บทที่ 5

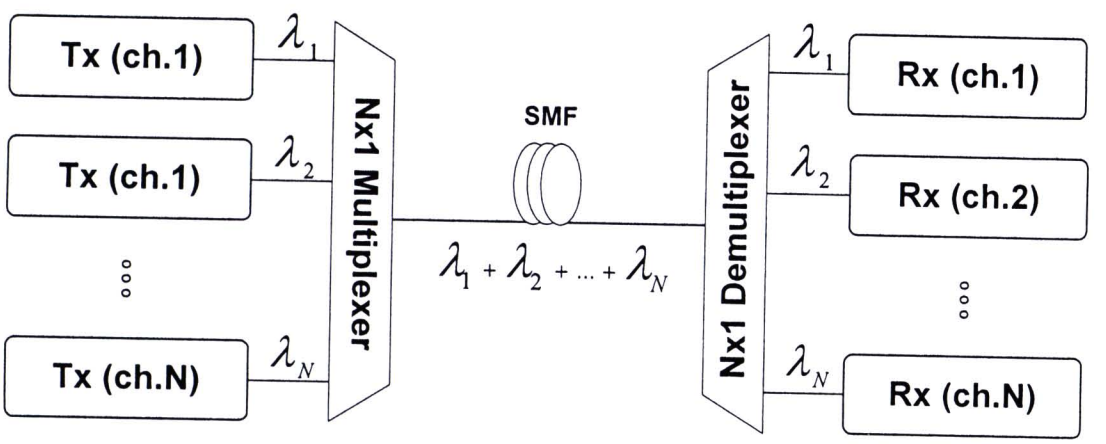
การส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ด้วยเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ

ในบทที่ 4 ได้แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของระบบ OCDMA-PON ที่ใช้ encoder ที่มีจำนวนชิปเท่ากับ 511 ชิป อัตราบิต 1.25 Gbps ว่าสามารถให้บริการได้ 8 รายเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 140 GHz หรือว่าสามารถให้บริการได้ 4 รายเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 GHz ในบทนี้จะเป็นการจำลองการส่งสัญญาณ OCDMA-PON ที่ใช้เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบเพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการให้มากขึ้น

5.1 เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ (Coarse wavelength division multiplexing: CWDM)

การมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางความยาวคลื่นเป็นวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณโดยใช้คลื่นพาห์ที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันส่งสัญญาณไปในเส้นใยแสงเส้นเดียวกันพร้อมๆกันได้ ทำให้สามารถส่งข้อมูลจำนวนมหาศาลได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมาตรฐานในการจัดสรรความยาวคลื่นที่ใช้ในการมัลติเพล็กซ์สัญญาณมีด้วยกัน 3 มาตรฐาน ได้แก่ การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing: WDM), การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหนาแน่น (dense wavelength division multiplexing: DWDM) และการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ (coarse wavelength division multiplexing: CWDM) ซึ่งสิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างมาตรฐานทั้งสามก็คือระยะห่างของความยาวคลื่นในแต่ละช่องสัญญาณ (channel spacing) โดย DWDM มีค่า channel spacing ที่แคบมาก เท่ากับ 12.5 25 50 และ 100 GHz ในขณะที่ระบบ CWDM มีค่า channel spacing ไม่น้อยไปกว่า 20 nm ทำให้มีความยืดหยุ่นในการเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบซึ่งสามารถที่จะใช้ตัวกำเนิดแสงที่ไม่ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิได้ ทำให้สามารถลดต้นทุนของระบบลงได้ด้วย นอกจากนี้ความยาวคลื่นของระบบ CWDM ในช่วง 1,270-1,610 nm สามารถจัดสรรได้ถึง 18 ช่องสัญญาณ ดังนั้นการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบจึงเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับโครงข่ายเข้าถึงเพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการในโครงข่ายให้มากขึ้น

