธีการปกติไม่สามารถใช้กับปัญหาในรูปแบบนี้ได้ดังแสดงในตัวอย่างของรูปที่ 2.22 [39]

$$\begin{aligned} \text{Maximize } Z &= x_1 + 5x_2 \\ \text{Subject to: } & x_1 + 10x_2 \leq 20 \\ & x_1 \leq 2 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \text{ and integer.} \end{aligned}$$

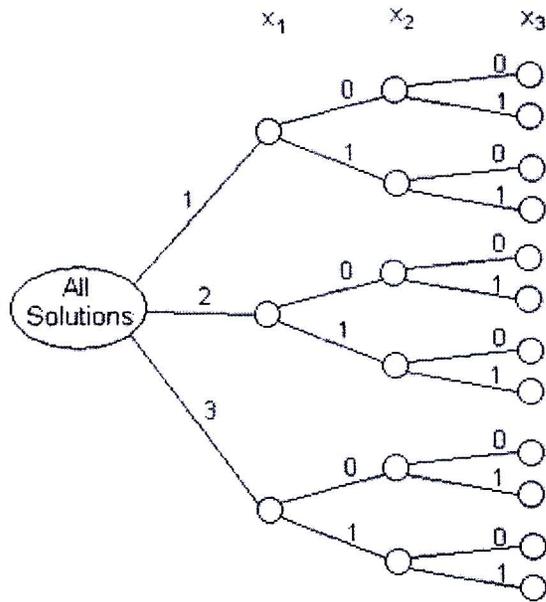


รูปที่ 2.22 ตัวอย่างของการแก้ปัญหาการแก้ปัญหาค่าขีดสุดของฟังก์ชัน

แบบเลขฐานสองโดยวิธีการปิดเศษ

จากปัญหาในตัวอย่างของรูปที่ 2.22 การแก้ปัญหาโดยวิธีเชิงเส้นโดยทั่วไปนั้นจะได้คำตอบที่ให้ค่าสูงสุดคือ $Z=11$ ที่จุด $(2, 1.8)$ โดยสัญชาตญาณการปิดเศษจะทำให้ได้คำตอบเป็น $Z=12$ ที่จุด $(2, 2)$ แต่จุดดังกล่าวละเมิดฟังก์ชันเงื่อนไขที่ 1 และหากพยายามปิดเศษลงจะได้ $Z=7$ ที่จุด $(2, 1)$ ซึ่งไม่ใช่คำตอบที่เป็นค่าสูงสุด คำตอบที่เป็นค่าสูงสุดของปัญหานี้คือ $Z=10$ ที่จุด $(0, 2)$ ซึ่งไม่ได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ได้จากการประมาณเชิงเส้นโดยวิธีปกติเลย ดังนั้นการแก้ปัญหาโดยการปิดเศษจึงไม่ใช่วิธีการที่ดีนัก

จากปัญหาในตัวอย่างของรูปที่ 2.22 ทำให้ทราบว่า การแก้ปัญหาค่าขีดสุดของฟังก์ชันแบบจำนวนเต็มนั้นไม่สามารถทำโดยวิธีการหาค่าต่ำสุดโดยทั่วไปได้ วิธีการที่นิยมใช้ในการหาค่าต่ำสุดของปัญหาในรูปแบบนี้คือวิธี Branch and Bound Method ดังรูปที่ 2.23 [39] ซึ่งใช้หลักการของการกระจายคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดออกเป็นกิ่งก้านแล้วทำการตัดกิ่งที่ไม่สามารถจะนำไปสู่คำตอบที่มีค่าต่ำสุดและเป็นไปตามฟังก์ชันเงื่อนไขได้ออก



รูปที่ 2.23 การแตกกิ่งเพื่อหาคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด

ขั้นตอนในการแก้ปัญหาโดยวิธี Branch and Bound Method สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำหนดจุดทำงานเริ่มต้นใดๆที่จุดต้นทางแล้วแทนค่าลงในฟังก์ชันว่ามีการละเมิดเงื่อนไขของฟังก์ชันหรือไม่ ถ้าไม่ละเมิดให้เก็บค่าดังกล่าวไว้เป็นค่าต่ำสุด (การกำหนดจุดทำงานเริ่มต้นที่ดีและไม่ละเมิดฟังก์ชันเงื่อนไขจะช่วยให้การตัดกิ่งสามารถทำได้อย่างรวดเร็วที่ต้นทาง)
2. แยกกิ่งออกมาที่ตัวแปรแรกโดยเลือกตัวแปรที่มีโอกาสละเมิดเงื่อนไขและมีค่าไม่เหมาะสมมากที่สุดมาอยู่ข้างหน้า เพื่อเพิ่มโอกาสในการตัดกิ่งตั้งแต่ต้นทาง
3. เลือกตัดกิ่งที่มีค่าสูงกว่าค่าต่ำสุดที่ถูกเก็บไว้ (ค่าต่ำสุดที่ถูกเก็บไว้ต้องไม่ละเมิดเงื่อนไขของฟังก์ชัน)
4. เลือกแตกกิ่งที่กิ่งที่มีโอกาสทำให้เกิดค่าต่ำสุดมากที่สุด นำค่าที่ได้จากการแตกกิ่งมาหากิ่งที่สมควรถูกตัดและแตกกิ่งออกไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด

การแก้ปัญหาโดยวิธี Branch and Bound Method จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นถ้าหากการเข้าหาคำตอบตัวแรกที่ไม่ละเมิดฟังก์ชันเงื่อนไขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการกำหนดจุดทำงานเริ่มต้นที่ดีจะช่วยให้การเข้าหาคำตอบสามารถทำได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนั้นการแก้ปัญหาด้วยวิธี Branch and Bound Method ยังการันตีการเข้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากเป็นวิธีที่มีการกระจายถึงคำตอบที่เป็นไปได้ทุกคำตอบ

2.8.2 Linear Programming (LP) based Branch and Bound Method

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการ Branch and bound ร่วมกันโปรแกรมเชิงเส้นในการแก้ปัญหาค่าขีดสุดของฟังก์ชันแบบเลขฐาน หลักการในการแก้ปัญหาโดยวิธีการ Branch and Bound ร่วมกับโปรแกรมเชิงเส้นคือการใช้วิธีการ Branch and Bound โดยมี Bounding Function ในแต่ละจุดของการทำงานเป็นฟังก์ชันในการแก้ปัญหาแบบเชิงเส้น (LP) ซึ่งก็คือการหาค่าต่ำสุดแบบเชิงเส้นโดยปกติที่ละเว้น Integer Constraint เอาไว้ หลังจากนั้นค่อยเพิ่ม Integer Constraint เข้าไปในการแตกกิ่งแต่ละครั้งเพื่อบีบให้คำตอบกลายเป็นจำนวน 0 หรือ 1 การแก้ปัญหาโดยวิธีการนี้จะต่างกับตัวอย่างการปิดเศษของรูปที่ 2.22 เนื่องจากการปิดเศษจะไม่สามารถการันตีได้ว่าจะไม่นำไปสู่คำตอบที่ไม่ละเมิดฟังก์ชันเงื่อนไขอื่นๆ และถึงแม้ว่าบางครั้งการปิดเศษจะไม่นำไปสู่การละเมิดฟังก์ชันเงื่อนไขอื่นๆ แต่คำตอบที่ได้ก็ไม่สามารถการันตีได้ว่าจะเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเหมือนอย่างกับการแก้ปัญหาโดยวิธีการนี้สามารถทำได้ การแก้ปัญหาโดยวิธีการ Branch and Bound ร่วมกับโปรแกรมเชิงเส้นจะใช้เวลาการคำนวณสูงกว่าการแก้ปัญหาแบบเป็นเชิงเส้นอยู่หลายเท่าตัวเนื่องจากจำเป็นต้องแก้ปัญหาแบบเป็นเชิงเส้นหลายครั้ง แต่เนื่องจากความสามารถของการแก้ปัญหาแบบเป็นเชิงเส้นที่รวดเร็วทำให้การแก้ปัญหาโดยวิธีการนี้ยังคงให้ประสิทธิภาพที่ดีและถูกนำมาใช้แก้ปัญหาในรูปแบบนี้กันอย่างแพร่หลาย