การส่งผ่านสัญญาณซีดีเอ็มเอแสงบนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

นายรชฏ มณีขัติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTICAL CDMA TRANSMISSION OVER PASSIVE OPTICAL NETWORK

Mr. Rachata Maneekut

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การส่งผ่านสัญญาณซีดีเอ็มเอแสงบนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

โดย นายรชฏ มณีขัติ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒ แสงอุดมเลิศ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รชฏ มณีขัติ : การส่งผ่านสัญญาณซีดีเอ็มเอแสงบนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ. (OPTICAL CDMA TRANSMISSION OVER PASSIVE OPTICAL NETWORK) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 117 หน้า.

โครงข่ายไฟเบอร์ทูเดอะโฮม (fiber-to-the–home: FTTH) ที่ใช้เทคโนโลยีโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (passive optical network: PON) เป็นโครงข่ายเข้าถึง (access network) ที่เชื่อมต่อผู้ใช้บริการเข้ากับระบบด้วยเส้นใยแสง และอุปกรณ์ภายในโครงข่ายเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานทางแสงทั้งหมดตั้งแต่อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงไปจนถึงอุปกรณ์รับสัญญาณแสง ทำให้ต้นทุนของระบบค่อนข้างต่ำในขณะที่สามารถให้บริการการสื่อสารข้อมูลด้วยอัตราบิตที่สูงมากเมื่อเทียบกับโครงข่ายเข้าถึงประเภทอื่นๆ อย่างไรก็ตามโครงข่าย FTTH แบบเดิมที่อาศัยการเข้าถึงหลายทิศทางแบบแบ่งเวลา (TDMA) ต้องมีการซิงโครนัสระหว่างอุปกรณ์ในโครงข่ายเพื่อจัดสรรช่องสัญญาณในการส่งข้อมูลให้กับผู้ใช้บริการแต่ละราย ทำให้ไม่สามารถใช้แบนด์วิดท์ในการรับส่งข้อมูลได้อย่างเต็มที่ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดด้านแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้การพัฒนาให้สามารถรับส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตที่สูงขึ้นกว่าเดิมมากๆนั้นทำได้ยากมาก ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการนำเทคโนโลยีการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (OCDMA) มาใช้ร่วมกับ PON เพื่อลดปัญหาการแย่งกันเข้าใช้ช่องสัญญาณ และสามารถทำให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายสามารถใช้แบนด์วิดท์ที่ได้รับในการรับส่งข้อมูลได้อย่างเต็มที่

จากการศึกษาในเชิงทฤษฎีปรากฏว่าการสื่อสัญญาณที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps ต่อผู้ใช้บริการ 1 ราย และใช้ en/decoder ที่ใช้ความยาวของรหัสโกลด์เท่ากับ 511 จะสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการได้เท่ากับ 9 รายพร้อมกันที่อัตราบิตผิดพลาดเท่ากับ 10^{-9} โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบ OCDMA-PON คือสัญญาณรบกวน MAI และ beat noise และกำลังของสัญญาณแสง auto-correlation peak ที่เครื่องรับ ในการตรวจสอบผลที่ได้จากการศึกษาในเชิงทฤษฎีโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าแบบจำลองโครงข่าย OCDMA-PON สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการได้มากที่สุดเท่ากับ 8 รายที่อัตราบิตผิดพลาดเท่ากับ 10^{-9} ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของสัญญาณได้แก่กำลังส่งสัญญาณ ระยะทางในการให้บริการ จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ อัตราการแบ่งพลังงานแสง และแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำที่เครื่องรับ นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ระบบ OCDMA-PON ร่วมกับการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ (Coarse wavelength division multiplexing: CWDM) เพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการ ผลการทดสอบการส่งสัญญาณ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการ 4 รายต่อ 1 ความคลื่น และใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น ที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps ต่อผู้ใช้บริการ 1 รายต่อ 1 ความยาวคลื่น ทำให้สามารถรองรับผู้ใช้บริการได้ทั้งหมด 16 รายที่อัตราบิตผิดพลาดเท่ากับ 10^{-9}

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต..............................

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..............................

ปีการศึกษา 2553..................

5170438221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : OPTICAL CDMA / PASSIVE OPTICAL NETWORK / ACCESS NETWORK

RACHATA MANEEKUT: OPTICAL CDMA TRANSMISSION OVER PASSIVE OPTICAL NETWORK. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 117 pp.

Fiber-to-the-home (FTTH) which is implemented on the passive optical network (PON) technology is an access network that connects subscribers to a service provider using optical fiber. Due to extremely huge bandwidth supported by optical fiber, PON can operate at very high-speed data rate. However, one of the important problems is that all equipments in the conventional FTTH, which is the time-division multiplexing access (TDMA)-based must be synchronized in order to assign an appropriate time-slot for each subscriber to respond for the demand for sending or receiving data of each subscriber.

In this thesis, we study the feasibility of employing OCDMA over PON, and find the maximum number of subscriber, maximum reach, and maximum supported data rate of the system, also for per 1 wavelength and for multi-wavelength based on the coarse wavelength division multiplexing (CWDM) wavelength assignment.

As we have studied, at data rate of 1.25 Gbps per subscriber on OCDMA-PON, using a 511-chip SSFBG with Gold code pattern as an en/decoder, can serve 9 subscribers with the bit-error rate (BER) lower than 10^{-9}. The main problems of OCDMA-PON are the media-access interference (MAI), beat noise and the auto-correlation peak power at receivers. After validating the theoretical investigation by computer simulation, the maximum number of subscriber of OCDMA-PON is found to be 8 at data rate of 1.25 Gbps. The quality of signal depends on transmitted power, reach, number of subscribers, split ratio, and bandwidth of the low-pass filter at a receiver. Furthermore, we also investigate the OCDMA-PON incorporated with the coarse wavelength division multiplexing (CWDM) to attain the increase in the number of subscribers. The simulation result of 4-wavelength OCDMA-PON at data rate of 1.25 Gbps per subscriber demonstrates the possibility of service provision to 16 subscribers with BER lower than 10^{-9}.

Department : Electrical Engineering Student's Signature ....

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature ....

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้พื้นฐานซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม นอกจากนี้ยังคอยให้คำปรึกษา คำแนะนำรวมไปถึงแนวคิดในการทำงานวิจัยซึ่งเปรียบเสมือนแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์ และซอฟท์แวร์ Optisys8.0 ในการจำลองการส่งสัญญาณจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม (Telecommunication Research and Industrial Development Institute: TRIDI) และสถานที่ที่ใช้ในการทำงานวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณโครงการทุนศิษย์ก้นกุฏิ ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี

กำลังใจและบรรยากาศที่ดีจากเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆในห้องปฏิบัติการวิจัยเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จ และท้ายที่สุดขอขอบคุณคุณพ่อและคุณแม่ที่ให้การสนับสนุนทั้งแรงกายและแรงใจตลอดมาอย่างหาที่สุดมิได้ ดังนั้นจึงมิมีคำกล่าวใดๆที่สามารถทดแทนสิ่งดีๆเหล่านี้ได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกซาบซึ้งและขอบคุณตลอดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..จ
กิตติกรรมประกาศ..ฉ
สารบัญ..ช
สารบัญตาราง..ญ
สารบัญภาพ..ฏ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์ 12
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์... 12
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 13
1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 13
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 14
2 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการสื่อสารทางแสง 15
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง 15
2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง 16
2.2.1 การสูญเสียกำลังของสัญญาณ (fiber attenuation) 17
2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion) 19
2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับเส้นใยแสง 22
2.4 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (PON) 30
2.4.1 โครงสร้างของ PON 30
2.4.2 มาตรฐานของ FTTX 31
2.4.3 หลักการทำงานเบื้องต้น 32
2.4.4 Link power budget 33
2.4.5 มาตรฐาน 10G-EPON... 34
2.5 ระบบซีดีเอ็มเอแสง 35
2.5.1 โครงสร้างของระบบ OCDMA.. 36

2.5.2 วิธีการเข้ารหัสและการถอดรหัส (En/decoding scheme) 37
2.6 การจัดการดิสเพอร์ชัน(Dispersion management) 41
2.6.1 ประเภทของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน 42
3 การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของระบบ OCDMA-PON 45
3.1 การหาค่า BER ของระบบ OCDMA 45
3.2 การวิเคราะห์ BER เนื่องจากสัญญาณรบกวนของการส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON 51
3.2.1 การวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทในระบบ OCDMA-PON . 51
3.2.2 การวิเคราะห์ผลของค่า decision threshold ที่ใช้ในระบบ OCDMA-PON 56
3.2.4 การวิเคราะห์ผลของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณแสงที่เครื่องรับในระบบ OCDMA-PON 62
3.2.5 แนวทางในการออกแบบระบบ OCDMA-PON 65
4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ OCDMA-PON โดยการจำลองทางคณิตศาสตร์.......... 67
4.1 การส่งสัญญาณ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 4 ราย 67
4.2 การส่งสัญญาณ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 8 ราย 75
4.3 การส่งสัญญาณ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 16 ราย 78
4.4 สมรรถนะของ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 ราย โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ไม่จำกัด.......... 81
4.5 สมรรถนะของ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 ราย โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 GHz.......... 82
4.6 สมรรถนะของ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 ราย โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 10 GHz.......... 83
4.7 ระยะทางไกลที่สุดของระบบ OCDMA-PON ที่สามารถให้บริการได้ 85
4.8 กำลังส่งสัญญาณ peak power น้อยที่สุดของระบบ OCDMA-PON ที่สามารถให้บริการได้.......... 86
4.9 แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำในระบบ OCDMA-PON ที่สามารถให้บริการได้.......... 88
4.10 ความไวของสมรรถนะต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ OCDMA-PON... 90
4.10.1 ความไวของสมรรถนะต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการ 4 ราย 90

4.10.2 ความไวของสมรรถนะต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการ 8 ราย 92
5 การส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ด้วยเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ 95
5.1 เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ (Coarse wavelength division multiplexing: CWDM) 95
5.2 แบบจำลองการส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ด้วยระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ 4 ช่องสัญญาณ 96
5.3 การส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ด้วยระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ 4 ช่องสัญญาณ 98
5.3.1 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถให้บริการได้ 99
5.3.2 กำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการได้ 100
5.3.3 แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้ 101
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 104
6.1 สรุปผลการวิจัย 104
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต 106
รายการอ้างอิง 107
ภาคผนวก 112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 117

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ OCDMA แบบต่างๆ 10
ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงมาตรฐาน G.652.C 27
ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงมาตรฐาน G.652.D 29
ตารางที่ 2.3 ค่า link power budget ของ PON 34
ตารางที่ 4.1 กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power 10 dBm ที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน 73
ตารางที่ 4.2 ความกว้างพัลส์ FWHM ของ ACP ที่ตรวจจับได้ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power 10 dBm ที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน 73
ตารางที่ 4.3 BER ของ ACP ที่ตรวจจับได้ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power 10 dBm ที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน 73
ตารางที่ 4.4 กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน 75
ตารางที่ 4.5 ความกว้างพัลส์ FWHM ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน 76
ตารางที่ 4.6 BER ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน 76
ตารางที่ 4.7 กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน 78
ตารางที่ 4.8 ความกว้างพัลส์ FWHM ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน 79
ตารางที่ 4.9 BER ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน 79

ตารางที่ 4.10 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถให้บริการได้ของระบบ OCDMA-PON 86
ตารางที่ 4.11 กำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการได้ของระบบ OCDMA-PON 88
ตารางที่ 4.12 แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้ของระบบ OCDMA-PON 90
ตารางที่4.13 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างกับค่า BER ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนเท่าของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 4 ราย 92
ตารางที่ 4.14 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างกับค่า BER ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนเท่าของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 8 ราย 94
ตารางที่ 5.1 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่น 100
ตารางที่ 5.2 กำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่น 101
ตารางที่ 5.3 แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่น... 103

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

รูปที่ 1.1 จำนวนผู้ใช้บริการของ ADSL CATV และ FTTH ในประเทศญี่ปุ่น ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2001 ถึงปี ค.ศ. 2009 4

รูปที่ 1.2 รูปแบบการเชื่อมต่อของ PON 5

รูปที่ 1.3 การส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมของ TDMA-PON 6

รูปที่ 1.4 การส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมของ WDMA-PON 7

รูปที่ 1.5 การส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมของ OCDMA-PON 8

รูปที่ 1.6 การแบ่งประเภทของ OCDMA ตามหลักการใช้งานและแบ่งตามมิติในการประมวลสัญญาณ 9

รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง 15

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนกำลังงาน และความยาวคลื่นที่ผลิตมาตั้งแต่ 18

รูปที่ 2.3 ผลของดิสเพอร์ชันต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง 19

รูปที่ 2.4 การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น 20

รูปที่ 2.5 การเกิด Inter-symbol interference (ISI) 21

รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบและค่าดัชนีหักเหของ core และ cladding ในเส้นใยแสง 23

รูปที่ 2.7 ค่า refractive index ของ SiO_2 ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อถูกเจือปนด้วยสารชนิดต่างๆ 23

รูปที่ 2.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ core และ cladding ของเส้นใยแสง MMF และ SMF 24

รูปที่ 2.9 ค่าอัตราการลดทอนกำลังของสัญญาณแสงของเส้นใยแสง G.652.C 26

รูปที่ 2.10 ค่าดิสเพอร์ชันของสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของเส้นใยแสงชนิด G.652.C . 26

รูปที่ 2.11 รูปแบบการเชื่อมต่อของ PON 31

รูปที่ 2.12 การส่งข้อมูลจาก OLT ไปยังแต่ละ ONU 33

รูปที่ 2.13 การส่งข้อมูลจาก ONU แต่ละตัวไปยัง OLT 33

รูปที่ 2.14 การจัดสรรความยาวคลื่นของ 10G-EPON 35

รูปที่ 2.15 ระบบ OCDMA อย่างง่าย 36

รูปที่ 2.16 การมอดูเลตสัญญาณแสงเข้ากับสัญญาณไฟฟ้าที่ตัวส่งสัญญาณของระบบ OCDMA 37

รูปที่ 2.17 การ encode สัญญาณแสงด้วยวิธี coherent time-spreading 38

รูปที่ 2.18 การ decode สัญญาณแสงด้วย decoder ที่มีรหัสที่สัมพันธ์กันกับรหัสของ encoder 39

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.19 การ decode สัญญาณแสงด้วย decoder ที่มีรหัสไม่สัมพันธ์กันกับรหัสของ encoder 40
รูปที่ 2.20 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชัน 42
รูปที่ 2.21 ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด NSC-DCF 43
รูปที่ 2.22 ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SC-DCF 44
รูปที่ 3.1 ระบบ OCDMA-PON ที่มีผู้ใช้บริการจำนวน N ราย 46
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ^2_{0-co} 52
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ^2_{1-co} 52
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ^2_{1-in} 53
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับสัญญาณรบกวน σ^2_{0-co} σ^2_{1-co} และ σ^2_{1-in} 54
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับค่า BER แยกตามประเภทของสัญญาณรบกวน 55
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับค่า BER แยกตามประเภทของสัญญาณรบกวน (ขยาย) 55
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER เมื่อพิจารณาผลของสัญญาณรบกวนทั้งหมด 56
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขอบเขตที่ลดลงกับจำนวน interference user ที่ค่า D ต่างๆกัน 57
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER ที่ค่า D ต่างกัน 57
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ L ที่ใช้ในการสร้าง gold code ความยาว $2^L - 1$ ชิป กับขนาดของสัญญาณรบกวน ξ และ σ^2_{MAI-0} 59
รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER โดยพิจารณาแค่ผลของ σ^2_{MAI} ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน 60
รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER โดยพิจารณาแค่ผลของ σ^2_{beat-0} และ σ^2_{beat-1} ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน 61

รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน 62
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ที่จำนวนผู้ใช้ในระบบต่างกัน 63
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ที่มีจำนวนผู้ใช้ในระบบ 9 ราย และข้อจำกัดของระบบเนื่องจาก σ^2_{beat-0} และ σ^2_{MAI} 64
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ที่มีจำนวนผู้ใช้ในระบบ 10 ราย และข้อจำกัดของระบบเนื่องจาก σ^2_{beat-0} σ^2_{beat-1} และ σ^2_{MAI} 64
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ของระบบ OCDMA ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 8 รายโดยใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน 66
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับค่า BER ที่กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับเท่ากับ -9.5 dBm โดยใช้ จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน........ 66
รูปที่ 4.1 แบบจำลองการส่งผ่านสัญญาณซีดีเอ็มเอแสงบนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟสำหรับผู้ใช้บริการจำนวน N ราย........ 68
รูปที่ 4.2 ลักษณะของสัญญาณในโดเมนเวลาของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 ณ ตำแหน่งต่างๆของระบบ (ก) สัญญาณไฟฟ้าแบบ NRZ (ข) พัลส์แสงที่สร้างจาก Mode-locked laser diod (ค) สัญญาณแสงหลังจากถูกมอดูเลต 69
รูปที่ 4.3 ลักษณะของสัญญาณในโดเมนเวลาของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 ณ ตำแหน่งต่างๆของระบบ (ก) หลังจากการ encode (ข) หลังจากการ decode ด้วย decoder ที่ใช้รหัส #3 (ค) หลังจากการ decode ด้วย decoder ที่ใช้รหัส #4........ 70
รูปที่ 4.4 ลักษณะสัญญาณในทางเวลาของผู้ใช้บริการทั้ง 4 รายก่อนถูก encode และหลังถูก decode (ก) รหัส#1 (ข) รหัส#3 (ค) รหัส#5 (ง) รหัส#6 71
รูปที่ 4.5 Eye-diagram ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power 10 dBm ในระบบ OCDMA-PON ที่มีผู้ใช้บริการ 4 รายที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน (ก) แบนด์วิดท์ไม่จำกัด (ข) 20 GHz (ค) 10 GHz (ง) 1.25 GHz........ 74
รูปที่ 4.6 Eye-diagram ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 ในระบบ OCDMA-PON ที่มีผู้ใช้บริการ 8 รายที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน (ก) แบนด์วิดท์ไม่จำกัด (ข) 20 GHz (ค) 10 GHz (ง) 1.25 GHz 77

รูปที่ 4.7 Eye-diagram ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 ในระบบ OCDMA-PON ที่มีผู้ใช้บริการ 16 รายที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน (ก) แบนด์วิดท์ไม่จำกัด (ข) 20 GHz (ค) 10 GHz (ง) 1.25 GHz 80
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของ BER ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่มีค่า BER แย่ที่สุดจากระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 รายตามลำดับ กับค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ไม่จำกัด 82
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของ BER ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่มีค่า BER แย่ที่สุดจากระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 รายตามลำดับ กับค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 GHz 83
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของ BER ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่มีค่า BER แย่ที่สุดจากระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 รายตามลำดับ กับค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 10 GHz 84
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการให้บริการได้กับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่า BER แย่ที่สุด 86
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งสัญญาณ peak power กับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่า BER แย่ที่สุด 87
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำที่ใช้ได้กับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่า BER แย่ที่สุด 89
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆกับค่า BER ของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 4 ราย 91
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆกับค่า BER ของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 8 ราย 93
รูปที่ 5.1 ระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ 96
รูปที่ 5.2 แบบจำลองการส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ด้วยการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ 4 ความยาวคลื่น 97
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการให้บริการกับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่าบิตผิดพลาดแย่ที่สุดในแต่ละความยาวคลื่น 99
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งสัญญาณ peak power กับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่าค่า BER แย่ที่สุดในแต่ละความยาวคลื่น 101
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำกับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่าบิตผิดพลาดแย่ที่สุดในแต่ละความยาวคลื่น 102

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันนี้การสื่อสารข้อมูลได้กลายเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นการโทรศัพท์ การค้นคว้าข้อมูลข่าวสารผ่านอินเทอร์เน็ต การดาวน์โหลดสื่อดิจิตัล และกิจกรรมอื่นๆอีกมากมายที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพเพื่อตอบสนองความต้องการและพัฒนาคุณภาพชีวิตของมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นการพัฒนาโครงข่ายการสื่อสารโทรคมนาคมจึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการพัฒนาและวิจัยโครงข่ายเข้าถึงซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้บริการสามารถเข้าถึงข้อมูลข่าวสารต่างๆได้อย่างสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีซีดีเอ็มเอแสงร่วมกับโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟซึ่งจะมีส่วนช่วยในการพัฒนาโครงข่ายเข้าถึงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารเป็นสิ่งที่มนุษย์ใช้ในการถ่ายทอดบอกความต้องการของตนเองไปยังผู้อื่นมาตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน ต่อมามนุษย์ได้พยายามพัฒนาระบบสื่อสารแบบต่างๆเพื่อให้สามารถนำพาข้อมูลข่าวสารจากจุดหนึ่งไปยังจุดอื่นๆได้ ในปี ค.ศ. 1838 แซมมวล มอร์สประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์โทรเลขโดยการแทรกข้อมูลเข้าไปในคลื่นพาห์ (carrier) ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการสื่อสารยุคอิเล็กทรอนิกส์ [1] ตั้งแต่นั้นมาก็มีการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไปอย่างรวดเร็ว ในปี ค.ศ. 1983 ก็เริ่มมีการใช้งานระบบอินเตอร์เน็ต และเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 หลังจากนั้นเป็นต้นมาจำนวนผู้ใช้บริการอินเตอร์เน็ตก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความต้องการแบนด์วิดท์ (bandwidth) ที่มากขึ้นเพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลจำนวนมากด้วยความเร็วสูง ซึ่งในปัจจุบันแนวโน้มความต้องการบริการด้านการสื่อสารข้อมูลของผู้ใช้บริการกำลังจะเปลี่ยนเข้าสู่ยุค triple play ซึ่งได้แก่ บริการโทรศัพท์ผ่านอินเตอร์เน็ต (voice over IP: VoIP) บริการวีดีโอความละเอียดสูง และบริการอินเตอร์เน็ตความเร็วสูง ทำให้มี

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความต้องการโครงข่ายเข้าถึง (access network) ที่สามารถให้บริการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงที่มีความเชื่อถือได้และมีอัตราค่าบริการต่ำเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

โครงข่ายเข้าถึงเป็นส่วนหนึ่งของระบบสื่อสารที่เชื่อมต่อผู้ใช้บริการโทรคมนาคม (subscriber) เข้ากับผู้ให้บริการโทรคมนาคม (service provider) และให้บริการการขนส่งข้อมูลข่าวสารภายในโครงข่าย [3] โดยโครงข่ายเข้าถึงแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆได้แก่โครงข่ายเข้าถึงแบบใช้สาย (wireline access network) และโครงข่ายเข้าถึงแบบไร้สาย (wireless access network) [2] โดยโครงข่ายเข้าถึงแบบใช้สายนั้นเริ่มต้นจากระบบโทรศัพท์พื้นฐานซึ่งใช้สายตีเกลียวคู่ (twisted pair) ในการส่งสัญญาณ การเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตในยุคแรกจะอาศัยการหมุนโทรศัพท์ (dial-up) ผ่านโมเด็มเพื่อติดต่อไปยังผู้ให้บริการอินเตอร์เน็ต (internet service provider: ISP) ผ่านโครงข่ายโทรศัพท์พื้นฐานซึ่งครอบคลุมพื้นที่ให้บริการเป็นจำนวนมากอยู่แล้วโดยที่ไม่ต้องลงทุนวางโครงข่ายใหม่ เทคโนโลยีนี้มีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดเพียงแค่ 56 kbps [4] และเพื่อเป็นการใช้โครงข่ายโทรศัพท์พื้นฐานที่มีอยู่แล้วให้เกิดประโยชน์มากขึ้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเอดีเอสแอล (asymmetric digital subscriber line: ADSL) ที่มีอัตรารับส่งข้อมูลประมาณ 8-30 Mbps สำหรับการดาวน์โหลด ทั้งนี้ก็ยังไม่สามารถส่งผ่านข้อมูลที่มีความเร็วสูงมากๆได้ เนื่องจากเทคโนโลยีดังกล่าวใช้สายตีเกลียวคู่ซึ่งทำจากทองแดงในการส่งสัญญาณ เมื่อส่งสัญญาณความถี่สูงในสายนำสัญญาณทองแดงจะทำให้ส่งได้ไม่ไกลมากนัก ด้วยสาเหตุนี้จึงมีการนำเส้นใยแสง (optical fiber) มาใช้ในการส่งสัญญาณเนื่องจากเป็นสายสัญญาณที่มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับสายสัญญาณชนิดอื่นๆ โดยข้อได้เปรียบของเส้นใยแสงที่เหนือกว่าสายสัญญาณชนิดอื่นๆมีดังนี้

(1) เส้นใยแสงมีปริมาณแบนด์วิดท์ที่กว้าง เมื่อเทียบกับความถี่ของคลื่นวิทยุซึ่งมีความถี่ 10^6-10^9 เฮิรตซ์เพราะความถี่ของคลื่นพาห์แสงจะอยู่ในช่วง 10^{13}-10^{14} เฮิรตซ์

(2) เส้นใยแสงมีอัตราการสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแสงต่ำเนื่องจากการลดทอนน้อยกว่าสายตีเกลียวคู่ (twisted pair) หรือสายไฟฟ้าร่วมแกน (coaxial cable) ทำให้การสื่อสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าและใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณรวมทั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณน้อยกว่าการสื่อสารแบบอื่น

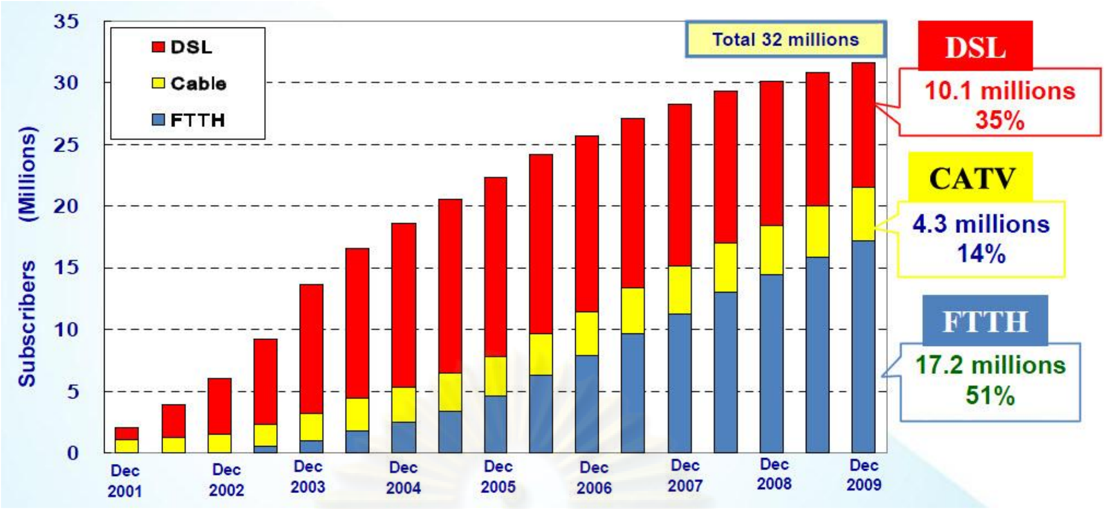
(3) เส้นใยแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา สามารถติดตั้งได้ง่าย และสามารถรวมเส้นใยแสงหลายเส้นเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นการเพิ่มช่องทางการสื่อสารให้มากขึ้นจากการใช้พื้นที่เท่าเดิม

(4) เส้นใยแสงถูกผลิตมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า จึงปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้มีความถูกต้องของสัญญาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสื่อประเภทอื่น

(5) เส้นใยแสงทำจากวัสดุที่ไม่มีการเจือจาง และการออกแบบสายเคเบิลของเส้นใยแสงมีความต้านทานต่อทั้งอุณหภูมิและความชื้น อีกทั้งยังต้องการการบำรุงรักษาที่น้อยมาก

(6) เส้นใยแสงมีความปลอดภัยกว่าระบบสายโลหะเมื่อพิจารณาในแง่ของอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์หรือมนุษย์จากไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างสาย หรือระว่างสายต่อสาย

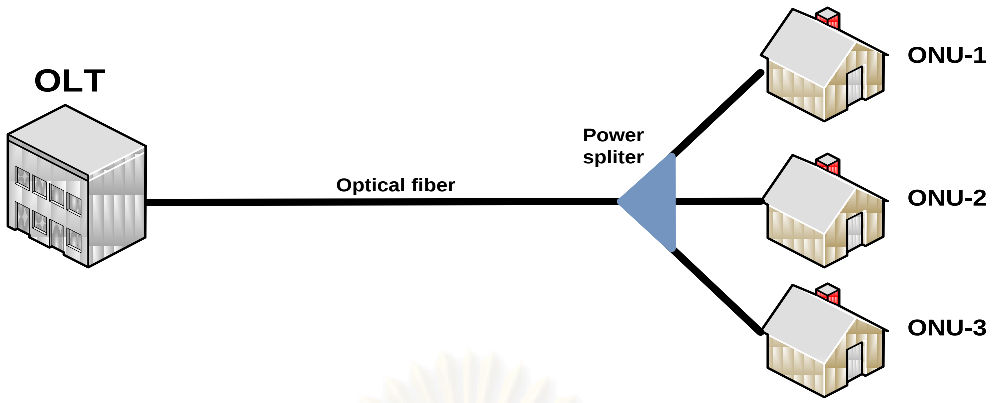
จากข้อดีดังกล่าวของเส้นใยแสง จึงมีการนำเส้นใยแสงมาใช้เป็นสายนำสัญญาณในโครงข่ายเข้าถึงหลายๆประเภท เช่น ไฮบริดไฟเบอร์โคแอ็กเชียล (hybrid fiber coaxcial: HFC) เป็นโครงข่ายที่ใช้เส้นใยแสงซึ่งมีค่าการลดทอนของสัญญาณที่ต่ำมากเป็นสายนำสัญญาณจึงสามารถส่งสัญญาณจากสถานีส่งสัญญาณ (head-end) ไปยังจุดแจกจ่าย (distribution node) ได้ไกลถึง 30 km [5] จากนั้นจึงแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งผ่านสายไฟฟ้าร่วมแกนไปยังผู้ใช้บริการภายในรัศมีประมาณ 2 km โครงข่ายนี้สามารถให้บริการเคเบิลทีวี (cable television: CATV) และอินเตอร์เน็ตความเร็วสูง 30-50 Mbps [6] นอกจากนี้โครงข่ายไฟเบอร์ทูเดอะโฮม (fiber-to-the–home: FTTH) ก็เป็นโครงข่ายเข้าถึงอีกประเภทหนึ่งที่ใช้เส้นใยแสงเป็นสายนำสัญญาณทั้งหมดซึ่งกำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากไม่มีการแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าในการรับส่งข้อมูล ทำให้โครงข่ายสามารถให้บริการได้เป็นระยะทางไกล ทั้งนี้ยังมีแบนด์วิดท์ที่มากเพียงพอที่จะให้บริการทีวีความละเอียดสูง (high-definition television: HDTV) และอินเตอร์เน็ตความเร็วสูงในระดับ 100 Mbps หรืออาจมากถึง 10 Gbps ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของมาตรฐานที่ใช้ โครงข่าย FTTH นี้เริ่มเปิดให้บริการทดลองใช้ในประเทศญี่ปุ่นเมื่อปี ค.ศ. 1977 และในยุโรปและสหรัฐอเมริกาในช่วงต้นปี ค.ศ. 1980 [7] แต่ไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากค่าใช้จ่ายของระบบที่สูงมาก จนกระทั่งในปี ค.ศ. 2002 โครงข่าย FTTH เริ่มเป็นที่สนใจในอย่างมากในประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากอัตราค่าบริการ FTTH ไม่ต่างจากอัตราค่าบริการ ADSL มากนัก ทำให้จำนวนผู้ใช้บริการ FTTH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว รูปที่ 1.1 แสดงจำนวนผู้ใช้บริการและอัตราการขยายตัวของ ADSL CATV และ FTTH ในประเทศญี่ปุ่น [ ] ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการขยายตัวของผู้ใช้บริการ FTTH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 1 ล้านรายในปี ค.ศ. 2002 เป็น 17 ล้านคนในปี ค.ศ. 2009 คิดเป็นอัตราส่วน 51% ของจำนวนผู้ใช้บรอดแบนด์อินเทอร์เน็ตทั้งหมด ในขณะที่จำนวนผู้ใช้บริการ CATV ในปีค.ศ. 2002 มีจำนวน 2 ล้านราย จนกระทั่งปี ค.ศ. 2009 มีจำนวนผู้ใช้บริการประมาณ 4.5 ล้านราย และจำนวนผู้ใช้บริการ ADSL ในปี ค.ศ. 2002 มีประมาณ 4.5 ล้านคน ซึ่งมีอัตราการขยายตัวของจำนวนผู้ใช้บริการอย่างรวดเร็วในช่วงปี ค.ศ. 2004-2006 หลังจากนั้นอัตราการขยายตัวของผู้ใช้บริการลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากผู้ใช้บริการหันไปนิยมโครงข่าย FTTH มากกว่า ทำให้จำนวนผู้ใช้บริการ ADSL ในปี ค.ศ. 2009 อยู่ที่ประมาณ 10 ล้านคน คิดเป็นอัตราส่วน 35% ของจำนวนผู้ใช้บรอดแบนด์อินเทอร์เน็ตทั้งหมด[8]



รูปที่ 1.1 จำนวนผู้ใช้บริการของ ADSL CATV และ FTTH ในประเทศญี่ปุ่น ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2001 ถึงปี ค.ศ. 2009 [8]

โครงข่าย FTTH เป็นโครงข่ายเข้าถึงที่อาศัยเทคโนโลยีพาสซิฟออปติคอลเน็ตเวิร์ก (passive optical network: PON) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีพื้นฐานของโครงข่ายเข้าถึงทางแสง (optical access networks: OANs) [7] ที่เชื่อมต่อผู้ใช้บริการเข้ากับระบบด้วยเส้นใยแสง มีรูปแบบการเชื่อมต่อของโครงข่ายเป็นแบบ point-to-multipoint ดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ optical line terminal (OLT) ที่ติดตั้งอยู่ที่สถานีฐาน (central office: CO) เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายเข้าถึงและโครงข่ายหลัก (backbone network) อุปกรณ์แบ่งพลังงานแสงแบบพาสซิฟ (passive optical power splitter) ทำหน้าที่แบ่งพลังงานแสงออกเป็นหลายๆส่วนเพื่อแจกจ่ายไปยังผู้ใช้งานหลายๆคน และ optical network unit (ONU) ที่ติดตั้งอยู่ที่บ้านของผู้ใช้บริการ เป็นอุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณแสงกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์ของผู้ใช้บริการ เช่น คอมพิวเตอร์ หรือเคเบิลทีวี และใช้เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวเป็นสายสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่าง OLT และ ONU

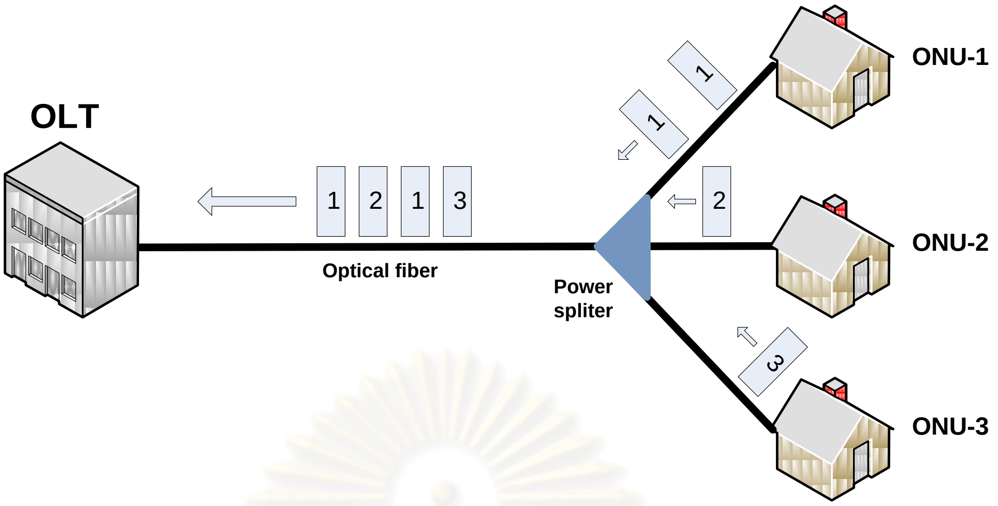
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.2 รูปแบบการเชื่อมต่อของ PON

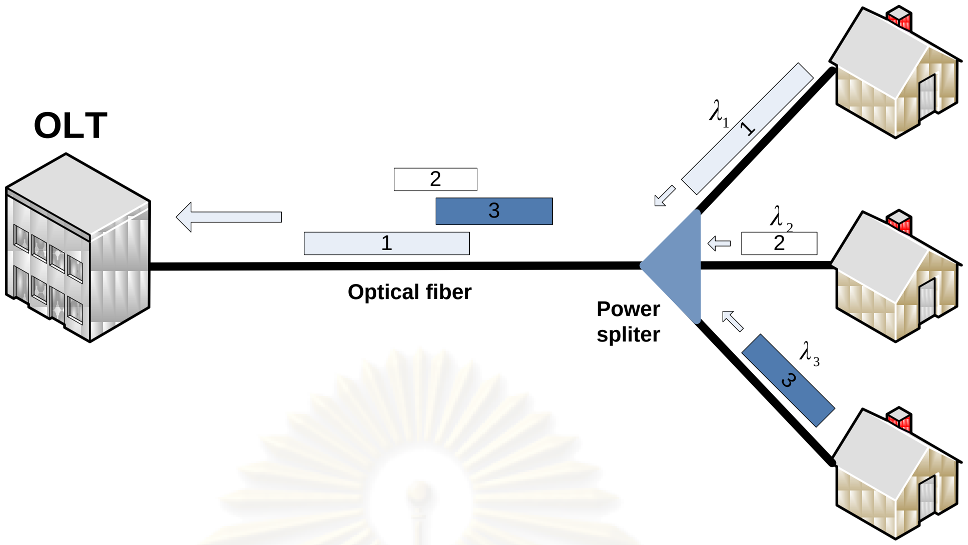
ในแต่ละมาตรฐานของ PON สำหรับโครงข่าย FTTH ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน การส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมของผู้ใช้แต่ละรายล้วนอาศัยการเข้าถึงแบบแบ่งเวลา (time-division multiple access: TDMA) กล่าวคือช่วงเวลา (time-slot) ในการส่งสัญญาณ N ช่วงจะถูกจัดสรรให้กับผู้ใช้บริการจำนวน N ราย ทั้งนี้เนื่องจาก TDMA-PON เป็นระบบที่ลงทุนน้อยกว่าระบบ PON แบบอื่น (เช่น WDMA-PON) และให้ประสิทธิภาพของระบบที่ดี ในการทำงานแบบ TDMA แต่ละ ONU จะทำการติดต่อเพื่อขอใช้ time-slot จาก OLT เพื่อป้องกันการชนกันของบิตข้อมูลของแต่ละ ONU โดยอาศัยโปรโตคอลที่ควบคุมการเข้าใช้ตัวกลาง (media access control: MAC) ทำให้ผู้ใช้แต่ละรายได้รับการจัดสรร time-slot เพื่อส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ใช้บริการแต่ละรายจึงสามารถส่งข้อมูลซึ่งเป็นสัญญาณแสงความยาวคลื่นเดียวกันลงไปในเส้นใยแสงเส้นเดียวกันโดยไม่เกิดกันชนกันของบิตข้อมูลได้ ซึ่งการส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมของ TDMA-PON ดังแสดงในรูปที่ 3 อย่างไรก็ตามการที่จะอัพเกรดระบบ TDMA-PON ที่มีอยู่เดิมให้สามารถรองรับอัตรารับส่งข้อมูลที่สูงขึ้นกว่าเดิมมากๆนั้นสามารถทำได้ยากเนื่องด้วยเป็นระบบแบบซิงโครนัสที่ใช้ MAC โปรโตคอล และข้อจำกัดทางด้านแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์อิเล็คทรอนิกส์ [10]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.3 การส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมของ TDMA-PON [9]

การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความยาวคลื่น (wavelength-division multiple access: WDMA) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถการเพิ่มประสิทธิภาพของ PON รูปที่ 4 แสดงรูปแบบการทำงานของ WDMA-PON โดยจัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกันให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายสำหรับการส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมและดาวน์สตรีม ทำให้ไม่มีโอกาสชนกันของข้อมูล ผู้ใช้แต่ละรายสามารถใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างเต็มที่และไม่ต้องอาศัยการซิงโครนัสของระบบด้วย แต่จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถจัดสรรให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายตามมาตรฐาน ITU-T G.694-2 (coarse wavelength division multiplexing: CWDM) นั้นสามารถให้บริการได้เพียง 18 รายเท่านั้น ซึ่งไม่มากพอสำหรับการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการจำนวนมาก ดังนั้นการเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการให้มากขึ้นย่อมเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายของระบบมากขึ้น [8],[10] ด้วยข้อจำกัดด้านต่างๆของ TDMA-PON และ WDMA-PON นักวิจัยจึงได้พัฒนาเทคโนโลยีใหม่ในการเข้าถึงข้อมูล คือเทคโนโลยีการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (code-division multiple access: CDMA)



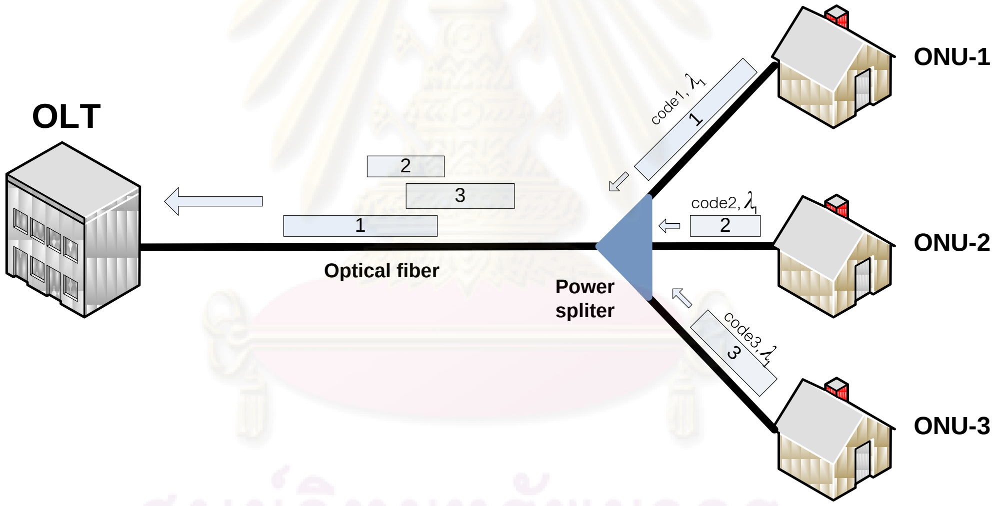
รูปที่ 1.4 การส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมของ WDMA-PON [9]

เทคโนโลยี CDMA นั้นได้เคยถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการทหารสำหรับป้องกันการรบกวนของศัตรูฝ่ายตรงข้ามต่อการรับส่งสัญญาณมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 หลังจากนั้นมาได้มีการพัฒนา CDMA เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างจริงจังมากขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1989 เพื่อให้ได้ระบบที่สามารถรองรับการสื่อสารมัลติมีเดียไร้สายรูปแบบใหม่ๆได้ในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจุบันระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3 (3G) ก็ใช้เทคโนโลยี CDMA เป็นพื้นฐานในการส่งและรับสัญญาณ หลักการการทำงานของระบบ CDMA เป็นการเข้าถึงโดยผู้ใช้แต่ละรายสามารถเข้าใช้ความถี่เดียวกันพร้อมกันได้ โดยอาศัยการเข้ารหัสสัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายด้วยรหัส (code) ที่แตกต่างกันไป ซึ่งแตกต่างกับการเข้าถึงแบบแบ่งเวลา (TDMA) ที่อาศัยการแบ่งช่วงเวลาในการใช้ช่องสัญญาณ และแบบแบ่งความถี่ (frequency-division multiple access: FDMA) ที่อาศัยการแบ่งช่วงความถี่ในการใช้ช่องสัญญาณ ทั้งนี้การใช้งานช่องสัญญาณพร้อมๆกันบนความถี่เดียวกันทำให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน ดังนั้นผู้ใช้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA แต่ละคู่จะต้องใช้รหัสชุดเดียวกันจึงจะสามารถรับและส่งข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ข้อดีของระบบ CDMA คือสามารถเพิ่มความจุของระบบได้มากขึ้น รองรับจำนวนผู้ใช้บริการพร้อมๆกัน ประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ที่สูงมากขึ้นและไม่ต้องอาศัยการ์ดไทม์ (guard time)ในการควบคุมป้องกันการชนกันของข้อมูลทำให้สามารถนำเวลาช่วงดังกล่าวมาเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลได้ [12],[13],[29]

จากข้อดีของเทคโนโลยี CDMA ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ จึงมีการนำ CDMA มาใช้ร่วมกับการสื่อสารทางแสง เรียกเทคโนโลยีดังกล่าวว่าออปติคอลโค้ดมัลติเพิ่ลแอ็กเซส (optical code-division multiply access: OCDMA) กล่าวคือผู้ใช้แต่ละรายจะถูกจัดสรรรหัส (code) ที่

แตกต่างกัน ข้อมูลของผู้ใช้แต่ละรายที่ส่งออกไปจะถูกเข้ารหัส (encode) ด้วยรหัสที่ถูกจัดสรรให้ผู้ใช้นั้นๆ ที่ตัวส่งสัญญาณ (transmitter) ทำให้ผู้ใช้แต่ละรายสามารถส่งข้อมูลลงไปบนเส้นใยแสงเส้นเดียวกันพร้อมๆกันได้ และที่เครื่องรับ (receiver) ของผู้ใช้แต่ละรายจะถูกถอดรหัส (decode) ด้วยกระบวนการแมตช์ฟิลเตอร์ริ่ง (match filtering) ทำให้ผู้ใช้แต่ละรายได้รับข้อมูลของตัวเองอย่างถูกต้องในขณะที่ข้อมูลของผู้ใช้รายอื่นก็จะถูกกำจัดทิ้งไป [11]

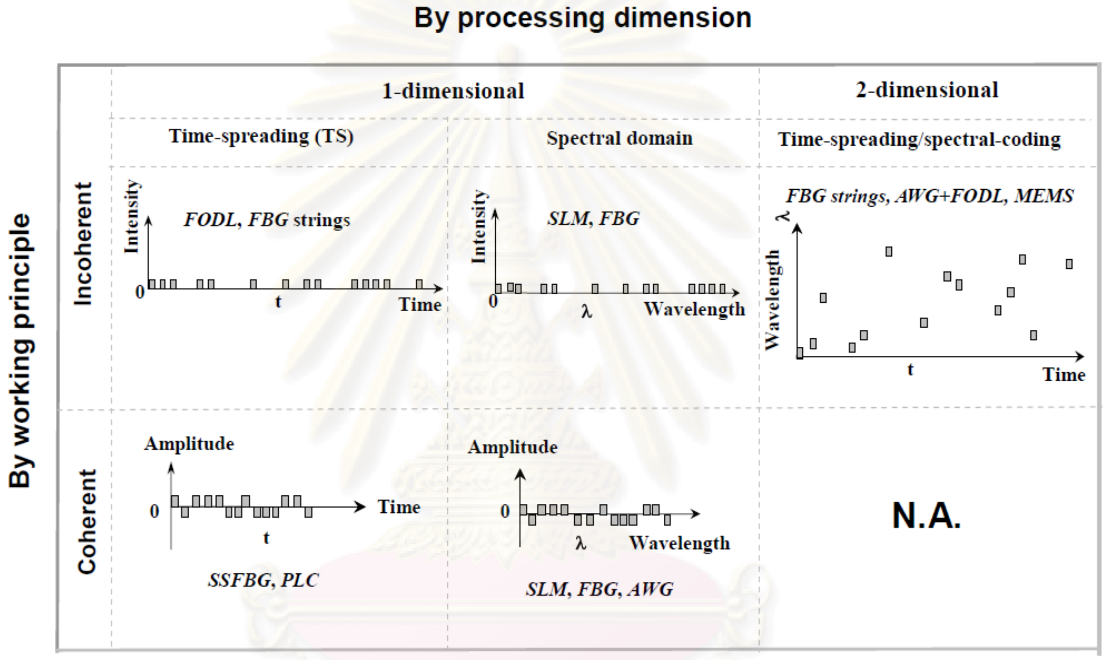
เทคโนโลยี OCDMA มีการประยุกต์ใช้งานมากมาย ไม่ว่าจะเป็นการใช้ OCDMA เพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการในโครงข่าย DWDM [x] การสวิตช์แพ็คเกทเชิงแสง (optical packet switching) [34] หรือนำมาใช้ร่วมกับ PON เรียกเทคโนโลยีดังกล่าวว่า OCDMA-PON ข้อดีของระบบนี้คือไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการซิงโครนัสระบบระหว่าง OLT กับ ONU นอกจากนี้ยังทำการเข้ารหัสถอดรหัสและประมวลสัญญาณในโดเมนของแสงทั้งหมด มีประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ที่สูง อีกทั้งยังรองรับจำนวนผู้ใช้ได้เป็นจำนวนมากอีกด้วย ทำให้ OCDMA-PON เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจสำหรับโครงข่ายเข้าถึงในยุคหน้าอันใกล้นี้



รูปที่ 1.5 การส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมของ OCDMA-PON [9]

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยี OCDMA มีมาตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1970 และเริ่มมีการนำเสนอผลการวิจัยในช่วงปี ค.ศ. 1980 ทั้งนี้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบยังไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้สำหรับ OCDMA เช่น อุปกรณ์เข้ารหัสและถอดรหัสทางแสง (optical encoder/decoder) อุปกรณ์ตัดสินระดับสัญญาณแสง (optical thresholder) และอื่นๆ ยังมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก [10] ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์ทางแสงก็ได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้น [15],[16] เราสามารถแบ่งระบบ OCDMA แบ่งเป็น 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 6 คือแบ่งตามหลักการใช้งาน (by working principle) ได้แก่ อินโคฮีเรนท์ (incoherent) OCDMA ซึ่งเป็นการทำงานบน

ความเข้มของสัญญาณแสงโดยมีการเข้ารหัสเป็นแบบยูนิโพลาร์ (0,1) และ โคฮีเรนท์ (coherent) OCDMA ซึ่งเป็นการทำงานบนแอมพลิจูดของสัญญาณแสงโดยมีการเข้ารหัสแบบไบโพล่าร์ (-1,1) [14] อีกวิธีการแบ่งคือแบ่งตามมิติในการประมวลสัญญาณ (by processing dimension) ได้แก่การเข้ารหัสแบบ 1 มิติทั้งในโดเมนเวลาหรือโดเมนความถี่ (1-D in time-domain or frequency-domain) ซึ่งได้แก่วิธี time-spreading (TS) OCDMA [10],[11],[15] และ spectral code OCDMA [28],[32] หรือแบบ 2 มิติในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ไปพร้อมๆกัน ซึ่งได้แก่วิธี wavelength hopping [14],[31]



รูปที่ 1.6 การแบ่งประเภทของ OCDMA ตามหลักการใช้งานและแบ่งตามมิติในการประมวลสัญญาณ

ถึงแม้ว่า 2-D OCDMA นั้นจะมีคุณสมบัติสหสัมพันธ์ (correlation property) ที่ดี แต่ประสิทธิภาพโดยรวมไม่ค่อยดีมากนักเนื่องจากการใช้หลายๆความยาวคลื่นมาทำการเข้ารหัสทำให้มีประสิทธิภาพการใช้ความยาวคลื่น (spectral efficiency) และประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสง (optical power efficiency) ที่ต่ำ และอาจเกิดปัญหาเนื่องจากดิสเพอร์ชั่น (dispersion) ที่ไม่เท่ากันของแต่ละความยาวคลื่นที่ใช้เข้ารหัสระหว่างการส่งสัญญาณได้ นอกจากนั้น incoherent-OCDMA ซึ่งมีการเข้ารหัสบนความเข้มแสงแบบ unipolar ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงและความยาวคลื่นที่ต่ำ และความยาวของรหัสที่ใช้ได้ก็ขนาดสั้นทำให้ correlation property ของระบบไม่ดี ในทางกลับกัน coherent-OCDMA ซึ่งเข้ารหัสบนแอมพลิจูดของสัญญาณแสงแบบ

bipolar ทำให้คุณสมบัติโดยรวมไม่ว่าจะเป็น correlation property ความยาวของรหัสที่สามารถใช้ได้ ประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงและความยาวคลื่นนั้นดีกว่า incoherent OCDMA ดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ OCDMA แบบต่างๆ [14],[19] ในปัจจุบันงานวิจัยส่วนมากล้วนศึกษาเกี่ยวกับ coherent OCDMA แทบทั้งสิ้นเนื่องจากข้อได้เปรียบของระบบดังที่ได้กล่าวมา [10],[11],[14]-[19]

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ OCDMA แบบต่างๆ

OCDMA schemes	Incoherent			Coherent	
	TS	Spectral coding	2-D	TS	Spectral coding
Correlation property	Worst	Medium	Good	Good	Medium
Code number	Small	Medium	Large	Large	Large
MAI noise	High	Medium	Medium	Low	Low
Beat noise	Low	Medium	Medium	High	High
Optical power efficiency	Low	High	Low	High	Medium
Spectral efficiency	Low	Low	Medium	Medium	Low
Data rate	Low	Low	Medium	High	High

ปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้ในการ encode และ decode สำหรับ TS-OCDMA ได้แก่ fiber optical delay line (FODL), spatial light phase modulator (SPLM) planar light wave circuit (PLC) arrayed-waveguide-grating (AWG) [24],[27] และ superstructure-fiber bragg grating (SSFBG) [10] ซึ่ง AWG และ SSFBG ซึ่งมีคุณสมบัติโดยรวมที่เหมาะสมกับระบบ OCDMA [14] ดังเห็นได้จากบทความ [15] ซึ่งได้แสดงการส่งสัญญาณ OCDMA สำหรับผู้ใช้บริการ 10 ราย ที่อัตราข้อมูล 1.25 Gbps โดยใช้ SSFBG เป็น en/decoder และบทความ [16] นำเสนอการใช้ AWG เป็น en/decoder ที่ OLT และใช้ SSFBG เป็น en/decoder ที่ ONU ถึงแม้ว่าผลการวิจัยจะประสบผลสำเร็จด้วยดี แต่อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญที่จำกัดขีดความสามารถของระบบ OCDMA ก็คือ การรบกวนเนื่องมาจากการเข้าใช้หลายทิศทาง (multiple-access interference: MAI) และสัญญาณรบกวน beat noise นอกจากนี้ยังรวมไปถึงขีดจำกัดในการออกแบบ en/decoder ที่เป็นอุปกรณ์แบบพาสซิฟให้มีความเที่ยงตรงและแม่นยำและมีอัตราการสูญเสียพลังงานที่ต่ำ ทำให้ความเร็วในการรับส่งข้อมูล OCDMA ถูกจำกัด

งานวิจัยที่ผ่านมามักจะให้ความสำคัญต่อปัญหาที่จำกัดสมรรถนะของระบบ OCDMA โดยเฉพาะ MAI และ beat noise ซึ่งนักวิจัยก็ได้พยายามศึกษาและพัฒนาวิธีการลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนดังกล่าว และได้นำเสนอโมเดลและการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ [18] และวิธีลดสัญญาณรบกวน เช่น การออกแบบ SSFBG ที่ใช้รหัสที่ยาวขึ้น [15] นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ เช่นการใช้ optical thresholding [26],[30] ที่ทำให้สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้ 10 รายที่อัตรารับส่งข้อมูล 1.25 Gbps ที่อัตราบิตผิดพลาด (bit error rate: BER) เท่ากับ 10^{-9} เมื่อเทียบกับการไม่ใช้ optical thresholding ซึ่งสามารถรองรับผู้ใช้ได้ 6 รายเท่านั้น [10],[11],[14]-[19]

งานวิจัยส่วนมากที่เกี่ยวกับ OCDMA จะเน้นไปที่การศึกษาออกแบบและวิเคราะห์ระบบ OCDMA เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลเป็นระยะทางไกล เช่น ทดลองส่งสัญญาณ OCDMA ลงบนโครงข่าย WDM เป็นระยะทาง 100 km ด้วยอัตราการส่งข้อมูล 10 Gbps ต่อ 1 ความยาวคลื่น [11],[16] ทั้งนี้ยังไม่มีงานวิจัยใดที่นำ OCDMA มาใช้ร่วมกับโครงข่าย FTTH เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการสื่อสัญญาณ OCDMA บนระบบ FTTH ภายใต้ข้อจำกัดต่างๆของระบบที่มีอยู่ ว่าสามารถให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากเพียงใด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจที่จะวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อความสามารถของการสื่อสัญญาณ OCDMA บนระบบ FTTH แล้วเทียบผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองที่จำลองจากโปรแกรม Optisys 8.0 นอกจากนี้แล้วยังรวมไปถึงการหาจำนวนผู้ใช้สูงสุดเมื่อกำหนดให้อัตรารับส่งข้อมูลและระยะทางให้บริการคงที่ อัตรารับส่งข้อมูลสูงสุดเมื่อกำหนดให้จำนวนผู้ใช้และระยะทางให้บริการคงที่ และระยะทางให้บริการที่ไกลที่สุดเมื่อกำหนดให้จำนวนผู้ใช้บริการและอัตรารับส่งข้อมูลคงที่ที่การสื่อสัญญาณ OCDMA บนระบบ FTTH สามารถทำได้ต่อ 1 ความยาวคลื่นและหลายความยาวคลื่นเมื่อนำมาใช้กับ coarse wavelength-division multiplexing (CWDM) ภายใต้ข้อจำกัดของระบบที่มีอยู่

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการสื่อสัญญาณ OCDMA บนระบบ FTTH มีมากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับ FTTH ที่ยังใช้ระบบ TDMA อยู่ในปัจจุบัน โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาและวิเคราะห์การสื่อสัญญาณ OCDMA บนระบบ FTTH จะได้แนวทางการออกแบบระบบให้มีสมรรถนะสูงสุด และสามารถนำไปประยุกต์และพัฒนาต่อเพื่อนำไปใช้ในโครงข่ายเข้าถึงแบบ FTTHในยุคหน้าได้อย่างแท้จริง

1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

การออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ผู้ใช้บริการสามารถเข้าถึงการให้บริการการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงขึ้นในราคาที่ถูกลง ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้โครงข่าย FTTH กลายเป็นโครงข่ายบรอดแบนด์ความเร็วสูงที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบันนี้ ซึ่งในอนาคตอันใกล้นี้ข้อมูลข่าวสาร ภาพ เสียง วิดีโอ และ content ต่างๆ จะมีขนาดของข้อมูลที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายต้องใช้แบนด์วิดท์จำนวนมหาศาลเพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการแย่งกันใช้ช่องสัญญาณหรือในบางครั้งมีแบนด์วิดท์ให้ใช้ไม่เพียงพอต่อความต้องการ ดังนั้นการเปลี่ยนวิธีการเข้าถึงในโครงข่าย FTTH จาก TDMA มาเป็น CDMA จึงเป็นจุดเริ่มต้นของวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากการใช้ระบบ CDMA ร่วมกับ PON หรือ OCDMA-PON เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาคอขวดของข้อมูลในโครงข่ายเข้าถึง เพราะการเข้าถึงแบบ CDMA จะใช้รหัสในการเข้ารหัสสัญญาณแต่ละรายแล้วส่งสัญญาณไปพร้อมๆกันได้ ทำให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายในโครงข่ายไม่ต้องแย่งกันใช้ช่องสัญญาณทางเวลา ผู้ใช้บริการแต่ละรายจึงสามารถใช้แบนด์วิดท์ที่ได้รับได้อย่างเต็มที่

อย่างไรก็ตามระบบ OCDMA-PON นอกจากจะมีสัญญาณรบกวนที่ตัวรับสัญญาณแล้ว ยังมีปัญหาสัญญาณรบกวน MAI และ beat noise ซึ่งมีส่วนทำให้คุณภาพของสัญญาณนั้นแย่ลง ดังนั้นด้วยข้อจำกัดของพารามิเตอร์ต่างๆในระบบที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์หาจำนวนผู้ใช้บริการมากสุด อัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดและระยะทางให้บริการไกลสุดที่สามารถให้บริการได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำระบบ OCDMA-PON ไปใช้ร่วมกับระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นอย่างหยาบ (CWDM) เพื่อเป็นการเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการได้อีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ รวมทั้งข้อจำกัดของการนำซีดีเอ็มเอแสง (OCDMA) มาใช้กับเทคโนโลยีโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (PON) หรือบนโครงข่ายไฟเบอร์ทูเดอะโฮม (FTTH)
2. วิเคราะห์หาจำนวนผู้ใช้บริการมากสุด อัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดและระยะทางให้บริการไกลสุดของ OCDMA-PON ที่สามารถให้บริการได้ต่อ 1 ความยาวคลื่น และหลายความยาวคลื่นเมื่อนำมาใช้ร่วมกับ coarse wavelength-division multiplexing (CWDM) ภายใต้ข้อจำกัดของระบบที่มีอยู่

3. เสนอแนวทางการออกแบบระบบ OCDMA-PON ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
4. เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ OCDMA-PON ในแง่จำนวนผู้ใช้บริการสูงสุด อัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุด และระยะทางให้บริการไกลสุด กับโครงข่าย FTTH ที่ยังใช้การเข้าถึงเชิงเวลา (time-division multiple access: TDMA) ในปัจจุบัน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับพื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อส่งแสงผ่านเส้นใยแสง
2. ศึกษาคุณสมบัติของระบบ OCDMA-PON รวมไปถึงผลดีและผลเสียของระบบดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ TDMA-PON
3. ศึกษาและวิเคราะห์วิธีการเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณแสงรวมไปถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าการลดทอนของสัญญาณ ดิสเพอร์ชันอันดับที่สอง MAI และ beat noise ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ OCDMA-PON ในเชิงทฤษฎี
4. จำลองระบบ OCDMA-PON ด้วยโปรแกรม Optisys 8.0 แล้วเปรียบเทียบผลการทดลองว่าสอดคล้องกับทฤษฎีหรือไม่
5. จำลองระบบ OCDMA-PON เพื่อหาจำนวนผู้ใช้มากที่สุด, ระยะทางที่ไกลที่สุด และอัตรารับส่งข้อมูลสูงสุดที่สามารถทำได้ต่อ 1 ความยาวคลื่นและหลายความยาวคลื่นเมื่อนำมาใช้ร่วมกับระบบ coarse wavelength-division multiplexing (CWDM) ภายใต้ข้อจำกัดของระบบที่มีอยู่
6. วิเคราะห์และประเมินผลของระบบ OCDMA-PON ทั้งหมด
7. สรุปผลและเรียบเรียงรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. แบบจำลองระบบ OCDMA-PON พิจารณาการเข้ารหัสและถอดรหัสแบบ coherent time-Spreading OCDMA
2. ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ศึกษามีเพียงค่าการลดทอนของสัญญาณ ดิสเพอร์ชันอันดับที่สอง MAI และ beat noise เท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. อุปกรณ์ภาคส่งและภาครับของแบบจำลองมีความเป็นอุดมคติโดยไม่คำนึงผลของสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ภาคส่งและภาครับ
4. เส้นใยแสงที่ใช้ในแบบจำลองเป็นไปตามมาตรฐาน ITU-T G.652.c และ G.652.d เท่านั้น
5. ใช้การ simulation ในการศึกษาและวิเคราะห์ระบบ OCDMA-PON ด้วยโปรแกรม Optisys 8.0 เพื่อทดสอบสมมุติฐานโดยไม่มีการทดลองจริง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยบกับวิธีมัลติเพล็กซ์แบบ OCDMA รวมทั้งการประยุกต์ระบบดังกล่าวเข้ากับโครงข่าย FTTH
2. สร้างระบบ OCDMA-PON ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดของระบบที่มีอยู่
3. ระบบ OCDMA-PON สามารถให้บริการด้วยอัตรารับส่งข้อมูลที่สูงกว่า รองรับจำนวนผู้ใช้ได้มากกว่า และส่งได้ระยะทางที่ไกลกว่า TDMA-PON ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน
4. นำผลงานวิจัยไปวิเคราะห์ผลร่วมกับงานวิจัยที่พัฒนาประสิทธิภาพของ OCDMA เพื่อนำไปออกแบบโครงข่ายเข้าถึงในยุคหน้า
5. ตีพิมพ์และนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติ

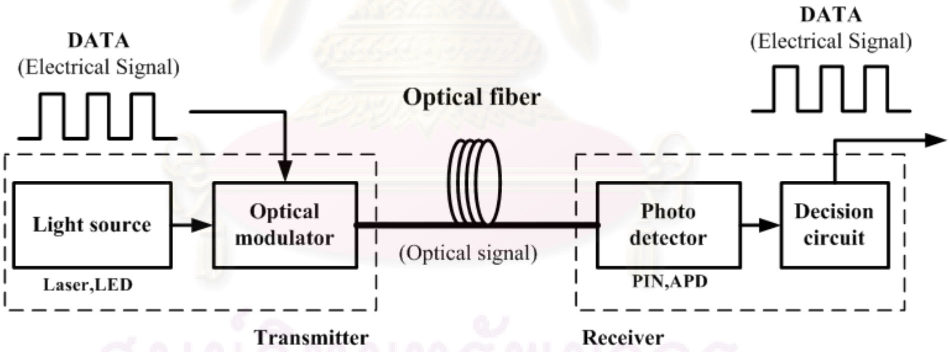
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการสื่อสารทางแสง

เนื้อหาของทฤษฎีที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์บทนี้แบ่งออกเป็น 6 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะกล่าวถึงระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงขั้นพื้นฐาน การส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะไกลรวมไปถึงการแนะนำให้รู้จักว่าอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องมีในระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงอย่างคร่าวๆ สำหรับส่วนที่สองเป็นการแนะนำถึงทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงซึ่งได้แก่ การลดทอนกำลังสัญญาณ และผลกระทบของดิสเพอร์ชัน สำหรับส่วนที่สามเป็นการแนะนำทฤษฎีเบื้องต้นของเส้นใยแสงและมาตรฐานของเส้นใยแสงที่ใช้ใน PON ส่วนที่สี่เป็นการแนะนำมาตรฐานต่างๆ ของ PON ส่วนที่ห้าเป็นการอธิบายระบบ OCDMA-PON และสุดท้ายจะกล่างถึงเทคนิคในการจัดการดิสเพอร์ชันเพื่อลดผลดิสเพอร์ชันที่มีต่อสัญญาณที่เดินทางไปในเส้นใยแสง

2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

ในระบบสื่อสารแบบใช้สายสัญญาณนั้น เส้นใยแสงได้ถูกนำมาใช้เป็นสื่อสัญญาณอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ โดยทั่วไประบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(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 ณ ความยาวคลื่น zero dispersion จะเป็นค่าเดียวกับความยาวคลื่นที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนกำลังงานต่ำที่สุด (1550 nm) และ NZ-DSF ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้ในระบบมัลติเพล็กซ์หลายช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น

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

2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

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

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

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

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

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 ทั้งนี้สามารถแยกคิดปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อรูปร่างของสัญญาณได้ดังนี้

2.2.1 **การสูญเสียกำลังของสัญญาณ** (fiber attenuation)

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

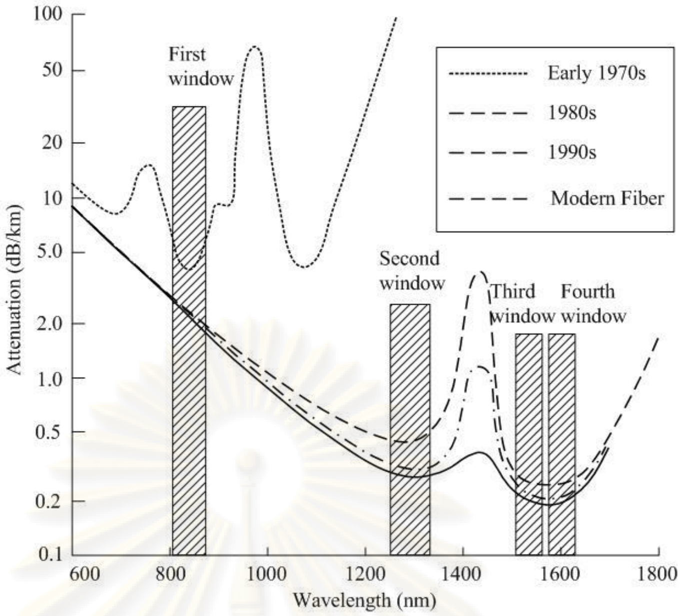
แสงที่เดินทางในเส้นใยแสงจะถูกลดทอนพลังงานแบบเอกซ์โพแนนเชียลไปตามระยะทางหนึ่งๆ โดยมีสมการแสดงการลดทอนกำลังสัญญาณดังนี้

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

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]

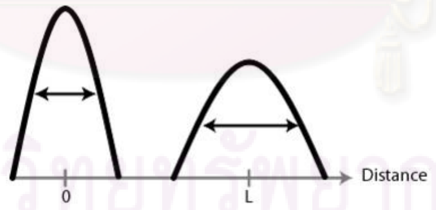
โดยที่ค่าคงตัวการลดทอน α นั้นจะแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงเส้นโค้งทั้ง 3 เส้น โดยเส้นบนสุดซึ่งเป็นเส้นประ แสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงปลายยุค 80 และล่างสุดเป็นเส้นทึบซึ่งแสดงถึงเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (first window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกา และจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความชื้น และผลของ Rayleigh scattering ซึ่งทำให้อัตราลดทอนสัญญาณมีค่าสูงดังเส้นประในรูป หลังจากนั้นก็มีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณในยุคที่ 2 (Second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ในช่วงปลายปี 1977 Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (Third window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm ซึ่งมีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการใช้งานนั้นถ้าเป็นการส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN เป็นต้น เราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (Fourth window) ให้เปลี่ยนไปใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm ซึ่งไม่ได้มีอัตราการลดทอนสัญญาณที่ลดลง แต่

อาจจะทำให้ความยุ่งยากในการส่งสัญญาณระยะทางไกลหรือระบบการสื่อสัญญาณแบบมีการมัลติเพล็กซ์หลายความยาวคลื่นลดลง

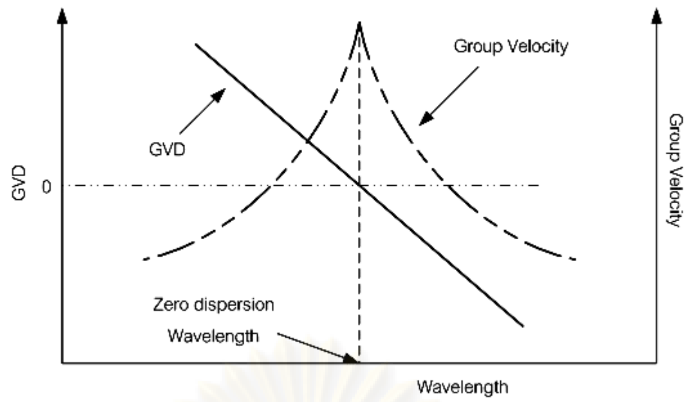
2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion)

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 ดังนั้นดิสเพอร์ชันที่ส่งผลกับระบบจะเป็นแบบ chromatic dispersion

สาเหตุของการเกิด chromatic dispersion คือคุณสมบัติของความเร็วกลุ่มมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละความยาวคลื่น ทำให้สัญญาณพัลส์ที่ประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกันเป็นผลให้สัญญาณพัลส์ที่ปลายทางขยายออก ซึ่งการขยายออกของสัญญาณพัลส์จะส่งผลให้ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณพัลส์ลดลงด้วยดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลของดิสเพอร์ชันต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

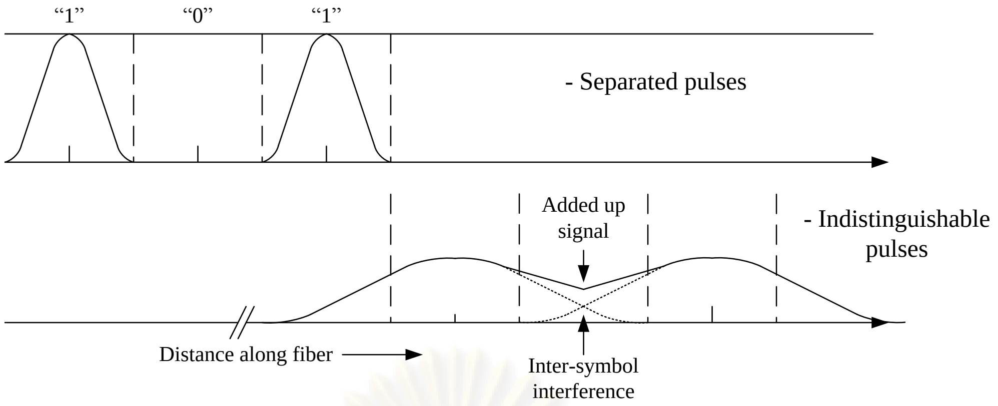


รูปที่ 2.4 การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น

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 $\beta_2 = 0$ โดยสัญญาณที่ความยาวคลื่นนี้จะมีค่าความเร็วกลุ่มสูงที่สุด

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 ที่เกิดจากการขยายตัวออกของสัญญาณพัลส์ โดยเริ่มแรกส่งสัญญาณแบบมอดูเลตความเข้มแสงด้วยบิต ‘1’, ‘0’, ‘1’ ตามลำดับ สัญญาณพัลส์ระหว่างบิตแยกออกจากกันอย่างชัดเจน เมื่อสัญญาณพัลส์เดินทางในเส้นใยแสงผลของ GVD ทำให้สัญญาณพัลส์ขยายออก จนกระทั่งเกิด ISI ผลของ ISI ทำให้กำลังงานของสัญญาณที่ช่วงเวลา (time slot) บิต ‘0’ เพิ่มขึ้น และอาจทำให้ตรวจจับสัญญาณผิดพลาดจากบิต ‘0’ กลายเป็นบิต ‘1’ หากว่าสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมาเลยค่าขอบเขตที่เครื่องตรวจจับสัญญาณกำหนดไว้

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

$$\tau = \frac{L}{v_g} \tag{2.4}$$

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

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

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

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

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

$$D = \frac{1}{L}\frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = \frac{1}{L}\frac{\partial \tau}{\partial \omega}\frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \tag{2.7}$$

เมื่อ

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

โดยที่ λ คือความยาวคลื่นหน่วยนาโนเมตร [nm]

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

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

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2 \tag{2.9}$$

ดังนั้นเราสามารถคำนวณการขยายตัวออกของสัญญาณพัลส์ในรูปของ D โดยนำสมการที่ (2.9) ที่ได้ไปแทนค่าลงในสมการที่ (2.7) ได้ดังนี้

$$\Delta\tau = |D|\Delta\lambda L \tag{2.10}$$

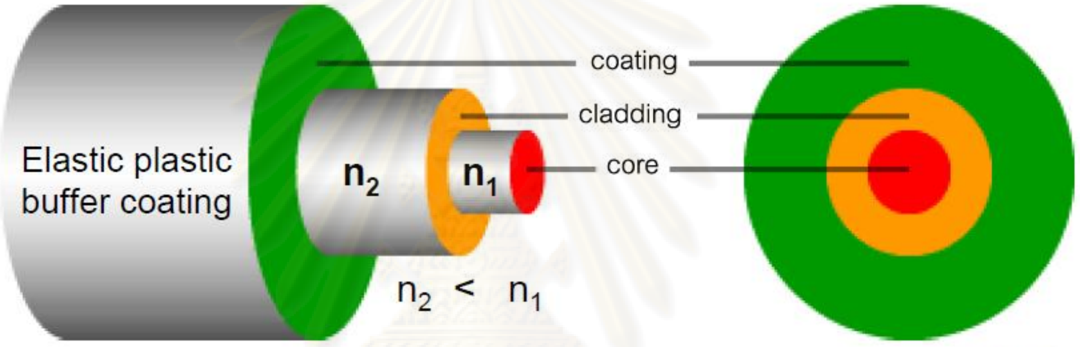
เมื่อ $\Delta\lambda$ แทนความกว้างสเปกตรัมของสัญญาณแสง

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับเส้นใยแสง

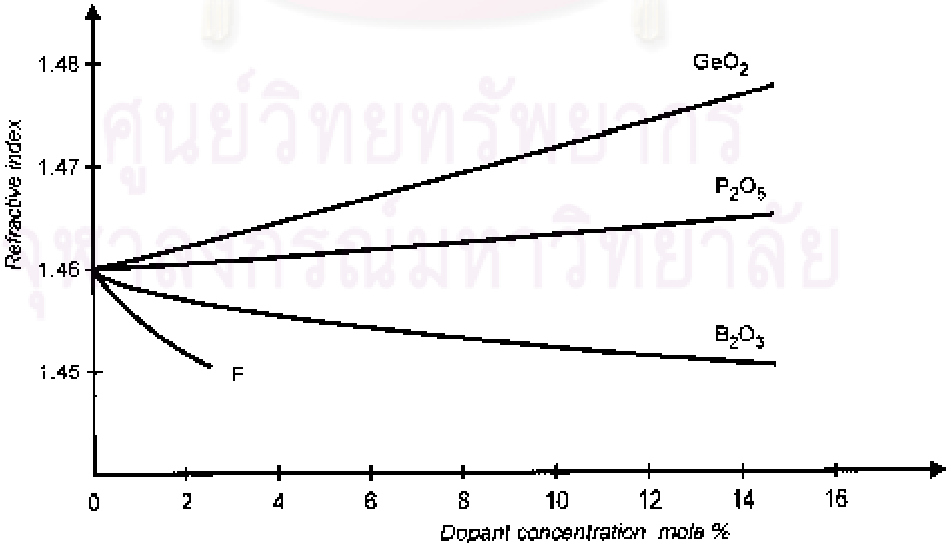
เส้นใยแสงเป็นสื่อสัญญาณที่ใช้ในระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงซึ่งอาศัยทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงผลิตจากวัสดุที่เป็นฉนวน (dielectric) เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือพลาสติก (plastic optical fiber: POF) ทั้งนี้เส้นใยแสงที่ทำจาก SiO_2 นั้นมีค่าการลดทอนของสัญญาณซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาที่ก่อให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่น้อยกว่าเส้นใยแสงที่ทำจากพลาสติค 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 ฟอสฟอรัสเพนท็อกไซด์ (Phosphorus pentoxide: P_2O_5) หรือเจอร์มาเนียมไดออกไซด์ (Germanium dioxide: GeO_2) ลงไปใน SiO_2 เพื่อให้ค่าดัชนีหักเหมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย หรือใส่สารไดโบรอนไตรอ็อกไซด์ (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