ทั้งนี้ในระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบจำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์สัญญาณ (multiplexer: MUX) ในการรวมสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน และอุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณ (demultiplexer: DEMUX) เพื่อแยกสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นออกจากกันในการรับสัญญาณ โดยรูปที่ 5.1 แสดงระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบที่ประกอบไปด้วยช่องสัญญาณแสงจำนวน N ช่องสัญญาณ โดยสัญญาณแสงจากทุกช่องสัญญาณจะถูกมัลติเพล็กซ์เข้าด้วยกันด้วย $N:1$ multiplexer ส่งผ่านไปยังเส้นใยแสง หลังจากนั้นที่ปลายทางสัญญาณแสงก็จะถูกดีมัลติเพล็กซ์ด้วย $1:N$ demultiplexer ในการแยกสัญญาณแสงออกเป็น 18 ช่องสัญญาณเช่นเดิม

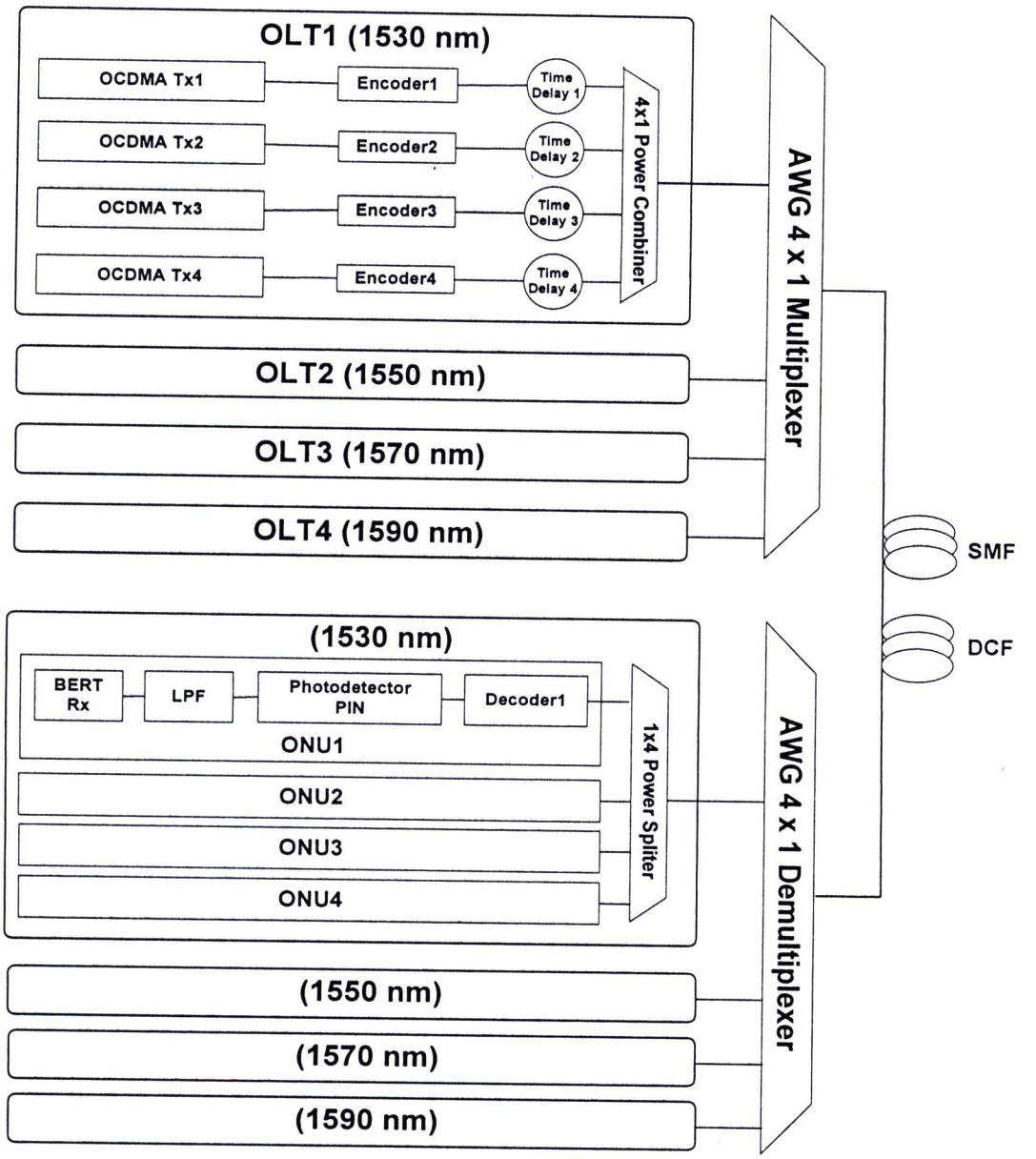


รูปที่ 5.1 ระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ

5.2 แบบจำลองการส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ด้วยระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ 4 ช่องสัญญาณ

การนำระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบมาประยุกต์ใช้กับการส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ทำได้โดยให้สัญญาณแสงในแต่ละช่องสัญญาณของระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบนั้นมีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณจากผู้ใช้บริการหลายๆรายด้วยระบบ OCDMA จากนั้นสัญญาณ OCDMA แต่ละความยาวคลื่นก็จะถูกมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นด้วย MUX ชนิด array waveguide grating (AWG) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ MUX แบบพาสซีฟเพื่อรวมสัญญาณแสงทุกความยาวคลื่นส่งไปบนเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน ในขณะที่ฝั่งตัวรับสัญญาณก็จะมีการดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นด้วย DEMUX ก่อน หลังจากนั้นสัญญาณแสงแต่ละความยาว

คลื่นก็จะถูก split และถอดรหัสสัญญาณแสงด้วย decoder ของระบบ OCDMA เพื่อดึงข้อมูลของผู้ใช้บริการแต่ละรายกลับคืนมา



รูปที่ 5.2 แบบจำลองการส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ด้วยการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ 4 ความยาวคลื่น

