

# พัฒนาการของการออกแบบ เส้นใยนำแสง

● พงษ์ศักดิ์ สุ่มพันธ์ไพบูลย์

ขณะที่ความต้องการใช้แบนด์วิดท์มีเพิ่มมากขึ้น เส้นใยนำแสงแบบใหม่จึงต้องถูกพัฒนาเพื่อให้ทันกับความต้องการนี้ เส้นใยแบบ non-zero dispersion-shifted fiber เป็นความก้าวหน้าล่าสุดที่เกิดขึ้น แม้จะผ่านไป 20 ปี ภายหลังจากที่ได้มีการติดตั้งเคเบิลเส้นใยนำแสงเป็นครั้งแรก การพัฒนาเส้นใยก็ยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลจากปัจจัยผลักดัน 2 ประการ คือ

- ความต้องการที่จะส่งช่องสัญญาณจำนวนหลายช่อง (multiple-channel) ทางเส้นใยแสงเพียงเส้นเดียว ซึ่งเป็นไปได้โดยความก้าวหน้าของเครื่องส่งและเทคโนโลยีการมอดูเลตเลสิกซ์ และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การพัฒนาของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (optical amplifier)

- ความต้องการความจุของการส่งข้อมูลที่มีเพิ่มมากขึ้น ความต้องการนี้เป็นผลมาจากการใช้งานอินเทอร์เน็ตที่มีมากขึ้นอย่างมาก

ระบบการส่งหลายช่องสัญญาณด้วยความเร็วสูงที่เกิดขึ้นใหม่ ได้สร้างความท้าทายให้กับผู้ผลิตเส้นใยและนักวิทยาศาสตร์ที่กำลังพัฒนาออกแบบเส้นใย เพื่อมารองรับกับเทคนิคการส่งสัญญาณที่เปลี่ยนไป

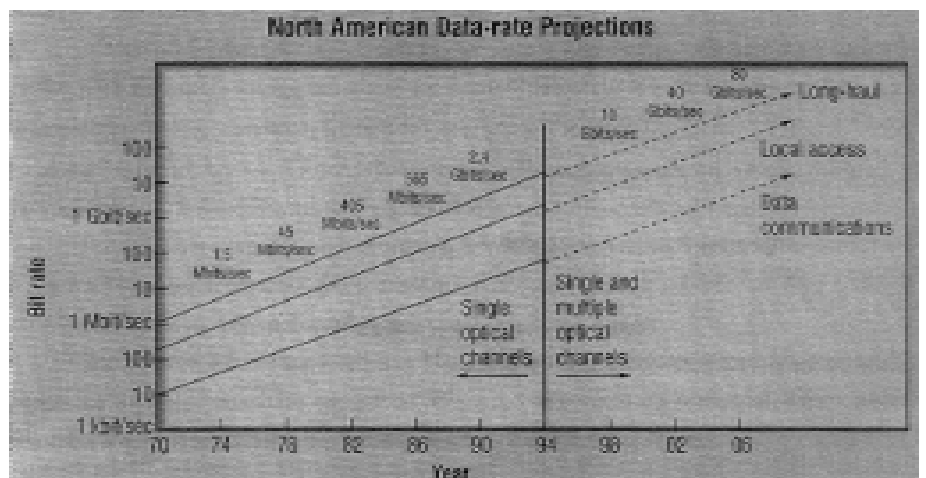
นับตั้งแต่ปี 1983 เส้นใยแสงที่ใช้กันโดยทั่วไปจะเป็นเส้นใยแบบ unshifted singlemode fiber เส้นใยแบบนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้งานที่ความยาวคลื่น 1310

nm และมีฐานการติดตั้งใช้งานที่สูงมาก การติดตั้งใช้งานเมื่อก่อนนี้จะใช้กับการส่งข้อมูลที่อัตราเร็วบิตในช่วงระดับร้อยเมกะบิตต่อวินาที มาในวันนี้ ระบบมีการอัปเดตที่จะส่งข้อมูลในระดับอัตราเร็วที่สูงขึ้นคือ 10 Gbits/sec แต่เส้นใยยังคงเป็นแบบเดิม

