

การหาค่าเวลาห่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นบนโครงข่ายเข้าถึงเส้นใย
แสงแบบยืดหยุ่น



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Optimization of delay time for wavelength selective switches (WSSs) in flexible fiber access network.

Miss Bussayamas Yipsirimetee



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

บุษยมาส เอียบศิริเมธี : การหาค่าเวลาหน่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นบนโครงข่ายเข้าถึงเส้นใยแสงแบบยืดหยุ่น (Optimization of delay time for wavelength selective switches (WSSs) in flexible fiber access network.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 72 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการรับส่งสัญญาณของระบบ FTTx ที่ทำงานร่วมกับใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น (WSS) แต่ละชนิดภายใต้การควบคุมของตัวควบคุมการจัดสรรความยาวคลื่นแบบพลวัต (DWBA) โดยมีอัตราข้อมูลอยู่ที่ 10 กิกะบิตต่อวินาที (Gbps) ต่อหนึ่งความยาวคลื่น และใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK ซึ่งสามารถส่งผ่านสัญญาณได้เป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร โดยพิจารณาที่อัตราผิดพลาดบิต (bit error rate: BER) ต่ำกว่า 10^{-4} คือสามารถผ่านการแก้ไขความผิดพลาดแบบล่วงหน้า (FEC)

อย่างไรก็ตามพบว่า switching characteristic ของสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นนั้นมีผลต่อ อัตราผิดพลาดบิตในการรับส่งข้อมูลของระบบ เนื่องจากการรบกวนของสัญญาณไขว้แทรกที่เกิดขึ้นขณะที่สวิตช์สับสัญญาณจากผู้ให้บริการรายแรกไปยังผู้ให้บริการรายถัดไปเมื่อสวิตช์มีค่า time constant น้อยกว่าหรือเท่ากับ switching time วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงของโครงข่ายเข้าถึง FTTx ที่ทำงานร่วมกับ WSS ภายใต้การควบคุมของ DWBA โดยให้มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงของการส่งสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับสวิตช์แต่ละชนิด ทั้งนี้ระบบที่ศึกษามี 2 ระบบคือ ระบบแรกเป็นระบบที่มี 4 ความยาวคลื่นซึ่งสามารถส่งข้อมูลให้ผู้ให้บริการได้มากที่สุดถึง 10 ราย และระบบที่สองเป็นระบบที่มี 8 ความยาวคลื่นซึ่งสามารถส่งข้อมูลให้ผู้ให้บริการได้มากที่สุดอยู่ที่ 5 ราย โดยการนำเสนอแนวทางการออกแบบระบบที่มีค่าเวลาหน่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสวิตช์แต่ละชนิดที่เลือกใช้ในระบบดังกล่าวข้างต้นนั้นพิจารณาจากอัตราผิดพลาดบิตน้อย และให้อัตราข้อมูลอยู่ในขั้นที่ยอมรับได้ ซึ่งทำโดยการจำลองระบบลงบนโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ซึ่งมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบตามจริง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5670266021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: FIBER-TO-THE-X (FTTX) / WAVELENGTH SELECTIVE SWITCH (WSS) / PASSIVE OPTICAL NETWORK (PON) / COARSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING (CWDM)

BUSSAYAMAS YIPSIRIMETEE: Optimization of delay time for wavelength selective switches (WSSs) in flexible fiber access network.. ADVISOR: ASST. PROF.PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 72 pp.

This thesis provides the studying of the FTTx system using Wavelength Selective Switch (WSS) incorporated with Dynamic Wavelength and Bandwidth Allocation (DWBA) which the data rate is up to 10 Gbps for each wavelength with signal transmission over PON based on the NRZ-OOK modulation format when the maximum reach is limited to 20 km with the bit-error rate (BER) is smaller than 10^{-4} (with forward error correction: FEC).

However, the effect of switching characteristic of WSS is the main factor that affect to the bit-error rate of signal transmission in the system, since the WSS switch from current subscriber to next subscriber while time constant is lower or equal to switching time. So, the system has the signal distortion due to the overlapping period, which causes the switching crosstalk among the subscribers. This thesis present to reduce signal distortion by using the proper delay time for different types of WSS. The study has 2 systems which are 4-wavelength CWDM signal to 10 subscribers and 8-wavelength CWDM signal to 5 subscribers. The results of the study in this thesis come from computer simulation which can be applied for finding optimal delay time for each type of switch which is considered among BER and bit rate.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำ ทั้งยังช่วยเหลือในทุกด้านอย่างเต็มที่มาโดยตลอดจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ ที่ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านซอฟต์แวร์ที่ใช้ทำวิจัย

ขอขอบคุณนายรชฏ มณีชาติ นิสิตชั้นปริญญาเอกที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยด้วยดีเสมอมา รวมถึงพี่เปียร์ พี่ตุ๊กตา พี่ยุ้ย พี่บอล พี่จากที่ทำงานของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนในด้านการบริหารเวลาการทำงานให้ข้าพเจ้าสามารถเข้าเรียนตลอดจนทำงานวิจัยได้พร้อมกับการทำงานอย่างไม่ขาดตกบกพร่องทางด้านใด

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวทุกคนเป็นอย่างยิ่ง ที่คอยให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ สร้างแรงบันดาลใจ และคอยช่วยเหลือข้าพเจ้าอย่างสูงสุดเสมอมาตลอดจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	10
1.3 ขั้นตอนดำเนินงาน.....	10
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	11
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	13
2.1 ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง.....	13
2.2 เส้นใยแสงชนิดโหมตเดี่ยวแบบ G.652.D.....	14
2.3 การมอดูเลตความเข้มแสง.....	16
2.4 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx [18].....	18
2.5 มาตรฐานของระบบ FTTx-PON.....	20
2.6 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ Active WSS.....	21
2.6.1 โครงสร้างและการทำงานของ active WSS.....	21
2.6.2 ผลของค่า time constant และกราฟ switching characteristic.....	24

บทที่ 3	ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมี ผู้ใช้บริการ 10 ราย.....	26
3.1	โครงสร้างของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่น และมี ผู้ใช้บริการ 10 ราย.....	26
3.2	WSS ที่ใช้ในระบบ FTTX เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA	27
3.3	จำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมี ผู้ใช้บริการ 10 ราย.....	28
3.4	วิเคราะห์ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมี ผู้ใช้บริการ 10 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS แต่ละชนิด.....	30
3.4.1	photonic crystal switch ที่มี $\tau = 0.5$ ps.....	31
3.4.2	GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มี $\tau = 100$ ps.....	32
3.4.3	Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ที่มี $\tau = 1$ ns	33
3.4.4	electro-optic switch ที่มี $\tau = 5$ ns.....	35
บทที่ 4	ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมี ผู้ใช้บริการ 5 ราย.....	37
4.1	โครงสร้างของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมี ผู้ใช้บริการ 5 ราย.....	37
4.2	WSS ที่ใช้ในระบบ FTTX เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA	38
4.3	จำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมี ผู้ใช้บริการ 5 ราย.....	38
4.4	วิเคราะห์ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมี ผู้ใช้บริการ 5 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS แต่ละชนิด.....	40
4.4.1	photonic crystal switch ที่มี $\tau = 0.5$ ps.....	40
4.4.2	GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มี $\tau = 100$ ps.....	42
4.4.3	Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ที่มี $\tau = 1$ ns	43

4.4.4 electro-optic switch ที่มี $\tau = 5$ ns.....	45
บทที่ 5 การคำนวณหาอัตราข้อมูลของสัญญาณของสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบ แอกทีฟแต่ละชนิดเมื่อมีการเพิ่มค่าเวลาหน่วง	47
บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	49
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	53
ข้อเสนอแนะ	55
รายการอ้างอิง	56
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	72



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงข่ายโทรคมนาคมในปัจจุบัน	2
รูปที่ 1. การประมาณการณปริมาณการใช้งานอินเทอร์เน็ต ในปี 2ค.ศ .2015 ถึงปี ค.ศ. 2020	3
รูปที่ 1..การประมาณการณการเติบโตของเทคโนโลยีความคมชัดของภาพหน้าจอ ในปี ค 3ศ . 2015 ถึงปี ค.ศ. 2020	4
รูปที่ 1. 4การประมาณการณการเติบโตของเทคโนโลยี machine-tomachine ในปี ค.ศ .2015 ถึงปี ค.ศ. 2020	4
รูปที่ 1. 5TDM-PON ภาค downlink.....	6
รูปที่ 1. 6TDM-PON ภาค uplink	6
รูปที่ 1. 7ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณของระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแต่ละประเภท.....	7
รูปที่ 1.8 WDM-PON ภาค downlink.....	8
รูปที่ 1.9 WDM-PON ภาค uplink.....	8
รูปที่ 1.10 โครงสร้างและการทำงานของระบบ FTTx เมื่อใช้ active WSS ร่วมกันกับ DWBA.....	9
รูปที่ 2.ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง 1	13
รูปที่ 2. 2ผลที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ในโดเมนเวลา.....	17
รูปที่ 2.3 สัญญาณแบบ NRZ และ RZ.....	17
รูปที่ 2.4 สเปคตรัมของสัญญาณ OOK แบบ (ก) NRZ (ข) RZ	18
รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx.....	19
รูปที่ 2. โครงสร้างและการทำงานของ 6active WSS.....	22
รูปที่ 2. 7switching characteristic ต่อการสวิตซ์ 1 ครั้ง	24
รูปที่ 2.8 time constant มากกว่า switching time.....	25
รูปที่ 2.9 time constant น้อยกว่าหรือเท่ากับ switching time	25

รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 10 ราย.....	26
รูปที่ 3.2 ช่วงการหน่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นมาในระบบ	30
รูปที่ 3.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ(ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ($\tau = 0.5$ ps) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ	31
รูปที่ 3.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ(ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ($\tau = 100$ ps) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ	33
รูปที่ 3.5 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ(ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ($\tau = 1$ ns) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ	34
รูปที่ 3.6 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ(ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด electro-optic switch ($\tau = 5$ ns) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ	35
รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 5 ราย	37
รูปที่ 4.2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ(ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ($\tau = 0.5$ ps) บนระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ	41

รูปที่ 4.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ(ROP) เมื่อไม่มีการ หน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ($\tau = 100$ ps) บน ระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ	42
รูปที่ 4.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ(ROP) เมื่อไม่มีการ หน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ($\tau = 1$ ns) บน ระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ	44
รูปที่ 4.5 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ(ROP) เมื่อไม่มีการ หน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด electro-optic switch ($\tau = 5$ ns) บนระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ	45
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราข้อมูล กับ ค่าเวลาหน่วง	47

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ .21 มาตรฐาน G.652.D	15
ตารางที่ .22 มาตรฐานของ PON	20
ตารางที่ .31 ค่าพารามิเตอร์ของ WSS แต่ละชนิด	28
ตารางที่ 3.2 ค่า attenuation และ dispersion ของความยาวคลื่นที่ 1471-1531 nm.....	29
ตารางที่ 3.3 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ($\tau = 0.5$ ps) บนระบบ 4ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ	32
ตารางที่ .34 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ($\tau = 100$ ps) บนระบบ 4 ความยาว คลื่น 10 ผู้ใช้บริการ	33
ตารางที่ .35 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ($\tau = 1$ ns) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ให้บริการ	34
ตารางที่ .36 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด electro-optic switch ($\tau = 5$ ns) บนระบบ 4ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ.....	36
ตารางที่ .41 ค่า attenuation และ dispersion ของความยาวคลื่นที่ 1471-1531 nm.....	39
ตารางที่ .42 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ($\tau = 0.5$ ps) บนระบบ 8ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ	42
ตารางที่ .43 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ($\tau = 100$ ps) บนระบบ 8ความยาว คลื่น 5 ผู้ใช้บริการ	43
ตารางที่ .44 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ($\tau = 1$ ns) บนระบบ 8ความยาวคลื่น 5 ผู้ให้บริการ	44

ตารางที่ .45 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด electro-optic switch ($\tau = 5\text{ns}$) บนระบบ 8ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ.....	45
ตารางที่ .61 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วง ของระบบ 4 ความยาวคลื่นส่งให้แก่ 10 บ้านผู้ให้บริการ.....	49
ตารางที่ .62 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วง ของระบบ 8 ความยาวคลื่นส่งให้แก่ 5 บ้านผู้ให้บริการ	51



บทที่ 1

บทนำ

มนุษย์มีการติดต่อสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลกันอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ได้รับรู้ข้อมูลข่าวสารในระยะไกลได้อย่างรวดเร็วทันและต่อเหตุการณ์ ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารทางเสียง การรับส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต ซึ่งจากการใช้งานที่หลากหลายในปัจจุบันทำให้ความต้องการใช้งานแบนด์วิดท์ (band width) เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก การสื่อสารทางแสงความเร็วสูงจึงมีความต้องการใช้งานในการรับส่งข้อมูลเป็นอย่างยิ่ง แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานแบนด์วิดท์มีแนวโน้มที่จะถูกพัฒนาต่อไปเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการที่มากขึ้นของผู้บริโภค ทั้งนี้แม้ในปัจจุบันจะมีระบบ TDM-PON ที่แบ่งอัตราข้อมูลทางเวลา หรือ WDM-PON [1] ที่แบ่งอัตราข้อมูลด้วยความยาวคลื่น แต่หากมีการใช้งานโดยระบบมีการจัดสรรความยาวคลื่นโดยใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟ (active WSS) จะสามารถช่วยแก้ปัญหาแบนด์วิดท์ที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานได้

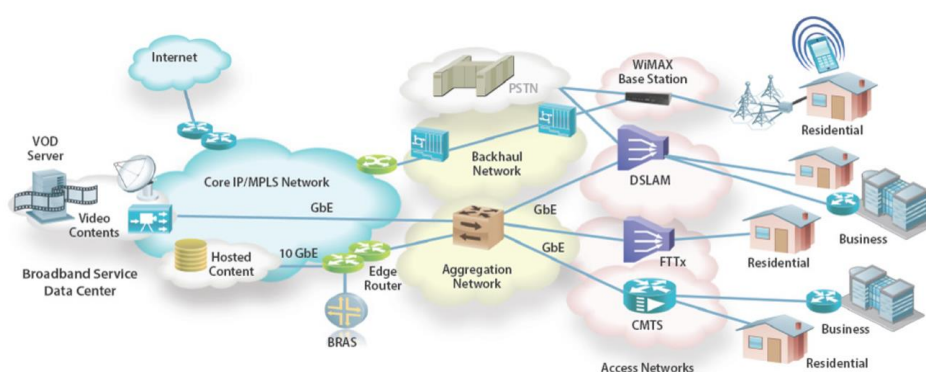
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่น่าเสนอแนวทางการพัฒนาระบบการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟ ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานของผู้บริโภคได้อย่างสิ้นไหล โดยเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารเป็นสิ่งที่ควบคู่กับการดำรงชีวิตของมนุษย์มาตั้งแต่อดีต วิวัฒนาการของการสื่อสารมีความเป็นมาที่ยาวนานกว่าที่จะเป็นรูปแบบการสื่อสารที่ใช้ในปัจจุบันนี้ โดยรูปแบบการสื่อสารในอดีตไม่ว่าจะเป็นการใช้ภาษามือ การประดิษฐ์ตัวอักษร จากนั้นเริ่มมีการพัฒนาเพื่อให้ติดต่อสื่อสารกันได้ในระยะที่กว้างขึ้นเช่นการใช้ควันไฟ การใช้เสียงกลอง การส่งข่าวโดยใช้สัตว์ จวบจนระบบไปรษณีย์ รวมทั้งโทรศัพท์และการใช้งานอินเทอร์เน็ตที่ปัจจุบันนี้นับว่าเป็นการติดต่อสื่อสารทางโทรคมนาคมที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด

โครงข่ายโทรคมนาคม (telecommunication networks) แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท โดยโดยประเภทแรกคือ โครงข่ายหลัก (core network) และประเภทที่สองคือโครงข่ายเข้าถึง (access network) ดังแสดงในรูป 1.1 ซึ่งโครงข่ายหลักนั้นจะรับหน้าที่สำคัญคือเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการติดต่อสื่อสารระหว่างกันได้ในแต่ละโครงข่าย นั่นคือโครงข่ายหลักจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการ

สื่อสารข้อมูลทั้งหมด โดยการติดต่อสื่อสารกันระหว่างโครงข่ายที่อยู่ไกลกันจะใช้การเชื่อมโยงแบบ wide-area network (WAN) สำหรับการติดต่อสื่อสารกันระหว่างโครงข่ายในระดับเมืองจะใช้การเชื่อมโยงแบบ metropolitan area network (MAN) จากนั้นโครงข่ายระดับเมืองจะเชื่อมโยงกันเองในลักษณะวงแหวนหรือลักษณะตาข่าย และเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายสื่อสารโดยผ่านโครงข่ายเข้าถึงซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ โครงข่ายแบบมีสาย (fixed line) และโครงข่ายแบบไร้สาย (wireless) ซึ่งโครงข่ายเข้าถึงแบบมีสายในอดีตเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายโทรคมนาคมโดยใช้การสื่อสารทางไฟฟ้าที่ส่งสัญญาณผ่านสายทองแดงชนิดคู่พันเกลียว (twisted pair) หรือสารเคเบิลแกนร่วม (coaxial cable) แต่เนื่องจากปัจจุบันมนุษย์มีการติดต่อสื่อสารกันอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีความต้องการในการสื่อสารทางข้อมูลที่ขยายตัวสูงขึ้นจากการให้บริการบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ตในรูปแบบที่หลากหลายมากขึ้นและปริมาณการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอย่างมากในแต่ละวัน ทำให้เกิดความต้องการในการสื่อสารข้อมูลปริมาณมากทั้งยังต้องการความเร็วสูงเพิ่มมากขึ้นด้วย ไม่ว่าจะเป็น การสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต (VoIP), จดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (e-mail), การพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-commerce), การเรียนรู้้อิเล็กทรอนิกส์ (e-learning), วิดีทัศน์ตามคำขอ (video on demand), การสืบค้นข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต, การเล่นเกมออนไลน์, เทคโนโลยี machine-to-machine, เทคโนโลยีความคมชัดของภาพหน้าจอระดับ high definition หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า HD ทั้งยังมี 4K ultra high definition หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า 4K รวมไปถึงการถ่ายทอดสดภาพและเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต (video streaming) และการดาวน์โหลดข้อมูลนั้นมีการประมาณการถึงการเติบโตที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 81% ภายในปี 2021 ดังแสดงในตารางที่ 1.1, รูปที่ 1.2, รูปที่ 1.3 และรูปที่ 1.4



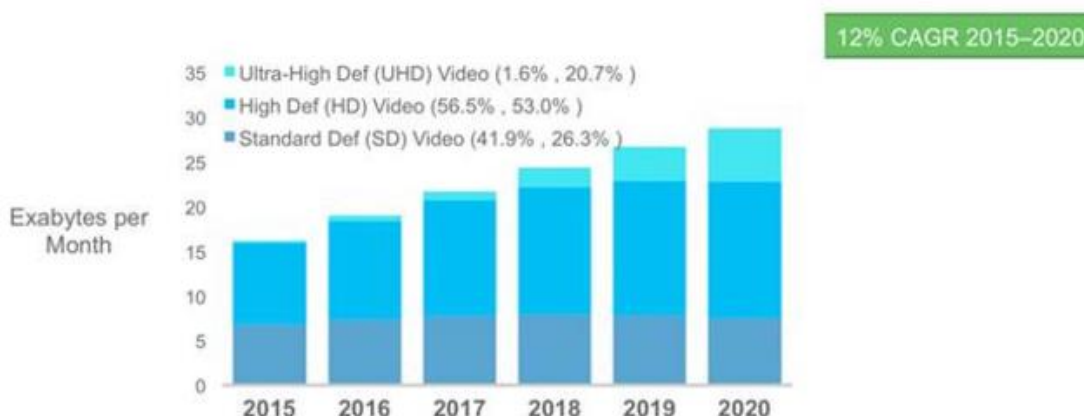
รูปที่ 1.1 โครงข่ายโทรคมนาคมในปัจจุบัน [2]

ตาราง 1.1 การประมาณการณปริมาณการใช้งานอินเทอร์เน็ต ปี ค .ศ.2016 ถึงปี ค.ศ. 2021 [3]

Consumer Internet Traffic,2016–2021	2016	2017	2018	2019	2020	2021	CAGR 2016–2021
By Subsegment (Petrabytes : PB per Month)							
Internet video	42,029	57,116	75,109	98,182	125,853	159,161	31%
Web, email, and data	9,059	10,681	12,864	15,120	17,502	19,538	17%
Online gaming	915	1,818	2,857	4,396	6,753	10,147	62%
File sharing	6,628	6,810	6,717	6,554	6,388	6,595	0%
Total (PB per Month)							
Consumer Internet traffic	58,630	76,426	97,547	124,252	156,496	195,440	27%



รูปที่ 1.2 การประมาณการณปริมาณการใช้งานอินเทอร์เน็ต ในปี ค .ศ.2015 ถึงปี ค.ศ. 2020 [4]



รูปที่ 1.3 การประมาณการณ์การเติบโตของเทคโนโลยีความคมชัดของภาพหน้าจอ ในปี ค .ศ.2015 ถึงปี ค.ศ. 2020 [4]



รูปที่ 1.4 การประมาณการณ์การเติบโตของเทคโนโลยี machine-to-machine ในปี ค .ศ.2015 ถึงปี ค.ศ. 2020 [4]

การส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิลแกนร่วมอันได้แก่ เทคโนโลยี digital subscriber line (DSL) ที่เป็นการใช้สายทองแดงเกลียวคู่จากระบบโทรศัพท์ที่มีอยู่เดิมโดยมีการกำหนดเป็นมาตรฐานออกมา เช่น asymmetric DSL (ADSL) และ very high bit rate DSL (VDSL) แต่อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณในลักษณะนี้ให้แบนด์วิดท์ที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานที่มากขึ้นอย่างก้าวกระโดดในปัจจุบัน ทั้งยังมีอัตราข้อมูลที่แปรผันตรงตามระยะทางอีกด้วย การสื่อสารทางแสง (optical communication) ผ่านเส้นใยแสง (optical fiber) จึงเข้ามามีบทบาทแทนที่การส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิลแกนร่วม โดยการสื่อสารทางแสงนั้นสัญญาณจะอยู่ในรูปของแสงทั้งหมด ดังนั้นจึงสามารถมีแบนด์วิดท์ที่มากกว่า สามารถส่งสัญญาณไปได้ในระยะทางที่ไกลกว่า และมีความสูญเสียกำลังของสัญญาณน้อยกว่าส่งผ่านตัวกลางชนิดอื่น ซึ่งมีอัตราสูญเสียกำลังของสัญญาณประมาณ 0.2 dB/km

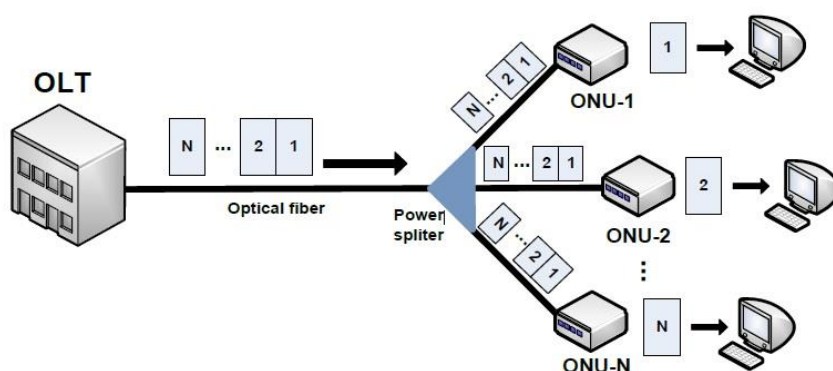
ทั้งยังมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและสามารถรวมเส้นใยแสงหลายเส้นเข้าด้วยกันได้ เป็นการเพิ่มจำนวนช่องทางการสื่อสารในพื้นที่เท่าเดิมและเส้นใยแสงเป็นฉนวนทางไฟฟ้ามีความปลอดภัยกว่าระบบสายโลหะในแง่ของการปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากไฟฟ้าลัดวงจร [5] , [6]

จากที่กล่าวมาข้างต้นผู้ให้บริการจึงเลือกที่ให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงและสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้บริการโดยการนำเทคโนโลยี fiber-to-the-x (FTTx) มาใช้ในโครงข่ายเข้าถึงมากขึ้น ทั้งนี้โครงข่าย FTTx สามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ประเภทคือ fiber-to-the-node (FTTN), fiber-to-the-curb (FTTC), fiber-to-the-building (FTTB) และ fiber-to-the-home (FTTH) [25] ซึ่งในปัจจุบันโครงข่ายเข้าถึงที่ใช้เทคโนโลยี FTTx มีศักยภาพรองรับการสื่อสารระดับ ultra broadband โดยอุปกรณ์ภายในโครงข่ายตั้งแต่ต้นทางคืออุปกรณ์ส่งสัญญาณไปจนถึงปลายทางคืออุปกรณ์รับสัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานทางแสงทั้งหมด ทำให้มีต้นทุนของระบบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ก็ยังสามารถให้บริการการสื่อสารด้วยอัตราข้อมูลที่สูงเมื่อเทียบกับโครงข่ายเข้าถึงประเภทอื่นซึ่งเทคโนโลยี FTTx ภายใต้มาตรฐาน 10G-EPON (IEEE 802.3av) [7] และมาตรฐาน ITU-T G.987 XG-PON [8] นั้นมีอัตราข้อมูลสูงสุดถึง 10 Gbps ทั้ง uplink และ downlink แต่อย่างไรก็ตามอัตราข้อมูล 10Gbps ก็ยังไม่เพียงพอต่อการใช้งานแบนด์วิดท์ของผู้ใช้บริการเนื่องจากแบนด์วิดท์ยังต้องถูกแบ่งให้ผู้ใช้บริการแต่ละบ้านอีก จึงพบว่ามีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลบนโครงข่ายหลักจาก 10 Gbps ต่อหนึ่งช่องสัญญาณไปเป็น 40 Gbps ต่อหนึ่งช่องสัญญาณ [9] แต่อุปกรณ์ที่ใช้บนโครงข่ายหลักมีความซับซ้อนและอาจถูกจำกัดด้วยราคาที่สูงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานในโครงข่ายเข้าถึง