รูปที่ 5.2 แสดงแบบจำลองการส่งผ่านสัญญาณแบบดาวน์สตรีมของ OCDMA-PON ด้วยการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ ใช้ตัวส่งสัญญาณ OCDMA จำนวน 4 ตัว/ความยาวคลื่น ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1,530 1,550 1,570 และ 1,590 nm ตามลำดับ ซึ่งตัวส่งสัญญาณของแต่ละความยาวคลื่นประกอบไปด้วยผู้ใช้บริการที่ถูกเข้ารหัส OCDMA จำนวน 4 ราย (ใช้

รหัส#5, #8, #10 และ #16) ที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps ต่อผู้ใช้บริการ 1 ราย สัญญาณ OCDMA ของผู้ใช้บริการแต่ละรายในแต่ละความยาวคลื่นจะถูกรวมเข้าด้วยกันด้วย 4×1 power spliter แล้วจึงมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นเข้าด้วยกันด้วย AWG ที่มีความเป็นอุดมคติและไม่มีการสูญเสียกำลังเกิดขึ้นและส่งผ่านไปยังเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวความยาว 20 km ที่มีค่าคงตัวของการลดทอนของเส้นใยแสงเท่ากับ 0.2 dB/km ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,550 nm เท่ากับ 17.46 ps/nm·km ค่าความชันดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,550 nm เท่ากับ 0.0582 $ps/nm \cdot km^2$ และเส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยความชันดิสเพอร์ชันความยาว 263.09 m ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,550 nm เท่ากับ -1,327.32 ps/nm × km ค่าความชันดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,550 nm เท่ากับ -4.4246 $ps/nm \times km^2$ หลังจากนั้นสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นก็จะถูกแยกออกจากกันด้วย AWG แล้วจึงถูกแบ่งพลังงานด้วย 4×1 power spliter ไปยัง ONU แต่ละตัวที่ประกอบไปด้วย SSFBG decoder แบบ coherent time-spreading ที่ใช้ gold code จำนวน 511 ชิป ตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN ที่มีค่า Responsivity ($\Re$) = 1 A/W Thermal noise เท่ากับ 1.52×10^{-12} $A/Hz^{-1/2}$ และกระแสมืด (Dark current) เท่ากับ 10 nA ตามด้วยวงจรกรองผ่านต่ำ (Low-pass filter: LPF) เพื่อกรองเอาความถี่ของสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป และทำการตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณและ BER ด้วยอุปกรณ์ทดสอบอัตราบิตผิดพลาด (bit error rate tester: BERT) ตามลำดับ