เส้นใย singlemode ตามมาตรฐานได้เคยถูกเชื่อว่ามีแบนด์วิดท์ไม่จำกัด และยังเชื่อว่า ถ้าต้องการเพิ่มความจุของการส่งข้อมูลก็เพียงแค่เปลี่ยนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของระบบส่งข้อมูลเท่านั้น พอมมาในช่วงต้นทศวรรษ 1990 ปัจจัยหลายอย่างที่เกิดขึ้นทำให้ต้องหันมาทบทวนความเชื่อดังกล่าวนี้เสียใหม่

จากอดีตที่ผ่านมา ความต้องการแบนด์วิดท์จะมีการเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ในทุก

24-30 เดือน (ดูรูปที่ 1) เส้นใยนำแสงที่ติดตั้งไปแล้ว จะสอดคล้องกับความต้องการนี้มาโดยตลอด อย่างไรก็ตาม พอมมาในช่วงทศวรรษ 1990 มีการเติบโตของอุตสาหกรรมโทรคมนาคมอย่างมาก บริการสื่อสารแบบบรอดแบนด์และบริการอินเทอร์เน็ตแอดดีทิฟต่างๆ ได้เร่งรัดการใช้ความจุของเครือข่ายสื่อสารทั่วโลกอย่างมาก นอกจากนี้จำนวน fiber ที่ไม่เพียงพอในการติดตั้งที่ได้ดำเนินการไปแล้วนั้น ได้ก่อให้เกิดคอขวดขึ้นมาสำหรับผู้ให้บริการบางรายซึ่งไม่มี fiber เพียงพอในบางเส้นทาง ทำให้ผู้ให้บริการเหล่านี้หาหนทางที่จะเพิ่ม capacity ให้มากขึ้นด้วยการเดินเคเบิลใหม่เพิ่มเติม ทำให้การลงทุนนั้นสูงมาก ในช่วงเวลาเดียวกัน ได้มีการพัฒนา



รูปที่ 1 : แสดงความต้องการแบนด์วิดท์ที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าในทุก 2 ปี ของอเมริกาเหนือ

อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่เรียกว่า erbium-doped optical-fiber amplifier (EDFA) อุปกรณ์นี้สามารถช่วยเพิ่มความจุของการส่งข้อมูลทางเส้นใย fiber ได้ และมีข้อดีได้เปรียบมากกว่าวิธีการแบบเดิมที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและให้กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขึ้นมาใหม่ แล้วเปลี่ยนกลับมาเป็นสัญญาณแสงตามเดิม ซึ่งวิธีการแบบเดิมนี้ออกแบบให้ใช้กับวิธีการเข้ารหัสและอัตราเร็วบิตเฉพาะอย่างเป็นทางการโดยเฉพาะ แต่ถ้าใช้ EDFA นั้น จะขยายสัญญาณแสงโดยตรงโดยไม่คำนึงถึงโครงสร้างหรืออัตราเร็วบิตของสัญญาณเลย แถบความยาวคลื่นของการขยายสัญญาณนั้นจะกว้าง ทำให้สามารถส่งความยาวคลื่นหลายค่าได้พร้อมกัน เป็นการเพิ่มแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นเป็นหลายเท่า อาจเป็น 8, 16, 32 เท่า หรือมากกว่า

เนื่องจาก EDFA ได้นำมาใช้งานใน wavelength window 1550 nm จึงเหมาะที่จะใช้กับเส้นใยแบบ dispersion-shifted fiber (DSF) ซึ่งมี zero-dispersion ที่ 1550 nm และให้การลดทอนของสัญญาณต่ำ ทำให้เส้นใย DSF ดูแล้วเหมาะที่จะใช้กับการใช้งานในระยะทางไกลและมีอัตราเร็วของการส่งข้อมูลที่สูง

**ผลกระทบจากคุณสมบัติไม่เชิงเส้น (Nonlinear)**

อย่างไรก็ตาม กำลังเอาท์พุทที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ optical amplifier รวมทั้งการส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นพร้อมกันได้ทำให้เกิดการตอบสนองไม่เชิงเส้น (non-linear response) ของเส้นใยนำแสงเกิดขึ้น ซึ่งจะเป็นแฟคเตอร์ที่จะจำกัดความจุการส่งข้อมูลของเส้นใย ผลตอบสนองไม่เชิงเส้นดังกล่าวนี้ได้แก่ “self-phase modulation” “cross-phase modulation”, “modulation instability” และ “four-wave mixing”