โดยเทคโนโลยี FTTx มักนิยมใช้ภายใต้มาตรฐานโครงข่ายแบบ passive optical network (PON) ซึ่งโครงข่าย PON ที่นิยมใช้ร่วมกับเทคโนโลยี FTTx มีอยู่หลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็น GE-PON (EPON), GPON, 10G-EPON หรือ XG-PON [10] ซึ่งข้อดีของโครงสร้างแบบ PON คือระบบไม่ต้องการพลังงานทางไฟฟ้ามาขับเคลื่อนเนื่องจากเป็นอุปกรณ์แบบ passive ที่ไม่ต้องการพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น จึงทำให้ช่วยลดต้นทุนของอุปกรณ์ ลดต้นทุนการดูแลรักษาระบบ ลดต้นทุนพลังงานไฟฟ้าในระบบและยังช่วยลดต้นทุนซ่อมแซมอุปกรณ์สนาม (outside-plant equipment) อีกด้วย [7] อย่างไรก็ตามระบบมัลติเพล็กซ์บนโครงข่ายเชิงแสงแบบ PON สามารถแบ่งออกได้เป็น ระบบมัลติเพล็กซ์เชิงเวลา(time division multiplexing : TDM) และระบบมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing : WDM)

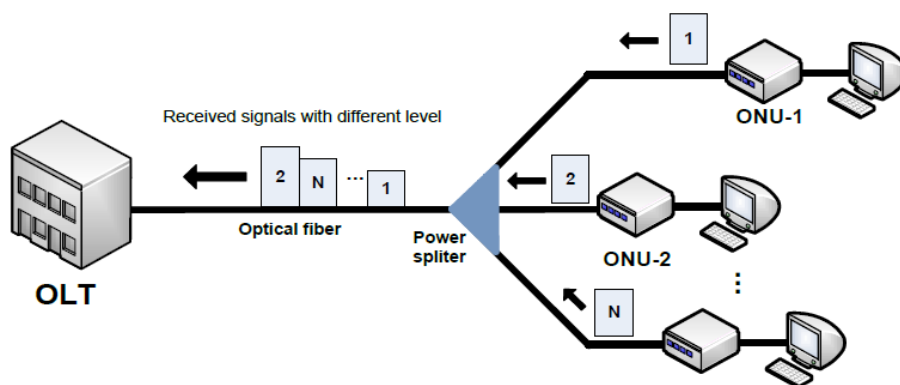
โครงข่ายเชิงแสงแบบ TDM-PON จะแบ่งอัตราข้อมูลกันทางเวลาระหว่างผู้ใช้บริการที่รับหรือส่งข้อมูลพร้อมกันในขณะนั้น จากรูปที่ 1.5 แสดงการมัลติเพล็กซ์สัญญาณจากอุปกรณ์ optical line terminal (OLT) ที่ติดตั้งอยู่ที่ผู้ให้บริการ ไปยังอุปกรณ์ optical network unit (ONU) ที่ติดตั้ง

อยู่ที่บ้านของผู้ใช้บริการซึ่งทำหน้าที่กระจายสัญญาณไปยังอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้าน โดยสัญญาณ downlink ซึ่งมีข้อมูลที่ต้องจะถูกส่งจาก OLT ซึ่งจะเดินทางในลักษณะของการกระจายข้อมูล (broadcast) กลับไปยัง ONU ทุกตัวด้วยอุปกรณ์ passive optical splitter โดยช่องสัญญาณทางเวลา (time slot) ที่ OLT จัดสรรให้แก่บ้านแต่ละบ้านอาจไม่เท่ากันซึ่งแตกต่างกันไปตามลักษณะของข้อมูลและความจำเป็นในการสื่อสาร



รูปที่ 1.5 TDM-PON ภาค downlink [9]

ในทางกลับกัน ONU หลายตัวสามารถติดต่อสื่อสารกับ OLT เพียงตัวเดียวได้โดยการใช้การเข้าถึง multiple access เชิงเวลา หรือ time division multiplexing access (TDMA) สำหรับสัญญาณ uplink แสดงดังรูปที่ 1.6 โดย ONU ที่ต้องการส่งข้อมูลไปยัง OLT จะร้องขอ time slot จาก OLT จากนั้น OLT จะจัดสรร time slot ที่เหมาะสมให้กับ ONU นั้น นอกจากนี้ OLT ยังมีการจัดลำดับ (ranking) ตามระยะทางจาก OLT ไปยัง ONU แต่ละตัวเพื่อปรับระยะทางสมมติที่ใช้ในการส่งข้อมูลจาก OLT ไปยัง ONU ทุกตัวให้เท่ากัน [9]

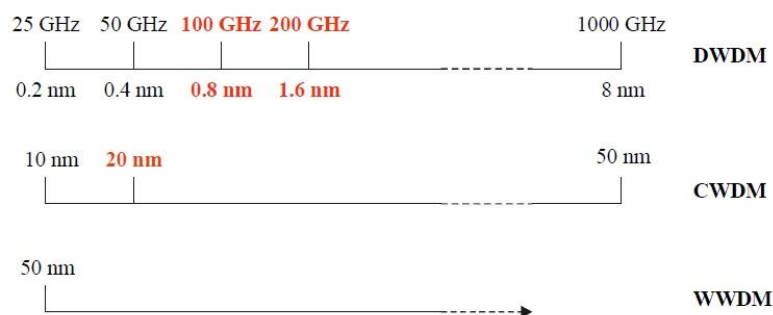


รูปที่ 1.6 TDM-PON ภาค uplink [9]

มาตรฐานของระบบมัลติเพล็กซ์แบบ TDM-PON นั้นเป็นการแบ่งสัญญาณกันทางเวลาโดยผ่านอุปกรณ์ power splitter ซึ่งส่งผลให้กำลังสัญญาณที่ลดลงเนื่องจากการแบ่งสัญญาณไปยังแต่ละ ONU จึงทำให้จำเป็นต้องจำกัดจำนวนผู้ใช้งาน การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยใช้ระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing : WDM)

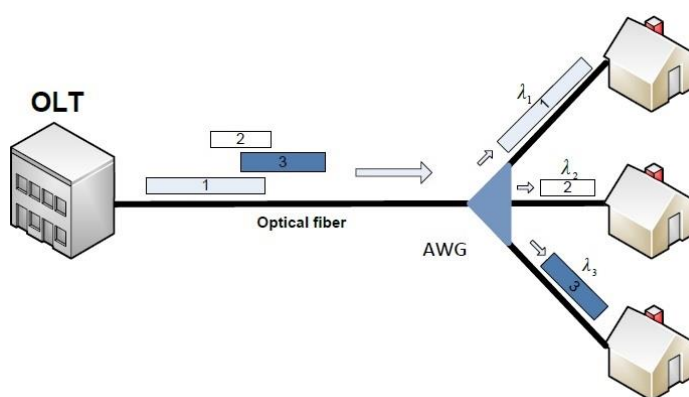
โครงข่ายเชิงแสงที่ใช้การมัลติเพล็กซ์แบบ WDM-PON ไม่ได้แบ่งสัญญาณกันทางเวลา แต่เป็นระบบที่แบ่งสัญญาณกันทางความยาวคลื่น จึงเป็นระบบที่สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการได้มากกว่าระบบ TDM-PON เนื่องจากสามารถเพิ่มความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณได้โดยไม่มีการแบ่งกำลังของสัญญาณและยังสามารถเพิ่มอัตราข้อมูลของระบบได้ โดยที่ผู้ใช้บริการสามารถใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างเต็มที่ ระบบ WDM แบ่งเป็น 3 ประเภทตามมาตรฐาน ITU-T G.671 [11] ได้แก่

1. มัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหยาบ (coarse wavelength division multiplexing : CWDM) ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าน้อยกว่า 50 นาโนเมตร แต่มากกว่า 1,000 GHz ประมาณ 8 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร และ 5.7 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 1,310 นาโนเมตร
2. มัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบหนาแน่น (dense wavelength division multiplexing : DWDM) มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.6 นาโนเมตร
3. มัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบกว้าง (wide wavelength division multiplexing : WWDM) มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณมากกว่าเท่ากับ 50 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1.5

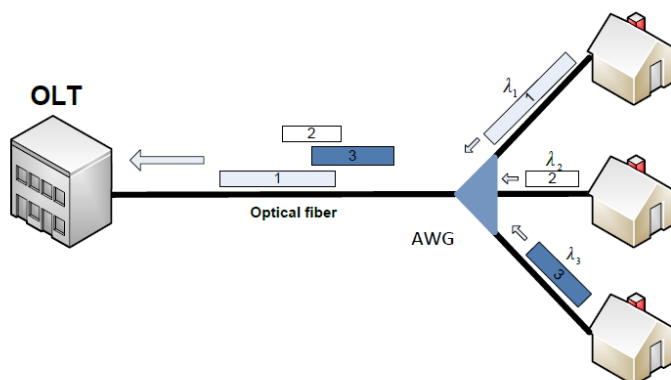


รูปที่ 1.7 ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณของระบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแต่ละประเภท [12]

รูปที่ 1.8 แสดงถึงการมัลติเพล็กซ์สัญญาณจาก OLT ไปสู่ ONU โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ WDM เพื่อรวมสัญญาณและแยกสัญญาณคือท่อนำคลื่นอาร์เรย์ (arrayed waveguide grating : AWG) โดยสัญญาณ downlink ซึ่งมีข้อมูลในแต่ละความยาวคลื่นของผู้ใช้บริการ จะถูกส่งไปยัง ONU ของผู้ใช้บริการแต่ละราย โดยมี AWG ทำหน้าที่แยกความยาวคลื่น ในทางกลับกันเมื่อผู้ใช้บริการต้องการส่งข้อมูลกลับมายัง OLT ข้อมูลแต่ละความยาวคลื่นจะถูกรวมกันที่ AWG ส่งไปยัง OLT ดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.8 WDM-PON ภาค downlink [9]

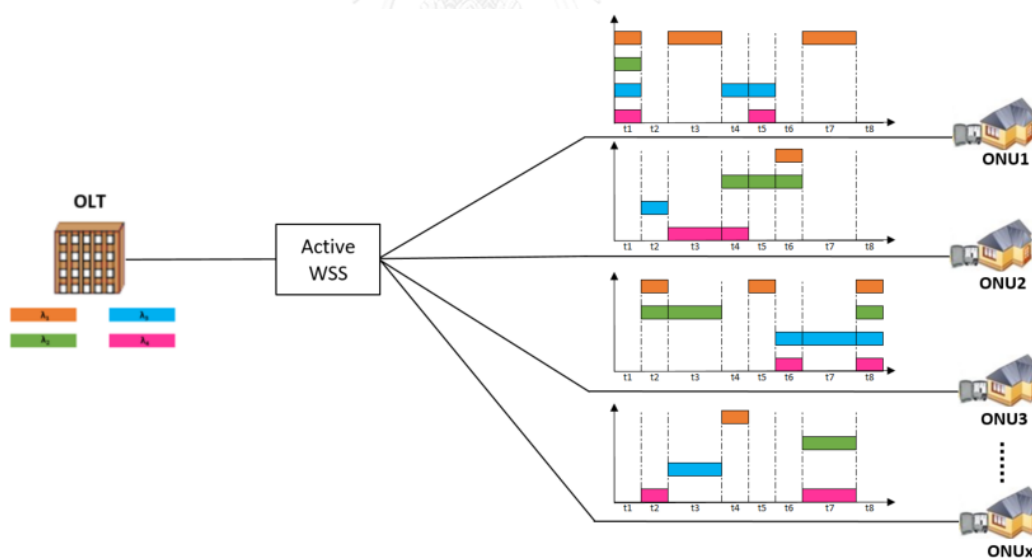


รูปที่ 1.9 WDM-PON ภาค uplink [9]

อย่างไรก็ตามระบบ WDM-PON จะส่งสัญญาณให้ผู้ใช้บริการแต่ละบ้านด้วยอัตราข้อมูลเท่ากันตลอดเวลา จึงทำให้ไม่เพียงพอต่อการใช้งานของผู้ใช้บริการในบางครั้ง เนื่องจากผู้ใช้บริการแต่ละรายนั้นมีความต้องการใช้อัตราข้อมูลที่ไม่เท่ากัน จึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบที่สามารถจัดสรรอัตราการรับส่งข้อมูลที่สามารถตอบสนองต่อผู้ใช้บริการได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการ ทั้ง

ยังสามารถใช้ได้ในเวลาใดอย่างไม่จำกัด นั่นคือ ระบบ FTTx ซึ่งทำงานร่วมกับสวิตช์สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟซึ่งทำหน้าที่แทน splitter ภายใต้การควบคุมโดย dynamic wavelength and bandwidth allocation (DWBA) [13]

โครงสร้างและการทำงานของระบบ FTTx ทำงานร่วมกับสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟ ภายใต้การควบคุมของ DWBA แสดงดังรูปที่ 1.10 มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกันให้ผู้ให้บริการแต่ละรายตามแต่ละเวลาที่ผู้ใช้บริการร้องขอ จึงทำให้ไม่มีโอกาสในการชนกันของข้อมูลสำหรับระบบนี้ โดยสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟจะจัดสรรความยาวคลื่นแบบ CWDM ระบบจะส่งสัญญาณ CWDM ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดย OLT ที่ถูกควบคุมแบบ dynamic จากตัวควบคุม DWBA ซึ่งสัญญาณ CWDM ที่ถูกสร้างขึ้นนั้นประกอบไปด้วยจำนวนความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและส่งสัญญาณไปในช่วงเวลาแตกต่างกันภายใต้การร้องขอการใช้อัตราข้อมูลจาก ONU สัญญาณ CWDM ที่ถูกจัดสรรความยาวคลื่นแล้ว จะถูกส่งผ่านเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (single-mode optical fiber: SMF) ITU-T G.652.D และถูกจัดสรรความยาวคลื่นด้วยสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟซึ่งถูกควบคุมด้วย DWBA เช่นกัน ก่อนที่จะส่งสัญญาณไปสู่แต่ละ ONU ที่ต้องการใช้สัญญาณในขณะนั้น



รูปที่ 1.10 โครงสร้างและการทำงานของระบบ FTTx เมื่อใช้ active WSS ร่วมกันกับ DWBA

แต่อย่างไรก็ตามระบบ FTTx ที่ใช้ active WSS ร่วมกันกับ DWBA ดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้นพบว่า ค่า time constant และค่า switching time นั้นเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบเป็นอย่างมาก กล่าวคือหากระบบมีเวลาในการสลับช่องสัญญาณ (switching time) น้อยกว่า time constant เพื่อที่จะสามารถจัดสรรอัตราการใช้ข้อมูลที่ได้รับส่งข้อมูลที่รวดเร็วแก่ผู้ใช้บริการ แต่ใน

ขณะเดียวกันคุณภาพของสัญญาณที่ผู้ใช้บริการได้รับนั้นต่ำ เนื่องจากกำลังของสัญญาณยังไม่อยู่ในสภาวะคงตัวแต่ต้องสลับช่องสัญญาณไปยังผู้ใช้บริการรายอื่นต่อไป ในขณะที่หาก time constant น้อยกว่า switching time คุณภาพของสัญญาณที่ได้นั้นจะมีประสิทธิภาพมาก แต่อาจได้รับสัญญาณที่ผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้บริการก่อนหน้า หรือเรียกว่า สัญญาณไขว้แทรก (crosstalk) เนื่องจากมีการรับส่งของข้อมูลอยู่ตลอดเวลา [31]

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ในการนำเสนอแนวทางการพัฒนาและออกแบบระบบการส่งสัญญาณผ่าน active WSS ที่ทำงานร่วมกันกับ DWBA โดยให้มีการหน่วงของเวลา (delay time) ระหว่างการสลับช่องสัญญาณด้วยระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับ active WSS ในแต่ละชนิดที่นำเสนอ โดยระหว่างช่วง delay time นั้นจะไม่มี การรับส่งของสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บริการให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด กล่าวคือมีอัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่รวดเร็วที่สุดในขณะที่ผู้ใช้บริการได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพสูงที่สุดเช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 นำเสนอแนวทางการพัฒนาระบบการส่งสัญญาณ FTTx ผ่านสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอกทีฟซึ่งทำงานร่วมกับ DWBA โดยอาศัยการส่งสัญญาณแบบ NRZ-OOK ที่อัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps และมีการหน่วงของเวลา (delay time) ที่ต่างกัน
- 1.2.2 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่มีการหน่วงของเวลาที่แตกต่างกันออกไป ในแง่ของอัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่และดีคุณภาพสัญญาณเป็นต้น

1.3 ขั้นตอนดำเนินงาน

- 1.3.1 ศึกษาความรู้พื้นฐานและทฤษฎีเกี่ยวกับการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง
- 1.3.2 ศึกษาการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK ในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง
- 1.3.3 ศึกษาหลักการส่งผ่านเส้นใยแสงโดยใช้ SMF ITU-T G.652.D
- 1.3.4 ศึกษา ระบบ FTTx ซึ่งใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอกทีฟที่ออกแบบร่วมกับ DWBA โดยคิดผลของ switching characteristic
- 1.3.5 ศึกษาหาข้อมูลของ active WSS ประเภทที่ใช้ในการทดลอง
- 1.3.6 ออกแบบระบบที่มี delay time เหมาะสมสำหรับการส่งสัญญาณผ่าน active WSS เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ด้วยโปรแกรม OptiSystem

1.3.7 วิเคราะห์ระบบที่ออกแบบในแง่อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลและคุณภาพของสัญญาณ

1.3.8 เรียบเรียงวิทยานิพนธ์

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1.4.1 จำลองโครงข่าย FTTx ซึ่งเป็นโครงข่ายเข้าถึงแบบ active optical network ด้วยโปรแกรม Optisystem software version 8.0 และใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยไม่มีการทดลองจริง

1.4.2 การศึกษาและจำลองโครงข่ายโดยใช้เฉพาะเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652.D ในการส่งสัญญาณเท่านั้น

1.4.3 จำลองระบบโดยใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK ด้วยอัตราการรับส่งข้อมูล 10 Gbps ต่อความยาวคลื่นเท่านั้น

1.4.4 การจำลองระบบและการวิเคราะห์ระบบไม่คิดผลจากปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์ รวมทั้งความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง

1.4.5 ออกแบบระบบการส่งสัญญาณผ่าน active WSS ที่ทำงานร่วมกันกับ DWBA โดยให้มีการหน่วงของเวลา (delay time) ระหว่างการสลับช่องสัญญาณด้วยระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับ active WSS แต่ละชนิด

1.4.6 ใช้ active WSS ดังต่อไปนี้

1.4.6.1 Photonic crystal switch ที่มีค่า time constant เท่ากับ 0.5 ps

1.4.6.2 GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มีค่า time constant เท่ากับ 100 ps

1.4.6.3 Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ที่มีค่า time constant เท่ากับ 1 ns

1.4.6.4 Electro-optic switch ที่มีค่า time constant เท่ากับ 5 ns

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและความผิดเพี้ยนของสัญญาณในเส้นใยแสงเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเป็น 10 Gbps ต่อช่องสัญญาณ

1.5.2 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK รวมทั้งการประยุกต์การมอดูเลตสัญญาณนี้เข้ากับโครงข่าย FTTx

1.5.3 ออกแบบระบบการส่งสัญญาณผ่าน active WSS ที่ทำงานร่วมกันกับ DWBA โดยให้มีค่าเวลาหน่วง (delay time) ระหว่างการสลับช่องสัญญาณด้วยระยะเวลาที่

เหมาะสมสำหรับ active WSS แต่ละชนิดให้เหมาะสมที่สุดสำหรับรูปแบบการใช้
งานที่ต่างกันไปของผู้ใช้บริการ

1.5.4 ผลงานตีพิมพ์และนำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

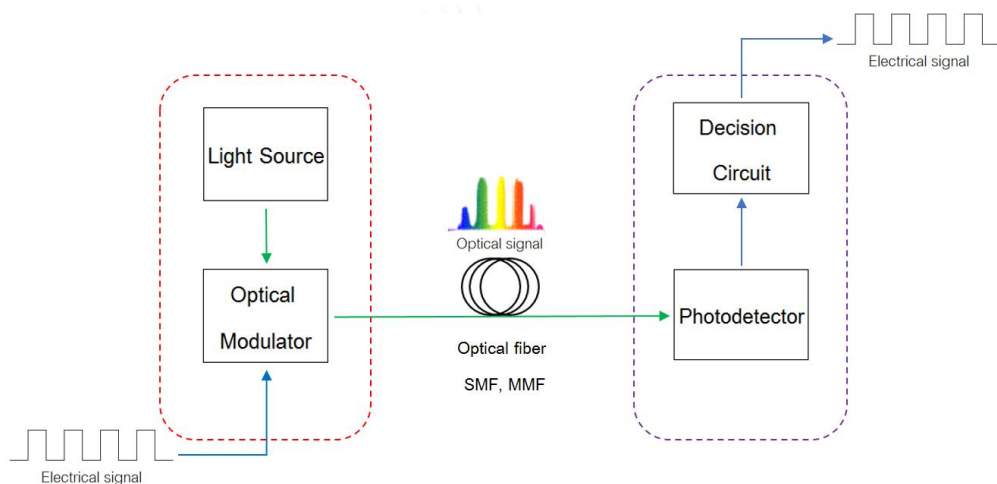


บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

เนื้อหาของทฤษฎีพื้นฐานที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 6 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะกล่าวถึง ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง ส่วนที่ 2 กล่าวถึงเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียว ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการมอดูเลตความเข้มแสง ส่วนที่ 4 กล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx ส่วนที่ 5 กล่าวถึงมาตรฐานของระบบ FTTx-PON และส่วนที่ 6 ซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟ

2.1 ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง



รูปที่ 2.1 ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงแสดงดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย ส่วนหลักคือ ภาคส่ง 3 (transmitter) ดังแสดงในกรอบสีแดง ตัวกลางหรือเส้นใยแสง (optical fiber) และภาครับ (receiver) ดังแสดงในกรอบสีม่วง โดยภาคส่งจะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าผ่าน optical modulator เพื่อแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นสัญญาณทางแสง (electro-optical : E-O) โดยการมอดูเลตสัญญาณนั้น มี ประเภทคือ 2การมอดูเลตภายนอก (external modulation) จะประกอบด้วย 2 ส่วนที่แยกออกจากกันนั่นคือแหล่งกำเนิดแสง (light source) และอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณ (modulator) สำหรับการมอดูเลตสัญญาณประเภทที่สองคือการมอดูเลตโดยตรง (direct modulation) ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณจะรวมเป็นชุดเดียวกัน เมื่อทำการมอดูเลตแล้วจึงส่งสัญญาณที่ได้นั้นผ่านเส้นใยแสงต่อไป

เมื่อภาครับที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (Photo detector) และวงจรตัดสินใจ (Decision circuit) ได้รับความสัญญาณทางแสงแล้ว อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงจะทำหน้าที่แปลง

สัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปจะใช้เป็น positive intrinsic negative junctions (PIN) หรือ avalanche photodiode (APD) สำหรับวงจรตัดสินใจทำหน้าที่ในการตัดสินใจว่าสัญญาณที่ขาออกควรจะเป็นบิต '0' หรือบิต '1' ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับที่กำหนดค่าภายในวงจรตัดสินใจ

เส้นใยแสงมีหลายชนิดคือ เส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (single mode fiber : SMF) ซึ่งมีราคาสูงแต่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (attenuation coefficient) ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงแบบหลายโหมดคลื่น (multi-mode fiber : MMF) ที่มีราคาถูกกว่า โดยเส้นใยแสงทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวกลางชนิดอื่นดังนี้ [5], [6]

1. มีอัตราการสูญเสียกำลังสัญญาณน้อยกว่าสายตีเกลียวคู่หรือสายทองแดง ส่งผลให้สามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าและใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (repeater) และอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) น้อยกว่า
2. มีขนาดแบนด์วิดท์กว้างเมื่อเทียบกับความถี่ของคลื่นวิทยุซึ่งมีความถี่ 106-109Hz เพราะความถี่ของคลื่นพาห้แสงจะอยู่ในช่วง 10¹³-10¹⁴ Hz
3. มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและสามารถรวมเส้นใยแสงหลายเส้นเข้าด้วยกันได้ เป็นการเพิ่มจำนวนช่องทางการสื่อสารในพื้นที่เท่าเดิม
4. มีความเป็นฉนวนไฟฟ้า จึงปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่พบในสายสัญญาณแบบทองแดง อาทิเช่น การเหนี่ยวนำโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าการรบกวนระหว่างตัวนำหรือเรียกว่าครอสทอล์ค นอกจากนี้ยังไม่สามารถลักลอบสัญญาณได้ทำให้มีความปลอดภัยที่สูง
5. มีความทนทานต่อความชื้นและอุณหภูมิ จึงทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและต้องการการบำรุงรักษาน้อย
6. มีความปลอดภัยกว่าระบบสายโลหะในแง่ของอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์หรือมนุษย์จากไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างสายหรือระหว่างสายต่อสาย