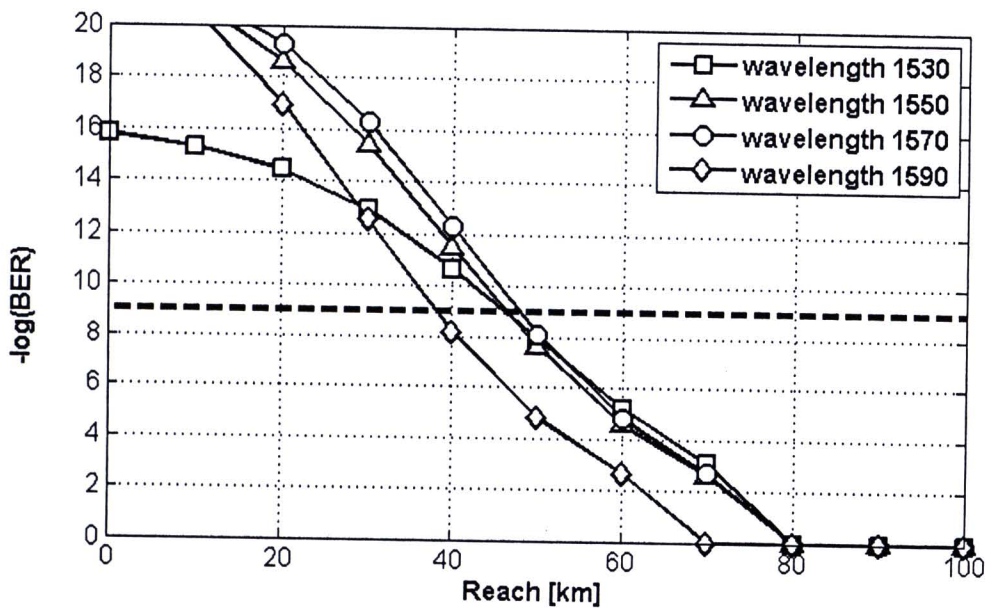
สำหรับการส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมของผู้ใช้บริการในแต่ละความยาวคลื่นนั้นอาจใช้การเข้าถึงข้อมูลแบบ TDMA เนื่องจากในระบบ OCDMA นั้นต้องใช้ MLLD เป็นตัวกำเนิดแสงและสร้างพัลส์แสงที่แคบมากเพื่อใช้ในการเข้ารหัสแบบ time-spreading OCDMA ทำให้ต้นทุนของ ONU เพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วแนวโน้มการใช้บริการของผู้ใช้บริการมักจะดาวน์โหลดข้อมูลมากกว่าที่จะอัพโหลดข้อมูล จึงพิจารณาที่จะใช้ระบบ TDMA-PON สำหรับข้อมูลแบบอัพสตรีม

5.3 การส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ด้วยระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ 4 ช่องสัญญาณ

ในส่วนนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่กำลังส่งสัญญาณ peak power , ระยะทางในการส่งสัญญาณ และแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำเพื่อวัดค่า BER เพื่อพิจารณาหากำลังส่งสัญญาณ peak power ต่ำสุด ระยะทางในการส่งสัญญาณไกลสุด และแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการผู้ใช้บริการทุกรายด้วย BER ที่น้อยกว่า 10^{-9}