แฟคเตอร์หนึ่งที่สำคัญของผลไม่เชิงเส้นนี้คือ four-wave mixing เมื่อหลายสัญญาณมีการแพร่เดินทางไปด้วยกัน ก็จะเกิดการ mix กัน ทำให้เกิดช่องสัญญาณใหม่เพิ่ม

ขึ้นมา ซึ่งอาจจะไปซ้อนทับหรือดึงเอากำลังจากสัญญาณเดิม รูปที่ 2 ได้แสดงกระบวนการของ four-wave mixing นี้จากการส่ง 3 ช่องสัญญาณที่ห่างเท่าๆ กัน (11, 12 และ 13) สัญญาณย่อยจากการ mixing นี้จะเกิดขึ้นที่  $\lambda_{xyz} = \lambda_x + \lambda_y - \lambda_z$  เนื่องจากความยาวคลื่นของสัญญาณเดิมมีการห่างเท่าๆ กัน ทำให้บางสัญญาณที่เกิดขึ้นใหม่ จะเกิดอยู่ที่ตำแหน่งช่องสัญญาณเดิมด้วย

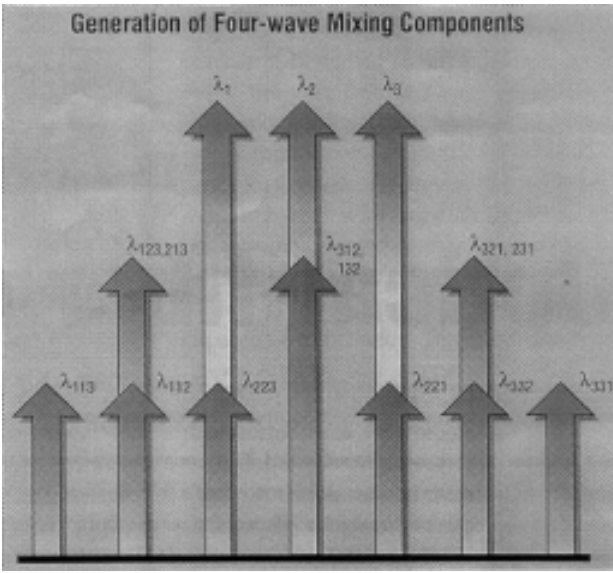
จำนวนองค์ประกอบของสัญญาณย่อยทั้งหมด (m) ที่เกิดขึ้นใหม่จากการ mixing นี้ จะคำนวณโดย  $m = 1/2 (N^3 - N^2)$  โดยที่ N คือจำนวนช่องสัญญาณเดิม ถ้าเป็นระบบแบบ 3 ช่องสัญญาณ ก็จะมีสัญญาณย่อยเกิดขึ้น 9 สัญญาณ (ดูรูปที่ 2) ถ้าเป็นระบบแบบ 8 ช่องสัญญาณ จำนวนสัญญาณย่อยก็จะเพิ่มขึ้นเป็น 224 สัญญาณ

วิธีหนึ่งของการลดผลของ four-wave mixing ให้เหลือน้อยที่สุด ก็คือการจัดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณให้ห่างไม่เท่ากัน คือให้ห่างไม่สม่ำเสมอนั่นเอง อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะดูง่ายสำหรับระบบแบบ 3 ช่องสัญญาณ แต่จะยากและซับซ้อนมากกว่ามากสำหรับระบบแบบ 32 ช่องที่จะมีสัญญาณย่อยเกิดขึ้นมากถึง 15,872 สัญญาณ