2.2 เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวแบบ G.652.D

เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวแบบ G.652.D นั้นอยู่ในซีรีส์ของ ITU-T G.652 ซึ่งเป็นมาตรฐานของ SMF ที่มีความยาวคลื่นที่มีค่า dispersion เท่ากับศูนย์ (zero-dispersion wavelength) ที่ความยาวคลื่น 1310 nm โดยได้รับการออกแบบให้มีการสูญเสียอันเนื่องมาจาก attenuation น้อยที่ความยาวคลื่นของ water absorption ซึ่งมีค่าประมาณ 1382 nm จึงทำให้ช่วงของความยาวคลื่นที่นำมาใช้ประโยชน์ในการส่งสัญญาณได้กว้างขึ้น โดยมีช่วงตั้งแต่ 1310 nm จนถึง 1550 nm ซึ่งความยาวคลื่นในช่วงนี้จะมี attenuation ต่ำ จึงทำให้มีประสิทธิภาพและคุณภาพของสัญญาณมีความเชื่อถือได้สูง โดยคุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652.D นั้นคล้ายกับคุณสมบัติของเส้นใยแสง

G.652.B ที่ใช้สำหรับอัตราการรับส่งข้อมูลที่เร็วขึ้นถึงระดับของ STM-64 เช่น ITU-T Recs G.691 และ G.692 หรือ STM-256 สำหรับบางแอปพลิเคชันใน ITU-T Recs G.693 และ G.959.1 ทั้งนี้ จะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากค่า Chromatic dispersion ด้วย

อย่างไรก็ตามมาตรฐานดังกล่าวข้างต้นนี้สามารถส่งสัญญาณแสงได้เพิ่มขึ้นได้ในช่วงความยาวคลื่น 1360 nm ถึง 1530 nm โดยตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยแสงตามมาตรฐาน G.652.D

ตารางที่ 2.1 มาตรฐาน G.652.D [14]

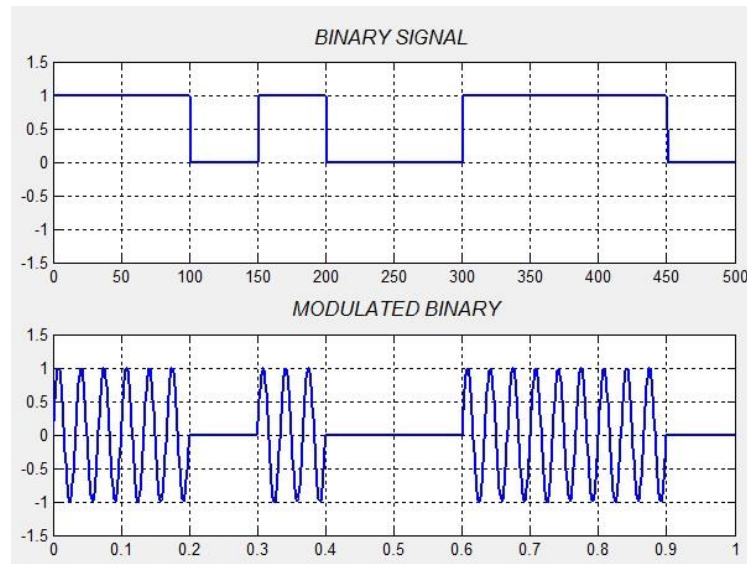
Fiber attribute		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6-9.5 μ m
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu$ m
Attribute	Detail	Value
Cladding Diameter	Nominal	125.0 μ m
	Tolerance	$\pm 1 \mu$ m
Core Concentricity error	Maximum	0.6 μ m
Cladding noncircularity	Maximum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

	extended to 1260 nm by adding 0.07 dB/km induced Rayleigh scattering loss)	
	Maximum at 1383 nm \pm 3 nm	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 fiber category.
	Maximum at 1550	0.3 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD	0.20 ps/ \sqrt{km}

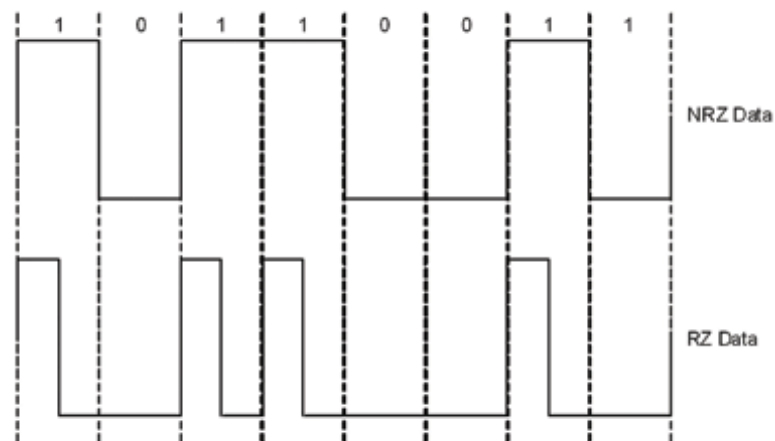
2.3 การมอดูเลตความเข้มแสง

คลื่นแสงประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ 4 อย่างคือ อย่างที่หนึ่ง ความเข้ม ซึ่งอาจแสดงในรูปของกำลังงาน, อย่างที่สอง แอมพลิจูด, อย่างที่สาม ความถี่หรือความยาวคลื่น และอย่างที่สี่ มุมการสั่นของคลื่นหรือเฟส (phase) การมอดูเลตความเข้มแสงที่นิยมใช้ในการส่งสัญญาณแสงคือ on-off keying (OOK) ซึ่งแอมพลิจูดของคลื่นพาห้จะเปลี่ยนไปตามข้อมูล แต่ความถี่และเฟสยังคงเดิม โดยกำลังส่งจะถูกแบ่งออกเป็นสองระดับ ตามบิต “1” และบิต “0” ซึ่งจะมีค่าของกำลังส่งของสัญญาณที่ต่างกันไปตามอัตราส่วน extinction ratio โดยแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 2.2 และนอกจากนี้ การส่งสัญญาณโดยมอดูเลตความเข้มแสงแบบ OOK ยังสามารถแบ่งออกตามรูปแบบการส่งสัญญาณ โดยแบ่งออกได้เป็นการส่งสัญญาณแบบ non return-to-zero (NRZ) ซึ่งกำลังส่งสัญญาณของบิต “1” จะมีค่าคงที่ตลอดช่วงบิต และการส่งสัญญาณแบบ return-to-zero (RZ) ซึ่งข้อมูลที่เป็นบิต “1” จะกลับลงมาเป็นบิต “0” ในระหว่างคาบของสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เห็นได้ว่าการส่งสัญญาณแบบ NRZ มีความจำเป็นต้องใช้กำลังงานเฉลี่ยสูงกว่าการส่งสัญญาณแบบ RZ เนื่องจากการส่งสัญญาณแบบ NRZ ต้องส่งกำลังของสัญญาณตลอดทั้งคาบของบิต แต่การส่งสัญญาณแบบ RZ นั้น จะส่งกำลังของสัญญาณเพียงแค่ส่วนหนึ่งของคาบของสัญญาณเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามการส่ง

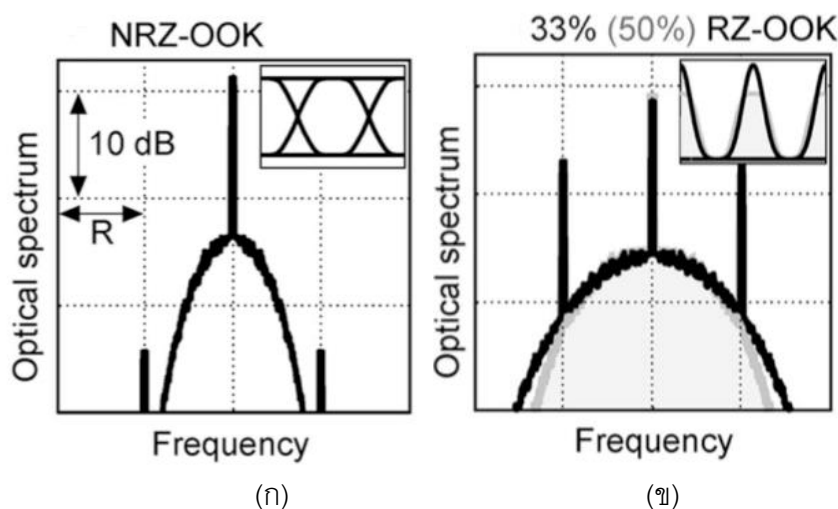
สัญญาณแบบ NRZ จะใช้แบนด์วิดท์ที่ต่ำกว่าการส่งสัญญาณแบบ RZ ซึ่งเห็นได้จากสเปกตรัมของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยรูปที่ 2.4 (ก) แสดงถึงสเปกตรัมของสัญญาณแบบ NRZ และรูปที่ 2.4 (ข) แสดงถึงสเปกตรัมของสัญญาณแบบ NRZ [15] , [16] , [17]



รูปที่ 2.2 ผลที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.3 สัญญาณแบบ NRZ และ RZ



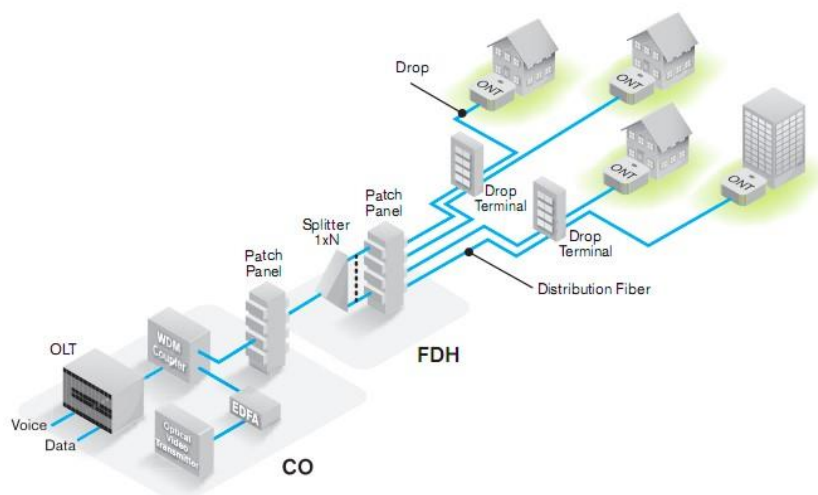
รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของสัญญาณ OOK แบบ (ก) NRZ (ข) RZ

2.4 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx [18]

Fiber-to-the-x (FTTx) ใช้เรียกลักษณะโครงสร้างของระบบเครือข่ายความเร็วสูงที่ใช้เส้นใยแสงในการเชื่อมระบบเครือข่ายไปยังผู้ใช้บริการแทนสายทองแดง อันประกอบไปด้วย [19] , [20] , [21] , [22]

1. fiber-to-the-node (FTTN) และ fiber-to-the-curb (FTTC) คือระบบสื่อสารสัญญาณเชิงแสงที่ใช้เส้นใยแสงเป็นสายส่งสัญญาณจนถึงสิ้นสุดที่หัวถนนหรือปากทางเข้าซอยจากนั้นจึงใช้สายส่งสัญญาณที่เป็นสายทองแดงเพื่อเชื่อมต่อไปยังบ้านผู้ใช้ปลายทางอีกทีหนึ่ง ระบบนี้จึงมีต้นทุนที่ต่ำลงมา
2. fiber-to-the-building (FTTB) คือระบบสื่อสารสัญญาณที่ใช้เส้นใยแสงตั้งแต่อุปกรณ์ส่งสัญญาณของผู้ให้บริการไปจนถึงอาคารของผู้ใช้บริการ จากนั้นจึงใช้สายนำสัญญาณอื่นเชื่อมต่อไปยังจุดที่ต้องการใช้งาน โดยปกติความยาวของส่วนที่เป็นโลหะหรือสายทองแดงของระบบ FTTB จะสั้นกว่า FTTN/FTTC ดังนั้น ต้นทุนในการติดตั้งจึงสูงขึ้น แต่ให้แบนด์วิดท์ที่มากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน โดยโครงข่ายชนิดนี้มักนิยมใช้ในอาคารธุรกิจหรืออาคารชุดสำหรับพักอาศัย
3. fiber-to-the-home (FTTH) คือระบบสื่อสารสัญญาณที่ใช้เส้นใยแสงตั้งแต่อุปกรณ์ส่งสัญญาณของผู้ให้บริการไปจนถึงบริเวณจุดใช้งานของผู้ใช้บริการโดยตรงซึ่งเป็นระบบที่มีต้นทุนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับระบบข้างต้นที่กล่าวมา แต่ในขณะเดียวกันระบบ FTTH ก็เป็นระบบที่ให้

แบนด์วิดท์สูงที่สุด ทั้งยังไม่มีการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระบบจึงทำให้มีการใช้พลังงานต่ำและอายุการใช้งานยาว



รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx [23]

โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx มีชุมสายสำนักงานกลาง (central office: CO) ทำหน้าที่จัดการเกี่ยวกับสัญญาณการให้บริการไปยังผู้ใช้บริการที่อยู่ในเขตควบคุมและเชื่อมโยงข้อมูลเข้ากับระบบสื่อสารโทรคมนาคมเพื่อรับส่งข้อมูลไปตามความต้องการของผู้ใช้บริการ ภายในชุมสายจะมี OLT เป็นอุปกรณ์รับสายเส้นใยแสงในฝั่งโครงข่ายโดยมักติดตั้งในตึกชุมสายไปยังบ้านผู้ใช้บริการในชุมสาย ภายในประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่สำหรับการประมวลสัญญาณ เส้นทางระหว่างชุมสายไปยังบ้านผู้ใช้บริการจะมีเส้นใยนำแสงเชื่อมโยงไปยังกลุ่มบ้านผู้ใช้บริการในลักษณะของการกระจาย (distribution) ซึ่งระหว่างทางจะมีอุปกรณ์แยกสัญญาณคือ passive optical splitter ส่วนปลายของเส้นใยนำแสงที่อยู่ภายในบ้านของผู้ใช้บริการ จะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ ONU หรือ optical network termination (ONT) ทำหน้าที่กระจายสัญญาณทั้งในรูปแบบของสัญญาณแสงและไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ใช้งาน ภายใน ทั้งนี้จำนวนอุปกรณ์ใช้งานในบ้านของผู้ใช้อาจมีได้มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ขึ้น อยู่กับกับปริมาณข้อมูล ความ (ความเร็ว)ความต้องการใช้บริการ และรูปแบบการให้บริการของผู้ให้บริการ (operator) [23]

2.5 มาตรฐานของระบบ FTTx-PON

Ethernet เป็นโปรโตคอลสื่อสัญญาณผ่าน FTTx ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคือซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐานของ IEEE จำนวน 4 มาตรฐานที่ถูกประกาศใช้แล้ว แสดงดังในตารางที่ 2 โดยมาตรฐาน GPON (ITU-T G.984) ใช้โปรโตคอล GEM ในการส่งสัญญาณ มีอัตราข้อมูลทั้ง downlink และ uplink ซึ่งส่งสัญญาณสูงสุดที่ 2.5 Gbps โดยมีระยะการให้บริการมากกว่า 20 km สำหรับมาตรฐาน GE-PON (IEEE 802.3ah) ใช้เทคโนโลยี Ethernet ในการส่งสัญญาณ มีอัตราข้อมูลทั้ง downlink และ uplink สูงสุดที่ 1.25 Gbps โดยมีระยะการให้บริการมากที่สุด 20 km สำหรับมาตรฐาน 10GE-PON: IEEE 802.3av ใช้เทคโนโลยี Ethernet ในการส่งสัญญาณ มีอัตราข้อมูลทั้ง downlink และ uplink สูงสุดที่ 10 Gbps และมาตรฐาน XG-PON (ITU-T G.987) ใช้เทคโนโลยี ethernet ในการส่งสัญญาณ มีอัตราข้อมูล downlink 10 Gbps และ uplink อยู่ที่ 2.5 Gbps โดยมีระยะการให้บริการ 20 km ขึ้นไป [22] , [24]

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานของPON [24]

	GPON	EPON	10GE-PON	XGPON
Standard	ITU G.984	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av	ITU-T G.987
Downstream speeds	1.24Gbps, 2.5Gbps	1.25Gbps	10Gbps	10Gbps
Upstream speeds	155Mbps, 622Mbps, 1.2Gbps, 2.5Gbps	1.25Gbps	10Gbps	2.5Gbps
Downstream wavelength	1480~1500nm	1500nm	1575-1580 nm	1575-1580 nm
Upstream wavelength	1260-1360nm	1310nm	1260-1280 nm	1260-1280 nm

Layer 2 support	Ethernet over GEM and/or ATM	Ethernet	Ethernet	Ethernet over GEM
	GPON	EPON	10GEPON	XGPON
Maximum PON splits	64	16	32	64
Distance	60km (max)	<20km	<20km	20km

2.6 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ Active WSS

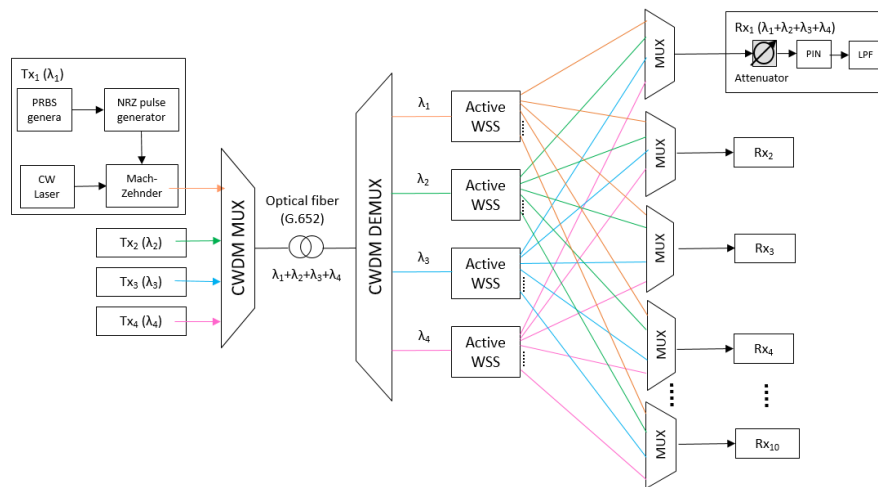
สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟ เป็นอุปกรณ์สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นเพื่อจะ add หรือ drop สัญญาณตามที่อยู่บริการต้องการโดย WSS มีคุณสมบัติ 4 ประการคือ

1. Colourless คือ ความยาวคลื่นที่ drop ในแต่ละช่องสัญญาณสามารถเป็นความยาวคลื่นใดก็ได้ในโครงข่าย ไม่กำหนดความยาวคลื่นตายตัวของแต่ละช่องสัญญาณ ทำให้สามารถเลือกใช้ความยาวคลื่นที่ drop ไปในแต่ละช่องสัญญาณได้อย่างหลากหลาย
2. Directionless คือ สามารถ drop ความยาวคลื่นออกจากทิศทางใดก็ได้ในแต่ละช่องสัญญาณ
3. Contentionless คือ การ add หรือ drop ความยาวคลื่นเดียวกันออกไปคนละทิศทางได้อย่างไม่จำกัด ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบนั้นใช้ optical cross-connect (OXC) ในการ drop ความยาวคลื่น ทำให้สามารถ add หรือ drop ความยาวคลื่นเดียวกันได้แม้จะเป็นคนละทิศทาง
4. Gridless คือ แบนด์วิดท์สามารถใช้งานได้อย่างไม่จำกัดด้วย ITU Grid แต่สำหรับกรณีที่มีอัตราข้อมูลสูงเช่น 40 Gbps หรือ 100 Gbps อาจจะต้องใช้หลายช่องสัญญาณ

2.6.1 โครงสร้างและการทำงานของ active WSS

สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟ มีหน้าที่เลือกความยาวคลื่นและจัดสรรให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้บริการ โดยอุปกรณ์นี้ทำงานแบบ dynamic ภายใต้การควบคุมของ dynamic wavelength and bandwidth allocation (DWBA) ซึ่งทำหน้าที่ในการจัดสรรอัตราข้อมูลและ

จัดสรรข้อมูลให้ตรงกับเวลาที่ผู้ใช้บริการร้องขอ (switching time) โดยทั่วไปแล้ว สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟมีหลายประเภท โดยแบ่งตามวัสดุที่ใช้ในการผลิตได้แก่ สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟที่ผลิตจาก MEMs Mirrors , digital light processing (DLP) , liquid crystals cells (LC cells) , liquid crystals on silicon (LCoS) และ hybrid (LC + MEMs) ซึ่งแต่ละประเภทนั้นจะมี switching characteristic และ time constant ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกความเร็วของการตอบสนองของ WSS ที่ต่างกัน [25] , [26] , [27] , [28]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างและการทำงานของ active WSS

การทำงานของ WSS ในแต่ละครั้ง switching characteristic ณ พอร์ตขาออกที่พิจารณาสามารถประมาณได้จากสมการ switching characteristic ที่ (2-1)

$$H(t) = \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \Big|_{t_0 < t \leq t_1} + 1 \Big|_{t_1 < t \leq t_2} + \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \Big|_{t_2 < t \leq t_3} \right] \exp(j\theta) \quad (2-1)$$

โดยที่ $H(t)$ คือ switching transfer function

τ คือ time constant [s] คือ ช่วงเวลาที่สวิตช์เริ่มปิด วงจรเริ่มทำงานโดยที่กำลังสัญญาณเริ่มจาก ไปถึง $0\frac{1}{e}$ หรือ ช่วงเวลาที่สวิตช์กำลังจะเปิด วงจรจะหยุดทำงาน ทำให้กำลังสัญญาณตกจากกำลังสัญญาณสูงสุด คือ แล้วตกลงมาถึง $1\frac{1}{e}$

t_0 คือ เวลาที่สวิตช์เริ่มสลับจากพอร์ตขาออกเดิม ไปยังพอร์ตขาออกที่พิจารณา [s]

t_1 คือ เวลาที่การตอบสนองของสวิตช์ต่อสัญญาณเข้าที่พอร์ตาออกที่พิจารณาเป็น 100% [s]

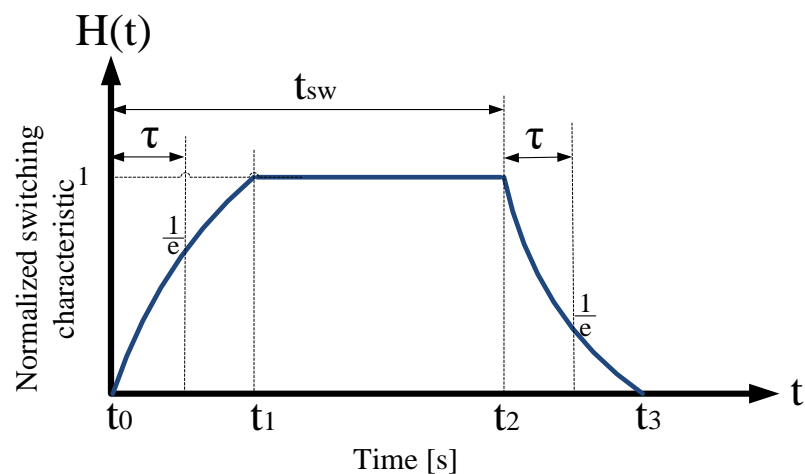
t_2 คือ เวลาที่สวิตช์เริ่มสลับจากพอร์ตาออกที่พิจารณา ไปยังพอร์ตาออกอื่น [s]

t_3 คือ เวลาที่กำลังแสงซึ่งถูกสวิตช์ไปยังพอร์ตาออกที่พิจารณา ถูกถ่ายถอดออกจากสวิตช์จนสมบูรณ์ [s]

t_{sw} คือ switching time [s] คือช่วงเวลาที่สวิตช์เริ่มสับสัญญาณจากพอร์ตาเดิมไปยังพอร์ตาที่พิจารณา จนถึงเวลาที่สวิตช์เริ่มสับสัญญาณจากพอร์ตาที่พิจารณา ไปยังพอร์ตาต่อไป

สมการ switching characteristic ดังที่แสดงในสมการที่ (2-1) สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.7 แสดงถึง switching characteristic ในการสวิตช์ 1 ครั้ง โดยแบ่งออกเป็นสามช่วงดังต่อไปนี้

1. ช่วง $t_0 < t \leq t_1$ คือช่วงเวลาที่สวิตช์เริ่มสับสัญญาณจากพอร์ตาเดิมไปยังพอร์ตาที่พิจารณา จนถึงเวลาที่การตอบสนองของสวิตช์ต่อสัญญาณเข้าที่พอร์ตาที่พิจารณาเป็น 100% นั่นคือ วงจรเริ่มทำงานที่กำลังสัญญาณเริ่มจาก 0 ไปจนถึงจุดที่กำลังสัญญาณสูงสุดคือ 1 ที่เวลา t_1
2. ช่วง $t_1 < t \leq t_2$ เป็นช่วงเวลาที่การตอบสนองของสวิตช์ต่อสัญญาณเข้าที่พอร์ตาที่พิจารณาเป็น 100% จนถึงเวลาที่สวิตช์เริ่มสับสัญญาณจากพอร์ตาที่พิจารณาไปยังพอร์ตาอื่น นั่นคือ วงจรยังใช้งานได้อยู่โดยที่กำลังสัญญาณยังคงเป็น 1 ไปจนถึงจุดที่เวลา t_2
3. ช่วง $t_2 < t \leq t_3$ คือช่วงเวลาที่สวิตช์เริ่มสับสัญญาณจากพอร์ตาที่พิจารณา ไปยังพอร์ตาอื่นต่อไป จนถึงเวลาที่กำลังแสงซึ่งถูกสวิตช์ไปยังพอร์ตาที่พิจารณาถ่ายถอดออกจากสวิตช์จนหมดอย่างสมบูรณ์แล้ววงจรหยุดทำงาน ทำให้กำลังสัญญาณตกลงจากกำลังสัญญาณสูงสุด คือ 1 ลงมาถึง 0