5.3.1 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถให้บริการได้

ในส่วนนี้จะหาระยะทางที่ไกลที่สุดในการวางเส้นใยแสงเชื่อมต่อระหว่าง OLT กับ ONU สำหรับระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 4 รายต่อ 1 ความยาวคลื่น ใช้กำลังส่งสัญญาณ peak power คงที่ที่ 10 dBm และใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 GHz โดยมีเงื่อนไขที่ว่าค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายต้องมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 10^{-9} ซึ่งระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถให้บริการได้ของระบบจะตัดสินจากระยะทางของผู้ใช้บริการที่สั้นที่สุดมีค่า BER เท่ากับ 10^{-9} ซึ่งจะสามารถรับประกันได้ว่าผู้ใช้บริการรายอื่นๆในระบบยังคงสามารถสื่อสารข้อมูลโดยมีค่า BER ไม่เกิน 10^{-9} โดยค่า BER ที่แย่ที่สุดของความยาวคลื่น 1,530 1,550 1,570 และ 1,590 nm นั้นถูกกำหนดโดยผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#5, #10, #8 และ #8 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่าบิตผิดพลาดแย่ที่สุดในแต่ละความยาวคลื่นกับระยะทางแสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะทางไกลสุดที่ให้บริการได้มีค่าอยู่ระหว่าง 38-48 km ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากกรณี 1 ความยาวคลื่น และระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถให้บริการได้ถูกกำหนดด้วยความยาวคลื่น 1,590 nm ซึ่งจะสามารถรองรับผู้ใช้บริการในระบบได้ทั้งหมดเท่ากับ 4×4 = 16 รายในระยะทางที่ไกลที่สุดเท่ากับ 38.17 km โดยระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 5.1



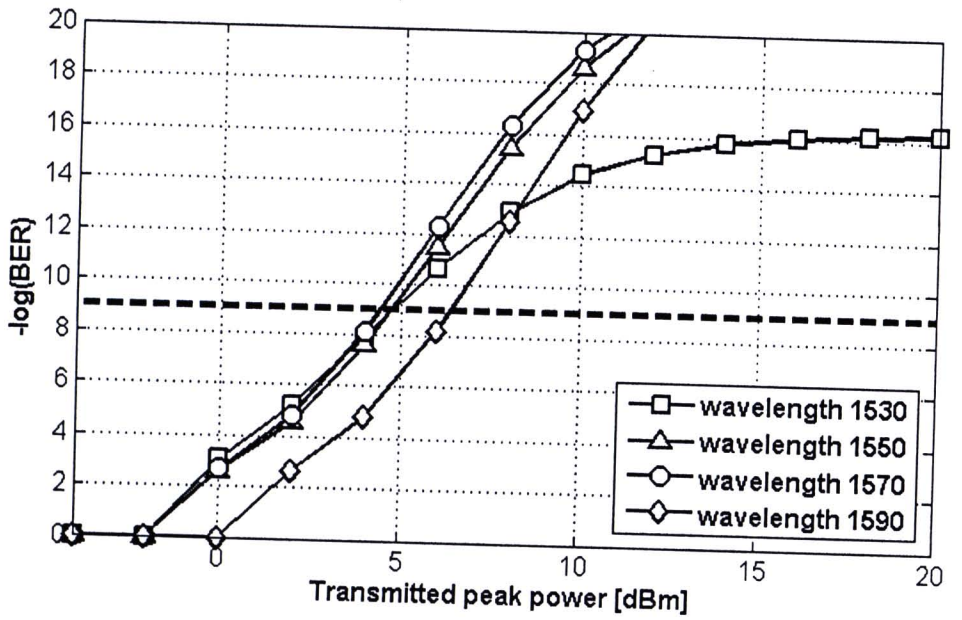
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการให้บริการกับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่าบิตผิดพลาดแย่ที่สุดในแต่ละความยาวคลื่น

ตารางที่ 5.1 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่น

ความยาวคลื่น (nm)	ระยะทางที่ไกลที่สุด (km)
1,530	46.06
1,550	46.41
1,570	47.86
1,590	38.17