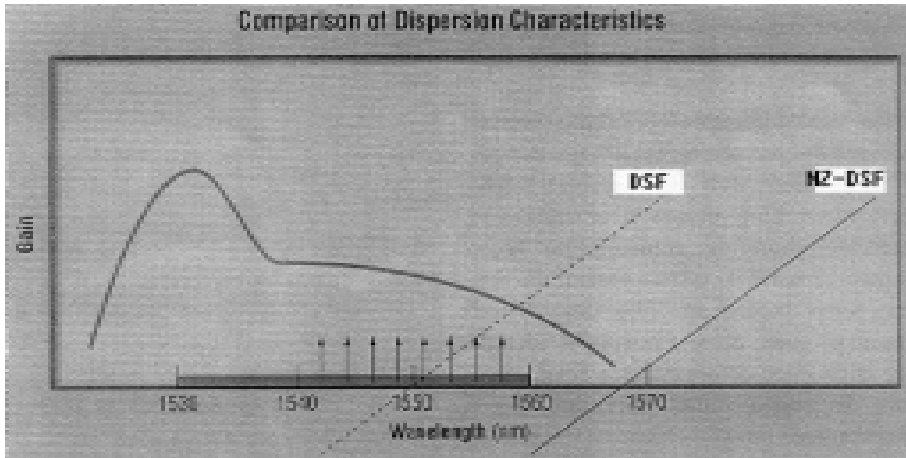
กระบวนการ four-wave mixing จะเกิดขึ้น ได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น zero-dispersion ซึ่งขัดแย้งโดยตรงกับความต้องการที่จะให้ dispersion ของเส้นใยมีค่าน้อยที่สุดเพื่อให้สามารถส่งข้อมูลได้มากและไปได้ไกล เนื่องจากเส้นใย dispersion-shifted ตามมาตรฐานจะมีความยาวคลื่น zero-dispersion อยู่ในแถบความยาวคลื่นที่ใช้งานของ EDFA ดังนั้น ความต้องการที่ขัดแย้งกันเหล่านี้จะจำกัดความสามารถของเส้นใย DSF ที่จะใช้ในเครือข่ายข้อมูลความเร็วสูงในระบบทางไกลและใช้เทคโนโลยีของ WDM (Wavelength Division Multiplexing) ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมา จึงมีการพัฒนาเส้นใยแบบใหม่ขึ้นมาที่เรียกว่า non-zero dispersion-shifted fiber (NZ-DSF)

**Non-zero dispersion-shifted fiber (NZ-DSF)**

แนวความคิดของ NZ-DSF นั้นจะง่าย คือความยาวคลื่น zero-dispersion ของ DSF จะถูกเคลื่อนย้ายออกไปอยู่ภายนอกแถบความยาวคลื่นใช้งานของ EDFA เป็นการทำให้มี dispersion ส่วนหนึ่งที่สามารถควบคุมได้ เกิดขึ้นในระบบ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3



รูปที่ 2 : เนื่องจากความยาวคลื่นของช่องสัญญาณเดิมมีระยะห่างที่เท่าๆ กัน ทำให้มีบางสัญญาณที่เกิดขึ้นใหม่ อยู่ในตำแหน่งของช่องสัญญาณเดิม



รูปที่ 3 : เปรียบเทียบคุณสมบัติ dispersion ของเส้นใย non-zero dispersion-shifted (NZ-DSF) และ standard dispersion-shifted (DSF) เทียบกับแถบการขยายความยาวคลื่นใช้งานของ EDFA

ซึ่งเปรียบเทียบเส้นโค้ง dispersion ของเส้นใย NZ-DSF และ DSF ค่า dispersion ที่เกิดขึ้นของเส้นใย NZ-DSF จะต่ำเพียงพอที่จะใช้กับระยะทางไกลได้ แต่จะยังไม่ต่ำจนกระทั่งผลของ four-wave mixing มีมากเกินไป ได้มีการทดลองสาธิตพบว่า การใช้เส้นใยแบบ NZ-DSF จะทำให้สามารถส่งข้อมูลความเร็ว 10 Gbit/sec จำนวน 8 ช่องพร้อมกัน ในระยะทาง 360 km ได้โดยไม่ต้องมีการชดเชยใดๆ

การรวมส่งช่องสัญญาณจำนวนหลายช่องเข้าไปพร้อมกันทางเส้นใย NZ-DSF ที่มีค่า loss ต่ำและ dispersion ที่ต่ำด้วย จะให้ประโยชน์ที่จะประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่า

การใช้เส้นใย singlemode ตามมาตรฐาน เพราะวาระยะห่างระหว่าง regenerator/amplifier สามารถไกลขึ้น และไม่มีความเป็นที่ จะต้องเพิ่มอุปกรณ์เพื่อชดเชย dispersion ในระบบ ประมาณการกันว่า สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง fiber ได้มากถึง 30-50% เลยทีเดียว