รูปที่ 2.7 switching characteristic ต่อการสวิตช์ 1 ครั้ง

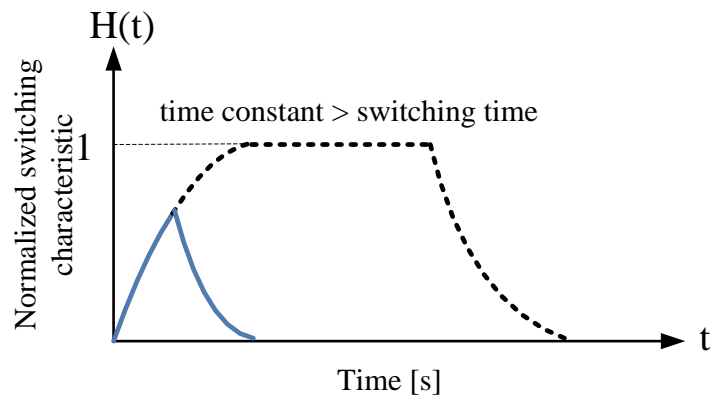
โดยสมการ switching characteristic ข้างต้นนั้น เมื่อนำไปคูณกับสัญญาณขาเข้า (E_{in}) ในหน่วย Gbps จะได้สัญญาณขาออก (E_{out}) ในหน่วย Gbps ดังสมการที่ (2-2)

$$E_{out} = E_{in} \times H(t) \quad (2-2)$$

2.6.2 ผลของค่า time constant และกราฟ switching characteristic

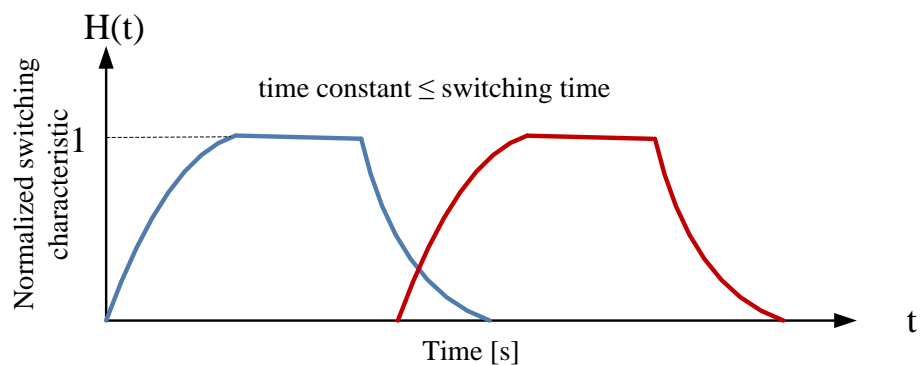
ในความเป็นจริงกำลังสัญญาณสูงสุดของสวิตช์ในกราฟดังรูปที่ 2.7 มีค่าไม่ถึง 1 แต่เนื่องจากแกนที่แสดงถึงค่ากำลังสัญญาณ โดยจากรูปคือแกน y ที่พิจารณานั้น ไม่คิดผลของความสูญเสีย insertion loss ที่เกิดจากสวิตช์ ทำให้ค่ากำลังของสัญญาณแสดงเป็น 1 ดังแสดงในรูปว่าเป็นกราฟ normalized switching characteristic อย่างไรก็ตาม active WSS แต่ละตัวนั้นจะมีค่า time constant (τ) ไม่เท่ากัน จึงทำให้กราฟของ switching characteristic แตกต่างกันไปสำหรับสวิตช์แต่ละประเภท ซึ่งหากพิจารณาในแง่อุดมคติ นั่นคือไม่คิดผลของค่า time constant กราฟ switching characteristic ที่ได้จะเป็นรูปสี่เหลี่ยม (pulse) ซึ่งหมายถึงสวิตช์นั้นสามารถสับเปลี่ยนสัญญาณที่พอร์ตขาออกของผู้ให้บริการรายแรกไปยังผู้ให้บริการรายถัดไปได้ทันที (instantaneous) โดยไม่มีการหน่วงดังแสดงในกราฟ switching characteristic ที่ช่วงเวลา $t_0 - t_1$ และช่วงเวลา $t_3 - t_4$ แต่หากพิจารณาในความเป็นจริงแล้วทุกสวิตช์จะมีผลของค่า time constant เกิดขึ้นอยู่เสมอ โดยถ้าหากค่า time constant มีค่ามากจะส่งผลให้สวิตช์สับสัญญาณไปสู่ผู้ให้บริการได้ช้า แต่ถ้าหากค่า time constant มีค่าน้อยจะส่งผลให้สวิตช์สับสัญญาณไปยังผู้ให้บริการได้เร็วกว่า จากที่ความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นนี้จึงสามารถจำแนกรูปแบบของความสัมพันธ์ของค่า time constant ในแต่ละสวิตช์กับ switching time ที่ผู้ให้บริการร้องขอ ได้เป็น 2 รูปแบบ นั่นคือ

1. กรณีที่ time constant มากกว่า switching time ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณที่ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ เนื่องจากในช่วงเวลาที่สวิตช์เริ่มสลับจากพอร์ตก่อนหน้าไปยังพอร์ตถัดไปที่พิจารณา (t_0) ในขณะที่กำลังสัญญาณของสวิตช์กำลังเพิ่มขึ้นตาม switching characteristic แต่ยังไม่ถึงจุดที่กำลังสัญญาณมีค่าสูงสุด แต่ต้องสับสวิตช์ให้ผู้ให้บริการรายถัดไปแล้ว จึงทำให้ได้กำลังสัญญาณไม่เพียงพอต่อการใช้งาน



รูปที่ 2.8 time constant มากกว่า switching time

2. กรณี time constant น้อยกว่าหรือเท่ากับ switching time ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ แต่สัญญาณจะผิดเพี้ยนในช่วงเวลาแรกเนื่องจากได้รับสัญญาณรบกวนหรือเรียกอีกอย่างว่า สัญญาณไขว้แทรก (crosstalk) จากผู้ใช้บริการรายก่อนหน้า กล่าวคือเมื่อเวลาที่กำลังแสงซึ่งถูกสวิตช์ไปยังพอร์ตที่พิจารณาถูกถ่ายทอดออกจากสวิตช์ วงจรจะหยุดทำงาน ค่ากำลังสัญญาณของสวิตช์จะค่อยๆ ลดต่ำลงไปตาม switching characteristic ของสวิตช์แต่ยังไม่ถึงจุดที่กำลังสัญญาณเป็นศูนย์ ในขณะที่เดียวกันนั้นก็มีการสับสวิตช์ให้ผู้ใช้บริการรายถัดไป นอกจากผู้ใช้บริการรายถัดไปจะได้รับสัญญาณที่ต้องการแล้ว ยังได้รับสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้บริการรายก่อนหน้าอีกด้วย ซึ่งเป็นสัญญาณที่ผู้ใช้บริการรายถัดไปไม่ต้องการ ทำให้เกิดสัญญาณที่มีความผิดเพี้ยนในช่วงแรกของสัญญาณที่ส่งให้แก่ผู้ใช้บริการรายถัดไป



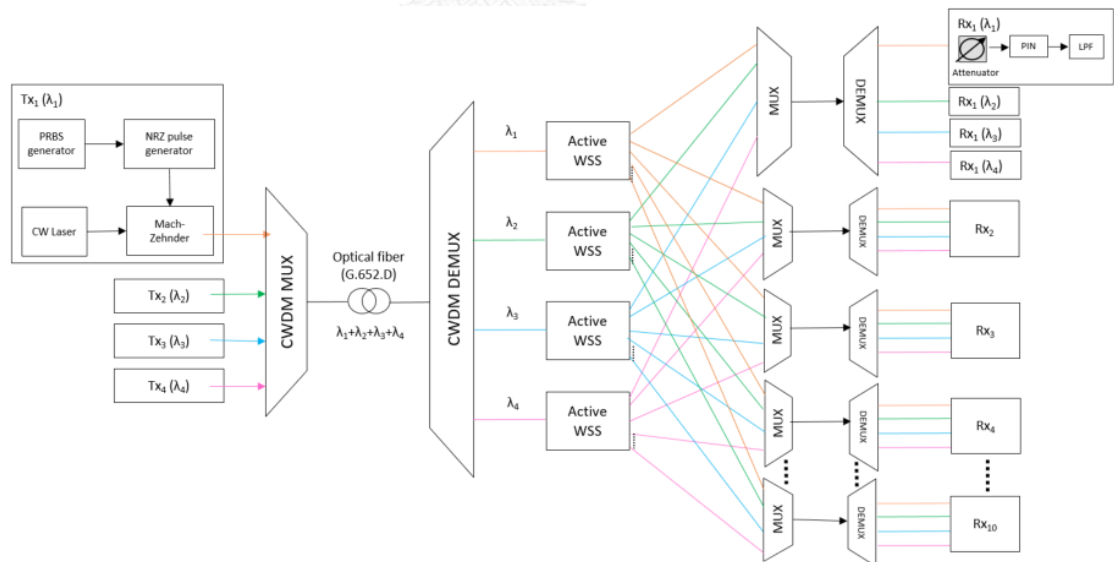
รูปที่ 2.9 time constant น้อยกว่าหรือเท่ากับ switching time

บทที่ 3

ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 10 ราย

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึง time constant และ switching time ของสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสัญญาณที่ผู้ใช้บริการได้รับแล้ว ซึ่งหาก time constant มากกว่า switching time สัญญาณที่ได้รับจะผิดเพี้ยนเนื่องจากกำลังสัญญาณไม่เพียงพอในช่วงที่สับสวิตช์ แต่หาก time constant น้อยกว่าหรือเท่ากับ switching time เกิดสัญญาณผิดเพี้ยนในช่วงแรกของสัญญาณยังเป็นการสูญเสียอัตราข้อมูลเกินความจำเป็นอีกด้วย ในบทที่ 3 นี้จึงจะกล่าวถึงการเพิ่มค่าหน่วงเวลา (delay time) ระหว่างการสับสวิตช์จากพอร์ตเดิมไปยังพอร์ตต่อไปตามผู้ใช้บริการร้องขอจากในระบบ 4 ความยาวคลื่นที่มีผู้ใช้บริการ 10 ราย เพื่อตอบสนองต่อความต้องการทางอัตราข้อมูลของผู้ใช้บริการและประสิทธิภาพของสัญญาณที่ผู้ใช้บริการได้รับ

3.1 โครงสร้างของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่น และมีผู้ใช้บริการ 10 ราย



รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบ FTTx ที่มี ราย 10 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 4

โครงสร้างการทำงานของระบบ FTTx ซึ่งใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟในการจัดสรรข้อมูลให้แก่ผู้ใช้บริการแต่ละรายตามที่ร้องขอ โดยระบบนี้จะไม่มีการชนกันของข้อมูล เรียกว่าการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ CWDM โดยจากรูปที่ 3.1 ระบบจะส่งสัญญาณที่มีจำนวน 4 ความยาวคลื่นที่ต่างกันออกไป ซึ่งมีอัตราข้อมูลความยาวคลื่นละ 10 Gbps และส่งในช่วงเวลาที่ต่างกันออกไป ซึ่งความยาวคลื่นนี้ถูกสร้างขึ้นที่ OLT ที่ถูกควบคุมโดย DWBA ภายใต้การร้องขอจาก ONU ของผู้ใช้บริการแต่ละบ้าน เมื่อถูกจัดสรรความยาวคลื่นที่เหมาะสมแล้วสัญญาณ CWDM จะถูกส่งผ่านเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว SMF ITU-T G.652.D ไปยัง WSS ที่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วง เพื่อจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละช่วงเวลาไปยัง ONU ตามที่ร้องขอ โดยโครงสร้างของระบบ FTTx นี้สามารถใช้ WSS แทนที่ passive optical splitter สำหรับการส่งสัญญาณได้ จากนั้นเมื่อ ONU เสร็จสิ้นการรับอัตราข้อมูล ณ ช่วงเวลาที่ร้องขอแล้ว ความยาวคลื่นทั้งหมดจะถูกส่งกลับไปยัง OLT ทันที

ดังนั้นโครงสร้างระบบนี้ที่มีการนำ WSS มาใช้ร่วมกับ DWBA บนระบบ FTTx โดยมีการหน่วงเวลาของกาสสวิตช์ WSS จะมีความสามารถในการจัดสรรข้อมูลให้แก่แต่ละ ONU ตามที่ร้องขอได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบนี้สามารถส่งอัตราข้อมูลได้สูงสุดอยู่ที่ 40 Gbps ต่อผู้ใช้บริการ นั่นคือส่งทั้งหมด 4 ความยาวคลื่นให้แก่ผู้ใช้บริการรายเดียว โดยระบบนี้เหมาะแก่การใช้งานกับสถานที่ที่มีผู้ใช้บริการจำนวนมาก แต่ปริมาณในการใช้อัตราข้อมูลไม่สูงมากนักแต่สามารถส่งอัตราข้อมูลให้แก่ผู้ใช้บริการได้อย่างทั่วถึง เช่น เขตที่อยู่อาศัย เป็นต้น

3.2 WSS ที่ใช้ในระบบ FTTX เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA

WSS เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการจัดสรรความยาวคลื่นให้ตรงตามผู้ใช้บริการร้องขอให้ตรงกับช่วงเวลา (switching time) ที่ผู้ใช้บริการร้องขอ โดยอุปกรณ์นี้ทำงานแบบ dynamic ภายใต้การควบคุมของ DWBA โดยทั่วไป WSS มีหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดจะมีค่า time constant, Insertion loss, Noise figure และ switching characteristic ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของ WSS แต่ละชนิดที่ใช้ในการจำลองระบบ

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของ WSS แต่ละชนิด

Type of WSS	Time Constant (τ)	Insertion loss	Noise figure
Photonic crystal switch	0.5 pS	16 dB	-
GaNAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	100 pS	16 dB	-
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	1 nS	-	8 dB
Electro-optic switch	5 nS	2 dB	-

3.3 จำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 10 ราย

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการจำลองระบบและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในระบบ ในกรณีที่มีจำนวนผู้ใช้บริการมากกว่าจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีในระบบ โดยการจำลองนี้ใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้สูงสุด 10 ราย โดยจำลองบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม optisystem software version 8.0 เพื่อทดสอบการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพของระบบ

โครงสร้างของระบบนี้ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบไปด้วย 4 ความยาวคลื่นซึ่งอยู่ในช่วง 1471nm-1531nm และมีระยะห่างของช่องสัญญาณ (channel spacing) เท่ากับ 20 nm สัญญาณทั้ง 4 ความยาวคลื่นถูกสร้างโดยมีแหล่งกำเนิดแสงที่สร้างขึ้นจากอาร์เรย์ของ CWDM continuous-wave laser จากนั้น Pseudo-random bit sequence generator จะรับหน้าที่ในการสร้างบิตอย่างสุ่มให้แก่ระบบ โดยมีการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK และเปลี่ยนรูปร่างโดย Mach-Zehnder modulator โดยมีอัตราข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps ต่อหนึ่งความยาวคลื่น จากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วทั้งหมดจะถูกรวมเข้าด้วยกันที่ multiplexer ที่มีค่า Insertion loss เท่ากับ 1.5 dB จากนั้นสัญญาณของแต่ละความยาวคลื่นจะถูกส่งผ่านเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652.D โดยส่งสัญญาณเป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (attenuation) และค่าดิสเพอร์ชัน (dispersion) ของ เส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวสำหรับความยาวคลื่น CWDM ที่ 1471nm-1531nm

โดยมีระยะห่างช่องสัญญาณเท่ากับ 20 nm ค่า attenuation และค่า dispersion ที่ใช้ในการจำลองระบบจะถูกแสดงในตารางที่ 3.2

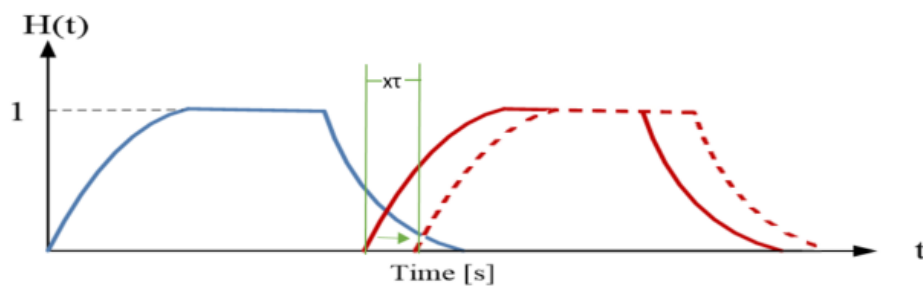
ตารางที่ 3.2 ค่า attenuation และ dispersion ของความยาวคลื่นที่ 1471-1531 nm

Wavelength [nm]	Attenuation [dB/km]	Dispersion [ps/km/nm]
1471	0.2127	12.5567
1491	0.2029	13.8819
1511	0.1956	15.1614
1531	0.1908	16.3988

กำหนดให้ระบบที่จำลองมีค่าโหมตการกระจายโพลาไรเซชัน (PMD) เท่ากับ $0.2 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$ โดยเส้นใยแสงจะส่งการเปลี่ยนรูปร่าง (Scattering section disper) ทุกระยะทางเท่ากับ 100 เมตร และเมื่อมีระยะทางครบ 500 เมตรจะคิดค่าเฉลี่ยของ PMD (mean scattering section) โดยไม่คิดผลของ non-linear หลังจากนั้น ทั้ง 4 ความยาวคลื่นจะถูกแยกสัญญาณแต่ละความยาวคลื่นด้วย demultiplexer ที่มีค่า insertion loss เท่ากับ 1.5 dB โดยสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟที่ควบคุมโดย DWBA จะทำหน้าที่คอยจัดสรรความยาวคลื่นให้กับผู้ใช้บริการแต่ละราย ซึ่งมีสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟที่ใช้งานอยู่ทั้งหมด 4 ชนิดตามที่ปรากฏดังตารางที่ 3.1 โดยแต่ละชนิดจะมีค่า time constant ที่ต่างกันส่งผลให้ switching characteristic ของแต่ละสวิตช์นั้นต่างกันเช่นกัน จากนั้นจึงผ่าน multiplexer อีกครั้งเพื่อรวมสัญญาณก่อนส่งถึงภาครับ สำหรับในส่วนของภาครับนั้น สัญญาณแต่ละความยาวคลื่นจะถูกปรับเพิ่มค่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน ที่มีค่าเท่ากับ 3 dB ด้วย optical attenuator และถูกตรวจจับสัญญาณโดย PIN photodetector ที่มีประสิทธิภาพการรับสัญญาณ 90%, มีค่า dark current ของตัวรับสัญญาณอยู่ที่ 10 nA และมี thermal noise เท่ากับ $18 \times 10^{-12} \text{ A} / \sqrt{\text{Hz}}$ จากนั้นจะกรองสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำออกด้วยวงจร low-pass filter ซึ่งมี cutoff frequency เท่ากับ $0.75 \times \text{bit rate} [\text{Hz}]$ และ 3R Regenerator เป็นอุปกรณ์ตัวสุดท้าย โดยสัญญาณที่ถูกตรวจจับแล้วจะถูกส่งไปที่ eye-diagram analyzer เพื่อคำนวณหา bit-error rate (BER) ซึ่ง BER ที่สามารถยอมรับได้จะมีค่าน้อยกว่า 10^{-4}

3.4 วิเคราะห์ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 10 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS แต่ละชนิด

ในการวิเคราะห์ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 10 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลา โดยออกแบบการหน่วงเวลาให้เป็นจำนวนเท่าของ time constant ดังแสดงในรูปที่ 3.2

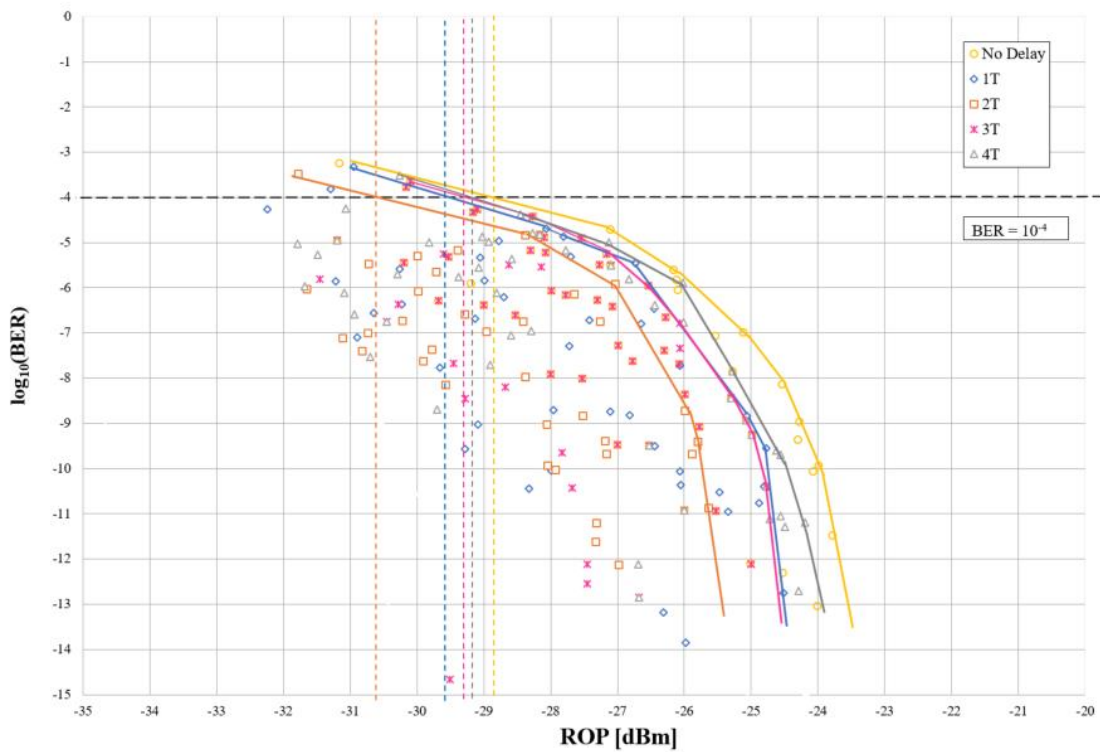


รูปที่ 3.2 ช่วงการหน่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นมาในระบบ

รูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงช่วงการหน่วงเวลาที่ถูกเพิ่มขึ้นมาในระบบ เส้นทึบสีน้ำเงินแสดงถึง switching characteristic ของผู้ใช้บริการรายแรก สำหรับเส้นทึบสีแดงแสดงถึง switching characteristic ของผู้ใช้บริการรายที่สองหลังการสับสวิตซ์ที่ยังไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วง สังเกตได้ว่าจะเห็นส่วนที่ทับซ้อนกันของสัญญาณของผู้ใช้บริการรายแรกและรายที่สองซึ่งเป็นผลให้อัตราข้อมูลเมื่อกำลังสัญญาณของสวิตซ์เป็นหนึ่ง มีค่ามาก แต่ขณะเดียวกันประสิทธิภาพของข้อมูลที่ได้รับต่ำ กล่าวคือ BER ที่ได้นั้นมีค่ามาก แต่หากเพิ่มการหน่วงเวลาเข้าไปดังแสดงในช่วงเวลาสี่เท่าซึ่งเป็นจำนวนเท่าของ time constant จะทำให้ switching characteristic ของผู้ใช้บริการรายที่สองหลังการสับสวิตซ์ที่มีการหน่วงเวลาขยายออกไปดังที่แสดงด้วยเส้นประสีแดง ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของข้อมูลที่ได้รับสูงขึ้น กล่าวคือ BER ที่ได้นั้นมีค่าน้อยกว่า แต่ต้องแลกมาด้วยอัตราข้อมูลที่ลดลงเช่นกัน จึงจำลองการเปลี่ยนค่าเวลาหน่วง จาก 0τ คือไม่มีการหน่วงเวลา, 1τ คือมีการหน่วงเวลาเท่ากับค่าของ time constant, 2τ คือมีการหน่วงเวลาเป็น 2 เท่าของ time constant, 3τ คือมีการหน่วงเวลาเป็น 3 เท่าของ time constant และ 4τ คือมีการหน่วงเวลาเป็น 4 เท่าของ time constant โดยแต่ละค่าเวลาหน่วงจะจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่งเป็นค่าที่แตกต่างกันออกไป แล้ววัดค่ากำลังสัญญาณที่ขารับ จนได้กำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง 10^{-4} จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับของค่าเวลาหน่วงหนึ่ง จากนั้นจึงจำลองเปลี่ยนค่าเวลาหน่วง แล้วทำซ้ำเช่นเดิมเพื่อให้ได้กราฟความสัมพันธ์ของ $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงที่ใช้

3.4.1 photonic crystal switch ที่มี $\tau = 0.5$ ps

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 10 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ที่มี $\tau = 0.5$ ps



รูปที่ 3.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ (ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ($\tau = 0.5$ ps) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ

จากรูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ($\tau = 0.5$ ps) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ กราฟที่ได้แสดงนี้เป็นกราฟที่ได้จากการจำลองระบบซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นจุดกระจัดกระจาย (scatter plot) เนื่องจากระบบมีการสับสวิตช์เพื่อส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้บริการที่หลากหลายตามแต่ละช่วงเวลาที่ใช้บริการร้องขอและยังมีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังสัญญาณที่ขาส่งอีกด้วย

จากกราฟที่มีจุดกระจัดกระจาย ให้เลือกขีดเส้นกราฟเพื่อหาจุดตัดของกำลังสัญญาณขารับ และ $\log_{10}(\text{BER})$ เมื่อพิจารณาที่ $\text{BER} = 10^{-4}$ โดยให้เลือกขีดเส้นกราฟที่แสดงถึงกรณีที่แย่มากที่สุด

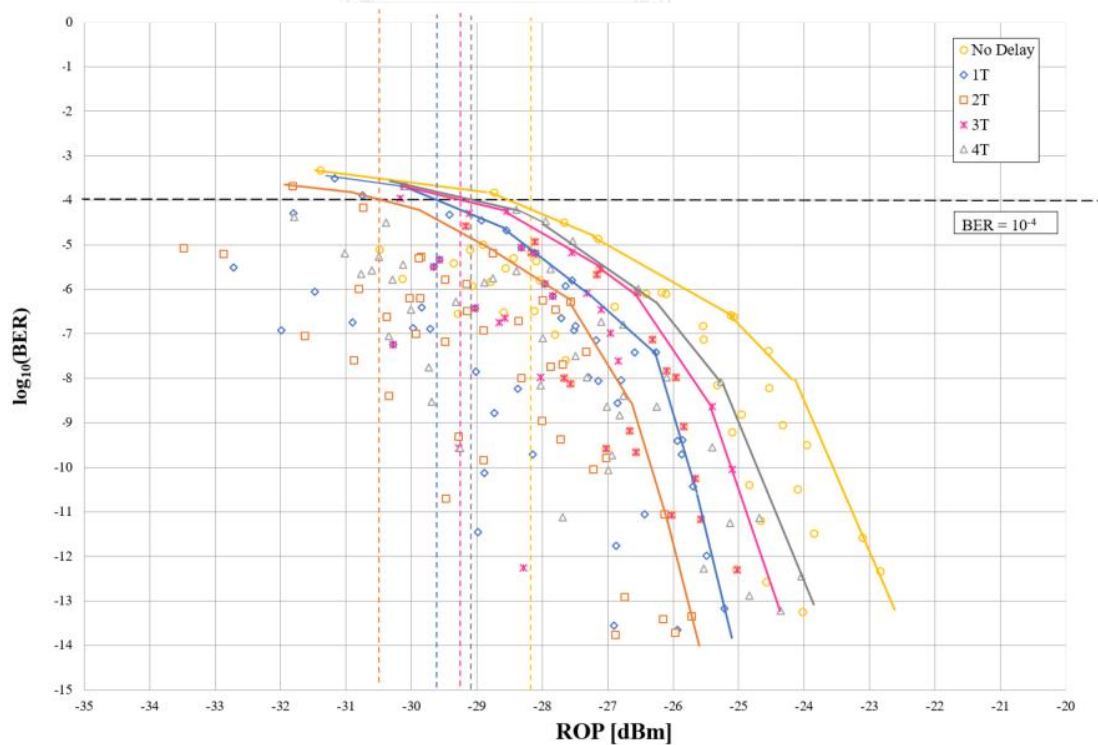
(worst case) ที่เป็นไปได้ คือเส้นที่มีแนวโน้มอยู่ด้านขวาสุดของกราฟ เนื่องจากทุกจุดบนเส้นกราฟนี้ ให้ค่ากำลังสัญญาณขารับมากที่สุด ซึ่งผลของแต่ละค่าแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่า กำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ($\tau = 0.5\text{ps}$) บนระบบ ผู้ใช้บริการ 10 ความยาวคลื่น 4

Received optical power ที่ BER = 10^{-4}				
No delay	Delay = 1τ	Delay = 2τ	Delay = 3τ	Delay = 4τ
-28.83 dBm	-29.58 dBm	-30.58 dBm	-29.31 dBm	-29.13 dBm

3.4.2 GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มี $\tau = 100\text{ ps}$

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมีผู้ให้บริการ 10 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มี $\tau = 100\text{ ps}$



รูปที่ 3.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ (ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ($\tau = 100$ ps) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ

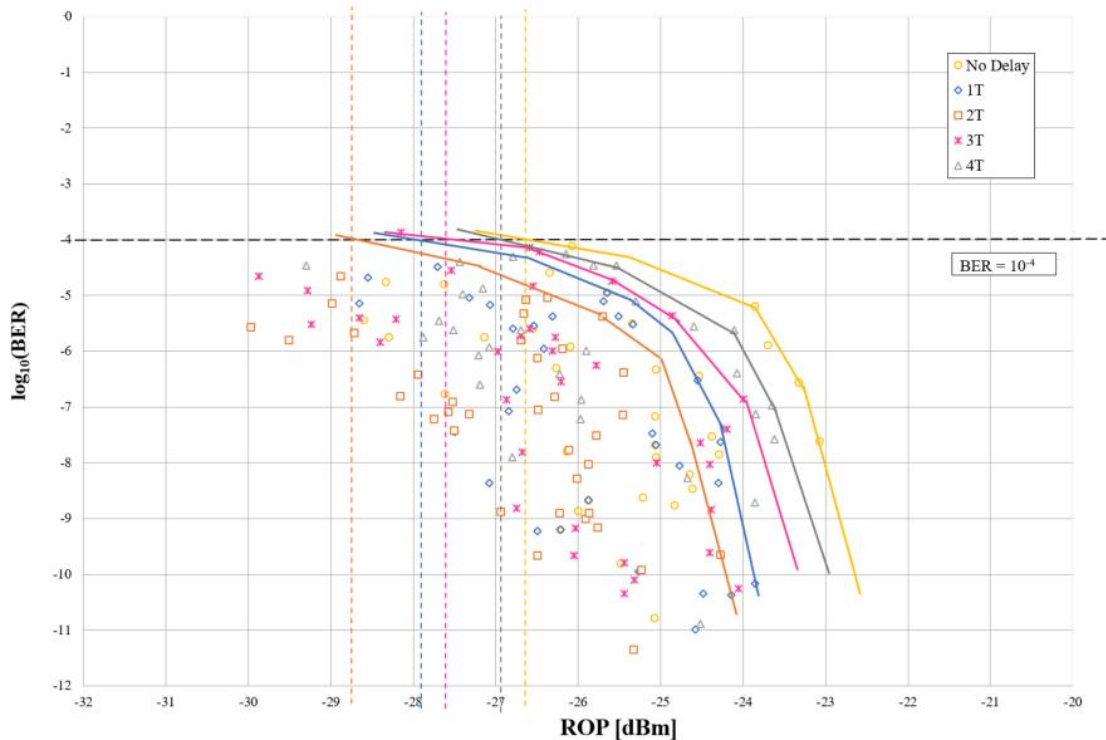
จากรูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ($\tau = 100$ ps) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ ซึ่งผลของจุดตัดของกำลังสัญญาณขารับและ $\log_{10}(\text{BER})$ เมื่อพิจารณาที่ $\text{BER} = 10^{-4}$ แต่ละค่าแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ($\tau = 100$ ps) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ

Received optical power ที่ $\text{BER} = 10^{-4}$				
No delay	Delay = 1τ	Delay = 2τ	Delay = 3τ	Delay = 4τ
- 28.18 dBm	- 29.56 dBm	- 30.47 dBm	- 29.23 dBm	- 29.06 dBm

3.4.3 Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ที่มี $\tau = 1$ ns

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมีผู้ให้บริการ 10 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS ชนิด Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ที่มี $\tau = 1$ ns



รูปที่ 3.5 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ (ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ($\tau = 1 \text{ ns}$) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ

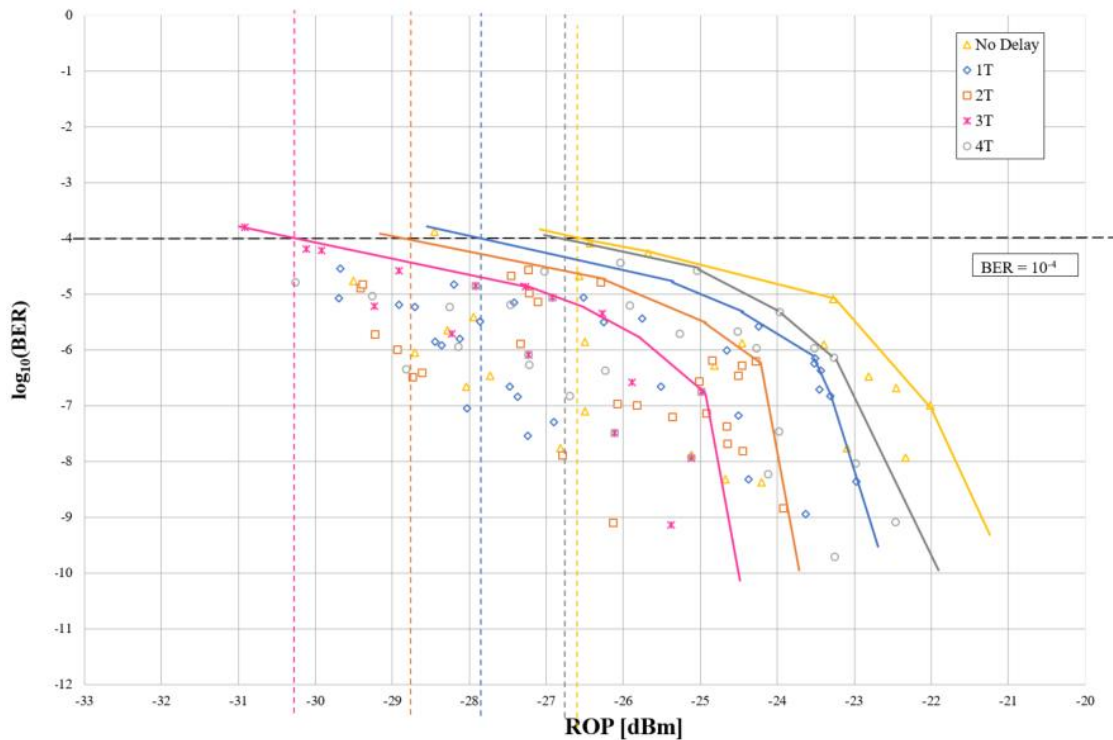
จากรูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด ชนิด Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ($\tau = 1 \text{ ns}$) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ ซึ่งผลของจุดตัดของกำลังสัญญาณขารับและ $\log_{10}(\text{BER})$ เมื่อพิจารณาที่ $\text{BER} = 10^{-4}$ แต่ละค่าแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ($\tau = 1 \text{ ns}$) บนระบบ 4 ผู้ 10 ความยาวคลื่นใช้บริการ

Received optical power ที่ $\text{BER} = 10^{-4}$				
No delay	Delay = 1τ	Delay = 2τ	Delay = 3τ	Delay = 4τ
- 26.68 dBm	- 27.89 dBm	- 28.80 dBm	- 27.57 dBm	- 26.91 dBm

3.4.4 electro-optic switch ที่มี $\tau = 5$ ns

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 10 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS ชนิด electro-optic switch ที่มี $\tau = 5$ ns



รูปที่ 3.6 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ(ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด electro-optic switch ($\tau = 5$ ns) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ

จากรูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด ชนิด electro-optic switch ($\tau = 5$ ns) บนระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ ซึ่งผลของจุดตัดของกำลังสัญญาณขารับและ $\log_{10}(\text{BER})$ เมื่อพิจารณาที่ $\text{BER} = 10^{-4}$ แต่ละค่าแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด electro-optic switch ($\tau = 5\text{ns}$) บนระบบ ผู้ใช้บริการ 10 ความยาวคลื่น 4

Received optical power ที่ BER = 10^{-4}				
No delay	Delay = 1τ	Delay = 2τ	Delay = 3τ	Delay = 4τ
- 26.62 dBm	- 27.83 dBm	- 28.74 dBm	- 30.25 dBm	- 26.74 dBm

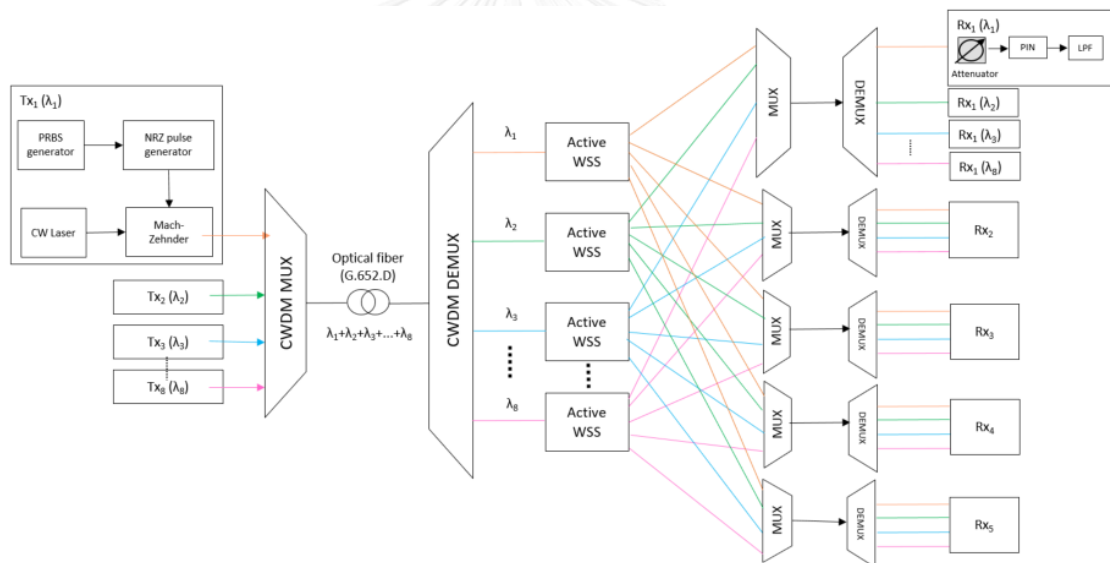


บทที่ 4

ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 5 ราย

ในบทที่ 4 จะนำเสนอระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 5 ราย โดยมีการเพิ่มค่าหน่วงเวลา (delay time) ระหว่างการสับสวิตช์จากพอร์ตเดิมไปยังพอร์ตต่อไปตามที่ใช้บริการร้องขอ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการทางอัตราข้อมูลของผู้ใช้บริการและประสิทธิภาพของสัญญาณที่ผู้ใช้บริการได้รับ

4.1 โครงสร้างของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 5 ราย



รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 5 ราย

โครงสร้างการทำงานของระบบ FTTx ซึ่งใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟในการจัดสรรข้อมูลให้แก่ผู้ใช้บริการแต่ละรายตามที่ร้องขอโดยระบบนี้จะไม่มีการชนกันของข้อมูลของความยาวคลื่นแบบ CWDM โดยจากรูปที่ 4.1 ระบบจะส่งสัญญาณที่มีจำนวน 8 ความยาวคลื่นที่ต่างกันออกไป ซึ่งมีอัตราข้อมูลความยาวคลื่นละ 10 Gbps และส่งในช่วงเวลาที่ต่างกันออกไปซึ่งถูกสร้างขึ้นที่ OLT ที่ถูกควบคุมโดย DWBA ภายใต้การร้องขอจาก ONU ของผู้ใช้บริการแต่ละบ้าน เมื่อถูกจัดสรรความยาวคลื่นให้เหมาะสมแล้วสัญญาณ CWDM จะถูกส่งผ่านเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว SMF ITUT G.652.D ไปยัง WSS ที่มีการหน่วงเวลา เพื่อจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละช่วงเวลาไปยัง

ONU ตามที่ร้องขอ โดยโครงสร้างของระบบ FTTx นี้สามารถใช้ WSS แทนที่ passive optical splitter สำหรับการส่งสัญญาณได้ เมื่อ ONU เสร็จสิ้นการรับอัตราข้อมูล ณ ช่วงเวลาที่ร้องขอแล้ว ความยาวคลื่นทั้งหมดจะถูกส่งกลับไปยัง OLT ทันที

ดังนั้นโครงสร้างระบบนี้ที่มีการนำ WSS มาใช้ร่วมกับ DWBA บนระบบ FTTx โดยมีการหน่วงเวลาของกาสับสวิตช์ WSS จะมีความสามารถในการจัดสรรข้อมูลให้แก่แต่ละ ONU ตามที่ร้องขอได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบนี้สามารถส่งอัตราข้อมูลได้สูงสุด 80 Gbps นั่นคือส่งทั้งหมด 8 ความยาวคลื่นให้แก่ผู้ใช้บริการรายเดียว โดยระบบนี้เหมาะแก่การใช้งานกับสถานที่ที่มีความต้องการใช้อัตราข้อมูลในปริมาณมาก แต่จำนวนผู้ใช้บริการไม่มากนัก

4.2 WSS ที่ใช้ในระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA

WSS เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการจัดสรรความยาวคลื่นให้ตรงตามผู้ใช้บริการร้องขอให้ตรงกับช่วงเวลา (switching time) ที่ผู้ใช้บริการร้องขอ โดยอุปกรณ์นี้ทำงานแบบ dynamic ภายใต้การควบคุมของ DWBA โดยทั่วไป WSS มีหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดจะมีค่า time constant, Insertion loss, Noise figure และ switching characteristic ที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 3.1

4.3 จำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 5 ราย

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการจำลองระบบและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในระบบ ในกรณีที่มีจำนวนผู้ใช้บริการน้อยกว่าจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีในระบบ โดยการจำลองนี้ใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 8 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้สูงสุด 5 ราย โดยจำลองบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม optisystem software version 8.0 เพื่อทดสอบการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพของระบบ

โครงสร้างของระบบนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ประกอบไปด้วย 8 ความยาวคลื่นซึ่งอยู่ในช่วง 1471nm-1531nm และมีระยะห่างของช่องสัญญาณ (channel spacing) เท่ากับ 20 nm สัญญาณทั้ง 4 ความยาวคลื่นถูกสร้างโดยมีแหล่งกำเนิดแสงที่สร้างขึ้นจากอาร์เรย์ของ CWDM continuous-wave laser จากนั้น Pseudo-random bit sequence generator จะรับหน้าที่ในการสร้างบิตอย่างสุ่มให้แก่ระบบ โดยมีการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK และเปลี่ยนรูปร่างโดย Mach-Zehnder modulator โดยมีอัตราข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps ต่อหนึ่งความยาวคลื่น จากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลต

แล้วทั้งหมดจะถูกรวมเข้าด้วยกันที่ multiplexer ที่มีค่า Insertion loss เท่ากับ 1.5 dB จากนั้นสัญญาณของแต่ละความยาวคลื่นจะถูกส่งผ่านเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652.D โดยส่งสัญญาณเป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (attenuation) และค่าดิสเพอร์ชัน (dispersion) ของเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวสำหรับความยาวคลื่น CWDM ที่อยู่ในช่วง 1471 nm-1531 nm โดยมีระยะห่างช่องสัญญาณเท่ากับ 20 nm ค่า attenuation และค่า dispersion ที่ใช้ในการจำลองระบบจะถูกแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า attenuation และ dispersion ของความยาวคลื่นที่ 1471-1531 nm

Wavelength [nm]	Attenuation [dB/km]	Dispersion [ps/km/nm]
1431	0.243	9.76147
1451	0.2254	11.1853
1471	0.2127	12.5567
1491	0.2029	13.8819
1511	0.1956	15.1614
1531	0.1908	16.3988
1551	0.1892	17.5969
1571	0.1915	18.7581

กำหนดให้ระบบที่จำลองมีค่าโหมดการกระจายโพลาไรเซชัน (PMD) เท่ากับ $0.2 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$ โดยเส้นใยแสงจะส่งการเปลี่ยนรูปร่าง (Scattering section disper) ทุกระยะทางเท่ากับ 100 เมตร และเมื่อมีระยะทางครบ 500 เมตรจะคิดค่าเฉลี่ยของ PMD (mean scattering section) โดยไม่คิดผลของ non-linear หลังจากนั้น ทั้ง 8 ความยาวคลื่นจะถูกแยกสัญญาณแต่ละความยาวคลื่นด้วย demultiplexer ที่มีค่า insertion loss เท่ากับ 1.5 dB โดยสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟที่ควบคุมโดย DWBA จะทำหน้าที่คอยจัดสรรความยาวคลื่นให้กับผู้ใช้บริการแต่ละราย ซึ่งมีสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟที่ใช้งานอยู่ทั้งหมด 4 ชนิดตามที่ปรากฏดังตารางที่ 3.1 โดยแต่ละชนิดจะมีค่า time constant ที่ต่างกันส่งผลให้ switching characteristic ของแต่ละสวิตช์นั้นต่างกันเช่นกัน จากนั้นจึงผ่าน multiplexer อีกครั้งเพื่อรวมสัญญาณก่อนส่งถึงภาครับ สำหรับในส่วนของภาครับนั้น สัญญาณแต่ละความยาวคลื่นจะถูกปรับเพิ่มค่า attenuation ที่มีค่าเท่ากับ 3 dB ด้วย

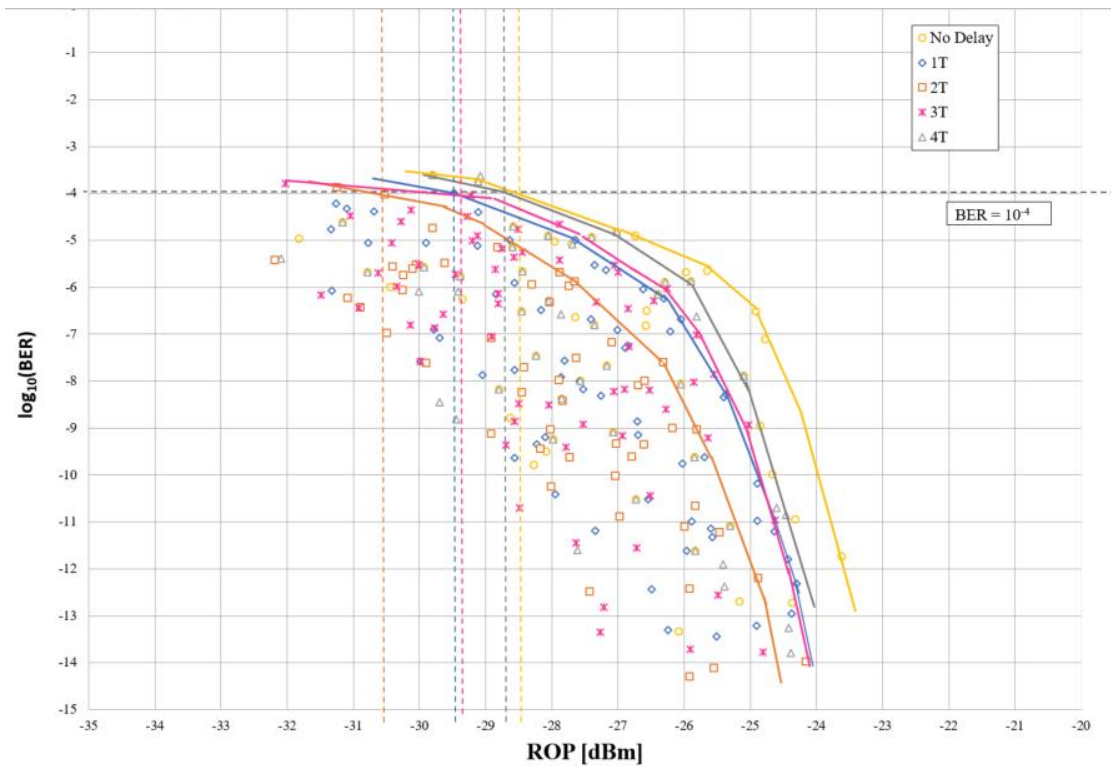
optical attenuator และถูกตรวจจับสัญญาณโดย PIN photodetector ที่มีประสิทธิภาพการรับสัญญาณ 90%, มีค่า dark current ของตัวรับสัญญาณอยู่ที่ 10 nA และมี thermal noise เท่ากับ $18 \times 10^{-12} \text{ A} / \sqrt{\text{Hz}}$ จากนั้นจะกรองสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำออกด้วยวงจร low-pass filter ซึ่งมี cutoff frequency เท่ากับ $0.75 \times \text{bit rate} [\text{Hz}]$ และ 3R Regenerator เป็นอุปกรณ์ตัวสุดท้าย โดยสัญญาณที่ถูกตรวจจับแล้วจะถูกส่งไปที่ eye-diagram analyzer เพื่อคำนวณหา bit-error rate ซึ่ง bit-error rate ที่สามารถยอมรับได้จะมีค่าน้อยกว่า 10^{-4}

4.4 วิเคราะห์ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 5 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS แต่ละชนิด

ในการวิเคราะห์ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 5 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงของแต่ละสวิตช์ โดยออกแบบการหน่วงเวลาให้เป็นจำนวนเท่าของ time constant จึงจำลองการเปลี่ยนค่าเวลาหน่วง จาก 0τ คือไม่มีการหน่วงเวลา, 1τ คือมีการหน่วงเวลาเท่ากับค่าของ time constant, 2τ คือมีการหน่วงเวลาเป็น 2 เท่าของ time constant, 3τ คือมีการหน่วงเวลาเป็น 3 เท่าของ time constant และ 4τ คือมีการหน่วงเวลาเป็น 4 เท่าของ time constant โดยในการพิจารณาแต่ละค่าเวลาหน่วงจะจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณที่ขาส่งแล้ววัดค่ากำลังสัญญาณที่ขารับ จนได้กำลังสัญญาณขารับที่มีค่า BER ถึง 10^{-4} จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับของค่าเวลาหน่วงหนึ่ง จากนั้นจึงจำลองเปลี่ยนค่าเวลาหน่วง แล้วทำซ้ำเช่นเดิมเพื่อให้ได้กราฟความสัมพันธ์ของ $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงที่ใช้