5.3.2 กำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการได้

ในส่วนนี้จะทำการหากำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดที่สามารถใช้ได้สำหรับระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 4 รายต่อ 1 ความยาวคลื่น ส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง 20 km และใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 GHz โดยมีเงื่อนไขที่ว่าค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายต้องมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 10^{-9} ซึ่งกำลังส่งสัญญาณที่น้อยที่สุดที่สามารถใช้ได้ของระบบจะตัดสินจากกำลังส่งสัญญาณ peak power ของผู้ใช้บริการที่ต้องใช้กำลังส่งสัญญาณสูงที่สุดเพื่อให้ได้ค่า BER เท่ากับ 10^{-9} ซึ่งจะสามารถรับประกันได้ว่าผู้ใช้บริการรายอื่นๆในระบบยังคงสามารถสื่อสารข้อมูลโดยมีค่า BER ไม่เกิน 10^{-9} โดยค่า BER ที่แย่ที่สุดของความยาวคลื่น 1,530 1,550 1,570 และ 1,590 nm นั้นถูกกำหนดโดยผู้ใช้บริการที่ใช้รหัส#5, #10, #8 และ #8 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่าบิตผิดพลาดแย่ที่สุดในแต่ละความยาวคลื่นกับกำลังส่งสัญญาณ peak power แสดงดังรูปที่ 5.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการได้มีค่าอยู่ระหว่าง 4.4-6.4 dBm ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากกรณี 1 ความยาวคลื่น และกำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการได้ถูกกำหนดด้วยความยาวคลื่น 1,590 nm ที่กำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 6.359 dBm ซึ่งทำให้สามารถรองรับผู้ใช้บริการในระบบได้ทั้งหมดเท่ากับ $4 \times 4 = 16$ ราย โดยกำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งสัญญาณ peak power กับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่าค่า BER แย่ที่สุดในแต่ละความยาวคลื่น

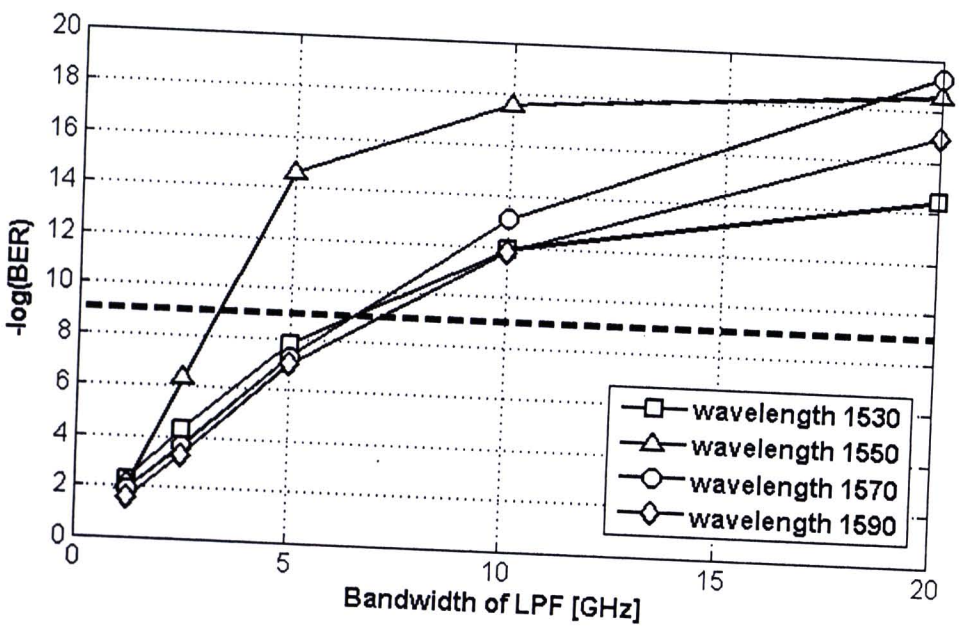
ตารางที่ 5.2 กำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่น

ความยาวคลื่น (nm)	กำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุด (dBm)
1,530	4.794
1,550	4.726
1,570	4.42
1,590	6.359