**การชดเชย dispersion**

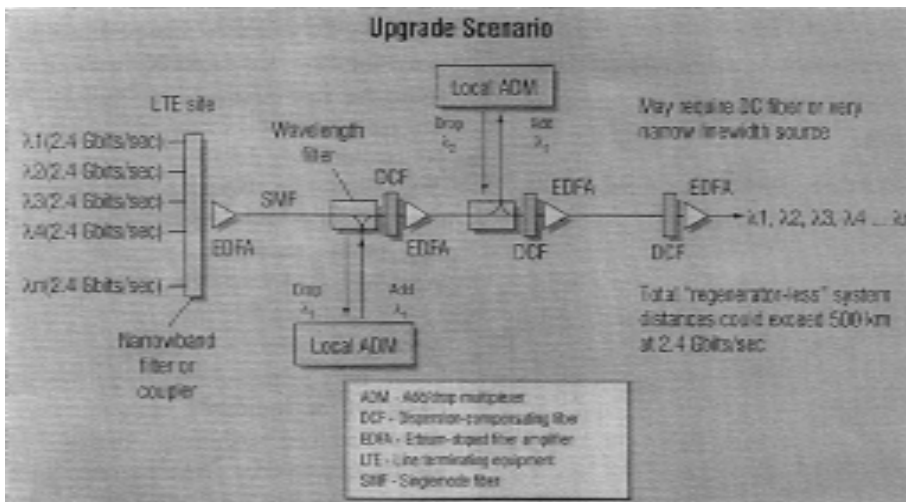
เนื่องจากฐานการติดตั้งที่มีมากอยู่แล้วของ unshifted fiber ดังนั้นการที่จะใช้ fiber แบบนี้ให้มีประสิทธิภาพในระบบสื่อสารสัญญาณที่มีการขยายสัญญาณแสงด้วย

จำเป็นต้องมีวิธีการในการลด dispersion ที่สะสมขึ้นอันเป็นผลจากการใช้งานที่ 1550 nm ในระยะทางไกล ด้วยเหตุนี้ ผู้ผลิตจึงได้นำเสนอเส้นใยที่เรียกว่า dispersion-compensating fiber (DCF) ขึ้นมา เพื่อชดเชย dispersion ที่เกิดขึ้นดังกล่าว ตามปกติเส้นใย unshifted singlemode จะมี dispersion อยู่ราวๆ +17 ps/nm/km ถึงแม้ว่า dispersion ที่สูงขนาดนี้ จะขจัดปัญหาของ four-wave mixing ไปได้ แต่ระยะทางการส่งที่ไกลสุดของอัตราเร็วข้อมูลระดับหนึ่ง จะถูกจำกัดโดย chromatic dispersion

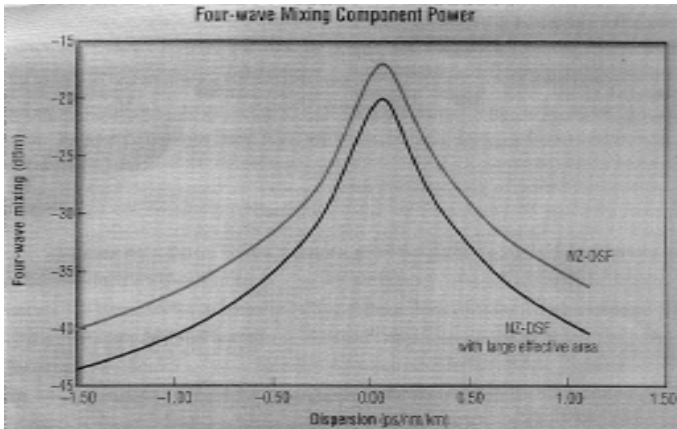
เส้นใยแบบ dispersion-compensating fiber จะมีค่า dispersion เป็นค่าลบที่มาก เมื่อนำ fiber นี้ไปวางในตำแหน่งที่เหมาะสมในระบบเชื่อมโยง ค่าลบที่มากของ dispersion จะช่วยให้ dispersion โดยรวมทั้งหมดของระบบเชื่อมโยง มีค่าเกือบจะเท่ากับศูนย์ได้ เทคนิคนี้จะช่วยให้สามารถใช้ fiber แบบ unshifted singlemode ที่ความเร็ว 10 Gbit/sec ในระยะทางหลายร้อยกิโลเมตรได้ ภาพตัวอย่างแสดงการออฟเกรดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4