4.4.1 photonic crystal switch ที่มี $\tau = 0.5 \text{ ps}$

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 5 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ที่มี $\tau = 0.5 \text{ ps}$



รูปที่ 4.2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ (ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ($\tau = 0.5$ ps) บนระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ($\tau = 0.5$ ps) บนระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ กราฟที่ได้แสดงนี้เป็นกราฟที่ได้จากการจำลองระบบซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นจุดกระจัดกระจาย (scatter plot) เนื่องจากระบบมีการสับสวิตช์เพื่อส่งสัญญาณไปยังผู้บริการที่หลากหลายตามแต่ละช่วงเวลาของผู้บริการร้องขอและยังมีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังสัญญาณที่ขาส่งอีกด้วย

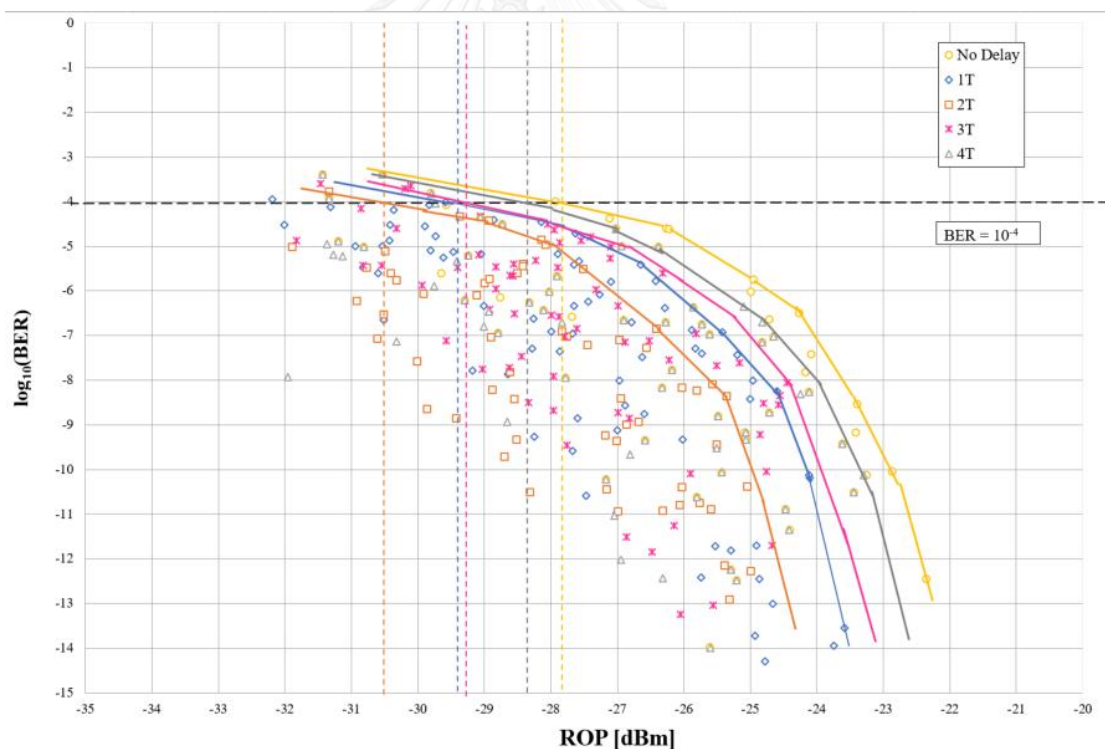
จากกราฟที่มีจุดกระจัดกระจาย ให้เลือกขีดเส้นกราฟเพื่อหาจุดตัดของกำลังสัญญาณขารับ และ $\log_{10}(\text{BER})$ เมื่อพิจารณาที่ $\text{BER} = 10^{-4}$ โดยให้เลือกขีดเส้นกราฟที่แสดงถึงกรณีที่แย่มากที่สุด (worst case) ที่เป็นไปได้ คือเส้นที่มีแนวโน้มอยู่ด้านขวาสุดของกราฟ เนื่องจากทุกจุดบนเส้นกราฟนี้ให้ค่ากำลังสัญญาณขารับมากที่สุด ซึ่งผลของแต่ละค่าแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด photonic crystal switch ($\tau = 0.5\text{ps}$) บนระบบ ผู้ใช้บริการ 5 ความยาวคลื่น 8

Received optical power ที่ BER = 10^{-4}				
No delay	Delay = 1τ	Delay = 2τ	Delay = 3τ	Delay = 4τ
-28.48 dBm	-29.48 dBm	-30.55 dBm	-29.36 dBm	-28.71 dBm

4.4.2 GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มี $\tau = 100\text{ ps}$

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ให้บริการ 5 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มี $\tau = 100\text{ ps}$



รูปที่ 4.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ (ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ($\tau = 100\text{ ps}$) บนระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ให้บริการ

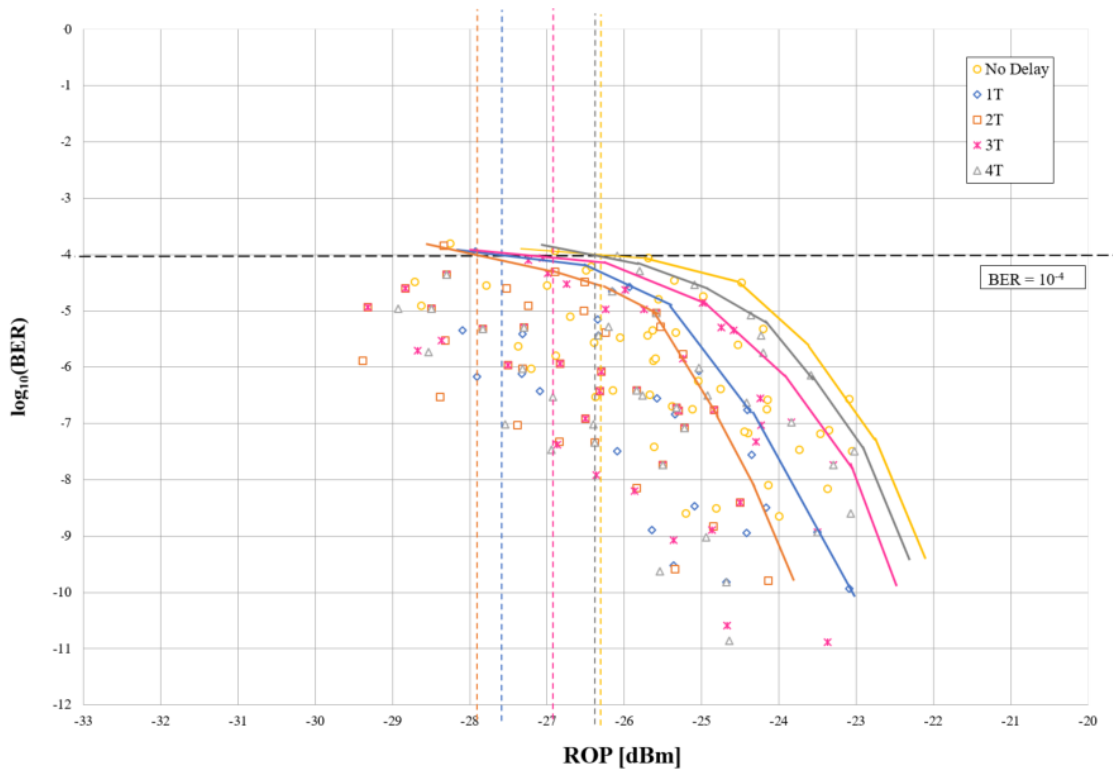
จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ($\tau = 100$ ps) บนระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ ซึ่งผลของจุดตัดของกำลังสัญญาณขารับและ $\log_{10}(\text{BER})$ เมื่อพิจารณาที่ $\text{BER} = 10^{-4}$ แต่ค่าแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด GaAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ($\tau = 100$ ps) บนระบบ ความยาว 8 คลื่น ผู้ใช้บริการ 5 คลื่น

Received optical power ที่ $\text{BER} = 10^{-4}$				
No delay	Delay = 1τ	Delay = 2τ	Delay = 3τ	Delay = 4τ
- 27.82 dBm	- 29.41 dBm	- 30.51 dBm	- 27.27 dBm	- 28.34 dBm

4.4.3 Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ที่มี $\tau = 1$ ns

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ให้บริการ 5 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS ชนิด Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ที่มี $\tau = 1$ ns



รูปที่ 4.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ (ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ($\tau = 1 \text{ ns}$) บนระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ($\tau = 1 \text{ ns}$) บนระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ ซึ่งผลของจุดตัดของกำลังสัญญาณขารับและ $\log_{10}(\text{BER})$ เมื่อพิจารณาที่ $\text{BER} = 10^{-4}$ แต่ค่าแสดงในตารางที่ 4.4

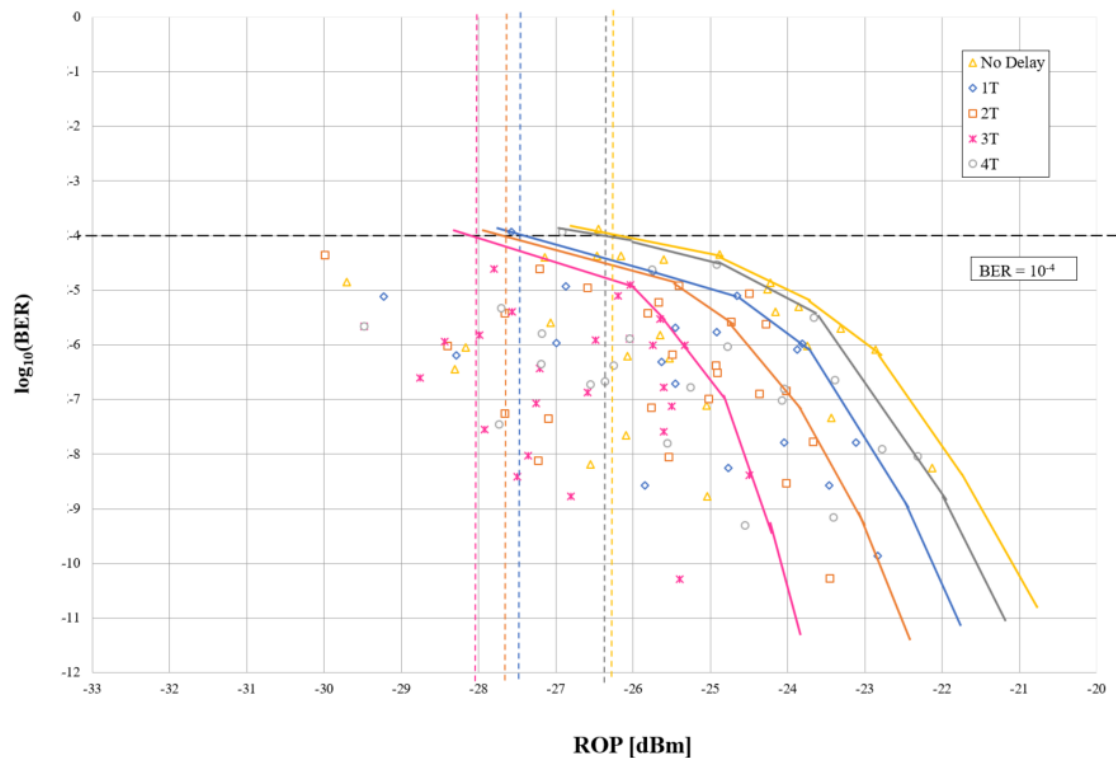
ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด

Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ($\tau = 1 \text{ ns}$) บนระบบ 8 ผู้ใช้บริการ 5 ความยาวคลื่น

Received optical power ที่ $\text{BER} = 10^{-4}$				
No delay	Delay = 1τ	Delay = 2τ	Delay = 3τ	Delay = 4τ
- 26.30 dBm	- 27.56 dBm	- 27.88 dBm	- 26.92 dBm	- 26.36 dBm

4.4.4 electro-optic switch ที่มี $\tau = 5$ ns

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 5 รายเมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS ชนิด electro-optic switch ที่มี $\tau = 5$ ns



รูปที่ 4.5 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ (ROP) เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด electro-optic switch ($\tau = 5$ ns) บนระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ

จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับ เมื่อไม่มีการหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับเมื่อมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1τ , 2τ , 3τ และ 4τ สำหรับ WSS ชนิด ชนิด electro-optic switch ($\tau = 5$ ns) บนระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ ซึ่งผลของจุดตัดของกำลังสัญญาณขารับและ $\log_{10}(\text{BER})$ เมื่อพิจารณาที่ $\text{BER} = 10^{-4}$ แต่ละค่าแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วงสำหรับ WSS ชนิด electro-optic switch ($\tau = 5$ ns) บนระบบ ผู้ใช้บริการ 5 ความยาวคลื่น 8

Received optical power ที่ BER = 10^{-4}				
No delay	Delay = 1τ	Delay = 2τ	Delay = 3τ	Delay = 4τ
- 26.26 dBm	- 27.45 dBm	- 27.65 dBm	- 28.03 dBm	- 26.34 dBm

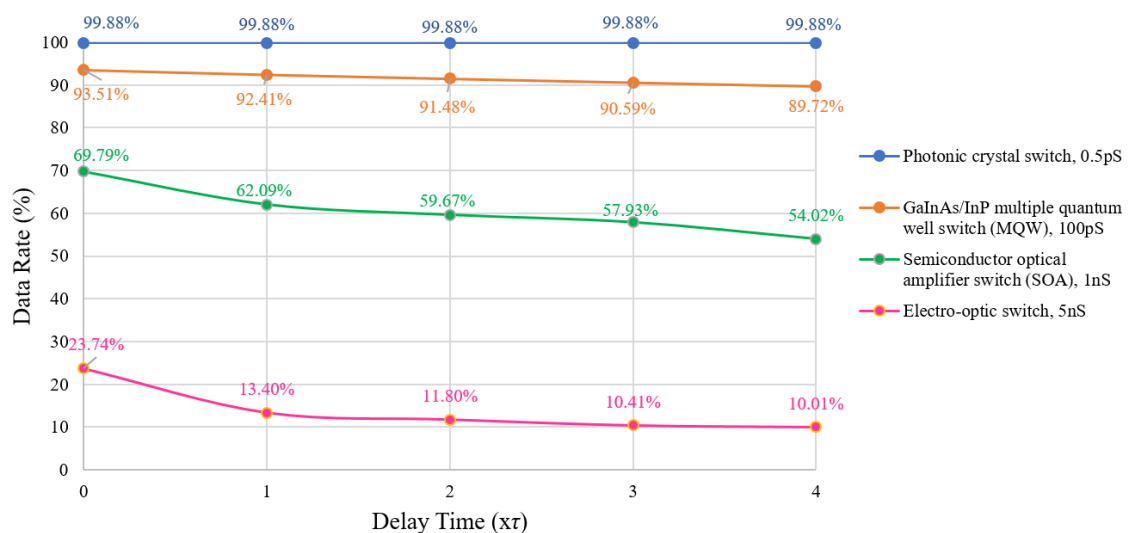


บทที่ 5

การคำนวณหาอัตราข้อมูลของสัญญาณของสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอดทีฟแต่ละชนิดเมื่อมีการเพิ่มค่าเวลาหน่วง

ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ได้แสดงการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 10 ราย และจำนวน 8 ความยาวคลื่นและมีผู้ใช้บริการ 5 ราย เมื่อใช้ WSS ที่มีการหน่วงเวลาสำหรับ WSS แต่ละชนิดแล้ว ในบทนี้จึงเพิ่มเติมในส่วนของการคำนวณหาอัตราข้อมูลของสัญญาณโดยพิจารณาที่สวิตช์มีค่ากำลังสัญญาณสูงสุด คือวงจรสวิตช์ทำงานเต็ม 100% แล้ว

จำลองโดยกำหนดให้สวิตช์มีการสับขาสัญญาณทั้งสิ้น 10 ครั้งเพื่อจัดสรรความยาวคลื่น 4 ความยาวคลื่น หรือ 8 ความยาวคลื่นไปยังผู้ใช้บริการ 10 ราย หรือ 5 ราย และกำหนดให้มีช่วงเวลาในการส่งสัญญาณเมื่อสวิตช์มีค่ากำลังสัญญาณสูงสุดในแต่ละการสับสวิตช์มีระยะเวลาเท่ากันเพื่อหาอัตราข้อมูลสูงสุดที่ผู้ใช้บริการจะได้รับเปรียบเทียบกับค่าเวลาหน่วงที่เปลี่ยนไป ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.1 กล่าวคือเมื่อกำหนดให้อัตราข้อมูลในอุดมคติคือ switching characteristic เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่ไม่มีการสูญเสียอัตราข้อมูลและกำลังสัญญาณเป็น 100% กราฟจะแสดงค่าอัตราข้อมูลที่ใช้บริการแต่ละบ้านได้รับเฉลี่ยหลังผ่านการจัดสรรข้อมูลให้แก่ผู้ใช้บริการด้วย WSS แล้ว โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับระบบในอุดมคติ



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราข้อมูล กับ ค่าเวลาหน่วง

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าเมื่อมีค่าเวลาหน่วงมีค่ามากขึ้น อัตราข้อมูลจะลดต่ำลงไปทิศทางเดียวกันสำหรับทุกสวิตช์ โดย Photonic crystal switch ที่มีค่า time constant = 0.5 ps สามารถรับส่งอัตราข้อมูลได้ถึง 99.88% สำหรับทุกค่าเวลาหน่วงที่พิจารณา กล่าวคือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ของอัตราข้อมูลที่บ้านผู้ใช้บริการได้รับเนื่องจากค่า time constant มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ bit period ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 ps ของอัตราการส่งข้อมูลที่ใช้ นั่นคือ 10 Gbps สำหรับส่วนของ 0.12% ที่หายไปเป็นการสูญเสียสำหรับช่วงที่สวิตช์เริ่มทำงานไปจนถึงค่ากำลังสัญญาณสูงสุดและช่วงที่สวิตช์สับสัญญาณไปจนถึงค่ากำลังสัญญาณต่ำสุด

สำหรับสวิตช์ MQW ที่มีค่า time constant = 100 ps สามารถรับส่งอัตราข้อมูลได้ที่ 93.51%, 92.41%, 91.48%, 90.59% และ 89.72% สำหรับกรณีที่ไม่มีค่าเวลาหน่วง, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของ time constant และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของ time constant ตามลำดับ

สำหรับสวิตช์ SOA ที่มีค่า time constant = 1 ns สามารถรับส่งอัตราข้อมูลได้ที่ 69.79%, 62.09%, 59.67%, 57.93% และ 54.02% สำหรับกรณีที่ไม่มีค่าเวลาหน่วง, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของ time constant และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของ time constant ตามลำดับ

สำหรับ Electro-optic switch ที่มีค่า time constant = 5 ns สามารถรับส่งอัตราข้อมูลได้ที่ 23.74%, 13.40%, 11.80%, 10.41% และ 10.01% สำหรับกรณีที่ไม่มีค่าเวลาหน่วง, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของ time constant และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของ time constant ตามลำดับ

บทที่ 6

วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะวิเคราะห์ผลจากการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS แต่ละชนิดที่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงต่างกัน ร่วมกับตัวควบคุม DWBA ทั้งแบบ 4 ความยาวคลื่นส่งให้แก่ 10 บ้านผู้ใช้บริการ และแบบ 8 ความยาวคลื่นส่งให้ 5 บ้านผู้ใช้บริการของสวิตซ์ทั้ง 4 ชนิด โดยผ่านเส้นใยแสงความยาว 20 กิโลเมตร

ตารางที่ 6.1 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วง ของระบบ 4 ความยาวคลื่นส่งให้แก่ 10 บ้านผู้ใช้บริการ

Type of WSS	Time Constant (τ)	Received optical power ที่ BER = 10^{-4}				
		No delay	Delay = 1τ	Delay = 2τ	Delay = 3τ	Delay = 4τ
Photonic crystal switch	0.5 ps	-28.83 dBm	-29.58 dBm	-30.58 dBm	-29.31 dBm	-29.13 dBm
GalnAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	100 ps	- 28.18 dBm	- 29.56 dBm	- 30.47 dBm	- 29.23 dBm	- 29.06 dBm
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	1 ns	- 26.68 dBm	- 27.89 dBm	- 28.80 dBm	- 27.57 dBm	- 26.91 dBm
Electro-optic switch	5 ns	- 26.62 dBm	- 27.83 dBm	- 28.74 dBm	- 30.25 dBm	- 26.74 dBm

ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS แต่ละชนิดที่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วง ทำงานร่วมกับตัวควบคุม DWBA แบบ 4 ความยาวคลื่นส่งให้แก่ 10 บ้านผู้ใช้บริการ โดยผ่านเส้นใยแสงความยาว 20 กิโลเมตร สำหรับสวิตซ์แต่ละชนิดได้ผลดังต่อไปนี้

Photonic crystal switch ที่มีค่า time constant = 0.5 ps เมื่อพิจารณาที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงพบว่า มีค่า ROP = -28.83 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -29.58 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -30.58 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -29.31 dBm และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -29.13 dBm

สำหรับสวิตช์ MQW ที่มีค่า time constant = 100 ps เมื่อพิจารณาที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงพบว่า มีค่า ROP = -28.18 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -29.65 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -30.47 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -29.23 dBm และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -29.06 dBm

สำหรับสวิตช์ SOA ที่มีค่า time constant = 1 ns เมื่อพิจารณาที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงพบว่า มีค่า ROP = -26.68 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -27.89 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -28.80 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -27.57 dBm และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -26.91 dBm

สำหรับ Electro-optic switch ที่มีค่า time constant = 5 ns เมื่อพิจารณาที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงพบว่า มีค่า ROP = -26.62 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -27.83 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -28.74 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -30.25 dBm และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -26.74 dBm

โดยจากผลข้างต้นนี้พบว่าสำหรับระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS แต่ละชนิดที่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วง ทำงานร่วมกับตัวควบคุม DWBA ที่มี 4 ความยาวคลื่นส่งให้แก่ผู้ใช้บริการ 10 บ้านเมื่อใช้ Photonic crystal switch ที่มีค่า time constant = 0.5 ps นั้นการเพิ่มค่าหน่วงเวลาเป็น 2 เท่าของค่า time constant จะให้ค่ากำลังสัญญาณที่ขารับดีที่สุดคือ -30.58 dBm ซึ่งสามารถเพิ่มค่า power budget ให้แก่ระบบได้ 1.75 dBm, สำหรับสวิตช์ MQW ที่มีค่า time constant = 100 ps นั้นการเพิ่มค่าหน่วงเวลาเป็น 2 เท่าของค่า time constant จะให้ค่ากำลังสัญญาณที่ขารับดีที่สุดคือ -31.21 dBm ซึ่งสามารถเพิ่มค่า power budget ให้แก่ระบบได้ 2.29 dBm, สำหรับสวิตช์ SOA ที่มีค่า time constant = 1 ns นั้นการเพิ่มค่าหน่วงเวลาเป็น 2 เท่าของค่า time constant จะให้ค่ากำลังสัญญาณที่ขารับดีที่สุดคือ -28.08 dBm ซึ่งสามารถเพิ่มค่า power budget ให้แก่ระบบได้ 2.12 dBm และสำหรับ Electro-optic switch ที่มีค่า time constant = 5 ns นั้นการเพิ่มค่าหน่วงเวลา

เป็น 3 เท่าของค่า time constant จะให้ค่ากำลังสัญญาณที่ขารับดีที่สุดคือ -30.25 dBm ซึ่งสามารถเพิ่มค่า power budget ให้แก่ระบบได้ 3.63 dBm

ตารางที่ 6.2 ค่ากำลังสัญญาณขารับของแต่ละค่าเวลาหน่วง ของระบบ 8 ความยาวคลื่นส่งให้แก่ 5 บ้านผู้ใช้บริการ

Type of WSS	Time Constant (τ)	Received optical power ที่ BER = 10^{-4}				
		No delay	Delay = 1τ	Delay = 2τ	Delay = 3τ	Delay = 4τ
Photonic crystal switch	0.5 ps	-28.48 dBm	-29.48 dBm	-30.55 dBm	-29.36 dBm	-28.71 dBm
GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	100 ps	- 27.82 dBm	- 29.41 dBm	- 30.51 dBm	- 27.27 dBm	- 28.34 dBm
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	1 ns	- 26.30 dBm	- 27.56 dBm	- 27.88 dBm	- 26.92 dBm	- 26.36 dBm
Electro-optic switch	5 ns	- 26.26 dBm	- 27.45 dBm	- 27.65 dBm	- 28.03 dBm	- 26.34 dBm

ระบบ FTTH เมื่อใช้ WSS แต่ละชนิดที่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วง ทำงานร่วมกับตัวควบคุม DWBA แบบ 8 ความยาวคลื่นส่งให้แก่ 5 บ้านผู้ใช้บริการ โดยผ่านเส้นใยแสงความยาว 20 กิโลเมตร สำหรับสวิตช์แต่ละชนิดได้ผลดังต่อไปนี้

Photonic crystal switch ที่มีค่า time constant = 0.5 ps เมื่อพิจารณาที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงพบว่าค่า ROP = -28.48 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -29.48 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -30.55 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -29.36 dBm และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = -28.71 dBm

สำหรับสวิตช์ MQW ที่มีค่า time constant = 100 ps เมื่อพิจารณาที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงพบว่าค่า ROP = - 27.82 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 29.41 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 30.51 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 27.27 dBm และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 28.34 dBm

สำหรับสวิตช์ SOA ที่มีค่า time constant = 1 ns เมื่อพิจารณาที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงพบว่าค่า ROP = - 26.30 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 27.56 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 27.88 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 26.92 dBm และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 26.36 dBm

สำหรับ Electro-optic switch ที่มีค่า time constant = 5 ns เมื่อพิจารณาที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงพบว่าค่า ROP = - 26.26 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 27.45 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 27.65 dBm, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 28.03 dBm และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของค่า time constant พบว่าค่า ROP = - 26.34 dBm

โดยจากผลข้างต้นนี้พบว่าสำหรับระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS แต่ละชนิดที่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วง ทำงานร่วมกับตัวควบคุม DWBA ที่มี 8 ความยาวคลื่นส่งให้แก่ผู้ใช้บริการ 5 บ้านเมื่อใช้ Photonic crystal switch ที่มีค่า time constant = 0.5 ps นั้นการเพิ่มค่าหน่วงเวลาเป็น 2 เท่าของค่า time constant จะให้ค่ากำลังสัญญาณที่ขารับดีที่สุดคือ -30.55 dBm ซึ่งสามารถเพิ่มค่า power budget ให้แก่ระบบได้ 2.07 dBm, สำหรับสวิตช์ MQW ที่มีค่า time constant = 100 ps นั้นการเพิ่มค่าหน่วงเวลาเป็น 2 เท่าของค่า time constant จะให้ค่ากำลังสัญญาณที่ขารับดีที่สุดคือ - 30.51 dBm ซึ่งสามารถเพิ่มค่า power budget ให้แก่ระบบได้ 2.69 dBm, สำหรับสวิตช์ SOA ที่มีค่า time constant = 1 ns นั้นการเพิ่มค่าหน่วงเวลาเป็น 2 เท่าของค่า time constant จะให้ค่ากำลังสัญญาณที่ขารับดีที่สุดคือ -27.88 dBm ซึ่งสามารถเพิ่มค่า power budget ให้แก่ระบบได้ 1.58 dBm และสำหรับ Electro-optic switch ที่มีค่า time constant = 5 ns นั้นการเพิ่มค่าหน่วงเวลาเป็น 3 เท่าของค่า time constant จะให้ค่ากำลังสัญญาณที่ขารับดีที่สุดคือ -28.03 dBm ซึ่งสามารถเพิ่มค่า power budget ให้แก่ระบบได้ 1.77 dBm

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

โครงข่าย FTTx เป็นโครงข่ายเข้าถึงที่มีความเร็วสูงสุดถึง 10 Gbps ทำให้สามารถรับและส่งข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากความต้องการแบนด์วิดท์ที่มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจึงก่อให้เกิดปัญหาการให้บริการแบนด์วิดท์ที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้มีการนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาการให้บริการแบนด์วิดท์ที่ไม่เพียงพอ โดยการใช้โครงข่าย FTTx ร่วมกับ WSS ที่ควบคุมโดย DWBA เป็นกลุ่มแรกของโลก โดยมีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงของการสวิตซ์ให้มีความเหมาะสมสำหรับ WSS แต่ละชนิด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้นจากระบบที่เคยศึกษา โดยพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราข้อมูลกับค่าเวลาหน่วง และความสัมพันธ์ระหว่าง BER กับค่าเวลาหน่วง

จากบทที่ 5 จะเห็นว่าเมื่อมีค่าเวลาหน่วงมีค่ามากขึ้น อัตราข้อมูลจะลดต่ำลงไป โดย Photonic crystal switch ที่มีค่า time constant = 0.5 ps สามารถรับส่งอัตราข้อมูลได้ถึง 99.88% สำหรับทุกค่าเวลาหน่วง, สวิตซ์ MQW ที่มีค่า time constant = 100 ps สามารถรับส่งอัตราข้อมูลได้ที่ 93.51%, 92.41%, 91.48%, 90.59% และ 89.72% สำหรับกรณีที่ไม่มีค่าเวลาหน่วง, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของ time constant และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของ time constant ตามลำดับ, สวิตซ์ SOA ที่มีค่า time constant = 1 ns สามารถรับส่งอัตราข้อมูลได้ที่ 69.79%, 62.09%, 59.67%, 57.93% และ 54.02% สำหรับกรณีที่ไม่มีค่าเวลาหน่วง, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของ time constant และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของ time constant ตามลำดับ, Electro-optic switch ที่มีค่า time constant = 5 ns สามารถรับส่งอัตราข้อมูลได้ที่ 23.74%, 13.40%, 11.80%, 10.41% และ 10.01% สำหรับกรณีที่ไม่มีค่าเวลาหน่วง, ค่าเวลาหน่วงเป็น 1 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของ time constant, ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของ time constant และค่าเวลาหน่วงเป็น 4 เท่าของ time constant ตามลำดับ

สำหรับระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS แต่ละชนิดที่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วง ทำงานร่วมกับตัวควบคุม DWBA แบบ 4 ความยาวคลื่นส่งให้แก่ 10 บ้านผู้ใช้บริการ โดยผ่านเส้นใยแสงความยาว 20 กิโลเมตร สำหรับ พบว่าค่าเวลาหน่วงที่ให้ผลดีที่สุดสำหรับ Photonic crystal switch ที่มีค่า time constant = 0.5 ps คือมีค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant แล้วจะพบว่าค่าเวลาหน่วงนี้ให้ผลที่ดีที่สุดคือมีค่า ROP = -30.58 dBm ซึ่งมีกำลังสัญญาณขารับต่ำกว่าสวิตซ์ที่ไม่มีค่าเวลาหน่วง

อยู่ 1.75 dB, สำหรับสวิตช์ MQW ที่มีค่า time constant = 100 ps เมื่อพิจารณาที่ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant แล้วจะพบว่าค่าเวลาหน่วงนี้ให้ผลที่ดีที่สุดคือมีค่า ROP = - 30.47 dBm ซึ่งมีกำลังสัญญาณขารับต่ำกว่าสวิตช์ที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงอยู่ 2.29 dB , สำหรับสวิตช์ SOA ที่มีค่า time constant = 1 ns เมื่อพิจารณาที่ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant แล้วจะพบว่าค่าเวลาหน่วงนี้ให้ผลที่ดีที่สุดคือมีค่า ROP = - 28.80 dBm ซึ่งมีกำลังสัญญาณขารับต่ำกว่าสวิตช์ที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงอยู่ 2.12 dB และสำหรับ Electro-optic switch ที่มีค่า time constant = 5 ns เมื่อพิจารณาที่ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของค่า time constant แล้วจะพบว่าค่าเวลาหน่วงนี้ให้ผลที่ดีที่สุดคือมีค่า ROP = - 30.25 dBm ซึ่งมีกำลังสัญญาณขารับต่ำกว่าสวิตช์ที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงอยู่ 3.63 dB

และระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS แต่ละชนิดที่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วง ทำงานร่วมกับตัวควบคุม DWBA แบบ 8 ความยาวคลื่นส่งให้แก่ 5 บ้านผู้ให้บริการ โดยผ่านเส้นใยแสงความยาว 20 กิโลเมตร สำหรับ Photonic crystal switch ที่มีค่า time constant = 0.5 ps เมื่อพิจารณาที่ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant แล้วจะพบว่าค่าเวลาหน่วงนี้ให้ผลที่ดีที่สุดคือมีค่า ROP = -30.55 dBm ซึ่งมีกำลังสัญญาณขารับต่ำกว่าสวิตช์ที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงอยู่ 2.07 dB, สำหรับสวิตช์ MQW ที่มีค่า time constant = 100 ps เมื่อพิจารณาที่ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant แล้วจะพบว่าค่าเวลาหน่วงนี้ให้ผลที่ดีที่สุดคือมีค่า ROP = - 30.51 dBm ซึ่งมีกำลังสัญญาณขารับต่ำกว่าสวิตช์ที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงอยู่ 2.69 dB, สำหรับสวิตช์ SOA ที่มีค่า time constant = 1 ns เมื่อพิจารณาที่ค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant แล้วจะพบว่าค่าเวลาหน่วงนี้ให้ผลที่ดีที่สุดคือมีค่า ROP = - 27.88 dBm ซึ่งมีกำลังสัญญาณขารับต่ำกว่าสวิตช์ที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงอยู่ 1.58 dB และสำหรับ Electro-optic switch ที่มีค่า time constant = 5 ns เมื่อพิจารณาที่ค่าเวลาหน่วงเป็น 3 เท่าของค่า time constant แล้วจะพบว่าค่าเวลาหน่วงนี้ให้ผลที่ดีที่สุดคือมีค่า ROP = - 28.03 dBm ซึ่งมีกำลังสัญญาณขารับต่ำกว่าสวิตช์ที่ไม่มีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงอยู่ 1.77 dB

เมื่อพิจารณาจากอัตราข้อมูลที่ได้รับของแต่ละสวิตช์และกำลังสัญญาณขารับของค่าเวลาหน่วงที่ให้ค่า BER ต่ำที่สุดของแต่ละสวิตช์พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังสัญญาณที่ขารับของสวิตช์ที่มีการสับสวิตช์เพื่อส่งข้อมูลให้แก่ผู้ให้บริการได้เร็วที่สุดคือ Photonic crystal switch ที่มีค่า time constant = 0.5 ps โดยเพิ่มค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant กับกำลังสัญญาณที่ขารับของ GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มีค่า time constant = 100 ps โดยมีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงที่ 2 เท่าของค่า time constant แล้วจะมีค่ากำลังสัญญาณที่ขารับแตกต่างกันเพียงแค่ 0.11 dB และ 0.04 dB สำหรับระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ให้บริการ และระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ให้บริการตามลำดับ ทั้งยังมีอัตราข้อมูลที่ได้รับของ Photonic crystal

switch มีอัตราข้อมูลที่ได้รับแตกต่างกันโดย Photonic crystal switch มีอัตราข้อมูลที่ได้รับมากกว่าเพียง 8.40% เท่านั้น

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจึงสรุปได้ว่าสวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่นแบบแอคทีฟชนิด GaInAs/InP multiple quantum well switch ที่มีค่า time constant = 100 ps เมื่อมีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงเป็น 2 เท่าของค่า time constant เป็นสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข่ายเข้าถึง FTTx ที่ทำงานร่วมกับ WSS ภายใต้การควบคุมของ DWBA สำหรับการส่งข้อมูลที่มีอัตราเร็วเท่ากับ 10 Gbps ต่อ 1 ความยาวคลื่นบนแสงใยแสงชนิดโหมดเดียว ITU-T G.652.D เป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร โดยใช้การมอดูเลตแบบ NRZ-OOK สำหรับทั้งระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 ผู้ใช้บริการ และระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 ผู้ใช้บริการ

ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอโครงข่ายเข้าถึง FTTx ซึ่งทำงานร่วมกับ WSS ที่ควบคุมโดย DWBA และมีการเพิ่มค่าเวลาหน่วงที่เหมาะสมสำหรับแต่ละสวิตช์ที่มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 10 Gbps แต่เนื่องจากในปัจจุบันในโครงข่ายหลักมีการรับส่งข้อมูลที่อัตราเร็ว 40 Gbps จึงมีข้อเสนอแนะให้พัฒนาระบบโครงข่ายเข้าถึงนี้เพื่อที่สามารถรองรับการรับส่งข้อมูลที่อัตราเร็ว 40 Gbps ได้ โดยการใช้การมอดูเลตแบบ DQPSK ทั้งนี้อาจพัฒนาไปถึงอัตราเร็วที่ 100 Gbps ได้ในอนาคตโดยมีการใช้ Digital Signal Processor (DSP) เข้ามาร่วมด้วย

รายการอ้างอิง

- [1] Urban, P., et al., High-bit-rate dynamically reconfigurable WDM-TDM access network. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2009. 1(2): p. A143-A159.
- [2] Futurist. Fixed Network Services Available from: <http://www.futurist.com.pk/fixed-network-services/>.
- [3] Cisco. The ZettabyteEra. 2017, June 7]; Available from: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html#_Toc484531512/.
- [4] Cisco. The ZettabyteEra: Trends and Analysis 2017, June 7]; Available from: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>
- [5] Bob Chomycz, Fiber optic installer's field manual, in McGraw Hill. 2000.
- [6] ปรีชา ยูพาพิน, เครือข่ายใยแก้วนำแสง, in บริษัทดวงกมลสมัย จำกัด. 2541: กรุงเทพมหานคร.
- [7] Technology, I.S.f.I., Telecommunications and Information Exchange Between Systems—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks. IEEE Standard 802.3av.
- [8] Effenberger, F.J. and K.W. Lu. Overview of FTTH networks: past history, current status, and future designs. in *Proceedings of the International Society for Optical Engineering*. 1996.
- [9] Saleh, A.A. and J.M. Simmons, Evolution toward the next-generation core optical network. *Journal of lightwave Technology*, 2006. 24(9): p. 3303.
- [10] Ahsan, M.S., et al., Migration to the Next Generation Optical Access Networks Using Hybrid WDM/TDM-PON. *JNW*, 2011. 6(1): p. 18-25.

- [11] ITU-T Rec. G.671, Transmission characteristics of optical components and subsystems. 2012.
- [12] International Telecommunication Union, Optical fibre cables and systems. 2009: Geneva, Switzerland.
- [13] Kanjanopas, P., R. Manee kut, and P. Kaewplung. FTTx with dynamic wavelength and bandwidth allocation. in Information Networking (ICOIN), 2014 International Conference on. 2014. IEEE.
- [14] ITU-T Rec. G.652, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. 2005.
- [15] Sen Zhang, Advanced Optical Modulation formats in High-speed Lightwave System, Msc, in Department of Electrical Engineering and Computer Science. Faculty of the Graduate School of the University of Kansas.
- [16] Winzer, P.J. and R.-J. Essiambre, Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks. *Journal of Lightwave Technology*, 2006. 24(12): p. 4711-4728.
- [17] Parente, F., Cross effects in services over PON, in Departamento de Electrónica Telecomunicações e Informática. 2010.
- [18] Ioannis P. Chochliouros, G.A.H.a.A.S.S., An Introduction to Optical Access Networks: Technological Overview and Regulatory Issues for Large-Scale Deployment. *Journal of Lightwave Technology*, 2010: p. 1-18.
- [19] พสุ แก้วปลั่ง. , Semiconductor Electronics plus. 2554: กรุงเทพมหานคร. p. 121-130.
- [20] อธิคม ฤกษ์บุตร, FTTH – Fiber – To – The – Home. 2549.
- [21] การประยุกต์ใช้เส้นใยนำแสงในระบบโทรคมนาคม chapter8. Available from: www.udontech.ac.th/web54/media/download/en/en-8.pdf
- [22] TESTING FTTx PON Description of the technology. devices for FTTH, FTTB, FTTC, BPON, GPON, EPON. Available from: http://www.tehencom.com/echnologies/FTTx_PON/FTTx_PON.htm.
- [23] Systems., C. FTTx. Available from: <http://www.centinasystems.com/technologies/fttx/>.
- [24] Lin, R. Next generation PON in emerging networks. in Optical Fiber Communication Conference. 2008. Optical Society of America.

- [25] Nielson, G.N., et al. MEMS based wavelength selective optical switching for integrated photonic circuits. in Conference on Lasers and Electro-Optics. 2004. Optical Society of America.
- [26] He, J., et al., A survey on recent advances in optical communications. Computers & Electrical Engineering, 2014. 40(1): p. 216-240.
- [27] El-Bawab, T.S., Optical switching. 2008: Springer Science & Business Media.
- [28] LCoS SLM Study and Its Application in Wavelength Selective Switch. Available from: <http://www.mdpi.com/2304-6732/4/2/22>.





ภาคผนวก

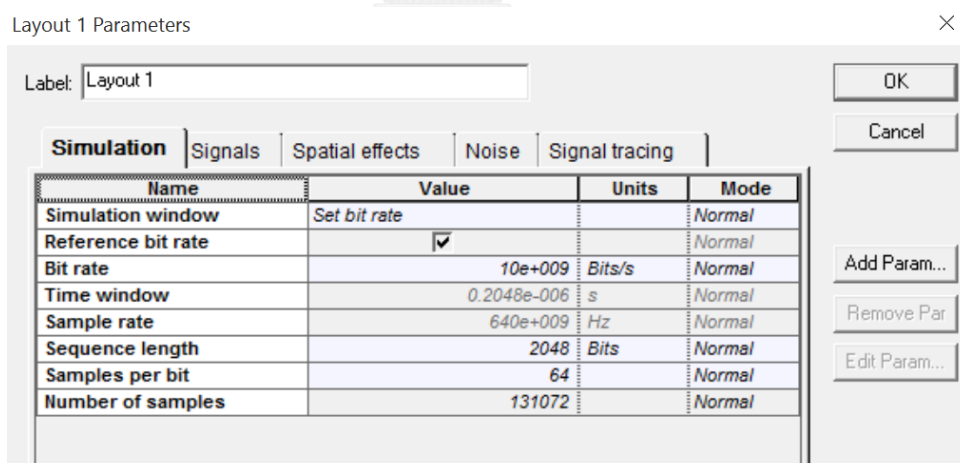
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ในภาคผนวกแสดงถึงแบบจำลองระบบที่ใช้บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ optisystem software version 8.0 และการตั้งค่าพารามิเตอร์แต่ละชนิดของอุปกรณ์ในระบบทั้งระบบแบบ 4 ความยาวคลื่น 10 บ้านผู้ใช้บริการ และ 8 ความยาวคลื่น 5 บ้านผู้ใช้บริการ โดยจะกล่าวถึงการตั้งค่าในส่วน Global parameter, การตั้งค่าที่ OLT, การตั้งค่าของเส้นใยแสง, การตั้งค่าของ WSS, การตั้งค่าที่ ONU และการตั้งค่าเพื่อเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ทั้งยังนำเสนอการจัดเรียงข้อมูลอัตโนมัติด้วย Perl Script อีกด้วย

Global parameter

ในการทดลองทุกครั้งให้เริ่มที่กำหนดค่า global parameter ให้แก่ระบบก่อน โดยประกอบด้วย อัตราบิตของระบบ (bit rate) จำนวนบิตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (sequence length) อัตราการสุ่มใน 1 บิต (sample per bit) ดังแสดงในรูปที่ ก.1

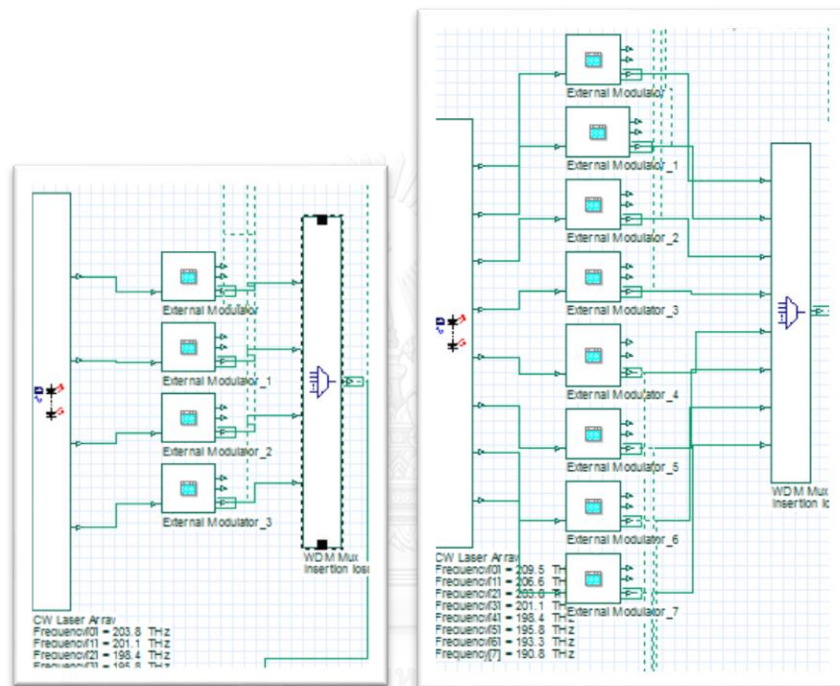


รูปที่ ก.1 ค่า global parameter ที่กำหนดในระบบ

การตั้งค่าที่ OLT

ภาคส่งหรือ OLT ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงในที่นี้ใช้ CWDM continuous-wave laser ระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 บ้านผู้ใช้บริการประกอบไปด้วยความยาวคลื่น 1471, 1491, 1511, และ

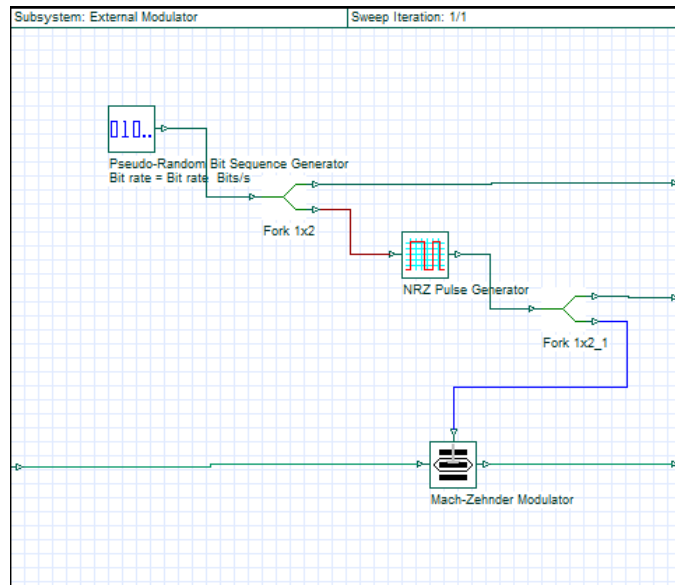
1531 nm ที่แสดงในรูปของความถี่อันได้แก่ 203.8, 201.1, 198.4 และ 195.8 THz ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ ก.2 รูปซ้าย (ก) สำหรับ ระบบที่ความยาวคลื่น 5 บ้านผู้ให้บริการประกอบไปด้วยความยาวคลื่น 1431, 1451, 1471, 1491, 1511, 1531, 1551 และ 1571 ที่แสดงในรูปของความถี่อันได้แก่ 209.5, 206.6, 203.8, 201.1, 198.4, 195.8, 193.3 และ 198.0 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ ก.2 รูปซ้าย (ก) สำหรับ



(ข)

รูปที่ ก.2 ระบบในส่วนของภาคส่ง OLT ที่ (ก) 4 ความยาวคลื่น 10 บ้านผู้ให้บริการ และ (ข) 8 ความยาวคลื่น 5 บ้านผู้ให้บริการ

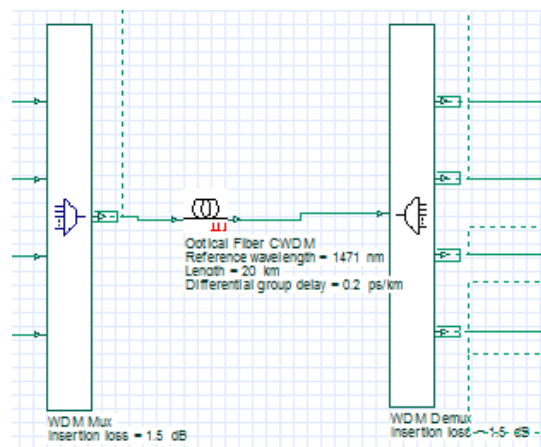
ซึ่งภายใน Ext.Mod ประกอบด้วย Pseudo-Random Bit Sequence Generator ทำหน้าที่สร้างบิตสัญญาณแบบสุ่ม ที่อัตราบิตในระบบคือ 10 Gbps และถูกมอดูเลตแบบ NRZ-OOK จากนั้นจะเปลี่ยนรูปร่างโดยใช้ Mach-Zehnder Modulator ดังแสดงในรูปที่ ก.3 แล้วสัญญาณที่ถูกมอดูเลตทั้งหมดจะถูกส่งออกจาก Ext.Mod ไปรวมกันที่ WDM multiplexer ที่มีค่า insertion loss เท่ากับ 1.5dB



รูปที่ ก.3 ระบบในส่วนของ Ext.Mod ที่อยู่ด้านภาคส่งคือ OLT

การตั้งค่าเส้นใยแสง

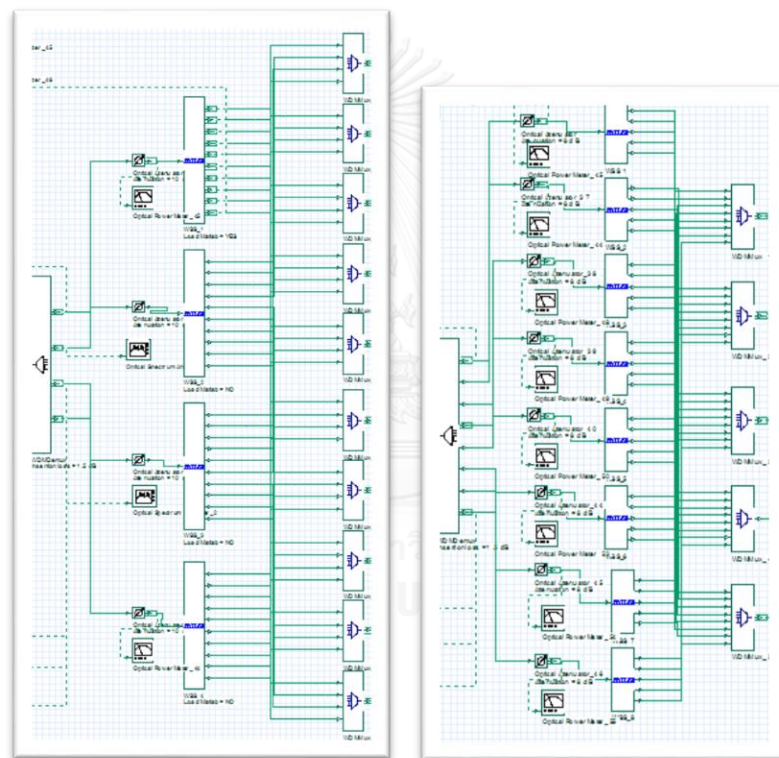
หลังจากสัญญาณทั้งหมดถูกรวมกันที่ WDM multiplexer แล้วจะถูกส่งผ่านเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652.D ซึ่งส่งเป็นระยะทาง 20 km ค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นปัจจัยในการกำหนดประสิทธิภาพคือค่า attenuation และ fiber dispersion ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และตารางที่ 4.2 สำหรับระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 บ้านผู้ใช้บริการ และระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 บ้านผู้ใช้บริการ ตามลำดับ โดยคิดผลของ PMD เท่ากับ 0.2 ps/km หลังจากส่งผ่านเส้นใยแสงจากนั้นสัญญาณจะถูกแยกออกจากกันด้วย demultiplexer ที่มีค่า insertion loss เท่ากับ 1.5 dB เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 แบบจำลองในส่วนของเส้นใยแสง

การตั้งค่า WSS

หลังจากสัญญาณผ่านเส้นใยแสงและถูกแยกสัญญาณออกด้วยความยาวคลื่นแล้ว สัญญาณความยาวคลื่นทั้งหมดจะผ่านอุปกรณ์ Optical Attenuator ซึ่งจะแทนด้วยค่า insertion loss ของ WSS แต่ละชนิดที่จำลอง จากนั้นจะผ่าน WSS ที่ทำหน้าที่จัดสรรความยาวคลื่นไปสู่ ONU แต่ละบ้าน โดยอุปกรณ์ WSS นี้ถูกเขียนด้วยโปรแกรม matlab แล้วนำมาใช้งานร่วมกับโปรแกรม optisystem software version 8.0 ต่อตามลำดับ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ ก.5 (ก) สำหรับระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 บ้านผู้ใช้บริการ และ (ข) สำหรับระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 บ้านผู้ใช้บริการ



รูปที่ ก.5 (ก) แบบจำลองในส่วนของ WSS สำหรับระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 บ้านผู้ใช้บริการ และ (ข) สำหรับระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 บ้านผู้ใช้บริการ

สำหรับ WSS ในส่วนของ matlab ชั้นแรกจะต้องเขียนให้ matlab รับค่าสัญญาณมาจาก optisystem ด้วยคำสั่ง $\text{OutputPort } x = \text{InputPort1}$; โดยให้ x แทนหมายเลขบ้านของผู้ใช้บริการ ตามจำนวนบ้านของผู้ใช้บริการ ดังแสดงในรูปที่ ก.6 สำหรับระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 บ้านผู้ใช้บริการ จะมี $\text{OutputPort } x = \text{InputPort1}$; ทั้งหมด 10 ชุด และรูปที่ ก.7 สำหรับระบบ 8

ความยาวคลื่น 5 บ้านผู้ใช้บริการจะมี OutputPort $x = \text{InputPort}1$; ทั้งหมด 5 ชุด จากนั้นจะมีการประกาศตัวแปรที่เตรียมใช้งานในการคำนวณ โดย parameter0 = ความถี่ในการสับสวิตช์ของ WSS, parameter1 = time constant, parameter2 = data rate, parameter3 = sequence length และ parameter4 = WSS ตัวที่เท่าไรของระบบ สำหรับ home คือจำนวนบ้านผู้ใช้บริการทั้งหมดในระบบ โดยจะใช้การสุ่มแบบ uniform discrete distribution ในการสุ่มเวลาในการใช้สัญญาณและเวลาในการสับสวิตช์ ซึ่งเป็นการสุ่มอย่างไม่ต่อเนื่องที่มีรูปแบบแน่นอน ดังนั้นโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ที่ switch time จะมากกว่าหรือน้อยกว่าหรือเท่ากับ time constant ของสวิตช์แต่ละชนิด จะมีโอกาสเกิดขึ้นเท่ากัน

```

1 - OutputPort1 = InputPort1;
2 - OutputPort2 = InputPort1;
3 - OutputPort3 = InputPort1;
4 - OutputPort4 = InputPort1;
5 - OutputPort5 = InputPort1;
6 - OutputPort6 = InputPort1;
7 - OutputPort7 = InputPort1;
8 - OutputPort8 = InputPort1;
9 - OutputPort9 = InputPort1;
10 - OutputPort10 = InputPort1;
11
12 - m = Parameter0;
13 - T = Parameter1;
14 - datarate = Parameter2;
15 - bitnum = Parameter3;
16 - SwitchNo = Parameter4;
17 - home=10;
18
19 - MaxSwitchNo = length(InputPort1.Sampled);
20 - OptdataIn = InputPort1.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal;
21 - SampleNumber = length(OptdataIn);

```

รูปที่ ก.6 ประกาศตัวแปรสำหรับระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 บ้านผู้ใช้บริการ

```

1 - OutputPort1 = InputPort1;
2 - OutputPort2 = InputPort1;
3 - OutputPort3 = InputPort1;
4 - OutputPort4 = InputPort1;
5 - OutputPort5 = InputPort1;
6
7 - m = Parameter0;
8 - T = Parameter1;
9 - datarate = Parameter2;
10 - bitnum = Parameter3;
11 - SwitchNo = Parameter4;
12 - home=5;
13
14 - MaxSwitchNo = length(InputPort1.Sampled);
15 - OptdataIn = InputPort1.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal;
16 - SampleNumber = length(OptdataIn);

```

รูปที่ ก.7 ประกาศตัวแปรสำหรับระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 บ้านผู้ใช้บริการ

จากนั้น WSS จะคำนวณหาจุดเริ่มต้นของสัญญาณที่สองหลังจากมีการสับสวิตช์ หากจุดเริ่มต้นนั้นมีระยะเวลาน้อยกว่าค่า time constant ของ WSS ดังนั้น ระบบจะคำนวณให้จุดเริ่มต้นของสัญญาณที่สองมีการหน่วงเวลาไปเป็นจำนวนเท่าของค่า time constant ดังแสดงในบรรทัดที่ 20 ในรูปที่ ก.8 เช่น $\text{Delay} = (T/\text{SampledTime})*(1)$; คือมีการหน่วงเวลาออกไปเป็น 1 เท่าของค่า time constant จากนั้นระบบจะคำนวณค่าของการทำงานของ WSS ต่อไปดังแสดงในรูปที่ ก.9 และรูปที่ ก.10

```

18 - A1=sort(randi(SampleNumber,[1,m*2]),2);
19 - SampledTime = ((1/datarate)*bitnum)/SampleNumber;
20 - Delay = (T/SampledTime)*(1); % Delay time 0T || 1T || 2T || 3T || 4T
21
22 - for i=1:l:home %start loop for assigning the zero values to all switching characteristics of all homes.
23 -     Htemp2(i)=1;
24 -     for n=1:1:SampleNumber
25 -         t(n)=SampledTime*n;
26 -         H(i,n)=0;
27 -     end
28 - end %now all switching characteristics will be zero.
29
30 - for x=1:2:2*m % start loop of switching
31 -     q(x)=randi(home); %random home for receiving signal
32 -     if x ~= 1
33
34 -         if (A1(1,x) < A1(1,x-1)+Delay)
35 -             A1(1,x) = A1(1,x-1)+1+Delay; %Shift rise edge
36 -             A1(1,x+1) = A1(1,x+1)+(Delay*R); %Shift Fall edge
37 -             R=R+1;
38 -         else
39 -             A1(1,x) = A1(1,x);
40 -         end
41 -     else
42 -         A1(1,x) = A1(1,x);
43 -     end

```

รูปที่ ก.8 ประกาศตัวแปรและการคำนวณค่าเวลาหน่วงของ WSS

```

45 - for n=A1(1,x)+1:1:A1(1,x+1) %rise time
46
47 -     Htemp1(q(x),n)=Htemp2(q(x))*(1-exp(-(t(n)-(A1(1,x))*SampledTime)/T)); %temporal rise time characteristic.
48 -     H(q(x),n)=H(q(x),n)+Htemp1(q(x),n);%Additive switching characteristic of home#q.
49 - end %end of loop for rise time
50
51 - Htemp2(q(x))=H(q(x),A1(1,x+1)); %use for continuing H(q(x),n) to start falling for home#q.
52
53 - for n=A1(1,x+1)+1:1:SampleNumber %loop to the end of switching (fall time)
54 -     Htemp1(q(x),n)=Htemp2(q(x))*exp(-(t(n)-(A1(1,x+1))*SampledTime)/T); %temporal fall time characteristic.
55 -     H(q(x),n)=H(q(x),n)+Htemp1(q(x),n);%Additive switching characteristic of home#q.
56 - end %end of loop to the end of switching (fall time).
57 - end %end of loop of switching.

```

รูปที่ ก.9 การคำนวณของ WSS บน matlab

```

145 - for b=1:1:SampleNumber
146 -     H1(b)=H(1,b);
147 -     OptdataOut1(b) = (sqrt(H1(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
148 -     H2(b)=H(2,b);
149 -     OptdataOut2(b) = (sqrt(H2(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
150 -     H3(b)=H(3,b);
151 -     OptdataOut3(b) = (sqrt(H3(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
152 -     H4(b)=H(4,b);
153 -     OptdataOut4(b) = (sqrt(H4(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
154 -     H5(b)=H(5,b);
155 -     OptdataOut5(b) = (sqrt(H5(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
156 -     H6(b)=H(6,b);
157 -     OptdataOut6(b) = (sqrt(H6(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
158 -     H7(b)=H(7,b);
159 -     OptdataOut7(b) = (sqrt(H7(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
160 -     H8(b)=H(8,b);
161 -     OptdataOut8(b) = (sqrt(H8(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
162 -     H9(b)=H(9,b);
163 -     OptdataOut9(b) = (sqrt(H9(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
164 -     H10(b)=H(10,b);
165 -     OptdataOut10(b) = (sqrt(H10(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
166 - end
167
168 - OutputPort1.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut1;
169 - OutputPort2.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut2;
170 - OutputPort3.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut3;
171 - OutputPort4.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut4;
172 - OutputPort5.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut5;
173 - OutputPort6.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut6;
174 - OutputPort7.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut7;
175 - OutputPort8.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut8;
176 - OutputPort9.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut9;
177 - OutputPort10.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut10;

```

(ก)

```

60 - for b=1:1:SampleNumber
61 -     H1(b)=H(1,b);
62 -     OptdataOut1(b) = (sqrt(H1(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
63 -     H2(b)=H(2,b);
64 -     OptdataOut2(b) = (sqrt(H2(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
65 -     H3(b)=H(3,b);
66 -     OptdataOut3(b) = (sqrt(H3(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
67 -     H4(b)=H(4,b);
68 -     OptdataOut4(b) = (sqrt(H4(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
69 -     H5(b)=H(5,b);
70 -     OptdataOut5(b) = (sqrt(H5(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
71 -
72 - end
73
74 - OutputPort1.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut1;
75 -
76 - OutputPort2.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut2;
77 -
78 - OutputPort3.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut3;
79 -
80 - OutputPort4.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut4;
81 -
82 - OutputPort5.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut5;

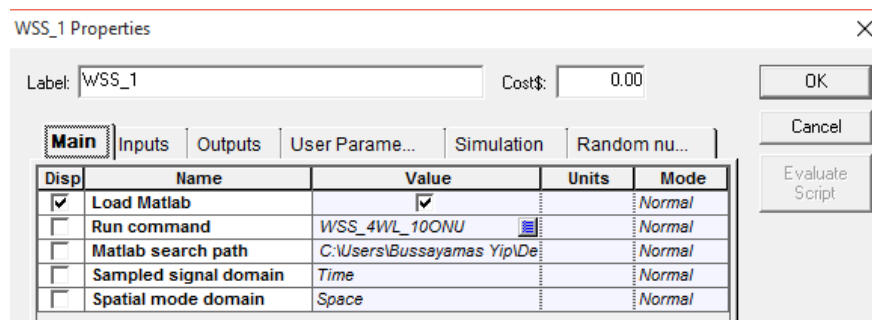
```

(ข)

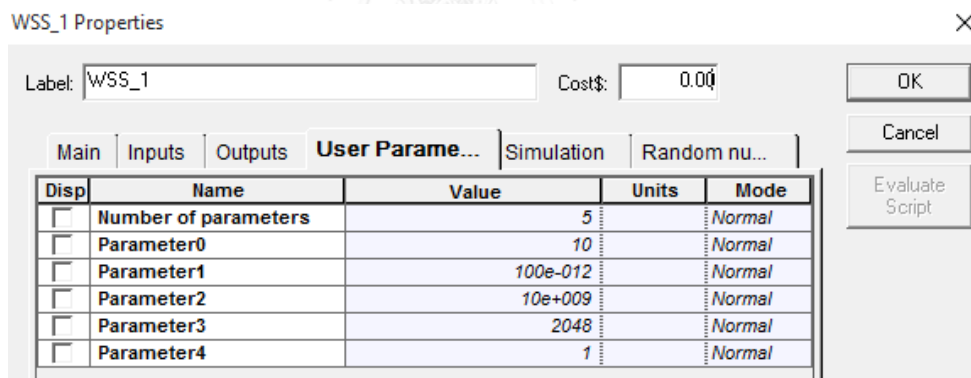
รูปที่ ก.10 การเขียน matlab เชื่อมต่อกับ optisystem ในส่วนปิดท้าย

สำหรับการตั้งค่า พารามิเตอร์ ของ WSS แสดงในรูปที่ ก.11 และรูปที่ ก.12 พิจารณาที่หน้า main จะมีส่วนของ run command จะใส่ชื่อไฟล์ matlab ที่ใช้ในการคำนวณ สำหรับ Matlab search path คือที่อยู่ของไฟล์ข้างต้นบนคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณ และพิจารณาที่หน้า user

parameter จะมีส่วนของพารามิเตอร์ ที่ต้องใช้ ซึ่ง parameter0 คือความถี่ในการสับสวิตช์ โดยในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดความถี่ในการสับสวิตช์ไว้ที่ 10 ครั้ง, parameter1 คือ time constant ของแต่ละ WSS ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ WSS 4 ชนิด, parameter2 คือ bit rate ของระบบคือ 10 Gbps, parameter3 คือ sequence length คือ 2048 บิต และ parameter4 คือ WSS ที่พิจารณานี้เป็น WSS ตัวที่เท่าไรของระบบ



รูปที่ ก.11 ค่าพารามิเตอร์ ของ WSS ในโปรแกรม optisystem ในหน้า main

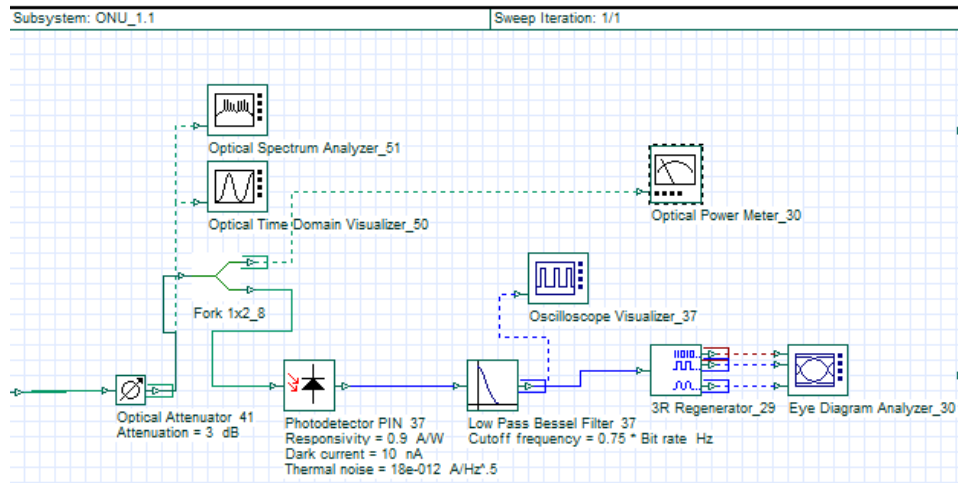


รูปที่ ก.12 ค่าพารามิเตอร์ ของ WSS ในโปรแกรม optisystem ในหน้า user parameter

การตั้งค่าที่ ONU

ในส่วนของภาครับสัญญาณ ONU ประกอบด้วย Optical Attenuator ซึ่งจะปรับค่าแต่ละสัญญาณด้วย 3 dB จากนั้นจะถูกตรวจจับสัญญาณด้วย Photodetector PIN ที่มีค่า responsivity เท่ากับ 0.9 A/W นั่นคือมีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณถึง 90% ค่า dark current เท่ากับ 10 nA ค่า thermal noise เท่ากับ $18 \times 10^{-12} \text{ A} / \sqrt{\text{Hz}}$ จากนั้นจะกรองสัญญาณด้วย Low Pass Bessel

Filter ที่มี cutoff frequency เท่ากับ $0.75 \times \text{bit rate Hz}$ และ 3R Regenerator จะส่งสัญญาณไปยัง eye-diagram analyzer เพื่อคำนวณหา BER ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ ก.13



รูปที่ ก.13 แบบจำลองภาครับ ONU

การเก็บค่าข้อมูลอัตโนมัติ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้มีการเก็บค่าข้อมูล ซึ่งในที่นี้มี 2 อุปกรณ์สำหรับแต่ละความยาวคลื่นของแต่ละบ้านคือ optical power meter และ eye-diagram analyzer ซึ่งหากพิจารณาระบบ 4 ความยาวคลื่น 10 บ้านผู้ใช้บริการ และระบบ 8 ความยาวคลื่น 5 บ้านผู้ใช้บริการ จะพบว่ามีข้อมูลมากถึง 40 ข้อมูลต่ออุปกรณ์ที่ต้องเก็บค่า ดังนั้นการเก็บค่าข้อมูลปริมาณมากด้วยแรงมนุษย์อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดจากมนุษย์ทำให้ค่าผิดเพี้ยนไปจากความจริงได้ การเก็บค่าข้อมูลในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีการเก็บค่าข้อมูลกึ่งอัตโนมัติหลังจากที่โปรแกรม optisystem ทำงานจนเสร็จสิ้นไว้ที่ที่ต้องการเก็บข้อมูลไว้ได้โดยการเลือกอุปกรณ์ที่เราต้องการเก็บค่า เช่น eye-diagram analyzer ให้คลิกขวาที่อุปกรณ์ตัวนั้นจากนั้นเลือก Component Script จะพบหน้าต่างแสดงในรูปที่ ก.14 จากนั้นให้เลือก Enable Script แล้วเพิ่ม code ดังที่แสดงในรูปที่ ก.14

```

Component Script
File Edit Insert Tools

 Enable Script
 Run after each sweep iteration
 Run at the end of the calculation

' Bz added
'Total number of iterations in the project
TotalNoIter = 1
'File name with complete path where the results have to be stored
fName = "C:\Users\Bussayamas Yip\Desktop\Chula_2016\Bz\Phase1\Dlog\EYE_RESULT_01-1.txt"

Dim FSO
Dim outFile
Dim resMgr
Dim res
Dim iter
Dim val
Dim textPrint

Set FSO = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
Set outFile = FSO.CreateTextFile(fName, True)

Set resMgr = ThisComponent.GetResultMgr
Set res = resMgr.GetObjectByName("Min. BER")

textPrint = ""














For iter = 1 To TotalNoIter
    val = res.GetValue(iter)
    textPrint = textPrint + CStr(val) + vbCrLf
Next
outFile.WriteLine (textPrint)
outFile.Close
  
```

รูปที่ ก.14 การเขียนโค้ดเพื่อเก็บค่าข้อมูลที่คำนวณได้อัตโนมัติ

จากรูปที่ ก.14 ในส่วนของ code ที่ระบุว่า fName = "C:\Users\xxx\xxx.txt" ให้ใส่ path และชื่อไฟล์ที่ต้องการบันทึกข้อมูลไว้ Set res = resMgr.GetObjectByName("Min. BER") ให้ใส่ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ที่เราต้องการเก็บค่าในวงเล็บ จากนั้นเมื่อโปรแกรมทำงานจนเสร็จสิ้น จะพบไฟล์ที่มีการบันทึกค่าข้อมูลที่ต้องการไว้ได้อย่างครบถ้วนอยู่ใน path ที่ระบุ

การจัดเรียงข้อมูลอัตโนมัติ

หลังจากมีการเก็บค่าข้อมูลอัตโนมัติอยู่ในรูปแบบไฟล์ .txt ดังแสดงในรูปที่ ก.15 แล้ว จะจัดเรียงข้อมูลที่เก็บได้ในแต่ละไฟล์ให้อยู่ในไฟล์เดียวกันเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการทำงานและป้องกันความผิดพลาดจากมนุษย์โดยใช้การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Perl Script (.pl)

Name	Date modified	Type
 BER	8/27/2016 4:19 PM	Microsoft Excel Comma Separated ...
 ROP	8/27/2016 4:19 PM	Microsoft Excel Comma Separated ...
 Combine_BER	8/24/2016 11:01 AM	Perl
 Combine_ROP	8/24/2016 9:21 AM	Perl
 EYE_RESULT_01-1	8/27/2016 2:25 PM	Text Document
 EYE_RESULT_01-2	8/27/2016 2:25 PM	Text Document
 EYE_RESULT_01-3	8/27/2016 2:25 PM	Text Document
 EYE_RESULT_01-4	8/27/2016 2:25 PM	Text Document
 EYE_RESULT_2-1	8/27/2016 2:25 PM	Text Document
 EYE_RESULT_2-2	8/27/2016 2:25 PM	Text Document
 EYE_RESULT_2-3	8/27/2016 2:25 PM	Text Document
 EYE_RESULT_2-4	8/27/2016 2:25 PM	Text Document
 EYE_RESULT_3-1	8/27/2016 2:25 PM	Text Document

รูปที่ ก.15 ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องอัตโนมัติใน path ที่ผู้ใช้งานระบุ

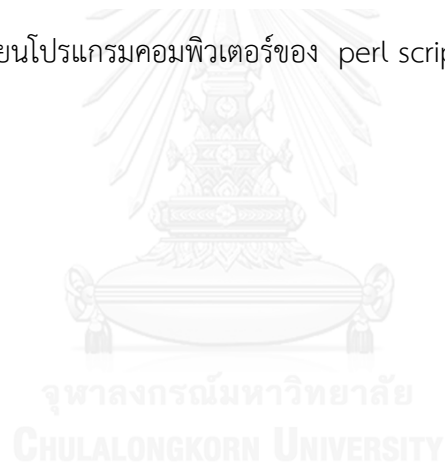
การใช้งาน perl script นั้นให้เขียน code ไฟล์ .pl โดยมีการประกาศ Global เพื่อให้ perl script สามารถรับข้อมูลที่นำมาคำนวณได้ ในที่นี้จากบรรทัดที่ 11 ในรูปที่ ก.16 หมายถึงตรวจสอบหาไฟล์ .txt ที่มีข้อความ EYE อยู่ในชื่อไฟล์เพื่อคัดกรองแต่ไฟล์ดังกล่าวมาคำนวณ จากนั้นจะเข้าไปคำนวณในแต่ละไฟล์เพื่อเก็บค่าที่ได้ดังบรรทัดที่ 28-30 ในรูปที่ ก.16 จากนั้นจะแสดงผลข้อมูลโดยเรียงลำดับไฟล์จากไฟล์แรกไปยังไฟล์สุดท้ายดังแสดงในรูปที่ ก.16 บรรทัดที่ 31-32 ออกมายัง outfile ที่ชื่อว่า BER.csv ต่อไปดังแสดงในรูปที่ ก.15 โดยการจัดเรียงข้อมูลเริ่มที่ให้อ่างไฟล์ .pl ที่ต้องการใช้งานให้อยู่ใน path เดียวกับข้อมูล .txt ที่เก็บได้จากโปรแกรม optisystem ที่ต้องการจัดเรียง จากนั้นคลิกสองครั้งที่ไฟล์ .pl เพื่อให้ perl script ทำงานและจะได้ไฟล์ .csv ออกมาในที่สุดซึ่งสามารถเปิดไฟล์ .csv ได้ด้วยโปรแกรม Microsoft excel

```

11 @Bz = glob("EYE*.txt*");
12 $outfilename='BER.csv';
13
14 open(OutFile, ">$outfilename") or die "$outfilename: $!";
15 print OutFile "BER\n";
16
17 foreach $file(@Bz)
18 {
19     $infilename=$file;
20     ($IniName,$extention)=split(/\./,$infilename);
21     open(InFile, $infilename) or die "$infilename: $!";
22
23     while( $line = <InFile>)
24     {
25
26         if (($line=~ /-/)||($line=~ /1/))
27         {
28             chomp($line);
29             @tmpplot= split('',$line);
30             $BER = $tmpplot[0];
31             print ("$BER\n");
32             print OutFile "$BER\n";
33         }
34
35     } #while
36     close(InFile);
37 } #each file
38 close(OutFile);

```

รูปที่ ก.16 การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของ perl script ที่ใช้ในการจัดเรียงข้อมูล



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวบุษยามาส เอี้ยบศิริเมธี เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าในปีการศึกษา 2555 ต่อจากนั้นเข้าทำงานบริษัทอิเล็กทรอนิกส์เอกชนระหว่างประเทศแห่งหนึ่ง และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2559

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 1 ฉบับ

บทความวิชาการในงานประชุม Optic & Photonics Taiwan, International Conference (OPTIC 2016) จัดขึ้น ณ National Taiwan University of Science and Technology (Taiwan Tech) ในวันที่ 3-5 ธันวาคม 2559 ในชื่อบทความเรื่อง Optimization of Delay Time for Wavelength Selective Switches in Flexible Fiber Access Network