5.3.3 แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้

ในส่วนนี้จะทำการหาแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถใช้ได้สำหรับระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 4 รายต่อ 1 ความยาวคลื่น ใช้กำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm/ผู้ใช้บริการ 1 ราย และส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง 20 km โดยมีเงื่อนไขที่ว่าค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายต้องมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 10^{-9}

ซึ่งแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถใช้ได้ของระบบจะพิจารณาจากแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำของผู้ใช้บริการที่ต้องใช้แบนด์วิดท์มากที่สุดเพื่อให้ได้ค่า BER เท่ากับ 10^{-9} ซึ่งจะสามารถรับประกันได้ว่าผู้ใช้บริการรายอื่นๆในระบบยังคงสามารถสื่อสารข้อมูลโดยมีค่า BER ไม่เกิน 10^{-9} โดยค่า BER ที่แย่ที่สุดของความยาวคลื่น 1,530 1,550 1,570 และ 1,590 nm นั้นถูกกำหนดโดยผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#5, #10, #8 และ #8 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำกับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่าบิตผิดพลาดแย่ที่สุดในแต่ละความยาวคลื่นแสดงดังรูปที่ 5.5 จะเห็นได้แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้อยู่ในช่วง 3.3-7.1 GHz ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากกรณี 1 ความยาวคลื่นและแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้ถูกกำหนดด้วยความยาวคลื่น 1,590 nm แสดงดังรูปที่ 5.6 โดยต้องใช้แบนด์วิดท์อย่างต่ำเท่ากับ 7.102 GHz จึงจะสามารถรับประกันได้ว่าค่า BER ของผู้ใช้บริการในระบบทั้งหมด 4×4 = 16 ราย จะมีค่าไม่เกิน 10^{-9} โดยแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำกับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่าบิตผิดพลาดแย่ที่สุดในแต่ละความยาวคลื่น

ตารางที่ 5.3 แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่น

ความยาวคลื่น (nm)	แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำ (GHz)
1,530	6.473
1,550	3.325
1,570	6.473
1,590	7.102

จากการทดลองในบทที่ 5 นี้จะเห็นได้ว่าสามารถส่งสัญญาณ OCDMA-PON ที่อัตราบิต 1.25 Gbps/ผู้ใชบริการ 1 รายลงบนโครงข่าย CWDM ได้ โดยสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้เท่ากับ 4 OCDMA-PON x 4 CWDM = 16 ราย ที่กำลังส่งสัญญาณ peak power 10 dBm/ผู้ใช้บริการ 1 ราย ระยะทาง 20 km และแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำเท่ากับ 7.102 GHz สำหรับแนวทางในการเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการให้มากกว่านี้สามารถทำได้โดยเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการในระบบ OCDMA-PON ของแต่ละความยาวคลื่นให้มากขึ้น ซึ่งจากทฤษฎีแล้วระบบดังกล่าวรองรับผู้ใช้บริการได้มากที่สุด 9 ราย และผลจากการทดลองในบทที่ 4 นั้นสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้มากที่สุด 8 ราย ดังนั้นเมื่อใช้จำนวนความยาวคลื่นเท่าเดิม จำนวนผู้ใช้บริการทั้งหมดของระบบจะเท่ากับ 8 OCDMA-PON x 4 CWDM = 32 ราย อย่างไรก็ตามในการที่จะรองรับผู้ใช้บริการ OCDMA-PON 8 รายนั้น จะต้องใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำเท่ากับ 141.1 GHz ที่ ONU ทุกตัว ซึ่งอาจทำให้ต้นทุนของ ONU เพิ่มขึ้นมาก จึงอาจจะปรับเปลี่ยนไปเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นของ CWDM แทน โดยแนวทางในการออกแบบคือ 4 OCDMA-PON x 8 CWDM = 32 ราย ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำเท่ากับ 7.102 GHz ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนของ ONU ได้มากกว่า