แต่กระนั้น เมื่อความต้องการแบนด์วิดท์ที่เพิ่มขึ้นมีอย่างต่อเนื่อง ความสามารถที่จะติดตั้ง fiber แบบ dispersion-compensated และแม้แต่เส้นใย NZ-DSF แบบใหม่นี้ ในที่สุดก็จะถูกบีบรัดมากขึ้น วิธีการหลายอย่างจึงถูกเสนอขึ้น เพื่อให้มีช่องสัญญาณใช้งานที่มากขึ้นกว่าเดิม

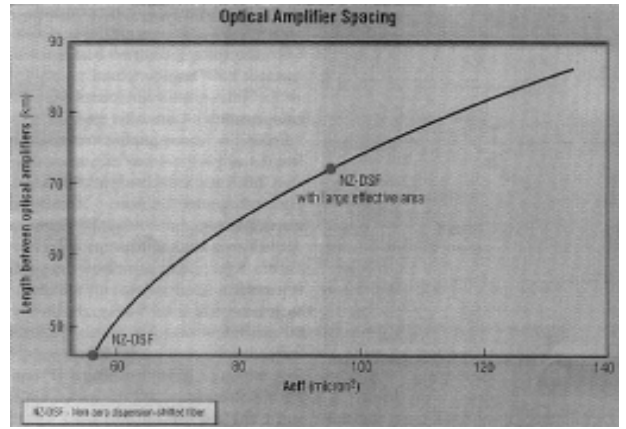
การชดเชย dispersion ด้วยการวางเคเบิลที่มี dispersion ค่าบวกและค่าลบสลับกัน จะทำให้ local dispersion ยังคงมีอยู่ขณะที่ dispersion รวมทั้งหมดของ link อยู่ในระดับเกือบเท่ากับศูนย์ การทดลองเมื่อไม่นานมานี้ ได้แสดงถึงความสามารถที่จะส่งช่องสัญญาณ 10 Gbit/sec พร้อมกัน 32 ช่องตลอดความยาว 640 km ได้เป็นผลสำเร็จ ถึงแม้ว่าเทคนิคนี้จะต้องมีการวางแผนอย่างระมัดระวังเพื่อให้มี dispersion โดยรวมต่ำสุด แต่กระบวนการของการ restoration หรือการ reconfiguration ของระบบเชื่อมโยง



รูปที่ 4 : แผนภาพแสดงการออฟเกรดการติดตั้งเส้นใยแบบ singlemode ที่มีอยู่ให้สามารถส่งข้อมูลความเร็ว 10 Gbit/sec ได้



รูปที่ 5 : เปรียบเทียบกำลังของสัญญาณย่อยที่เกิดจาก four-wave mixing ระหว่างเส้นใยแบบ NZ-DSF และเส้นใยแบบ NZ-DSF ที่มี large effective area (สัญญาณย่อยในตัวอย่างนี้เกิดจาก four-wave mixing ของ 2 ของสัญญาณที่มีระยะทาง 100 GHz ในช่วงความยาว 90 km)



รูปที่ 6 : กราฟแสดงระยะห่างของ optical amplifier เป็นฟังก์ชันของ effective area

ก็สามารถมีผลกระทบต่อคุณภาพระบบได้หากไม่เผื่อ margin ให้เพียงพอในการออกแบบ จึงเป็นที่ชัดเจนว่า ทางเลือกที่ต้องการมากที่สุดก็คือ ต้องติดตั้ง fiber ที่ไม่เพียงแต่รองรับระบบ WDM เท่านั้น แต่จะต้องให้ความคล่องตัวที่เพียงพอต่อการออฟเกรดในอนาคตด้วย

**เส้นใยแบบ NZ-DSF กับคุณสมบัติ large effective area**

การเพิ่มพื้นที่หน้าตัด (cross-section) ของทางวิ่งของแสงใน fiber จะทำให้ความเข้มแสงเฉลี่ยตามเส้นทาง (path average intensity) มีค่าลดลงสำหรับระดับกำลังส่งค่าหนึ่ง ประโยชน์ของการเพิ่ม effective area นี้ ประกอบด้วยความสามารถที่จะส่งกำลังสัญญาณได้สูงกว่า, ค่า signal-to-noise ratio ที่สูงกว่า, อัตราบิดผลพลาตที่ต่ำกว่า, ระยะห่างระหว่าง amplifier ที่ไกลมากกว่า และสำคัญที่สุดก็คือ ทำให้มีความจุของการส่งข้อมูลที่สูงกว่า