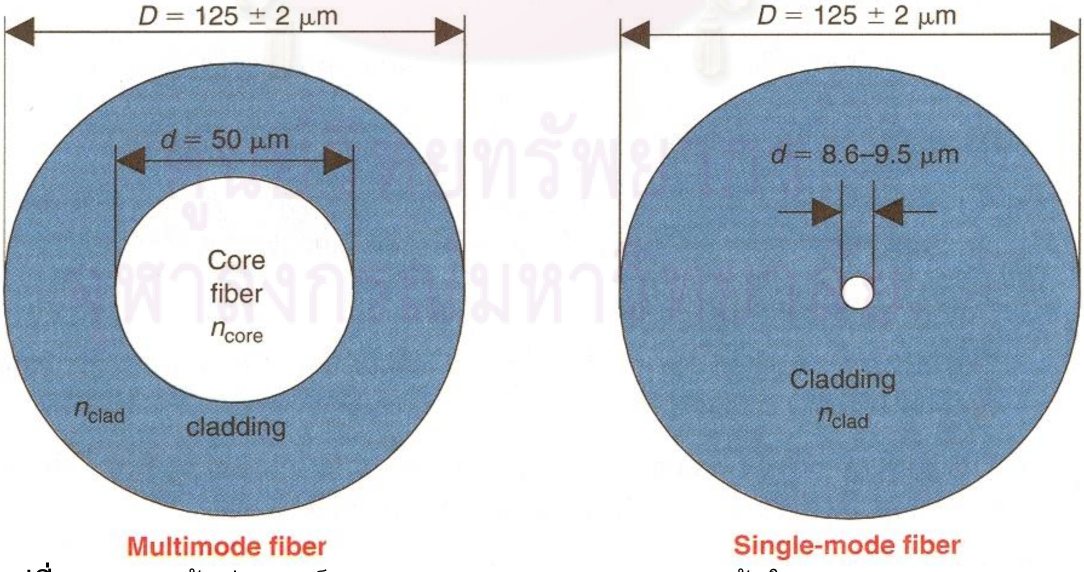


รูปที่ 2.7 ค่า refractive index ของ SiO_2 ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อถูกเจือปนด้วยสารชนิดต่างๆ [1]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เส้นใยแสงแบ่งตามจำนวนของโหมดในการสื่อสัญญาณได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว (single-mode fiber: SMF) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ core ประมาณ 8.6-9.5±0.6 μ m และขนาดมีเส้นผ่านศูนย์กลางของ cladding ประมาณ 125±1 μ 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±3 μ m หรือ 62.5±2.5 μ m และขนาดมีเส้นผ่านศูนย์กลางของ cladding ประมาณ 125±2 μ 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

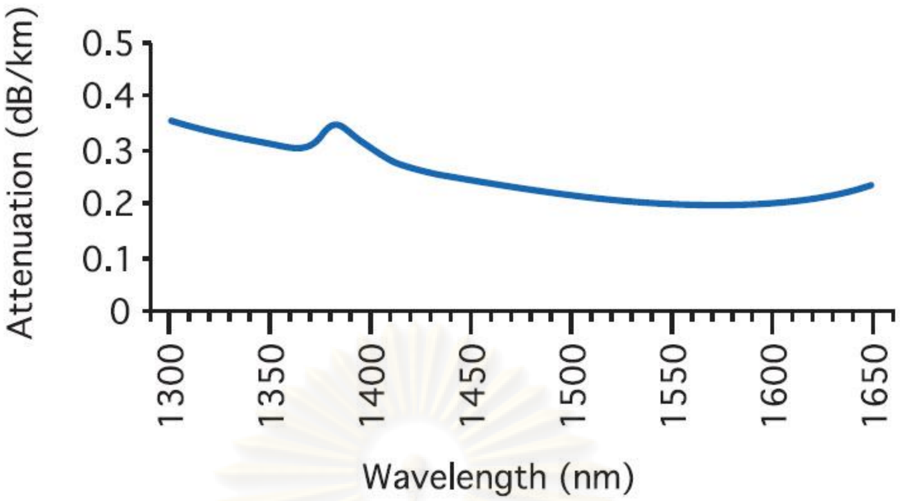


รูปที่ 2.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ core และ cladding ของเส้นใยแสง MMF และ SMF [c]

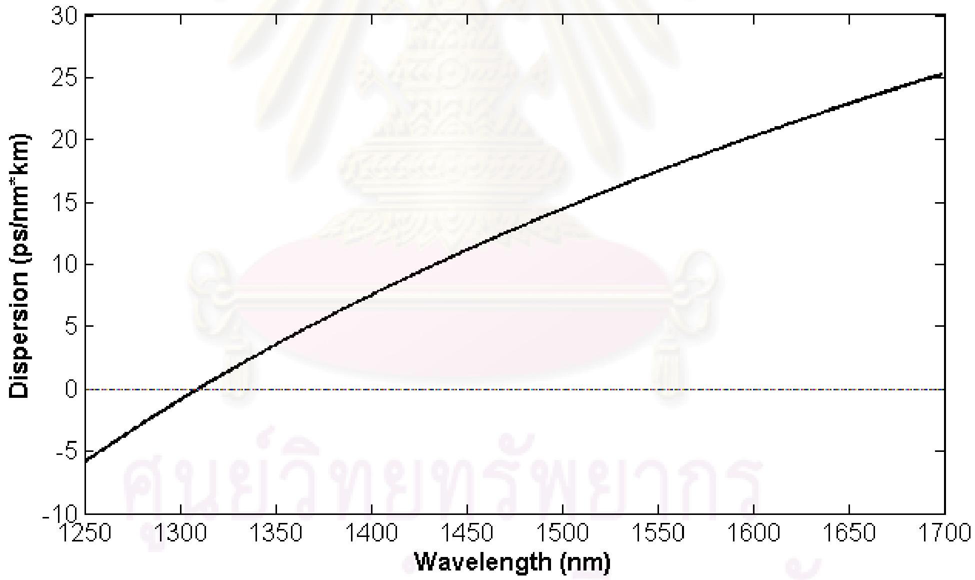
มาตรฐานที่กำหนดคุณลักษณะของเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน คือ มาตรฐาน ITU-T Recommendation G.652 (standard single-mode fiber) [20] ซึ่งมาตรฐานของ SMF ที่มี zero-dispersion wavelength เท่ากับ 1310 nm ใช้งานได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm แต่สามารถใช้ได้กับความยาวคลื่นที่ 1550 nm ได้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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 ค่าอัตราการลดทอนกำลังของสัญญาณแสงของเส้นใยแสง G.652.C



รูปที่ 2.10 ค่าดิสเพอร์ชันของสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของเส้นใยแสงชนิด G.652.C

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 μm
	Tolerance	$\pm$0.6 μm
Cladding Diameter	Nominal	125.0 μm
	Tolerance	$\pm$1 μm
Core Concentricity error	Maximum	0.6 μm
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$3 nm	(Note 3)
	Maximum at 1550	0.3 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD	0.5 ps/$\sqrt{km}$
NOTE 1 – According to 6.2, a maximum PMD$_Q$ value on uncabled is specified in order		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

คุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652.D นั้นคล้ายกันกับคุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652.B ที่ใช้สำหรับอัตราการรับส่งข้อมูลที่เร็วขึ้นถึงระดับของ STM-64 เช่น ITU-T Recs G.691 and G.692 หรือ STM-256 สำหรับบางแอปพลิเคชั่นใน 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 μm
	Tolerance	$\pm$0.6 μm
Cladding Diameter	Nominal	125.0 μm
	Tolerance	$\pm$1 μm
Core Concentricity error	Maximum	0.6 μm
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}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 ที่เหนือกว่าเทคโนโลยีที่ใช้สายตีเกลียวคู่ นั่นคือการใช้เส้นใยแสงเป็นสายนำสัญญาณซึ่งมีอัตราสูญเสียกำลังของสัญญาณที่น้อย สามารถรองรับแบนด์วิดท์ได้มากกว่า และไม่มีสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และด้วยประสิทธิภาพของ PON ที่พัฒนาจนสามารถรับส่งข้อมูลได้เร็วถึง 10 Gbps ในระยะทางให้บริการ 20 km จึงคาดว่าโครงข่าย FTTH จะสามารถให้บริการการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงและรองรับแอพพลิเคชันใหม่ๆ ในอนาคตได้ [9],[24]

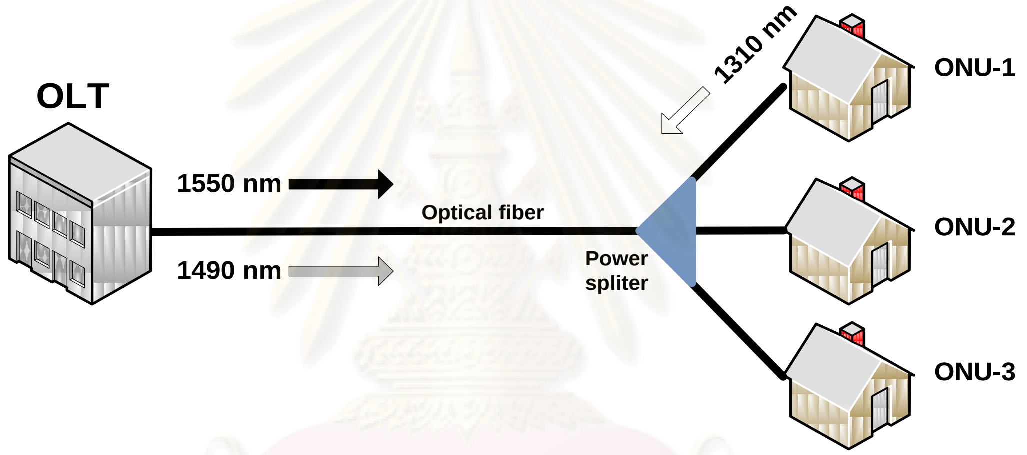
2.4.1 โครงสร้างของ PON

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

optical network unit (ONU) เป็นส่วนที่แปลงสัญญาณแสงกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์ของผู้ใช้บริการ เช่น คอมพิวเตอร์ หรือโทรทัศน์ 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 ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของ 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 สำหรับการส่งข้อมูลแบบดาวน์สตรีม และ 155 Mbps สำหรับการส่งข้อมูลแบบอัพสตรีม 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

แบบดาวน์สตรีมและอัพสตรีม หรือ 2.5 Gbps สำหรับการส่งข้อมูลแบบดาวน์สตรีม และ 1.25 Gbps สำหรับการส่งข้อมูลแบบอัพสตรีม 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 ทั้งการส่งข้อมูลแบบดาวน์สตรีมและอัพสตรีม มี spiltting ratio สูงสุดที่ 1:16 (อาจได้ถึง 1:32) และสามารถให้บริการได้ในระยะทาง 10-20 km

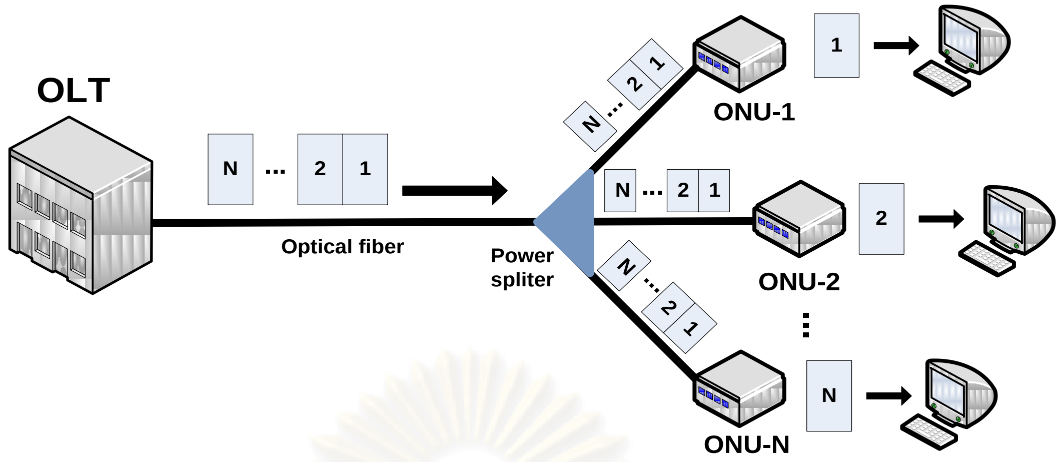
ทั้งนี้ใช้ความยาวคลื่น 1490±10 nm สำหรับทราฟฟิกแบบดาวน์สตรีมและ 1310±50 nm สำหรับทราฟฟิกแบบอัพสตรีม ทั้งนี้ใช้ความยาวคลื่น 1555±5 nm ในการส่งสัญญาณวีดีโอและโทรทัศน์

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

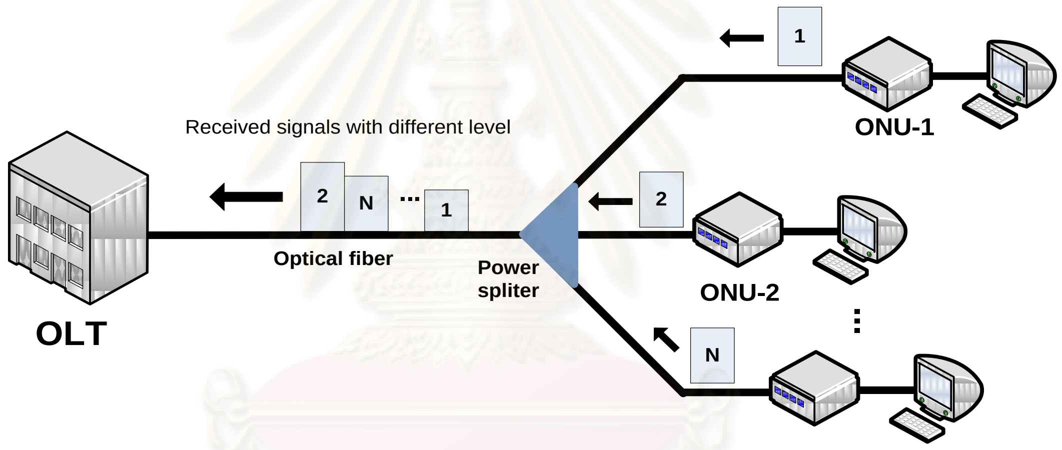
2.4.3 หลักการทำงานเบื้องต้น

สำหรับการส่งข้อมูลแบบดาวน์สตรีม OLT จะส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสง และข้อมูลดังกล่าวจะถูกกระจาย (broadcast) ที่ spliter ไปยัง ONU ทุกตัว โดยกำลังของสัญญาณแสงจะถูกแบ่งให้กับผู้ใช้บริการที่แต่ละ ONU จำนวน N ราย รูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ส่งมาจาก OLT จะถูกส่งไปยัง ONU ทุกตัว ในขณะที่แต่ละ ONU จะสามารถรับข้อมูลที่มีการระบุ address ถึง ONU ตัวนั้นเท่านั้น สำหรับข้อมูลอื่นๆที่มีการระบุ address ไม่ตรงกันก็จะถูกกำจัดทิ้งไป

สำหรับการส่งข้อมูลแบบอัพสตรีม ONU แต่ละตัวจะติดต่อสื่อสารกับ OLT เพียงตัวเดียว เพื่อให้ OLT ทำการจัดสรรช่องสัญญาณให้แต่ละ ONU ใช้ในการส่งข้อมูล ซึ่งการใช้ช่องสัญญาณดังกล่าวเป็นการเข้าถึงแบบแบ่งเวลา (TDMA) โดยที่แต่ละ ONU จะได้รับการจัดสรรช่วงเวลาในการส่งข้อมูลที่ต่างกัน ทำให้ข้อมูลของแต่ละ ONU ไม่เกิดการชนกัน รูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ส่งจาก ONU แต่ละตัวจะได้รับการจัดสรรช่วงในเวลาในการส่งที่ต่างกัน และที่ OLT ก็มีการออกแบบระบบให้สามารถรับสัญญาณที่มีกำลังของสัญญาณที่ไม่เท่ากันอันเนื่องมาจากระยะห่างระหว่าง 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

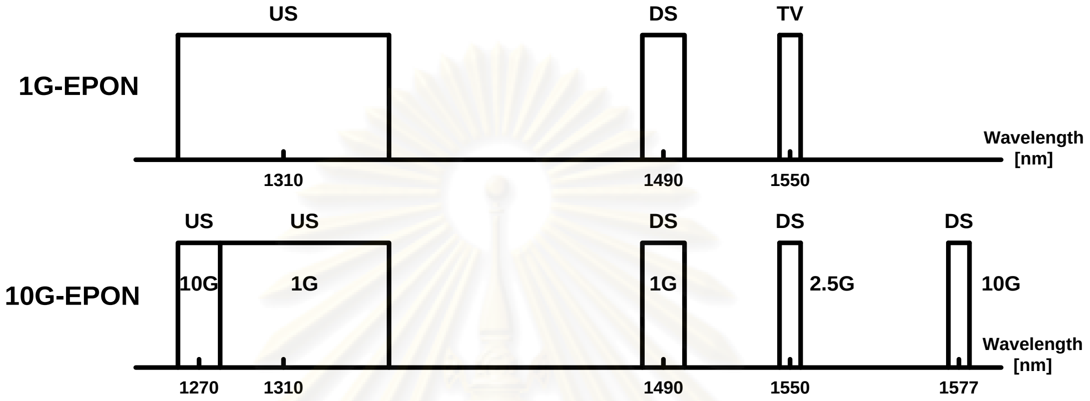
class	link power budget (dB)
A	20
B	25
C	30

2.4.5 มาตรฐาน 10G-EPON

มาตรฐาน 10G-EPON หรือ IEEE802.3av เป็นมาตรฐานที่ได้รับการพัฒนาจาก EPON (หรือ 1G-EPON) ให้สามารถส่งข้อมูลทั้งแบบดาวน์สตรีมและอัพสตรีมได้เร็วยิ่งขึ้นด้วยอัตราบิต 10 Gbps หรือส่งข้อมูลแบบดาวน์สตรีมด้วยอัตราบิต 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

การส่งข้อมูลแบบดาวน์สตรีมความเร็ว 1.25 Gbps จะใช้ความยาวคลื่น 1,490 nm การส่งข้อมูลแบบดาวน์สตรีมความเร็ว 2.5 Gbps จะใช้ความยาวคลื่น 1,550 nm และการส่งข้อมูลแบบดาวน์สตรีมความเร็ว 10 Gbps จะใช้ความยาวคลื่น 1,577 nm สำหรับการส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมความเร็ว 1.25 Gbps จะใช้ความยาวคลื่น 1,310 nm และการส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมความเร็ว 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 สำหรับการส่งข้อมูลแบบดาวน์สตรีมและอัพสตรีม หรือ PRX10 PRX20 และ PRX30 สำหรับระบบ 10G-EPON ที่มีอัตราบิตสำหรับการส่งข้อมูลแบบดาวน์สตรีมเท่ากับ 10 Gbps และอัตราบิตสำหรับการส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมเท่ากับ 1 Gbps ทั้งนี้ค่า link power budget ของทั้ง 3 class จะต้องมีค่าไม่เกิน 20 24 และ 29 dB ตามลำดับ

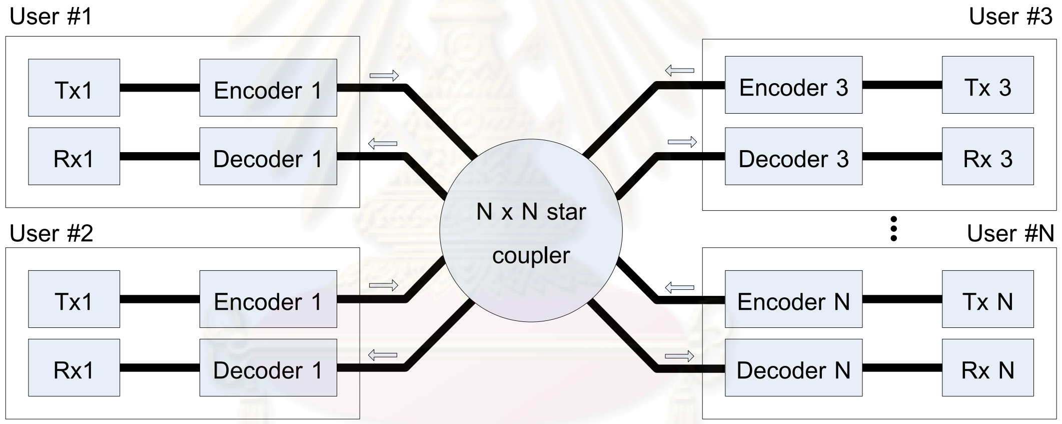
2.5 ระบบซีดีเอ็มเอแสง

ระบบซีดีเอ็มเอแสงหรือ OCDMA เป็นวิธีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสงความยาวคลื่นเดียวกันที่มาจากผู้ใช้บริการ N ราย บนโครงข่ายเดียวกันพร้อมๆกันโดยไม่เกิดการชนกันของข้อมูล เนื่องจากมีการการเข้ารหัสสัญญาณแสงของผู้ใช้บริการแต่ละรายด้วยรหัส (code) ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งรหัสแต่ละชุดดังกล่าวสามารถที่จะดึงข้อมูลของผู้ใช้บริการแต่ละรายกลับคืนมาได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่ข้อมูลของผู้ใช้รายอื่นก็จะถูกกำจัดทิ้งไป ทำให้ผู้ใช้บริการแต่

ละรายสามารถรับส่งข้อมูลได้ตลอดเวลาโดยไม่ต้องมีการแย่งใช้ช่องสัญญาณทางเวลา (access without contention) ส่งผลให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายสามารถใช้แบนด์วิดท์ของตัวเองได้อย่างเต็มที่

2.5.1 โครงสร้างของระบบ OCDMA

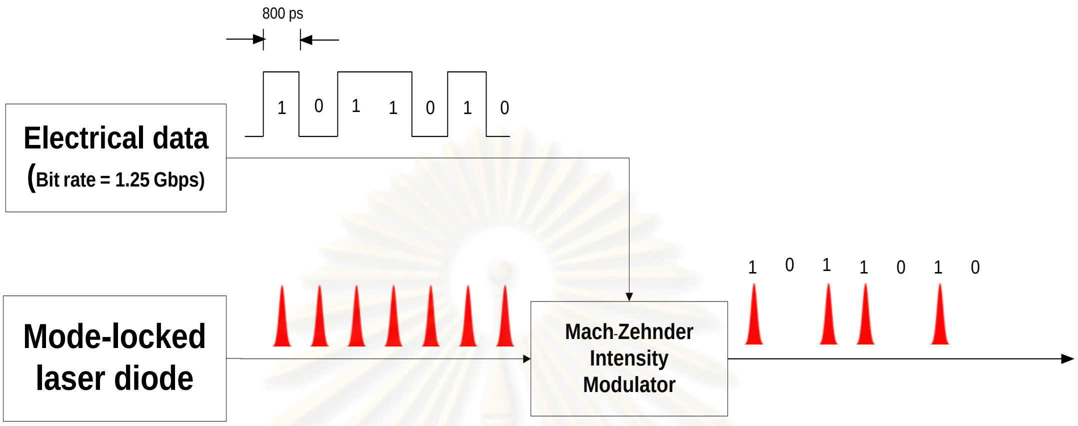
สำหรับโครงสร้างของระบบ OCDMA อย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.15 ผู้ใช้บริการจำนวน N รายจะมีตัวส่งสัญญาณแสงตัวที่ใช้ความยาวคลื่นเดียวกัน ซึ่งสัญญาณแสงที่ออกจากตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวจะถูกเข้ารหัสทางแสงด้วย encoder ที่มีรหัส (code) ที่แตกต่างกันออกไป จากนั้นสัญญาณแสงจะถูกรวมเข้าด้วยกันและแบ่งพลังงานแสงไปยังผู้ใช้บริการแต่ละรายด้วย $N \times N$ star spliter โดยที่ผู้ใช้บริการแต่ละรายจะมี decoder ที่สามารถถอดรหัสสัญญาณแสงเพื่อดึงข้อมูลของตัวเองกลับมาได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่ข้อมูลของผู้ใช้บริการรายอื่นก็จะถูกกำจัดทิ้งไป



รูปที่ 2.15 ระบบ OCDMA อย่างง่าย

สำหรับตัวส่งสัญญาณแสงแต่ละตัวนั้น จะใช้โหมดล็อคเลเซอร์ไดโอด (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” จะแสดงด้วยพัลส์แสงที่แคบมากๆในช่วงคาบของบิตนั้นๆ ในขณะที่บิต “0” ก็จะไม่มีพัลส์แสงในช่วงคาบของบิตดังกล่าว ซึ่งสัญญาณแสงที่ถูกมอดูเลตแล้วก็จะถูกเข้ารหัสทางแสงในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2.16 การมอดูเลตสัญญาณแสงเข้ากับสัญญาณไฟฟ้าที่ตัวส่งสัญญาณของระบบ OCDMA

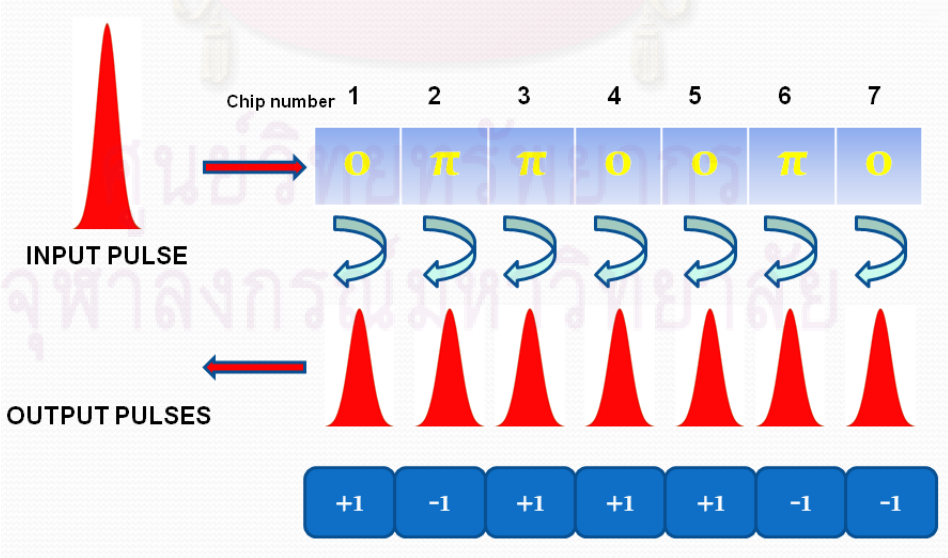
2.5.2 **วิธีการเข้ารหัสและการถอดรหัส** (En/decoding scheme)

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 ที่มีค่าดัชนีหักเหของการมอดูเลชั่น (refractive index modulation) เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และมีโครงสร้างของดัชนีหักเหของการมอดูเลชั่น (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] เมื่อส่งสัญญาณแสงเป็นพัลส์ที่แคบมากๆ (ultra short optical pulse) 1 ลูกเข้าไปใน encoder ที่มีจำนวนชิปเท่ากับ N สัญญาณที่ออกจาก encoder จะเป็นพัลส์จำนวน N ลูกเรียงออกมาอย่างต่อเนื่องกัน โดยที่พัลส์แต่ละลูกจะมีเฟสที่ถูกเปลี่ยนแปลงไปตามลำดับการเลื่อนเฟสใน encoder

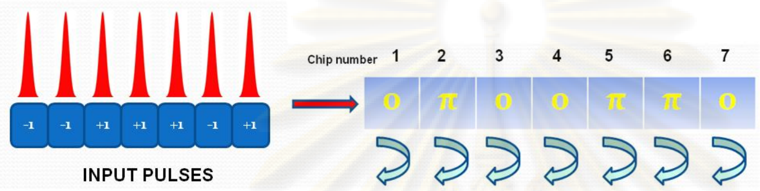
รูปที่ 2.17 แสดงวิธีการ encode สัญญาณแสงด้วยวิธี coherent time-spreading โดยใช้ SSFBG เป็น encoder กล่าวคือสัญญาณแสงขาเข้าเป็นพัลส์ที่แคบมากจะถูกส่งมายัง encoder ที่มีจำนวนชิปเท่ากับ 7 และมีลำดับการเลื่อนเฟสเป็นไปตาม gold code ที่มีความยาวเท่ากับ 7 เช่นเดียวกัน โดยลำดับของการเลื่อนเฟสคือ $0\pi\pi\pi\ 00\pi$ ตามลำดับ

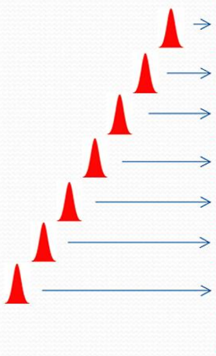
เมื่อสัญญาณแสงเดินทางมายังชิปที่ 1 เฟสของสัญญาณแสงจะไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากค่าของตัวเลื่อนเฟสในชิปที่ 1 เท่ากับ 0 เรเดียน เมื่อพิจารณาสัญญาณแสงดังกล่าวในเชิงแอมพลิจูดของสัญญาณแสงดังกล่าวจะมีแอมพลิจูดเป็นบวก (+1) ซึ่งกำลังของสัญญาณส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนออกมาในขณะที่กำลังของสัญญาณส่วนที่เหลือจะผ่านไปยังชิปที่สอง 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



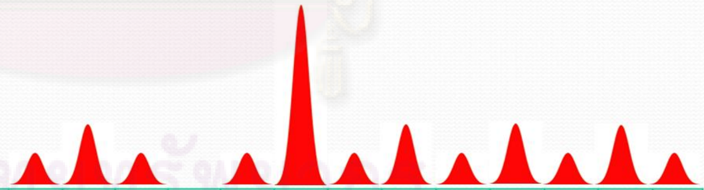
รูปที่ 2.17 การ encode สัญญาณแสงด้วยวิธี coherent time-spreading

สำหรับการ decode สัญญาณแสงนั้นอาศัยกระบวนการ match-filtering โดยใช้ decoder ที่มีรหัสที่สัมพันธ์กันกับรหัสของ encoder นั่นคือลำดับของการเลื่อนเฟสของสัญญาณของ decoder จะตรงกันข้ามกับลำดับของการเลื่อนเฟสของ encoder [37] เช่น encoder มีลำดับการเลื่อนเฟสเป็น $\pi 0 \pi \pi$ ดังนั้น decoder จะต้องมีลำดับการเลื่อนเฟสเป็น $\pi \pi 0 \pi$ จึงจะทำให้ decoder สามารถ recover สัญญาณแสงที่ถูกแผ่ออกทางเวลากลับมาได้เหมือนเดิม 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





Input chip 1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1						
Input chip 2		-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1					
Input chip 3			+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1				
Input chip 4				+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1			
Input chip 5					+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1		
Input chip 6						-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	
Input chip 7							-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1
Sum of optical pulse	+1	-2	1	0	+1	-6	-1	+2	+1	-2	1	+2	1



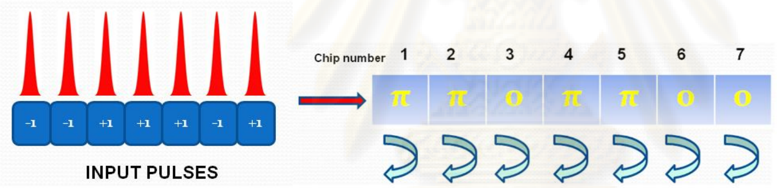
Sum of optical pulse	1	2	1	0	1	6	1	2	1	2	1	2	1

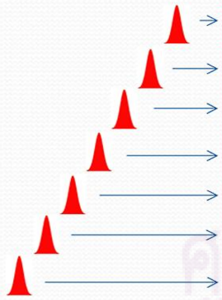
รูปที่ 2.18 การ decode สัญญาณแสงด้วย decoder ที่มีรหัสที่สัมพันธ์กันกับรหัสของ encoder

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

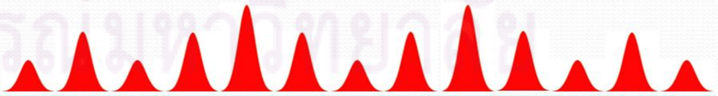
กระบวนการดังกล่าวแล้ว ผลรวมของสัญญาณแสงในเชิงแอมพลิจูดและเชิงความเข้มแสงดังแสดงในรูปที่ 2.18 กล่าวคือ จะเกิดพัลส์ที่มีกำลังของสัญญาณที่สูงที่มีลักษณะคล้ายสัญญาณแสงก่อนการ encode เนื่องมาจากสัญญาณแสงที่ถูกแผ่ออกในทางเวลาที่ encoder นั้นถูกแผ่กลับอย่างถูกต้องโดย decoder ที่มีรหัสที่สัมพันธ์กับ encoder เรียกพัลส์ที่ถูกแผ่กลับอย่างถูกต้องว่า ดังกล่าวว่า auto-correlation peak (ACP) ทั้งนี้เมื่อใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปมากขึ้น จะยิ่งทำให้ ACP ที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณแสงก่อนการ encode

เมื่อเปลี่ยนรหัสของ decoder เป็น $\pi\pi 0\pi\pi 00$ ซึ่งมีลำดับการเลื่อนเฟสที่ไม่สัมพันธ์กันกับรหัสของ encoder (ลำดับไม่ตรงกันข้ามกัน) รูปที่ 2.19 แสดงผลลัพธ์ของการ decode สัญญาณแสงด้วย decoder ที่มีลำดับการเลื่อนเฟสเป็น $\pi\pi 0\pi\pi 00$ กล่าวคือ พัลส์ที่เกิดจากผลรวมของการสะท้อนกลับที่ชิปทั้ง 7 ของ decoder จะมีกำลังของสัญญาณที่ต่ำตลอด เนื่องจาก decoder ไม่สามารถแผ่กลับสัญญาณแสงดังกล่าวให้เหมือนเดิมได้เนื่องจากมีรหัสที่ไม่สัมพันธ์กันกับ encoder เรียกพัลส์ที่เกิดจากการแผ่กลับอย่างไม่ถูกต้องว่า cross-correlation peak (CCP) ทั้งนี้เมื่อใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปมากขึ้น ก็จะทำให้ CCP ที่ได้มีค่าน้อยลง





Input chip 1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1						
Input chip 2		+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1					
Input chip 3			-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1				
Input chip 4				-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1			
Input chip 5					-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1		
Input chip 6						+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	
Input chip 7							+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
Sum of optical pulse	-1	+2	-1	-2	+3	+2	+1	-2	+3	+2	-1	-2	-1



Sum of optical pulse	1	2	1	2	3	2	1	2	3	2	1	2	1

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)

$$N_{chip} = 2^{L} - 1 \tag{2.12}$$

โดย L คือจำนวนชิฟท์รีจิสเตอร์ที่ใช้ในการสร้าง 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 ลูกเรียงกันออกมาตามลำดับในช่วงเวลา 1 บิต เมื่อส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูลเท่ากับ 1.25 Gbps ก็จะมีพัลส์เรียงกันออกไปเท่ากับ 511×1.25 = 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

การจัดการดิสเพอร์ชันทำได้โดยการนำเอาเส้นใยแสงที่ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อนชดเชยค่าดิสเพอร์ชันและทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามสมการ (2.13)

$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \tag{2.13}$$

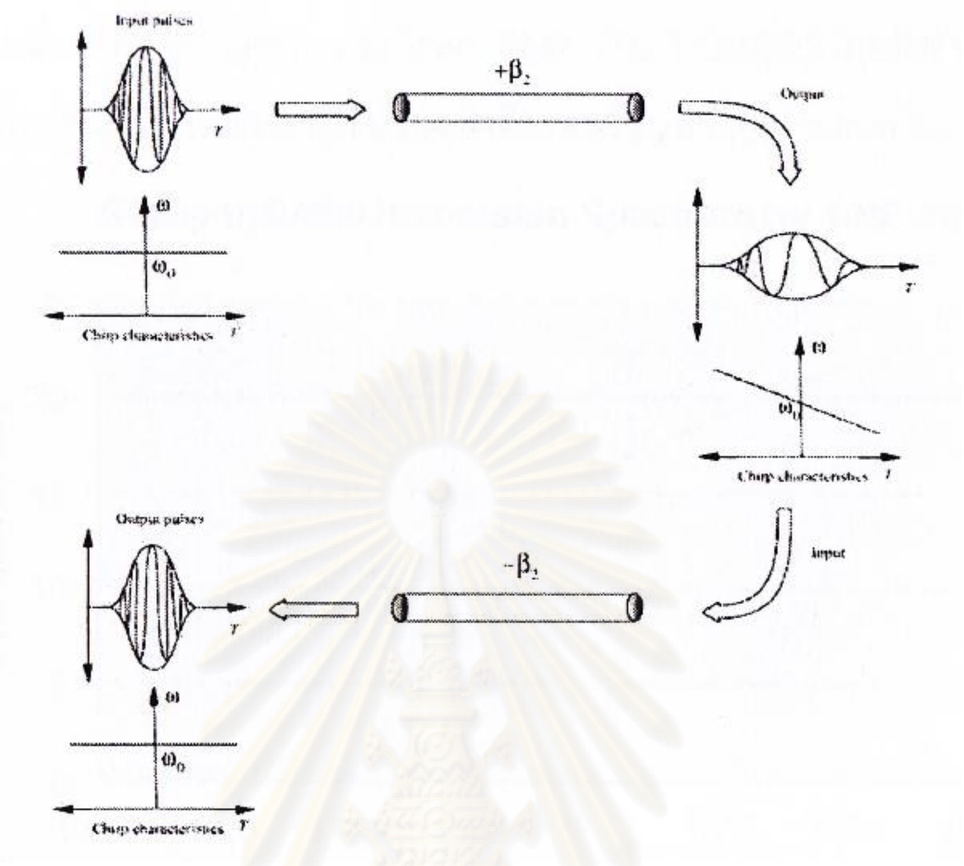
โดย D_1 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [ps/nm·km]

D_2 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [ps/nm·km]

L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [km]

L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [km]

เทคนิดการขจัดความเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากดิสเพอร์ชันด้วยเทคนิดการจัดการดิสเพอร์ชั่นเป็นดังรูปที่ 2.20 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี D_1 ที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชันด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า D_2 ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการชดเชยดิสเพอร์ชัน ส่งผลให้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้

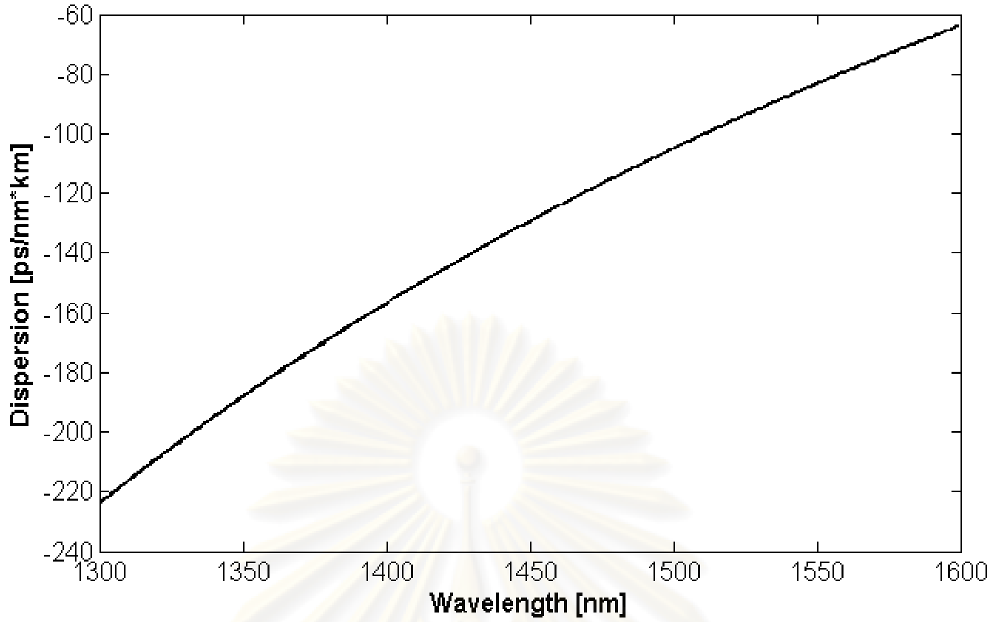


รูปที่ 2.20 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชัน

2.6.1 ประเภทของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชั่นที่ใช้กันทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิดคือ

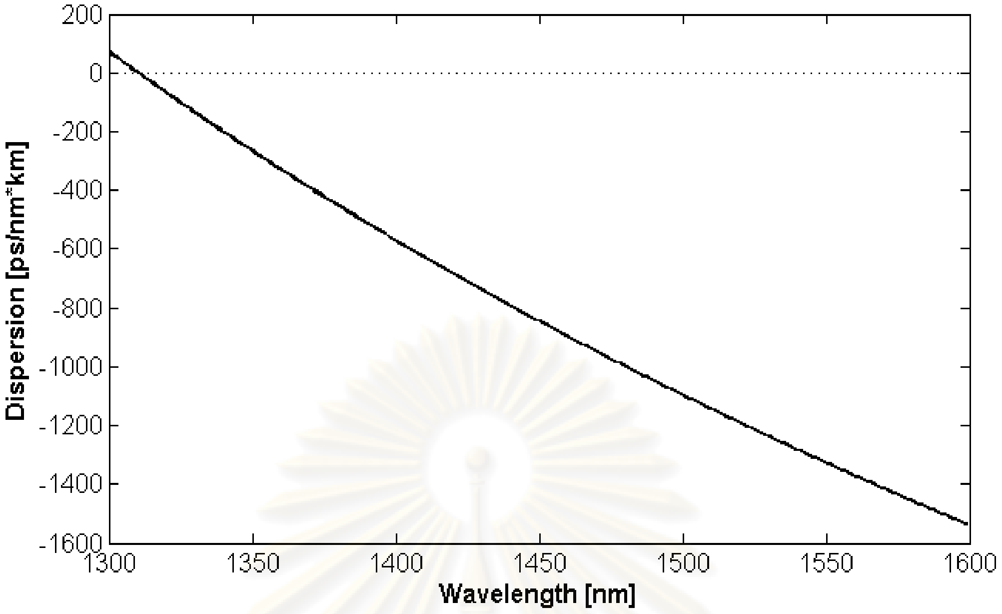
1) เส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชันแบบไม่ชดเชยความชันของดิสเพอร์ชัน (Non-slope compensated dispersion compensating fiber: NSC-DCF) เป็นเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันเป็นลบ แต่มีค่าความชันของดิสเพอร์ชันเป็นบวก กล่าวคือค่าดิสเพอร์ชันจะเป็นจำนวนลบที่น้อยลงเรื่อยๆเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.21 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%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.22 ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SC-DCF

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

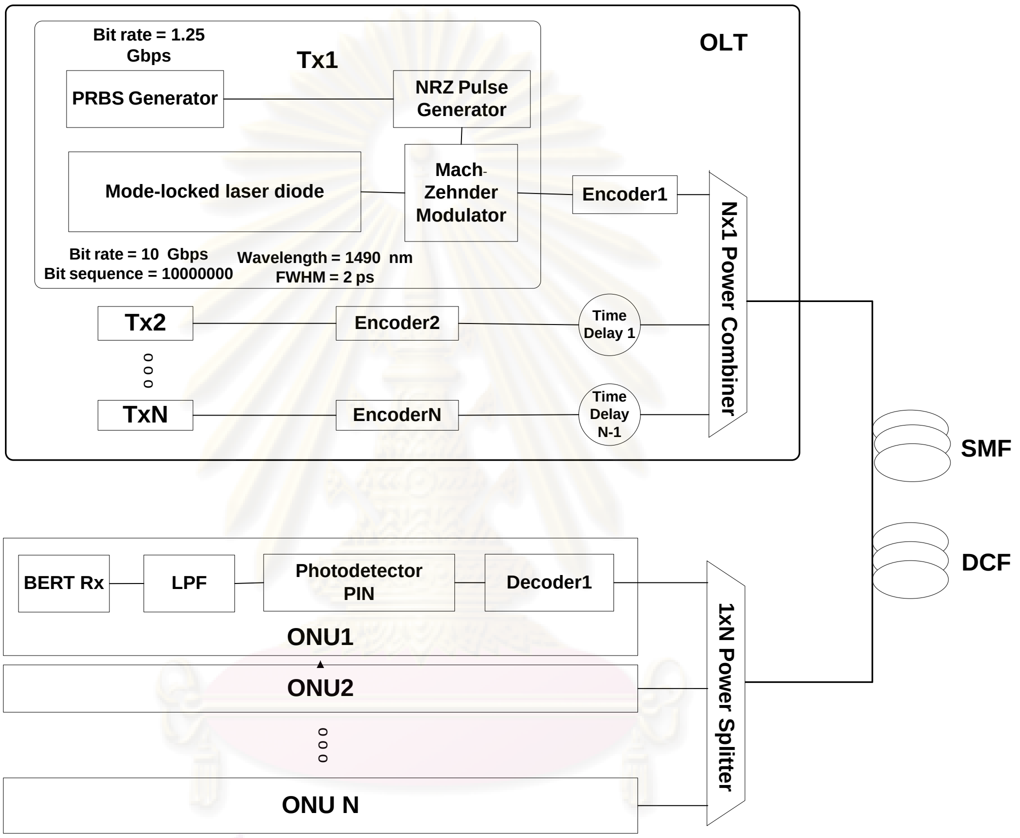
การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของระบบ OCDMA-PON

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงลักษณะโครงสร้างของระบบ OCDMA และได้อธิบายถึงการเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณแสงด้วยวิธี TS-OCDMA ด้วย SSFBG สำหรับเนื้อหาในบทที่ 3 จะอธิบายถึงวิธีการคำนวณต่า BER ของระบบ OCDMA และวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในเชิงทฤษฎีที่ส่งผลต่อค่า BER ของระบบ รวมไปถึงแนวทางในการออกแบบระบบ OCDMA ให้สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการและค่า BER ให้ได้ตามที่ต้องการ

3.1 การหาค่า BER ของระบบ OCDMA

ระบบ OCDMA-PON ที่นำเสนอและจะวิเคราะห์นั้นแสดงดังรูปที่ 3.1 ระบบดังกล่าวมีจำนวนผู้ใช้บริการจำนวน N ราย โดยที่ OLT จะประกอบไปด้วยตัวส่งสัญญาณ N ตัวและ encoder N ตัว ซึ่งภายในตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวประกอบไปด้วย MLLD ที่สร้างพัลส์แสงความยาวคลื่น 1,490 nm มีขนาดของความกว้างพัลส์ full-width half maximum (FWHM) เท่ากับ 1.56 ps และอัตราการสร้างพัลส์แสงเท่ากับ 1.25 GHz ซึ่งจะถูกมอดูเลตแบบความเข้มแสงเข้ากับสัญญาณไฟฟ้า NRZ แบบ pseudo random ที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps ใช้ SSFBG encoder แบบ coherent time-spreading ที่ใช้ gold code จำนวน 511 ชิป จากนั้นสัญญาณแสงของผู้ใช้บริการทั้ง N รายที่ถูก encode เรียบร้อยแล้วจะถูกหน่วงเวลาด้วยเวลาที่แตกต่างกันเพื่อให้ลักษณะการส่งสัญญาณของผู้ใช้บริการแต่ละรายเป็นแบบไม่ซิงโครนัสจากนั้น $N \times 1$ power combiner จะรวมสัญญาณแสงทั้งหมดเข้าด้วยกันและส่งผ่านไปยังเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวความยาว 20 km ที่มีค่าคงตัวของการลดทอนของเส้นใยแสงเท่ากับ 0.2 dB/km ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ 13.79 ps/nm$\cdot$km ค่าความชันดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ 0.0642 ps/nm$\cdot$km^2 และเส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยความชันดิสเพอร์ชันความยาว 263.09 m ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ -1,048.56 ps/nm$\times$km ค่าความชันดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ -4.8825 ps/nm$\times$km^2 หลังจากนั้นสัญญาณแสงก็จะถูกแบ่งพลังงานด้วย $1 \times N$ 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)



รูปที่ 3.1 ระบบ OCDMA-PON ที่มีผู้ใช้บริการจำนวน N ราย

สำหรับการวัดคุณภาพของสัญญาณ จะใช้ค่าอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) เป็นตัววัดคุณภาพของสัญญาณ โดยค่า BER เป็นค่าที่บ่งบอกอัตราความผิดพลาดในการส่งสัญญาณ หาได้จากการนับจำนวนบิตที่ส่งผิดพลาดต่อบิตที่ส่งทั้งหมด ซึ่งในความเป็นจริงนั้นเป็นเรื่องยากในการนับจำนวนบิตที่ผิดพลาด จึงได้มีการประมาณค่า BER ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$BER=\frac{1}{2}\left[1-erf\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)\right] \tag{3.1}$$

โดย Q คือ ตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \tag{3.2}$$

โดย μ_1 คือค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณบิต “1”

μ_0 คือค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณบิต “0”

σ_1 คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มของสัญญาณที่บริเวณระดับของบิต “1”

σ_0 คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มของสัญญาณที่บริเวณระดับของบิต “0”

โดยค่า BER ที่ยอมรับได้สำหรับแบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-9} [35]

สำหรับการส่งสัญญาณ OCDMA ด้วยวิธี time-spreading สามารถคำนวณค่า BER ได้จากสมการที่ (3.3) [18]

$$BER(m) = \Pr(0)_{chip} Pe(1|0)(m) + \Pr(1)_{chip} + Pe(0|1)(m) \tag{3.3}$$

โดย m คือ จำนวนของสัญญาณรบกวนที่มาจากผู้ใช้บริการรายอื่น (interference user) มีค่าเท่ากับ $N-1$

$\Pr(0)_{chip}$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งชิป “0”

$\Pr(1)_{chip}$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งชิป “1”

$Pe(1|0)(m)$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งชิป “0” ผิดพลาด เมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ m

$Pe(0|1)(m)$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งชิป “1” ผิดพลาด เมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ m

ทั้งนี้ค่าของ $\Pr(0)_{chip}$ และ $\Pr(1)_{chip}$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ (3.4) และ (3.5)

$$\Pr(0)_{chip} = \Pr(0)_{data} + \Pr(1)_{data}\left(1 - \frac{T_C}{T_{Bit}}\right) \tag{3.4}$$

$$\Pr(1)_{chip} = \Pr(1)_{data}\left(\frac{T_C}{T_{Bit}}\right) \tag{3.5}$$

โดย $\Pr(0)_{data}$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งบิต “0”

$\Pr(1)_{data}$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งบิต “1”

T_C คือ ระยะเวลา 1 คาบของชิป (chip period)

T_{Bit} คือ ระยะเวลา 1 คาบของบิต (bit period)

เมื่อแทนค่า $\Pr(0)_{data}$ และ $\Pr(1)_{data}$] ลงในสมการที่ (3.3) จะได้ว่า

$$BER(m)=\left[\Pr(0)_{data}+\Pr(1)_{data}\left(1-\frac{Tc}{T_{Bit}}\right)\right]Pe(1|0)(m) + \left[\Pr(1)_{data}\left(\frac{T_c}{T_{Bit}}\right)\right]Pe(0|1)(m) \tag{3.6}$$

ซึ่งสามารถลดรูปให้เหลือดังสมการ (3.7)

$$BER(m)=\frac{1}{2}\left[\left(2-\frac{T_C}{T_{Bit}}\right)Pe(1|0)(m)+\frac{T_C}{T_{Bit}}Pe(0|1)(m)\right] \tag{3.7}$$

โดยค่า $Pe(1|0)(m)$ และ $Pe(0|1)(m)$ หาได้จากการประมาณค่าจากสมการ (3.8) และ (3.9)

$$Pe(1|0)(m)=\frac{1}{2}erfc\left[\frac{P_d(D-m\xi)}{\sqrt{2}\sigma_{0-co}}\right] \tag{3.8}$$

$$Pe(0|1)(m)=\frac{1}{2}erfc\left[\frac{P_d(1+m\xi-D)}{\sqrt{2}\sigma_{1-co}}\right] \tag{3.9}$$

โดย D คือ ค่าการตัดสินใจ (decision threshold) มีค่าอยู่ระหว่าง $0<D<1+m\xi$

ξ คือ ค่าไขว้แทรก (crosstalk) เป็นอัตราส่วนระหว่างสัญญาณรบกวนกับ ACP สำหรับ encoder/decoder แบบ SSFBG สามารถประมาณค่าได้จาก

$$\xi=\frac{1}{N_{chip}} \tag{3.10}$$

โดย N_{chip} คือ ความยาวของรหัส gold code หาได้จากสมการที่ (2.12)

P_d คือ กำลังของสัญญาณแสง ACP ในช่วงเวลา T_C

σ^2_{0-co} คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน (noise variance) ของชิป “0” ในการส่งสัญญาณ OCDMA แบบ coherent time-spreading เป็นผลรวมของสัญญาณรบกวนจากการเข้าถึงหลายทิศทาง (multiple access interference: MAI) สัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal noise) และสัญญาณรบกวนเนื่องจากการตีกันของสัญญาณ (beat noise) หาได้จากสมการที่ (3.11)

$$\sigma^2_{0-co}=\sigma^2_{MAI}+\sigma^2_{th}+\sigma^2_{beat-0} \tag{3.11}$$

โดย σ^2_{MAI} คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนจากการเข้าถึงหลายทิศทาง แปรผันตรงกับจำนวน interference user ที่มาจากผู้ใช้บริการรายอื่นๆในระบบ หาได้จาก

$$\sigma^2_{MAI}=m\sigma^2_{MAI-0} \tag{3.12}$$

โดย σ^2_{MAI-0} คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนแบบเดี่ยว (single interference signal) สำหรับ encoder แบบ SSFBG ที่ใช้ gold code ความยาว 2^L-1 จะหาค่าได้จาก

$$\sigma^2_{MAI-0} = \frac{2^{2L}+2^{(L+2)}}{(2^L-1)^4} \tag{3.13}$$

σ^2_{th} คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ หาได้จาก

$$\sigma^2_{th} = B_R\left(\frac{4k_BT}{R_L}\right) \tag{3.14}$$

โดย B_R คือ ค่าแบนด์วิดท์ของตัวรับสัญญาณแสง (receiver bandwidth)

k_B คือ ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} [JK^{-1}]

T คือ อุณหภูมิ [K]

R_L คือ ค่าความต้านทานของโหลด

σ^2_{beat-0} คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากการตีกันของสัญญาณของชิป “0” เกิดจากกระบวนการ square-law detection ของตัวรับสัญญาณแสงเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีค่า coherence time ยาวนานกว่าระยะเวลาของชิปหาได้จาก

$$\sigma^2_{beat-0} = m(m-1)\xi^2P_d^2 \tag{3.15}$$

σ^2_{1-co} คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน (noise variance) ของชิป “1” ในการส่งสัญญาณ OCDMA แบบ coherent time-spreading เป็นผลรวมของสัญญาณรบกวนเนื่องจากการตีกันของสัญญาณ (beat noise) สัญญาณรบกวนจากการเข้าถึงหลายทิศทาง (multiple access interference: MAI) สัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal noise) และสัญญาณรบกวนกระแสช็อท (shot noise)หาได้จากสมการที่ (3.16)

$$\sigma^2_{1-co} = \sigma^2_{beat-1}+\sigma^2_{MAI}+\sigma^2_{th}+\sigma^2_{1-sh} \tag{3.16}$$

โดย σ^2_{beat-1} คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากการตีกันของสัญญาณของชิป “1” หาได้จาก

$$\sigma^2_{beat-1} = 2m\xi P_d^2 \tag{3.17}$$

σ^2_{1-sh} คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนช็อท (variance of shot noise) หมายถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการกำเนิดและการสะสมประจุอิเล็กตรอนเมื่อมีสัญญาณแสงมาตกกระทบที่ตัวรับสัญญาณแสง หาได้จาก

$$\sigma^2_{1-sh} = 2eB_R\Re P_d\,(1+m\xi) \tag{3.18}$$

โดย $\Re$ คือ ค่าประสิทธิภาพในการแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าของตัวรับสัญญาณแสง (responsivity)

e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน

ดังนั้นเมื่อนำค่าของ σ_{0-co}^2 จากสมการที่ (3.11) และ σ_{1-co}^2 จากสมการที่ (3.16) ไปแทนค่าใน (3.8) และ (3.9) จะทำให้ทราบค่าของ $Pe(1|0)(m)$ $Pe(0|1)(m)$ ทำให้สามารถคำนวณ $BER(m)$ ได้ในที่สุด อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการประมาณค่าของ beat noise ให้ถูกต้องยิ่งขึ้น ค่าของ σ_{1-co}^2 จะคิดผลของ beat noise เมื่อ m มีค่ามากพอ ซึ่งกำหนดด้วยสมการ

$$\sigma_{1-m}^2 = \begin{cases} \sigma_{1-co}^2 = \sigma_{beat-1}^2 + \sigma_{MAI}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{1-sh}^2, \text{ if } D > 1 + m\xi - 2m\sqrt{\xi} \\ \sigma_{1-in}^2 = \sigma_{MAI}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{1-sh}^2, \text{ others} \end{cases} \tag{3.19}$$

โดย σ_{1-in}^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน (noise variance) ของชิป “1” ในการส่งสัญญาณ OCDMA แบบ incoherent time-spreading เป็นผลรวมของสัญญาณรบกวนจากการเข้าถึงหลายทิศทาง(multiple access interference: MAI) สัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal noise) และสัญญาณรบกวนกระแสช็อท (shot noise) หาได้จาก

$$\sigma_{1-in}^2 = \sigma_{MAI}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{1-sh}^2 \tag{3.20}$$

ค่าของ σ_{1-m}^2 ที่จะนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.21) จะเท่ากับ σ_{1-co}^2 เมื่อค่าของ D ที่กำหนดไว้มีค่ามากกว่าค่าขอบเขตที่หาได้จาก $1 + m\xi - 2m\sqrt{\xi}$ และจะเท่ากับ σ_{1-in}^2 เมื่อค่าของ D มีค่าน้อยกว่าค่าขอบเขตดังกล่าว ทั้งนี้ค่าของ $Pe(0|1)(m)$ หาได้จาก

$$Pe(0|1)(m) = \begin{cases} \dfrac{1}{2}\left\{ \begin{array}{c} erfc\left[\dfrac{P_d(1 + m\xi - D)}{\sqrt{2}\sigma_{1-co}}\right] + erfc\left[\dfrac{2m\sqrt{\xi}P_d}{\sqrt{2}\sigma_{1-in}}\right] \\ - erfc\left[\dfrac{2m\sqrt{\xi}P_d}{\sqrt{2}\sigma_{1-co}}\right] \end{array} \right\} \\ \text{;if } D > 1 + m\xi - 2m\sqrt{\xi} \\ \dfrac{1}{2}erfc\left[\dfrac{P_d(1 + m\xi - D)}{\sqrt{2}\sigma_{1-in}}\right] \quad ; \text{ others.} \end{cases} \tag{3.21}$$

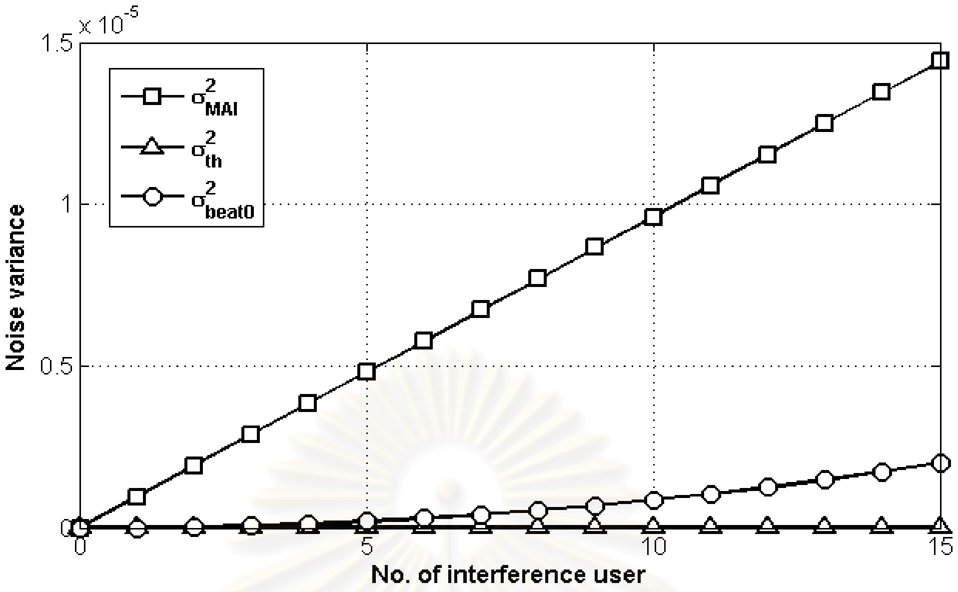
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 การวิเคราะห์ BER เนื่องจากสัญญาณรบกวนของการส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON

ในหัวข้อที่ 3.1 ได้นำเสนอการหาค่า BER โดยคำนวณจากค่าสัญญาณรบกวนประเภทต่างๆภายในระบบ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์แต่ละตัวว่าจะส่งผลต่อค่า BER ของระบบอย่างไร ซึ่งจะนำไปสู่แนวทางการออกแบบระบบ OCDMA-PON ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

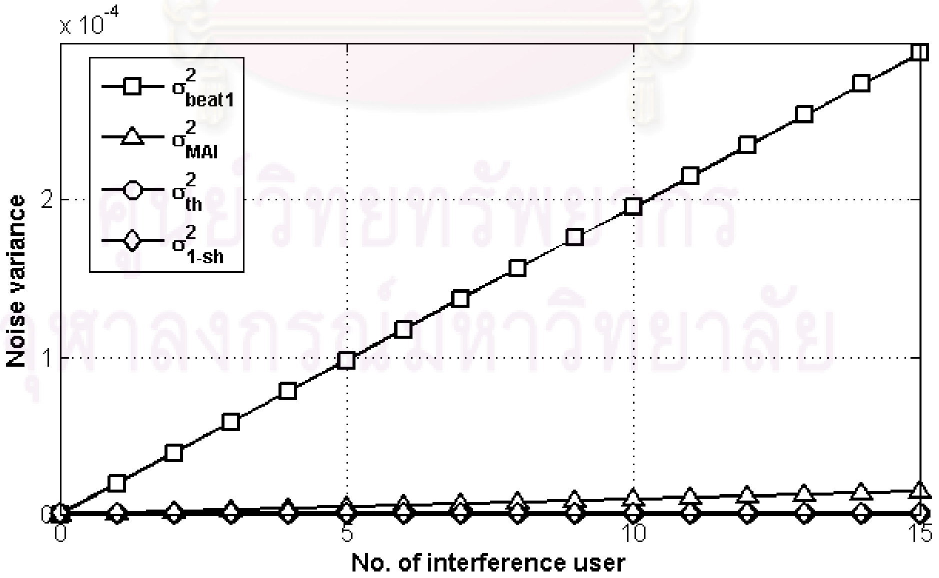
3.2.1 การวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทในระบบ OCDMA-PON

ในการวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้ จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ N = 16 ราย จำนวนชิปของ encoder N_{chip} = 511 ชิป ระยะเวลา 1 คาบของชิป T_C = 1.56 ps ระยะเวลา 1 คาบของบิต T_{Bit} = 800 ps แบนด์วิดท์ของเครื่องรับ B_R = 320 GHz ค่าคงที่ของ Boltzman k_B = 1.38×10^{-23} J/K^{-1} อุณหภูมิ T = 300 K ความต้านทานโหลด R_L = 7000 Ω กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับ P_d = -10 dBm ค่าประจุของอิเล็กตรอน e = 1.602×10^{-19} C ค่า responsivity $\Re$ = 1 A/W และค่า decision threshold D = 0.3 โดยรูปที่ 3.2-3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการรายอื่นที่เปรียบเป็นสัญญาณรบกวน (interference user) กับขนาดความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนชนิด σ^2_{0-co} σ^2_{1-co} และ σ^2_{1-in} ตามลำดับ



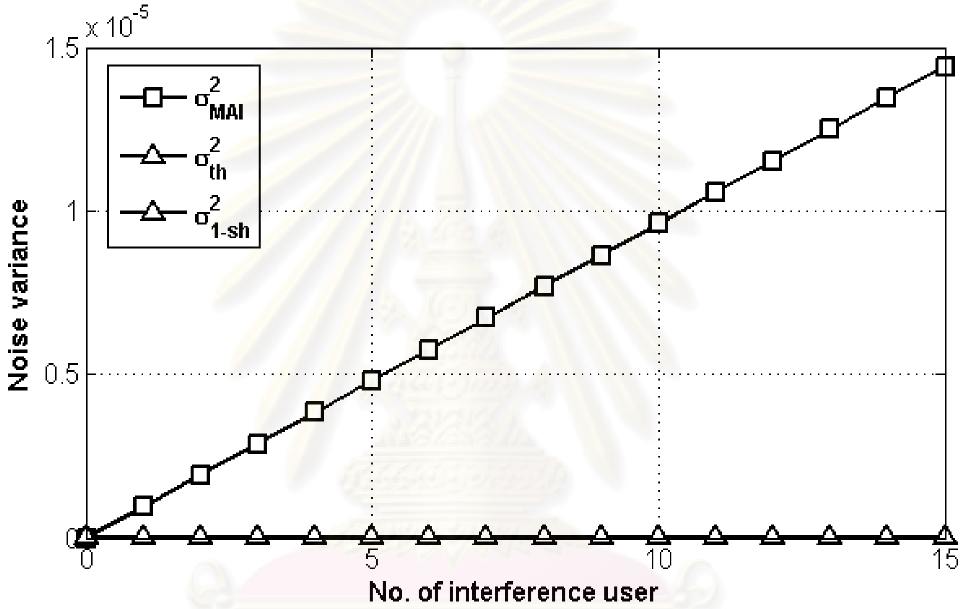
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ^2_{0-co}

รูปที่ 3.2 แสดงปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ^2_{0-co} ดังแสดงในสมการที่ (3.11) โดยสัญญาณรบกวนที่มีค่ามากที่สุดก็คือ σ^2_{MAI} ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวน interference user m ในสมการที่ (3.12) ในสัดส่วนที่มากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่า σ^2_{beat-0} ในขณะที่ค่า σ^2_{th} ไม่แปรผันตามจำนวน interference user m



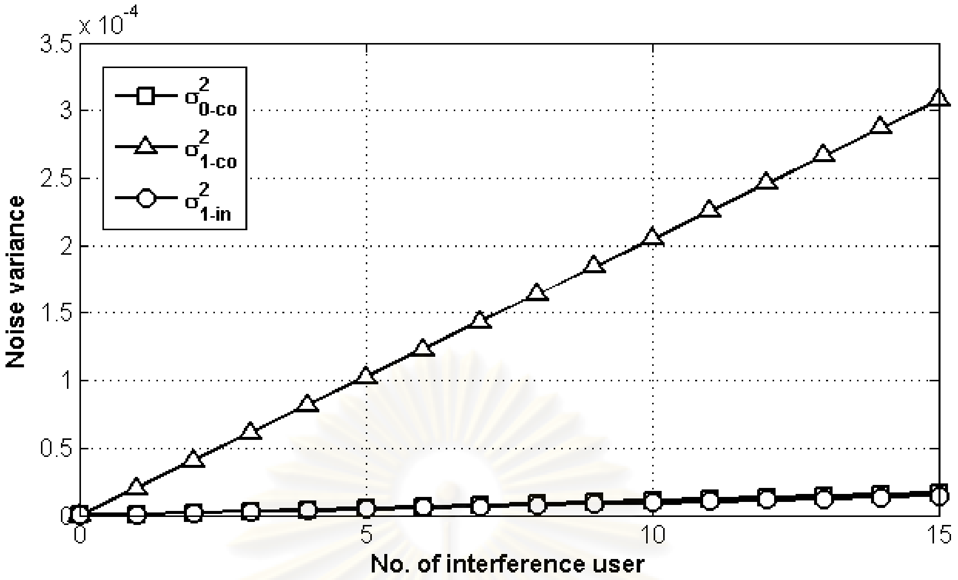
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ^2_{1-co}

รูปที่ 3.3 แสดงปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ^2_{1-co} ดังแสดงในสมการที่ (3.16) โดย σ^2_{beat-1} นั้นมีความรุนแรงของสัญญาณรบกวนมากที่สุด เนื่องจากความแรงของสัญญาณรบกวน σ^2_{beat-1} ดังแสดงในสมการที่ (3.17) แปรผันตามจำนวน interference user m เช่นเดียวกันกับ σ^2_{MAI} แต่ค่าของ crosstalk (ξ)ที่เกิดจาก encoder ที่ใช้จำนวนชิปเท่ากับ 511 ชิปนั้นมีค่าเท่ากับ 1/511=0.020 ในขณะที่ค่าของ σ^2_{MAI} เป็นผลคูณของจำนวน interference user m กับค่า σ^2_{MAI-0} ดังแสดงในสมการที่ (3.12) ซึ่งค่า σ^2_{MAI-0} จาก encoder ตัวเดียวกันมีค่าเท่ากับ 3.87×10^{-6} ซึ่งน้อยกว่าผลจาก ξ ที่เกิดขึ้นใน σ^2_{beat-1}



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ^2_{1-in}

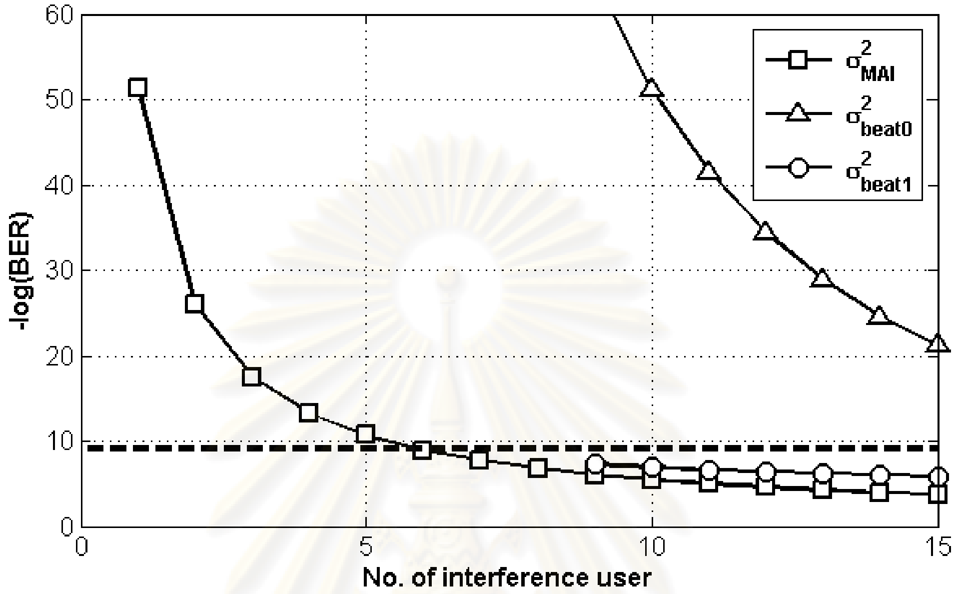
รูปที่ 3.4 แสดงปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ^2_{1-in} แสดงดังสมการที่ (3.20) จะเห็นได้ว่า σ^2_{MAI} มีความรุนแรงของสัญญาณรบกวนมากที่สุด ในขณะที่ σ^2_{1-sh} มีค่าน้อยมากและ σ^2_{th} ก็มีค่าน้อยมากและไม่แปรผันตามจำนวน interference user m



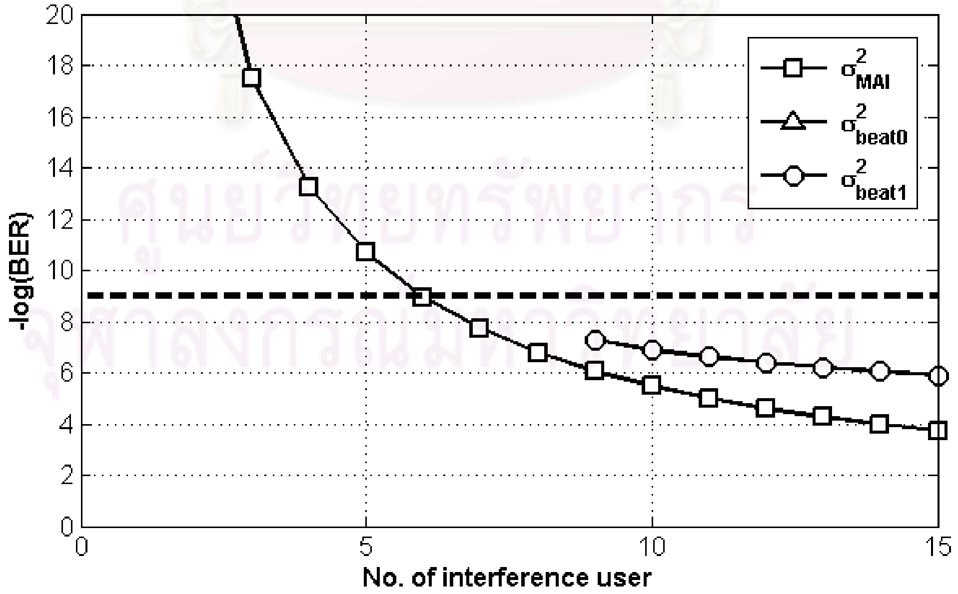
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับสัญญาณรบกวน σ^2_{0-co} σ^2_{1-co} และ σ^2_{1-in}

จากผลที่แสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณรบกวนทั้ง σ^2_{0-co} σ^2_{1-co} และ σ^2_{1-in} ที่จำนวนของ interference user เดียวกัน จะเห็นได้ว่าสัญญาณรบกวนชนิด σ^2_{1-co} มีความรุนแรงมากที่สุด ดังนั้นเมื่อนำสัญญาณรบกวนทั้งสามไปคำนวณในสมการที่ (3.8) และ (3.21) ก็จะสามารถหาค่า BER ได้ อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาค่าของ σ^2_{0-co} σ^2_{1-co} และ σ^2_{1-in} ค่าของสัญญาณรบกวนที่มีผลต่อค่าสัญญาณรบกวนทั้งสามได้แก่ σ^2_{MAI} σ^2_{beat-1} และ σ^2_{beat-0} ในขณะที่ผลของ σ^2_{th} และ σ^2_{1-sh} มีค่าน้อยมาก รูปที่ 3.6 แสดงค่า BER ของระบบเมื่อแยกคิดผลของ σ^2_{MAI} σ^2_{beat-1} และ σ^2_{beat-0} จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาแค่ผลของ σ^2_{beat-0} ทำให้ช่วงที่มีจำนวน interference user เท่ากับ 0-4 ราย ไม่มีความผิดพลาดในการส่งสัญญาณเลย ผลของ σ^2_{beat-0} ที่มีต่อระบบจะเริ่มต้นที่จำนวน interference user มีค่าเท่ากับ 5 เป็นต้นไป เมื่อพิจารณาแค่ผลของ σ^2_{MAI} ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวน interference user น้อยจะทำให้ได้ค่า BER ที่ดี แต่เมื่อเพิ่มจำนวน interference user มากขึ้นจะทำให้ค่า BER ค่อยๆแย่ลง ซึ่งค่า BER ที่คำนวณได้จะมากกว่า 10^{-9} ที่จำนวน interference user เท่ากับ 6 ในขณะที่ผลของ σ^2_{beat-1} จะเริ่มมีผลตั้งแต่จำนวน interference user เท่ากับ 9 เนื่องมาจากค่าของ D จะมีค่ามากกว่าค่าขอบเขต $1+m\xi-2m\sqrt{\xi}$ เมื่อจำนวน interference user มีค่าเท่ากับ 9 ทำให้ σ^2_{1-co} จะเริ่มพิจารณาผลของ σ^2_{beat-1} ตั้งแต่จำนวน

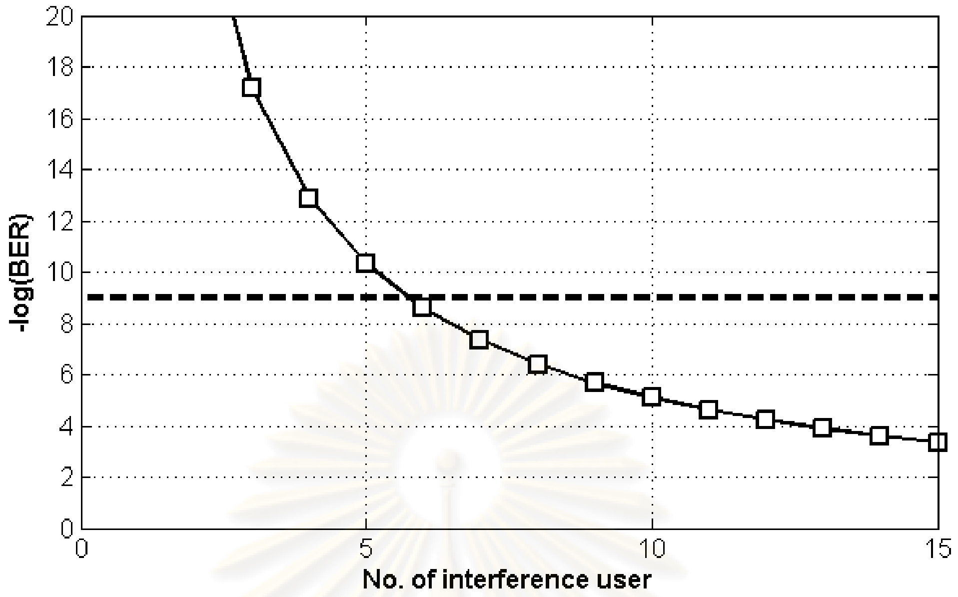
interference user เท่ากับ 9 เป็นต้นไป ดังนั้นเมื่อคิดผลของสัญญาณรบกวนทั้งหมด ทำให้ค่า BER แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-9} จะสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการ N เท่ากับ 7 ราย



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับค่า BER แยกตามประเภทของสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับค่า BER แยกตามประเภทของสัญญาณรบกวน (ขยาย)



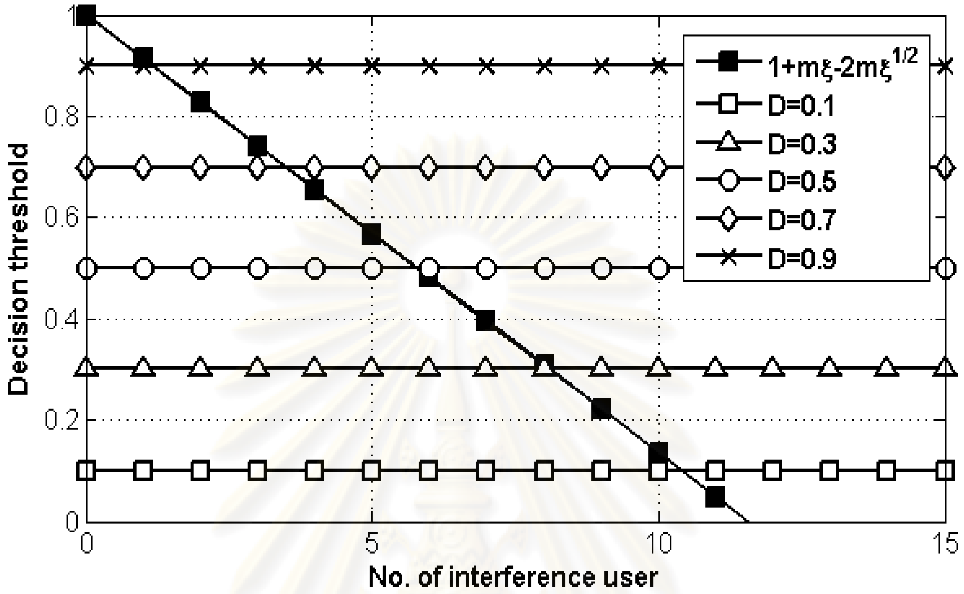
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER เมื่อพิจารณาผลของสัญญาณรบกวนทั้งหมด