โดยปกติ เส้นใยแบบ DSF จะมี effective area ประมาณ 50 ตารางไมครอนเท่านั้น แต่ในขณะนี้ได้มีการผลิตเส้นใยที่มี effective area ขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่มากถึง 92 ตารางไมครอนแล้ว เพื่อตอบสนองความต้องการที่มากขึ้นของระบบการส่งข้อมูลความเร็วสูงและมีการขยายสัญญาณแสงตามเส้นทาง

รูปที่ 5 ได้แสดงถึงประโยชน์ของการเพิ่ม effective area ให้มากขึ้น นั่นก็คือ

จะช่วยลดกำลังส่วนที่จะต้องเจียดไปให้กับสัญญาณองค์ประกอบย่อยๆ ที่เกิดจากกระบวนการ four-wave mixing เป็นการแสดงให้เห็นว่า จะสามารถส่งกำลังสัญญาณได้มากขึ้น ผลที่ตามมาก็คือ จะทำให้ระยะห่างระหว่าง amplifier ยาวขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งได้พล็อตระยะห่างระหว่าง optical amplifier เป็นฟังก์ชันของ effective area ข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือ ความสามารถของการออฟเกรดในอนาคตไปใช้ระบบ dense WDM ที่มีอัตราเร็วบิตข้อมูลสูงมากได้ ระบบที่สามารถส่งช่องสัญญาณ 10 Gbit/sec จำนวนหลายช่อง กำลังมีการใช้งานกันมากอยู่ในขณะนี้ เส้นใยแบบ NZ-DSF ที่มี large-effective-area จะเป็นแพลตฟอร์มที่สามารถช่องสัญญาณขนาด 40 Gbit/sec ผ่านแถบขยายสัญญาณของ EDFA ได้ต่อไปในอนาคต ประโยชน์ที่ได้รับจากการลดจำนวน amplifier และการเพิ่มระยะห่างของ amplifier ตลอดจนความสามารถที่จะออฟเกรดไปยังระบบการส่งข้อมูลที่เร็วกว่า ก็คือจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและการดำเนินงานลดน้อยลง

**บทสรุป**

การผ่อนคลาญกฎระเบียบการให้บริการโทรคมนาคม, สภาพการแข่งขันที่สูงขึ้น และการให้บริการที่ขยายตัวมากขึ้น ได้มีผลต่อความต้องการใช้แบนด์วิธที่สูงขึ้น การเพิ่ม

อย่างต่อเนืองของความต้องการนี้ เป็นแรงผลักดันให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีที่จะตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดค่าใช้จ่ายให้มากที่สุด ความก้าวหน้าที่มีการพัฒนาออกมาให้เห็นในช่วงแรกก็คือ การใช้ประโยชน์จาก optical amplifier และ WDM ยิ่งกว่านั้น การหันไปใช้แถบความยาวคลื่นใช้งานในย่าน 1550 nm ได้กระตุ้นให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีอื่นๆ เพิ่มขึ้นมา เส้นใยแบบ dispersion-compensating fiber ได้ช่วยให้ fiber แบบ singlemode ที่ได้มีการติดตั้งไปแล้วเป็นจำนวนมาก สามารถส่งอัตราเร็วบิตข้อมูล 10 Gbit/sec ต่อช่องสัญญาณ ในระยะทางได้หลายร้อยกิโลเมตร อย่างไรก็ตาม การพัฒนา NZ-DSF ที่มี large effective area เพื่อใช้ในการติดตั้งใหม่ จะมีข้อดีที่สำคัญในเรื่องของ system performance และราคา

เส้นใยในยุคถัดไปนั้น จะต้องสามารถลดผลกระทบจาก non-linear effects ให้เหลือน้อยที่สุด และต้องสามารถรองรับการส่งข้อมูลได้หลายร้อยช่องสัญญาณอีกด้วย เส้นใยแบบ large effects นี้ จะตอบสนองความต้องการนี้ ด้วยการเป็นแพลตฟอร์มที่จะให้ความคล่องตัวต่อการรองรับการส่งหลายความยาวคลื่น, การเพิ่มความจุของการส่งข้อมูล และช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการลงทุนอีกด้วย.