3.2.2 **การวิเคราะห์ผลของค่า** decision threshold **ที่ใช้ในระบบ** OCDMA-PON

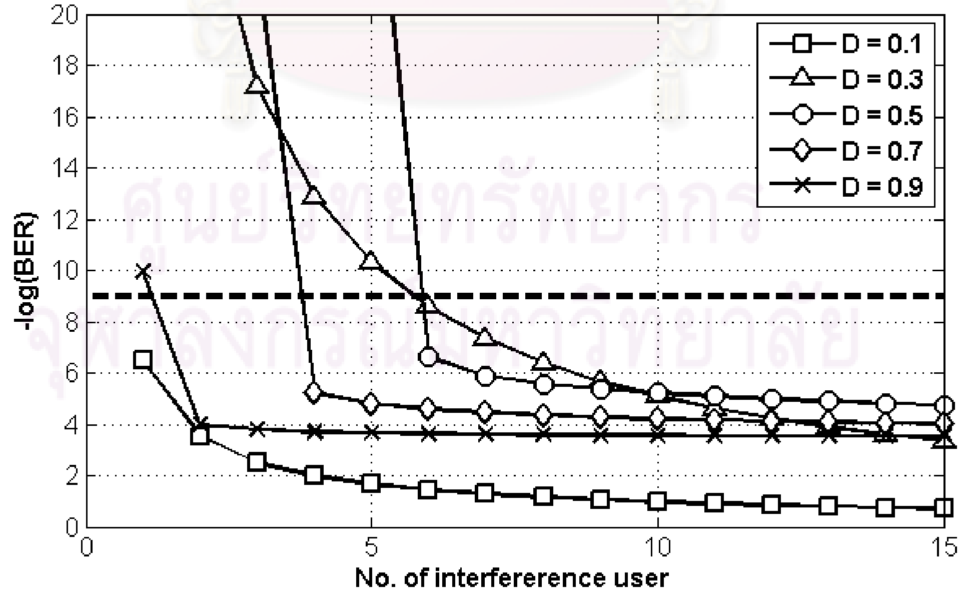
ในการวิเคราะห์ผลของค่า decision threshold D ที่มีต่อระบบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้ จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ N = 16 ราย จำนวนชิปของ encoder N_{chip} = 511 ชิป ระยะเวลา 1 คาบของชิป T_C = 1.56 ps ระยะเวลา 1 คาบของบิต T_{Bit} = 800 ps แบนด์วิดท์ของเครื่องรับ B_R = 320 GHz ค่าคงที่ของโบลทซ์มาน k_B = 1.38×10^{-23} J/K^{-1} อุณหภูมิ T = 300 K ความต้านทานโหลด R_L = 7000 Ω กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับ P_d = -10 dBm ค่าประจุของอิเล็กตรอน $e=1.602\times10^{-19}$ C และค่า responsivity $\Re$ = 1 A/W

ค่า D ที่กำหนดไว้มีจะเป็นตัวกำหนดการคิดผลของ σ^2_{beat-1} ในสมการที่ (3.19) ซึ่งจะพิจารณาจากค่าขอบเขต $1+m\xi-2m\sqrt{\xi}$ ซึ่งลดลงตามจำนวน interference user m ที่เพิ่มขึ้น เมื่อ D มีค่ามากกว่าค่าขอบเขต $1+m\xi-2m\sqrt{\xi}$ ทำให้ค่าของ σ^2_{1-co} คิดผลของ σ^2_{beat-1} รูปที่ 3.9 แสดงค่าขอบเขต $1+m\xi-2m\sqrt{\xi}$ ที่ลดลงเรื่อยๆเมื่อมีจำนวน interference user m เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อ D= 0.1 จะเริ่มคิดผลของ σ^2_{beat-1} เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 11 รายเป็นต้นไป เมื่อเพิ่มค่า D= 0.3 ทำให้เริ่มคิดผลของ σ^2_{beat-1}

เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 9 รายเป็นต้นไป และเมื่อเพิ่มค่า D = 0.9 ทำให้เริ่มคิดผลของ σ^2_{beat-1} เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 1 รายเป็นต้นไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า D ส่งผลต่อค่า BER ของระบบดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขอบเขตที่ลดลงกับจำนวน interference user ที่ค่า D ต่างๆกัน



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER ที่ค่า D ต่างกัน

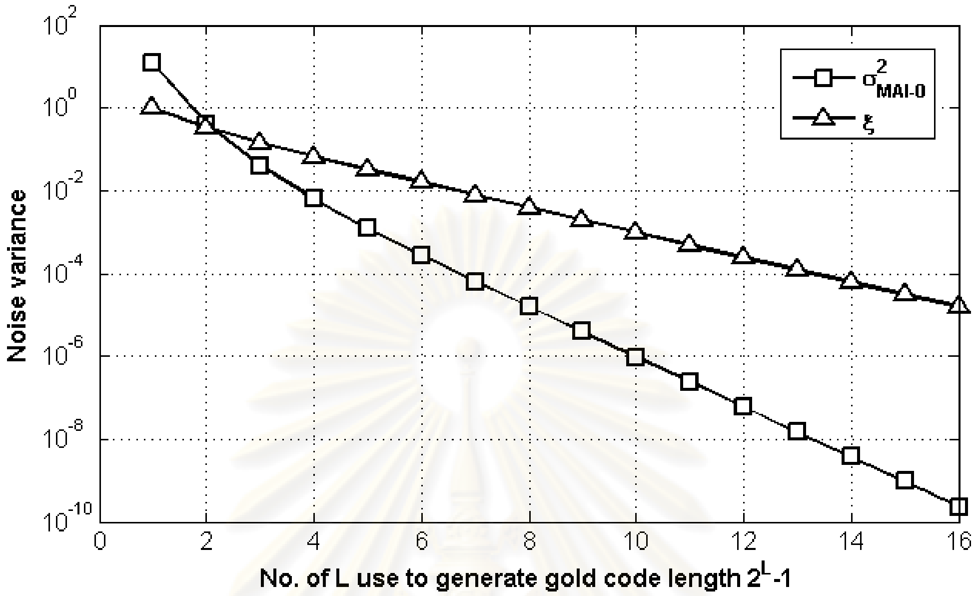
จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่า D = 0.1 ทำให้เริ่มคิดผลของ σ_{beat-1}^2 เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 11 ราย ดังนั้นในช่วงที่มีจำนวนสัญญาณไม่เกิด 11 ราย ค่า BER จึงขึ้นอยู่กับผลของ σ_{MAI}^2 นอกจากนี้ค่า D ที่น้อยอาจทำให้โอกาสที่ชิป “0” จะถูกตัดสินผิดพลาดเป็นชิป “1” ตามสมการที่ (3.8) มีมากขึ้น ทำให้ค่า BER ที่คำนวณได้มีค่าสูงมาก เมื่อใช้ค่า D = 0.3 ทำให้เริ่มมีผลของ σ_{beat-1}^2 เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 9 ราย ทั้งนี้ผลของ σ_{beat-1}^2 และ σ_{MAI}^2 เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 9 รายเป็นต้นไปมีค่าใกล้เคียงกันทำให้ค่า BER ขึ้นอยู่กับสัญญาณรบกวนทั้งสองชนิด นอกจากนี้ค่า D = 0.3 ยังทำให้โอกาสตัดสินชิปผิดพลาดดังสมการที่ (3.8) และ (3.9) น้อยลงด้วย ค่า BER จึงน้อยกว่าเมื่อใช้ค่า D = 0.1 อย่างไรก็ตามผลจากการเปลี่ยนแปลงค่า D เริ่มชัดเจนเมื่อใช้ค่า D = 5 ในช่วงแรกเมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 1-5 ราย ค่า BER จะขึ้นอยู่กับผลของ σ_{MAI}^2 แต่เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 6 รายก็จะเริ่มมีผลของ σ_{beat-1}^2 ทำให้ค่า BER เพิ่มสูงขึ้นทันที ท้ายสุดเมื่อใช้ค่า D = 7 และ 9 ก็จะเริ่มมีผลของ σ_{beat-1}^2 เมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ 4 และ 2 รายตามลำดับ นอกจากนี้ค่า D ที่มากเกินไปจะทำให้โอกาสที่ชิป “1” จะถูกตัดสินผิดพลาดเป็นชิป “0” ตามสมการที่ (3.21) ก็มีมากขึ้น ทำให้ค่า BER มีค่าสูง

3.2.3 การวิเคราะห์ผลของจำนวนชิปของ encoder/decoder ที่ใช้ในระบบ OCDMA-PON

ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชิปของ encoder/decoder N_{chip} ที่มีต่อระบบ ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้ จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ N = 16 ราย ระยะเวลา 1 คาบของชิป T_C = 1.56 ps ระยะเวลา 1 คาบของบิต T_{Bit} = 800 ps แบนด์วิดท์ของเครื่องรับ B_R = 320 GHz ค่าคงที่ของโบลทซ์มาน k_B = 1.38×10^{-23} J/K^{-1} อุณหภูมิ T = 300 K ความต้านทานโหลด R_L = 7000 Ω กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับ P_d = -10 dBm ค่าประจุของอิเล็กตรอน $e = 1.602\times10^{-19}$ C ค่า responsivity $\Re$ = 1 A/W และค่า decision threshold D = 0.3 ตามลำดับ

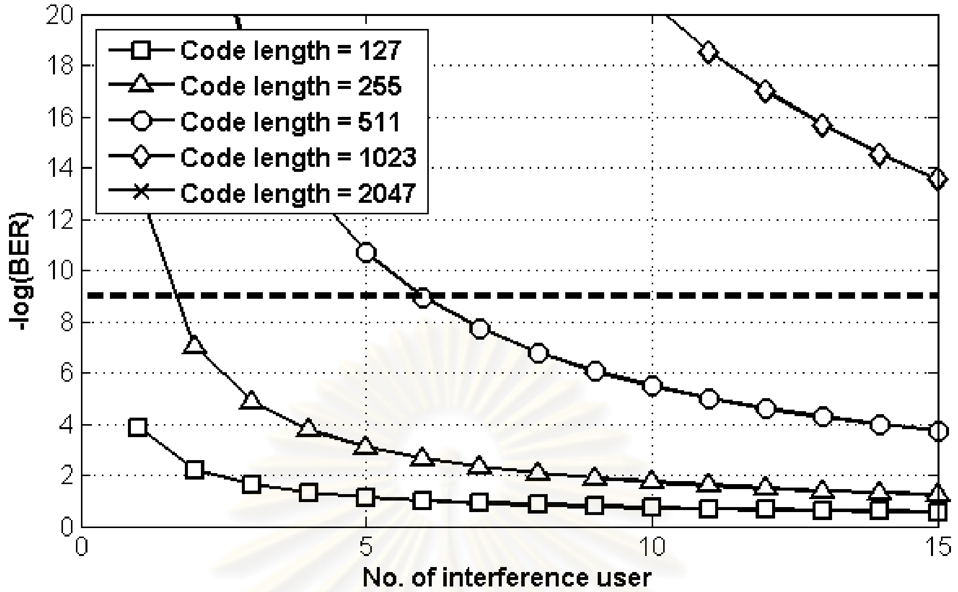
จำนวนชิปของ encoder/decoder ที่ใช้นั้นจะเท่ากับความยาวของ gold code ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.11) ซึ่งค่าของ N_{chip} นั้นมีผลต่อค่า ξ ในสมการที่ (3.10) และค่า σ_{MAI-0}^2 ในสมการที่ (3.13) รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ L ที่ใช้ในการสร้าง gold code ความยาว 2^L-1 ชิป กับขนาดของสัญญาณรบกวน ξ และ σ_{MAI-0}^2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่ม

จำนวนชิปของ encoder (หรือความยาวของรหัส) ให้มากขึ้น จะทำให้ค่าสัญญาณรบกวนเนื่องจาก ξ และ σ^2_{MAI-0} นั้นมีค่าลดลง



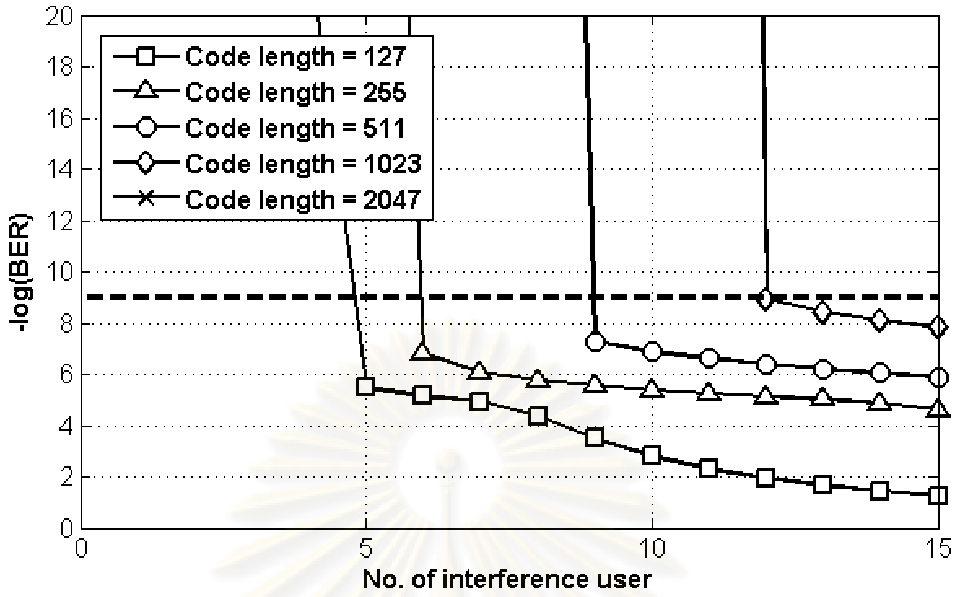
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ L ที่ใช้ในการสร้าง gold code ความยาว 2^L-1 ชิป กับขนาดของสัญญาณรบกวน ξ และ σ^2_{MAI-0}

เมื่อสามารถลดผลของ ξ และ σ^2_{MAI-0} โดยการเพิ่มจำนวนชิปให้มากขึ้น ยังส่งผลให้ค่าของ σ^2_{beat-0} σ^2_{beat-1} และ σ^2_{MAI} น้อยลงด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ξ กับ σ^2_{beat-0} และ σ^2_{beat-1} แสดงดังสมการที่ (3.15) และ (3.17) ตามลำดับ และความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ^2_{MAI-0} กับ σ^2_{MAI} แสดงดังสมการที่ (3.12) ทำให้ค่า BER ของระบบน้อยลง รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER โดยพิจารณาแค่ผลของ σ^2_{MAI} ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน เมื่อใช้จำนวนชิปเท่ากับ 127 ชิป ผลปรากฏว่าเมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ 1 ราย ค่า BER เท่ากับ 1.44x10^{-4} เมื่อเพิ่มจำนวนชิปเป็น 255 ชิป ค่า BER ลดลงเหลือ 4.24x10^{-14} และค่า BER จะลดน้อยลงเรื่อยเมื่อใช้จำนวนชิปให้มากขึ้น



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER โดยพิจารณาแค่ผลของ σ^2_{MAI} ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน

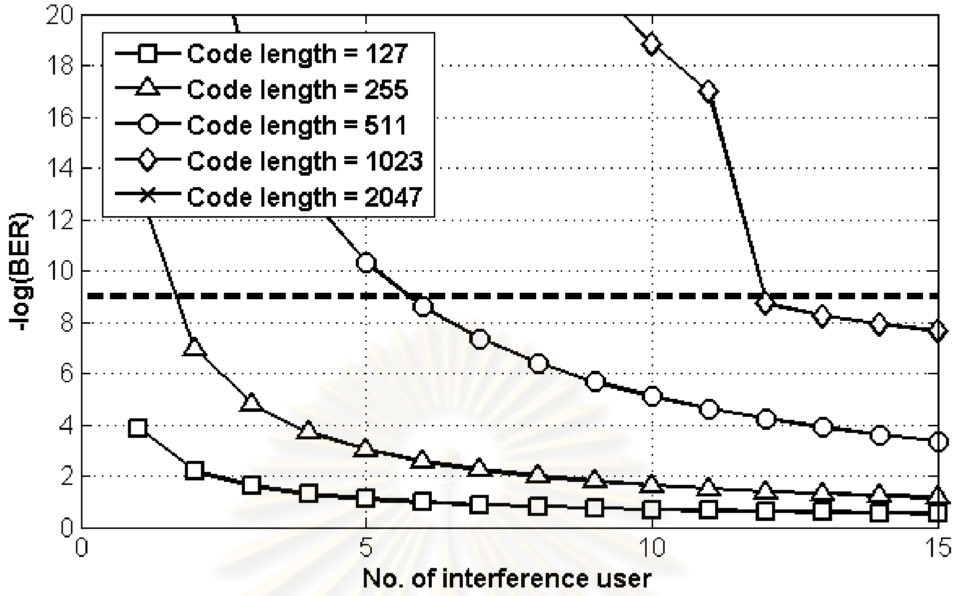
รูปที่ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER โดยพิจารณาแค่ผลของ σ^2_{beat-0} และ σ^2_{beat-1} ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาที่จำนวน interference user เท่ากัน ค่า BER และจะมีค่าลดน้อยลงเรื่อยๆเมื่อเพิ่มจำนวนชิปมากขึ้น เนื่องจากผลของ ξ ที่น้อยลงดังแสดงในรูปที่ 3.11 นอกจากนี้การเพิ่มหรือลดจำนวนชิปมีผลต่อการพิจารณาค่าของ σ^2_{beat-1} ในสมการที่ (3.19) ด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่า ξ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าขอบเขต $1+m\xi-2m\sqrt{\xi}$ ที่ใช้ในสมการที่ (3.19) ด้วย จากเดิมเมื่อค่าใช้จำนวนชิปเท่ากับ 511 ชิป จะเริ่มมีผลของ σ^2_{beat-1} เมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ 9 รายเป็นต้นไปดังแสดงในรูปที่ 3.9-3.10 แต่เมื่อเปลี่ยนจำนวนชิปเท่ากับ 255 และ 1023 ชิป จะเริ่มมีผลของ σ^2_{beat-1} เมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ 6 กับ 12 ราย ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER โดยพิจารณาแค่ผลของ σ^2_{beat-0} และ σ^2_{beat-1} ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลของ σ^2_{beat-0} σ^2_{beat-1} และ σ^2_{MAI} ร่วมกันที่มีต่อค่า BER ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนชิปให้มากขึ้น จะทำให้ค่า BER ลดน้อยลง และทำให้ค่าขอบเขตการตัดสินใจในการพิจารณาผลของ σ^2_{beat-1} ที่ส่งผลต่อค่า BER เปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการจากประมาณ 6 ราย เป็นประมาณ 12 ราย เมื่อเพิ่มจำนวนชิปจาก 511 ชิป เป็น 1023 ชิป ที่ BER น้อยกว่า 10^{-9} เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนชิปให้มากขึ้นจะเป็นการเพิ่มต้นทุนและขนาดของ en/decoder นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนชิปให้มากขึ้นในขณะที่ต้องการส่งด้วยมูลด้วยอัตราบิตเท่าเดิม ระยะเวลาของชิป T_C จะต้องน้อยลงเพื่อให้สัญญาณที่ถูก encode นั้นถูกแผ่ทางเวลาอยู่ในช่วงเวลาของ T_{Bit} เช่นเดิม ทำให้ต้องใช้ตัวกำเนิดแสงในการส่งสัญญาณที่สามารถสร้างพัลส์แสงที่แคบกว่าเดิม ทำให้ต้นทุนของระบบสูงขึ้นไปอีก

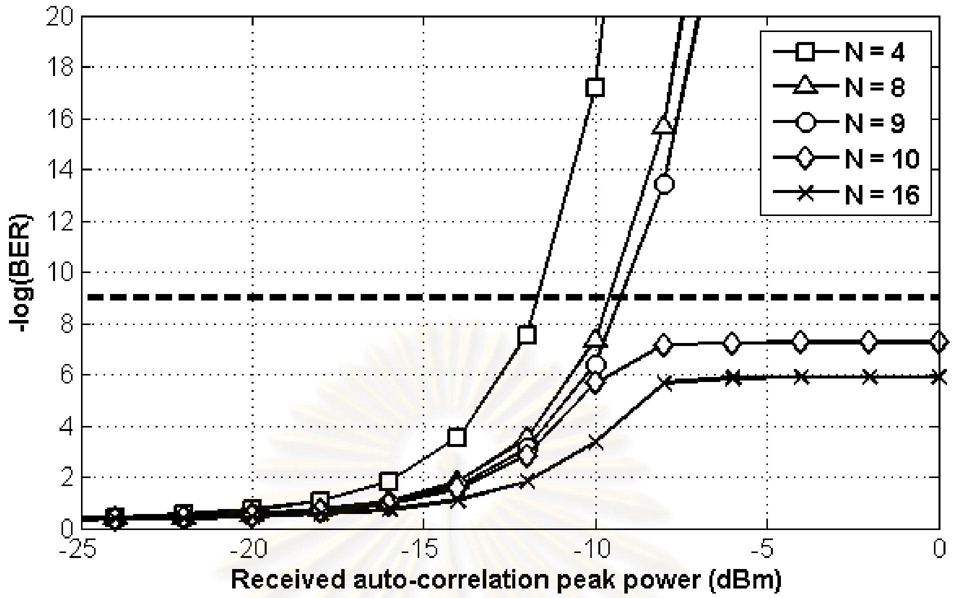


รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน

3.2.4 การวิเคราะห์ผลของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณแสงที่เครื่องรับในระบบ OCDMA-PON

ในการวิเคราะห์ผลของกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับ P_d ของผู้ใช้บริการแต่ละรายที่มีต่อระบบ ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้ จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ N = 16 ราย ระยะเวลา 1 คาบของชิป T_C = 1.56 ps ระยะเวลา 1 คาบของบิต T_{Bit} = 800 ps แบนด์วิดท์ของเครื่องรับ B_R = 320 GHz ค่าคงที่ของโบลทซ์มาน k_B = 1.38×10^{-23} J/K^{-1} อุณหภูมิ T = 300 K ความต้านทานโหลด R_L = 7000 Ω ค่าประจุของอิเล็กตรอน $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C ค่า responsivity $\Re$ = 1 A/W และค่า decision threshold D = 0.3 ตามลำดับ

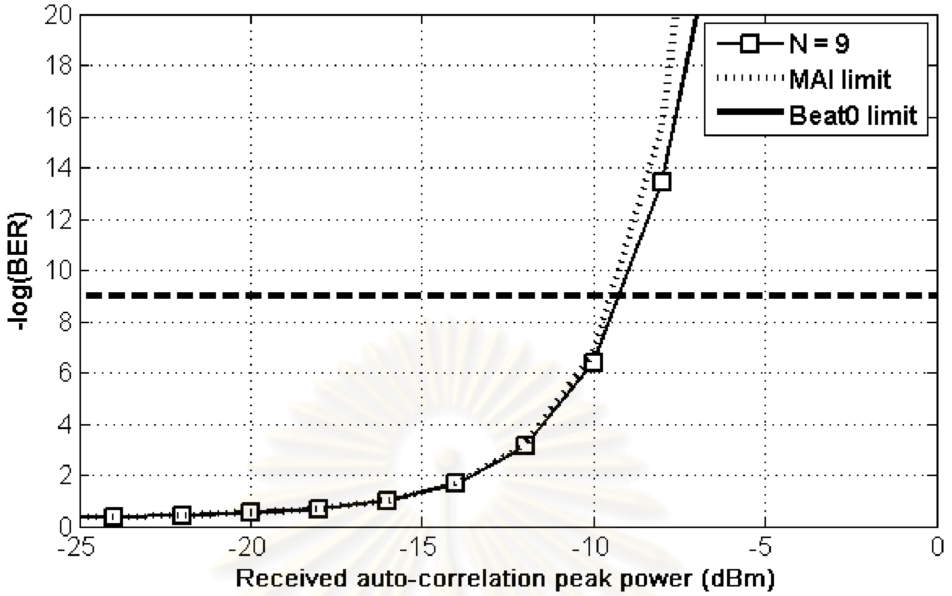
รูปที่ 3.15 แสดงกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ที่จำนวน N เท่ากับ 4 8 9 10 และ 16 รายตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบที่มีจำนวน N เท่ากับ 8 และ 9 ราย ในขณะที่ P_d มีค่าประมาณ -10 dBm ค่า BER จะเริ่มลดน้อยลง เมื่อเพิ่ม P_d ให้มากขึ้นก็จะทำให้ค่า BER ลดน้อยลงเรื่อยๆ ในขณะที่ระบบที่มีจำนวน N 10 รายเป็นต้นไป จะเริ่มมีผลของ σ^2_{beat-1} ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1 และ 3.2.2 ตามลำดับ ทำให้ค่าอัตราบิตพิดพลาดลดลงไม่มากนัก ถึงแม้ว่าจะเพิ่มค่า P_d ให้มากขึ้นก็ตาม



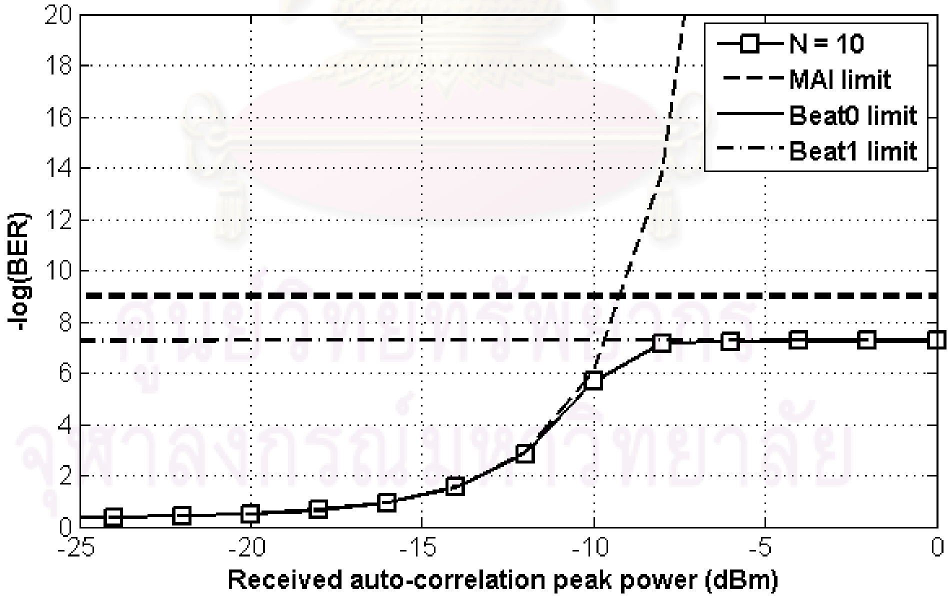
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ที่จำนวนผู้ใช้ในระบบต่างกัน

รูปที่ 3.16 แสดงกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ในระบบที่มี N เท่ากับ 9 ราย นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของระบบเนื่องมาจาก σ^2_{beat-0} และ σ^2_{MAI} ด้วย เมื่อค่า P_d มีค่าน้อยทำให้ค่าของ σ^2_{beat-0} ที่คำนวณจากสมการที่ (3.15) มีค่าน้อยด้วย ค่า BER ของระบบจะขึ้นอยู่กับ σ^2_{MAI} เมื่อเพิ่มค่า P_d ให้สูงขึ้นก็จะทำให้ความแตกต่างระหว่างชิป "1" และ "0" มีมากขึ้น ทำให้ค่า BER ลดลงเรื่อยๆจนใกล้ค่า BER ที่เกิดจาก σ^2_{beat-0} ที่ค่า P_d ประมาณ -5 dBm และจะเริ่มคงที่เนื่องจากผลของค่า σ^2_{beat-0} ที่ค่า P_d ประมาณ 5 dBm เป็นต้นไปที่ค่า BER ประมาณ 10^{-80} อย่างไรก็ตามค่า BER ที่ถูกจำกัดด้วย σ^2_{beat-0} มีค่าประมาณน้อยมากจนถือได้ว่าไม่เกิดความผิดพลาดเลย

ในขณะที่เมื่อเพิ่มจำนวน N เป็น 10 ราย จะเริ่มคิดผลของ σ^2_{beat-1} ที่มีต่อระบบดังแสดงในรูปที่ 3.17 ในช่วงแรกที่ P_d มีค่าน้อย ค่า BER จะขึ้นอยู่กับ σ^2_{MAI} แต่เมื่อเพิ่มค่า P_d ให้สูงขึ้น ผลของ σ^2_{MAI} จะเริ่มน้อยลงเรื่อยๆ ทำให้ค่า BER ขึ้นอยู่กับ σ^2_{beat-1} เมื่อ P_d มีค่าประมาณ -8 dBm เป็นต้นไปที่ค่า BER ประมาณ 5.4×10^{-8}



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ที่มีจำนวนผู้ใช้ในระบบ 9 ราย และข้อจำกัดของระบบเนื่องจาก σ^2_{beat-0} และ σ^2_{MAI}



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ที่มีจำนวนผู้ใช้ในระบบ 10 ราย และข้อจำกัดของระบบเนื่องจาก σ^2_{beat-0} σ^2_{beat-1} และ σ^2_{MAI}

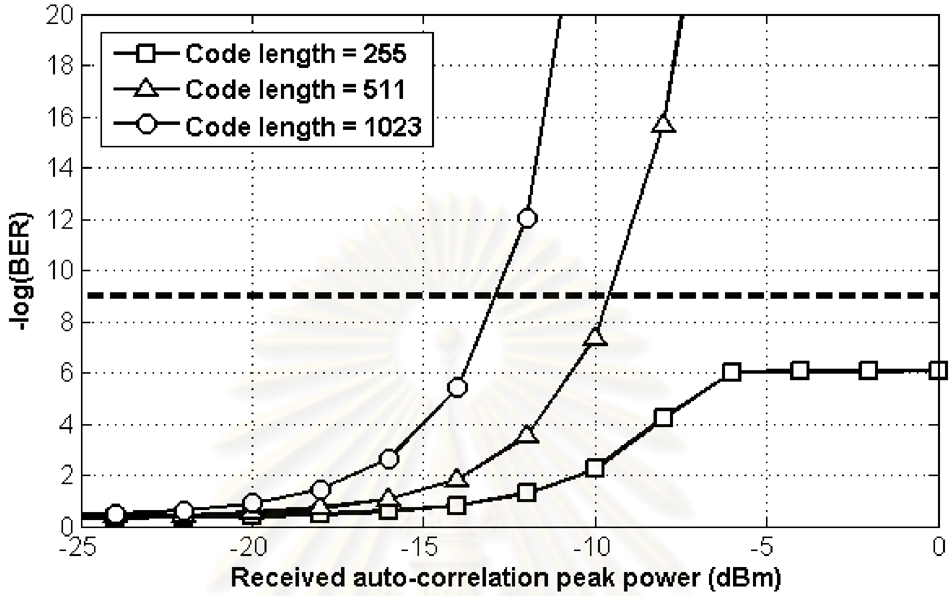
ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.5 แนวทางในการออกแบบระบบ OCDMA-PON

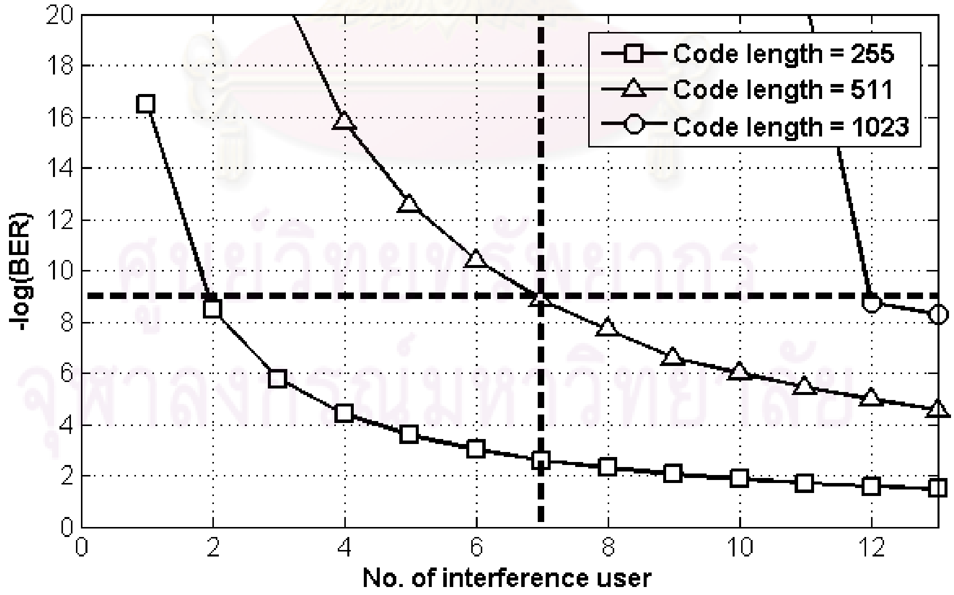
ในหัวข้อ 3.2.1-3.2.4 ได้วิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวน ค่า decision threshold D จำนวนชิปของ encoder/decoder และกำลังสัญญาณเฉลี่ยที่เครื่องรับตามลำดับ โดยปัจจัยที่สามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการในระบบให้มากขึ้น คือ การเพิ่มจำนวนชิปของ encoder/decoder ให้มากขึ้น (ใช้รหัสที่ยาวขึ้น) ซึ่งจะทำให้ค่าของ ξ และ σ^2_{MAI-0} ลดน้อยลง และยังส่งผลให้ค่าของ σ^2_{beat-0} σ^2_{beat-1} และ σ^2_{MAI} น้อยลงด้วยดังอธิบายในหัวข้อที่ 3.2.3 อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มจำนวนชิปของ encoder/decoder ให้มากขึ้นในขณะที่ยังใช้อัตราบิตในการส่งข้อมูลเท่าเดิม ทำให้ช่วงเวลาของชิปหรือ T_c แต่ละชิปก็ลดน้อยลงด้วย จึงจำเป็นต้องใช้ตัวกำเนิดแสงที่สามารถสร้างพัลส์แสงให้แคบกว่าเดิม ซึ่งทำให้ต้นทุนของระบบสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มกำลังส่งสัญญาณก็เป็นปัจจัยหนึ่งในการทำให้ค่า BER ลดน้อยลง แต่จะต้องใช้ตัวกำเนิดแสงที่มีกำลังส่งสัญญาณสูง ซึ่งทำให้ต้นทุนของระบบเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

รูปที่ 3.18 แสดงค่า BER ของระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการ N เท่ากับ 8 รายโดยใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปต่างๆกัน หากต้องการจะออกแบบระบบให้สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการ 8 รายที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps จะต้องเลือกออกแบบโดยใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 511 ชิป ใช้ตัวกำเนิดแสงที่สร้างสร้างพัลส์แสงขนาดเท่ากับ T_c หรือเท่ากับ 800×10^{-12}/511 = 1.56 ps โดยกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-9} มีค่าประมาณ -9.5 dBm (เนื่องจาก ACP เป็นสัญญาณแสงพัลส์เดียวในช่วงเวลา 1 คาบของบิตหรือ 511 คาบของชิป กำลังเฉลี่ยของสัญญาณแสงต้องลดลงจากค่ากำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับประมาณ 511 เท่า ดังนั้นเมื่อค่ากำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับเท่ากับ -9.5 dBm จึงคำนวณกำลังเฉลี่ยของสัญญาณแสงได้เท่ากับ -9.5-10log(511)= -36.58 dBm) ดังแสดงในรูปที่ 3.18-3.19 ซึ่งสามารถนำค่ากำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับไปคำนวณหาค่ายอดของกำลังส่งสัญญาณ (peak power) ได้จากสมการที่ (2.11) (ให้ค่ากำลังสูญเสียทั้งหมดจากเส้นใยแสง spliter และ power margin รวมเท่ากับ 13 dB) จะได้ค่า peak power ในการส่งสัญญาณประมาณ 3.5 dBm เป็นต้น หรือเลือกออกแบบโดยใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปเท่ากับ 1023 ชิป ใช้ตัวกำเนิดแสงที่สร้างสร้างพัลส์แสงขนาดเท่ากับ 800^{-12}/1023 = 0.78 ps ซึ่งต้องใช้เลเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่าที่ค่ากำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับเท่ากันที่ -9.5 dBm ค่า BER ของกรณี 1023 ชิปจะดีกว่าประมาณ 25 เท่า รูปที่ 3.18 แสดงกำลัง

ของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-9} มีค่าประมาณ -13 dBm ซึ่งสามารถหาค่า peak power ในการส่งสัญญาณจากสมการที่ (2.11) ได้เท่ากับ 0 dBm เป็นต้น



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ของระบบ OCDMA ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 8 รายโดยใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับค่า BER ที่กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับเท่ากับ -9.5 dBm โดยใช้ จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน

บทที่ 4

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ OCDMA-PON โดยการจำลองทางคณิตศาสตร์

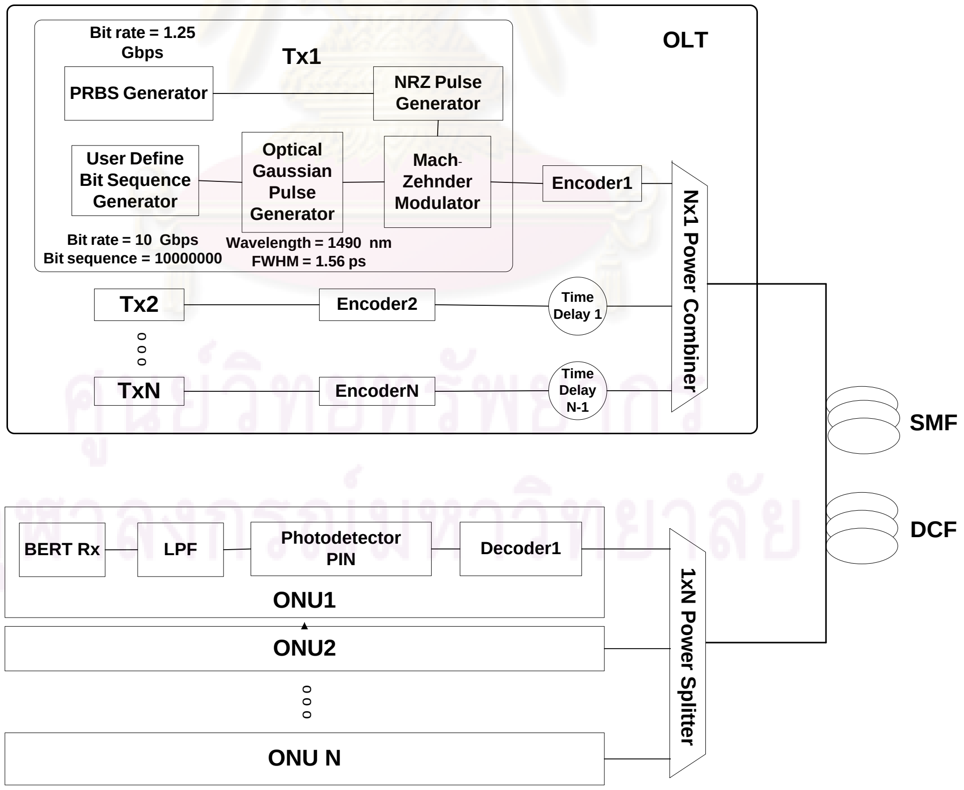
ในบทที่ 3 ได้แสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ OCDMA-PON ในทางทฤษฎี ข้อจำกัดของระบบเนื่องจากสัญญาณรบกวน และแนวทางการออกแบบระบบ ในบทนี้ส่วนที่ 1-3 จะได้กล่าวถึงโครงสร้างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทดสอบระบบ OCDMA-PON รวมไปถึงลักษณะของสัญญาณทางเวลา และ eye-diagram ของสัญญาณแสง ส่วนที่ 4-6 กล่าวถึงผลของแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำที่มีผลต่อค่า BER ของผู้ใช้บริการในระบบ ส่วนที่ 7-9 จะเป็นการหาระยะไกลสุด กำลังส่งสัญญาณต่ำสุด และแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำที่น้อยที่สุดที่สามารถใช้ได้ในระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้ในระบบต่างๆกันตามลำดับ และในส่วนที่ 10 จะเป็นการพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ต่างๆในอัตราที่เท่ากัน พารามิเตอร์ใดจะส่งผลทำให้ค่า BER เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด

4.1 การส่งสัญญาณ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 4 ราย

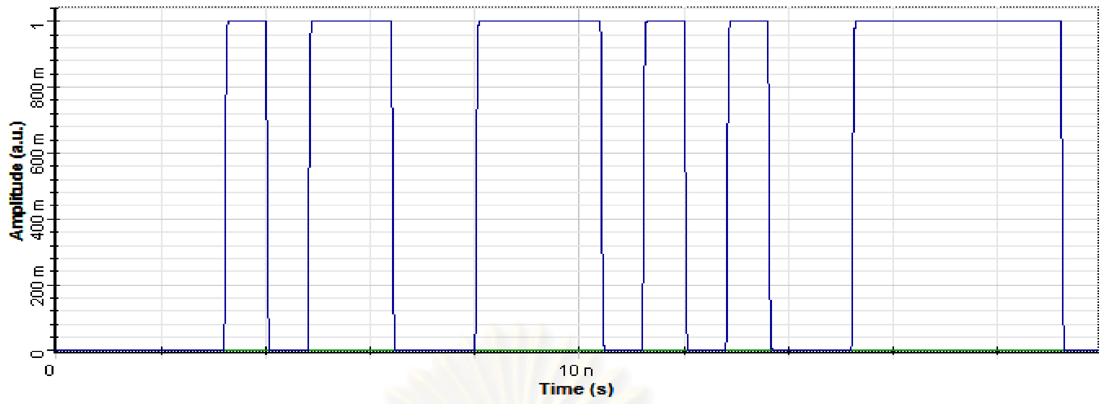
แบบจำลองการส่งสัญญาณ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 4 รายที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps จำนวนบิตที่ส่งสัญญาณเท่ากับ 256 bit และอัตราการสุ่มสัญญาณในช่วงเวลา 1 บิตเท่ากับ 1024 sample/bit ใช้แบบจำลองเช่นเดียวกับที่แสดงในรูป 4.1 โดยใช้ค่า N เท่ากับ 4 ในที่นี้รหัสแต่ละชุด (#1, #3, #5 และ #6) จะถูกจัดสรรให้กับผู้ใช้แต่ละรายในระบบ ซึ่งลักษณะของสัญญาณในโดเมนเวลาของผู้ใช้บริการที่ใช้รหัส#3 ณ ตำแหน่งต่างๆของระบบ รูปที่ 4.2-4.3 แสดงลักษณะของสัญญาณทางเวลาในช่วงเวลา 20ns แรกที่มีลำดับบิตเท่ากับ "0000101100111010100111110" ดังแสดงในรูป 4.2(ก) เมื่อมอดูเลตสัญญาณไฟฟ้าเข้ากับพัลส์แสงจาก optical Gaussian pulse generator ในรูป 4.2(ข) จะได้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณแสงที่มีลักษณะเป็นพัลส์แสง 1 ลูกในช่วงเวลา 1 คาบบิตสำหรับบิต "1" ดังแสดงในรูป 4.2(ค) จากนั้นสัญญาณแสงจะถูก encode ทำให้พัลส์ในรูป 4.2(ค) ถูกแผ่ออกทางเวลาดังแสดงในรูป 4.3(ก) เมื่อสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงเป็นระยะทาง 20 km และ spliter ที่มีอัตราการแบ่งพลังงานแสงเท่ากับ 1:4 แล้วสัญญาณแสงก็จะเข้าไปยัง decoder ที่มีรหัสที่สัมพันธ์กันกับรหัสของ encoder ดังรูปที่ 4.3(ข) ที่แสดงให้เห็นถึง ACP ของสัญญาณแสงที่ถูก decode อย่างถูกต้องด้วย decoder

ที่ใช้ รหัส#3 ซึ่งลักษณะของสัญญาณจะถูกแผ่กลับอย่างถูกต้องกลับมาเป็นพัลส์แสงแคบๆที่มีกำลังของสัญญาณที่สูงในช่วงเวลา 1 คาบบิตคล้ายกับสัญญาณก่อนถูก encode ในรูป 4.2(ค) อย่างไรก็ตามกำลังของสัญญาณแสงในแต่ละบิตมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากในแต่ละบิตอาจถูกรบกวนด้วยสัญญาณที่มาจากผู้ใช้บริการรายอื่นไม่เท่ากัน ในขณะที่รูปที่ 4.3(ค) แสดง CCP ของสัญญาณแสงที่ถูก decode อย่างไม่ถูกต้องด้วยรหัส #4 ทำให้สัญญาณแสงไม่สามารถกลับไปเป็นพัลส์แสงแคบๆที่มีกำลังของสัญญาณสูงเหมือนเดิมได้

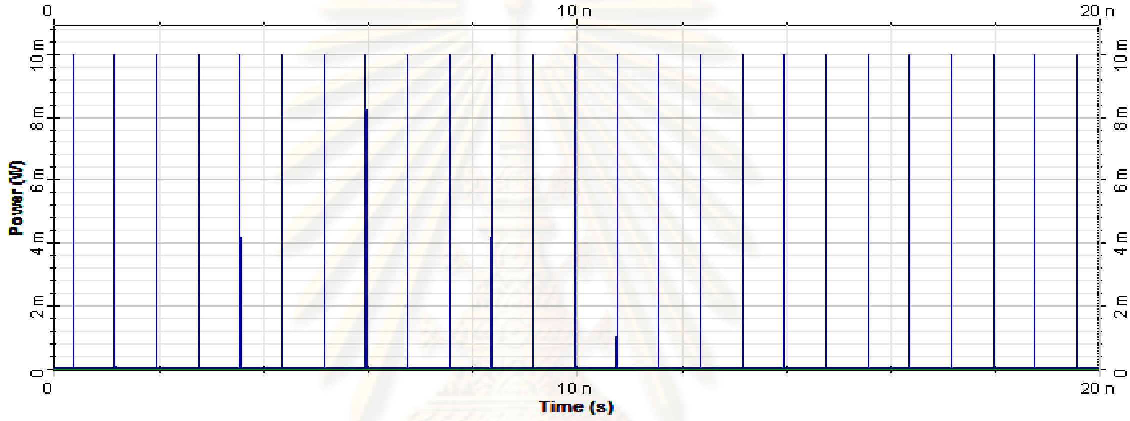
เมื่อพิจารณาลักษณะของสัญญาณในโดเมนเวลาก่อน encode และหลัง decode ของผู้ใช้บริการแต่ละรายจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ decoder ที่มีรหัสสัมพันธ์กับรหัสของ encoder ทำให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายสามารถถอดรหัสและดึงข้อมูลของตัวเองกลับมาได้ ดังรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะสัญญาณในทางเวลาของผู้ใช้บริการทั้ง 4 รายก่อนถูก encode ด้วย encoder ที่ใช้รหัส#1 #3 #5 และ #6 และหลังถูก decode ด้วย decoder ที่ใช้รหัส#1 #3 #5 และ #6 ตามลำดับจะเห็นได้ว่าผู้ใช้บริการแต่ละรายสามารถดึงข้อมูลของตัวเองกลับมาได้เท่านั้นเนื่องจากสัญญาณถูกแผ่กลับอย่างถูกต้อง ทำให้ได้ ACP ที่มีกำลังของสัญญาณสูงและมีพัลส์ที่แคบคล้ายกับที่ตัวส่งสัญญาณ ในขณะที่ข้อมูลที่มาจากผู้ใช้บริการรายอื่นๆก็จะถูกแผ่ออกทางเวลาเช่นเดิม



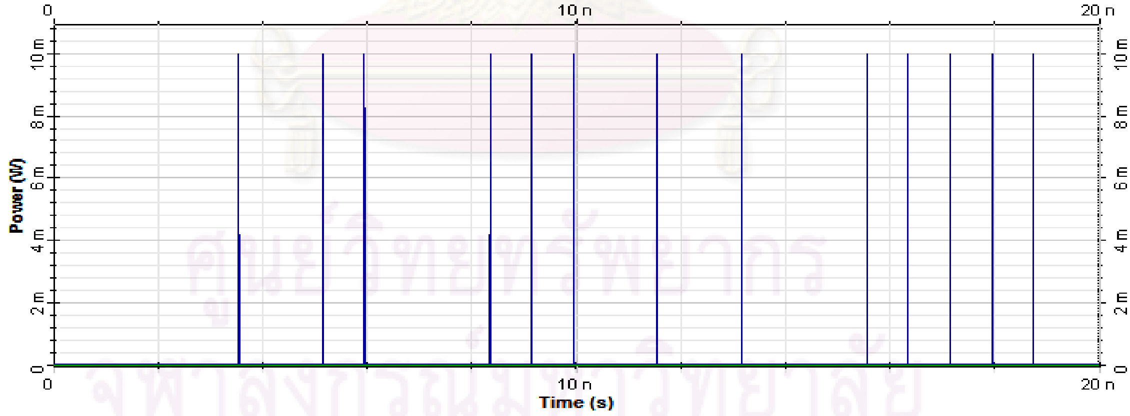
รูปที่ 4.1 แบบจำลองการส่งผ่านสัญญาณซีดีเอ็มเอแสงบนโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟสำหรับผู้ใช้บริการจำนวน N ราย



(ก)



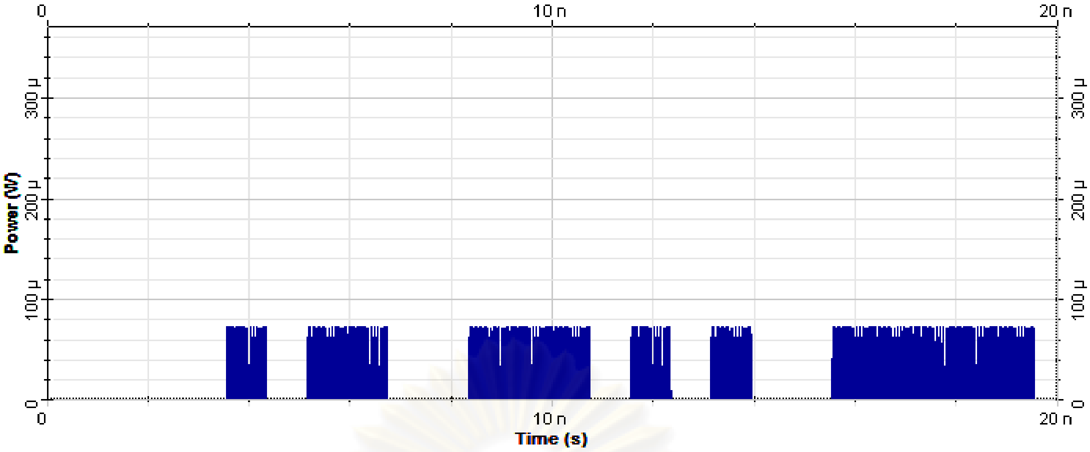
(ข)



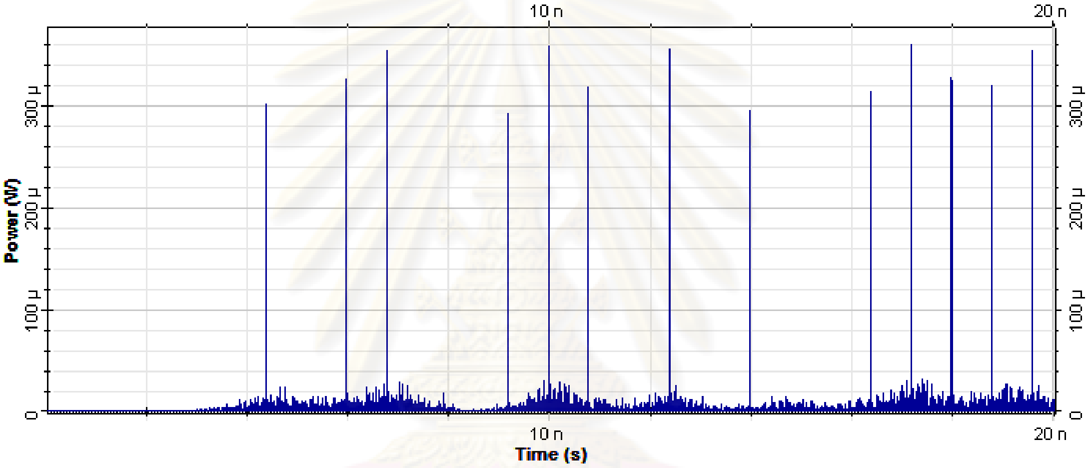
(ค)

รูปที่ 4.2 ลักษณะของสัญญาณในโดเมนเวลาของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 ณ ตำแหน่งต่างๆของระบบ (ก) สัญญาณไฟฟ้าแบบ NRZ (ข) พัลส์แสงที่สร้างจาก Mode-locked laser diode (ค) สัญญาณแสงหลังจากถูกมอดูเลต

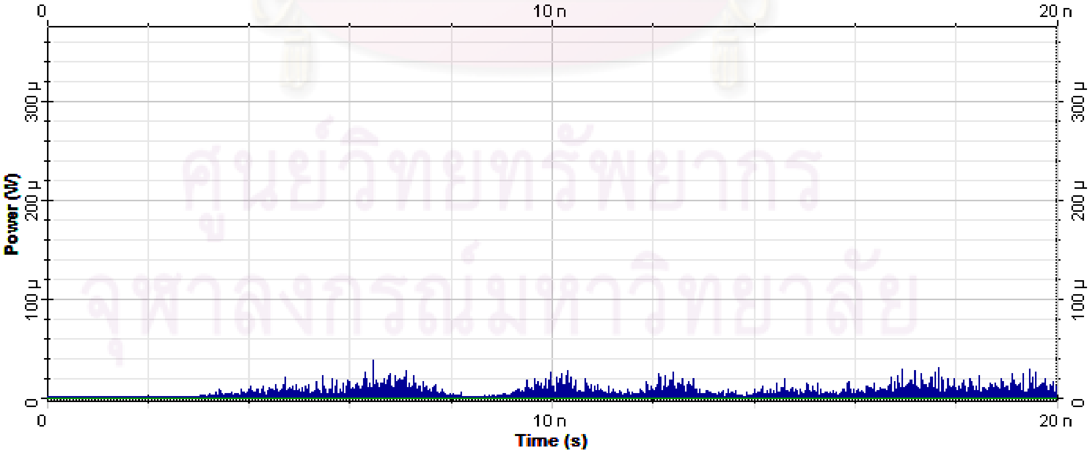
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



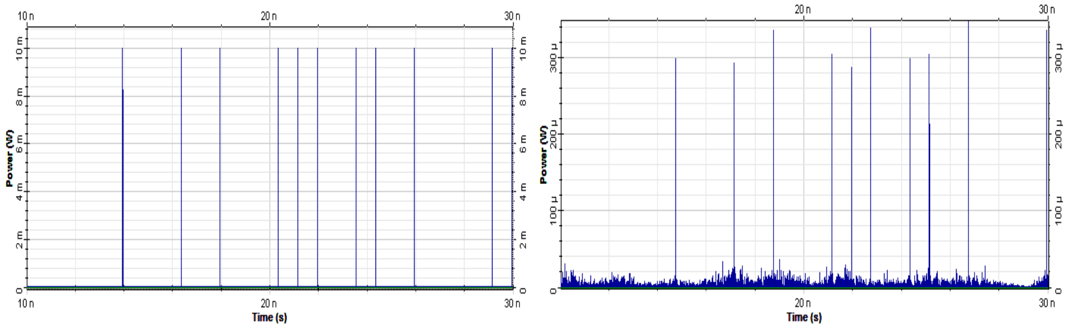
(ข)



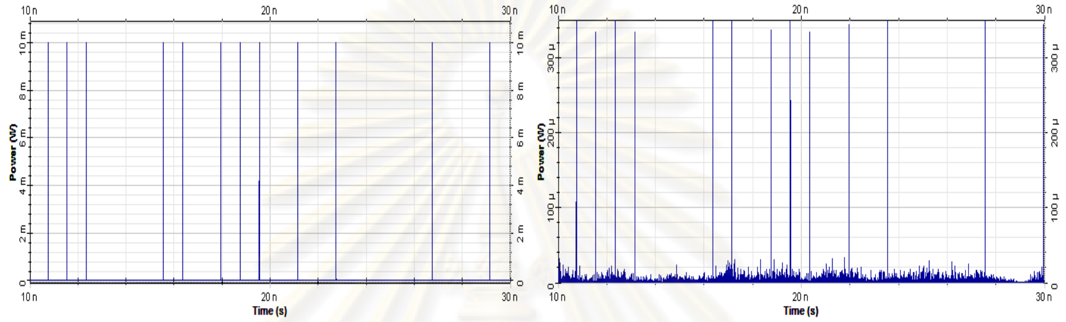
(ค)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

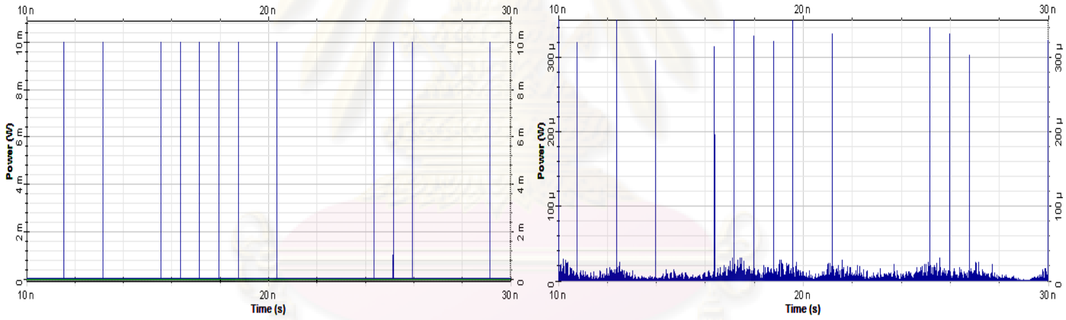
รูปที่ 4.3 ลักษณะของสัญญาณในโดเมนเวลาของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 ณ ตำแหน่งต่างๆของระบบ (ก) หลังจากการ encode (ข) หลังจากการ decode ด้วย decoder ที่ใช้รหัส #3 (ค) หลังจากการ decode ด้วย decoder ที่ใช้รหัส #4



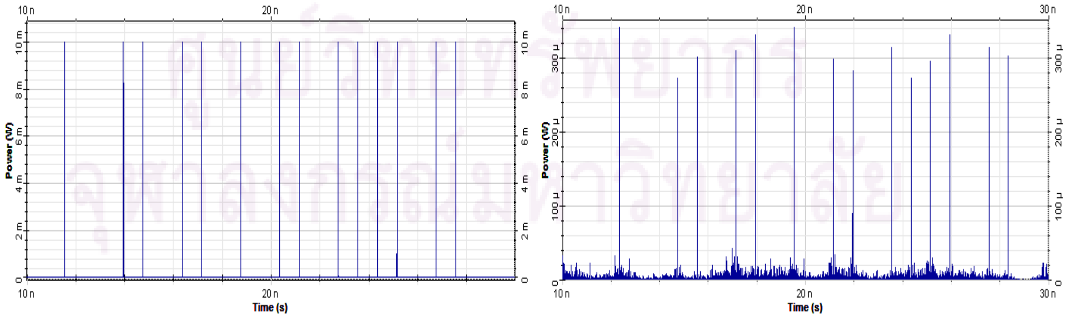
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.4 ลักษณะสัญญาณในทางเวลาของผู้ใช้บริการทั้ง 4 รายก่อนถูก encode และหลังถูก decode (ก) รหัส#1 (ข) รหัส#3 (ค) รหัส#5 (ง) รหัส#6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลังจากสัญญาณแสงของผู้ใช้แต่ละรายถูก decode และดึงข้อมูลกลับมาเรียบร้อยแล้วก็จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN และวงจรกรองผ่านต่ำ รูปที่ 4.5 แสดง eye-diagram ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 ที่ใช้กำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm หลังผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีค่าความถี่ตัด (cut-off frequency: f_c) หรือแบนด์วิดท์ต่างกัน โดยรูปที่ 4.5(ก) แสดง eye-diagram ของ ACP ที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ไม่จำกัด กล่าวคือ ทุกองค์ประกอบความถี่ของ ACP ดังกล่าวจะผ่านวงจรกรองไปได้ทั้งหมด ทำให้ ACP มีกำลังของสัญญาณที่สูงและมี FHWM ที่แคบใกล้เคียงกับพัลส์แสงที่ตัวส่งสัญญาณ และมีความต่างของบิต “1” และ ”0” ณ ตำแหน่งกึ่งกลางบิตสูงที่สุด (eye-opening กว้างที่สุด) ทำให้ค่ามี BER น้อยที่สุดด้วย ซึ่งในกรณีนี้ค่า BER ของ ACP ดังกล่าวเท่ากับ 1.32×10^{-112} รูปที่ 4.5(ข) แสดง eye-diagram ของ ACP เมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำเหลือ 20 GHz ซึ่งองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณที่สูงกว่า 20 GHz จะถูกกำจัดทิ้งไป ทำให้กำลังของสัญญาณลดลงเท่ากับ -14.09 dBm และพัลส์แสงกว้างขึ้นเล็กน้อยโดยมีค่า FWHM เท่ากับ 16.29 ps และ BER ของ ACP ดังกล่าวเท่ากับ 7.15×10^{-32} เมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำลงมาเหลือ 10 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.5(ค) องค์ประกอบความถี่สูงถูกกำจัดทิ้งไปมากกว่าเดิม ทำให้กำลังของสัญญาณลดลงเท่ากับ -16.78 dBm และพัลส์แสงกว้างขึ้นเล็กน้อยโดยมีค่า FWHM เท่ากับ 34.62 ps และ BER ของ ACP ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 2.92×10^{-16} และเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.25 GHz หรือเท่าอัตราบิตของข้อมูล จะเห็นได้ว่าความแตกต่างระหว่างบิต “1” กับบิต “0” มีน้อยมากดังแสดงในรูปที่ 4.5(ง) เนื่องจากองค์ประกอบความถี่สูงถูกกำจัดทิ้งไปหมด ส่งผลให้กำลังของสัญญาณต่ำที่สุด พัลส์แสงกว้างที่สุด และค่า BER ของ ACP ก็มีค่าสูงที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4.1-4.3 โดยค่า BER มีค่าน้อยกว่า 10^{-9} เมื่อใช้ของวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ไม่จำกัด 20 และ 10 GHz ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.25 GHz จะไม่สามารถให้บริการที่ค่า BER น้อยกว่า 10^{-9} ได้เลย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power 10 dBm ที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน

แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ (GHz)	กำลังของ ACP (dBm)
แบนด์วิดท์ไม่จำกัด	-5.85
20	-14.09
10	-16.78
1.25	-23.79

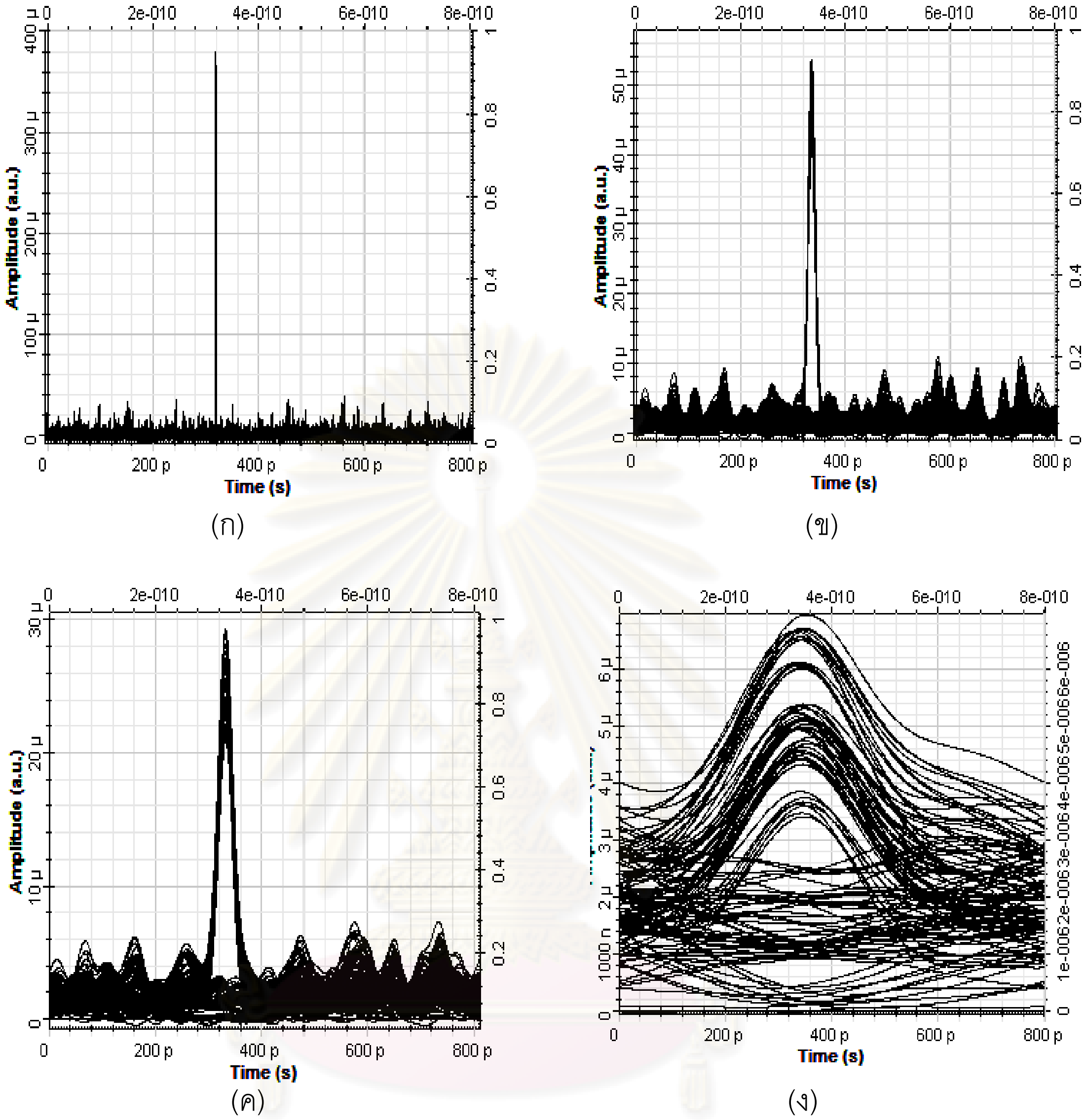
ตารางที่ 4.2 ความกว้างพัลส์ FWHM ของ ACP ที่ตรวจจับได้ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power 10 dBm ที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน

แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ (GHz)	ความกว้างพัลส์ FHWM (ps)
แบนด์วิดท์ไม่จำกัด	2.38
20	16.29
10	34.62
1.25	374.92

ตารางที่ 4.3 BER ของ ACP ที่ตรวจจับได้ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power 10 dBm ที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน

แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ (GHz)	BER
แบนด์วิดท์ไม่จำกัด	1.32×10^{-112}
20	7.15×10^{-32}
10	2.92×10^{-16}
1.25	1.24×10^{-2}

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 Eye-diagram ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power 10 dBm ในระบบ OCDMA-PON ที่มีผู้ใช้บริการ 4 รายที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน (ก) แบนด์วิดท์ไม่จำกัด (ข) 20 GHz (ค) 10 GHz (ง) 1.25 GHz

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การส่งสัญญาณ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 8 ราย

แบบจำลองการส่งสัญญาณ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 8 รายใช้แบบจำลองเช่นเดียวกับที่แสดงในรูป 4.1 โดยใช้ค่า N เท่ากับ 8 ในที่นี้ รหัส แต่ละชุด (#1-#8) จะถูกจัดสรรให้กับผู้ใช้แต่ละรายในระบบ เมื่อพิจารณา eye-diagram ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์สูงๆ ลักษณะของ ACP จะเป็นพัลส์ที่มีกำลังของสัญญาณที่สูง และกำลังของสัญญาณจะลดลงเมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำลง เนื่องจากองค์ประกอบความถี่สูงถูกกำจัดทิ้งไปดังแสดงในตารางที่ 4.4 ทั้งนี้ค่ากำลังของ ACP ที่วัดได้นั้นมีค่าน้อยกว่าที่วัดได้จากกรณีของผู้ใช้บริการ 4 รายเนื่องจากมีอัตราการแบ่งสัญญาณที่สูงกว่า (1:8) และได้รับผลกระทบของสัญญาณรบกวน σ_{MAI}^2 และ σ_{beat-1}^2 ที่มากกว่าด้วย ในขณะที่ความกว้าง FWHM ของ ACP ก็จะแคบมากเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์สูงและพัลส์จะมีค่า FWHM ที่กว้างมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำลงดังแสดงในตารางที่ 4.5 และค่า BER มีค่าน้อยมากเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์สูง เนื่องจากกำลังของ ACP มีค่าสูงส่งผลให้ความต่างของระดับความเข้มของสัญญาณที่บิต “1” และ ”0” ต่างกันมาก ทำให้ค่า BER มีค่าน้อยมาก ซึ่งเมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำลง ทำให้กำลังของ ACP ลดลง และทำให้ค่า BER มีค่าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยค่า BER มีค่าน้อยกว่า 10^{-9} เมื่อใช้ของวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ไม่จำกัดเท่านั้น ในขณะที่เมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 10 และ 1.25 GHz จะไม่สามารถให้บริการที่ค่า BER น้อยกว่า 10^{-9} ได้เลย

ตารางที่ 4.4 กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน

แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ (GHz)	กำลังของ ACP (dBm)
แบนด์วิดท์ไม่จำกัด	-11.55
20	-19.59
10	-22.37
1.25	-28.51

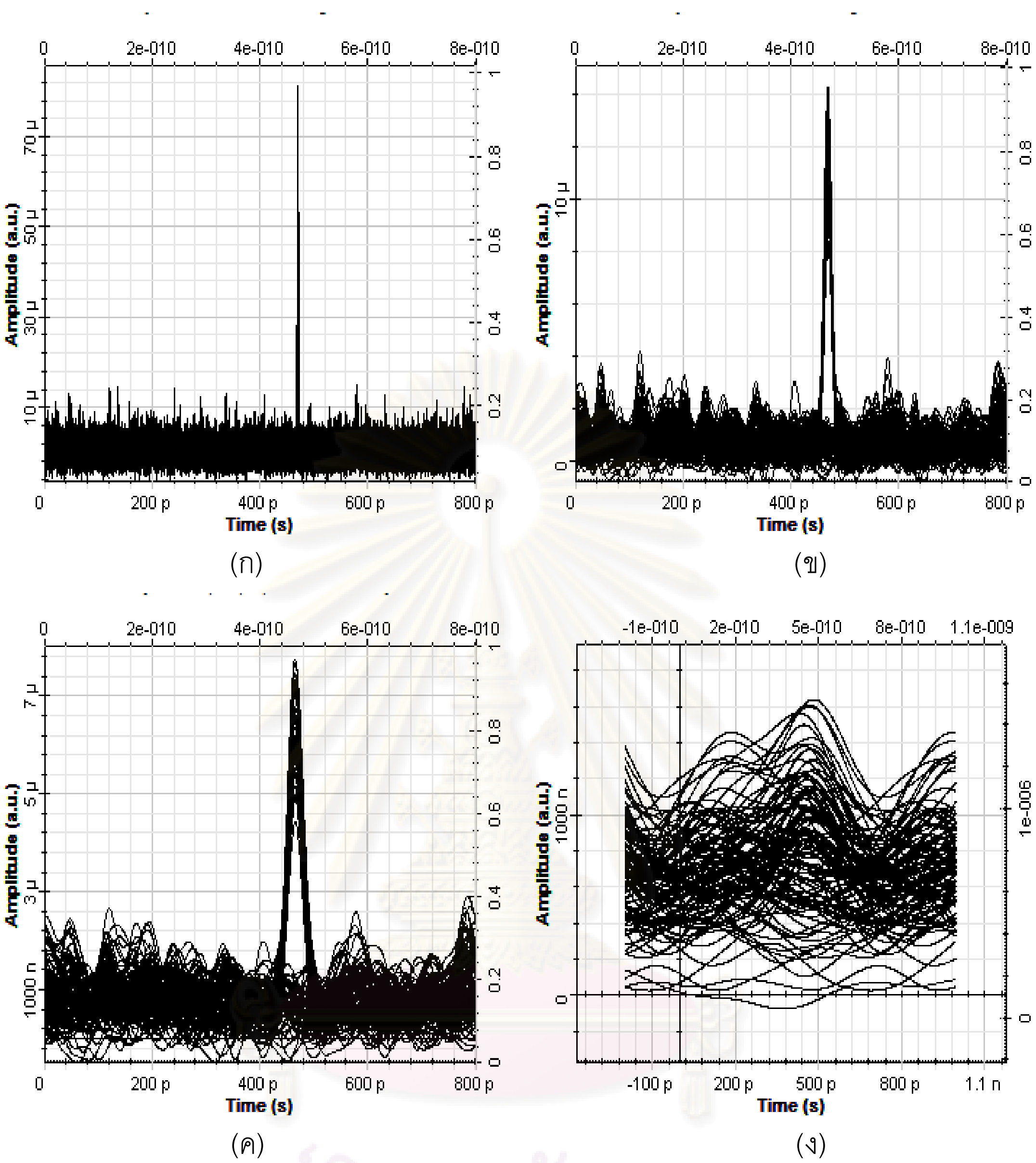
ตารางที่ 4.5 ความกว้างพัลส์ FWHM ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน

แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ (GHz)	ความกว้างพัลส์ FHWM (ps)
แบนด์วิดท์ไม่จำกัด	2.49
20	16.45
10	35.77
1.25	700.61

ตารางที่ 4.6 BER ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน

แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ (GHz)	BER
แบนด์วิดท์ไม่จำกัด	4.34×10^{-18}
20	2.32×10^{-9}
10	8.18×10^{-7}
1.25	4.43×10^{-2}

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 Eye-diagram ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 ในระบบ OCDMA-PON ที่มีผู้ใช้บริการ 8 รายที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน (ก) แบนด์วิดท์ไม่จำกัด (ข) 20 GHz (ค) 10 GHz (ง) 1.25 GHz

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การส่งสัญญาณ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 16 ราย

แบบจำลองการส่งสัญญาณ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 16 รายใช้แบบจำลองเช่นเดียวกับที่แสดงในรูป 4.1 โดยใช้ค่า N เท่ากับ 16 ในที่นี้ รหัส แต่ละชุด (#1-#16) จะถูกจัดสรรให้กับผู้ใช้แต่ละรายในระบบ เมื่อพิจารณา eye-diagram ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์สูงๆ ลักษณะของ ACP จะเป็นพัลส์ที่มีกำลังของสัญญาณที่สูง และกำลังของสัญญาณจะลดลงเมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำลง เนื่องจากองค์ประกอบความถี่สูงถูกกำจัดทิ้งไปดังแสดงในตารางที่ 4.7 ทั้งนี้ค่ากำลังของ ACP ที่วัดได้นั้นมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากมีอัตราการแบ่งสัญญาณที่สูงที่สุด (1:16) และได้รับผลกระทบของสัญญาณรบกวน σ_{MAI}^2 และ σ_{beat-1}^2 ที่มากที่สุดด้วย ในขณะที่ความกว้าง FWHM ของ ACP ก็จะแคบมากเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์สูงและพัลส์จะมีค่า FWHM ที่กว้างมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำลงดังแสดงในตารางที่ 4.8 และค่า BER มีค่าน้อยมากเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์สูง ซึ่งเมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำลง ทำให้กำลังของ ACP ลดลง และทำให้ค่า BER มีค่าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.9 ทั้งนี้ระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 16 ราย ไม่สามารถให้บริการด้วยค่า BER ที่น้อยกว่า 10^{-9} สำหรับทุกค่าของแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ

ตารางที่ 4.7 กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน

แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ (GHz)	กำลังของ ACP (dBm)
แบนด์วิดท์ไม่จำกัด	-16.99
20	-25.69
10	-28.24
1.25	-

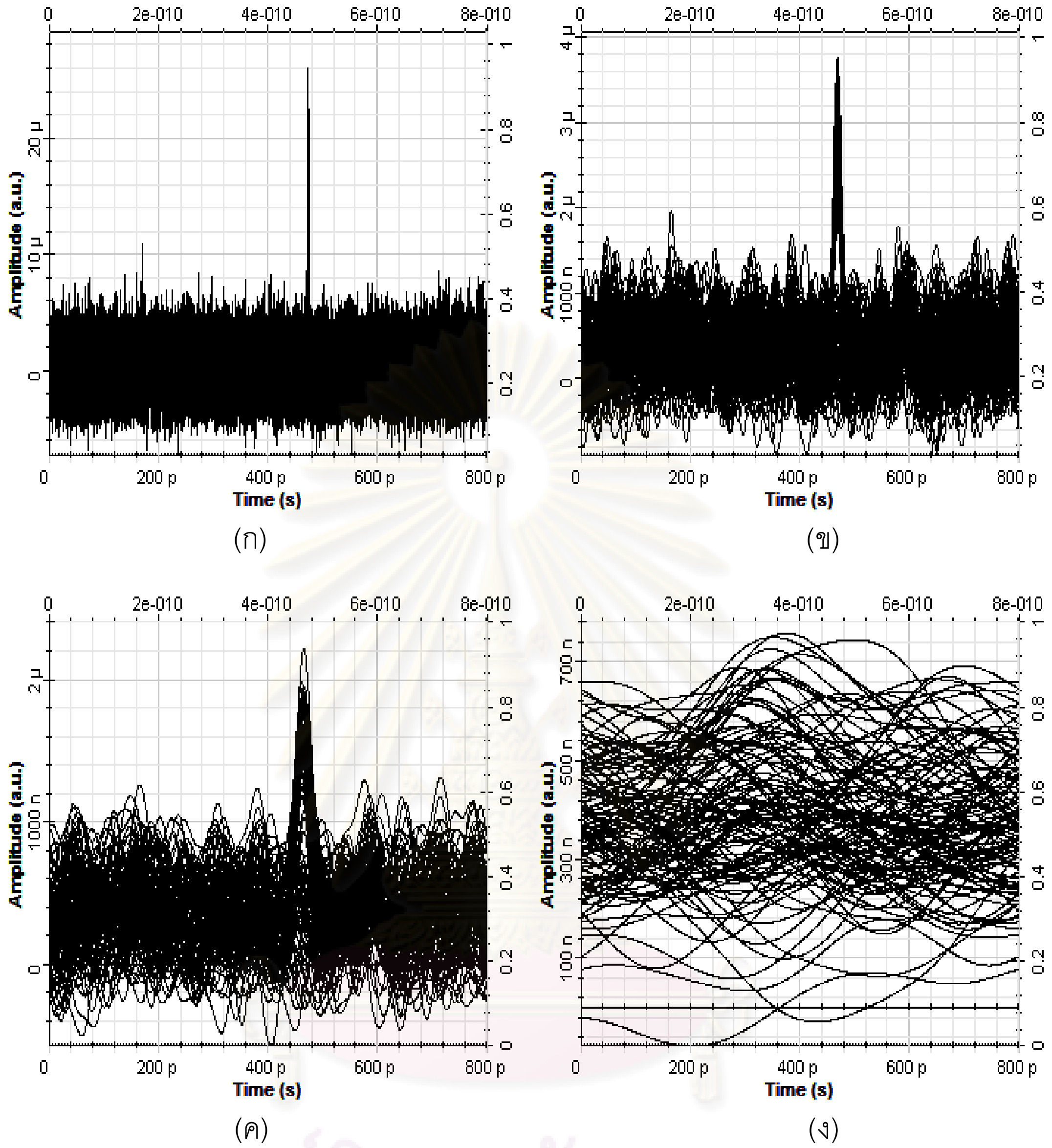
ตารางที่ 4.8 ความกว้างพัลส์ FWHM ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน

แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ (GHz)	ความกว้างพัลส์ FHWM (ps)
แบนด์วิดท์ไม่จำกัด	2.42
20	16.96
10	43.17
1.25	-

ตารางที่ 4.9 BER ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 และกำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน

แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ (GHz)	BER
แบนด์วิดท์ไม่จำกัด	1.20×10^{-4}
20	1.54×10^{-3}
10	1.08×10^{-2}
1.25	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 Eye-diagram ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่ใช้ รหัส#3 ในระบบ OCDMA-PON ที่มีผู้ใช้บริการ 16 รายที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน (ก) แบนด์วิดท์ไม่จำกัด (ข) 20 GHz (ค) 10 GHz (ง) 1.25 GHz

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดลองส่งสัญญาณ OCDMA-PON ในระบบที่มีผู้ใช้บริการ 4 8 และ 16 ราย ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อกำลังของสัญญาณแสงที่ตัวรับลดน้อยลงทำให้ความต่างระหว่างบิต “1” และ “0” ลดน้อยลง ทำให้ค่า BER ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.1) เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ปัจจัยที่ทำให้กำลังของสัญญาณแสงที่ตัวรับลดน้อยลงนอกจากอัตราการแบ่งสัญญาณที่ต่างกันแล้ว ยังมีผลของแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำที่ใช้ด้วย ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อที่ 4.4-4.6

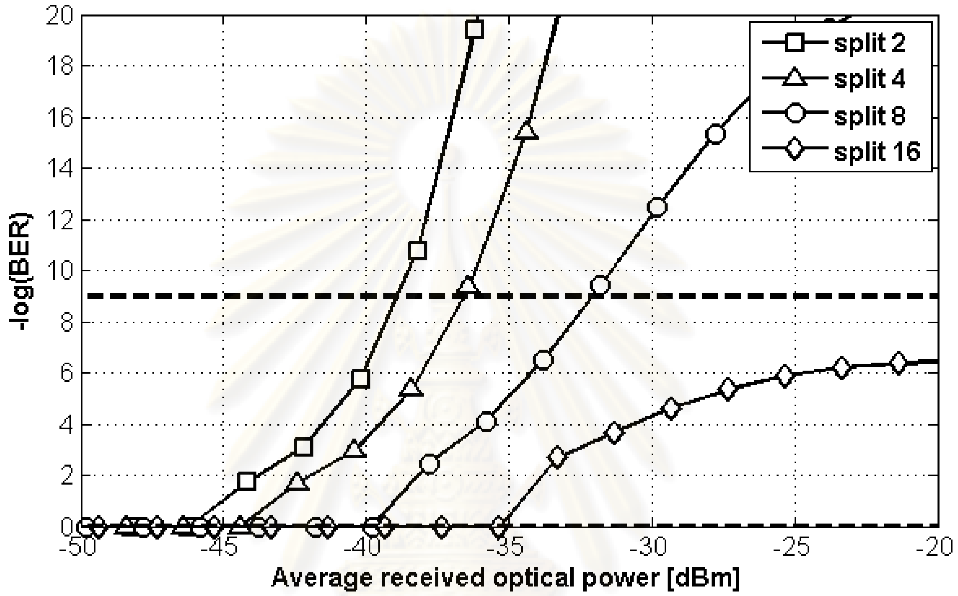
4.4 สมรรถนะของ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 ราย โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ไม่จำกัด

ในหัวข้อที่แล้วได้ทำการจำลองสัญญาณของระบบ OCDMA-PON โดยใช้กำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm /ผู้ใช้บริการ 1 ราย มี split ratio และใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำต่างกัน เพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณทางเวลาของ ACP โดยเมื่อ split ratio ที่สูงและใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์แคบ จะทำให้กำลังของสัญญาณ ACP ต่ำลง และส่งผลให้ค่า BER สูงขึ้นตามทฤษฎี

สำหรับหัวข้อนี้จะพิจารณาค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่ตัวรับกับค่า BER เพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่า BER ของผู้ใช้บริการในระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการต่างกัน ในที่นี้จะใช้แบบจำลองในรูปที่ 4.1 โดยที่ค่า N เท่ากับ 2 4 8 และ 16 รายตามลำดับ ใช้ตัวส่งสัญญาณส่งสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1,490 nm ที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps/ผู้ใช้บริการ 1 ราย ส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวความยาว 20 km ค่าคงตัวของการลดทอนของเส้นใยแสงเท่ากับ 0.2 dB/km ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ 13.79 ps/nm·km ค่าความชันดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ 0.0642 $\text{ps/nm}\cdot\text{km}^2$ และเส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยความชันดิสเพอร์ชันความยาว 263.09 m ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ -1,048.56 ps/nm$\times$km ค่าความชันดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ -4.8825 $\text{ps/nm}\times\text{km}^2$ เมื่อสัญญาณของผู้ใช้บริการแต่ละรายถูก decode อย่างถูกต้องแล้วก็จะแปลง ACP จากสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ PIN โดยในกรณีนี้จะใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ไม่จำกัดในการกรองสัญญาณ

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า BER ที่วัดได้จาก ACP หลังผ่านวงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ไม่จำกัด โดยเลือกผู้ใช้บริการรายที่มี BER แย่ที่สุดของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 รายตามลำดับ กับค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณแสงในช่วงเวลา 1 คาบของบิตที่เครื่องรับหลังจากผ่าน decoder จะเห็นได้ว่าเมื่อกำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับมากขึ้นทำให้ค่า BER ดีขึ้น โดยผู้ใช้บริการทุกรายมีค่า BER น้อยกว่า 10^{-9} ที่ค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเท่ากับ -38.9 dBm สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 ราย ค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายมีค่าน้อยกว่า 10^{-9} ที่กำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเท่ากับ -36.57 dBm สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 4 ราย ค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายมีค่าน้อยกว่า 10^{-9} ที่ค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเท่ากับ -32.1 dBm สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 8 ราย และค่า BER มีแนวโน้มน้อยลงเรื่อยๆเมื่อเพิ่มกำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับให้มากขึ้น และสำหรับระบบที่มี

ผู้ใช้บริการ 16 รายมีค่า BER มากกว่า 10^{-9} ที่ทุกค่าของกำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับ โดยมีค่า BER ลดลงเข้าสู่ 10^{-7} เมื่อกำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นอกจากนี้แล้วผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้ 8 ราย มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณจากสมการดังแสดงในรูปที่ 3.15 ที่สามารถรองรับผู้ใช้บริการได้ 9 ราย

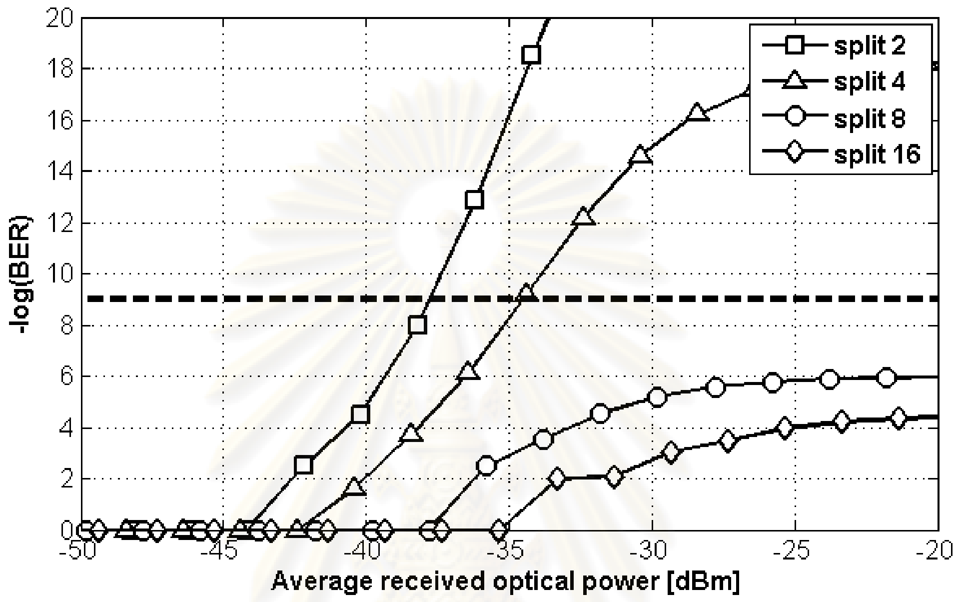


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของ BER ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่มีค่า BER แย่ที่สุดจากระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 รายตามลำดับ กับค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ไม่จำกัด

4.5 **สมรรถนะของ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 ราย โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 GHz**

เมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำลง มีผลทำให้คุณภาพของสัญญาณลดลง เนื่องจากองค์ประกอบความถี่สูงของ ACP ถูกกำจัดทิ้งไปดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1 เมื่อพิจารณาระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 ราย ค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายมีค่าน้อยกว่า 10^{-9} ที่ค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเท่ากับ -37.79 dBm เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.11 dB เมื่อเทียบกับกรณีแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำไม่จำกัด สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 4 ราย ค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายมีค่าน้อยกว่า 10^{-9} ที่ค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเท่ากับ -34.51

dBm เพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.06 dB เมื่อเทียบกับกรณีแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำไม่จำกัด และค่า BER มีแนวโน้มน้อยลงเรื่อยๆเมื่อเพิ่มกำลังส่งสัญญาณให้มากขึ้น สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 8 และ 16 ราย มีค่า BER มากกกว่า 10^{-9} ที่ทุกค่าของกำลังของสัญญาณแสงตัวรับดังแสดงในรูปที่ 4.9

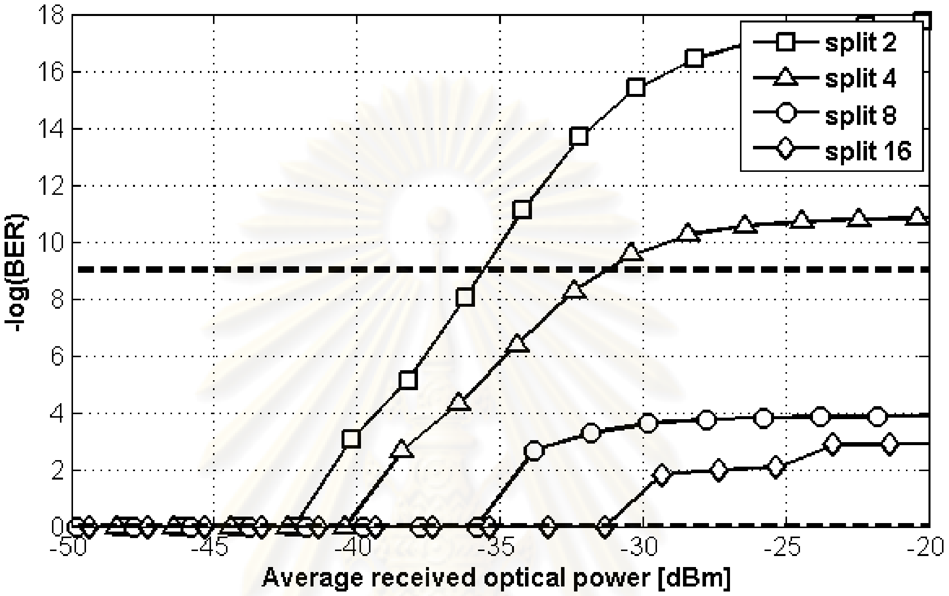


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของ BER ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่มีค่า BER แย่ที่สุดจากระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 รายตามลำดับ กับค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 GHz

4.6 สมรรถนะของ OCDMA-PON สำหรับผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 ราย โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 10 GHz

เมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำลงมาอีกที่ 10 GHz ทำให้ ACP มีค่าน้อยลงส่งผลให้ค่า BER ที่วัดได้ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 รายนั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 ราย ค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายมีค่าน้อยกว่า 10^{-9} ที่ค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเท่ากับ -37.76 dBm เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.14 dB เมื่อเทียบกับกรณีแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำไม่จำกัด สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 4 ราย ค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายมีค่าน้อยกว่า 10^{-9} ที่ค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่

เครื่องรับเท่ากับ -34.5 dBm เพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.07 dB เมื่อเทียบกับกรณีแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำไม่จำกัด และค่า BER มีแนวโน้มน้อยลงเรื่อยๆเมื่อเพิ่มกำลังส่งสัญญาณให้มากขึ้น สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 8 และ 16 ราย มีค่า BER มากกว่า 10^{-9} ที่ทุกค่าของกำลังของสัญญาณแสงตัวรับดังแสดงในรูปที่ 4.10



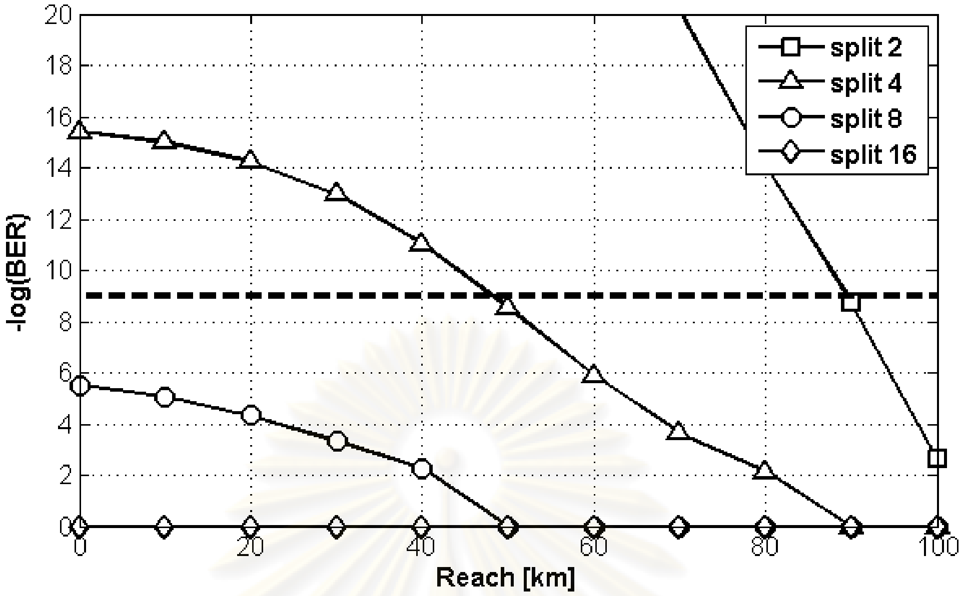
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของ BER ของ ACP ของผู้ใช้บริการที่มีค่า BER แย่ที่สุดจากระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 รายตามลำดับ กับค่ากำลังของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เครื่องรับเมื่อใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 10 GHz

ผลของการส่งสัญญาณ OCDMA-PON โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์ต่างกันที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 4.4-4.6 แสดงให้เห็นว่า การใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์มากจะทำให้ได้ค่า BER ที่ดีกว่า เนื่องจากทุกองค์ประกอบความถี่ของ ACP ดังกล่าวจะผ่านวงจรกรองไปได้มากกว่า ทำให้ ACP มีกำลังของสัญญาณที่สูง และมีความต่างของบิต “1” และ ”0” ณ ตำแหน่งกึ่งกลางบิตสูงที่สุด (eye-opening กว้างที่สุด) ทำให้ค่ามี BER น้อยที่สุดด้วย ดังแสดงในระบบที่มีผู้ใช้บริการ 8 รายสามารถให้บริการที่ค่า BER น้อยกว่า 10^{-9} เมื่อใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำแบบไม่จำกัด แต่เมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำเหลือ 20 GHz และ 10 GHz ทำให้ไม่สามารถให้บริการได้ที่ค่า BER น้อยกว่า 10^{-9} ที่ทุกค่าของกำลังของสัญญาณแสงที่ตัวรับ

4.7 ระยะทางไกลที่สุดของระบบ OCDMA-PON ที่สามารถให้บริการได้

ในส่วนนี้จะทำการหาระยะทางที่ไกลที่สุดในการวางเส้นใยแสงเชื่อมต่อระหว่าง OLT กับ ONU สำหรับระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 2, 4, 8 และ 16 รายตามลำดับที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps ต่อผู้ใช้บริการ 1 ราย โดยใช้กำลังส่งสัญญาณ peak power คงที่ที่ 10 dBm และใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 GHz โดยมีเงื่อนไขที่ว่าค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายต้องมีค่ามากที่สุดไม่เกิน 10^{-9} ซึ่งระยะทางที่ไกลที่สุดของแต่ละระบบจะถูกจำกัดโดยค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่า BER มากที่สุด (แต่อย่างไรก็ตามต้องมีค่าไม่เกิน 10^{-9}) ทำให้สามารถรับประกันได้ว่าผู้ใช้บริการรายอื่นๆในระบบยังคงสามารถสื่อสารข้อมูลโดยมีค่า BER ไม่เกิน 10^{-9} โดยรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการให้บริการของระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 2 4 8 และ 16 รายกับค่า BER ที่ของผู้ใช้บริการในระบบที่แย่ที่สุด ซึ่งระยะทางที่ไกลสุดที่สามารถให้บริการได้สำหรับทุกระบบแสดงดังตารางที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า BER มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆเมื่อเพิ่มระยะทางในการส่งสัญญาณเนื่องมาจากมีการสูญเสียกำลังของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงตามสมการ (2.3) ดังนั้นกำลังของสัญญาณ ACP ที่ได้นั้นมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ทำให้ความต่างของบิต “1” และ ”0” ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของ ACP มีน้อยลง ทำให้ค่า BER ที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ระยะทางที่สุดที่สามารถให้บริการได้สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 และ 4 รายเท่ากับ 89 และ 48.5 km ในขณะที่ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 8 และ 16 ราย ไม่สามารถให้บริการได้เนื่องจากค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายในระบบมีค่ามากกว่า 10^{-9}

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการให้บริการได้กับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่า BER แย่ที่สุด

ตารางที่ 4.10 ระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถให้บริการได้ของระบบ OCDMA-PON

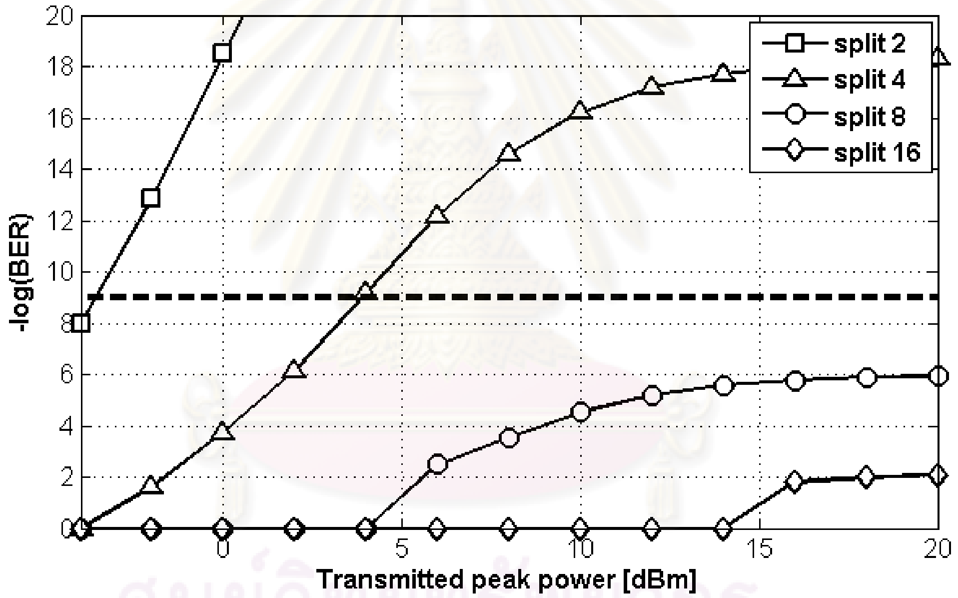
จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ (คน)	ระยะทางที่ไกลที่สุด (km)
2	89
4	48.5
8	-
16	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.8 กำลังส่งสัญญาณ peak power น้อยที่สุดของระบบ OCDMA-PON ที่สามารถให้บริการได้

ในส่วนนี้จะทำการหากำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดสำหรับผู้ใช้บริการแต่ละรายสำหรับระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 2, 4, 8 และ 16 รายตามลำดับที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps ต่อผู้ใช้บริการ 1 รายเป็นระยะทาง 20 km และใช้วงจรกรองผ่านต่ำที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 GHz โดยมีเงื่อนไขเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 4.4 รูปที่ 4.12 แสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งสัญญาณ peak power ของระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 2, 4, 8 และ 16 รายกับค่า BER ที่ของผู้ใช้บริการในระบบที่แย่ที่สุด ซึ่งกำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการได้สำหรับทุกระบบแสดงดังตารางที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า BER มีค่าลดน้อยลงเรื่อยๆเมื่อเพิ่มกำลังส่งสัญญาณมากขึ้น ดังนั้นกำลังของสัญญาณ ACP ที่ได้นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ความต่างของบิต “1” และ ”0” ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของ ACP มีมากขึ้น ทำให้ค่า BER ที่คำนวณได้มีค่าน้อยลง ทั้งนี้กำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการได้สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 และ 4 รายเท่ากับ -3.5 และ 4 dBm ในขณะที่ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 8 และ 16 ราย ไม่สามารถให้บริการได้เนื่องจากค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายในระบบมีค่ามากกว่า 10^{-9} สำหรับทุกค่าของกำลังส่งสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งสัญญาณ peak power กับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่า BER แย่ที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 กำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการได้ของระบบ OCDMA-PON

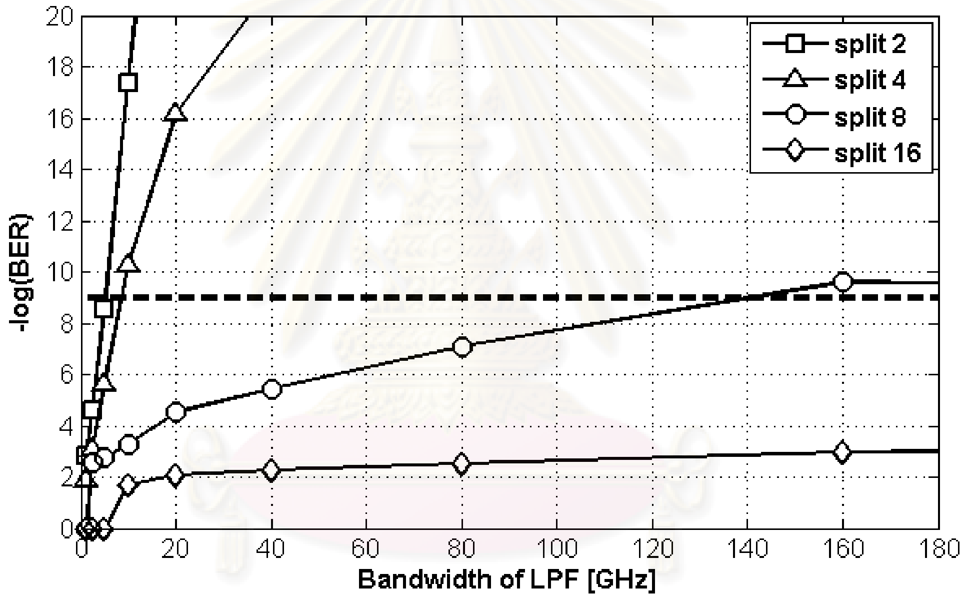
จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ (คน)	กำลังส่งสัญญาณ peak power (dBm)
2	-3.5
4	4
8	-
16	-

4.9 แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำในระบบ OCDMA-PON ที่สามารถให้บริการได้

ในส่วนนี้จะทำการหาแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่ใช้ได้สำหรับผู้ใช้บริการแต่ละรายสำหรับระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 2, 4, 8 และ 16 รายตามลำดับที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps ต่อผู้ใช้บริการ 1 รายเป็นระยะทาง 20 km และใช้กำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm โดยมีเงื่อนไขเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 4.4 รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำของระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 2, 4, 8 และ 16 รายกับค่า BER ที่ของผู้ใช้บริการในระบบที่แย่ที่สุด ซึ่งแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้สำหรับทุกระบบแสดงดังตารางที่ 4.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า BER มีค่าลดน้อยลงเรื่อยๆเมื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำให้มากขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณถูกกรองออกไปน้อยลง ทำให้กำลังของสัญญาณ ACP ที่ได้นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ให้ความต่างของบิต “1” และ ”0” ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของ ACP มีมากขึ้น ทำให้ค่า BER ที่คำนวณได้มีค่าน้อยลง ทั้งนี้แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่ให้บริการได้สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2, 4 และ 8 รายเท่ากับ 5.27, 8.65 และ 141.1 GHz ในขณะที่ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 16 ราย ไม่สามารถให้บริการได้เนื่องจากค่า BER ของผู้ใช้บริการทุกรายในระบบมีค่ามากกว่า 10^{-9} สำหรับทุกค่าของแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.13

การเพิ่มแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำให้สูงขึ้นถึง 141.1 GHz ทำให้สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการได้ถึง 8 รายตามข้อจำกัดของ encoder/decoder ที่ใช้จำนวนชิปเท่ากับ 511

ชิป ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และ 3.19 เนื่องจากพัลส์แสงจะมีขนาดแคบและมีกำลังของสัญญาณที่สูง องค์ประกอบความถี่สูงไม่ถูกกรองทิ้งออกไปมากนัก ค่าของ P_d ที่ใช้ในการคำนวณในสมการที่ (3.21) จึงมีค่ามากขึ้นและทำให้ค่า BER ลดน้อยลง สำหรับระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 16 รายไม่สามารถให้บริการด้วยค่า BER ที่น้อยกว่า 10^{-9} ถึงแม้ว่าจะเพิ่มแบนด์วิดท์ของวงจรผ่านต่ำมากขึ้นเรื่อยๆก็ตาม เนื่องมาจากข้อจำกัดของ σ^2_{beat-1} และ σ^2_{MAI} ที่เกิดจากการใช้ encoder/decoder ที่ใช้จำนวนชิปเท่ากับ 511 ชิปทำให้สามารถรองรับจำนวนผู้ให้บริการมากที่สุดเท่ากับ 8 รายดังแสดงในรูปที่ 3.15 อย่างไรก็ตามการเพิ่มแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำให้สูงขึ้นเป็นการเพิ่มต้นทุนของระบบเนื่องมาจากความซับซ้อนในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูง



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำที่ใช้ได้กับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่า BER แย่ที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้ของระบบ OCDMA-PON

จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ (คน)	แบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำ (GHz)
2	5.27
4	8.65
8	141.1
16	-

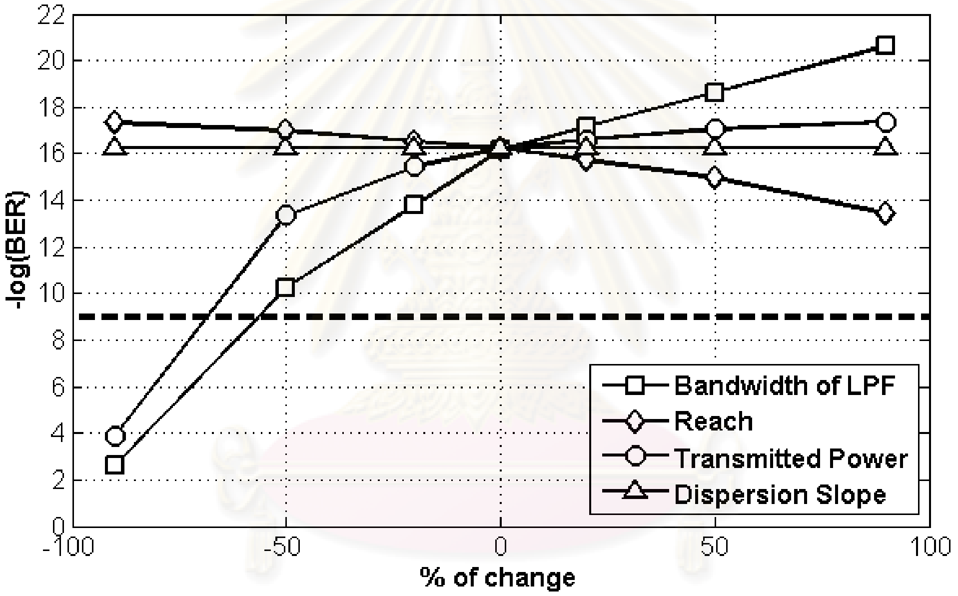
4.10 ความไวของสมรรถนะต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ OCDMA-PON

ในหัวข้อที่ 4.4-4.6 ได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของ BER เมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในการส่งสัญญาณ ได้แก่ ระยะทางในการให้บริการ กำลังส่งสัญญาณ peak power และแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ ซึ่ง BER จะมีค่าลดน้อยลงก็ต่อเมื่อลดระยะทางในการส่งสัญญาณให้สั้นลง, เพิ่มกำลังส่งสัญญาณให้มากขึ้น และเพิ่มแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำให้มากขึ้น แต่ทั้งนี้ไม่ได้มีการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆว่าค่าพารามิเตอร์ใดมีผลต่อค่า BER มากกว่ากัน โดยในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์แต่ละตัวที่ส่งผลต่อค่า BER สำหรับระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 4 และ 8 ราย ตามลำดับ

4.10.1 ความไวของสมรรถนะต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการ 4 ราย

ในเบื้องต้นทำการจำลองส่งสัญญาณโดยมีผู้ใช้บริการในระบบเท่ากับ 4 ราย กำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ความยาวของเส้นใยแสงเท่ากับ 20 km และแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำเท่ากับ 20 GHz ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงกับค่า BER แสดงดังในรูปที่ 4.14 โดยเมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำลง 90% ค่า BER เพิ่มขึ้นจาก 10^{-17} เหลือ 10^{-3} เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นประมาณ 10^{-14} เท่า ในขณะที่เมื่อเพิ่มแบนด์วิดท์สูงขึ้น 90% ค่า BER ลดลงจาก 10^{-17} เป็น 10^{-21} เปลี่ยนแปลงลดลงประมาณ 10^{4} เท่า เป็น

ต้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างกับค่า BER ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนเท่าแสดงดังตารางที่ 4.13 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ, กำลังส่งสัญญาณ, ค่าความชันดิสเพอร์ชันและการเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณให้ไกลขึ้นจะทำให้ค่า BER เพิ่มสูงขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า BER มากที่สุดก็คือแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ ซึ่งเมื่อลดแบนด์วิดท์ลง 90% จะทำให้ค่า BER เพิ่มขึ้นถึง 3.45×10^{13} เท่า ในทำนองเดียวกันเมื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ, กำลังส่งสัญญาณ ค่าความชันดิสเพอร์ชันและการลดระยะทางการส่งสัญญาณให้สั้นลงจะทำให้ค่า BER ลดน้อยลง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของค่า BER มากที่สุดก็คือแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ ซึ่งเมื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ขึ้น 90% จะทำให้ค่า BER ลดลงถึง 2.98×10^{4} เท่า



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆกับค่า BER ของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 4 ราย

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

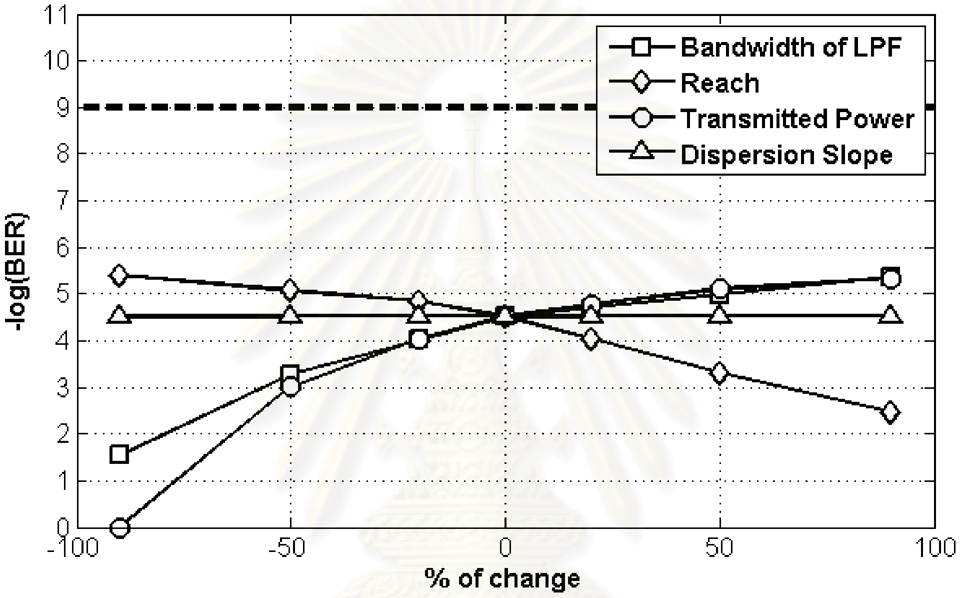
ตารางที่4.13 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างกับค่า BER ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนเท่าของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 4 ราย

อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)	ค่า BER ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนเท่า			
	แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ	ระยะทาง	กำลังส่งสัญญาณ peak power	ค่าความชันดิสเพอร์ชัน
-90	$+3.45\times10^{13}$	-12	$+2.33\times10^{12}$	+0.99
-50	$+8.04\times10^{5}$	-5.58	+715.23	+0.98
-20	+231.53	-1.99	+5.94	+0.98
0	0	0	0	0
20	-9.97	+3.23	-2.39	-1
50	-305	+19.15	-6.95	-1.01
90	-2.98×10^{4}	+669.59	-14.6	-1.01

4.10.2 ความไวของสมรรถนะต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการ 8 ราย

ในหัวข้อนี้ทำการจำลองส่งสัญญาณโดยมีผู้ใช้บริการในระบบเท่ากับ 8 ราย กำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ความยาวของเส้นใยแสงเท่ากับ 20 km และแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำเท่ากับ 20 GHz ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงกับค่า BER แสดงดังในรูปที่ 4.15 โดยเมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำลง 90% ค่า BER เพิ่มขึ้นจาก 10^{-5} เป็น 10^{-2} เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 10^{3} เท่า ในขณะที่เมื่อเพิ่มแบนด์วิดท์สูงขึ้น 90% ค่า BER ลดลงจาก 10^{-5} เป็น 10^{-6} เปลี่ยนแปลงลดลงประมาณ 10 เท่า เป็นต้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างกับค่า BER ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนเท่าแสดงดังตารางที่ 4.9 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าเมื่อลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ, กำลังส่งสัญญาณ, ค่าความชันดิสเพอร์ชันและการเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณให้ไกลขึ้นจะทำให้ค่า BER เพิ่มสูงขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า BER มากที่สุดก็คือกำลังในการส่งสัญญาณ ซึ่งเมื่อลดกำลังส่งสัญญาณลง 90% จะทำให้ค่า BER เพิ่มขึ้นถึง 3.24×10^{4} เท่า ในขณะที่การลดแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำและค่าความชันดิสเพอร์ชันให้น้อยลง 90% และการเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณให้ไกลขึ้น 90% จะทำให้ค่า BER

เพิ่มขึ้น 925.32, 0.98 และ 107.79 เท่าตามลำดับ ในทำนองเดียวกันเมื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ กำลังส่งสัญญาณ ค่าความชันดิสเพอร์ชันและการลดระยะทางการส่งสัญญาณให้สั้นลงจะทำให้ค่า BER ลดน้อยลง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของค่า BER มากที่สุดก็คือการลดระยะทางการส่งสัญญาณให้สั้นลง ซึ่งเมื่อลดระยะทางลง 90% จะทำให้ค่า BER ลดลงถึง 8.11 เท่า ในขณะที่การเพิ่มแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ กำลังส่งสัญญาณ และค่าความชันดิสเพอร์ชันมากขึ้น 90% จะทำให้ค่า BER ลดลง 7.06 6.75 และ 1 เท่าตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆกับค่า BER ของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 8 ราย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างกับค่า BER ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนเท่าของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 8 ราย

อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ (%)	ค่า BER ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนเท่า			
	แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำ	ระยะทาง	กำลังส่งสัญญาณ peak power	ค่าความชันดิสเพอร์ชัน
-90	+925.32	-8.11	$+3.24\times10^{4}$	+0.98
-50	+17.24	-3.59	+31.23	+0.99
-20	+3.13	-2.18	+2.94	+0.99
0	0	0	0	0
20	-1.59	+2.92	-1.86	-1
50	-2.96	+15.94	-3.94	-1.01
90	-7.06	+107.92	-6.75	-1.01

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

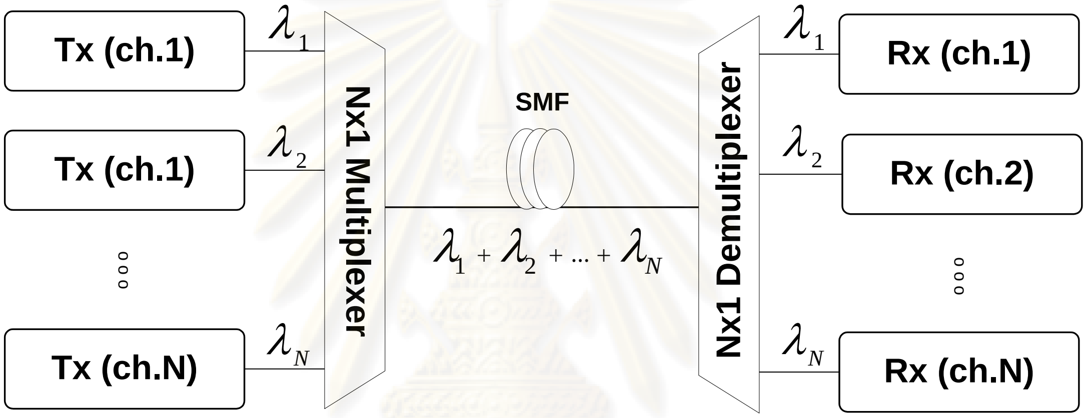
การส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ด้วยเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ

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

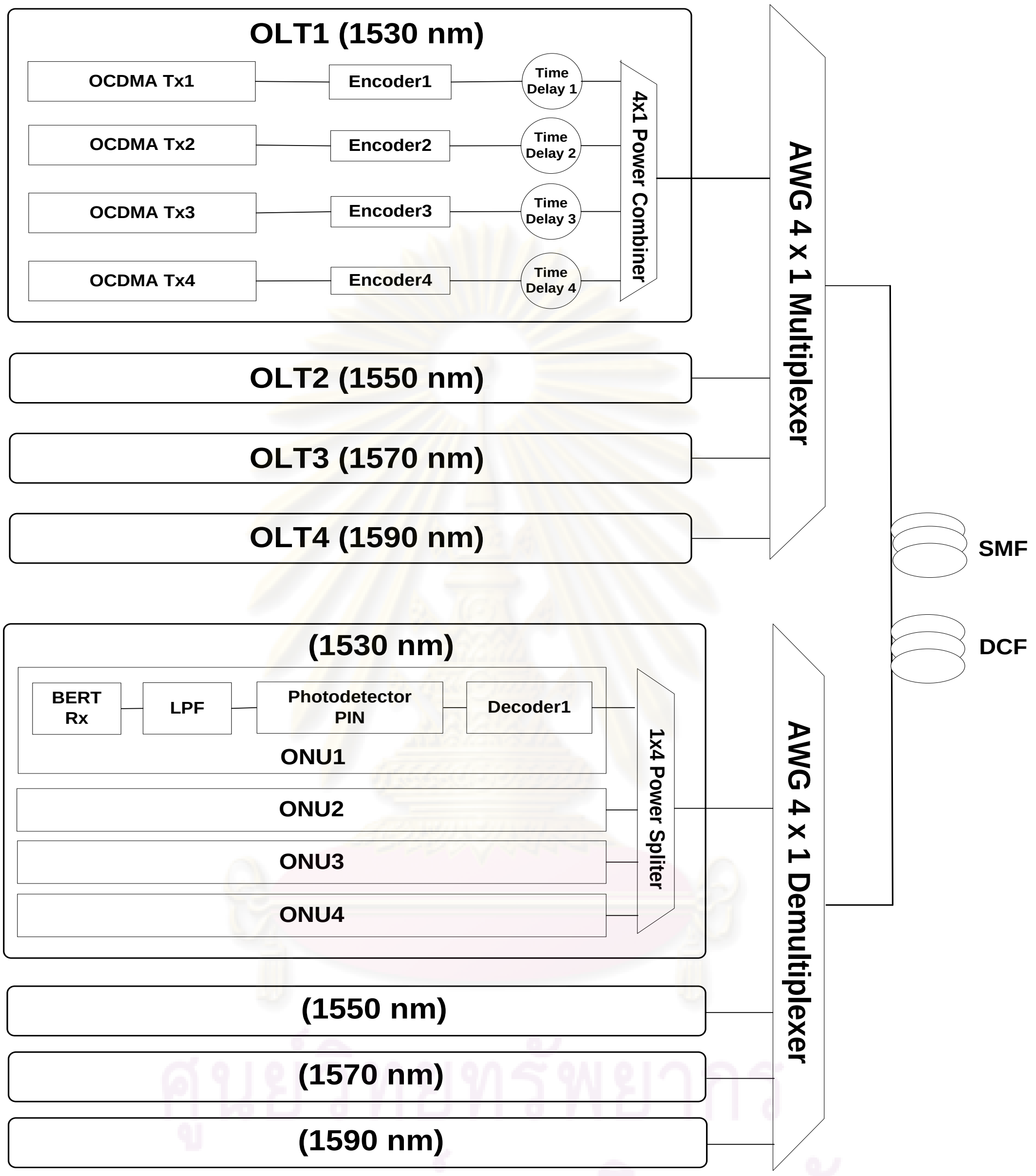


รูปที่ 5.1 ระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ

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·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×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 $\times 10^{-12}$ 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

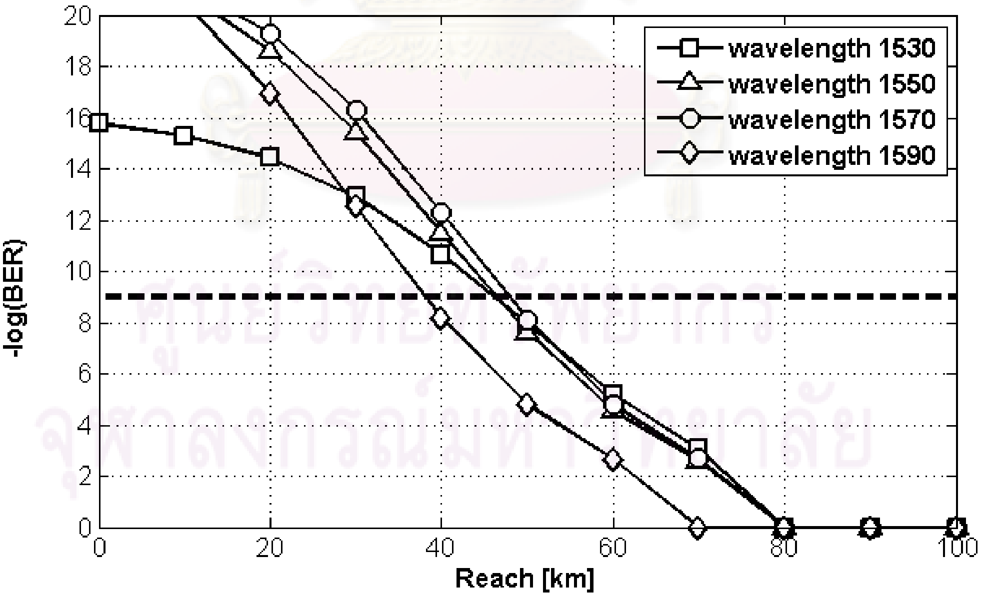
สำหรับการส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมของผู้ใช้บริการในแต่ละความยาวคลื่นนั้นอาจใช้การเข้าถึงข้อมูลแบบ TDMA เนื่องจากในระบบ OCDMA นั้นต้องใช้ MLLD เป็นตัวกำเนิดแสงและสร้างพัลส์แสงที่แคบมากเพื่อใช้ในการเข้ารหัสแบบ time-spreading OCDMA ทำให้ต้นทุนของ ONU เพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วแนวโน้มการใช้บริการของผู้ใช้บริการมักจะดาวน์โหลดข้อมูลมากกว่าที่จะอัพโหลดข้อมูล 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 $4\times4 = 16$ รายในระยะทางที่ไกลที่สุดเท่ากับ 38.17 km โดยระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 5.1



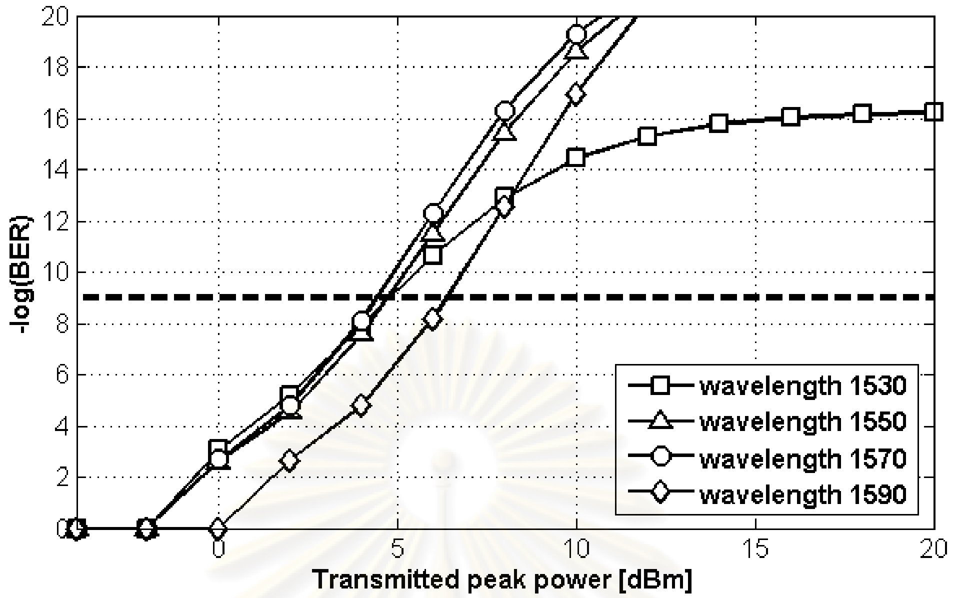
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการให้บริการกับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่าบิตผิดพลาดแย่ที่สุดในแต่ละความยาวคลื่น

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 $4\times4 = 16$ ราย โดยกำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งสัญญาณ peak power กับค่า BER ของผู้ใช้บริการรายที่มีค่าค่า BER แย่ที่สุดในแต่ละความยาวคลื่น

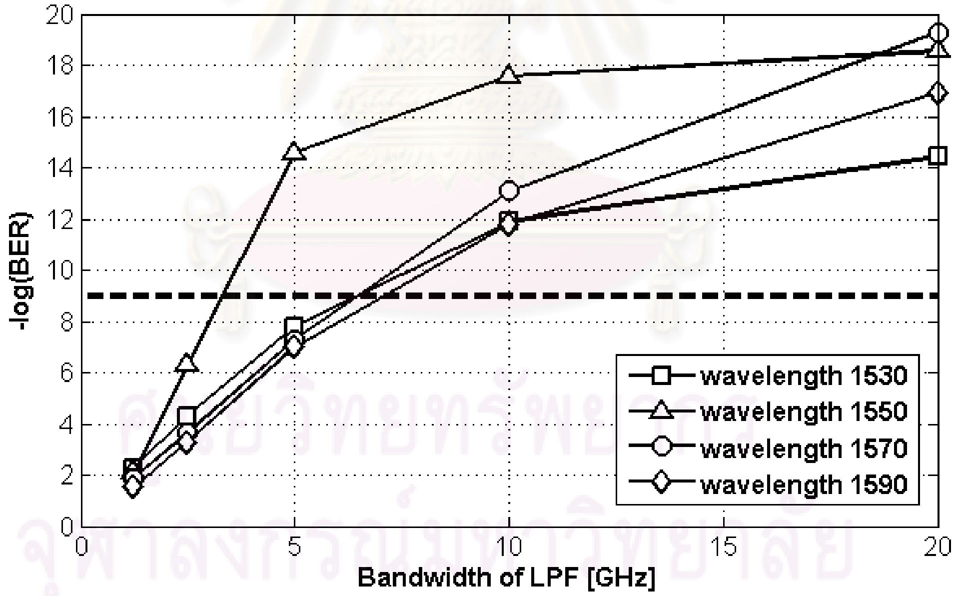
ตารางที่ 5.2 กำลังส่งสัญญาณ peak power ที่น้อยที่สุดของวงจรกรองผ่านต่ำที่สามารถให้บริการได้ของแต่ละความยาวคลื่น

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

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการส่งสัญญาณ OCDMA มาใช้ร่วมกับ PON เพื่อวิเคราะห์หาจำนวนผู้ใช้บริการมากที่สุด และระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถให้บริการได้ เพื่อที่จะได้เปรียบเทียบว่าเทคโนโลยี OCDMA-PON ที่ได้ทำการศึกษานั้นว่ามีประสิทธิภาพมากกว่า FTTH ใช้เทคโนโลยี TDMA-PON แบบเดิมมากเพียงใด

จากการศึกษาในเชิงทฤษฎีปรากฏว่าในการส่งสัญญาณ OCDMA-PON ด้วยวิธี time-spreading โดยใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปหรือความยาวของ gold code เท่ากับ 511 ชิป ที่อัตราบิต 1.25 Gbps/ผู้ใช้บริการ 1 ราย จะสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้มากที่สุด 9 ราย ซึ่งปัญหาที่จำกัดประสิทธิภาพของระบบคือสัญญาณรบกวน MAI และ beat noise ที่เป็นตัวจำกัดประสิทธิภาพของระบบ ในการลดผลกระทบของ MAI และ beat noise ทางทฤษฎีทำได้โดยใช้ encoder/decoder ที่ใช้รหัสที่ยาวขึ้น แต่ในทางปฏิบัติแล้วถ้าต้องการใช้ encoder/decoder ที่ใช้รหัสที่ยาวขึ้นในขณะที่อัตราบิตของระบบคงเดิม ทำให้จำนวนชิปในช่วงเวลา T_{Bit} มีมากขึ้น ระยะเวลาของชิป T_C จะต้องน้อยลงเพื่อให้สัญญาณที่ถูก encode นั้นถูกแผ่ทางเวลาอยู่ในช่วงเวลาของ T_{Bit} เช่นเดิม จึงจะต้องใช้ตัวกำเนิดแสงที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิมที่สามารถสร้างพัลส์ที่แคบกว่าเดิม ทำให้ต้นทุนของระบบสูงขึ้น หรือในทางกลับกันต้องลดอัตราบิตของระบบลงเพื่อให้ T_{Bit} กว้างมากพอที่จะทำให้สัญญาณที่ถูก encode ด้วย en/decoder ที่มีจำนวนชิปเพิ่มมากขึ้นนั้นถูกแผ่ทางเวลาอยู่ในช่วงเวลาของ T_{Bit} เช่นเดิม ทำให้สามารถใช้ตัวกำเนิดแสงตัวเดิมได้ ซึ่งส่งผลให้สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตที่น้อยลง ทั้งนี้แนวทางในการออกแบบระบบควรจะเริ่มจากพิจารณาถึงจำนวนผู้ใช้บริการในระบบ เพื่อที่จะได้คำนวณหาความยาวของรหัสที่ใช้สำหรับ en/decoder ที่เหมาะสม จากนั้นเลือกอัตราบิตในการให้บริการเพื่อที่จะนำไปคำนวณหาความกว้างของพัลส์แสงของตัวกำเนิดแสงที่ต้องใช้ในการส่งสัญญาณ เป็นต้น

ผลจากการ simulation การส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps/ผู้ใช้บริการ 1 ราย และใช้ en/decoder ที่มีจำนวนชิปเท่ากับ 511 ชิป โดยมีจำนวนผู้ใช้ในระบบเท่ากับ 2 4 8 และ 16 ตามลำดับ ในเบื้องต้นได้แสดงให้เห็นแล้วว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถส่งผ่านสัญญาณแบบ OCDMA ได้จริง เมื่อพิจารณาถึงสมรรถนะของระบบพบว่า เมื่อกำลังของ

สัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับต่ำลง ทำให้ค่า BER ที่คำนวณได้จากโปรแกรมนั้นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งปัจจัยที่ทำให้กำลังของสัญญาณแสง ACP ลดลงนั้นเกิดจากการลดทอนกำลังสัญญาณของแสงที่เดินทางในเส้นในแสง การลดกำลังส่งสัญญาณ การเพิ่มระยะทางของระบบ อัตราการแบ่งพลังงานแสงที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการในระบบซึ่งเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวน MAI และ beat noise นอกจากนี้ยังเกิดจากผลของแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำที่ใช้ในการรับสัญญาณแสง โดยแบนด์วิดท์ที่กว้างทำให้องค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณแสงสามารถผ่านไปได้เกือบหมด กำลังของสัญญาณจึงถูกลดทอนเพียงเล็กน้อย ทำให้ค่าที่วัดได้มีค่า BER น้อยกว่ากรณีที่ใช้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำที่แคบกว่า ผลจากการจำลองการส่งสัญญาณด้วยระบบดังกล่าวจะสามารถรองรับผู้ใช้บริการในระบบได้มากที่สุดเท่ากับ 8 เมื่อใช้กำลังส่งสัญญาณ peak power เท่ากับ 10 dBm ระยะทางให้บริการ 20 km และแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำเท่ากับ 141.1 GHz คนซึ่งสอดคล้องกับผลทางทฤษฎีที่สามารถรองรับผู้ใช้บริการได้ประมาณ 9 ราย

นอกจากนี้แล้วยังได้ทดลองส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON ด้วยการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแบบหยาบ 4 ความยาวคลื่นเพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการของระบบ โดยผู้ใช้บริการทั้ง 4 รายในแต่ละความยาวคลื่นจะถูกมัลติเพล็กซ์สัญญาณ OCDMA แล้วแต่ละความยาวคลื่นก็จะถูกมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นด้วยกันอีกที ผลการทดลองปรากฏว่าที่กำลังส่งสัญญาณ peak power 10 dBm/ผู้ใช้บริการ 1 รายจะสามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุด 38.17 km กำลังส่งสัญญาณ peak power ต่ำสุดต่อผู้ใช้บริการ 1 รายในการส่งสัญญาณ 20 km เท่ากับ 6.359 dBm และแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำน้อยที่สุดที่ใช้ในการส่งสัญญาณ 20 km เท่ากับ 7.102 GHz ตามลำดับ นอกจากนี้ เนื่องจากการส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมด้วยสัญญาณแบบ OCDMA ต้องใช้ตัวกำเนิดแสงที่มีประสิทธิภาพสูงมากในการสร้างสัญญาณอัพสตรีมที่ ONU ทำให้ต้นสูง การส่งข้อมูลแบบอัพสตรีมจึงได้นำเสนอให้ใช้ TDMA-PON เนื่องจากแนวโน้มการใช้บริการของผู้ใช้บริการนิยมที่จะดาวน์โหลดข้อมูลมากกว่าอัพโหลด จึงไม่ต้องการอัตราข้อมูลของการส่งสัญญาณแบบอัพสตรีมสูงมากนัก นอกจากนี้ยังมีต้นทุนของ ONU ที่ถูกกว่า จึงคาดว่าน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาในแง่ต้นทุนของระบบ

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ศึกษาเทคนิคการ encode/decode สัญญาณรวมไปถึงวิธีการลดผลกระทบของ beat noise เพื่อเพิ่มจำนวนจำนวนของผู้ใช้บริการให้มากขึ้นกว่าเดิม นอกจากนี้การลดต้นทุนของระบบโดยเฉพาะที่ ONU เพื่อเป็นแรงจูงใจให้ผู้ใช้บริการพิจารณาเลือกใช้บริการระบบ OCDMA-PON ก็เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาควบคู่ไปกับประสิทธิภาพของระบบและคุณภาพของอุปกรณ์ในโครงข่าย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] Keiser, G. Optical Fiber Communications. McGraw-Hill Higher Education, 2000

[2] Asatani, K. and Maeda, Y. Access Network Architectural Issues for Future Telecommunication Networks. IEEE Communications Magazine 36 (August 1998): 110–114.

[3] Maeda, Y. A Standardization Plan for Broadband Access Network Transport. IEEE Communications Magazine 7 (July 2001) : 166–172.

[4] International Telecom Union. V.90 : A digital modem and analogue modem pair for use on the Public Switched Telephone Network (PSTN) at data signalling rates of up to 56 000 bit/s downstream and up to 33 600 bit/s upstream [online]. 1999. Available from: http://www.itu.int/rec/T-REC-V.90-199809-I [2009, September]

[5] Fernando, X. Broadband Access Networks. Proceedings of International Conference on Signal Processing Communications, Chennai, 2008, pp 380-383, 2008.

[6] Sasaki, J. Mitsuishi, T. and Fmyu, Y. Cable and Wireless Hybrid Access Networks for Rural Residential Areas. Proceedings of International Conference on Electrical and Electronic Technology, 2001, pp 494-499, 2001.

[7] Shumate, P. W. Fiber-to-the-Home: 1977–2007. J. Lightwave. Technology 26 (May 2008) : 1093-1103.

[8] Ebihara, T. Understanding the Japanese Broadband Miracle [Online]. 2007. Available from http://www.itif.org/files/Ebihara_Japanese_Broadband.pdf [2009, September]

[9] Decusatis, C. Handbook of Fiber Optic Data Communication: A Practical Guide to Optical Networking. Elsevier Academic Press, 2008.

[10] Kitayama, K. Wang, X. and Wada, N. OCDMA over WDM PON – a solution path to gigabit-symmetric FTTH. J. Lightwave. Technology 24 (April 2006): 1654-1662.

[11] Wang. X. Recent progresses in OCDMA. Proceedings of International Conference on Transparent Optical Networks, Athens, 2008, pp 39-42, 2008.

[12] ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ. หลักการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่. พิมพ์ครั้งที่ 2 : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

[13] ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ. เทคโนโลยีสื่อสารไร้สาย CDMA (CDMA Technology). พิมพ์ครั้งที่ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

[14] Wang, X. Keys towards practical OCDMA networks. Proceedings of International Conference on Optoelectronics, Fiber Optics and Photonics, 2004, pp 1-6, 2004.

[15] Wang, X. Hamanaka, T. Wada, N. Nishiki, A. and Kitayama, K. 10-user, truly-asynchronous OCDMA experiment with 511-chip SSFBG en/decoder and SC-based optical thresholder. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference Technical Digest, 2005, 3pp, 2005

[16] Wang, X. Wada, N. Hamanaka, T. Miyazaki, T. Cincotti, G. and Kitayama, K. OCDMA over WDM Transmission. Proceedings of International Conference on Transparent Optical Networks, Rome, 2007, pp 110-113, 2007.

[17] Wang, X. Wada, N. and Kitayama. K. Inter-symbol interference and beat noise in flexible data-rate coherent OCDMA and the BER improvement by using optical thresholding. Optics Express 13 (2005): 10469-10474.

[18] Wang, X. and Kitayama, K. Analysis of beat noise in coherent and incoherent time-spreading OCDMA. J. Lightwave. Technology 22 (October 2004): 2226-2235.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[19] Wang, X. Matsushima, K. Nishiki, A. Wada, N. and Kitayama, K. High reflectivity superstructured FBG for coherent optical code generation and recognition. Optics Express 13 (2005) : 5457-5468.

[20] International Telecom Union. G.652, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. [online]. 2009. Available from : http://www.itu.int/itu-t/recommendations/index.aspx?ser=G [2009, October]

[21] Imai, T. Access Network Technology for Diverse Services. NTT Technical Review 3 (June 2005): 9-13.

[22] Agrawal, G. Applications of Nonlinear Fiber Optics (Optics and Photonics Series). Academic Press. 2001.

[23] Kazovsky, L., et al. Optical Fiber Communication Systems. Artech House, 1996.

[24] Gorshe, S. S. FTTH & FTTC Technologies and Standards. China Communications (December 2006) : 104-114.

[25] Chen, H. Zhang, Y. Wang, X. Wada, N. Miyazaki, T. Zhang, Y. and Xie, S. Multiuser asynchronous OCDMA system with different types of FBG based en/decoder. Proceedings of Opto-Electronics and Communications Conference and The Australian Conference on Optical Fibre Technology, Sydney 2008, pp 1-2, 2008.

[26] Wang, X. Wada, N. Hamanaka, T. and Kitayama, K. Dispersion flattened-fiber based optical thresholder for multiple-access-interference suppression in OCDMA system. Optics Express 13 (July 2005): 5499-5505.

[27] Cincotti, G. Wada, N. and Kitayama, K. Characterization of a full encoder/decoder in the AWG configuration for code-based photonic routers. Part I: Modelling and design. J. Lightwave. Technology 24 (January 2006): 103-112.

[28] Jiang, Z. Seo, D. Yang, S. Leaird, D. E. Roussev, R. V. Langrock, C. Fejer, M. M. and Weiner, A. M. Four-User, 2.5-Gb/s, Spectrally Coded OCDMA System

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Demonstration Using Low-Power Nonlinear Processing. J. Lightwave. Technology 23 (January 2005) : 143-158.

[29] Stock, A. and Sargent, E. H. The role of optical CDMA in access networks. IEEE Communications Magazine 40 (September 2002): 83-87.

[30] Wang, X. Hamanaka, T. Wada, N. and Kitayama, K. Dispertion-flattened-fiber based optical thresholder for multiple-access-interference suppression in OCDMA system. Optics Express 13 (July 2005): 5499-5505.

[31] Fathallah, H. Rusch, L. A. and LaRochelle, S. Passive optical fast frequency-hop CDMA communications system. J. Lightwave. Technology 17 (March 1999): 397-405.

[32] Tsuda, H. Takenouchi, H. Ishii, T. Okamoto, K. Gosh, T. and Amano, C. Photonic spectral encoder/decoder using an AWG for coherent optical code division multiplexing. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and The International Conference in Integrated Optics and Optical Fiber Communications, San Diego 1999, PD32/1 - PD32/3 Suppl. 1999.

[33] Galli, S. Menendez, S. Toliver, R. Banwell, P. Jackel, T. Young, J. and Etemad, J. DWDM compatible Spectrally Phase Encoded Optical CDMA. Proceedings of Global Telecommunications Conference, 2004, pp 1888-1894, 2004.

[34] Wang, X. and Wada, N. Experimental demonstration of OCDMA traffic over optical packet switching network with hybrid PLC and SSFBG en/decoders. J. Lightwave. Technology 24 (August 2006): 3012-3020.

[35] Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.3av-2009 [Online]. 2009. Available from: http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.3av-2009.pdf [September, 2010]

[36] Corning. Corning SMF-28 ULL Optical Fiber with Corning Ultra Low Loss Technology Product Information. [Online]. Available from: http://www.corning.com [September, 2010]

[37] Lee, J. H. Petropoulos, P. C. Ibsen, P. M. and Richardson, D.J. A grating-based OCDMA coding-decoding system incorporating a nonlinear optical loop mirror for improved code recognition and noise reduction. J. Lightwave. Technology 20 (January 2002) : 36-46

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

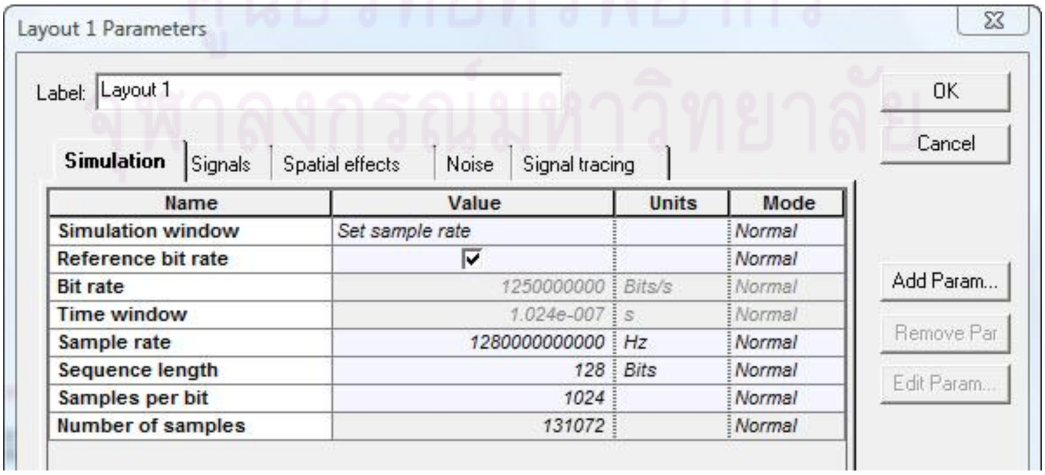
แบบจำลองการส่งสัญญาณ OCDMA-PON ที่ใช้ใน simulation

ในส่วนนี้จะแสดงแบบจำลองการส่งสัญญาณ OCDMA-PON ที่ใช้ในการ simulation ด้วยโปรแกรม Optisys รวมไปถึงการตั้งค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบที่ใช้ในการจำลองการส่งสัญญาณ ในส่วนแรกจะอธิบายถึง global parameter ซึ่งเป็นตัวกำหนดพารามิเตอร์หลักของระบบ เช่น อัตราบิต จำนวนบิตที่ใช้ในการส่งสัญญาณเป็นต้น ส่วนที่ 2 จะอธิบายถึง OLT ซึ่งประกอบไปด้วยตัวส่งสัญญาณแสง OCDMA และ encoder ส่วนที่ 3 จะกล่าวถึงเส้นใยแสงที่ใช้ ได้แก่ เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว ITU-T G.652.C และเส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดชดเชยความชันดิสเพอร์ชัน และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึง ONU ซึ่งประกอบไปด้วย decoder ตัวรับสัญญาณแสง วงจรกรองผ่านต่ำ และอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราบิตผิดพลาด ตามลำดับ

○ Global parameter

ก่อนที่จะเริ่มทำ simulation จะต้องมีการตั้งค่า global parameter เป็นอันดับแรก ได้แก่ อัตราบิตของระบบ (bit rate) จำนวนบิตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (sequence length) และอัตราการสุ่มในช่วงเวลา 1 คาบบิต (sample per bit) โดยระบบ OCDMA-PON ที่ได้ทำ simulation มีค่า global parameter แสดงดังรูปที่ ก.1 โดยมีอัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps sequence length เท่ากับ 256 บิต และจำนวน sample per bit เท่ากับ 1024 ตามลำดับ

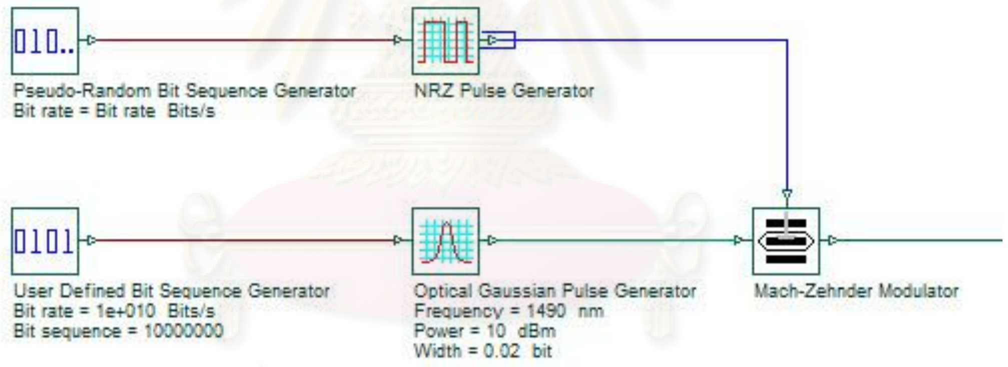
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.1 ค่า global parameter ที่กำหนดในระบบ OCDMA-PON

○ OLT

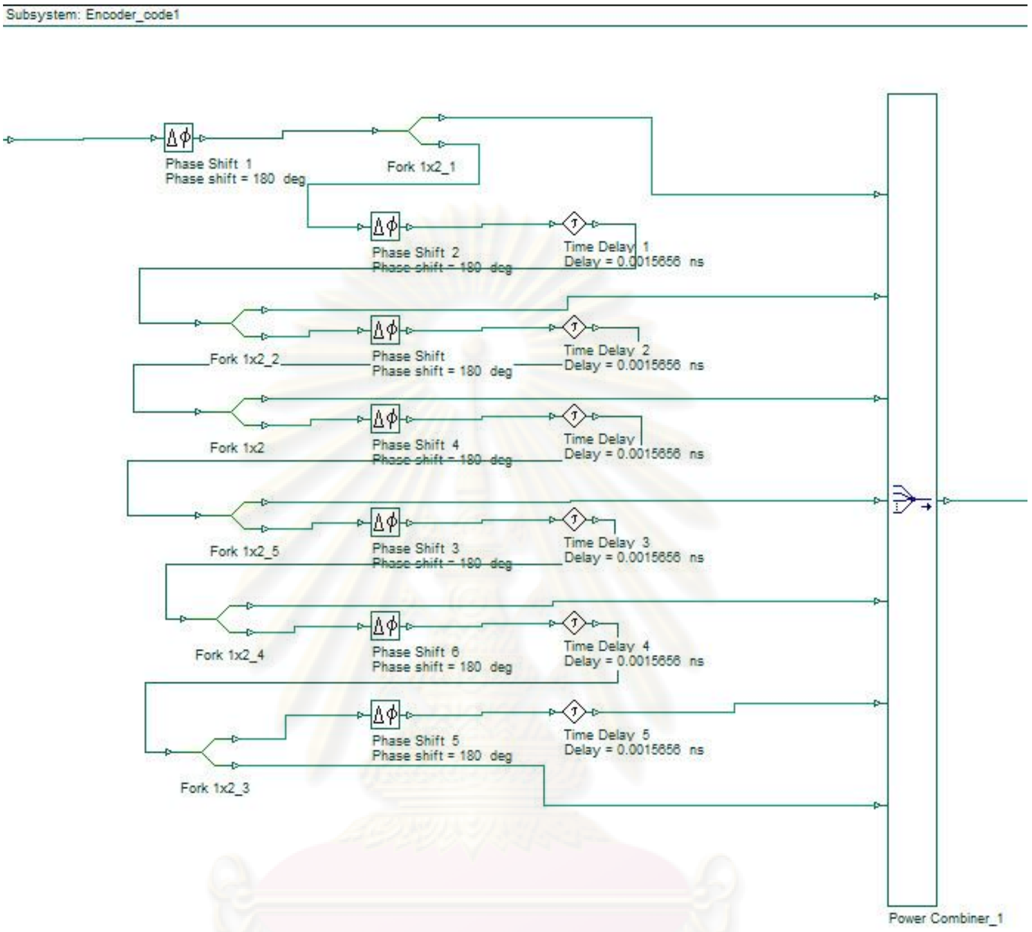
ในส่วนของ OLT จะประกอบไปด้วยตัวส่งสัญญาณของระบบ OCDMA จำนวน N ตัว ซึ่งแต่ละตัวจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังที่ได้อธิบายดังรูปที่ 2.16 โดยแบบจำลองตัวส่งสัญญาณของระบบ OCDMA ที่ใช้ simulation แสดงดังรูปที่ ก.2 กล่าวคือ สัญญาณไฟฟ้าแบบ NRZ สร้างจาก NRZ pulse generator โดยมีลำดับของบิตสัญญาณแบบสุ่มที่สร้างจาก psuedo-random bit sequence generator ที่อัตราบิตเท่ากับอัตราบิตของระบบที่ 1.25 Gbps สำหรับสัญญาณแสง จะมีลำดับของบิตสัญญาณที่สร้างจาก user-defined bit sequence generator ที่มีลำดับของบิตคงที่ที่ “10000000” และมีอัตราการสร้างบิตดังกล่าวเท่ากับ 10 Gbps เพื่อให้ optical Gaussian pulse generator (มีค่า width เท่ากับ 0.02 เพื่อให้ค่า FWHM มีค่าประมาณ 1.56 ps ตามที่ได้ออกแบบไว้ในตอนต้น) สร้างพัลส์แสงทุกๆ 800 ps ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.5.1 หลังจากนั้นสัญญาณแสงและสัญญาณไฟฟ้าจะถูกมอดูเลตด้วยอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณแบบความเข้มแสงตามลำดับ



รูปที่ ก.2 แบบจำลองตัวส่งสัญญาณของระบบ OCDMA ที่ใช้ใน simulation

สัญญาณแสงที่ออกจากอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะถูกเข้ารหัสแบบ coherent time-spreading ด้วย encoder ที่ได้จำลองขึ้นมา รูปที่ ก.3 แสดงตัวอย่างโครงสร้างภายในแบบจำลองของ encoder ที่มีจำนวนชิปเท่ากับ 7 ชิปที่ใช้ใน simulation ประกอบไปด้วยตัวเลื่อนเฟสที่มีลำดับการเลื่อนเฟสเป็นไปตาม gold code ที่ใช้ (0 หรือ π) หลังจากนั้นก็จะผ่าน fork เพื่อให้สัญญาณส่วนหนึ่งสะท้อนออกมาและสัญญาณอีกส่วนหนึ่งก็จะถูกหน่วงเวลาด้วย time delay เท่ากับ 1.56 ps และผ่านไปยังชิปต่อไป ท้ายที่สุดแล้วสัญญาณจากทุกชิปก็จะถูกรวมด้วย power combiner ทำให้สัญญาณขาออกจาก encoder จะเป็นสัญญาณแสงที่ถูกแผ่ออกทางเวลาดังที่ได้

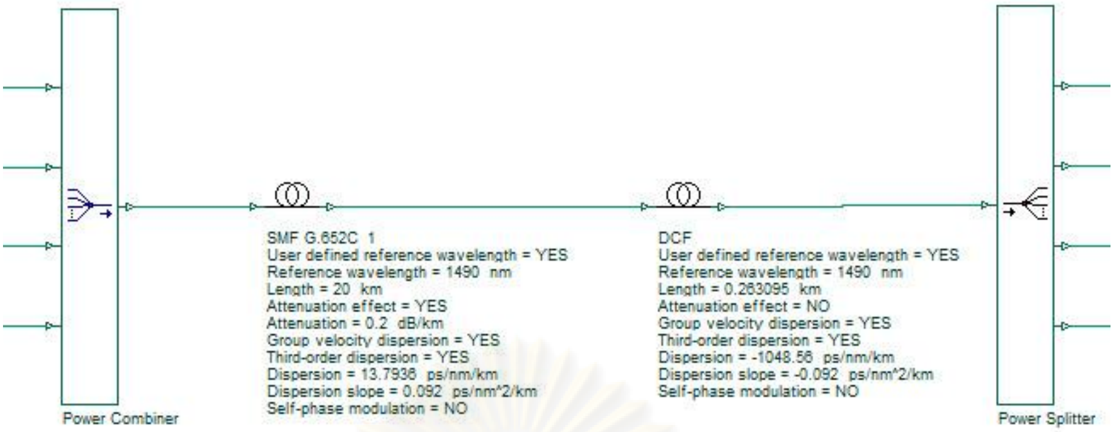
อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.5.2 อย่างไรก็ตามในผลการ simulation ทั้งหมดจะใช้ encoder ที่มีจำนวนชิปเท่ากับ 511 ชิป ซึ่งใช้หลักการในการสร้างแบบจำลองดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อนี้เช่นเดียวกัน



รูปที่ ก.3 แบบจำลองโครงสร้างภายในของ encoder ที่มีจำนวนชิปเท่ากับ 7 ชิปที่ใช้ใน simulation

- **เส้นใยแสง**

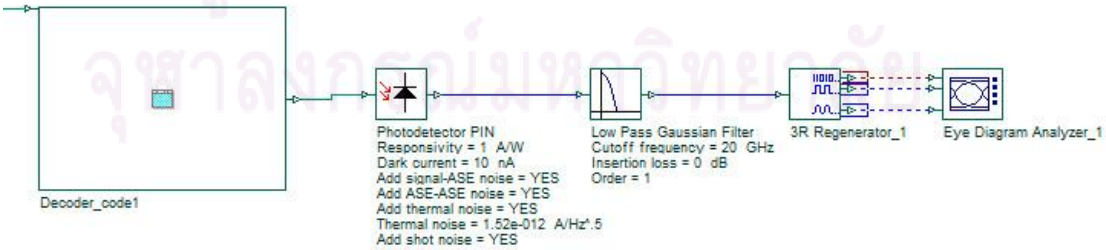
สัญญาณแสงที่ถูก encode จากผู้ใช้บริการทุกรายจะถูกรวมเข้าด้วยกันด้วย power combiner และส่งผ่านเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว และเส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดชดเชยความชันดิสเพอร์ชันตามลำดับ หลังจากนั้นสัญญาณแสงก็จะถูกแบ่งพลังงานแสงไปยัง ONU แต่ละตัวด้วย power spliter เพื่อทำการ decode สัญญาณแสงในขั้นตอนต่อไป โดยแบบจำลองของเส้นใยแสงที่ใช้ใน simulation สำหรับระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการในระบบเท่ากับ 4 ราย และค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเส้นใยแสง เช่น ความยาว ค่าอัตราการลดทอนกำลังของสัญญาณแสง ค่าดิสเพอร์ชัน และค่าความชันดิสเพอร์ชัน ของเส้นใยแสงทั้งสองชนิดแสดงดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 แบบจำลองของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งสัญญาณในระบบ OCDMA-PON ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการในระบบเท่ากับ 4 รายที่ใช้ใน simulation

- ONU

รูปที่ ก.5 แสดงโครงสร้างภายในของ ONU ที่ใช้ใน simulation สัญญาณแสงที่ถูกแบ่งพลังงานแสงโดย power spliter จะเข้ามาที่ ONU แต่ละตัว ในขั้นตอนแรกสัญญาณแสงดังกล่าวจะถูก decode ด้วย decoder เพื่อดึงข้อมูลของตัวเองกลับมาได้อย่างถูกต้อง โดยโครงสร้างของ decoder ที่ใช้ใน simulation นั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับ encoder ในรูปที่ ก.3 แต่จะต้องมีลำดับของตัวเลื่อนเฟสที่ตรงกันข้ามกันกับลำดับการเลื่อนเฟสของ encoder หลังจากนั้นก็จะแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN กรองสัญญาณด้วยวงจรกรองผ่านต่ำชนิด Gaussian และดูลักษณะของ eye-diagram พร้อมทั้งวัดอัตราบิตผิดพลาดด้วย eye-diagram analyzer ตามลำดับ



รูปที่ ก.5 แบบจำลองของ ONU สำหรับ decoder และรับสัญญาณแสงที่ใช้ใน simulation

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรชฏ มณีขัติ เกิดเมื่อวันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2528 อ.เมือง จ.เชียงราย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา พ.ศ. 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 2 ฉบับ

- บทความวิชาการในงานประชุม The 5th National Conference on Optics and Applications (NCOA-5) จัดขึ้น ณ โรงแรมเจ้าพระยาปาร์ค กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2553 ในชื่อบทความเรื่อง Optical CDMA Transmission over Passive Optical Network
- บทความวิชาการในงานประชุม The 9th International Conference on Optical Internet (COIN 2010) จัดขึ้น ณ Shilla Jeju, Jeju ประเทศเกาหลีใต้ ในวันที่ 11-14 กรกฎาคม 2553 ในชื่อบทความเรื่อง Feasibility of employing OCDMA on passive optical network

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย