

การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ในระบบคัมเบียมจากสถิติการวัด  
เพื่อการบำรุงรักษาโครงข่ายหลัก

THE OSNR ANALYSIS FROM THE STATISTIC MEASUREMENT OF  
WDM SYSTEM FOR BACKBONE NETWORK MAINTENANCE

จรุงภพ งามางกูร  
JARUNGPON NAMANGKOR

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษากฎบัตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2629-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ในระบบดับเบิลยูดีเอ็มจากสถิติการวัด  
เพื่อการบำรุงรักษาโครงข่ายหลัก

THE OSNR ANALYSIS FROM THE STATISTIC MEASUREMENT OF  
WDM SYSTEM FOR BACKBONE NETWORK MAINTENANCE



จรุงภพ รามางกูร

JARUNGPOB RAMANGKOOL

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 63630  
วัน,เดือน,ปี 30 ส.ค. 2549

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2629-6

**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ในระบบดับเบิลยูดีเอ็ม  
จากสถิติการวัดเพื่อการบำรุงรักษาโครงข่ายหลัก

นักศึกษา

นายจรุงภพ รามางกูร

รหัสนักศึกษา

44061741

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมโทรคมนาคม

พ.ศ.

2549

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ.นิภา ลีลารุจิ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม 16 ช่องสัญญาณที่ใช้ในการเชื่อมโยงโครงข่ายหลักที่ให้บริการอยู่จากสถิติการวัด โดยจะทำการวัดค่า โอ เอส เอ็น อาร์ ในกรณีที่ใช้ความยาวคลื่นที่ใช้งานอยู่ตามจริง, ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทางและที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทางบวกการลดทอน 5 dB ในโครงข่ายหลักของ บ.ทีโอที จำกัด (มหาชน) เพื่อศึกษาและทดสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มจำนวนของความยาวคลื่น และการลดทอนของเคเบิลในขณะที่ระบบยังให้บริการอยู่ จากนั้นจัดข้อมูลในรูปของกราฟและตาราง พบว่าโอเอสเอ็นอาร์ จะลดทอนลงตามระยะทางและจำนวนของความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้น ท้ายสุดทำการคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์ของสัญญาณจากสมการตามคำแนะนำใน ITU-T G.692 ทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่าจากการวัดและการคำนวณ สรุปผลที่ได้และเสนอแนะการคำนวณโอเอสเอ็นอาร์จากคุณลักษณะเฉพาะที่ได้จากการทดสอบเพื่อใช้ในการบำรุงรักษาโครงข่าย, การปรับปรุงและวิเคราะห์ระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

<b>Thesis Title</b>	The OSNR analysis from the statistic measurement of WDM system for backbone network maintenance
<b>Student</b>	Mr.Jarungpob Ramangkool
<b>Student ID.</b>	44061741
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Suthichai Noppanakeepong
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Assoc. Prof. Nipha Leelaruji

### **ABSTRACT**

This research studies and analyze OSNR of 16-channel WDM system which is implemented as the backbone network by measuring OSNR for the real wavelengths in use, full wavelengths per distance and full wavelengths per distance plus 5 dB attenuation on backbone network of TOT public company . The objective is to test and study the effects when the number of wavelengths is increased while the attenuation of cables in the system exists. Then, the results are presented in graphs and tables. It is found that OSNR will attenuate as the distance and the number of wavelengths increase. Finally, system analysis is performed after comparison between the calculated OSNR from the equation in ITU-T G.692 and the OSNR measurement. The conclusion and guidelines for maintenance, improvement and system analysis are recommended to achieve effective operating.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความปรักษาของ ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ รศ.นิภา ลีลารุจิ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ตลอดจนข้อคิดต่างๆ อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าและเป็นแนวทางในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ บริษัท ทีไอที จำกัด (มหาชน) ที่ให้โอกาสด้านการศึกษาและข้อมูลในการจัดทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนการศึกษา

ขอขอบคุณ บริษัท อัลคาเทล (ประเทศไทย) ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนข้อมูลด้านเทคนิคในการจัดทำวิทยานิพนธ์

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

จรูญภพ รามางกูร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 เพราะเหตุใดปัญหานี้จึงน่าสนใจ.....	2
1.4 มีการนำเสนอหลักการใหม่อย่างไร.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 การสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม.....	4
2.1 หลักการเบื้องต้นของระบบ ดับเบิลยูดีเอ็ม.....	4
2.2 ชนิดของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น.....	8
2.2.1 เทคนิคการเลือกความยาวคลื่น (Wavelength – selective WDM).....	8
2.2.2 เทคนิคแบบการกระจายและการเลือก (Broadcast- and –select Techniques).....	10
2.3 มัลติเพล็กซ์เซอร์(Multiplexers).....	10
2.3.1 อุปกรณ์กระจายมุม (Angular Dispersion Devices).....	11
2.3.2 อุปกรณ์กรองแสง ( Filtering Devices).....	12
2.4 แหล่งกำเนิดแสง (Source).....	14
2.4.1 LED (Light Emitting Diode).....	15
2.4.2 Fabry-perot Diode Laser.....	15
2.4.3 DFB Diode laser.....	16
2.4.4 Frequency-Locked Laser.....	16
2.5 การไม่เป็นเชิงเส้นของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม(Nonlinear Effects on WDM Links).....	16

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6	ดับเบิลยูดีเอ็มและออปติคัลแอมพลิฟายเออร์(WDM and Optical amplifier).....	17
2.7	โครงข่ายแบบหลายจุด,หลายความยาวคลื่น(Multipoint, Multiwavelength Network) .....	19
2.7.1	การส่งสัญญาณระบบบรอดแบนด์(Broadband Transmission System).....	19
2.7.2	โครงข่ายสื่อสัญญาณแบบ Wavelength-Routed (Wavelength-Routed Transmission network).....	19
2.7.2.1	โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบดาว (WDM star network).....	20
2.7.2.2	โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบลูกโซ่ (WDM chain Network).....	20
2.7.2.3	โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน (WDM Ring Network).....	23
2.7.3	Switched Network.....	25
2.7.3.1	Source Tuning.....	26
2.7.3.2	Receive tuning.....	27
2.8	ไอเอสเอ็นอาร์ในระบบดับเบิลยูดีเอ็ม.....	29
2.8.1	การออกแบบ Point-to-Point Link โดยใช้ค่า Q-Factor และ OSNR.....	29
2.8.2	การคำนวณ Q-factor จากไอเอสเอ็นอาร์.....	31
2.8.3	การคำนวณ ไอเอสเอ็นอาร์สำหรับ Point-to-Point Link.....	31
2.8.4	การปรับปรุงไอเอสเอ็นอาร์โดยการขยาย Raman.....	34
2.8.5	ข้อกำหนดเกี่ยวกับ Margin.....	35
บทที่ 3	โครงสร้างของโครงข่ายหลัก.....	38
3.1	โครงสร้างของโครงข่ายหลัก.....	38
3.2	อุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็มและเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ.....	41
3.2.1	อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์(MUX) และดีมัลติเพล็กซ์ (DMUX).....	41
3.2.2	อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความยาวคลื่น (Wavelength adaptation : WLA).....	42
3.2.3	Optical amplifier, In-line/ Pre-amplifier/ Booster.....	43
3.2.4	Optical Spectrum Analyzer(OSA).....	47

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การติดตั้งอุปกรณ์, เครื่องมือวัดและขั้นตอนการทดสอบ.....	48
3.3.1 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด.....	48
3.3.2 การวัดโอเอสเอ็นอาร์และการบันทึกผล.....	50
บทที่ 4 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์.....	57
4.1 การวัดและการวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานต่อระยะทาง(C&R)...	57
4.2 การวัดและการวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทาง (F&R).....	60
4.3 ผลการวัดและการวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทาง บวกการลดทอน 5 dB (F&M).....	62
4.4 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากการวัดเปรียบเทียบกับการคำนวณ.....	64
4.4.1 การคำนวณ OSNR จาก ITU-T G.692.....	64
4.4.2 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากการวัดเปรียบเทียบกับการคำนวณ.....	65
4.5 ผลการวัดจากเครื่องมือวัด Optical spectrum analyzer (OSA).....	70
4.5.1 ตารางบันทึกผลการวัดทุกแบบและทุก Section.....	70
4.5.2 ตัวอย่างผลการวัดจาก OSA (Optical Spectrum Analyzer).....	75
4.5.2.1 ผลการวัดจาก OSA ของ section 1.1.....	75
4.5.2.2 ผลการวัดจาก OSA ของ section 4.....	78
4.5.2.3 ผลการวัดจาก OSA ของ section 7.1.....	81
4.5.2.4 ผลการวัดจาก OSA ของ section 8.....	84
4.5.2.5 ผลการวัดจาก OSA ของ section 11.....	87
4.5.2.6 ผลการวัดจาก OSA ของ section 14.2.....	90
บทที่ 5 คุณลักษณะโอเอสเอ็นอาร์ของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม.....	93
5.1 คุณลักษณะของโอเอสเอ็นอาร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบ.....	93
5.2 ตารางคำนวณโอเอสเอ็นอาร์.....	95
5.2.1 ตารางบันทึกผล.....	95
5.2.2 ตารางการคำนวณโอเอสเอ็นอาร์และการลดทอน.....	95
5.2.3 การทดสอบตารางคำนวณโอเอสเอ็นอาร์.....	99

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	103
6.1 สรุปผล.....	103
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	104
เอกสารอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก. คำย่อ.....	107
ภาคผนวก ข. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	114

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณสำหรับเทคนิคการกรองแบบต่างๆ.....13
2.2	ความกว้างของสเปกตรัมสำหรับแหล่งกำเนิดต่างๆ.....15
2.3	จำนวนต่ำสุดของความยาวคลื่นที่ต้องการในการเชื่อมโยงกับช่องสัญญาณ N ช่องสัญญาณ ในโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็ม.....25
2.4	Insertion loss และ loss อื่นๆ สำหรับการใช้งานที่ 1550 nm.....36
2.5	ข้อกำหนดเกี่ยวกับ margin.....37
3.1	รายละเอียดการเชื่อมโยงของแต่ละส่วน(Section).....39
3.2	Channel and wavelength spacing.....43
3.3	ตัวอย่างตารางการบันทึกผลการวัด.....51
4.1	ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งาน section 1.1.....58
4.2	ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานต่อระยะทาง (C&R) ที่ทุกsection.....59
4.3	ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทาง (F&R) ที่ทุก section.....61
4.4	โอเอสเอ็นอาร์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อจำนวนของความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น(C&R to F&R).....61
4.5	ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทางบวกค่าการลดทอน..... 63
4.6	เปรียบเทียบการลดทอนของโอเอสเอ็นอาร์ที่การทดสอบแบบต่างๆ.....64
4.7	รายละเอียดการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ของ section 8.....66
4.8	ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์ของ section 8.....66
4.9	ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์ของทุก section.....68
4.10	ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์ของทุก section.....70
5.1	คุณลักษณะเฉพาะของแต่ละ section.....94
5.2	เปรียบเทียบผลการวัดกับผลจากตารางการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์.....97
5.3	เปรียบเทียบผลการวัดกับคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการลดทอน.....100
5.4	ค่าเฉลี่ยผลการวัดกับคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์..... 100

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบดับเบิลยูดีเอ็ม.....	4
2.2 การใช้ประโยชน์ Bandwidth ของ เส้นใยแก้วนำแสงในระบบ Single source multimode.....	6
2.3 ระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น(wavelength division multiplexing:WDM).....	6
2.4 ระบบ ดับเบิลยูดีเอ็ม แบบ Bidirectional.....	7
2.5 ย่านการใช้งานสเปกตรัมในเส้นใยแก้วนำแสงแบบชนิดโหมดเดี่ยว.....	7
2.6 (ก) Wavelength – routed multiplexing . (ข) Broadcast- and – select multiplexing.....	9
2.7 การแยกความยาวคลื่นที่ใช้การกระจายของมุมและเลนส์.....	11
2.8 เรขาคณิตสำหรับการสะท้อนของ grating ที่ด้านรับของ ดับเบิลยูดีเอ็ม.....	12
2.9 (ก) distributed-feedback(DFB) amplifier, (ข) distributed- reflector (DFR).....	14
2.10 (ก) broadcast-and-select, broadband-transmission, star network (ข) การส่งสัญญาณ Broadband แบบ tree network.....	21
2.11 ตัวอย่างของ โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบstar networkที่ภาครับสามารถตรวจจับการรับสัญญาณ ได้โดยตรงด้วย spectral filter หรือ การตรวจจับแบบ heterodyne detection FDM receiver...22	
2.12 โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบลูกโซ่(chain network)ความยาวคลื่นถูกกำหนดเส้นทางสัญญาณ add/ drop ไว้ที่ทุกๆ โหนด ที่ โหนด 1และ โหนด 5จะมีการส่งสัญญาณที่เต็มความจุและมีความสามารถที่จะทำงานได้ในการส่งสัญญาณในทิศทางเดียว.....	22
2.13 เส้นทางของความยาวคลื่นที่ทำงานแบบ add/ drop ของ ดับเบิลยูดีเอ็ม ในโครงข่ายแบบวงแหวน (ring network).....	23
2.14 (ก)ดับเบิลยูดีเอ็ม แบบ star network ที่มี node 4 node และ 3 ความยาวคลื่น (ข) ตารางกำหนด ความยาวคลื่น.....	24
2.15 จำนวนความยาวคลื่นต่ำสุดที่ต้องการในการเชื่อมโยง N node ของ โครงข่าย.....	25
2.16 ตัวอย่างของ switch ดับเบิลยูดีเอ็ม network.....	27
2.17 ความสัมพันธ์ของ Q-Factor กับ BER.....	29
2.18 Q-Factor Penalty.....	30
2.19 ระบบ DWDM ที่มีการขยายแบบหลายขั้นที่นำมาใช้ใน Point-to-Point topology.....	32
2.20 ระบบที่ใช้ Raman amplifier แบบ multistage.....	34
2.21 การแปรผันของค่า Raman gain ตาม Pump power.....	35

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	โครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบ.....38
3.2	อุปกรณ์ WDM MUX AND DMUX.....42
3.3	โครงสร้างของ Double – stage amplifier.....44
3.4	อุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็ม Alcatel รุ่น 1686WM ชนิด 16 ความยาวคลื่น.....46
3.5	Optical Spectrum Analyzer(OSA)ของ Anritsu รุ่น MS9710C..... 47
3.6	การรับรองการตรวจสอบมาตรฐานและปรับแต่งการวัด.....47
3.7	ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ.....50
3.8	WDM Section 1.1.....51
3.9	WDM Section 1.2.....52
3.10	WDM Section 4.....52
3.11	WDM Section 6.....53
3.12	WDM Section 7.1.....53
3.13	WDM Section 8.....54
3.14	WDM Section 9.....55
3.15	WDM Section 11.....55
3.16	WDM Section 14.2.....56
4.1	ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์ จากเครื่องมือวัดที่ความยาวคลื่นใช้งาน section 1.1.....58
4.2	เปรียบเทียบ โอเอสเอ็นอาร์ กับระยะทางสะสม section 1.1.....59
4.3	ความสัมพันธ์ของการลดทอนกับจำนวนความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้น.....62
4.4	ตัวอย่างเปรียบเทียบการลดทอนของ โอเอสเอ็นอาร์ ที่การทดสอบแบบต่างๆ ของ section 12,14.1, และ 14.2.....63
4.5	โอเอสเอ็นอาร์ จากการวัดเปรียบเทียบกับการคำนวณ.....66
4.6	ผลการวัดของ section 1.1แบบ C&R จากสถานี A ถึง B (ก)Terminal A, (ข) Terminal B.....75
4.7	ผลการวัดของ section 1.1แบบ C&R จากสถานี B ถึง A (ก)Terminal B, (ข) Terminal A.....75
4.8	ผลการวัดของ section 1.1แบบ F&R จากสถานี A ถึง B (ก)Terminal A, (ข) Terminal B.....76
4.9	ผลการวัดของ section 1.1แบบ F&R จากสถานี B ถึง A (ก)Terminal B, (ข) Terminal A.....76
4.10	ผลการวัดของ section 1.1แบบ F&M จากสถานี A ถึง B (ก)Terminal A, (ข) Terminal B.....77



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 ผลการวัดของ section 14.2แบบF&R จากสถานี B ถึง A (ก)Terminal B, (ข) Terminal A .....	91
4.40 ผลการวัดของ section 14.2 แบบ F&M จากสถานี A ถึง B (ก)Terminal A , (ข) TerminalB..	92
4.41 ผลการวัดของ section 14.2 แบบF&M จากสถานี B ถึง A (ก)Terminal B , (ข) Terminal A ..	92
5.1 ค่าความแตกต่างระหว่างการวัดและการคำนวณ(addition)เปรียบเทียบกับระยะทาง.....	94
5.2 ตัวอย่างตารางบันทึกผล section 8.....	95
5.3 ตารางแสดงค่ากำลังงานและค่าการลดทอน(Power and attenuation table).....	96
5.4 ตารางแสดงค่าการเชื่อมโยง(Link budget table).....	96
5.5 ตารางแสดงค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการคำนวณ(OSNR calculation table).....	96
5.6 ตัวอย่างตารางแสดงค่าการชดเชยโอเอสเอ็นอาร์(Addition table).....	97
5.7 (ก) เปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณจากตาราง section 2 (ข) เปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณจากตาราง section 4 (ค) เปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณจากตาราง section 7.2 (ง) เปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณจากตาราง section 8.....	98
5.8 เปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณจากตารางเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าการลดทอนเพิ่มขึ้น 5 dB ทุกๆ span section (ก) section 6, (ข) section 7.2 , (ค) section 14.2, (ง) section 16.....	101
5.9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโอเอสเอ็นอาร์ การวัดกับการคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าการลดทอน.....	102

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันการติดต่อสื่อสารข้อมูลในประเทศไทยได้มีการเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นโครงข่ายของระบบการสื่อสารข้อมูลจะต้องมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้สามารถส่งสัญญาณที่มีความเร็วที่สูง และมีระยะทางในการส่งสัญญาณที่ไกลขึ้นเพื่อสามารถรองรับการเจริญเติบโตที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งระบบหนึ่งๆที่เริ่มนำมาใช้ก็คือเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น(Wavelength Division Multiplexing : WDM)บนโครงข่ายเคเบิลใยแก้ว ในทางปฏิบัติค่าที่เป็นเครื่องบ่งชี้ว่าระบบดับเบิลยูดีเอ็มทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหนก็คือค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Optical Signal to Noise Ratio : OSNR) ค่าของโอเอสเอ็นอาร์นี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายส่วนประกอบกัน เช่น ระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสง, ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง, Noise figure ของระบบ, ขนาดของแอมพลิไฟเออร์เป็นต้น ผลของปัจจัยต่างๆเหล่านี้จะทำให้ระดับกำลังงานของโอเอสเอ็นอาร์ลดลง, คุณสมบัตินี้และความเชื่อถือได้ในการเชื่อมโยงการสื่อสารลดลง ดังนั้นในระบบดับเบิลยูดีเอ็มการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ การปรับปรุงและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ให้ระบบการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพข้อมูลค่าโอเอสเอ็นอาร์เป็นสิ่งจำเป็นที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบได้เป็นอย่างดี สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunications Union : ITU) ได้แนะนำสมการในการคำนวณค่าของโอเอสเอ็นอาร์ไว้ใน ITU-T G.692 ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์ ระหว่างสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทาง (Terminal to Terminal) จำนวน 16 ส่วน (section) และนำข้อมูลที่ได้มาจัดให้อยู่ในรูปของตารางและกราฟ จากนั้นคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์ตามคำแนะนำของ ITU-T G.692 ทำการเปรียบเทียบค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการวัดกับการคำนวณเพื่อหาคุณลักษณะของแต่ละ Section มาทำการสร้างเครื่องมือในการประมาณการ โอเอสเอ็นอาร์ ในเบื้องต้นเพื่อเพิ่มการบำรุงรักษาโครงข่ายหลักให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโอเอสเอ็นอาร์จากสถิติการวัดของระบบดับเบิลยูดีเอ็มที่มีการเชื่อมโยงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงในโครงข่ายหลัก(Backbone)ของ บ.ทีโอที จำกัด(มหาชน)โดยทำการการศึกษา และวิเคราะห์ผลกระทบของโอเอสเอ็นอาร์ที่เกิดขึ้น เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นหรือค่าการลดทอนของของเคเบิลมีการเปลี่ยนแปลงและทำการบันทึกผลที่เกิดขึ้น

นำมาทำการเก็บสถิติเพื่อประมาณการค่าของโอเอสเอ็นอาร์ ที่เหตุการณ์ต่างๆจากนั้นนำข้อมูลจากการวัดมาทำการเปรียบเทียบกับการคำนวณและนำข้อมูลที่ได้จากการเปรียบเทียบมาทำการวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ของระบบเพื่อการบำรุงรักษาโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

### 1.3 เพราะเหตุใดปัญหานี้จึงน่าสนใจ

ในงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจไปที่โครงข่ายหลักที่เป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงโครงข่ายท้องถิ่น (Regional subnetwork) เข้าด้วยกันซึ่งระบบหนึ่งที่น่าสนใจมากในโครงข่ายหลักก็คือการใช้เทคนิคการส่งสัญญาณระบบดับเบิลยูดีเอ็มเครื่องบ่งชี้ว่าระบบทำงานได้มีประสิทธิภาพได้มากน้อยแค่ไหนในทางปฏิบัติเมื่อระบบได้ถูกใช้งานแล้วก็คือค่าของโอเอสเอ็นอาร์โดยตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อโอเอสเอ็นอาร์ของระบบในทางปฏิบัติก็คือ ระยะทางในการส่งสัญญาณและจำนวนของความยาวคลื่นที่ใช้ ในทางปฏิบัติการวัดค่าของโอเอสเอ็นอาร์เพื่อการบำรุงรักษาระบบจะต้องใช้เครื่องมือวัดที่สามารถวัดสเปกตรัมของระบบดับเบิลยูดีเอ็มซึ่งมีราคาแพง และมีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับโครงข่ายที่ครอบคลุมทั่วประเทศเมื่อเกิดปัญหาค้นกับโครงข่ายการแก้ไขปัญหามอาจล่าช้าทำให้ประสิทธิภาพในการให้บริการลดลง ดังนั้นความสามารถในการประมาณการค่าของโอเอสเอ็นอาร์ในเบื้องต้นจะทำให้สามารถคาดเดาปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับระบบและสามารถดำเนินการบำรุงรักษาและป้องกันเหตุขัดข้องได้ก่อนที่จะเกิดปัญหากับระบบได้

### 1.4 มีการนำเสนอหลักการใหม่อย่างไร

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์สถิติการเปลี่ยนแปลงของโอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดของระบบดับเบิลยูดีเอ็มในโครงข่ายหลักที่ให้บริการอยู่จากการจำลองเหตุการณ์ต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับระบบในอนาคตโดยจะใช้วิธีการวัดโอเอสเอ็นอาร์ของระบบดับเบิลยูดีเอ็มที่ใช้ในการเชื่อมโยงโครงข่ายหลักทั่วประเทศและเก็บสถิติของผลการวัดเปรียบเทียบกับการคำนวณจากสมการใน ITU-G.692 เพื่อหาคุณลักษณะของโอเอสเอ็นอาร์ในแต่ละส่วนของโครงข่าย จากนั้นทำการประมาณการค่าคุณลักษณะเฉพาะโอเอสเอ็นอาร์ ที่ได้ของโครงข่ายในแต่ละส่วนในทางปฏิบัติเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการบำรุงรักษาโครงข่ายหลัก

### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ดำเนินการวัดโอเอสเอ็นอาร์ของโครงข่ายหลักทั่วประเทศ 16 section ของระบบดับเบิลยูดีเอ็มที่ใช้ในโครงข่ายหลักทั้งที่ความยาวคลื่นใช้งานจริง, ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทางและที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทางบวกการลดทอนที่เพิ่มเข้าไปในเคเบิลเพื่อทดสอบผลกระทบ

ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโอเอสเอ็นอาร์ของระบบ จากผลการทดสอบพบว่าโอเอสเอ็นอาร์ จะมีการเปลี่ยนแปลงตามจำนวนของความยาวคลื่นที่ใช้งานในระบบ และค่าการลดทอนหรือระยะทางในการเชื่อมต่อของแต่ละ section โดยในแต่ละ section จะมีคุณลักษณะของโอเอสเอ็นอาร์ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับระยะทางในช่วง (span) ของแต่ละ section และทำการสร้างเครื่องมือประมาณการค่าโอเอสเอ็นอาร์จากคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละ section เพื่อใช้ในการบำรุงรักษาโครงข่ายหลัก

## 1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 บทนำ : กล่าวถึงความจำเป็นของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ปัญหาที่น่าสนใจ การเสนอหลักการใหม่

บทที่ 2 การสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม : กล่าวถึงหลักการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม มัลติเพล็กซ์เซอร์ โครงข่ายในระบบดับเบิลยูดีเอ็มและโอเอสเอ็นอาร์ในระบบดับเบิลยูดีเอ็ม

บทที่ 3 โครงสร้างของโครงข่ายหลัก : เสนอโครงสร้างของโครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบ, การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบรวมทั้งโครงสร้าง และหลักการงานของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและขั้นตอนในการทดสอบ

บทที่ 4 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ : เสนอผลการวัดและการวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการทดสอบ

บทที่ 5 คุณลักษณะโอเอสเอ็นอาร์ของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม : เป็นการนำผลการวิเคราะห์จากผลการวัดและการคำนวณมาทำการประมาณการหาค่าลักษณะเฉพาะของแต่ละ section เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการบำรุงรักษาระบบ

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ : เป็นการกล่าวสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

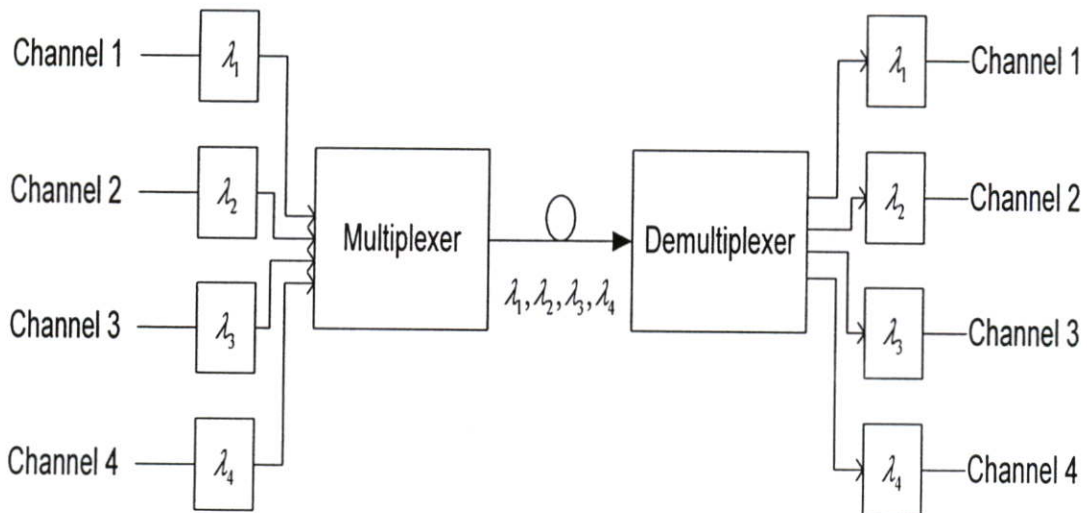
## บทที่ 2

# การสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกักระบบดับเบิลยูดีเอ็มเป็นความรู้พื้นฐานของการวิจัย เพื่อถ่ายทอดการศึกษาในบทต่อไป เนื้อหาเริ่มจากทฤษฎีเบื้องต้นของระบบดับเบิลยูดีเอ็มการใช้ระบบดับเบิลยูดีเอ็มในโครงข่ายสื่อสารสัญญาณ โอเอสเอ็นอาร์ในระบบดับเบิลยูดีเอ็ม ซึ่งเป็นระบบที่นำมาใช้กันมากในปัจจุบันสำหรับการเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารสัญญาณที่มีขนาดใหญ่และระยะทางไกล โดยแสดงเป็นลำดับหัวข้อดังต่อไปนี้

### 2.1 หลักการเบื้องต้นของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม

ระบบดับเบิลยูดีเอ็มเป็นระบบมัลติเพล็กซ์ที่ใช้คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเป็นคลื่นพาห์สำหรับนำข้อมูล โดยแสงทั้งหมดจะถูกรวมกันก่อนส่งออกไปในเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกันด้วยออปติคอลคัมเพลอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งจะสามารถบรรจุข้อมูลได้หนึ่งชุดและข้อมูลแต่ละชุดนี้อาจเป็นข้อมูลเดี่ยวของหนึ่งช่องสัญญาณหรืออาจเป็นข้อมูลจำนวนมากที่มาจากหลายช่องสัญญาณที่ได้จากการจัดระบบข้อมูลด้วยเทคนิคของ TDM (Time Division Multiplexing) หรือ SCM (Subcarrier Multiplexing) มาแล้วก็ได้[1]



รูปที่ 2.1 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบดับเบิลยูดีเอ็ม

ที่ภาครับข้อมูลแสงจะถูกแยกออกในแต่ละช่วงของความยาวคลื่นด้วยระบบกรองแสง สัญญาณแสงที่ถูกแยกแล้วจะถูกตีมอดูเลตด้วยวิธีการที่เหมาะสมกับขบวนการทางอินพุท

ระบบดับเบิลยูดีเอ็มเป็นเทคนิคที่ใช้เฉพาะระบบการสื่อสารข้อมูลทางแสง สามารถส่งข้อมูลได้เป็นจำนวนมหาศาล อย่างไรก็ตามการส่งแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันหลายค่าเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวจะมีผลเสียในทางปฏิบัติอยู่สองประการใหญ่ๆ คือ

1. ระยะระหว่างสถานีทวนสัญญาณของข้อมูลแต่ละช่องหรือแต่ละความยาวคลื่นแสงจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการกำหนดตำแหน่งของสถานีทวนสัญญาณ

2. การออกแบบระบบขยายสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์อาจมีความซับซ้อนเพราะจำนวนช่องสัญญาณมีจำนวนมาก เช่นเดียวกับกรณีของสถานีทวนสัญญาณทางแสงที่ต้องทำการขยายสัญญาณทุกค่าความยาวคลื่นไปพร้อมกัน

เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวในระบบจริงจึงใช้แสงที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกันมากในย่านความยาวคลื่น 1.55 nm โดยแต่ละช่องสัญญาณอาจใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 1.51, 1.53, 1.55 และ 1.57 nm สำหรับการส่งข้อมูล 4 ช่องสัญญาณไปพร้อมๆกัน นอกจากนี้การเลือกใช้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 1.55 nm จะทำให้การลดทอนสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนำแสงของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าเกือบเท่ากัน อีกทั้งยังสามารถใช้สถานีทวนสัญญาณแสงที่เป็นอุปกรณ์ EDFA (Erbium-Dope Fiber Amplifier) เพียงตัวเดียวเพื่อขยายสัญญาณทุกช่องสัญญาณไปพร้อมกันได้

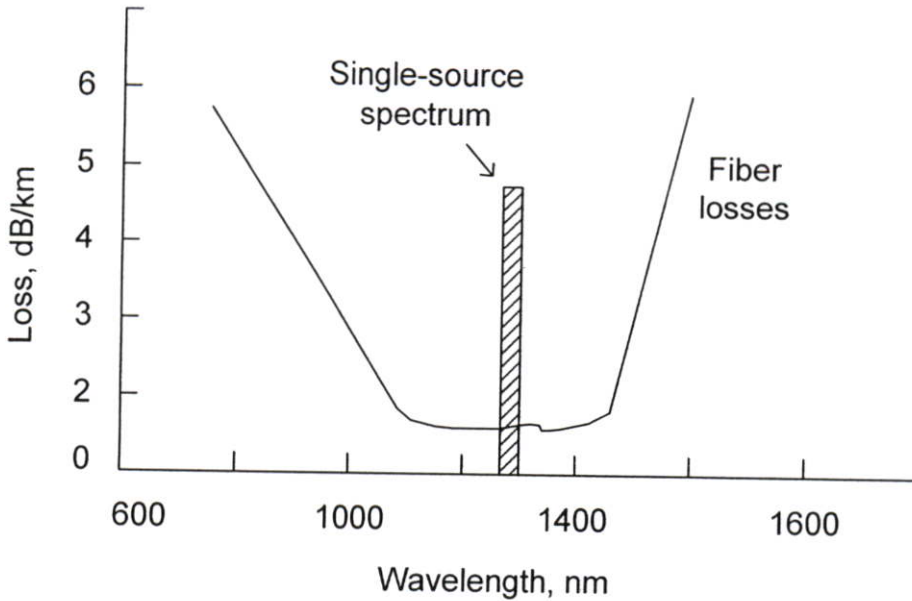
จะเห็นได้จากรูปที่ 2.2 ที่ค่าการลดทอนต่าๆนั้นสามารถรองรับการทำงานได้มากกว่าหนึ่งความยาวคลื่น การควบคุมการทำงานของความยาวคลื่นโดยใช้วัสดุผสมหรือโดยใช้ grating spacing เลเซอร์แบบ Distribution-FeedBack(DFB) หรือเลเซอร์แบบ Distribution Bragg Reflector (DBR) ทำให้สามารถที่จะใช้ความยาวคลื่นหลายๆ ความยาวคลื่นในการเชื่อมโยงเดียวกันได้ ดังอธิบายในรูปที่ 2.3 ที่ด้านรับจะใช้อุปกรณ์กรองแสงหรืออุปกรณ์ที่มีความไวต่อความยาวคลื่น เช่น grating เพื่อที่จะแยกความยาวคลื่นแต่ละความยาวคลื่นออกจากคลื่นพาหะเดิมระยะห่างระหว่างความยาวคลื่นจะมีระยะประมาณ 10 nm. ปัจจุบันสามารถแยกช่องสัญญาณให้มีระยะห่างระหว่างความยาวคลื่นประมาณ 1 nm. เราเรียกเทคนิคแบบนี้ว่า Dense WDM(DWDM)

อุปกรณ์ที่เป็นกุญแจสำคัญก็คืออุปกรณ์ที่รวมแสงจากหลายๆ แหล่งกำเนิดแสงที่ด้านส่ง (couplers Or multiplexers) และอุปกรณ์ที่ใช้แยกช่องสัญญาณออกจากกัน (demultiplexers) ที่ด้านรับ นอกจากนี้เรายังต้องการเทคนิคในการคงไว้ ซึ่งความยาวคลื่นเดิมจากแหล่งกำเนิดที่มีการรวมความยาวคลื่นกันอีกด้วย[2]

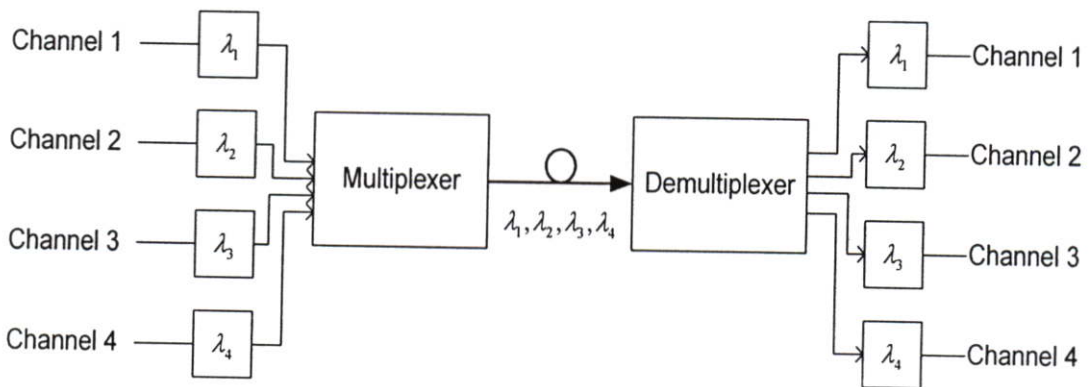
การส่งสัญญาณแสงแบบสองทิศทาง(Bidirectional)สามารถใช้ในระบบดับเบิลยูดีเอ็มได้ด้วยการรวมแหล่งกำเนิดแสงและภาครับไว้ที่ปลายด้านเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.4 เส้นใยแก้วนำแสงมีย่านพาสแบนด์ (passband) ประมาณ 800 nm. ถึง 1600 nm. (มีค่าการลดทอนที่เกี่ยวข้องกับ OH<sup>-</sup> iron ที่ความยาวคลื่น 1400 nm. และ 1250 nm. ค่าการลดทอนเหล่านี้จะไม่มีความสำคัญสำหรับการเชื่อมโยงที่มีระยะทางสั้นๆ แต่ค่าการลดทอน เหล่านี้จะเพิ่มความสำคัญขึ้นตามระยะทาง

ของการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น) การส่งสัญญาณในใยแก้วมีการระบุย่านการทำงานไว้ในช่วงความยาวคลื่น 850 nm., 1300 nm. และ 1550 nm.[3]

ในระบบโหมคร่วม (multimode) มีย่านการทำงานที่ 850 nm มี Bandwidth-distance 1 GHz\*km (โดยใช้ graded-index fiber)



รูปที่ 2.2 การใช้ประโยชน์แบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วนำแสงในระบบ Single source multimode

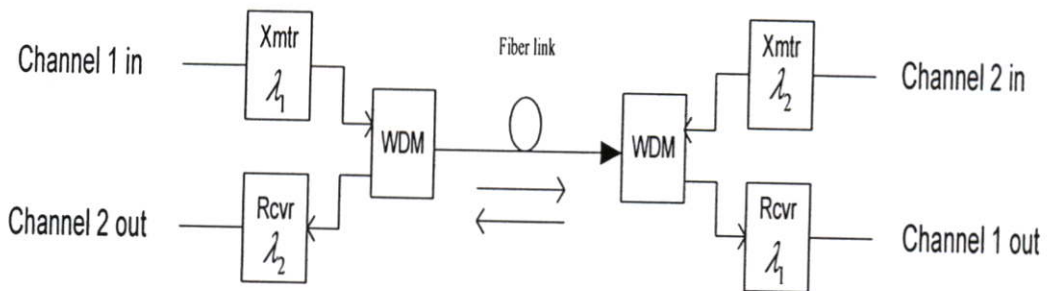


รูปที่ 2.3 ระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing : WDM)

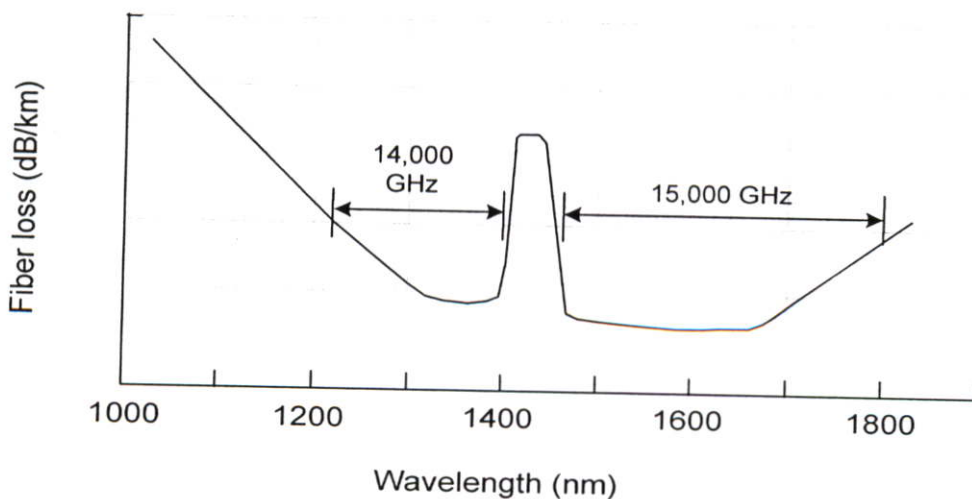
รูปที่ 2.5 จะเห็นว่าย่านการทำงานของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมคร่วมเดี่ยว (single-mode fiber) ที่มีค่าการสูญเสียของแบนด์วิดท์ (bandwidth loss) ที่ต่ำจะอยู่ที่ย่านความยาวคลื่น 1300 nm.

มีความถี่ประมาณ 14000 GHz. มีค่าสูญเสียต่อระยะทางประมาณ 0.4 dB/km. ค่าการแพร่กระจายแสง (dispersion) และค่าการเปลี่ยนแปลง  $\Delta$  ประมาณ 0.5% เป็นศูนย์กลางที่ความยาวคลื่น 1300 nm. ด้วยแกนของเส้นใยแก้วนำแสงขนาด 10  $\mu\text{m}$ . มีค่าการแพร่กระจายแสง (dispersion) ที่ย่านความยาวคลื่น 1260 nm. – 1360 nm ประมาณ  $4 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  (ผลของ dispersion จะเห็นได้ชัดเมื่อค่าเกินกว่า 20% ของ bit period) และจากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าที่ความยาวคลื่น 1550 nm. ย่านการทำงานของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยวที่มีค่าการสูญเสียของแบนด์วิดท์ต่ำจะมีความถี่ประมาณ 15000 GHz. มีค่าสูญเสียต่อระยะทางประมาณ 0.2 dB/km. ด้วยค่าการแพร่กระจายแสงประมาณ  $18 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  ค่าการแพร่กระจายแสงนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยใช้เทคนิค dispersion shifting มาประยุกต์ใช้เพื่อทำให้ค่าการแพร่กระจายแสงมีค่าต่ำสุดในย่านความยาวคลื่น 1550 nm. หรือโดยการลดระดับพลังงานของแหล่งกำเนิดพลังงานของไลน์วิดท์ (line width)

สำหรับการเชื่อมโยงที่มีระยะทางไกลๆ และมีอัตราการส่งข้อมูลสูง สามารถใช้ย่านความยาวคลื่นจาก 1250 ถึง 1350 nm. และ 1450 nm. ถึง 1600 nm. โดยสามารถขยายย่านความยาวคลื่นออกไปได้อีก 250 nm.



รูปที่ 2.4 ระบบ ดับเบิลยูดีเอ็ม แบบ Bidirectional



รูปที่ 2.5 ย่านการใช้งานสเปกตรัมในเส้นใยแก้วนำแสงแบบชนิดโหมคเดี่ยว

องค์ประกอบอื่นๆ ที่สามารถจำกัดขอบเขตการใช้งานของเส้นใยแก้วนำแสงแบบชนิด โหมดเดี่ยวในการใช้งานกับความยาวคลื่นหลายๆความยาวคลื่น ถ้าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิด ความยาวคลื่นต่ำกว่าความยาวคลื่นตัด (cut off) ของเส้นใยแก้วนำแสงและที่ความยาวคลื่นยาวมาก เส้นใยแก้วนำแสงจะมีความอ่อนไหวมากต่อค่าการสูญเสียเพียงเล็กน้อย

ขอบเขตของการส่งสัญญาณสามารถใช้ประโยชน์ได้สูงสุดด้วยวิธีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่ง ความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing:WDM) โดยการรวมความยาวคลื่นที่มีหลากหลาย แหล่งกำเนิดความยาวคลื่นที่ด้านส่งและแยกความยาวคลื่นเหล่านี้ที่ด้านรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 หลักที่สำคัญก็คือการที่สามารถนำสัญญาณที่เป็นทั้งสมมาตรและไม่สมมาตร (synchronous and asynchronous) และสัญญาณอานาล็อกส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการใช้ประโยชน์แบนด์วิดท์ ของเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างสูงสุด[2]

## 2.2 ชนิดของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ เทคนิคการเลือก ความยาวคลื่น (wavelength-selective techniques)และบรอดแบนด์เทคนิค (broadband techniques)

### 2.2.1 เทคนิคการเลือกความยาวคลื่น (Wavelength – selective WDM)

กำลังงานทั้งหมดจะให้แก่ความยาวคลื่นใดคลื่นหนึ่งเพียงหนึ่งส่วนและกำลังงานที่เหลือก็ จะถูกใช้ในความยาวคลื่นอื่นๆ ที่ถูกแยกออกไป ถ้าไม่คิดรวมการสูญเสียที่เพิ่มขึ้น (insertion loss) สามารถเชื่อมโยงได้ดังนี้

$$P_{out}(\lambda_j) = P_{in}(\lambda_j) \quad (2.1)$$

จำนวนของแสงที่รั่วไหลจากช่องสัญญาณหนึ่งไปยังอีกช่องสัญญาณอื่นๆ เรียกว่าการ แทรกสอดหรือการไขว้แทรก (crosstalk) ในระบบที่ไม่มีการเชื่อมโยงกันสามารถอธิบายได้จากช่อง สัญญาณ  $j$  เข้าสู่ ช่องสัญญาณ  $i$  ในหน่วย dB

$$CT_{ij} = 10 \log (P_{ij} / P_{ii}) \quad (2.2)$$

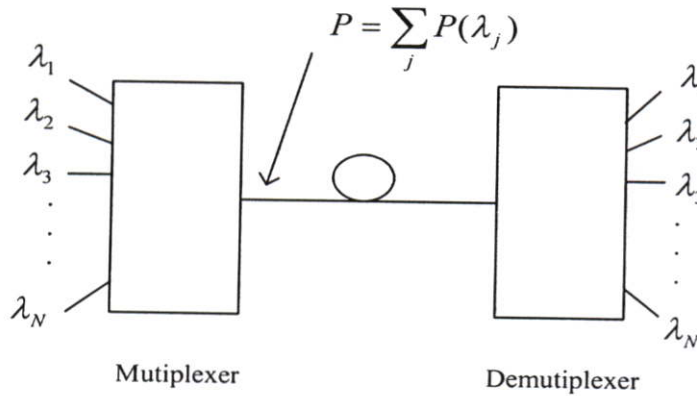
เมื่อ  $P_{ij}$  คือกำลังงานที่วัดได้

เทคนิค wavelength – routed WDM อธิบายในรูปที่ 2.6 ก แหล่งกำเนิดความยาวคลื่นที่ แยกจากกันจะถูกกำหนดความยาวคลื่นของแต่ละแหล่งกำเนิด กำลังงานของแหล่งกำเนิดทั้งหมด จะรวมกันโดยปราศจากค่าสูญเสีย (ในอุดมคติ) ดีมัลติเพล็กซ์ที่ด้านรับปลายทางจะมีความไวต่อ ความยาวคลื่น ดีมัลติเพล็กซ์จะทำการแยกความยาวคลื่นแต่ละความยาวคลื่นออกจากกันและส่งไป

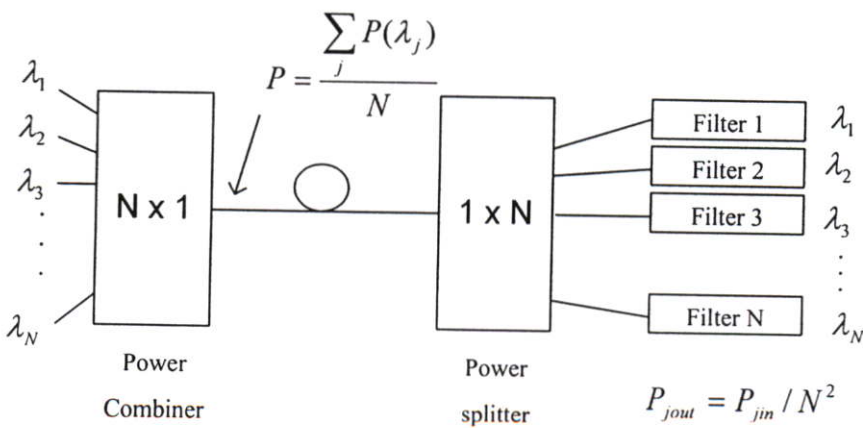
ยังเส้นทางที่แตกต่างกันที่ด้านรับ โดยแต่ละเส้นทางจะมีความยาวคลื่นที่ไม่เหมือนกัน (เป็นการแยกออกทางอุดมคติไม่มีการสูญเสีย) การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์จะประสบความสำเร็จได้ถ้ามีค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้น(insertion loss)ที่ต่ำ จากช่องสัญญาณ  $i$  เมื่อมีเพียงช่องสัญญาณ  $j$  เท่านั้นที่ทำงาน  $P_{ii}$  คือกำลังงานในช่องสัญญาณ  $i$  เมื่อมีเพียงช่องสัญญาณ  $i$  เท่านั้นที่ทำงาน crosstalk สามารถหาได้ด้วยการแยกออกเป็นคู่ๆ หรือหาจากผลรวมคือ

$$CT_{Total} = 10 \log \left( \sum_j P_{ij} / P_{ii} \right) \tag{2.3}$$

เมื่อ  $\sum_j$  คือ ผลรวมของพลังงานจากทุก ช่องสัญญาณ ที่วัดได้จาก ช่องสัญญาณ  $i$



( ก )



( ข )

รูปที่ 2.6 (ก) Wavelength – routed multiplexing . (ข) Broadcast- and – select multiplexing

### 2.2.2 เทคนิคแบบการกระจายและการเลือก (Broadcast- and -select Techniques)

เทคนิคแบบการกระจายและการเลือก (รูปที่ 2.6ข) เป็นการรวมกำลังงานของแหล่งกำเนิดที่ด้านส่งและแบ่งผลรวมของกำลังงานที่ถูกรวมนี้ด้วยจำนวนของแหล่งกำเนิดทั้งหมดโดยที่ด้านรับจะรวมสัญญาณที่ถูกแบ่งกำลังงานที่เท่าๆ กันนี้ให้ได้ผลรวมของกำลังงานดั้งเดิม

ความยาวคลื่นแต่ละส่วนของด้านส่งจะถูกกำหนดความยาวคลื่นไว้ก่อนอย่างแน่นอน ความยาวคลื่นทั้งหมดจะถูกส่งไปพร้อมๆ กันไปยังด้านรับ ที่ด้านรับจะกรองความยาวคลื่นที่ต้องการแยกออกเป็นแต่ละช่องสัญญาณ และแบ่งกำลังงานที่ได้รับตามความยาวคลื่นที่ต้องการหลังจากผ่านการกรองความยาวคลื่นแล้วซึ่งการแบ่งกำลังงานนี้ทำได้ด้วยการผ่านอุปกรณ์ตรวจจับ แหล่งกำเนิดและด้านรับปลายทางอาจจะมีโครงสร้างในการเชื่อมโยงในแบบดาว (star)

ระบบเทคนิคแบบการกระจายและการเลือกนี้ เป็นระบบที่ทำงานด้วยการแยกและรวมสัญญาณที่ไม่สลับซับซ้อนที่มีการสูญเสียที่เกิดขึ้นอุปกรณ์แต่ละส่วนเป็น  $1/N$  และมีค่าสูญเสียทั้งหมดเป็น  $1/N^2$  ดังนั้นเราสามารถหาค่ากำลังสูญเสียที่แต่ละช่องสัญญาณได้คือ (ไม่รวม insertion loss)

$$P_{out}(\lambda_j) = P_{in}(\lambda_j) / N^2 \quad (2.4)$$

ค่าสูญเสียที่ถูกแยกออกจากกันคือ  $1/N$  หรือ  $10 \log N$  dB (ไม่คิดรวมค่าสูญเสียอื่นที่เข้ามา) เมื่อตัดค่าสูญเสียนี้ออกไปก็สามารถทำการส่งสัญญาณได้โดยไม่ต้องใช้ออปติคัลแอมป์ลิฟายเออร์ข้อได้เปรียบของระบบบรอดแบนด์เทคนิคคือแหล่งกำเนิดต้องการเพียงการปรับแต่งภายในพาสแบนด์ของสเปคตรัมฟิลเตอร์มีการแบ่งความกว้างของสเปคตรัมอย่างเท่าเทียมกันและสม่ำเสมอ, ระยะช่องว่างต่ำสุดของช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับคุณลักษณะสตีฟเนส (steepness) ของพาสแบนด์ฟิลเตอร์และจำนวนของ crosstalk ที่สามารถทนได้ วัสดุที่เหมาะสมจะใช้เป็นตัวกรอง (filter) คือ Fabry-Perot etalons, laser amplifier ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำที่สามารถปรับค่าได้, integrated filter, และ heterodyne receivers

### 2.3 มัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexers)

ระบบบรอดแบนด์ดับเบียดีเอ็ม (Broadband WDM) ใช้แบบของการแยกกำลังงาน (power splitter) และการรวม (combiners) ซึ่งแบนด์วิดท์ของความยาวคลื่นที่สม่ำเสมอสามารถรวมและแยกกันได้ทุกๆ 400 nm. ซึ่งเพียงพอที่จะใช้ย่านความยาวคลื่นที่ขยายการทำงานได้จาก 1250 nm. ถึง 1600 nm.

ระบบ Wavelength-selective WDM จะต้องมีการการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ซึ่งมีเทคนิคที่สามารถใช้ได้หลายวิธีได้แก่การใช้ Diffraction grating, Spectral filter หรือ Directional

couplers โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแยกความยาวคลื่น 2 ชนิดคือ อุปกรณ์แพร่กระจายมุม (angular dispersion) และตัวกรอง (filter)

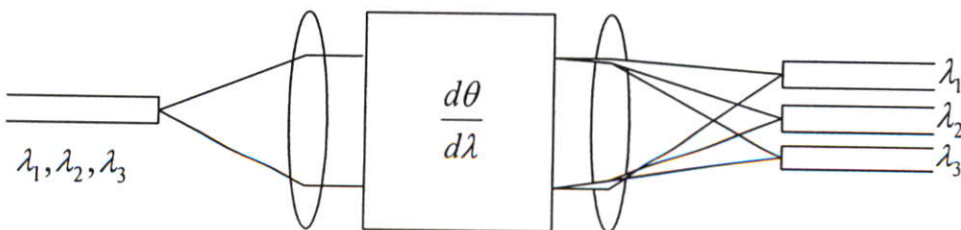
### 2.3.1 อุปกรณ์กระจายมุม (Angular Dispersion Devices)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายของมุม (ตัวอย่าง ปริซึมและ gratings) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งแสงหรือสะท้อนแสงที่มุมต่างๆ เพื่อกำหนดความยาวคลื่นของแสงที่ปรากฏ (เช่น การหักเหของแสงที่อินพุต) ปัจจัยหลักที่กำหนดการทำงานของอุปกรณ์คือค่าการสูญเสียที่มากเกินไป (excess loss) และการแพร่กระจายมุมของอุปกรณ์ ค่า excess loss คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการที่แสงผ่านอุปกรณ์เกินกว่า  $1/N$  ของ splitting loss ซึ่งค่าการสูญเสียเหล่านี้เกิดจากธรรมชาติของอุปกรณ์, ความกว้างแบนด์ (wideband) ของอุปกรณ์ ซึ่งควรมีการกำหนดค่า excess loss ที่มีผลต่อการทำงานของความยาวคลื่น

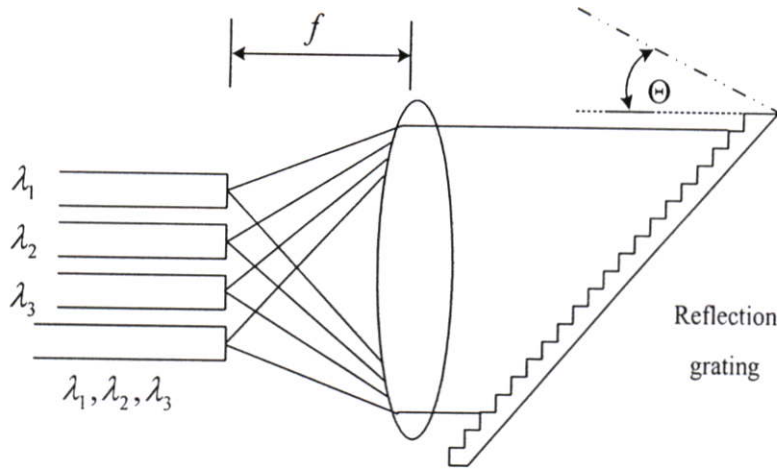
มุมการกระจายแสงของอุปกรณ์ (angular dispersion) คือการวัดมุมเอียง  $d\theta$  ของลำแสงสองลำแสงที่เกิดขึ้นพร้อมกันที่อินพุตโดยแยกความยาวคลื่นด้วย  $d\lambda$  โดยจะได้มุมกระจายของแสงคือ  $d\theta/d\lambda$  การกระจายของมุมสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงมุมได้ด้วยการเพิ่มเลนส์เข้าไปดังรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการกระจายของมุมจะถูกวางหันหน้าไปในแนวจุดรวมแสงของเลนส์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับแสงที่เข้ามาจะวางอยู่ในด้านหลังของเลนส์ในแนวจุดรวมแสง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายมุมของแสงจะต้องมีการหักเหของลำแสงในตัวของมันเอง รูปที่ 2.7 แสดงเลนส์ที่ใช้ในการหักเหแสงจะวางกั้นลำแสงที่มาจากอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสง ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกวางหันหน้าไปในแนวจุดรวมแสงของเลนส์ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายของมุมจะอยู่ในด้านหลังของเลนส์ในแนวจุดรวมแสง

ในระบบส่วนมากที่ใช้ในแบบการกระจายของมุม grating จะเป็นอุปกรณ์ที่ถูกรวมอยู่กับเลนส์ (รูปที่ 2.8) grating คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสะท้อนหรือส่งแสงด้วยการใช้แผ่นเพลทที่วางเรียงไว้ใกล้ๆกันในแนวขนานกันหรือใช้เป็นแผ่นเพลทที่พื้นผิวของ grating โดยทั่วไปค่าการสูญเสียของอุปกรณ์นี้มีผลเล็กน้อยเหล่านี้จะต้องไม่มากกว่า 1-3 dB และระยะห่างของช่องสัญญาณที่แยกออกจากกัน 1-10 nm.



รูปที่ 2.7 การแยกความยาวคลื่นที่ใช้การกระจายของมุมและเลนส์



รูปที่ 2.8 เรขาคณิตสำหรับการสะท้อนของ grating ที่ด้านรับของคัปเปิลยูตีเอ็ม

### 2.3.2 อุปกรณ์กรองแสง (Filtering Devices)

อุปกรณ์กรองแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสะท้อนแสงหรือส่งแสงโดยขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ต้องการกรอง อุปกรณ์กรองแสงที่สามารถใช้ในการแยกความยาวคลื่นมีหลายชนิด ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของอุปกรณ์กรองแสงและแบนด์วิดท์ที่สามารถใช้งานได้ของอุปกรณ์กรองแสง แต่ละชนิด

1. Interference filters- อุปกรณ์กรองแสงแบบนี้ส่วนมากใช้ฉนวน (Dielectric) ที่มีหลายชั้นรวมกันเป็นชุดเดียวกัน(เหมือนกับการใช้ตัวกรองแสงที่ดูคลื่นแสงของการถ่ายภาพ) ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาดในการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นที่ต้องการและมีค่า insertion loss ต่ำสุด อุปกรณ์กรองแสงแบบนี้จะยอมให้แสงผ่านเพียงความยาวคลื่นเดียว (ด้วยการตอบสนองความถี่) และสะท้อนแสงทุกความยาวคลื่นที่เหลือ ความยาวคลื่นอื่นๆ โดยทั่วไปจะอยู่ห่างออกไปจากความยาวคลื่นศูนย์กลางของตัวกรองแสงมากกว่า 10% ของความยาวคลื่นศูนย์กลาง(ด้วยการออกแบบที่สลับซับซ้อนระยะห่างของความยาวคลื่นสามารถทำให้มีระยะห่างกันได้ 1% หรือที่ทุกๆ 0.1% ของความยาวคลื่นศูนย์กลาง) สำหรับการทำงานที่มีช่องสัญญาณมากกว่าสองช่องสัญญาณ จำเป็นต้องมีการใช้อุปกรณ์กรองแสงจัดเรียงกันหลายๆอุปกรณ์กรองแสงแบบอนุกรม ซึ่งจะเป็นการเพิ่ม insertion loss สำหรับการรวมอุปกรณ์กรองแสงแบบนี้เพียงการวางเรียงอุปกรณ์กรองแสงอนุกรมกันแบบขั้นบันไดสองหรือสามอุปกรณ์กรองแสง ในทางปฏิบัติจะมีความสัมพันธ์กับค่า insertion loss ที่สูงมาก ขอบเขตในการทำงานของระบบบรอดแบนด์จะสามารถทำงานแยกความยาวคลื่นได้ห้าหรือหกช่องสัญญาณ

ตารางที่ 2.1 แบบจำลองของช่องสัญญาณสำหรับเทคนิคการกรองแบบต่างๆ

Method	Typical channel bandwidth
Interface filters	5 nm
Fabry-Perot filter	0.1-10 nm
Tuned semiconductor amplifier	1-10 GHz
Heterodyne	1-10 GHz

2. Fabry-Perot resonator filter- คือเส้นใยแก้วนำแสงชนิด bandpass filter โดยจะส่งผ่านความยาวคลื่นแคบๆและสะท้อนความยาวคลื่นอื่นๆ ความถี่ในการกรองของ filter จะเกิดขึ้นที่ทุกๆ  $c/2L$  เมื่อ  $L$  คือระยะห่างระหว่างกระจกของ resonator ช่วงเวลาที่เกิดการส่งผ่านนี้เรียกว่า free spectral rang (FSR) ของ interferometer ความถี่ของความกว้างของ filter bandpass มีค่า 3dB ( ต.ย. ความกว้างเต็มทีที่ครึ่งหนึ่งของจุดสูงสุด ) คือ  $\Delta f$  และมีความสัมพันธ์กับ FSR ด้วยการหาค่าจากค่า  $F$  ของ filter โดย

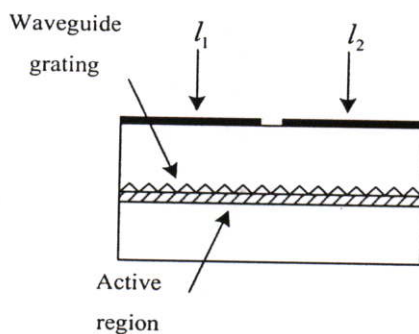
$$\Delta f = \text{FSR} / F \quad (2.5)$$

เมื่อ  $F = \pi \sqrt{R} / (1-R)$  และ  $R$  คือค่าการสะท้อนแสงของ resonator mirror (สมมุติว่ากระจกทั้งสองข้างของ resonator filter เหมือนกันทั้งสองด้าน) ค่าของการส่งต่ำสุดระหว่างจุดสูงสุดคือ  $(\pi / 2F)^2$

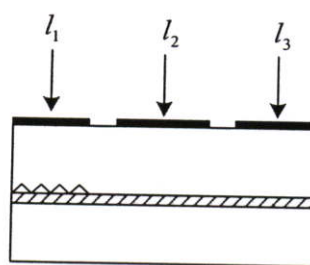
3. Semiconductor amplifier filter- เป็นเลเซอร์ไดโอดที่มีการ pump ที่ต่ำกว่าค่า threshold และปรับแต่งการขยายแบนด์พาสด้วยพาสแบนด์แคบๆ ความถี่สัญญาณกำหนดด้วยส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้ทำเลเซอร์ โดยใช้ distributed-feedback reflector (DFR) หรือ distributed-feedback reflector (DFR) เลเซอร์กับอิเล็กทรอนิกส์หลายขั้ว (แสดงในรูปที่ 2.9) ซึ่งยินยอมให้มีหนึ่งขั้วสามารถปรับแต่งการขยายความยาวคลื่นได้ในแบบ DFR (รูป 2.9 ก) กระแสที่หนึ่งอินพุต สามารถใช้สำหรับการ pump ขณะที่กระแสอื่นๆใช้ในการควบคุมความยาวคลื่นศูนย์กลางของการขยายในแบบ DFB กระแส  $I_1$  จะแปรผันตามช่วงเวลาการสะท้อนของเส้นใยแก้ว (และแปรผันตามความยาวคลื่นศูนย์กลางของการขยาย) กระแส  $I_2$  ควบคุมเฟสของการขยายและ  $I_3$  ควบคุมกำลังงานในการ pump หรืออัตราขยาย

4. Coherent detector with electronic filter- coherent detection เป็นเทคนิคที่ใช้แหล่งกำเนิดที่มีโลว์วีคท์ที่เล็กกว่าสัญญาณแบนด์วิดท์ เทคนิคแบบนี้สัญญาณจะถูกผสมกับความถี่ที่เลื่อน (shift) จากความถี่อ้างอิงที่ถือความถี่มาจาก local laser การผสมสัญญาณที่รวมกลุ่มกันจะกำเนิดความถี่ที่แตกต่างกันขึ้น (เรียกว่า intermediate frequency) ระยะห่างของช่องสัญญาณ

กำหนดด้วยแบนด์วิดท์ของสัญญาณมอดูเลต (ขึ้นอยู่กับชนิดของการมอดูเลตและอัตราการส่งข้อมูลที่ใช้) และลักษณะการจัดเตรียมภาครับที่ใช้วิธีการตรวจจับที่ยินยอมให้ใช้ช่องสัญญาณแคบๆ ถูกแยกออกจากกันที่ระบบย่อยด้วยขบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ของภาครับ โดยใช้ตัวกรองอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเที่ยงตรงมากกว่าการกรองที่ใช้กฎเกณฑ์แบบเดิมที่ใช้ตัวกรองในการแยกที่มีความหยابและความกว้างของช่องสัญญาณต่ำ



(ก)



$I_1$  — Bragg  
 $I_2$  — Phase  
 $I_3$  — Gain

(ข)

รูปที่ 2.9 (ก) distributed-feedback (DFB) amplifier, (ข) distributed-reflector (DFR) amplifier

## 2.4 แหล่งกำเนิดแสง (Source)

การสร้างระบบ ดับเบิลยูดีเอ็มในทางอุดมคติจะต้องมีกำลังในการส่งที่เพียงพอมีเสถียรภาพ และสามารถปรับแต่งความยาวคลื่นที่ต้องการได้รวดเร็วและแม่นยำตารางที่ 2.2 แสดงความกว้างของสเปกตรัมกับแหล่งกำเนิดที่เลือกมาใช้

### 2.4.1 LED (Light Emitting Diode)

ความกว้างแบนด์วิดท์ของแอลอีดีโดยทั่วไปจะต้องคำนึงจุดค้อยของแอลอีดีเนื่องจากผลของการแพร่กระจายของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งอาจเกิดขึ้น โดยการให้ความกว้างของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดผ่านออกจากสเปกตรัมฟิลเตอร์ให้ได้ความกว้างที่แคบๆ เรียกเทคนิคแบบนี้ว่าสเปกตรัมสไลซ์ (spectral slicing) ด้วยวิธีนี้มีข้อได้เปรียบคือยินยอมให้ใช้แอลอีดีที่มีความสัมพันธ์ที่เหมือนกันได้หลากหลายมีราคาไม่แพง และใช้ตัวกรองที่แตกต่างกันในการเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการ การเลือกการกรองแบบนี้จะทำให้ระดับกำลังงานที่สามารถใช้สอยได้ของแหล่งกำเนิดของแอลอีดีมีไม่เพียงพอ ดังนั้นการลดลงของกำลังงานจะเป็นสัดส่วนกับการลดลงของแบนด์วิดท์ ทำให้เทคนิคแบบนี้เป็นเพียงการศึกษาที่ระยะทางเส้นใยแก้วสั้นๆ และมีอัตราการส่งข้อมูลในการเชื่อมโยง(link)ต่ำ

ตารางที่ 2.2 ความกว้างของสเปกตรัมสำหรับแหล่งกำเนิดต่างๆ

Type	Typical spectral width	Typical spectral width
LED	50-100 nm (or more)	5000-10000 GHz
Fabry-Perot laser	3-6 nm	300-600 GHz
DFB laser	<0.01 nm	10-100 MHz
External cavity laser		<1 MHz

### 2.4.2 Fabry-perot Diode Laser

Fabry-perot(FP)เลเซอร์โดยทั่วไปมี 6-8 วิธีในการoscillatingด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็น  $c / 2L$  Hz. สำหรับเลเซอร์เหล่านี้โดยปกติสามารถทนต่อการเบี่ยงเบนของความยาวคลื่นได้  $\pm 3$  nm. และมีความยาวคลื่นของไลน์วิดท์โดยทั่วไป 6 nm. การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ (multiplex and demultiplex) สามารถทนทานต่อการเบี่ยงเบนของความยาวคลื่นได้  $\pm 1$  nm. ซึ่งความยาวคลื่นที่สามารถใช้งานได้ดีที่สุดประมาณ 14 nm. (เลเซอร์ต้องการควบคุมอุณหภูมิซึ่งความยาวคลื่นศูนย์กลางมีสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิประมาณ  $0.4 \text{ nm.}^\circ\text{C}^{-1}$ ) ยินยอมให้การด์แบนด์ (guad band) ระหว่างช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับความกว้างแบนด์วิดท์ของตัวเอง มีความต้องการความยาวคลื่นประมาณ 28 nm. ต่อช่องสัญญาณและมีความกว้างวินโดว์ของตัวเอง 100 nm และ 150 nm. สามารถใช้งานความยาวคลื่นได้ 3 และ 5 ช่องสัญญาณตามลำดับสำหรับช่องสัญญาณรวมทั้งหมด 8 ช่องสัญญาณ

### 2.4.3 DFB Diode Laser

distributed-feedback (DFB) laser จะยินยอมให้ทำงานกับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (single-mode fiber) และมีความไวต่ออุณหภูมิต่ำประมาณ  $0.08 \text{ nm} \cdot \text{C}^{-1}$  โดยทั่วไปความกว้างสเปกตรัมของเอาต์พุตคือ 10 ถึง 100 MHz. ซึ่งความกว้างนี้เล็กกว่าความกว้าง spectral ของสัญญาณมาก (สำหรับอัตราข้อมูลสูง) หรือเล็กกว่าความยาวคลื่น "chirp" ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับ pulse ที่ output ของเลเซอร์ (ความยาวคลื่น chirp สามารถทำงานที่ความถี่มากกว่า 10s GHz หรือหนึ่งในสิบส่วนของความยาวคลื่น) ความยาวคลื่น chirp นี้ สามารถขจัดออกได้ด้วยการใช้ cw เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิด และใช้การ modulator จากภายนอกทำการ modulator ข้อมูลเป็นแสง (ความกว้างของช่องสัญญาณสามารถประมาณการจากแหล่งกำเนิดความยาวคลื่นศูนย์กลางซึ่งสามารถทนทานการเบี่ยงเบนของความยาวคลื่นได้  $\pm 0.5 \text{ nm}$ . (ตั้งสมมุติฐานว่ามีการควบคุมอุณหภูมิเลเซอร์) ความทนทานต่อความยาวคลื่น chirp  $\pm 0.2 \text{ nm}$ . และ filter ทนทานได้  $\pm 1 \text{ nm}$ . ความกว้างช่องสัญญาณที่แท้จริงประมาณ 3.5nm. และการเพิ่ม guard band เท่ากับความกว้างช่องสัญญาณซึ่งความกว้างช่องสัญญาณมีค่าประมาณ 7 nm. ดังนั้นเราสามารถมีช่องสัญญาณได้ 14 และ 21 ช่องสัญญาณตามลำดับ ในการส่งสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสง

### 2.4.4 Frequency-Locked Laser:

เลเซอร์สามารถทำงานได้ด้วย autotmiac resonance และด้วยอุณหภูมิและกระแสควบคุม ป้อนกลับสามารถทำให้ได้ linewidth) เล็กๆ ประมาณ 5 MHz linewidth ขนาดเล็กๆ นี้ยินยอมให้แบนด์วิธของช่องสัญญาณถูกกำหนดได้จากสัญญาณแบนด์วิธที่เท่ากันด้วยแหล่งกำเนิด linewidth ในกรณีนี้การดีมัลติเพล็กซ์เซอร์ไม่สามารถทำได้ด้วยตัวกรอง (filter) ที่ไม่สามารถปรับแต่งได้แต่จำเป็นต้องมีการปรับแต่ง filter ได้และแบนด์วิธนี้จะต้องเข้ากันได้กับพาสแบนด์ของ filter ที่มีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิด การที่ความถี่ถูกล็อกเพียงครั้งเดียวจะทำให้เลเซอร์ไม่สามารถปรับแต่งได้โดยง่าย เทคนิคอื่นๆ สามารถที่จะใช้การชดเชยโดยใช้เลเซอร์อันดับสองจากการล็อกเลเซอร์อ้างอิงด้วยการปรับแต่งให้เข้ากัน (หรือเริ่มต้นใหม่)

## 2.5 การไม่เป็นเชิงเส้นของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม (Nonlinear Effects on WDM Links)

ผลการวิเคราะห์ Charplyvy analysis เป็นการวิเคราะห์การไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณเดี่ยวและหลายสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสง [4, 5] โดยสรุปได้ว่า

1. สำหรับการเชื่อมโยงสัญญาณหลายๆ สัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงพบว่าจะมีผลกระทบเล็กน้อยกับ Stimulated Raman Scattering
2. ผลของ carrier- induce phase noise ตัวอย่าง การเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณหนึ่งสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานในตัวมันเองหรือเนื่องจาก

คลื่นแสงอื่นๆ ใน link จะเป็นการแสดงปัญหาที่เกิดขึ้นกับการมอดูเลตสัญญาณแบบเฟสมอดูเลต ในดับเบิลยูดีเอ็ม ลิงค์ (link) การเชื่อมโยงแบบบรอดแบนด์มัลติเพล็กซ์ซิ่ง (broadband multiplexing) จะต้องการระดับกำลังงานต่ำกว่า 20 mW. เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบนี้การเชื่อมโยงแบบการเลือกความยาวคลื่น(selective-wavelength)จะต้องรักษาระดับพลังงานให้ต่ำกว่าระดับมิลลิวัตต์เพื่อที่จะสามารถทำงานได้มากกว่า 10 ช่องสัญญาณ

3. ผลของ Brillouin scattering ขึ้นอยู่กับเพียงระดับพลังงานและความเป็นอิสระของจำนวนช่องสัญญาณในลิงค์ ขอบเขตของกำลังงานสูงสุดในลิงค์ไม่ควรเกิน 10 mW(โดยทั่วไปในระบบบรอดแบนด์ระดับพลังงานแต่ละส่วนจะถูกลดลงด้วยของค์ประกอบของ  $1 / N$  ของค่าสูงสุดด้วยการไม่เป็นเชิงเส้น (เมื่อ  $N$  คือจำนวนของช่องสัญญาณในลิงค์)การเชื่อมโยงแบบการเลือกความยาวคลื่น wavelergth-Selective link ยินยอมให้แต่ละแหล่งกำเนิดมีขอบเขตของกำลังงานขึ้นอยู่กับความไม่เป็นเชิงเส้น)

4. Four-photon mixing เมื่อคลื่นแสง 2 คลื่นผสมกันแบบไม่เป็นเชิงเส้นเดินทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสงและผลิตความถี่ที่มีองค์ประกอบที่  $2V_1 - V_2$  และ  $2V_2 - V_1$  Side Band เหล่านี้จะเกิดขึ้นต่อไปอีกแบบไม่เป็นเชิงเส้น และมีปฏิกริยาร่วมกันโดยมันจะผลิตความถี่ขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสงอีก 9 ความถี่ที่  $V_{ijk} = V_i + V_j - V_k$  เมื่อ  $i, j, k = 1, 2, 3$  การเกิดขึ้นของสัญญาณใหม่เหล่านี้และการลดลงของสัญญาณเดิมจะทำให้การทำงานของลิงค์ลดประสิทธิภาพลง ผลกระทบที่เกิดจากกรณีเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ การแยกช่องสัญญาณและการเกิดการแพร่กระจาย (dispersion) ในเส้นใยแก้วนำแสงผลกระทบต่ำสุด chrplyvy[7] ได้คำนวณได้ว่าระยะห่างช่องสัญญาณที่มีความกว้างมากกว่า 50 GHz และอยู่ในขอบเขตของ zero-Dispersion ควรจะหลีกเลี่ยง(ผลที่เกิดขึ้นจะไปลดอัตราการส่งข้อมูล/ระยะทางในลิงค์) แหล่งกำเนิดกำลังงานที่มีกำลังงานน้อยกว่ามิลลิวัตต์แนะนำว่ามีการดำเนินงานเหมือนการวิเคราะห์ผลของการไม่เป็นเชิงเส้นบน Coherent frequency-division Multiplex link เมื่อช่องสัญญาณที่ต้องการอยู่ใกล้กันมากกับช่องสัญญาณอื่นๆ

## 2.6 ดับเบิลยูดีเอ็มและออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ (WDM and Optical amplifier)

ออปติคัลแอมพลิฟายเออร์มีความสามารถขยายความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นพร้อมกันหลายความยาวคลื่น ดังนั้นการรวมความยาวคลื่นหลายความยาวคลื่นเข้าสู่ดับเบิลยูดีเอ็มลิงค์คือการส่งสัญญาณที่มีหลายช่องสัญญาณเข้าสู่ระยะทางไกลๆ หรือการส่งสัญญาณหลายช่องสัญญาณในโครงข่ายแบบวงแหวน (ring) ขนาดใหญ่ซึ่งมีข้อได้เปรียบคือมันอาจเป็นไปได้ที่ไม่มีผลกระทบใดๆ ใดๆ ใ่ก็ตามจะมีปัญหาที่พบอยู่ 2 ปัญหาคือ

1. สเปคตรัมการขยายสัญญาณที่ไม่เป็นรูปแบบของแอมพลิฟายเออร์สามารถที่จะมีผลทำให้โอเอสเอ็นอาร์แปรผันได้ที่ปลายทางของลิงค์ที่เป็นแอมพลิฟายแบบขั้นบันได (cascaded amplifier)[6] ผลของการที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้เน้นให้เห็นความสำคัญที่เกิดขึ้นเพราะว่าการขยายสัญญาณที่มีกำลัง

การขยายมากจะดึงการกำลังงานการขยายสัญญาณของช่องสัญญาณที่มีการขยายน้อยผ่านขบวนการของการขยายแบบอิมพัลส์ ดังแสดงในแบบจำลองระดับของการที่เกิดการไม่เข้ากัน[6] ของช่องสัญญาณ แสดงด้วยค่าวิกฤติของพารามิเตอร์เป็นเครื่องชี้ค่าการสูญเสียระหว่างการขยายสัญญาณ (สมมุติว่าความยาวคลื่นเป็นอิสระต่อกัน)และค่าการสูญเสียที่เหมาะสมที่สุดคือ 25dB ซึ่งกำหนดให้ใช้ในการแสดงค่าพารามิเตอร์ของลิงค์

2. ไม่สามารถเพิ่มตัวกรองสเปกตรัมแคบ (narrow spectral filter) หลังจากการขยายแต่ละส่วนได้ขจัดการเกิด ASE (Amplified spontaneous emission) บางตัวออกไป ผลของ ASE จะมีมากถ้าเกิดขึ้นในระบบช่องสัญญาณเดี่ยว (Single channel) มันจะทำให้การขยายเกิดการอิมพัลส์และลดโอเอสเอ็นอาร์

ภายใต้บางสภาวะแวดล้อมเส้นใยแก้วนำแสงที่มีระยะทางยาวมีค่าการแพร่กระจายของแสงต่ำ และมีกำลังงานปานกลาง (ต.ย.1 mW ต่อช่องสัญญาณ) อาจจะทำให้เกิด four-wavelength mixing ขึ้นและกำเนิดสัญญาณใหม่ที่มีขดคลื่นใกล้เคียงกับขดคลื่นของช่องสัญญาณ ในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีการแพร่กระจายของแสงต่ำอย่างเช่น dispersion-shifted fiber นั้นจะทำงานในลิงค์ร่วมกับออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ ดังนั้นการเกิดขึ้นของ four-wavelength mixing จะเป็นกลไกในการกำหนดขอบเขตของลิงค์ การผสมสัญญาณเหล่านี้อาจจะสอดแทรกไปในสัญญาณที่ได้รับและทำให้การตรวจจับสัญญาณเป็นไปได้ยาก การผสมสัญญาณแบบพิเศษนี้ถ้ามีการทำงานที่ความยาวคลื่นที่มีค่าแพร่กระจายของแสงเป็นศูนย์การแก้ปัญหาบางอย่างที่เป็นไปได้คือ ใช้เทคนิคการแยกช่องสัญญาณที่มีค่าไม่เท่ากันและใช้การจัดการแพร่กระจายของแสง (Dispersion management) ในการบริหารสัญญาณ

ระยะห่างที่ไม่เท่ากันของช่องสัญญาณ โดยทั่วไปช่องสัญญาณ N ช่องสัญญาณจะผสมกันเกิดขึ้นเป็นการผสมของ M จากสมการ

$$M = N^2(N - 1) / 2 \quad (2.6)$$

เนื่องจากธรรมชาติการเกาะกลุ่มของการผสมของสัญญาณกับสัญญาณเข้าด้วยกันแม้ว่าจะเป็นการผสมเพียงเล็กน้อยก็สามารถเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้สัญญาณที่ด้านรับเสียหายได้ถ้าความถี่ในการผสมสัญญาณต่ำกว่าความถี่สูงสุดของสัญญาณ (ต.ย.การผสมสัญญาณด้วยกำลังงานของสัญญาณ 1% สามารถมีการผันแปรของที่ภาครับได้  $\pm 1$  dB) เราสามารถหลีกเลี่ยงผลที่เกิดขึ้นนี้ได้ด้วยการใช้ระยะห่าง (spacing) ของช่องสัญญาณที่ไม่เท่ากันด้วยการแบ่งระยะห่างของความถี่ให้มากกว่าอัตราของการส่งข้อมูล (bit rate) เพื่อหลีกเลี่ยงการสอดแทรกกันของสัญญาณ (ระยะห่างของความยาวคลื่นที่มีระยะเท่าๆ กันก็คือระยะห่างของความถี่ที่ไม่เท่ากันแต่มันก็ไม่เพียงพอต่อการแยกผลกระทบออกไปได้) คุณสมบัติของความถี่จะยินยอมให้ระดับกำลังงานของอินพุตเพิ่มขึ้นได้ การเพิ่มขึ้น

ของกำลังงานนี้สามารถใช้สำหรับการส่งสัญญาณที่อัตราบิตสูงๆ และเพิ่มระยะทางในการส่งสัญญาณหรือรวมลิงก์ที่ต้องการเข้าด้วยกัน การจัดสรรแผนงานในการแก้ปัญหาที่มีหลายวิธีการและการแลกเปลี่ยนการดำเนินงานในลิงค์บางลิงค์สามารถทำได้ (การเกิดของขบวนการผสมกันจะยังคงทำให้กำลังของสัญญาณหมดไปและลดค่าไอเอสเอ็นอาร์ที่ด้านรับ) เทคนิคนี้ควรจะตรวจสอบการใช้สำหรับการยกระดับการใช้ประโยชน์ dispersion-shifted ของลิงค์และออปติคัลแอมพลิฟายเออร์จากช่องสัญญาณหนึ่งช่องสัญญาณที่ใช้จากการส่งสัญญาณหลายช่องสัญญาณ

## 2.7 โครงข่ายแบบหลายจุด, หลายความยาวคลื่น ( Multipoint, Multiwavelength Networks)

ในบทนี้จะอธิบายตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ Broadband และ wavelength-Selective

### 2.7.1 การส่งสัญญาณระบบบรอดแบนด์(Broadband Transmission System)

ในโครงข่ายแบบ broadcast และ Select network(ทั้งหมดรวมเรียกว่า broadband network) แสดงในรูป 2.6b ทุกสัญญาณที่ถูกส่งออกไปจะมีความถี่ที่แน่นอนและส่งกระจายออกไปเหมือนกัน ไปยังด้านรับทั้งหมดที่ด้านรับจะเลือกสัญญาณที่ต้องการจากด้านส่ง ถ้า  $N$  คือจำนวนของสถานีในเส้นทาง ดังนั้น power จะถูกแบ่งออกเป็น  $1 / 2^N$  และค่าสูญเสียในการถูกแยกออกทั้งหมดคือ  $10 \log 2^N$  dB โครงข่ายสามารถมีโครงสร้างในแต่ละส่วนที่เป็นแบบ tree หรือแบบ star ได้ (รูป 2.10)

### 2.7.2 โครงข่ายสื่อสัญญาณแบบ Wavelength-Routed( Wavelength-Routed Transmission network)

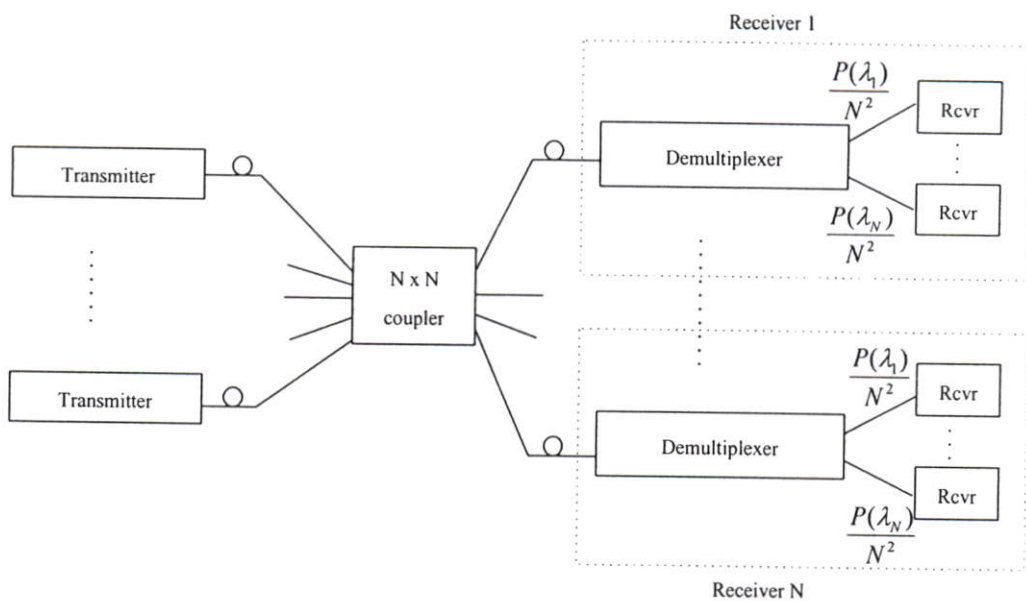
ระบบนี้จะรวมระบบดับเบิลยูดีเอ็มในหลากหลายเส้นทาง กำลังงานในการส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่นใดๆ โดยเฉพาะคือ เส้นทางเฉพาะในการรับสัญญาณผ่านโครงข่ายโดยใช้อุปกรณ์ในการเลือกความยาวคลื่น ความยาวคลื่นหนึ่งจะถูกค่าครอป (drop) ในภาครับที่ต้องการรับสัญญาณนั้น ความยาวคลื่นที่ถูกครอป (drop) ไปสามารถถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกโดยการเพิ่มสัญญาณอื่นผสมเข้าไปแทนเพื่อเป็นการรักษาจำนวนของความยาวคลื่นที่ต้องการใช้ให้คงเดิม บางโครงข่ายมีการใช้อุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนความยาวคลื่นของสัญญาณภายในเส้นทางของโครงข่าย ซึ่งการใช้วิธีนี้มีผลทำให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายเพิ่มขึ้นทำให้ใช้ประโยชน์จากความยาวคลื่นและการใช้กำลังงานในเส้นใยแก้วนำแสงได้มากและมีประสิทธิภาพ แต่มีค่าใช้จ่ายลดลงและโครงข่ายมีความยืดหยุ่น โครงข่ายเหล่านี้ครอบคลุมถึงโครงข่ายแบบดาว (star network), โครงข่ายแบบลูกโซ่ (chain network) และโครงข่ายแบบวงแหวน (ring network)

### 2.7.2.1 โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบดาว (WDM star network)

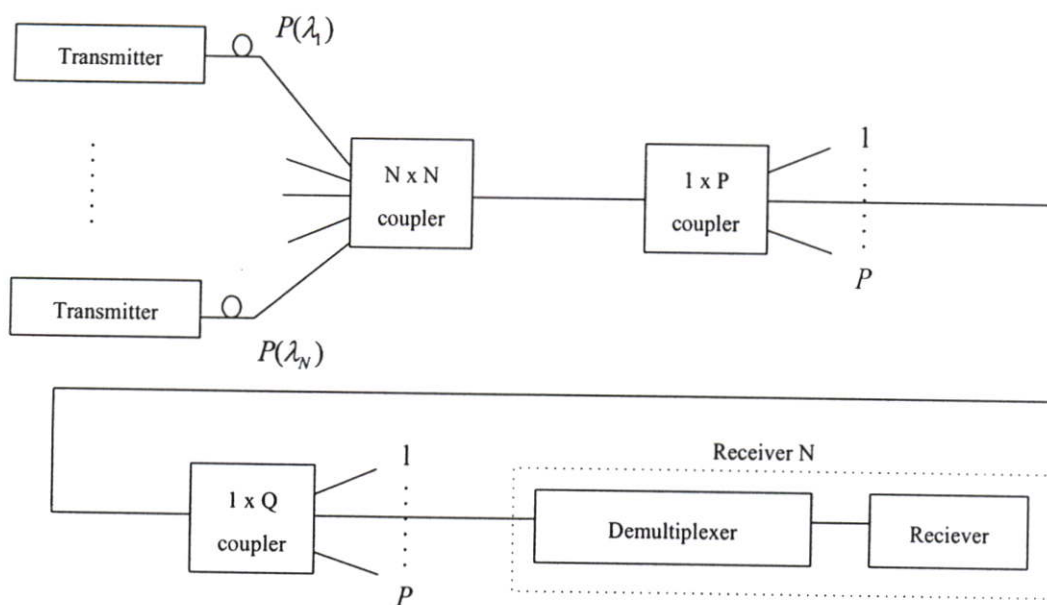
โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบดาวเป็นหนึ่งในรูปแบบของ wavelength-selective WDM (รูป 2.11) ที่ภาครับจะมีการกำหนดความยาวคลื่นและมีแหล่งกำเนิดที่สามารถปรับค่าได้ (การกำหนดโครงสร้างที่มีแหล่งกำเนิดความยาวคลื่นที่กำหนดได้ และภาครับที่ปรับแต่งได้มีความเป็นไปได้) ทุกๆ แหล่งกำเนิดสามารถติดต่อกับทุกๆ ภาครับด้วยการปรับแต่งภาครับให้มีความยาวคลื่นที่ตรงกัน แหล่งกำเนิด การรับสัญญาณที่เป็นไปได้มี 2 แบบคือ การตรวจจับโดยตรงที่ภาครับโดยใช้ optical filter ในการเลือกความยาวคลื่นที่ถูกต้องและการรับสัญญาณที่รวมกลุ่มกันแบบ FDM นั้นจะใช้การตรวจจับแบบ heterodyne ตรวจจับและปรับแต่งความถี่ที่ถูกต้องของภาครับ  $N \times N$  coupler ที่เชื่อมโยงกันด้วยอุปกรณ์แบบแบนด์กว้าง (wideband device) ที่รวมแหล่งกำเนิดกำลังงานและแยกมันออกมาเท่าๆ กันจำนวนภาครับ

### 2.7.2.2 โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบลูกโซ่ (WDM chain Network)

ในระบบ wavelength-Selective WDM chain network (รูป 2.12) แต่ละ node มีอุปกรณ์เลือกและแยกความยาวคลื่น (wavelength-selective splitter) ที่ใช้ในการแยกความยาวคลื่นในกรณี เพิ่ม/ดึง (add/drop) จะต้องแน่ใจว่าความยาวคลื่นมีเส้นทางไปยังภาครับ (ต.ย. drop จากโครงข่ายไปยังภาครับทั้งหมดในโครงข่าย) สัญญาณใหม่จะเพิ่มเข้าสู่โครงข่ายที่ความยาวคลื่นเหล่านี้ถูกดึงลง นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความยาวคลื่นในโครงข่ายได้อีกด้วย (จัดเตรียมไว้เพื่อเชื่อมโยงเอาท์พุทและอินพุทในโครงข่ายเข้าด้วยกัน) ข้อมูลสามารถเพิ่มและดึงลงที่แต่ละช่องสัญญาณความยาวคลื่นเนื่องจากโครงข่ายมีการติดต่อสื่อสารถึงกันในรูป 2.12 จะเห็นว่าโหนด 1 และ 5 จะมีความสามารถในการส่งและรับอย่างเต็มกำลัง

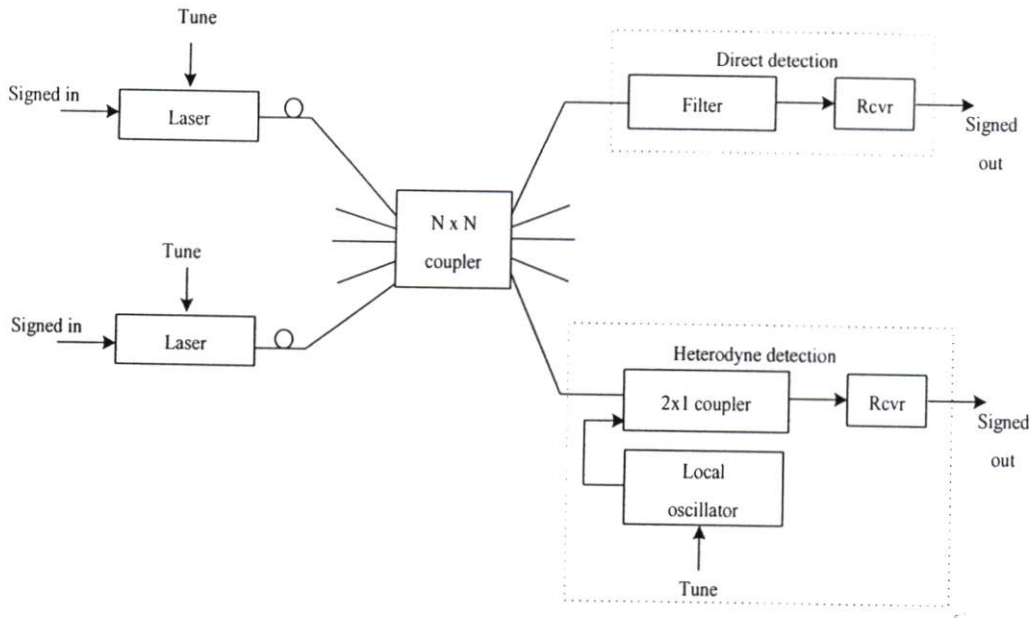


(ก)

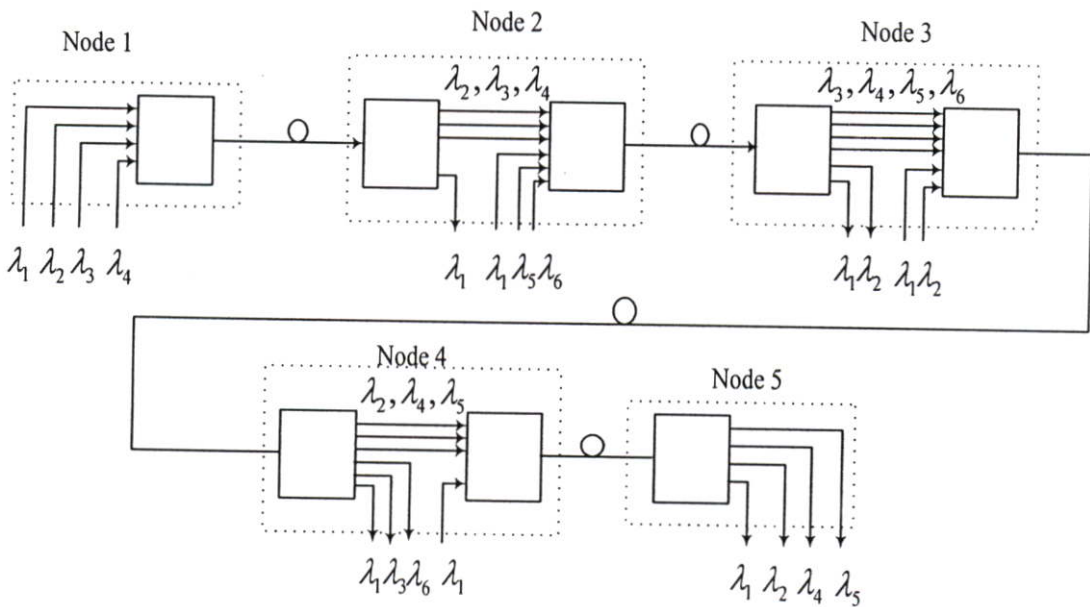


(ข)

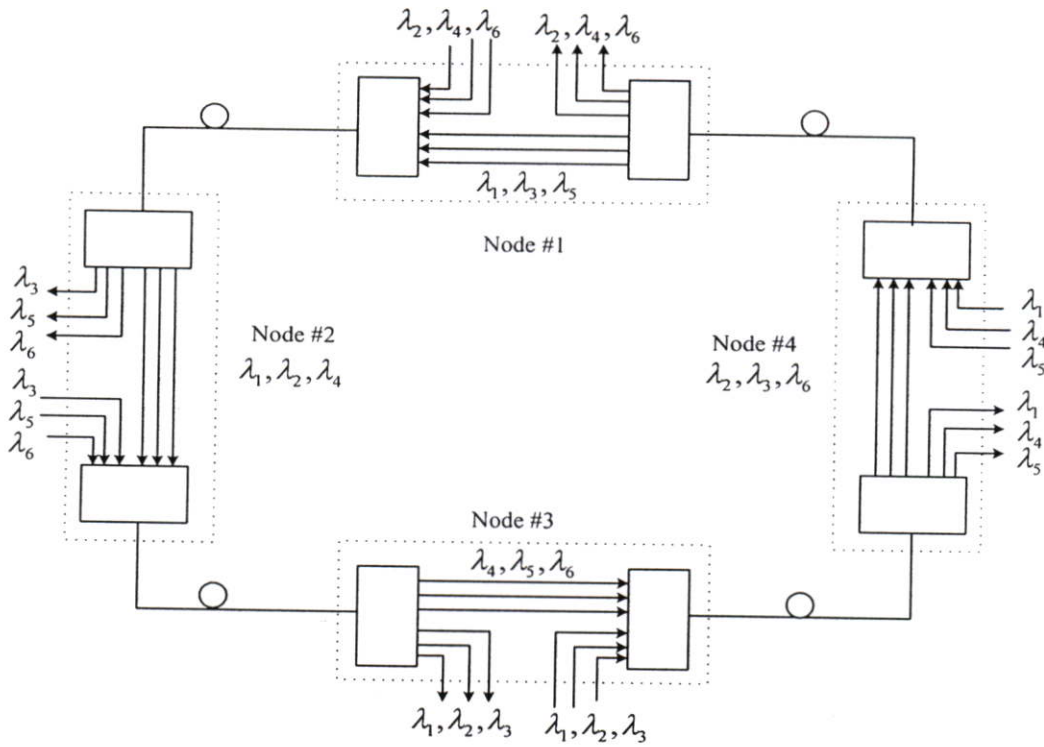
รูปที่ 2.10 (ก) broadcast-and-select, broadband-transmission, star network (ข) การส่งสัญญาณ Broadband แบบ tree network



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบดาว (star network) ที่ภาครับสามารถตรวจจับการรับสัญญาณได้โดยตรงด้วย spectral filter หรือ การตรวจจับแบบ heterodyne detection FDM receivers



รูปที่ 2.12 โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบลูกโซ่ (chain network) ความยาวคลื่นถูกกำหนดเส้นทางของสัญญาณ add/drop ไว้ที่ทุกๆ โหนด ที่โหนด 1 และ โหนด 5 จะมีการส่งสัญญาณที่เต็มความจุและมี ความสามารถที่จะทำงานได้ในการส่งสัญญาณ ในทิศทางเดียว



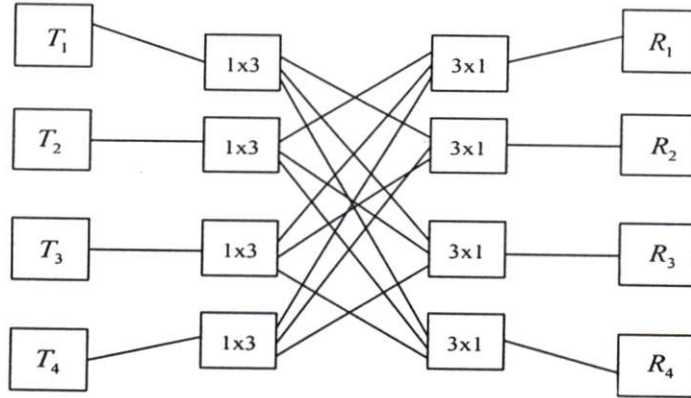
รูปที่ 2.13 เส้นทางของความยาวคลื่นที่ทำงานแบบ add/ drop ของดับเบิลยูดีเอ็มในโครงข่ายแบบวงแหวน (ring network)

2.7.2.3 โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน (WDM Ring Network)

ในระบบ wavelength-selective WDM Ring Network (รูป 2.13) มีโครงสร้างคล้ายกับโครงข่ายแบบลูกโซ่แต่ที่ปลายโครงข่ายจะรวมเข้าด้วยกันจากตัวอย่างจะเห็นว่าจำนวนความยาวคลื่นที่เพิ่มเข้าที่โหนดจะมีจำนวนเท่ากับความยาวคลื่นที่ได้รับซึ่งความยาวคลื่นเหล่านี้จะถูกเชื่อมโยงและแยกออกจากกันเหมือนกัน

ความคิดพื้นฐานของโครงสร้างเหล่านี้คือการกำหนดอุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็มที่เหมือนกันทุกอย่างจัดเตรียมเส้นทางที่แน่นอนระหว่างภาคส่งและภาครับ ความยาวคลื่นที่ถูกใช้แล้วสามารถนำมาใช้ใหม่ในส่วนอื่นของโครงข่าย ด้วยเหตุนี้วิธีการลดจำนวนของความยาวคลื่นที่ต้องการของโครงข่ายสามารถแสดงได้จากการกำหนด N node ซึ่งจะต้องการ optical channel เพียง N(N-1) มากไปกว่านั้นเราอาจคาดหวังได้ว่าความสามารถเชื่อมต่อ (interconnection) ของทุกโหนดเข้าด้วยกันกำหนดได้จาก  $N^2$  (ต.ย. โหนดทุกๆ โหนดสามารถติดต่อกันได้) รูป 2.14 แสดงโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบดาวที่สามารถเชื่อมต่อ (Interconnection) โหนด 4 โหนดด้วยดับเบิลยูดีเอ็มที่เหมือนกันทุกอย่าง 8 แบบวิธีที่แต่ต้องการความยาวคลื่นในการเชื่อมต่อเพียง 3 การระบุความยาวคลื่นในตารางที่ 2.3 (ต.ย. ในรูปสมมุติว่า Tx 1 ไม่ต้องเชื่อมโยงกับ Rx 1) แสดงจำนวนความยาวคลื่นต่ำที่สุดที่ต้องการในการเชื่อมต่อระหว่างโหนดด้วยอุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็มรูป 2.15 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของตาราง 2.3

เมื่ออุปกรณ์มัลติเพล็กซ์เป็นแบบขั้นบันได (cascade) ควรระลึกไว้เสมอว่าแบนด์วิดท์ของการรวมกันจะลดลงจากแบนด์วิดท์ของสัญญาณเดิมตัวอย่าง ถ้าแบนด์วิดท์เดิมมีรูปร่างของ Gaussian และมีระดับแบนด์วิดท์คือ BW ดังนั้นการเชื่อมโยงแบบแบนด์วิดท์จำนวน N แบนด์วิดท์ จะต้องการรูปร่างของ Gaussian ด้วยระดับของแบนด์วิดท์  $BW/N$  เนื่องจากจะต้องให้ความสำคัญกับการลดลงของแบนด์วิดท์ในการรวมกันของความยาวคลื่นและการรักษาความยาวคลื่นจากแหล่งกำเนิดให้คงเดิมเหมือนกับแหล่งกำเนิดของตัวเอง



(ก)

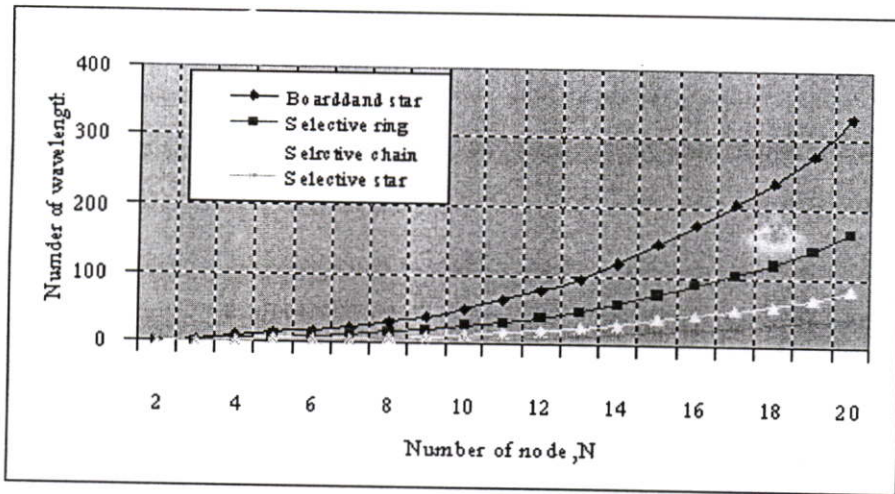
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
$T_1$	—	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
$T_2$	$\lambda_3$	—	$\lambda_1$	$\lambda_2$
$T_3$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	—	$\lambda_1$
$T_4$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	—

(ข)

รูปที่ 2.14 (ก) ดับเบิลยูดีเอ็ม แบบ star network ที่มีโทนด 4 โทนดและ 3 ความยาวคลื่น  
(ข) ตารางกำหนดความยาวคลื่น

ตารางที่ 2.3 จำนวนต่ำสุดของความยาวคลื่นที่ต้องการในการเชื่อมโยงกับช่องสัญญาณ N ช่องสัญญาณในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็ม

Method	Minimum number of wavelengths	
Star	$N - 1$	
Chain	$\left(\frac{N}{2}\right)^2$	(if N is even)
	$\frac{(N-1)(N+1)}{4}$	(if N is odd)
Ring	$\frac{N(N-1)}{2}$	



รูปที่ 2.15 จำนวนความยาวคลื่นต่ำสุดที่ต้องการในการเชื่อมโยง N โหนดของโครงข่าย

### 2.7.3 Switched Networks

การ switching ในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มสามารถทำได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงแหล่งกำเนิดหรือใช้ภาครับที่มีความยาวคลื่นในการรับ-ส่งที่แตกต่างกันและมีเส้นทางที่แตกต่างกันในโครงข่าย

รูป 2.16 แสดง Optical switch ทั้งหมดในโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงโดยที่ hub ทั้งหมดทำงานแบบพาสซีฟ (passive) ที่มีส่วนประกอบเพียง  $1 \times N$  couplers และ  $N \times 1$  couplers อย่างใดอย่างหนึ่ง ภาครับแต่ละส่วนของโหนดตั้งอยู่กับภาครับของโหนดดังแสดงในรูป 2.16 การ switching ทำได้โดยการเลือกความยาวคลื่นของเครื่องส่งที่เหมาะสมกับเครื่องรับ และจากนั้นจะกำหนดเส้นทางจราจรของข้อมูล (traffic) ที่เครื่องรับของโหนด ตัวอย่าง traffic ที่โหนด 1 จะถูกส่งไปที่โหนด 2 โดยเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น  $\lambda_{12}$  ที่โหนด 1 ดับเบิลยูดีเอ็มคัปเปิ้ล จะรวมความยาวคลื่นนี้กับความยาวคลื่นอื่นทั้งหมด (ตัวอย่าง Traffic ทั้งหมดสำหรับโหนดอื่นๆ) และส่งไปที่ hub

1 x N coupler จะรับความยาวคลื่นที่ถูกแบ่งและส่งทราฟฟิคที่ความยาวคลื่น  $\lambda_{12}$  ไปยัง N x 1 coupler ซึ่งจะรวมกำลังงานของความยาวคลื่นทั้งหมดและส่งไปที่โหนด 2 ที่โหนด 2 ช่องสัญญาณจะถูกแยกออกด้วย N x 1 coupler ข้อมูลจะถูกตีมีัลติเพล็กซ์แบบ TDM และกำหนดเส้นทางที่ต้องการส่งไปยัง switch ที่โหนด 2

จากขั้นตอนเหล่านี้ โหนดจะมีหลายแหล่งกำเนิดและหลายเครื่องรับ จำนวนของแหล่งกำเนิดและเครื่องรับเหล่านี้สามารถลดลงได้หนึ่งแหล่งกำเนิด และหนึ่งเครื่องรับถ้าเราสามารถปรับแต่งแหล่งกำเนิดและ filter ที่เครื่องรับและจำกัดการรับ-ส่งข้อมูลเพียงหนึ่งข้อมูลที่เวลาเดียวกัน

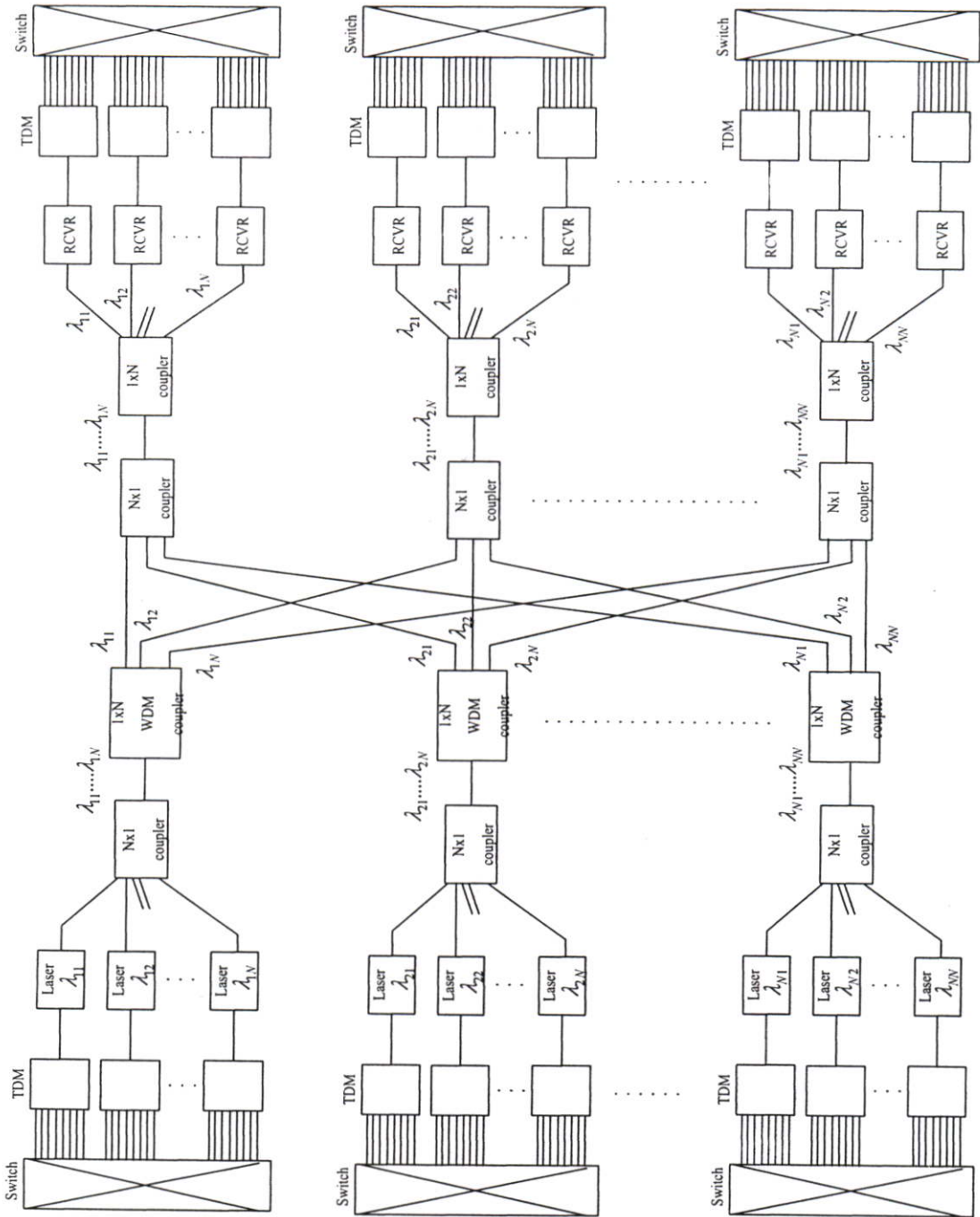
มีหลายวิธีการที่ใช้ในการปรับแต่งแหล่งกำเนิดหรือเครื่องรับใน switched network

### 2.7.3.1 Source Tuning

1. Temperature/current tuning แหล่งกำเนิดความยาวคลื่นสามารถเปลี่ยนแปลงได้พอประมาณด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแหล่งกำเนิด (ผลของการเปลี่ยนแปลงประมาณ  $0.08 \text{ nm} \cdot \text{C}^{-1}$  สำหรับ distribution-feedback laser สามารถเปลี่ยนแปลงได้ถึง  $1 \text{ nm}$ ) หรือเปลี่ยนแปลงที่กระแสเลเซอร์ (ผลของการเปลี่ยนแปลงประมาณ  $200 \text{ MHz mA}^{-1}$  สำหรับอัตราการ switch ที่มากกว่า  $10 \text{ MHz}$ )

2. DBF and DFR tuning การปรับแต่งขอบเขตของความกว้างสามารถทำได้ด้วยการรวม DFB เลเซอร์กับส่วนของ phase-control และส่วนของ active section หรือโดยการสร้างอุปกรณ์ integrate ที่สามารถควบคุมการรวมกำลังงานของเลเซอร์ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันที่หลายความยาวคลื่น

3. External element tuning มีความเป็นไปได้ที่ใช้ Fabry-perot laser เป็นอุปกรณ์ที่เพิ่มจากภายนอกกับ cavity จากภายนอกที่สามารถควบคุมการเคลื่อนย้ายของ grating ได้ด้วย piezoelectric pusher การปรับแต่งด้วยเทคนิคนี้ทดลองปรับแต่งได้กับความยาวคลื่นมากกว่า  $55 \text{ nm}$ . อย่างไรก็ตามความแม่นยำของอุปกรณ์ในการปรับแต่งแบบนี้ยังคงต้องมีการทดลองต่อไปอีก



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของ switch WDM network

2.7.3.2 Receive tuning

การปรับแต่งที่ภาครับมีเทคโนโลยีพื้นฐานบนการปรับแต่ง filter ที่ใช้แบบหลายๆ ชั้น (multilayer), Fabry-perot interferometers, หรืออุปกรณ์รวมแสง(integrated เส้นใยแก้ว device)

1. Tunable multilayer filter device การปรับแต่งตัวกรองที่มีหลายๆ ชั้น สามารถทำได้ด้วยการส่งสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ช่องว่างของอากาศข้ามพื้นผิวของตัวกรอง (ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความหนา layer) การปรับแต่งด้วยเทคนิคแบบนี้ทำได้ด้วยการเปลี่ยนแปลง filter ซึ่งสามารถครอบคลุมการปรับแต่งได้ 270 nm. ด้วยพาสแบนด์ 7 nm.

2. Fabry-perot interferometer filter เป็นการปรับแต่งที่ใช้การเปลี่ยนแปลงความยาวของโพรง(cavity)ที่ใช้ piezoelectric pusher โดยจากการทดลองด้วยการทำงานที่ 30 ช่องสัญญาณ[7] เวลาในการปรับแต่งสามารถน้อยกว่า microsecond

3. Integrated เส้นใยแก้ว tunable filter การกรองสัญญาณด้วยอุปกรณ์รวมแสง ใช้ TE-to-TM mode ในการ converters (ตัวอย่าง การแปลงไฟฟ้าเป็นแม่เหล็ก) มีการทดลองอยู่ในห้องทดลอง

4. Distribution feedback lasers การทำงานของเลเซอร์ชนิดการป้อนกลับแบบกระจายทำงานที่ค่าเริ่มต้นต่ำกว่า narrow passband ที่ปรากฏอยู่ อุปกรณ์สามารถปรับแต่งได้ด้วยการทำงานภายใน (incorporating) ในส่วนของการควบคุมเฟสโดยมีผลตอบสนองต่อเวลาเร็วมาก (บนระดับการ switching ที่เวลาเป็นไมโครวินาที)และมีขอบเขตของการปรับแต่งจากการทดลอง [7] 71 GHz สำหรับการทำงานที่ 10 ช่องสัญญาณ)

การมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งความยาวคลื่น(WDM)เป็นวิธีที่นำพาสแบนด์ของเส้นใยแก้วนำแสงมาใช้งานได้เต็มที่ด้วยแหล่งกำเนิดหลายแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันดับเบิลยูดีเอ็มเป็นเทคนิคที่มั่นใจได้ว่าจะสามารถส่งข้อมูลจำนวนมากไปบนเส้นใยแก้วนำแสงถึงค์

การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งความยาวคลื่นมีทั้งแบบ wavelength-selective และแบบ Broadband การดีมัลติเพล็กซ์แบบ wavelength-selective โดยทั่วไปจะใช้อุปกรณ์การกระจายของมุมเช่น diffraction grating ในการแยกความยาวคลื่น ตัวกรองหลายชนิดมีการควบคุมพาสแบนด์ของความยาวคลื่นที่ดีกว่าแต่จะมีค่า insertion loss ซึ่งจำกัดจำนวนของตัวกรองที่สามารถต่อกันแบบขั้นบันได(cascaded)

ดับเบิลยูดีเอ็มต้องการแหล่งกำเนิดที่สามารถควบคุมการทำงานของความยาวคลื่น และมีการระบุความยาวคลื่นเฉพาะและมีเสถียรภาพในการรักษาความยาวคลื่นเดิมไว้ได้ในระยะยาว เทคนิคหลายแบบที่ได้อธิบายได้แก่ filter LEDs, Fabry-perot resonator lasers, DFR diode lasers, และ frequency lock diode lasers

เมื่อทำงานด้วยระดับกำลังงานปานกลางในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยค่าการแพร่กระจายของแสงเข้าใกล้ศูนย์ four-wavelength mixing จะกลายเป็นกลไกที่มีบทบาทสำคัญในการดำเนินการในลิงค์ดั่งนั้นลิงค์สามารถทำงานได้ดีที่สุดด้วยความถี่ที่มีช่วงเวลาไม่คงที่ (non-periodic) ระหว่างช่องสัญญาณของความยาวคลื่น(ถึงแม้ว่ากำลังที่ลดลงงานในการผสมกันของช่องสัญญาณจะยังคงเป็นข้อจำกัดของการดำเนินการของลิงค์) เทคนิคอื่นที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่มีความยาวจะมีการแพร่

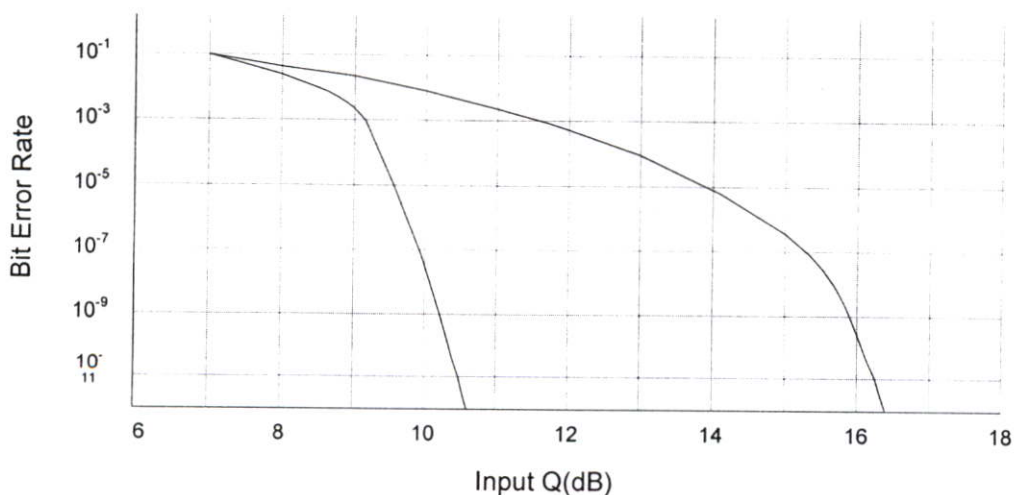
กระจาย (dispersion) ของ alternating sign ซึ่งผลรวมของการรวมกันจะทำให้ค่าการแพร่กระจายมีค่าใกล้เคียงศูนย์แต่การแพร่กระจายที่เกิดขึ้นเฉพาะที่ (local dispersion) มีจำนวนมากเพียงพอที่จะป้องกันการผสมกันของความยาวคลื่นที่ความยาวคลื่นจากผลกระทบที่คงอยู่

## 2.8 โอเอสเอ็นอาร์ในระบบดับเบิลยูดีเอ็ม

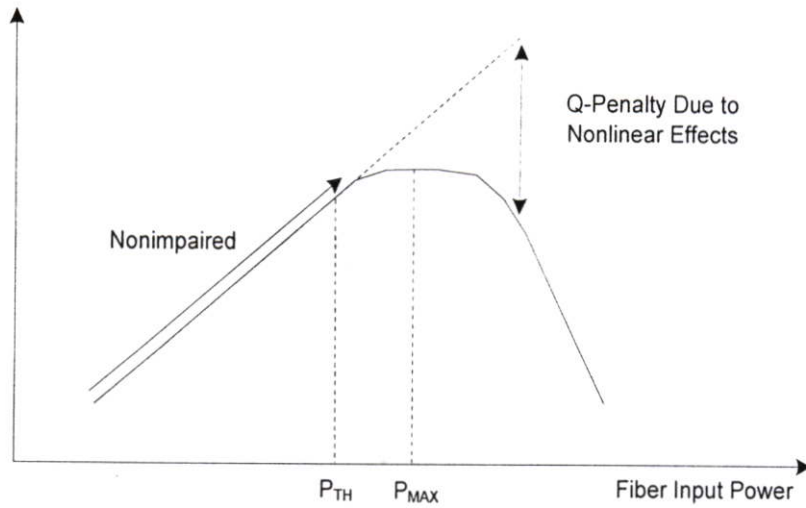
ในระบบดับเบิลยูดีเอ็มการวัดคุณภาพและประสิทธิภาพของสัญญาณในระบบค่าโอเอสเอ็นอาร์จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ชี้ว่าระบบมีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหน เนื่องจากค่าของโอเอสเอ็นอาร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า BER (Bit Error Rate) และ Q-Factor ซึ่งเป็นตัวชี้ในเชิงคุณภาพของระบบแต่ค่าโอเอสเอ็นอาร์สามารถทำการวัดและทดสอบได้ง่ายกว่า ดังนั้นในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ การวัดและประมาณการค่าโอเอสเอ็นอาร์เพื่อการออกแบบหรือบำรุงรักษาระบบจึงทำได้สะดวกกว่าการหาค่า Q-Factor หรือ BER ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสามแบบนี้และสมการในการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์[8]

### 2.8.1 การออกแบบ Point-to-Point Link โดยใช้ค่า Q-Factor และ โอเอสเอ็นอาร์

ในการออกแบบโครงข่ายนั้นเป็นเรื่องหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องให้การออกแบบระบบเป็นไปตามข้อกำหนด BER ของโครงข่าย การคำนวณ BER เป็นงานที่น่าสนใจถ้าหากว่าผู้ออกแบบมีเครื่องมือเช่นตารางการคำนวณและเครื่องคิดเลข โดยที่ Q-factor นั้น เป็นการอธิบายเชิงคุณภาพของสมรรถนะของเครื่องรับเนื่องจากมันเป็นฟังก์ชันของ SNR(optical), Q-factor จะเป็นตัวบอกถึง SNR ต่ำสุดที่ต้องการเพื่อให้ได้ค่า BER เฉพาะค่าหนึ่งสำหรับสัญญาณที่กำหนดให้ รูป 2.17 แสดงความสัมพันธ์ของ Q-factor กับ BER จะเห็นว่ายิ่งค่าของ Q-factor สูงค่า BER ก็จะมียิ่งดี[10]



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของ Q-Factor กับ BER



รูปที่ 2.18 Q-Factor Penalty

สมการ 2.7 ใช้หาค่า Q-factor ของสัญญาณแสง

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.7)$$

ในสมการ 2.7,  $I_1$  คือค่าของกระแสบิต 1,  $I_0$  คือ ค่าของกระแสบิต 0,  $\sigma_1$  คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระแสบิต 1 และ  $\sigma_0$  คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระแสบิต 0 ความสัมพันธ์ของ Q-factor กับ BER นั้นแสดงในสมการ 2.8

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.8)$$

ทำไม BER ถึงยากที่จะประมาณการหรือคำนวณ: สำหรับการออกแบบที่ BER ค่าหนึ่ง (เช่น  $10^{-12}$  และความเร็วระดับ OC-3 หรือ 155 Mbps) โครงข่ายจะมีความผิดพลาดอย่างหนึ่งในเวลาโดยประมาณคือสิบวัน อาจจะต้องใช้เวลา 1000 วันเพื่อบันทึกค่าสถานะคงที่ (steady state BER) นั่นคือคำอธิบายว่าทำไมการคำนวณ BER จึงค่อนข้างยาก แต่อีกนัยหนึ่งนั้นการวิเคราะห์ Q-factor นั้นง่ายเมื่อเทียบกับอย่างอื่น Q-Factor นั้นมักจะวัดในหน่วย dB คำถามถัดไปคือว่าจะคำนวณ Q ได้อย่างไร ซึ่งคำตอบคือสามารถหาได้จากโอเอสเอ็นอาร์

### 2.8.2 การคำนวณ Q-factor จาก โอเอสเอ็นอาร์

โอเอสเอ็นอาร์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงที่กำหนดให้เป็น ปริมาณที่วัดได้ (ในทางปฏิบัติ) สำหรับโครงข่ายที่กำหนดให้ และสามารถคำนวณได้จากพารามิเตอร์ ของระบบที่กำหนดให้ หัวข้อต่อไปนี้จะแสดงวิธีคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์และอธิบายถึงความสัมพันธ์ ของโอเอสเอ็นอาร์กับ Q-factor

ค่าอัลทอลอริทึมของ Q (หน่วย dB) นั้นมีความสัมพันธ์กับ โอเอสเอ็นอาร์ตามสมการ 2.9

$$Q_{dB} = 20 \log \sqrt{OSNR} \sqrt{\frac{B_0}{B_c}} \quad (2.9)$$

ในสมการ  $B_0$  คือ Optical bandwidth ของอุปกรณ์ปลายทาง (photodetector) และ  $B_c$  คือ Electrical bandwidth ของ Receiver filter

ดังนั้น Q(dB) จะแสดงได้ดังในสมการ 2.10

$$Q_{dB} = OSNR + 10 \log \frac{B_0}{B_c} \quad (2.10)$$

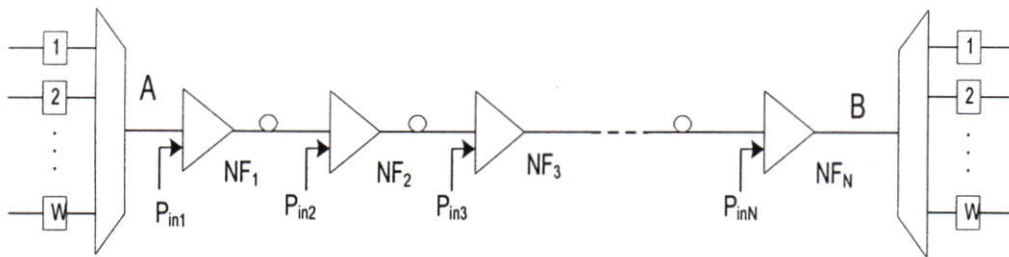
อาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า Q ค่อนข้างจะเป็นสัดส่วนกับ โอเอสเอ็นอาร์โดยทั่วไปแล้ว การคำนวณสัญญาณรบกวน (noise) จะใช้เครื่อง Optical spectrum analyzer(OSAs)หรือ Sampling oscilloscope และการวัดเหล่านี้จะถูกกระทำในช่วงการวัดเฉพาะของ  $B_m$  โดยแท้จริงแล้ว  $B_m$  มีค่า ประมาณ 0.1 nm หรือ 12.5 GHz สำหรับ OSA ที่กำหนด จากสมการ 2.10 แสดงให้เห็น Q มีหน่วย เป็น dB ในเทอมของ โอเอสเอ็นอาร์จะเห็นว่าถ้า  $B_0 < B_c$  แล้ว  $OSNR(dB) > Q(dB)$  สำหรับการ ออกแบบในทางปฏิบัตินั้น โอเอสเอ็นอาร์(dB)  $> Q(dB)$  อย่างน้อยที่สุด 1-2 dB ในขณะที่การออกแบบ ระบบที่มีบิตเรตสูงในทางปฏิบัตินั้นค่า margin ของเครื่องรับจะมีค่าประมาณ 2 dB เพื่อให้ Q มีค่า น้อยกว่าโอเอสเอ็นอาร์(dB) ประมาณ 2 dB

### 2.8.3 การคำนวณโอเอสเอ็นอาร์สำหรับ Point-to-Point Link

พิจารณา physical link AB ดังแสดงในรูป 2.19 สมมติว่ามันเป็น คับเบิลใยดีเอ็มลิงค์ที่ใช้ใน ระยะทางไกล แอมพลิฟายเออร์ถูกวางเป็นระยะๆ โดยมีระยะห่างเท่าๆ กันเพื่อขยายกำลังของสัญญาณ ดังนั้นจะทำให้สัญญาณสามารถไปได้ไกลกว่าค่าการสูญเสียสะสมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของเส้นใยแก้ว นำแสง อย่างไรก็ตามในการจะทำเช่นที่ว่าแอมพลิฟายเออร์แต่ละชั้นจะต้องเพิ่มองค์ประกอบของ Amplified Spontaneous Emission(ASE) สัญญาณรบกวน (noise) และทำให้การลดทอนโอเอสเอ็นอาร์ มากขึ้นไปอีก ยิ่งไปกว่านั้นแอมพลิฟายเออร์ทุกตัวขยายสัญญาณรบกวนที่ปรากฏอยู่แล้วด้วย ให้

สังเกตว่าสัญญาณรบกวนนี้แทรกแซงอยู่ทั่วไปตลอดทั้งสเปกตรัมและแทบจะเป็นไปไม่ได้ที่จะเอาออกไป ดังนั้นจึงเป็นเรื่องหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะคิดหาวิธีที่จะคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ (output) ที่จุดปลายของระบบที่มีการขยายสัญญาณ  $N$  ชั้นและหาว่ามีค่า  $N$  ที่สมเหตุสมผลหรือไม่

ในการออกแบบโดยใช้โอเอสเอ็นอาร์นั้นเราต้องให้แน่ใจว่าโอเอสเอ็นอาร์ของชั้นสุดท้ายนั้นตรงกันกับข้อกำหนดโอเอสเอ็นอาร์ของระบบและทำให้เป็นไปตามข้อกำหนด BER ด้วย ในการทำให้ระบบได้ BER ค่าที่ต้องการจึงเป็นเรื่องจำเป็นที่จะต้องออกแบบระบบโอเอสเอ็นอาร์ให้ตรงตามข้อกำหนด



รูปที่ 2.19 ระบบ DWDM ที่มีการขยายแบบหลายชั้นที่นำมาใช้ใน Point-to-Point topology

โอเอสเอ็นอาร์ ของแต่ละชั้นแสดงในสมการ 2.11

$$OSNR = \frac{P_{in}}{NF_{stage} h \nu \Delta f} \quad (2.11)$$

ในสมการ 2.11,  $NF_{stage}$  คือ Noise figure ของชั้นนั้นๆ  $h$  คือ ค่าคงที่ของ Plank ( $6.6260 \times 10^{-34}$ ),  $\nu$  คือความถี่แสง 193 THz, และ  $\Delta f$  คือแบนด์วิดท์ที่วัด NF (โดยปกติแล้วมีค่า 0.1 nm)

โอเอสเอ็นอาร์ ทั้งหมดของระบบสามารถพิจารณาได้จากวิธีส่วนกลับและแสดงในสมการ 2.12

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \frac{1}{OSNR_3} + \dots + \frac{1}{OSNR_N} \quad (2.12)$$

สำหรับระบบที่มี  $N$  ชั้น ผลรวมจะเป็นไปตามสมการ 2.12

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \sum_i \frac{1}{OSNR_i} \quad (2.13)$$

การวิเคราะห์ในรายละเอียดเล็กน้อยทำให้ได้สมการของโอเอสเอ็นอาร์ที่เหมาะสมมากขึ้นสำหรับ gain ของแอมพลิฟายเออร์ตัวเดียว โอเอสเอ็นอาร์จะแสดงได้ในสมการ 2.14

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \frac{P_{in}}{P_{ASE}} = \frac{P_{in}}{2n_{sp}(G-1)h\nu\Delta f} \quad (2.14)$$

ในสมการ 2.14,  $n_{sp}$  คือ population inversion parameter ที่แสดงในสมการ 2.15 และเป็นอัตราส่วนของอิเล็กตรอนในสถานะที่สูงกว่าและต่ำกว่า

$$n_{sp} = N_2 / N_2 - N_1 \quad (2.15)$$

ในสมการ 2.15,  $N_2$  คือจำนวนของอิเล็กตรอนในสถานะที่สูงกว่าและ  $N_1$  คือจำนวนของอิเล็กตรอนในสถานะต่ำกว่า

Population inversion parameter ยังแสดงในสมการ 2.16 อีกด้วย

$$n_{sp} = 0.5 \times 10^{\frac{NF}{10}} \quad (2.16)$$

สำหรับ ระบบที่มีการขยาย  $N$  ชั้น โดยมีแอมพลิฟายเออร์แต่ละตัวทำการชดเชยการสูญเสียของช่วง span ก่อนหน้าซึ่งค่า span loss ในหน่วย dB มีค่า  $\Gamma$ , ความสัมพันธ์ของโอเอสเอ็นอาร์ขั้นสุดท้ายจะเป็นดังแสดงในสมการ 2.17

$$OSNR_{final} = \frac{P_{in}}{NF\Gamma h\nu\Delta f \cdot N} \quad (2.17)$$

หากค่าล็อกการริซึมฐาน 10 เราจะได้สมการ 2.18

$$OSNR_{db} = 158.93 + P_{in} - \Gamma(db) - NF_{db} - 10 \log N - 10 \log \Delta f \quad (2.18)$$

จากหัวข้อก่อนหน้านี เราได้  $\Delta f = 0.1 \text{ nm}$  หรือ  $12.5 \text{ GHz}$  แทนค่าลงไป จะได้สมการ 2.19

$$OSNR_{db} = 58 + P_{in} - \Gamma(db) - NF_{db} - 10 \log N \quad (2.19)$$

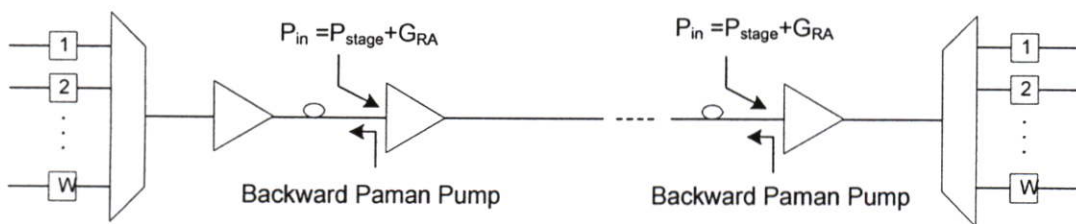
มีข้อสมมติดังต่อไปนี้

1.  $NF$  ของแอมพลิฟายเออร์ทุกตัวมีค่าเท่ากัน(สมมติให้ผลิตภัณฑ์เหมือนกัน ดังนั้น  $NF$  จึงมีค่าเหมือนกันในแอมพลิฟายเออร์แต่ละตัว)
2.  $\Gamma$  คือ span loss และมีค่าเท่ากัน(เป็นข้อสมมติทั่วไปและสามารถเปลี่ยนได้)
3. สัญญาณรบกวนรวมเข้าด้วยกันทั้งสองสถานะของโพลาไรซ์กล่าวอย่างสั้นๆ คือเป็นสัญญาณรบกวนที่ไม่เป็นโพลาไรซ์(unpolarized noise)

สมการ 2.19 เป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์อย่างแท้จริงของโอเอสเอ็นอาร์ วิธีการคำนวณนี้มีการประมาณค่าสองสามอย่าง ซึ่งเราสามารถหาค่าโอเอสเอ็นอาร์ของระบบที่มีระดับความถูกต้องสูงได้ในระบบดับเบิลยูดีเอ็มแบบหลายช่องสัญญาณ (multichannel) การออกแบบควรพิจารณาโอเอสเอ็นอาร์สำหรับช่องสัญญาณที่แย่ที่สุด ช่องสัญญาณที่แย่ที่สุดโดยปกติแล้วจะเป็นช่องสัญญาณแรกหรือสุดท้ายในสเปกตรัม

#### 2.8.4 การปรับปรุงโอเอสเอ็นอาร์โดยการขยาย Raman

ถ้าเราพิจารณาสมการ 2.19 เราจะเห็นว่า EDFA gain factor  $G$  ไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากโอเอสเอ็นอาร์เป็นอัตราส่วนและอัตราขยาย (gain) นั้น มีค่าเท่ากันทั้งในสัญญาณและสัญญาณรบกวน (noise) ทำให้ gain factor ตัดกันไปทั้งเศษและส่วน กล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า EDFA จะทำให้ขีดจำกัดบนของระยะทางการส่งสัญญาณเนื่องจากการลดทอนน้อยลงโดยการต่อ EDFA เข้าไปแบบอนุกรมโอเอสเอ็นอาร์ก็ยังมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องไปตามระยะทางการส่งสัญญาณและ ASE (จาก EDFA) การลดลงนี้สามารถทำให้ลดลงได้บ้างโดย distributed Raman amplifiers (DRAs) การขยาย Raman เป็นผลมาจากการกระจาย Raman ที่ถูกกระตุ้นของ pump signal ความเข้มสูงที่ความถี่ต่างๆ กัน (เปรียบเทียบกับความถี่ของสัญญาณ) สิ่งนี้ทำให้เกิด gain เนื่องจากการสร้าง Stokes wave ซึ่งผลที่ได้คืออัตราขยายที่ใช้ป้อนคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้าง



รูปที่ 2.20 ระบบที่ใช้ Raman amplifier แบบ multistage

พิจารณาระบบผสมที่แสดงในรูป 2.20

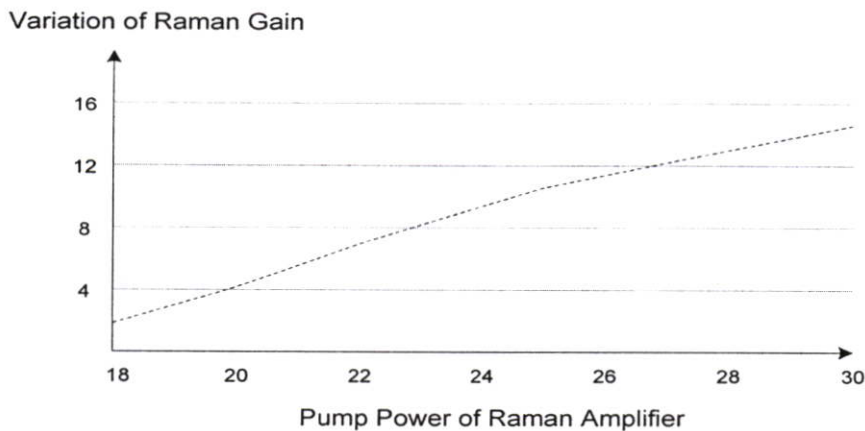
จากระบบก่อนหน้านี้โอเอสเอ็นอาร์ของขั้นสุดท้ายถูกแสดงในสมการ 2.20

$$\frac{1}{OSNR_{Total}} = \sum_i \frac{1}{OSNR_{i(Stage)}} + \frac{1}{OSNR_{RA}} \quad (2.20)$$

สมการ 2.21 ให้ค่าของโอเอสเอ็นอาร์ของแต่ละขั้น

$$OSNR_{Total} = \frac{P_{in_i} G_{RA(i)}}{NF_i h \nu \Delta f} \quad (2.21)$$

ดังที่เห็นในสมการ 2.21, factor  $G_{RA}$  ในเศษนั้นเพิ่มค่าโอเอสเอ็นอาร์ของระบบอย่างแท้จริง รูป 2.20 แสดงการแปรผันของค่า Raman gain ตาม Pump power



รูปที่ 2.21 การแปรผันของค่า Raman gain ตาม Pump power

### 2.8.5 ข้อกำหนดเกี่ยวกับ Margin

ในระดับเบิลยูดีเอ็มลิงค์แบบโหมคร่วมมองค์ประกอบหลักของการสูญเสียในระบบไม่ใช่การลดทอนอันเนื่องมาจากสื่อสัญญาณ แต่เป็นการสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับระบบย่อยที่แตกต่างกัน โดยปกติแล้วลิงค์จะประกอบด้วยหลายๆ โหนด ซึ่งแต่ละโหนดนั้นติดตั้งส่วนประกอบต่างๆ หลายชนิด การสูญเสียเนื่องมาจากส่วนประกอบแต่ละตัวนั้นมีค่าสูง ซึ่งมีผลให้ค่า penalty ในการออกแบบระบบมาก ระบบดับเบิลยูดีเอ็มจริงๆ แล้วอาจมี optical multiplex section (OMS) ครอบคลุม ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแบบอาร์เรย์ (AWGs) และ switching matrix, grating-based AWG โดยทั่วไปแล้วมีค่าการสูญเสีย 5 dB สัญญาณแสงที่ผ่านโหนดที่มี AWGs สองตัวดังกล่าว (ส่วนที่เป็นมัลติเพล็กซ์กับ

ดีมัลติเพล็กซ์) นั้นมีค่าการสูญเสีย 10 dB นอกเหนือไปจาก switching fabric loss การประมาณค่าการสูญเสียนั้นสามารถเข้าใจได้ตามการพิสูจน์ต่อไปนี้[8]

พิจารณาโหนดสองโหนดแต่ละโหนดนั้นติดตั้ง AWGs (loss = 5dB) และ switching fabric (loss = 3 dB) นอกเหนือไปจากอุปกรณ์เชื่อมต่อ[connector loss(2 dB)]ถ้าระยะห่างมีค่า 50 กม.และเป็นโหนด( $\alpha = 0.2\text{dB/km}$ ) การสูญเสียรวมเนื่องจากสื่อสัญญาณมีค่า 10 dB ( $.2 \times 50$ ) อย่างไรก็ตามที่แต่ละโหนดค่าการสูญเสียเท่ากับ  $5+5+3+2$ , หรือ 15 dB กล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าการสูญเสียที่โหนดนั้นสามารถมีค่าสูงกว่าได้เมื่อเทียบกับการสูญเสียในสื่อสัญญาณ สิ่งนี้กระทบต่อการออกแบบระบบและค่าโอเอสเอ็นอาร์เช่นกัน ผลกระทบนั้นเป็นทางอ้อมในลักษณะที่ว่ากำลังขาออกจากโหนดถูกกระทบเนื่องมาจากการสูญเสียดังกล่าวซึ่งมีผลต่อโอเอสเอ็นอาร์ต่อไปอีกเนื่องจากสมการ 2.19

ตารางที่ 2.4 แสดง insertion loss เนื่องจากองค์ประกอบต่างๆ เราต้อง quantize ค่า การสูญเสียที่เกิดจากการสูญเสียในสื่อสัญญาณตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อบทนำของบทนี้ dispersion สามารถแสดงเป็นค่า penalty ได้ในหน่วย dB การปฏิบัติคล้ายๆ กันนี้สามารถทำได้กับลักษณะอื่นๆ เช่น polarization และ nonlinearity และเรื่องอื่นๆ อีก

ตารางที่ 2.4 Insertion loss และ loss อื่นๆสำหรับการใช้งานที่ 1550nm

Component	Insertion Loss	Wavelength-Dependent Loss	Polarization-Dependent Loss	Cross-Talk NF
Multiplexer Demultiplexer (AWG)	5 dB	< 1 dB	0.1 dB	-40 dB
Optical 2x2 add-drop switch	1.2 dB	< 0.2 dB	0.1 dB	-40 dBm
Coupler (2x2) passive	3 dB	-	-	-
Filter-Thin-film	1 dB	0.1 dB	-	-40 dBm
Filter- AOTF/MZI	1 dB	0.1 dB	-	-35 dBm
Interleaver	2-3 dB	-	-	-
Optical cross-connect (OXC) Port to port	3 dB โดยปกติ ปราศจาก AWG loss	< 0.4 dB	0.1 dB	-40 dBm

ตาราง 2.5 แสดงข้อกำหนดเกี่ยวกับ margin สำหรับการออกแบบที่ดี ค่า margin เหล่านี้ยึดติดกับการเปลี่ยนแปลง optical signal budgeting โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับ dynamic โดยปกติแล้วจะเลือก margin โดยการหาค่าชุดของการอ่านที่แสดงจำนวนเหตุการณ์แบบ discrete ที่ครอบคลุม sample space ทั้งหมดของการออกแบบสัญญาณแสง

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดเกี่ยวกับ margin

Symptom	Loss Margin
Fiber dispersion	1 dB
SPM margin	0.5 dB
XPM margin	0.5 dB
DCU compensation	6 dB
FWM	0.5 dB
SRS/SBS	0.5 dB
PDL	0.3 dB
PMD	0.5 dB
Amplifier gain tilt (Dute to nonflat gain spectra)	3.0 dB
Receiver sensitivity tilt (wavelength dependence of PMD)	0.5 dB
Transmission chirp	0.5 dB
AWG cross-talk	0.2 dB
Fiber connectors	0.5 dB

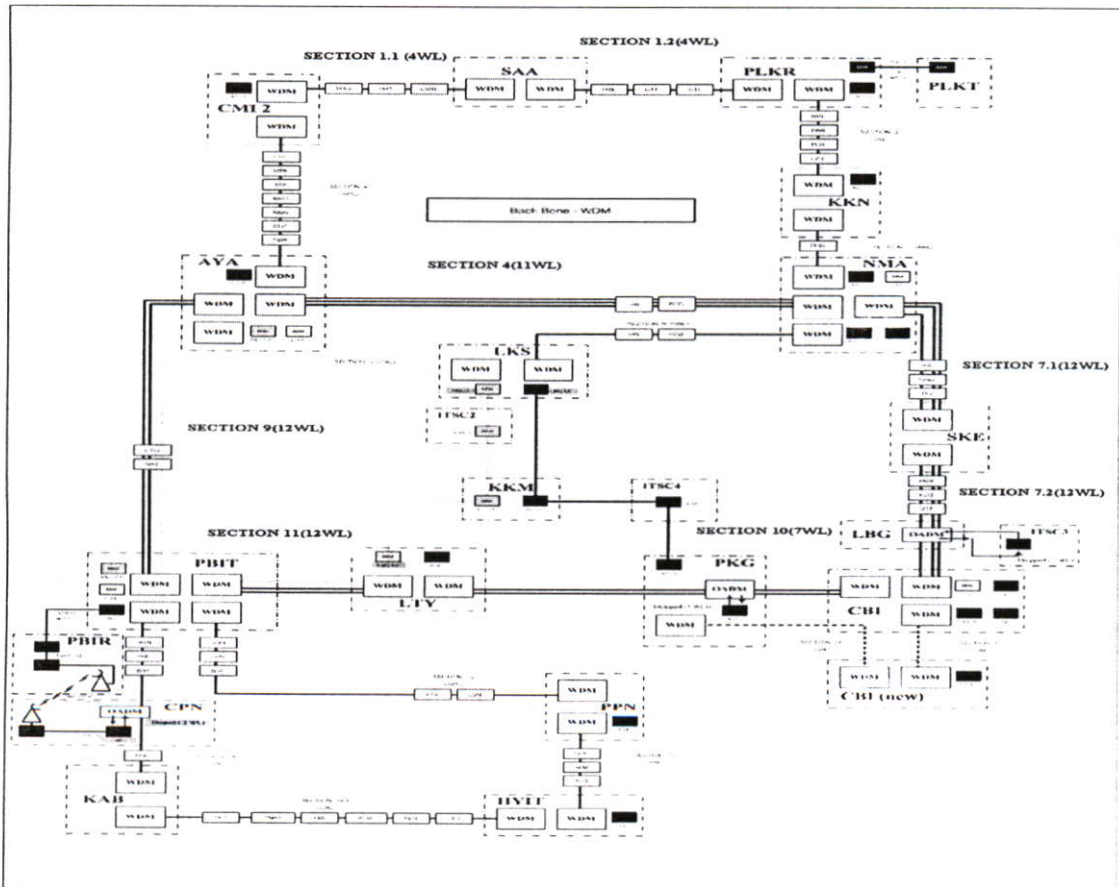
### บทที่ 3

## โครงสร้างของโครงข่ายหลัก

ในบทนี้จะนำเสนอการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบรวมทั้งโครงสร้างของโครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบ, โครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและขั้นตอนในการทดสอบ

### 3.1 โครงข่ายหลัก

โครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบเป็นนี้ถูกออกแบบให้สามารถรองรับกราฟิกได้ครอบคลุมในทุกๆ ภาคของประเทศไทยโดยใช้ระบบดับเบิลยูดีเอ็มของอัลคาเทลรุ่น 1686WM[11] เป็นอุปกรณ์หลักในการเชื่อมโยงโครงข่ายซึ่งถูกแบ่งออกทั้งหมด 19 ส่วน (Section) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยระยะทางและจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละส่วนจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของแต่ละส่วนเช่น จำนวนสถานีฐานที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้, จำนวนความยาวคลื่นที่ต้องการใช้ เป็นต้น



รูปที่ 3.1 โครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบ

โครงข่ายหลักจะถูกแบ่งออกเป็น 6 Loop ครอบคลุมในส่วนภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 Loop ในส่วนภาคกลาง 2 Loop และในส่วนภาคใต้ตอนบนและตอนล่าง 2 Loop โดยการเชื่อมโยงของทุกๆ Loop จะเชื่อมโยงด้วยระบบดับเบิลยูดีเอ็ม รายละเอียดของสถานีที่ติดตั้งอุปกรณ์, ระยะทางระหว่างสถานี, ค่าการลดทอนของแต่ละช่วง(span), แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดการเชื่อมโยงของแต่ละส่วน(Section)

Section No.	Station		1	2	1+2
	A	B	distance (Km.)	Fibre lose dB/Km.	real
1.1 (161)	CMI II	MSU	142.7	0.2525	36.03175
	MSU	PHA	95.4	0.2525	24.0885
	PHA	CMN	134.28	0.2525	33.9057
	CMN	SAA	95.81	0.2525	24.192025
1.2 (161)	SAA	PRE	95.4	0.2525	24.0885
	PRE	UTI	85	0.2525	21.4625
	UTI	STI	109.72	0.2525	27.7043
	STI	PLKR	61.92	0.2525	15.6348
2 (161)	PLKR	HHL	77.25	0.2525	19.505625
	HHL	PBN	91.52	0.2525	23.1088
	PBN	PUK	83.47	0.2525	21.076175
	PUK	CPE	71.26	0.2525	17.99315
3 (161)	CPE	KKN	84.56	0.2525	21.3514
	KKN	PHN	79.68	0.2525	20.1192
4 (321)	PHN	NMA	119.96	0.2525	30.2899
	AYA	SRI	97.2	0.2525	24.543
	SRI	PCG	66.3	0.2525	16.74075
5 (161)	PCG	NMA	87.5	0.2525	22.09375
	AYA	LKS	62.11	0.2525	15.682775
6 (321)	LKS	SRI	93.4	0.2525	23.5835
	SRI	PCG	74.3	0.2525	18.76075
	PCG	NMA	95.5	0.2525	24.11375
7.1 (321)	NMA	HTL	71.73	0.2525	18.111825
	HTL	NRG	120.05	0.2525	30.312625
	NRG	TPY	93.13	0.2525	23.515325
	TPY	SKE	102.59	0.2525	25.903975
7.2 (321)	SKA	PNR	117.13	0.2525	29.575325
	PNR	KLG	108.66	0.2525	27.43665
	KLG	MTP	66.55	0.2525	16.803875
	MTP	LBG	89.6	0.2525	22.624
	LBG	CBIT	34.72	0.2525	8.7668

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

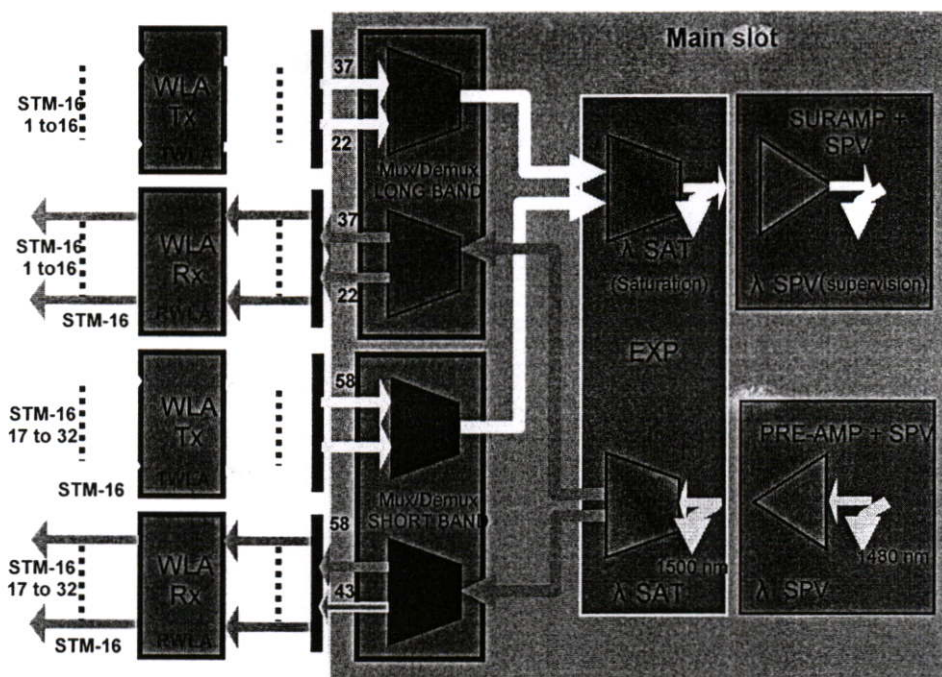
Section No.	Station		1 distance (Km.)	2 Fibre lose dB/Km.	1+2 real
	A	B			
8 (161)	AYA	SBR	82.85	0.2525	20.919625
	SBR	CNT	58.31	0.2525	14.723275
	CNT	NSN	103.13	0.2525	26.040325
	NSN	KKG	78	0.2525	19.695
	KKG	TAK	116.86	0.2525	29.50715
	TAK	MPK	75.93	0.2525	19.172325
	MPK	LPG	117.97	0.2525	29.787425
	LPG	CMI II	112.34	0.2525	28.36585
9 (321)	PBIT	NPT	105.12	0.2525	26.5428
	NPT	UTG	133.89	0.2525	33.807225
	UTG	AYA	96.43	0.2525	24.348575
10 (321)	CBIT	PKG	77.05	0.2525	19.455125
	PKG	LTY	20.8	0.2525	5.252
11 (321)	LTY	PBIT	137.85	0.2525	34.807125
12 (161)	PBIT	HHN	67.69	0.2525	17.091725
	HHN	PKN	96.75	0.2525	24.429375
	PKN	BSP	88.35	0.2525	22.308375
	BSP	KTK	72	0.2525	18.18
	KTK	LSN	127.27	0.2525	32.135675
	LSN	PPN	111.74	0.2525	28.21435
14.1 (161)	HYIT	STN	101.62	0.2525	25.65905
	STN	PLN	110.68	0.2525	27.9467
	PLN	WWS	106.98	0.2525	27.01245
	WWS	KBI	86.14	0.2525	21.75035
	KBI	PNAT	94.3	0.2525	23.81075
	PNAT	TKP	63.55	0.2525	16.046375
	TKP	KAB	56.66	0.2525	14.30665
14.2 (161)	KAB	RNG	116.9	0.2525	29.51725
	RNG	CPN	123.12	0.2525	31.0878
	CPN	BSP	116.53	0.2525	29.423825
	BSP	PKN	89.96	0.2525	22.7149
	PKN	HHN	95.65	0.2525	24.151625
	HHN	PBIT	67.24	0.2525	16.9781
15 (321)	CBIT	CBIN	8.8	0.2525	2.222
16 (321)	CBIN	PKG	86.03	0.2525	21.722575

## 3.2 อุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็มและเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

การเชื่อมโยงในหนึ่งส่วน (section) หลักๆ จะมีส่วนที่เป็นเทอร์มินัล (Terminal : LT) A, เทอร์มินัล (Terminal : LT) B และ In-line amplifier (ILA) ในเทอร์มินัล A หรือ B จะประกอบด้วย อุปกรณ์หลักๆ ได้แก่ มัลติเพล็กซ์เซอร์(multiplexers), ดีมัลติเพล็กซ์เซอร์(demultiplexers), เอกซ์แพนชัน (expansion), บูสเตอร์ (booster) และพรีแอมพลิฟายเออร์(preamplifier) ส่วนอุปกรณ์หลักๆ ใน ILA ได้แก่ ILA E-W และ ILA W-E จำนวนช่วง (span) N ของการเชื่อมโยงลิงค์ (link) จะสัมพันธ์กับจำนวนของ ออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ต้องการใช้ในลิงค์โดยในหนึ่ง in-line amplifier จะแบ่งออกเป็น 2 span ดังนั้นจำนวนของของแอมพลิฟายเออร์จะเท่ากับ  $N+1 = 1$  booster(at transmitter) +  $N-1$  in-line amplifier + 1 preamplifier (ที่ด้านรับ) อุปสรรคในการเพิ่มกำลังส่งในช่องสัญญาณของ แอมพลิฟายเออร์ไปยัง fiber span ได้แก่การขยายสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเองจากธรรมชาติของเส้นใยแก้ว (amplified spontaneous emission : ASE) บนแบนด์วิธของสัญญาณ ซึ่งเป็นสาเหตุให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง(Degrading transmission) และจำกัดจำนวนของแอมพลิฟายเออร์ต่อกันแบบขั้นบันได (cascade) ในลิงค์[11]

### 3.2.1 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์(MUX)และดีมัลติเพล็กซ์(DMUX)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการรวมและแยกความยาวคลื่น โดยใช้อุปกรณ์ชนิด passive wavelength sensitive device เป็นอุปกรณ์พื้นฐานในการทำหน้าที่เลือกความยาวคลื่นที่ใช้ในการรับและส่งสัญญาณ และทำหน้าที่ในการบล็อกความยาวคลื่นเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนซึ่งกันและกันของความยาวคลื่นอุปกรณ์ MUX/DMUX ที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นแบบ 16 ช่องสัญญาณ (channel) โดยอุปกรณ์สามารถทำการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นได้ 16 ทรินูทารี (tributaries) ในช่วงความยาวคลื่นแถบสีแดง (red band) และ 16 ทรินูทารีในช่วงความยาวคลื่นแถบสีน้ำเงิน(blue band) [8 ทรินูทารีสำหรับอุปกรณ์ชนิด 16 ช่องสัญญาณ] ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ของอุปกรณ์ชนิด 32 ช่องสัญญาณ 1 ช่องสัญญาณทั้งหมดของทั้ง red band และ blue band จะถูกรวมเข้าด้วยกันที่ expansion unit และในส่วนนี้จะทำการใส่ความยาวคลื่นที่ทำหน้าที่ในการควบคุมความสมดุลระดับกำลังงานของทุกๆ ความยาวคลื่นเรียกว่า saturation wavelengthเข้าไประหว่าง red band และ blue band หลังจากนั้นสัญญาณที่ออกจาก expansion unit จะถูกส่งไปที่ booster amplifier เพื่อทำการใส่ สัญญาณที่ใช้ในการควบคุม (Optical Supervision Channel : OSC) และทำการขยายสัญญาณในการส่งออกไปยังสถานีปลายทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสงและในทิศทางกลับกันสัญญาณจะถูกรับจากไลน์ผ่าน preamplifier และเข้าสู่ expansion unit ซึ่งจะแยก red band และ blue band ออกจากกันและส่งไปยัง DMUX เพื่อทำการแยกออกเป็นแต่ละทรินูทารีต่อไป[11]



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ WDM MUX AND DMUX

### 3.2.2 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความยาวคลื่น (Wavelength adaptation : WLA)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนความยาวคลื่นจากแถบความยาวคลื่น 1310 nm หรือ 1550 nm (black and white) ให้เป็นความยาวคลื่นต่างๆ ตามที่ต้องการในสเปกตรัมของแสงตามมาตรฐาน ITU-T G.692 ซึ่งเป็นการแนะนำการใช้ colored aggregate หรือการใช้ wavelength adaptation (transponders) โดยมีระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น (wavelength spacing) เท่ากับ 100 GHz สำหรับอุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็ม ชนิด 32 channel และ 200 GHz สำหรับอุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็ม ชนิด 16 channel (งานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ชนิด 16 channel ในการทดสอบ) ตารางที่ 3.2 เป็นการแสดงค่าความยาวคลื่น, ความถี่และระยะห่างระหว่างความยาวคลื่นของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบโดยในการทดสอบนี้จะใช้อุปกรณ์ WLA\_TS16\_1 (short-haul receive interface, WDM transmit interface) และ WLA\_RS16\_1 (WDM receive interface, short-haul transmit interface) เปรียบเทียบได้กับ S-16.1 interface ที่กำหนดไว้ใน ITU-T G.957 โดยมีความเร็วในการส่ง 2.5 Gbit/s และมีค่า chromatic dispersion เท่ากับ 12800 ps/nm

ตารางที่ 3.2 Channel and wavelength spacing

channel	lambda(nm)	Frequency(THz)	channel	lambda(nm)	frequency(THz)
2	1558.98	192.3	1	1559.79	192.2
4	1557.36	192.5	3	1558.71	192.4
6	1555.75	192.7	5	1556.55	192.6
8	1554.13	192.9	7	1554.94	192.8
10	1552.52	193.1	9	1553.33	193.0
12	1550.92	193.3	11	1551.72	193.2
14	1549.32	193.5	13	1550.12	193.4
16	1547.72	193.7	15	1548.51	193.6
17	1542.94	194.3	18	1542.14	194.4
19	1541.35	194.5	20	1540.56	194.6
21	1539.77	194.7	22	1538.98	194.8
23	1538.61	194.9	24	1537.40	195.0
25	1536.61	195.1	26	1535.82	195.2
27	1535.04	195.3	28	1534.25	195.4
29	1533.47	195.5	30	1532.68	195.6
31	1531.90	195.7	32	1531.12	195.8

### 3.2.3 Optical amplifier, In-line/ Pre-amplifier/ Booster

เป็นอุปกรณ์ออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้ในการส่งสัญญาณ โดยไม่ต้องใช้การทวนสัญญาณทางไฟฟ้า (electrical regeneration) ในการส่งสัญญาณ ไปบนเส้นใยแก้วที่มีระยะทางไกล โดยอุปกรณ์ทั้ง 3 แบบมีความแตกต่างกันในการใช้งานดังนี้

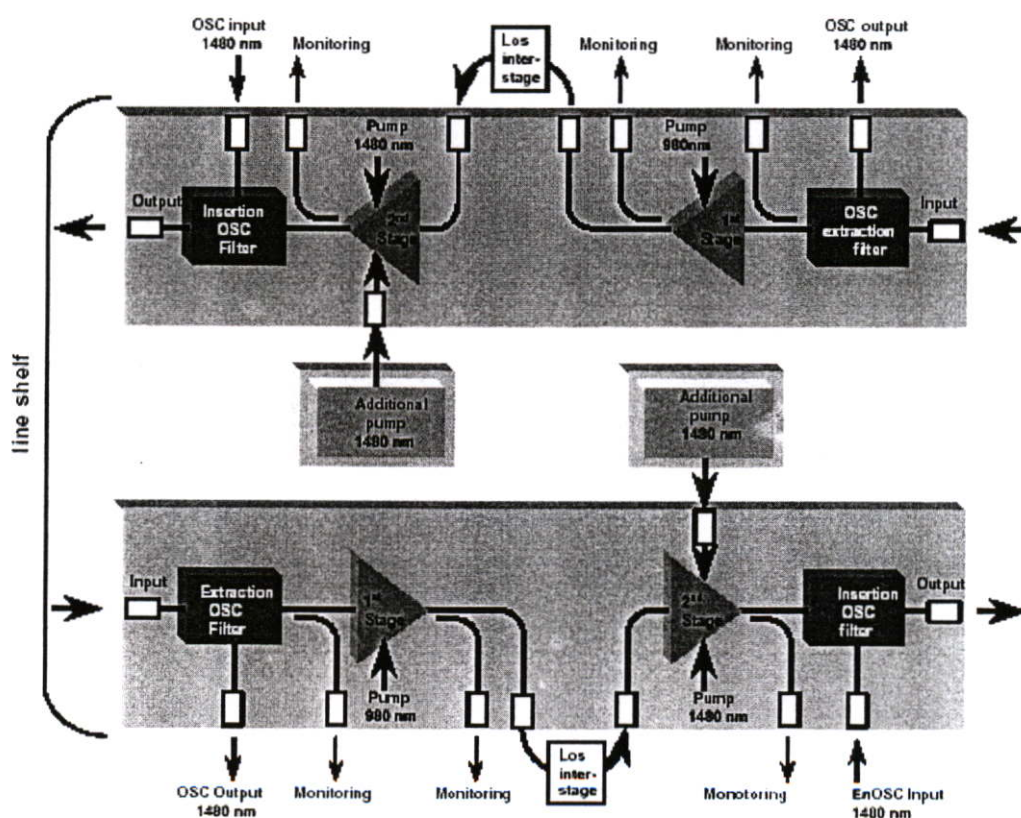
- a). Booster จะใช้ในส่วนที่เป็นเทอร์มินัล
- b). Pre-amplifier จะใช้ในส่วนที่เป็นเทอร์มินัล
- c). In-line amplifier จะใช้ในส่วนที่เป็นสถานีทวนสัญญาณ

ออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้ในการทดสอบนี้จะเป็นชนิด Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) แบบ Double-stage optical amplifier มีคุณลักษณะที่สำคัญดังนี้

1. Double-stage optical amplifier with mid-stage access แบ่งออกเป็น 2 ส่วนในส่วนแรก เรียกว่า first-stage ถูกออกแบบให้มีหน้าที่ขยายสัญญาณโดยให้มีการขยายสัญญาณรบกวน (noise) ให้น้อยที่สุดโดยทำการ pump ที่ความยาวคลื่น 980-nm สามารถปรับปรุงค่าของ first-stage noise figure ให้ดีขึ้น 2 dB ในส่วนที่สองเรียกว่า Second-stage ออกแบบให้มีการ pump ที่ความยาวคลื่น

1489-nm ซึ่งผลจากการขยายนี้ทำให้สามารถจัดเตรียมกำลังส่งออกในย่านจาก +14 dBm ถึง +20 dBm ด้วย noise figure ที่น้อยกว่า 5 dB

อัตราขยายสัญญาณของแอมพลิฟายเออร์ของแต่ละช่องสัญญาณจะมีความเที่ยงตรงที่ไม่เท่ากันทุกช่องสัญญาณซึ่งความสม่ำเสมอของ EDFA passband จะเป็นจุดวิกฤตที่สำคัญของระบบดับเบิลยูดีเอ็มที่ใช้แอมพลิฟายเออร์ที่ต่อกันแบบขั้นบันได (cascaded amplifier) การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในการขยายสัญญาณระหว่างช่องสัญญาณในสแตจสามารถเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากของกำลังงานที่แตกต่างกันระหว่างช่องสัญญาณที่เอาต์พุตของลูกโซ่ (chain) ตัวอย่างเช่น ถ้าการเปลี่ยนแปลงของอัตราขยายระหว่างช่องสัญญาณที่แย่ที่สุดกับช่องสัญญาณที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 1 dB ที่แต่ละแอมพลิฟายเออร์หลังจากผ่านไป 10 ขั้นบันได (cascades) จะทำให้ความเปลี่ยนแปลงระหว่างช่องสัญญาณจะแตกต่างถึง 10 dB ด้วยสาเหตุนี้จะทำให้ช่องสัญญาณที่แย่ที่สุดมีค่าของโอเอสเอ็นอาร์ ที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ดังนั้นในการติดตั้งระบบดับเบิลยูดีเอ็ม การปรับแต่งอุปกรณ์ให้มีค่าตัวแปรต่างๆ ใกล้เคียง สม่ำเสมอกันมากที่สุดจะทำให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น[11]



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของ Double – stage amplifier

2. คุณลักษณะทางเทคนิคของ In-line amplifier / preamplifier / booster ของระบบดับเบิลยูดีเอ็มที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

2.1 แอมพลิฟายเออร์ที่ใช้เป็นชนิด EDFA (Erbium – Doped Fiber Amplifier)

2.2 กำลังงานขาออก (Output power) ของอุปกรณ์ที่ใช้มีหลายระดับคือ +14 dBm, +17 dBm และ +20 dBm โดยค่ากำลังงานต่อช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับจำนวนของช่องสัญญาณที่ใช้

2.3 ย่านความยาวคลื่นที่ใช้คือ 1530 – 1560 nm

2.4 ค่าของ Polarization Mode Dispersion (PMD) : 0.5 dB

2.5 ค่าของ Polarization Dependent Loss (PDL) : 0.5 dB

2.6 ย่านกำลังงานขาเข้า (Input power range): -24 ถึง -4 dBm สำหรับแอมพลิฟายเออร์ชนิด Double-stage

2.7 ค่าของ Bandwidth flatness = 1.5 dBm

2.8 ค่าของ Noise figure : 6 dB สำหรับแอมพลิฟายเออร์ชนิด Double-stage

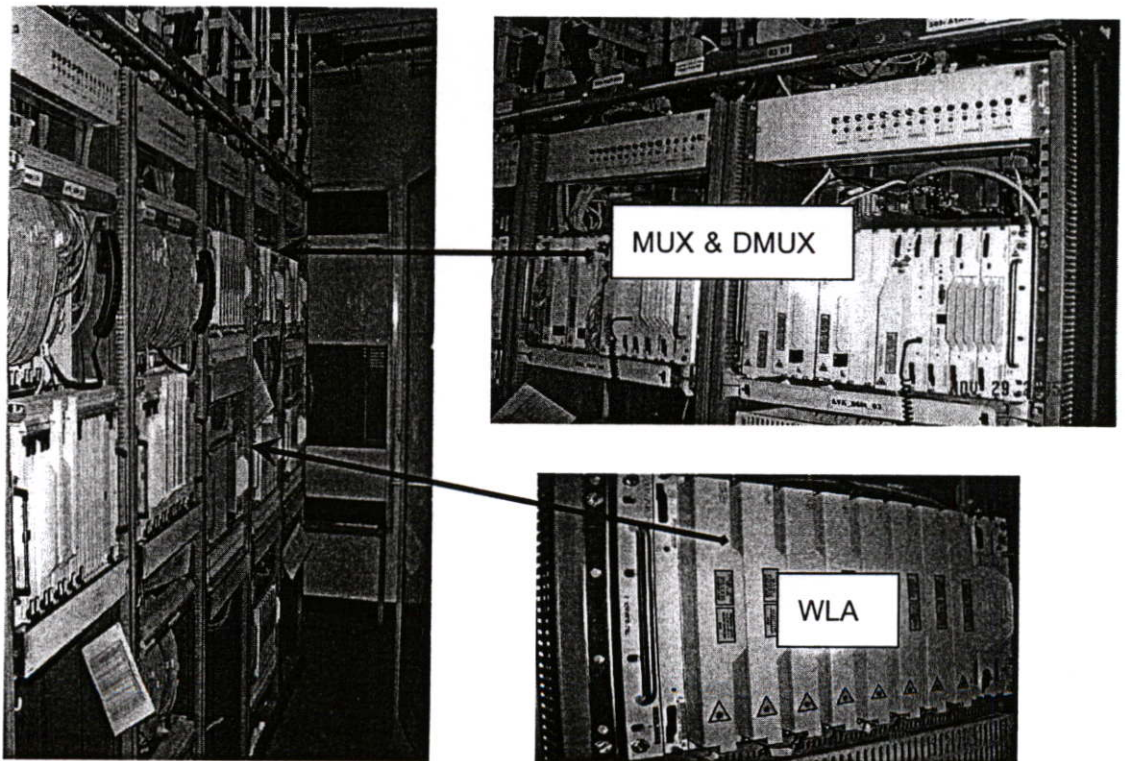
2.9 ค่าของ Max accommodated loss (ในกรณีที่ใช้อุปกรณ์ชนิด Double-stage) : 9 dB

2.10 ชนิดของอุปกรณ์เชื่อมต่อ (connector) ที่ใช้ได้แก่ FC/PC และ SC

ในการทำให้การส่งสัญญาณของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ มีความราบเรียบสม่ำเสมอทำได้โดยใช้เทคโนโลยีหลายแบบในเวลาเดียวกัน โดยวิธีการออกแบบที่เหมาะสมของ erbium doped fiber ให้ออปติคัลแอมพลิฟายเออร์สามารถขยายสเปกตรัมให้มีการเบี่ยงเบนที่น้อยกว่า 1.5 dB ความเหมาะสมของการออกแบบ double-stage design และการออกแบบที่เหมาะสมของ passive optical filtering นอกจากนั้นกำลังงานขาเข้ารวมของ booster amplifier สามารถรักษาระดับสัญญาณให้มีความคงที่ได้โดยวิธีการใช้ saturation wavelength ในการควบคุมและปรับเปลี่ยนระดับกำลังงานของสัญญาณให้มีระดับกำลังงานขาเข้าที่ booster คงที่อัตโนมัติโดยไม่คำนึงถึงจำนวนของช่องสัญญาณที่ถูกใส่เข้ามาในระบบ

3. Saturation wavelength คุณลักษณะของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์อาจจะขึ้นอยู่กับผลรวมของอัตราการส่งบิต(bit rate)สาเหตุเนื่องมาจากผลรวมของ power optical จะขึ้นอยู่กับจำนวนช่องสัญญาณในการส่ง ตัวอย่างเช่น กำลังงานขาออก (output power) ของ multiplexing stage มีการเปลี่ยนแปลงของระดับกำลังงาน 3 dB ทุกครั้งที่มีจำนวนของความยาวคลื่นเป็นเท่าตัว ดังนั้นถ้ากำลังงานขาเข้า (input power) ของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการขยายสัญญาณจะทำให้ gain flatness และกำลังงานต่อช่องสัญญาณที่เอาท์พุทของแอมพลิฟายเออร์มีการเปลี่ยนด้วยโดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ สำหรับออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้การควบคุมการขยาย (gain-controller) นั้น กำลังงานขาออกของแอมพลิฟายเออร์จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นและสำหรับออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้การควบคุมกำลังงานส่ง(output power control)อัตราการขยายจะถูกลดลง

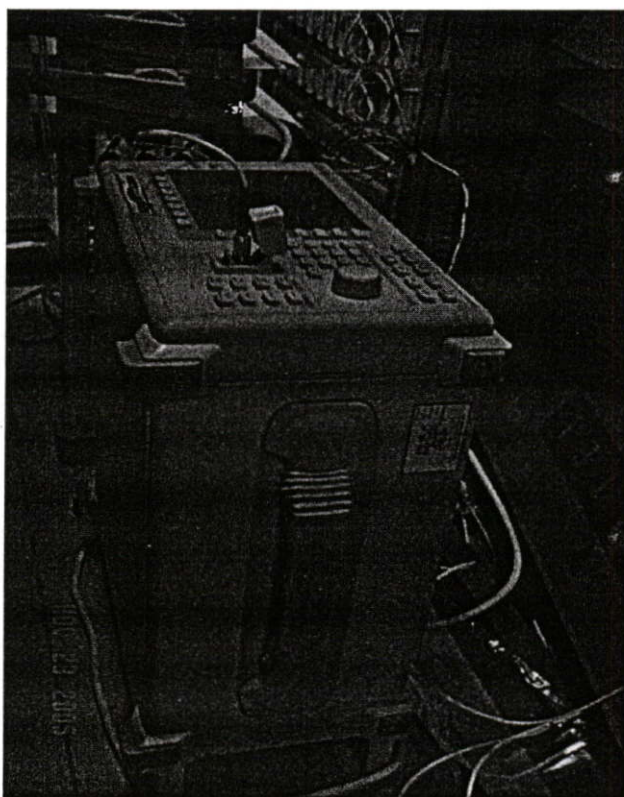
เนื่องจากจำนวนของช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นและทำให้กำลังงานต่อช่องสัญญาณลดลงด้วยซึ่งสาเหตุเหล่านี้จะทำให้คุณภาพในการส่งสัญญาณลดลงได้ ดังนั้นระบบดับเบิลยูดีเอ็ม จำเป็นจะต้องมีการวางแผนการใช้อุปกรณ์อย่างมีประสิทธิภาพที่สามารถควบคุมการเปลี่ยนของ optical power ที่อาจเกิดขึ้นเหล่านี้ได้ การใช้ saturation wavelength เป็นวิธีการในการควบคุมและจัดการกับการเปลี่ยนแปลงของ optical power ในไลน์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนความยาวคลื่น ลักษณะเฉพาะของ saturation wavelength ก็คือคุณสมบัติที่เรียกว่า optical tank ซึ่งจะช่วยชดเชยทุกๆ การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานที่แปรผันตามความยาวคลื่น ในกรณีถ้าจำนวนช่องสัญญาณมีการเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัวอย่างทันทีทันใดกำลังงานขาออกของ saturation wavelength จะลดลง 3 dB เพื่อรักษา กำลังงานขาออกของ multiplexing stage ให้คงที่ดังนั้นกำลังงานขาออกของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ จะมีค่าคงที่ถึงแม้ว่าจำนวนของความยาวคลื่นที่เข้ามาและ operating point จะมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องมาจากการควบคุมกำลังงานขาออกซึ่งจะเป็นผลให้การขยายยังคงมีค่าคงที่และ optical power ต่อช่องสัญญาณยังคงมีค่าคงที่อีกด้วย การใช้ saturation wavelength จะทำให้การทำงานมีความสะดวกขึ้น รวดเร็วขึ้นและมีความน่าเชื่อถือในการ upgrade ช่องสัญญาณ โดยที่ผู้ใช้งานสามารถทำงานได้ที่สถานีที่เป็นเทอร์มินัลและใส่ช่องสัญญาณใหม่โดยปราศจากทุกๆ สาเหตุที่ไปรบกวน ทราฟฟิคที่มีอยู่ก่อนแล้ว (saturation wavelength) จะทำงานอยู่ที่ย่านความยาวคลื่น 1545 nm



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็มอัลคาเทล รุ่น 1686 WM ชนิด 16 ความยาวคลื่น

### 3.2.4 Optical Spectrum Analyzer(OSA)

Optical Spectrum AnalyZer(OSA) ที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ OSA ของ Anritsu รุ่น MS9710C สามารถวัดระดับสัญญาณ optical ในย่านความยาวคลื่น 600-700 nm และ 1550 nm มีความแม่นยำในการวัด (accuracy)  $\pm 20$  pm โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบได้ผ่านการตรวจสอบมาตรฐานและปรับแต่งการวัดจากศูนย์ทดสอบและวิจัยของบ.ทีโอที จำกัด(มหาชน) และขั้นตอนการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานการรับรองระเบียบการทดสอบ (Acceptance Test Procedures) ของ บ.อัลคาเทล (ประเทศไทย) จำกัดที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์โครงการ TNEP ของบ.ทีโอที จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 3.5 Optical Spectrum Analyzer(OSA)ของAnritsuรุ่นMS9710C



รูปที่ 3.6 การรับรองการตรวจสอบมาตรฐานและปรับแต่งการวัด

### 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์, เครื่องมือวัดและขั้นตอนการทดสอบ

#### 3.3.1 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด

อุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็ม ที่ใช้ในการเชื่อมโยงโครงข่ายหลักในการทดสอบนี้จะใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดี่ยว (single mode fiber) ตามมาตรฐานของ ITU-T Recommendation G.652[12] ในการเชื่อมต่อ โดยมีระยะทางระหว่างสถานีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 สถานีต้นทาง-ปลายทางที่ทำการติดตั้งเครื่องมือวัด, จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในแต่ละ section และจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดในแต่ละ section มีรายละเอียดดังนี้

1. Section 1.1 CMI II - SAA ความยาวคลื่นใช้งาน 3 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น
2. Section 1.2 SAA - PLKR ความยาวคลื่นใช้งาน 3 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น
3. Section 2 PLKR - KKN ความยาวคลื่นใช้งาน 4 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น
4. Section 4 AYA – NMA ความยาวคลื่นใช้งาน 11 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น
5. Section 5 AYA - LKS ความยาวคลื่นใช้งาน 5 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น
6. Section 6 PLKR - KKN ความยาวคลื่นใช้งาน 5 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น
7. Section 7.1 NMA - SKE ความยาวคลื่นใช้งาน 12 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น
8. Section 7.2 SKE - CBIT ความยาวคลื่นใช้งาน 12 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น
9. Section 8 AYA – CMI2 ความยาวคลื่นใช้งาน 4 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น
10. Section 9 PBIT - AYA ความยาวคลื่นใช้งาน 12 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น
11. Section 10 CBIT - LTY ความยาวคลื่นใช้งาน 7 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น
12. Section 11 LTY - PBIT ความยาวคลื่นใช้งาน 12 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น

13. Section 12 PBIT - PPN ความยาวคลื่นใช้งาน 3 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น

14. Section 14.1 HYIT - KAB ความยาวคลื่นใช้งาน 3 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น

15. Section 14.2 KAB - PBIT ความยาวคลื่นใช้งาน 3 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น

16. Section 16 CBIT - PKG ความยาวคลื่นใช้งาน 12 ความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นสูงสุด 16 ความยาวคลื่น

การคำนวณค่าสูญเสีย(loss)ระหว่าง span จะอ้างอิงจาก ITU-T Recommendation G.652 โดยกำหนดให้มีค่าสูญเสียในส่วนของการเชื่อมต่อเคเบิล splicing = 0.05 dB/ point , ค่าของการลดทอนของเคเบิล line attenuation = 0.25 dB/ km , ค่าสูญเสียจากจุดเชื่อมต่อ connector loss = 0.5 dB/ connector และมีระยะทางของเคเบิลต่อ roll = 4 km โดยมีสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\text{Line attenuation} = [ D/4 * A ] + [ D*B ] + [ 2*C ] \quad (3.1)$$

D = Cable length ; km

A = Splicing attenuation ; dB/ point

B = Line attenuation ; dB/km

C = Connector loss ; dB/connector

ค่าของ 4 ในเทอมของ  $D/4*A$  คือระยะทางของเคเบิลในหนึ่ง roll ซึ่งมีความยาว 4 km/roll และค่าของเทอม  $[2*C]$  จะไม่นำมาคิดในการทดสอบนี้เนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์จะใช้การ splicing แทนการใช้ connector เชื่อมต่อจึงไม่ต้องคิดค่าสูญเสียที่เกิดจาก connector และได้มีการเผื่อค่าการลดทอน(margin) ไว้แล้ว 4 dB/span เมื่อทำการคำนวณค่าต่างๆ แล้ว จึงนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์โดยมีค่าที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

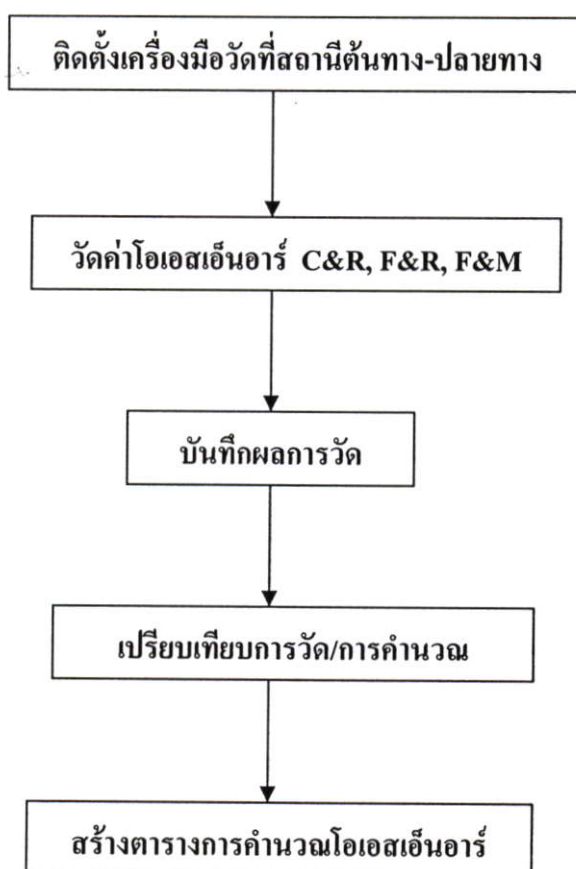
\* RSL = Real Span Length คือค่าของระยะทางเคเบิลใน span ตามความเป็นจริง(cable length : D)

\* RSA = Real Span Attenuation คือค่าการลดทอนของเคเบิลใน span ตามความเป็นจริง (Line attenuation : B)

ตัวอย่างการเชื่อมโยง แสดงในรูปที่ 3.7 ถึง 3.16

### 3.3.2 การวัดโอเอสเอ็นอาร์และการบันทึกผล

ในการวิจัยนี้จะทำการวัดและทดสอบ โครงข่ายหลักที่มีการเชื่อมโยงด้วยระบบดับเบิลยูดีเอ็ม 16 Section. การทดสอบเริ่มต้นจากการวัดโอเอสเอ็นอาร์ของระบบดับเบิลยูดีเอ็มที่ทุกความยาวคลื่นที่เทอร์มินัล โดยเริ่มต้นที่ความยาวคลื่นที่ใช้งานจริงต่อการลดทอนตามจริง (C&R), ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อการลดทอนตามจริง (F&R) และความยาวคลื่นเต็มระบบต่อการลดทอนตามจริงบวกค่าลดทอนที่เพิ่มเข้าไปในระบบ (F&M) 5 dB และทำการบันทึกผลที่ (ตารางที่ 3.3) ได้จากนั้นนำผลจากการวัดมาทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเพื่อหาคุณลักษณะของแต่ละ section และทำการสร้างตารางการคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์ของแต่ละ section ด้วยโปรแกรม microsoft excel เพื่อนำไปใช้ในการบำรุงรักษาโครงข่ายหลักต่อไป ขั้นตอนการดำเนินการแสดงในรูปที่ 3.5



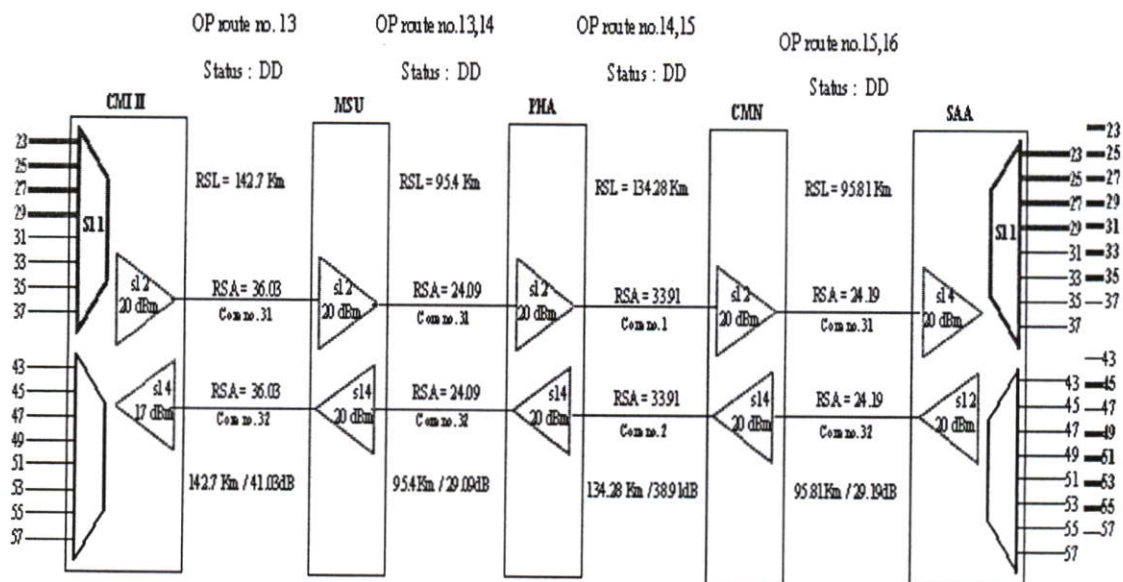
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างตารางการบันทึกผลการวัด

Ch.	Lambda (nm)	Freq. (THz)	C&R		F&R		F&M		C&R		F&R		F&M	
			Term. A	Term. B	Term. A	Term. B	Term. A	Term. B	Term. B	Term. A	Term. B	Term. A	Term. B	Term. A
23	1558.98	192.3	33.51	26.3	32.62	25.99	32.62	18.03	33.51	26.76	30.7	25.91	30.7	18.84
25	1557.36	192.5	22.77	26.4	32.32	25.64	32.32	18.36	22.77	26.54	30.62	24.86	30.62	19.26
27	1555.75	192.7	32.94	25.88	31.99	25.84	31.99	18.09	32.94	26.92	31.07	25.62	31.07	19.82
29	1554.13	192.9	33.08	25.51	32.19	24.62	32.19	17.52	33.08	25.81	30.73	24.5	30.73	18.06
31	1552.52	193.1	33.55	25.77	32.42	24.92	32.42	17.73	33.55	25.36	30.63	24.15	30.63	18.08
33	1550.92	193.3	34.18	26.41	33.39	25.45	33.39	18.57	34.18	24.73	30.42	24.38	30.42	17.9
35	1549.32	193.5	33.62	25.2	33.25	24.61	33.25	17.84	33.62	24.85	30.81	25.96	30.81	18.06
37	1547.72	193.7	35.42	26.66	34.26	25.86	34.26	18.54	35.42	26.18	32.38	25.62	32.38	19.58
43	1542.94	194.3	35.15	25.78	33.61	24.58	33.61	17.66	35.15	25.52	31.14	23.57	31.14	18.47
45	1541.35	194.5	35.95	25.94	33.84	25.19	33.84	18.25	35.95	24.6	31.54	23.18	31.54	18.11
47	1539.77	194.7	36.58	26.58	35.39	25.68	35.39	18.46	36.58	25.04	31.93	23.21	31.93	18
49	1538.19	194.9			34.52	24.16	34.52	17.67			32.4	23.34	32.4	18.38
51	1536.61	195.1			34.6	23.66	34.6	17.02			32.56	22.44	32.56	17.68
53	1535.04	195.3			35.15	22.93	35.15	17.14			32.94	21.63	32.94	17.78
55	1533.47	195.5			35.85	22.26	35.85	17.51			33.97	22.36	33.97	18.11
57	1531.90	195.7			35.96	22.14	35.96	17.3			32.26	20.79	32.26	17.93

Section 1.1 - CMII - SAA - 16 λ

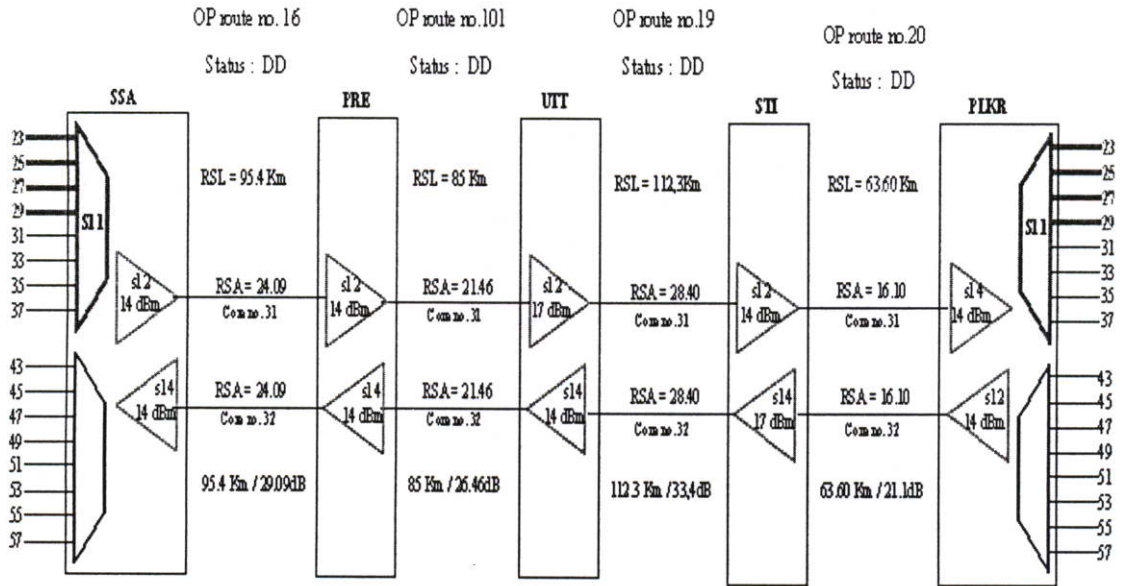
WLA + FEC, 12800 ps/hm  
Total CD = 8427.4 ps/hm



รูปที่ 3.8 WDM Section 1.1

Section 1.2 - SSA - PLKR - 16 λ

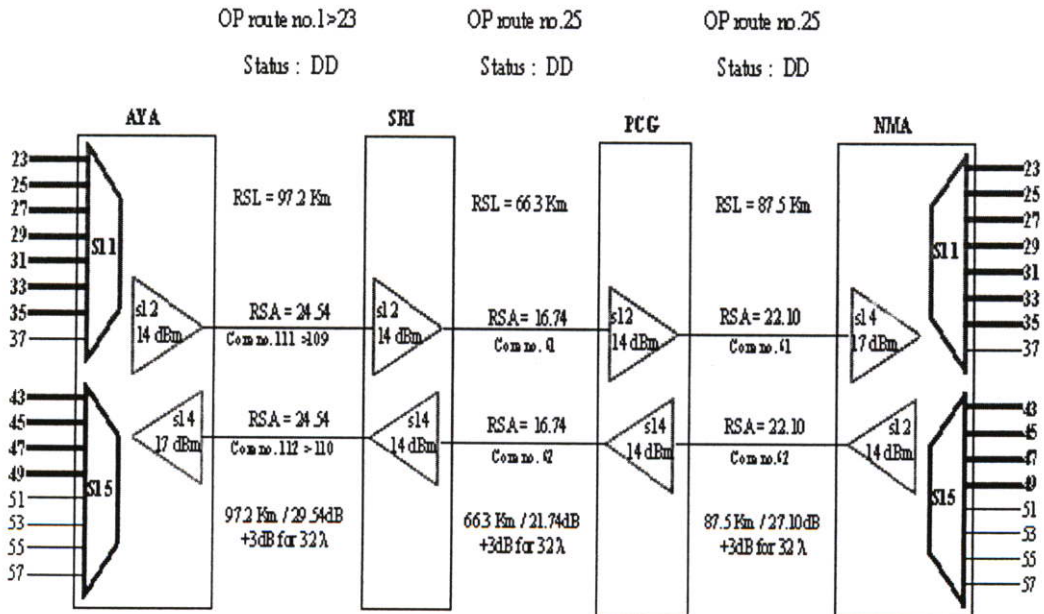
WLA + FEC, 12800 ps/hm  
Total CD = 6413.4 ps/hm



รูปที่ 3.9 WDM Section 1.2

Section 4 - AYA-NMA - 32 λ

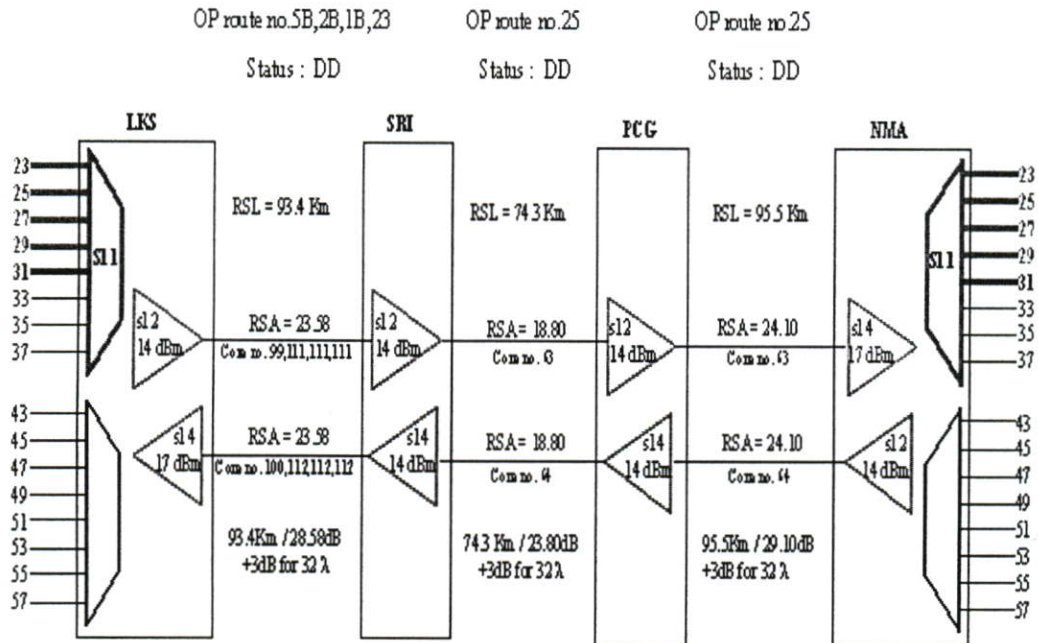
WLA + FEC, 12800 ps/hm  
Total CD = 4518 ps/hm



รูปที่ 3.10 WDM Section 4

Section 6 - LKS-NMA - 32 λ

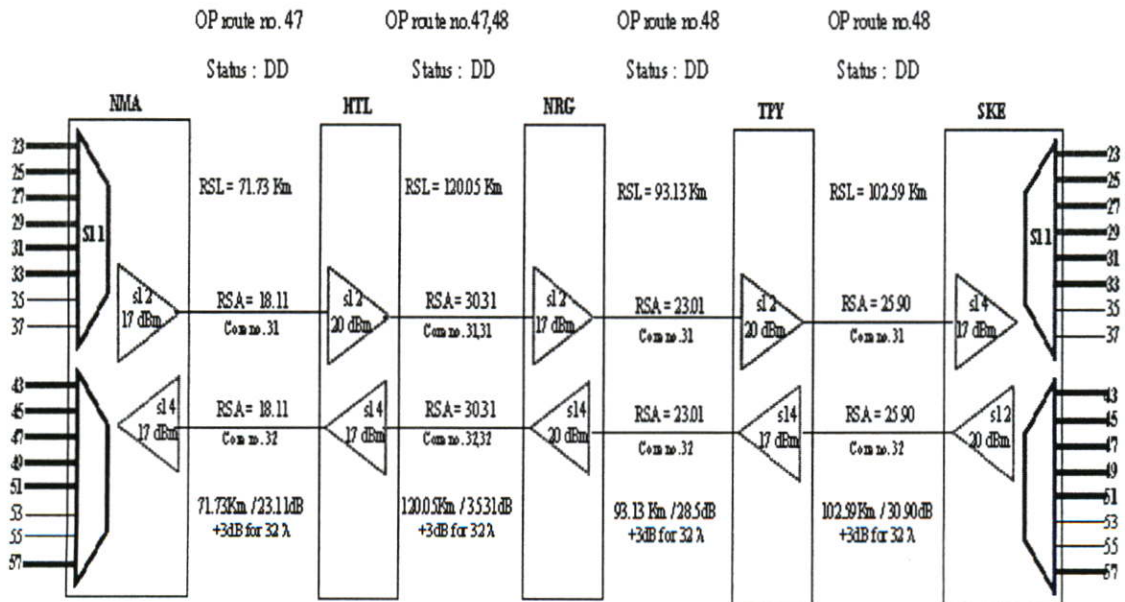
WLA + FEC, 12800 ps/hm  
Total CD = 4737.6 ps/hm



รูปที่ 3.11 WDM Section 6

Section 7.1 - NMA - SKE - 32 λ

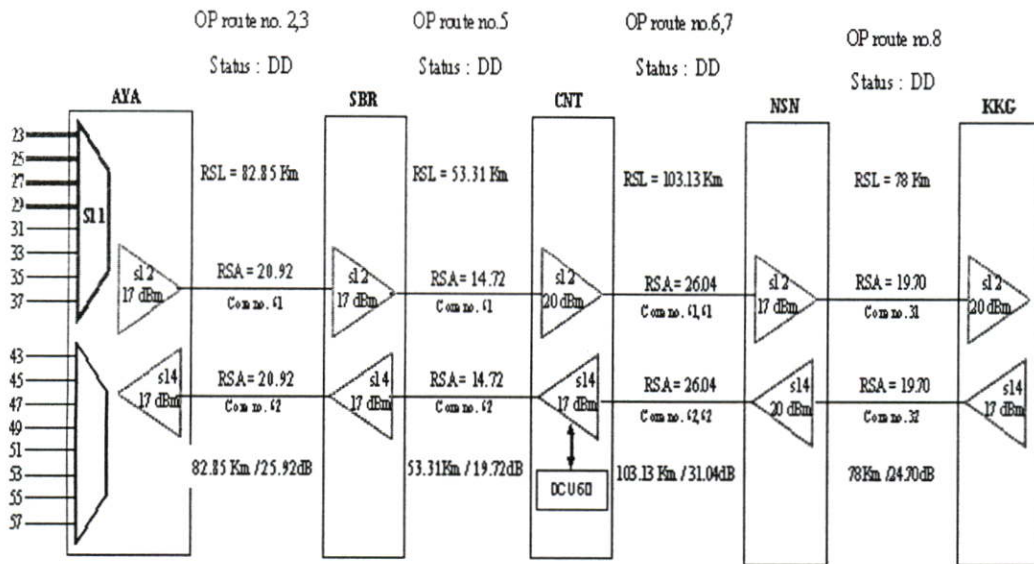
WLA + FEC, 12800 ps/hm  
Total CD = 6983 ps/hm



รูปที่ 3.12 WDM Section 7.1

Section 8 – AYA – CMI II - 16 λ (page 1)

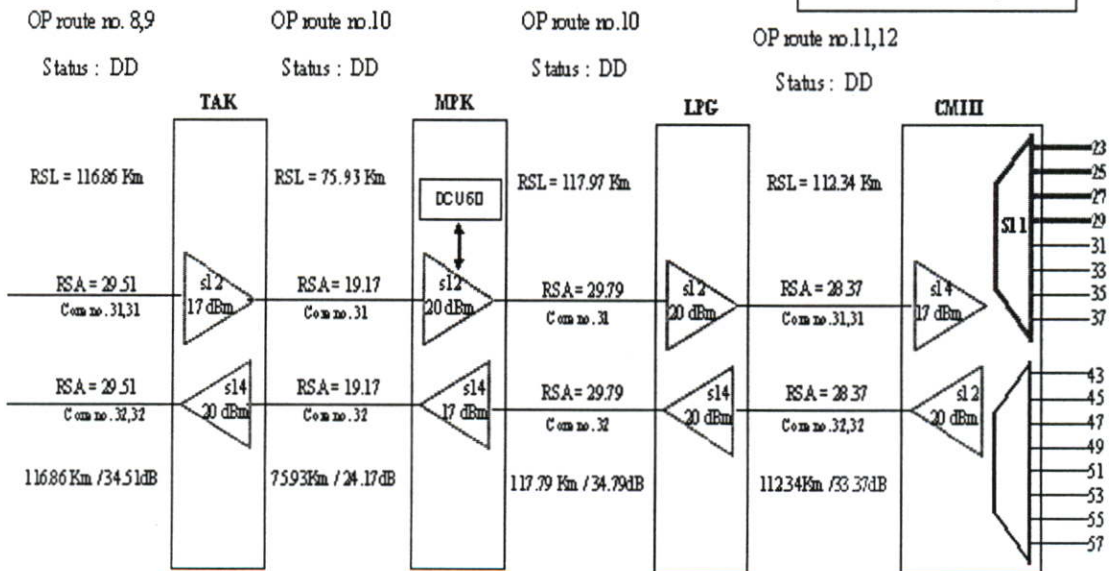
WLA + FEC, 12800 ps/hm  
Total CD = 13417 ps/hm



รูปที่ 3.13 WDM Section 8

Section 8 – AYA – CMI II - 16 λ (page 2)

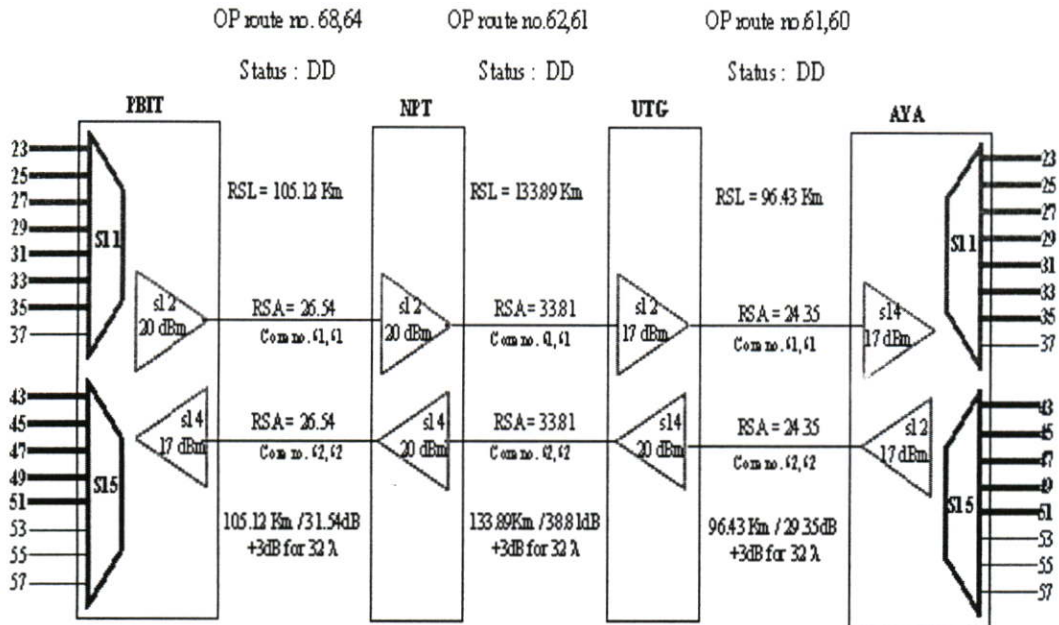
WLA + FEC + DCU, 12800 ps/hm  
Total CD = 13697.82 ps/hm  
CD with DCU: 12707.82 ps/hm



รูปที่ 3.13 (ต่อ)

Section 9 – PBIT - AYA - 32 λ

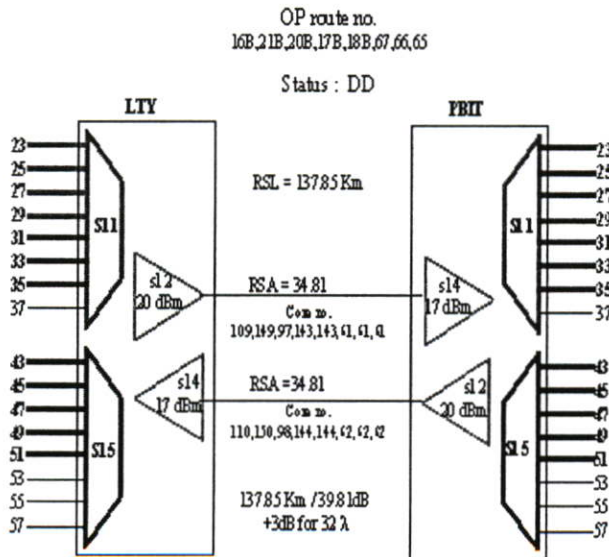
WLA + FEC, 12800 ps/km  
 Total CD = 60379 ps/km



รูปที่ 3.14 WDM Section 9

Section 11 –LTY - PBIT - 32 λ

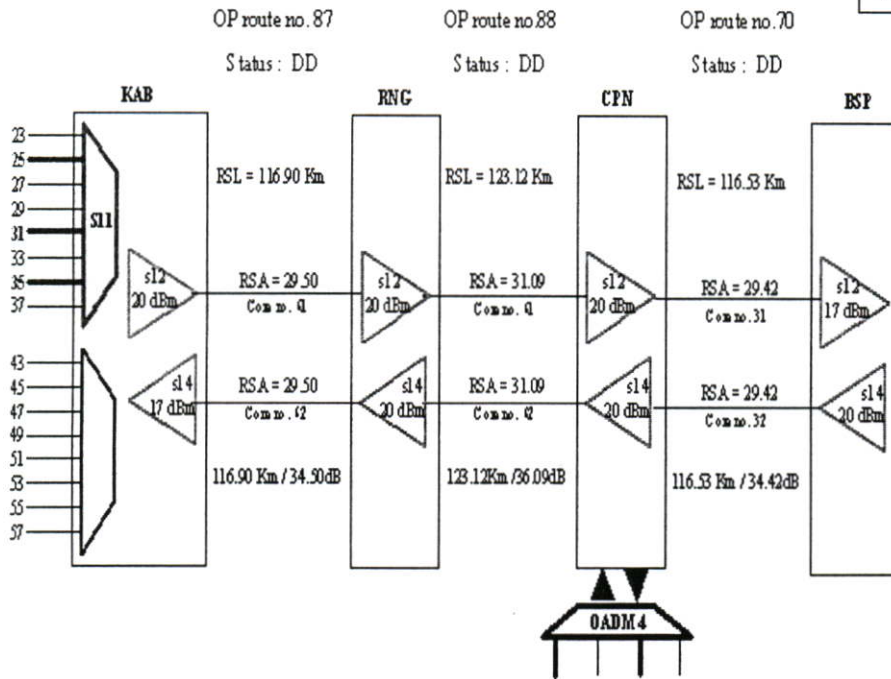
WLA + FEC, 12800 ps/km  
 Total CD = 2481.6 ps/km



รูปที่ 3.15 WDM Section 11

Section 14.2 -KAB - PBIT - 16 λ (page 1)

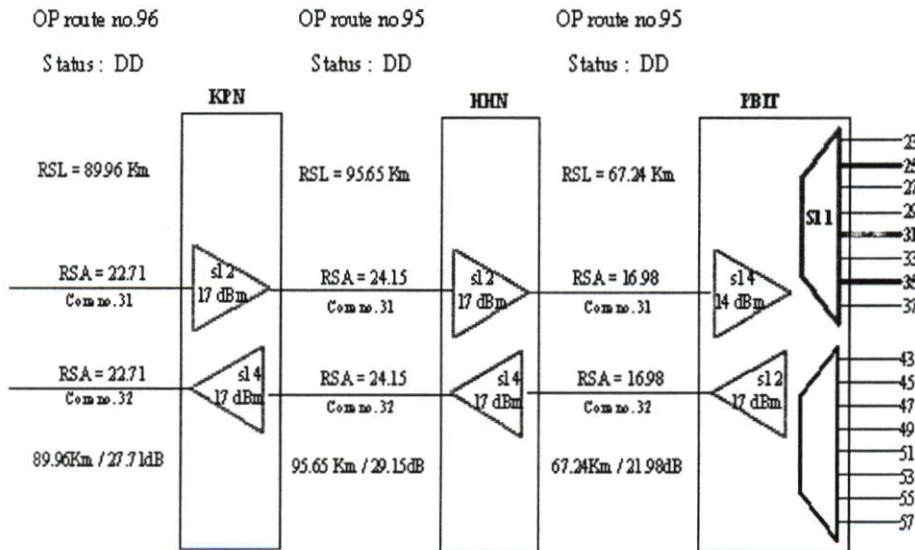
WLA + FEC, 12800 ps/nm  
Total CD = 10946.5 ps/nm



รูปที่ 3.16 WDM Section 14.2

Section 14.2 -KAB - PBIT - 16 λ (page 2)

WLA + FEC, 12800 ps/nm  
Total CD = 10969.2 ps/nm



รูปที่ 3.16 (ต่อ)

## บทที่ 4

# การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์

ในบทนี้จะนำเสนอผลการวัดและการวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการทดสอบ 16 ส่วน (section) โดยใช้การเก็บผลในรูปแบบของตารางและนำมาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่ทำให้ค่าโอเอสเอ็นอาร์เปลี่ยนแปลง จากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาทำการกำหนดคุณลักษณะโอเอสเอ็นอาร์ของคัมเบิลยูติเอ็มแต่ละส่วน

วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่าสูญเสีย(loss)ระหว่างช่วง(span)ให้มีค่าสูญเสียในส่วนของ การเชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสง(splicing) = 0.05 dB/ point, ค่าการลดทอนของเคเบิลใยแก้วนำแสง (line attenuation) = 0.2525 dB/ km, ค่าสูญเสียจากอุปกรณ์เชื่อมต่อ(connector loss) = 0.5 dB/ connector ตามคำแนะนำใน ITU-T Recommendation G.652[12] และมีระยะทางของเคเบิลต่อ roll = 4 km และใช้ระยะทางจริงจากการออกแบบติดตั้งเส้นใยแก้วที่ใช้ในการเชื่อมโยงระบบ โดยได้แบ่งการวิเคราะห์ดังนี้

1. วิเคราะห์ความสัมพันธ์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานต่อระยะทาง (C&R) ในทุกๆ section และทุกช่องสัญญาณ
2. วิเคราะห์ความสัมพันธ์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดที่ความยาวคลื่นเต็มระบบ(F&R)ต่อ ระยะในหลายๆ section และทุกช่องสัญญาณ
3. วิเคราะห์ความสัมพันธ์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะ ทางบวกการลดทอนที่เพิ่มขึ้นspan ละ 5 dB(F&M) ในทุกๆ section และทุกช่องสัญญาณ
4. วิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดกับการคำนวณ

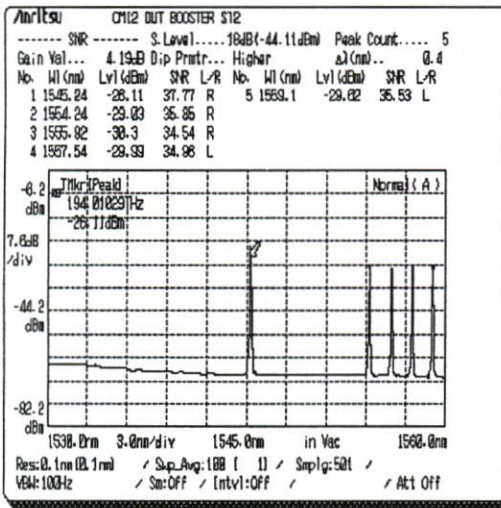
### 4.1 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานต่อระยะทาง(C&R)

ในส่วนนี้จะนำเสนอผลการวัดและการวิเคราะห์ค่าจากการวัดโอเอสเอ็นอาร์ที่แต่ละช่อง สัญญาณต่อระยะทางโดยจำนวนของช่องสัญญาณที่จะทำการวัดขึ้นอยู่กับการใช้งานในปัจจุบันของ โครงข่ายในแต่ละ section ที่ความเร็ว 2.5Gbps ในระบบ SDH STM-16 ตารางที่ 4.1 แสดงตัวอย่าง ค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานจากการวัดที่ section 1.1 เชียงใหม่ 2 (CMI2) ถึงเวียงสา (SAA) มีความยาวคลื่นใช้งานอยู่ 4 ความยาวคลื่น(channel 23,25,27,29) ระยะทางรวม 468.19 กม. มีระยะทางเฉลี่ยระหว่าง span 117.548 กม.ต่อ span โดยที่สถานีเชียงใหม่2 (CMI2) ซึ่งเป็นสถานี ต้นทางจะมีโอเอสเอ็นอาร์เฉลี่ยของแต่ละช่องสัญญาณอยู่ที่ประมาณ 35 dB และโอเอสเอ็นอาร์ที่ สถานีเวียงสา (SAA) ซึ่งเป็นสถานีปลายทางจะมีค่าโอเอสเอ็นอาร์เฉลี่ยของแต่ละช่องสัญญาณอยู่ที่ ประมาณ 25 dB โดยมี Lambda Saturation(หมายเลข 1 จากกราฟ) เป็นตัวชดเชยกำลังงานของทุก

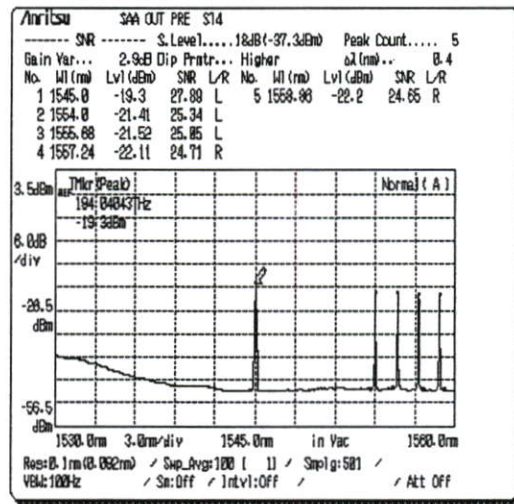
ช่องสัญญาณรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) แสดงผลที่ได้จากเครื่องมือวัด (Optical Spectrum Analyzer : OSA) ค่าที่วัดได้ที่สถานีปลายทางเป็นค่าของโอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดหลังจากสัญญาณผ่านสถานีทวนสัญญาณ 3 สถานีเราพบว่าค่าของโอเอสเอ็นอาร์จะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ของค่าโอเอสเอ็นอาร์กับระยะทางแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าของโอเอสเอ็นอาร์จะลดลงตามระยะทางสะสมที่เพิ่มขึ้นคิดเป็นค่าเฉลี่ยต่อกิโลเมตรประมาณ 0.022 dB/km ตารางที่ 4.2 แสดงการบันทึกผลการวัดของทุก section โดยค่าที่บันทึกในตารางเป็นค่าโอเอสเอ็นอาร์เฉลี่ยจากผลการวัดของทุกช่องสัญญาณ และผลการวัดจาก Optical Spectrum Analyzer(OSA) แสดงในหัวข้อที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งาน section 1.1

Ch.	Lambda	Freq.	Direction			
	(nm)	(THz)	Term.A	Term.B	Term.B	Term.A
23	1558.98	192.3	35.53	24.65	32.27	24.7
25	1557.36	192.5	34.96	24.71	31.98	25.05
27	1555.75	192.7	34.54	25.05	31.38	24.25
29	1554.13	192.9	35.85	25.34	30.61	23.54



(ก)



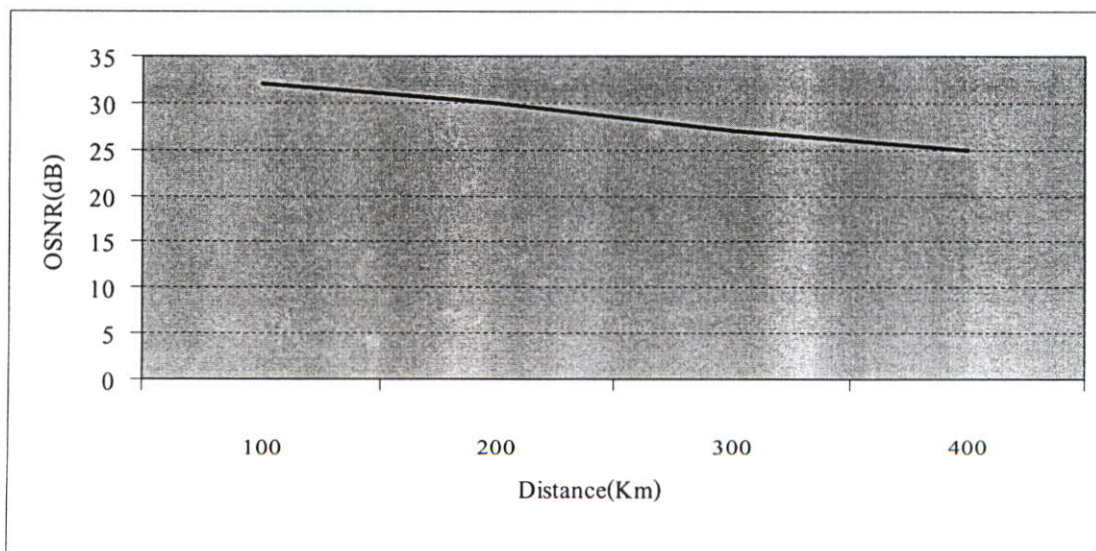
(ข)

รูปที่ 4.1 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์จากเครื่องมือวัดที่ความยาวคลื่นใช้งาน section 1.1

(ก) สถานีต้นทาง , (ข) สถานีปลายทาง

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานต่อระยะทาง(C&R) ที่ทุก section

SECTION	Distance (Km)	Number of Wavelength	Number of span	OSNR (dB)				dB/Km	
				Terminal A	Terminal B	Terminal B	Terminal A	A to B	B to A
1.1	468.19	4	4	35.22	24.9375	31.56	24.385	0.022	0.0153
1.2	352.04	4	4	32.288	26.87	32.675	26.183	0.0182	0.0184
2	408.06	4	5	33.77	27.03	33.77	26.843	0.0165	0.017
4	251	11	3	33.341	26.039	33.341	25.665	0.0291	0.0306
5	62.11	5	1	34.09	32.828	34.344	32.932	0.0203	0.0227
6	247.2	5	3	33.006	27.148	33.774	27.906	0.0237	0.0237
7.1	387.5	12	4	32.116	23.603	33.246	26.150	0.022	0.0183
7.2	416.66	12	5	35.825	26.969	36.409	25.513	0.021	0.026
8	745.39	4	8	33.975	25.5025	34.275	25.7125	0.0114	0.0115
9	335.44	12	3	35.697	25.673	34.753	24.126	0.0299	0.0317
10	97.85	2	2	33.173	31.540	33.454	31.153	0.017	0.024
11	137.85	7	1	34.414	25.262	35.118	25.897	0.066	0.067
12	563.8	3	6	33.99	27.253	35.210	26.357	0.012	0.016
14.1	619.93	3	7	35.943	28.210	34.060	28.020	0.012	0.010
14.2	542.16	3	6	36.03	31.013	35.293	30.750	0.009	0.008
16	86.03	5	1	34.086	31.488	33.946	30.372	0.030	0.042



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบ โอเอสเอ็นอาร์กับระยะทางสะสม section 1.1

## 4.2 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทาง (F&R)

ในส่วนนี้จะนำเสนอผลการวัดและการวิเคราะห์ค่าจากการวัด โอเอสเอ็นอาร์ที่แต่ละช่องสัญญาณต่อระยะทาง (F&R) โดยจะทำการเพิ่มความยาวคลื่นจากความยาวคลื่นที่ใช้งานเป็นความยาวคลื่นเต็มระบบ(16 ช่องสัญญาณ)ของโครงข่ายในแต่ละ section ที่ความเร็ว 2.5Gbps ในระบบ SDH STM-16 ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยของช่องสัญญาณที่ได้จากการวัดโดยใช้ OSA ที่ระยะทางเท่ากันเราพบว่าค่าของโอเอสเอ็นอาร์จะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นเหมือนการวัดแบบ C&R แต่มีค่าการลดทอนมากกว่าในแบบ C&R เนื่องจากจำนวนของความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นในแต่ละ section โดยในหัวข้อนี้จะให้ความสนใจการลดทอนของ โอเอสเอ็นอาร์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากจำนวนของความยาวคลื่นที่เพิ่ม ตารางที่ 4.4 แสดงการจับกลุ่มของ section ตามจำนวนของความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มความยาวคลื่นเข้าไปในระบบจะทำให้ค่าการลดทอนในระบบจะเพิ่มตาม ที่การเพิ่มจำนวนขึ้นของความยาวคลื่นต่างๆ กันจากตารางที่ 4.4 เราพบว่าค่าของการลดทอนที่เกิดขึ้นจะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่มีผลกับการลดทอนของสัญญาณได้แก่ จำนวนของ span และระยะทางระหว่างสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทาง ระดับของการเพิ่มขึ้นของการลดทอนนี้จะทำการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของการลดทอนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการจำนวนความยาวคลื่นในระบบที่ถูกเพิ่มขึ้นตามการทดสอบ

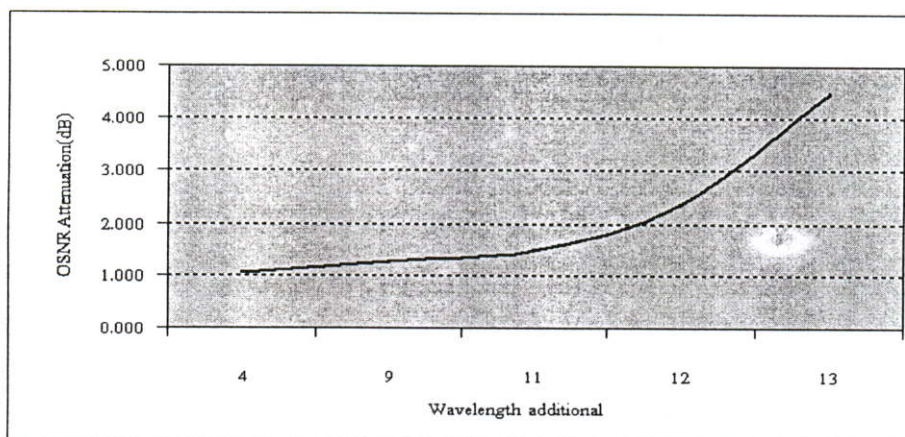
การวิเคราะห์ผลการวัดในการทดสอบแบบ F&R จะกำหนดให้ระยะทางและจำนวนของ span ในแต่ละ section มีค่าคงที่และไม่มีผลกระทบต่อค่าโอเอสเอ็นอาร์ จะพบว่าจำนวนของความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นในระบบจะมีผลโดยตรงกับระดับสัญญาณของ โอเอสเอ็นอาร์โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับการเพิ่มความยาวคลื่นในระบบ และมีความสัมพันธ์แบบแปรผันโดยตรงกับค่าการลดทอนของโอเอสเอ็นอาร์ หมายความว่าถ้ามีการเพิ่มความยาวคลื่นเข้าสู่ระบบจะทำให้ระดับสัญญาณของโอเอสเอ็นอาร์ที่สถานีปลายทางมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าการลดทอนของโอเอสเอ็นอาร์จากสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทางจะมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการวัดจาก Optical Spectrum Analyzer(OSA) แสดงหัวข้อที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นเดิมระบบต่อระยะทาง (F&R) ที่ทุก section

Section	Distance (km)	Number of Wavelength	Number of span	OSNR (dB)				Attenuation(dB/km)	
				Terminal A	Terminal B	Terminal B	Terminal A	A to B	B to A
1.1	468.19	4	4	35.22	24.9375	31.56	24.385	0.022	0.0153
1.2	352.04	4	4	32.288	26.87	32.675	26.183	0.0182	0.0184
2	408.06	4	5	33.77	27.03	33.77	26.843	0.0165	0.017
4	251	11	3	33.341	26.039	33.341	25.665	0.0291	0.0306
5	62.11	5	1	34.09	32.828	34.344	32.932	0.0203	0.0227
6	247.2	5	3	33.006	27.148	33.774	27.906	0.0237	0.0237
7.1	387.5	12	4	32.116	23.603	33.246	26.150	0.022	0.0183
7.2	416.66	12	5	35.825	26.969	36.409	25.513	0.021	0.026
8	745.39	4	8	33.975	25.5025	34.275	25.7125	0.0114	0.0115
9	335.44	12	3	35.697	25.673	34.753	24.126	0.0299	0.0317
10	97.85	2	2	33.173	31.540	33.454	31.153	0.017	0.024
11	137.85	7	1	34.414	25.262	35.118	25.897	0.066	0.067
12	563.8	3	6	33.99	27.253	35.210	26.357	0.012	0.016
14.1	619.93	3	7	35.943	28.210	34.060	28.020	0.012	0.010
14.2	542.16	3	6	36.03	31.013	35.293	30.750	0.009	0.008
16	86.03	5	1	34.086	31.488	33.946	30.372	0.030	0.042

ตารางที่ 4.4 โอเอสเอ็นอาร์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อจำนวนของความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น (C&R to F&R)

Section	Distance (km)	Number of span	Wavelength Addition (Lambda)	C&R to F&R Attenuation (dB)	
				A to B	B to A
12	563.8	6	13	3.445	3.337
14.1	619.93	7	13	4.855	2.843
14.2	542.16	6	13	5.140	6.646
1.1	468.19	4	12	1.886	3.822
1.2	352.04	4	12	2.261	3.171
2	408.06	5	12	2.868	3.211
8	745.39	8	12	2.489	3.013
5	62.11	1	11	0.707	0.740
6	247.2	3	11	2.553	2.837
16	86.03	1	11	1.129	1.312
10	97.85	2	9	1.721	0.947
11	137.85	1	9	0.787	0.301
4	251	3	5	1.988	0.110
7.1	387.5	4	4	0.332	0.621
7.2	416.66	5	4	1.973	-0.675
9	335.44	3	4	0.810	0.806



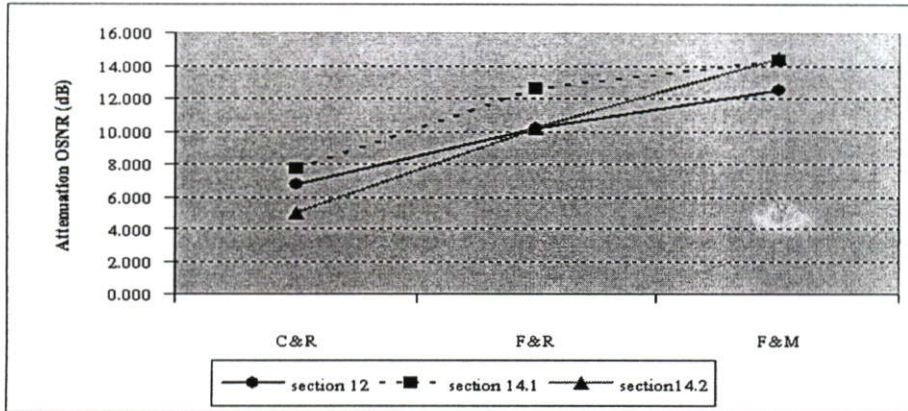
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของการลดทอนกับจำนวนความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้น

### 4.3 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทางบวกการลดทอน 5 dB (F&M)

ในส่วนนี้จะนำเสนอผลการวัดและการวิเคราะห์ค่าจากการวัดโอเอสเอ็นอาร์ที่แต่ละช่องสัญญาณต่อระยะทางบวกการลดทอนที่เพิ่มขึ้น span ละ 5 dB(F&M)ในทุกๆ section และทุกช่องสัญญาณ โดยเป็นการวิเคราะห์ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์หลังจากทำการเพิ่มความค่าการลดทอนในแต่ละ span โดยการเพิ่มตัวลดทอนแบบคงที่ (Fix attenuator) span ละ 5 dB ที่ความยาวคลื่นเต็มระบบ (16 ช่องสัญญาณ) ของโครงข่ายในแต่ละ section ที่ความเร็ว 2.5Gbps ในระบบ SDH STM-16 ค่าเฉลี่ยของทุกๆ ช่องสัญญาณที่ได้จากผลการวัดโดยใช้ OSA แสดงในตารางที่ 4.5 ที่ระยะทางและความยาวคลื่นเต็มระบบ (16 ช่องสัญญาณ) เท่ากันกับการทดสอบในแบบ C&R และ F&R เราพบว่าค่าของโอเอสเอ็นอาร์จะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นเหมือนการวัดแบบ C&R และ F&R แต่มีค่าการลดทอนมากกว่าในแบบ C&R เนื่องจากจำนวนของความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นในแต่ละ section และมีค่าการลดทอนของโอเอสเอ็นอาร์มากกว่าในแบบ F&R เนื่องจากการเพิ่มความค่าการลดทอนเข้าไปในระบบโดยที่ระยะทางยังคงเท่ากันกับการทดสอบในแบบ C&R และ F&R

การเพิ่มความค่าการลดทอน 5 dB ในการทดสอบนี้เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าโอเอสเอ็นอาร์ในกรณีที่ค่าการลดทอนในเส้นใยแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งาน, สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง, การซ่อมหรือปรับปรุงเส้นใยแก้วที่มีผลทำให้ค่าการลดทอนในเส้นใยแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นจากการเปรียบเทียบการลดทอนของโอเอสเอ็นอาร์ที่การทดสอบในทุกๆ แบบพบว่า จำนวนความยาวคลื่นและการลดทอนของเส้นใยแก้วจะมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าโอเอสเอ็นอาร์ ตัวอย่างจากตารางที่ 4.6 ที่ section 12, 14.1, 14.2 จะมีการเพิ่มความยาวคลื่นขึ้นจาก 3 ช่องสัญญาณเป็น 16 ช่องสัญญาณหรือมีการเพิ่มความยาวคลื่นจำนวน 13 ความยาวคลื่น มีการลดทอนของโอเอสเอ็นอาร์จากสถานี A ถึงสถานี B เพิ่มขึ้น 3.44 dB และเมื่อเพิ่มความค่าการลดทอน 5 dB ค่าการลดทอนของโอ

เอสเอ็นอาร์จะเพิ่มขึ้นอีก 2.346 dB แสดงให้เห็นว่าจำนวนของความยาวคลื่นและการลดทอนมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับโอเอสเอ็นอาร์ เมื่อนำผลการวัดมาทำการพล็อตกราฟจะทำให้เห็นความสัมพันธ์ได้ชัดเจนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าแนวโน้มของการลดทอนของโอเอสเอ็นอาร์จะมีค่าที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความยาวคลื่นและค่าการลดทอนที่เพิ่มขึ้นจากการทดสอบแบบต่างที่ได้กำหนดไว้ในงานวิจัยนี้นั่นเอง ตัวอย่างผลการวัดจาก Optical Spectrum Analyzer(OSA) แสดงในหัวข้อที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างเปรียบเทียบการลดทอนของโอเอสเอ็นอาร์ที่การทดสอบแบบต่างๆของ section 12, 14.1 และ 14.2

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทางบวกค่าการลดทอน

Section	Distance (km)	Number of Wavelength	Number of span	OSNR (dB)				Attenuation(dB/Km)	
				Terminal A	Terminal B	Terminal B	Terminal A	A to B	B to A
1.1	468.19	16	4	33.732	17.136	32.025	17.300	0.035	0.031
1.2	352.04	16	4	30.816	20.676	32.522	20.273	0.029	0.035
2	408.06	16	5	32.377	20.284	32.618	20.246	0.030	0.030
4	251	16	3	33.835	17.856	31.631	18.379	0.064	0.053
5	62.11	16	1	33.115	29.166	33.449	29.213	0.064	0.068
6	247.2	16	3	32.399	18.051	32.684	18.136	0.058	0.059
7.1	387.5	16	4	31.576	17.913	32.561	17.913	0.035	0.038
7.2	416.66	16	5	38.153	23.376	35.009	20.296	0.035	0.025
8	745.39	16	8	32.620	17.941	33.609	18.056	0.020	0.021
9	335.44	16	3	35.174	16.766	34.884	17.119	0.055	0.053
10	97.85	16	2	32.139	27.159	33.029	25.566	0.051	0.076
11	137.85	16	1	34.055	17.753	34.530	18.417	0.118	0.117
12	563.8	16	6	32.287	19.760	34.558	19.313	0.022	0.027
14.1	619.93	16	7	35.403	21.084	31.753	20.849	0.023	0.018
14.2	542.16	16	6	35.398	20.957	35.423	19.802	0.027	0.029
16	86.03	16	1	32.882	24.635	32.701	22.676	0.096	0.117

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบการลดทอนของโอเอสเอ็นอาร์ที่การทดสอบแบบต่างๆ

Section	Distance (km)	Number of span	Addition	Attenuation OSNR(C&R)		Attenuation OSNR(F&R)		Attenuation OSNR(F&M)	
				A to B	B to A	A to B	B to A	A to B	B to A
12	563.8	6	13	6.737	8.853	10.181	12.191	12.527	15.244
14.1	619.93	7	13	7.733	6.040	12.589	8.883	14.319	10.904
14.2	542.16	6	13	5.017	4.543	10.157	11.189	14.441	15.621
1.1	468.19	4	12	10.283	7.175	12.169	10.997	16.596	14.725
1.2	352.04	4	12	5.418	6.492	7.679	9.663	10.140	12.249
2	408.06	5	12	6.740	6.927	9.608	10.138	12.093	12.372
8	745.39	8	12	8.473	8.563	10.961	11.576	14.679	15.553
5	62.11	1	11	1.262	1.412	1.969	2.152	3.949	4.236
6	247.2	3	11	5.858	5.868	8.411	8.705	14.348	14.548
16	86.03	1	11	2.598	3.574	3.727	4.886	8.247	10.024
10	97.85	2	9	1.633	2.301	3.354	3.249	4.981	7.463
11	137.85	1	9	9.153	9.222	9.940	9.523	16.302	16.113
4	251	3	5	7.302	7.676	9.289	7.786	15.979	13.253
7.1	387.5	4	4	8.513	7.096	8.844	7.717	13.663	14.648
7.2	416.66	5	4	8.856	10.896	10.829	10.221	14.778	14.714
9	335.44	3	4	10.023	10.628	10.833	11.433	18.408	17.765

#### 4.4 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดเปรียบเทียบกับการคำนวณ

##### 4.4.1 การคำนวณ OSNR จาก ITU-T G.692

ในงานวิจัยนี้จะทำการคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์จากสมการที่ I-3 ใน Recommendation ITU-T G.692 [13] พารามิเตอร์ที่สำคัญมีดังนี้

1. กำลังงานของช่องสัญญาณ  $P_{out}$  จากการระบุคุณสมบัติของอุปกรณ์มีค่า 0 dB [11]
2. Noise figure ของ Amplifier  $NF$  มีค่า 5 dB [11]
3.  $10\text{Log}[h\nu\Delta\nu_0]$  มีค่า -58 dB ในความยาวคลื่น 1.550 nm ที่ resolution bandwidth

0.1 nm [13]

สูตรการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์มีดังนี้

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10\text{Log}N - 10\text{Log}[h\nu\Delta\nu_0] \quad \text{dB} \quad (4.1)$$

ค่าของ  $L$  ได้มาจากสมการ

$$L = [D/4 * A] + [D * B] + [2 * C] \quad \text{dB} \quad (4.2)$$

โดยที่ในงานวิจัยนี้กำหนดให้

1. ค่าของ Splicing attenuation  $A = 0.05$  dB/Point
2. ค่าของ Line attenuation  $B = 0.025$  dB/Km
3. ค่าของ Connector loss  $C = 0.5$  dB/connector
4.  $D$  เป็นความยาวของเคเบิล ในหน่วย Km

ในสมการที่ (4.1) ค่า  $P_{out}$  เป็นค่าที่ได้จากคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ,  $P_{out}$  หมายถึง กำลังงานขาออกต่อช่องสัญญาณ ในหน่วย dB,  $NF$  หมายถึง External Noise figure ในหน่วย dB[14],  $L$  หมายถึงการลดทอนของ span ระหว่าง Amplifier ในหน่วย dB,  $\Delta\nu_0$  หมายถึง Optical Bandwidth,  $N$  หมายถึง จำนวนของ span ในช่วงระหว่างเทอร์มินัลถึงเทอร์มินัล,  $\nu$  หมายถึง optical frequency 193 THz,  $h$  หมายถึง Plank'constant ( $6.6260 \times 10^{-34}$ ) โดยใน ITU-T G.692 สมมติให้ทุกๆ span มีค่าเท่าๆ กันและกำหนดไว้ว่าในความยาวคลื่น 1550 nm ที่ optical bandwidth 0.1 nm ให้ค่าของ  $10 \log [h\nu\Delta\nu_0]$  มีค่า  $-58$  dB ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า  $L$  ที่ได้จากการคำนวณจากระยะทางที่ได้มาจากแบบการติดตั้งเคเบิล โดยใช้สมการที่ (4.2) ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหา  $L$  เราได้มาจากคำแนะนำใน ITU-T G.652 ซึ่งจะเห็นว่าค่าการลดทอนของแต่ละ span จะมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสถานที่ติดตั้งอุปกรณ์เมื่อได้ค่าของ  $L$  แล้วจึงนำมา ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าของโอเอสเอ็นอาร์ในสมการที่ (4.1) ในงานวิจัยนี้เราจะทำการคำนวณค่าของโอเอสเอ็นอาร์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณใดช่องสัญญาณหนึ่ง และใช้ความยาวคลื่น channel 23 (192.3 THz) ซึ่งเป็นช่องสัญญาณแรกของระบบที่ใช้ในการทดสอบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด สาเหตุที่ใช้ค่าจากช่องสัญญาณเพียงช่องสัญญาณเดียวเนื่องจากในการคำนวณจะใช้พารามิเตอร์ค่าเดียวในทุกๆ ช่องสัญญาณ ดังนั้นจึงตั้งสมมุติฐานได้ว่าทุกๆ ช่องสัญญาณมีค่าพารามิเตอร์เท่ากัน

#### 4.4.2 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ

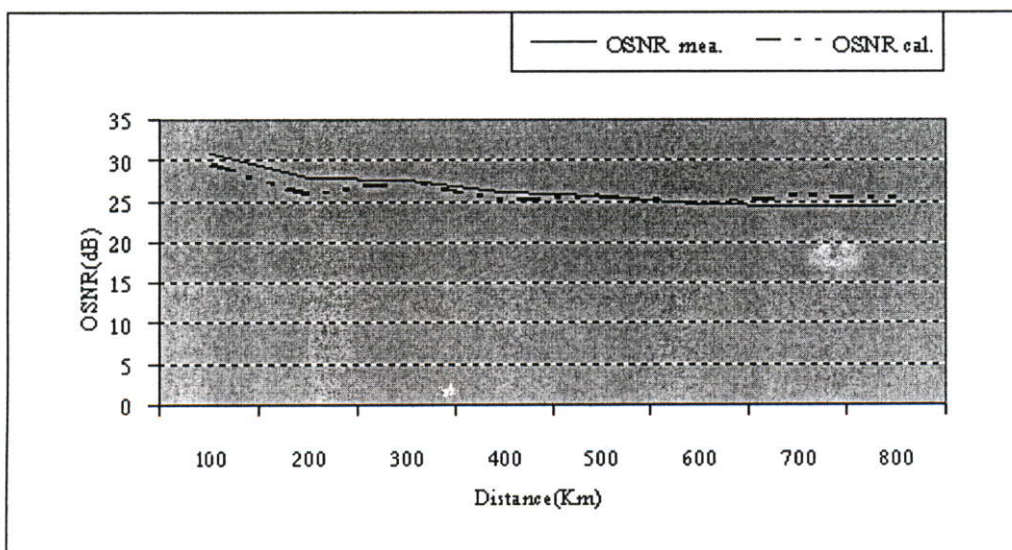
การคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ในงานวิจัยนี้จะทำการคำนวณตามสมการใน ITU-T G.692 โดยจะทำการคำนวณจากสถานีต้นทาง (Terminal A) ถึงสถานีปลายทาง (Terminal B) ที่ทุก section และทำการวัดและคำนวณในส่วนของ section 8 ที่ทุกๆ สถานีจาก Terminal B (เชียงใหม่) ถึง Terminal A (อยุธยา) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการคำนวณโดยละเอียด โดยในการวัด section 8 จะใช้ผลการวัดในแบบความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทาง (F&R) และใช้พารามิเตอร์ในแบบ F&R มาคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์เพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นระหว่างการวัดและการคำนวณ

ตารางที่ 4.7 รายละเอียดการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ของ section 8

Station	Distance(km)	OSNR	$P_{out}$	$L$	NF	$10\text{Log}N$	$10L \text{og}[h\nu \Delta\nu_0]$	$N$
CMI2-LPG	112.34	24.63	0	28.37	5	0	-58	1
LPG-MPK	117.97	20.91	0	29.08	5	3.01	-58	2
MPK-TAK	75.93	22.45	0	25.78	5	4.77	-58	3
TAK-KKG	116.86	20.27	0	26.71	5	6.02	-58	4
KKG-NSN	78	20.70	0	25.31	5	6.99	-58	5
NSN-CNT	103.13	19.79	0	25.43	5	7.78	-58	6
CNT-SBR	58.13	20.65	0	23.90	5	8.45	-58	7
SBR-AYA	82.85	20.44	0	23.53	5	9.03	-58	8

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์ของ section 8

Station	Distance(km)	OSNR cal.	OSNR mea.	OSNR diff.
CMI2-LPG	112.34	29.63	30.85	1.22
LPG-MPK	117.97	25.91	28	2.09
MPK-TAK	75.93	27.45	27.51	0.06
TAK-KKG	116.86	25.27	26.19	0.92
KKG-NSN	78	25.70	25.72	0.02
NSN-CNT	103.13	24.79	24.53	-0.26
CNT-SBR	58.13	25.65	24.43	-1.22
SBR-AYA	82.85	25.44	24.31	-1.13



รูปที่ 4.5 โอเอสเอ็นอาร์ จากการวัดเปรียบเทียบกับคำนวณ

ค่าจากการคำนวณเปรียบเทียบกับการวัดของ section 8 ที่ได้จากการทดสอบจะพบว่าค่าของโอเอสเอ็นอาร์จากการคำนวณ(OSNR cal.)กับค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัด(OSNR mea.) มีค่าของโอเอสเอ็นอาร์ที่แตกต่าง(OSNR diff) สาเหตุเนื่องมาจากการติดตั้งใช้งานจริงไม่สามารถใช้ระยะทางที่เท่าๆกันทุกช่วงของสถานี เพราะในการติดตั้งใช้งานจริงเราจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ตามสถานีที่มีอยู่เดิมทำให้ไม่สามารถกำหนดระยะทางระหว่างสถานีให้เท่ากันทุกๆ ช่วงสถานีได้ ดังนั้นในการคำนวณค่า  $L$  จึงต้องทำการเฉลี่ยค่า  $L$  ที่ทุกๆ span ที่เพิ่มขึ้นและค่า  $L$  ที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าที่คำนวณมาจากระยะทางตามแบบการติดตั้งเคเบิลจริง ซึ่งในการติดตั้งอาจมีตัวแปรหลายตัวแปรที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปได้ เช่นค่าของการลดทอนจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว (Splicing Attenuation :  $A$ ) ซึ่งในการติดตั้งจริงค่าที่ได้ อาจจะมีค่าที่มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ใน การคำนวณก็ได้หรือค่าของการลดทอนในเส้นใยแก้ว (Line Attenuation :  $B$ ) ของเคเบิลก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพในการผลิตของผู้ผลิตหรือค่าของอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Connector Loss :  $C$ ) ก็อาจจะมีค่าที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในสมการซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะทำให้ค่าของ  $L$  ที่ใช้ในการคำนวณเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลทำให้ค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่คำนวณได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองทำการกำหนดค่าชดเชยการความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวแปรต่างๆ ไว้ 5 dB ที่ทุกๆ span ของ section 8 ผลจากการคำนวณเปรียบเทียบกับการวัดที่ได้จะมีค่าความแตกต่างจากการคำนวณและการวัดที่ไม่แตกต่างกันมากดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.5 และผลการวัดเปรียบเทียบการคำนวณแบบไม่มีการชดเชยค่าคลาดเคลื่อนของทุก section แสดงในตารางที่ 4.9

จากผลที่ได้ถ้าอยากทราบว่า จะต้องทำการปรับปรุงค่าโอเอสเอ็นอาร์เมื่อใดสามารถทำได้ โดยจะต้องรู้ค่าโอเอสเอ็นอาร์ต่ำสุดที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้และระยะทางรวมทั้งหมดตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็มมีค่าโอเอสเอ็นอาร์ต่ำสุดที่สามารถทำงานได้ 19 dB ที่ BER  $10^{-12}$  และมีค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่สถานีต้นทาง 30 dB ถ้าระยะทางจากต้นทางถึงปลายทาง 900 กม. จะได้ค่าการลดทอนของโอเอสเอ็นอาร์ประมาณ 11.7 dB เมื่อนำค่าที่ได้นี้ไปลบออกจากค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่สถานีต้นทาง 30 dB จะได้ค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ปลายทางประมาณ 18.3 dB ทำให้ทราบว่าควรจะต้องมีการปรับปรุงค่าโอเอสเอ็นอาร์ซึ่งสามารถทำได้โดยการตั้ง Terminal ขึ้นใหม่และเรายังสามารถนำผลการทดลองที่ได้นี้ไปทำการวิเคราะห์ปัญหาของระบบในกรณีที่เกิดความผิดพลาด (Error) ขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านระบบดับเบิลยูดีเอ็มได้ การคำนวณโอเอสเอ็นอาร์จากสมการใน ITU-T G.692 พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีผลลัพธ์ที่มีค่าแตกต่างออกไปจากค่าที่ได้จากการวัด ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบนี้เกิดจากหลายสาเหตุที่สำคัญ ได้แก่ระยะทางระหว่างแต่ละสถานีที่มีค่าไม่เท่ากัน, ค่าความคลาดเคลื่อนจากตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่า  $L$  กับค่าจากการติดตั้งเคเบิลใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าจากการคำนวณมีการคลาดเคลื่อนออกไปจากค่าจากการวัด

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์ของทุก section

SECTION		1.1				1.2			
Ch.	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	
	C&R	F&R	F&M		C&R	F&R	F&M		
23	24.65	22.18	17.7	17.425	27.49	25.13	21.05	24.757	
25	24.71	21.85	17.3	17.425	26.07	23.86	21.6	24.757	
27	25.05	22.46	17.4	17.425	26.6	24.27	21.46	24.757	
29	25.34	22.55	17.37	17.425	27.32	24.7	21.54	24.757	
31		22.34	16.54	17.425		24.71	20.82	24.757	
33		21.81	17.39	17.425		24.54	21.52	24.757	
35		22.09	17.78	17.425		24.35	21.39	24.757	
37		22.22	17.17	17.425		24.6	21.35	24.757	
43		20.78	16.69	17.425		22.99	20.27	24.757	
45		20.8	16.48	17.425		23.39	20.62	24.757	
47		22.55	17.77	17.425		23.13	20.18	24.757	
49		20.76	16.73	17.425		22.04	20.29	24.757	
51		20.63	16.62	17.425		21.96	19.61	24.757	
53		21.23	17.59	17.425		20.27	19.44	24.757	
55		20.61	16.89	17.425		20.18	19.76	24.757	
57		20.15	16.76	17.425		20.07	19.92	24.757	
SECTION		2				4			
Ch.	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	
	C&R	F&R	F&M		C&R	F&R	F&M		
23	27.39	25.36	21.49	25.401	26.3	25.99	18.03	27.103	
25	26.77	24.65	20.71	25.401	26.4	25.64	18.36	27.103	
27	27	25	20.31	25.401	25.88	25.04	18.09	27.103	
29	26.96	24.61	21.31	25.401	25.51	24.62	17.52	27.103	
31		23.48	19.64	25.401	25.77	24.92	17.73	27.103	
33		23.7	20.02	25.401	26.41	25.45	18.57	27.103	
35		23.12	19.44	25.401	25.2	24.61	17.84	27.103	
37		23.31	20.05	25.401	26.66	25.86	18.54	27.103	
43		22.11	20.02	25.401	25.78	24.58	17.66	27.103	
45		22.8	20.03	25.401	25.94	25.19	18.25	27.103	
47		22.13	20.17	25.401	26.58	25.68	18.46	27.103	
49		22.25	20.21	25.401		24.16	17.67	27.103	
51		21.05	19.72	25.401		23.66	17.02	27.103	
53		20.63	20.58	25.401		22.93	17.14	27.103	
55		19.94	20.27	25.401		22.26	17.51	27.103	
57		20.17	20.58	25.401		22.14	17.3	27.103	
SECTION		5				6			
Ch.	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	
	C&R	F&R	F&M		C&R	F&R	F&M		
23	33.01	32.17	30.54	37.317	27.24	25.76	18.51	26.089	
25	33.19	31.37	29.93	37.317	27.16	25.76	18.61	26.089	
27	32.19	31.13	29.59	37.317	27.16	25.8	19.11	26.089	
29	32.77	31.64	30.06	37.317	27.37	25.77	19.29	26.089	
31	32.98	31.98	29.87	37.317	26.81	25.15	18.64	26.089	
33		31.61	29.42	37.317		24.69	17.78	26.089	
35		30.93	29.52	37.317		25.3	18.59	26.089	
37		31.51	29.73	37.317		24.5	18.13	26.089	
43		31.12	28.98	37.317		23.75	17.41	26.089	
45		31.59	29.45	37.317		23.24	17.37	26.089	
47		30.58	28.63	37.317		23.59	17.45	26.089	
49		30.77	28.76	37.317		23.24	17.37	26.089	
51		30.44	28.29	37.317		22.76	17.46	26.089	
53		30.19	27.75	37.317		22.05	17.46	26.089	
55		30.55	27.87	37.317		21.42	17.47	26.089	
57		30.75	28.27	37.317		21.02	18.17	26.089	
SECTION		7.1				7.2			
Ch.	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	
	C&R	F&R	F&M		C&R	F&R	F&M		
23	23.99	23.55	18.13	23.002	26.04	26.02	20.64	24.969	
25	24.17	23.7	17.67	23.002	25.44	25.44	20.76	24.969	
27	23.5	23.09	17.42	23.002	25.65	25.82	21.15	24.969	
29	23.47	23.06	17.28	23.002	25.11	25	20.13	24.969	
31	23.52	22.97	17.17	23.002	30.53	30.28	25.94	24.969	
33	23.76	23.22	17.55	23.002	30.49	29.98	25.7	24.969	
35	24.44	23.85	17.74	23.002		29.83	25.8	24.969	
37	23.93	23.57	18.28	23.002		30.72	28.47	24.969	
43	22.93	22.35	18.01	23.002	31.05	29.99	25.75	24.969	
45	23.11	22.54	18.13	23.002		29.26	25.56	24.969	
47	23.44	22.77	18.42	23.002	30.1	28.65	25.24	24.969	
49	22.98	22.41	18.24	23.002	25.69	29.96	25.96	24.969	
51		21.52	17.81	23.002	24.14	24.93	20.61	24.969	
53		21.82	18.76	23.002	24.38	24.74	20.1	24.969	
55		21.61	17.64	23.002	25.01	22.23	21.02	24.969	
57		21.68	18.36	23.002		24.34	21.18	24.969	

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

SECTION 8					9			
Ch.	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)
	C&R	F&R	F&M		C&R	F&R	F&M	
23	26.07	24.39	18.45	20.537	26.86	26.05	17.65	19.995
25	25.39	24.03	18.29	20.537	26.39	25.77	17.41	19.995
27	25.31	23.58	18.43	20.537	25.75	25.32	16.66	19.995
29	25.24	23.29	18.35	20.537	26.32	25.59	16.63	19.995
31	27.51	22.6	17.28	20.537	25.57	24.86	17.09	19.995
33		22.87	17.72	20.537	25.45	24.89	16.85	19.995
35		21.93	16.98	20.537	25.27	25.03	16.64	19.995
37		22.2	17.68	20.537	25.05	24.33	16.78	19.995
43		22.22	18.86	20.537	25.46	24.81	17.16	19.995
45		21.96	18.48	20.537	25.61	25.01	16.41	19.995
47		21.14	18.6	20.537	25.23	24.35	16.78	19.995
49		19.87	17.5	20.537	25.12	24.13	17.05	19.995
51		20.2	18.51	20.537		23	16.16	19.995
53		18.59	17.13	20.537		22.32	16.03	19.995
55		19.14	17.19	20.537		22.2	16.59	19.995
57		19.65	17.61	20.537		21.79	16.36	19.995
SECTION 10					11			
Ch.	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)
	C&R	F&R	F&M		C&R	F&R	F&M	
23	29.96	28.78	26.21	38.875	25.58	24.85	18.48	18.193
25	30.85	29.59	27.42	38.875	25.03	24.16	18.21	18.193
27	30.83	29.58	27.64	38.875	25.14	24.32	18.39	18.193
29	29.36	27.91	25.7	38.875	25.1	24.04	18.42	18.193
31	34.2	32.33	30.78	38.875	25.85	24.82	18.52	18.193
33	32.98	31.26	30.28	38.875	24.69	23.73	17.5	18.193
35	32.6	30.69	29.63	38.875	25.28	24.07	18.13	18.193
37		30.7	29.22	38.875	25.14	24.03	17.59	18.193
43		28.23	26.23	38.875	25.01	23.79	17.38	18.193
45		27.17	24.67	38.875	25.25	24.05	17.86	18.193
47		28.94	28.33	38.875	25.6	24.27	17.87	18.193
49		29.08	27.43	38.875	25.47	24.32	17.78	18.193
51		27.02	24.77	38.875		23.54	17.09	18.193
53		27.05	25.58	38.875		24.03	17.01	18.193
55		26.6	25.65	38.875		23.91	16.96	18.193
57		25.64	25	38.875		23.92	16.86	18.193
SECTION 12					14.1			
Ch.	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)
	C&R	F&R	F&M		C&R	F&R	F&M	
23	27.62	25.86	21.27	26.579	27.98	25.39	21.11	22.187
25	27.84	25.09	21.3	26.579	28.12	25.61	21.44	22.187
27		24.99	21.06	26.579	28.53	25.69	21.36	22.187
29		23.99	20.43	26.579		25.73	21.72	22.187
31		23.5	19.82	26.579		26.13	22.43	22.187
33		23.06	19.39	26.579		25.64	22.01	22.187
35		23.26	19.45	26.579		24.96	22.23	22.187
37		23.6	20.68	26.579		24.27	21.7	22.187
43		21.55	19.66	26.579		22.15	20.3	22.187
45		21.6	18.88	26.579		21.96	20.53	22.187
47		22.23	19.56	26.579		22.01	20.72	22.187
49		20.88	19.7	26.579		21.86	20.93	22.187
51		19.3	18.22	26.579		20.63	21.08	22.187
53		18.28	18.63	26.579		18.63	20.01	22.187
55		17.37	18.72	26.579		17.09	20.05	22.187
57		19.13	19.39	26.579		17.28	19.72	22.187
SECTION 14.2					16			
Ch.	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)	OSNR measurement(dB)			OSNR calculation(dB)
	C&R	F&R	F&M		C&R	F&R	F&M	
23		24.12	19	20.365	31.03	29.75	25.88	31.277
25	28.59	25.18	19.98	20.365	31.38	30.01	26.7	31.277
27		24.53	19.75	20.365	31.18	29.55	25.3	31.277
29		24.72	20.43	20.365	31.93	30.4	26.35	31.277
31	32.09	27.81	23.02	20.365	31.92	30.49	26.14	31.277
33		27.16	22.43	20.365		29.58	25.4	31.277
35	32.36	27.27	22.47	20.365		28.87	24.9	31.277
37		26.62	22.42	20.365		29.37	24.74	31.277
43		24.5	21.37	20.365		29.69	24.54	31.277
45		24.66	21.38	20.365		29.1	24.26	31.277
47		24.85	21.66	20.365		28.37	23.29	31.277
49		25.2	22.14	20.365		29.75	24.47	31.277
51		24.3	22.22	20.365		28.48	23.56	31.277
53		24.38	20.94	20.365		28.23	23.4	31.277
55		24.23	19.43	20.365		26.65	22.53	31.277
57		24.33	18.73	20.365		28.19	22.7	31.277







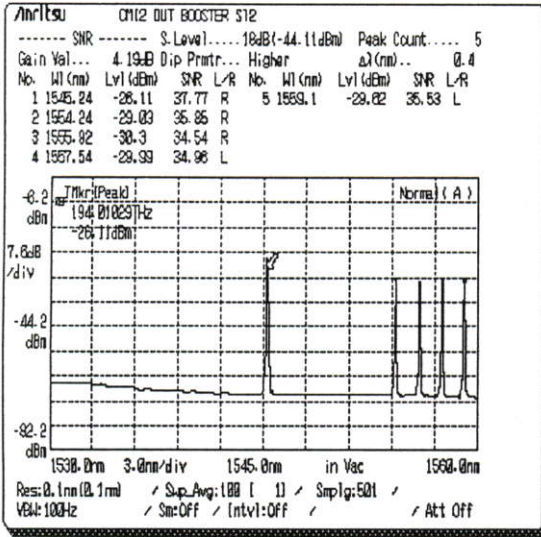
ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

SECTION 9(PBIT - AYA)																	
Ch.		23	25	27	29	31	33	35	37	43	45	47	49	51	53	55	57
Lambda(nm)		1558.98	1557.36	1555.75	1554.13	1552.52	1550.92	1549.32	1547.72	1542.94	1541.35	1539.77	1538.19	1536.61	1535.0	1533.5	1531.90
Freq.	(THz)	192.3	192.5	192.7	192.9	193.1	193.3	193.5	193.7	194.3	194.5	194.7	194.9	195.1	195.3	195.5	195.7
F&M	Term.A	33.46	35.73	34.56	34.75	35.62	35.44	35.75	35.97	35.64	35.78	36.02	35.89	35.13	34.79	34.04	34.21
	Term.B	17.65	17.41	16.66	16.63	17.09	16.85	16.64	16.78	17.16	16.41	16.78	17.05	16.16	16.03	16.59	16.36
F&R	Term.A	33.46	35.73	34.56	34.75	35.62	35.44	35.75	35.97	35.64	35.78	36.02	35.89	35.13	34.79	34.04	34.21
	Term.B	26.05	25.77	25.32	25.59	24.86	24.89	25.03	24.33	24.81	25.01	24.35	24.13	23	22.32	22.2	21.79
C&R	Term.A	36.11	35.68	34.66	35.02	34.97	35.16	35.67	35.69	36.35	36.23	36.44	36.38				
	Term.B	26.86	26.39	25.75	26.32	25.57	25.45	25.27	25.05	25.46	25.61	25.23	25.12				
F&M	Term.B	34.36	34.84	33.53	33.6	32.86	33.19	33.79	33.76	35.15	35.88	36	35.78	35.44	36.61	37.75	35.6
	Term.A	18.96	18.79	17.65	17.15	16.36	16.58	16.56	16.67	17.38	17.73	17.54	16.51	16.01	16.91	16.69	16.41
F&R	Term.B	34.36	34.84	33.53	33.6	32.86	33.19	33.79	33.76	35.15	35.88	36	35.78	35.44	36.61	37.75	35.6
	Term.A	26.01	26.15	24.31	24.08	23.73	23.72	23.32	23.49	23.32	23.96	23.55	21.92	21.88	22.69	22.81	20.27
C&R	Term.B	34.91	35.19	33.92	34.24	32.97	33.65	34.53	33.51	35.11	36.37	36.47	36.17				
	Term.A	26.18	26.36	24.62	24.38	23.78	24.09	23.44	23.17	23.23	24.01	23.66	22.59				
SECTION 10(CBIT - LTY)																	
F&M	Term.A	32.21	33.27	32.25	31.44	31.7	31.94	32.36	31.32	31.72	32.8	31.83	32.13	32.31	32.45	32.64	31.86
	Term.B	26.21	27.42	27.64	25.7	30.78	30.28	29.63	29.22	26.23	24.67	28.33	27.43	24.77	25.58	25.65	25
	Term.B(OADM)	26.62	27.73	27.46	25.27	32.17	26.79	29.02	27.39	28.29	28.16	27.28	30.29	25.37	25.23	25.25	24.88
F&R	Term.A	32.21	33.27	32.25	31.44	31.7	31.94	32.36	31.32	31.72	32.8	31.83	32.13	32.31	32.45	32.64	31.86
	Term.B	28.78	29.59	29.58	27.91	32.33	31.26	30.69	30.7	28.23	27.17	28.94	29.08	27.02	27.05	26.6	25.64
	Term.B(OADM)	28.84	29.69	29.45	27.67	32.97	28.36	29.6	28.89	29.82	29.9	29.77	31.34	27.01	26.59	26.19	25.33
C&R	Term.A	32.66	33.62	33.72	32.36	33.5	32.8	33.55									
	Term.B	29.96	30.85	30.83	29.36	34.2	32.98	32.6									
	Term.B(OADM)	29.93	31.2	30.83	28.79	33.13	28.06	30.13									
F&M	Term.B	32.26	31.86	32.59	32.2	33.6	32.59	31.48	32.68	32.6	33.42	33.23	33.57	34.27	33.93	34.37	33.81
	Term.A	24.3	22.75	27.03	26.78	28.45	25.94	26.01	26.91	27.36	25.97	27.33	25.25	25.49	24.2	23.64	21.65
	Term.A(OADM)	21.38	25.2	26.81	26.48	26.05	26.83	27.84	26.93	25.34	27	27.69	26.21	25.61	24.1	22.79	22.2
F&R	Term.B	32.26	31.86	32.59	32.2	33.6	32.59	31.48	32.68	32.6	33.42	33.23	33.57	34.27	33.93	34.37	33.81
	Term.A	27.63	28.78	30.77	30.66	34.65	32.49	28.85	31.16	30.42	28.8	30.96	30.12	29.14	27.75	27.55	26.75
	Term.A(OADM)	26.1	27.56	29.15	28.81	29.67	30.7	31.81	30.57	29.49	30.87	30.82	31.04	29.07	27.63	27.31	26.53
C&R	Term.B	33.25	33.03	33.42	33.68	34.83	33.61	32.36									
	Term.A	28.84	28.81	31.61	30.28	35.24	32.22	31.07									
	Term.A(OADM)	27.98	30.11	31.24	30.28	29.79	30.78	32.29									
SECTION 11(LTY - PBIT)																	
F&M	Term.A	34.05	33.5	33.42	33.736	34.72	33.31	33.81	33.65	33.81	34.26	34.89	34.59	33.92	34.6	34.1	34.52
	Term.B	18.48	18.21	18.39	18.42	18.52	17.5	18.13	17.59	17.38	17.86	17.87	17.78	17.09	17.01	16.96	16.86
F&R	Term.A	34.05	33.5	33.42	33.736	34.72	33.31	33.81	33.65	33.81	34.26	34.89	34.59	33.92	34.6	34.1	34.52
	Term.B	24.85	24.16	24.32	24.04	24.82	23.73	24.07	24.03	23.79	24.05	24.27	24.32	23.54	24.03	23.91	23.92
C&R	Term.A	34.54	34.48	33.79	33.76	35.3	33.98	34.24	33.9	34.22	34.86	34.97	34.93				
	Term.B	25.58	25.03	25.14	25.1	25.85	24.69	25.28	25.14	25.01	25.25	25.6	25.47				
F&M	Term.B	34.43	34.74	34.43	34.22	34.44	34.7	33.88	34.62	35.26	34.91	34.65	34.56	35.29	35.37	33.59	33.39
	Term.A	18.82	18.96	18.67	18.08	19.19	18.66	17.46	18.35	18.36	18.66	18.36	17.96	19.1	18.77	17.63	17.64
F&R	Term.B	34.43	34.74	34.43	34.22	34.44	34.7	33.88	34.62	35.26	34.91	34.65	34.56	35.29	35.37	33.59	33.39
	Term.A	25.22	25.21	24.78	24.57	25.38	25.19	24.14	24.9	25.25	25.18	25.16	24.65	25.97	25.68	24.67	24.16
C&R	Term.B	35.06	34.69	34.82	34.35	35.49	35	34.54	35.23	35.71	35.7	35.45	35.38				
	Term.A	26.2	26.24	25.79	25.1	26.34	26.07	24.96	25.72	26.22	26.12	26.29	25.71				

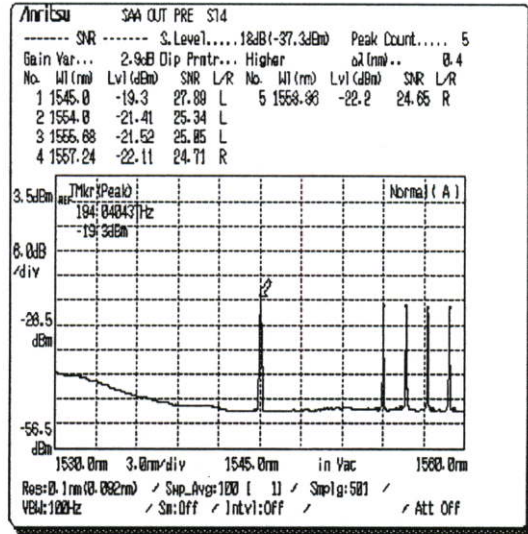


### 4.5.2 ตัวอย่างผลการวัดจาก Optical Spectrum Analyzer(OSA)

#### 4.5.2.1 ผลการวัดจาก OSA ของ section 1.1

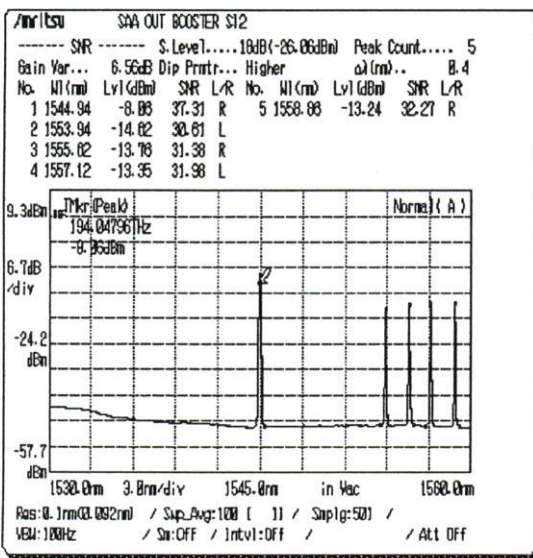


(ก)

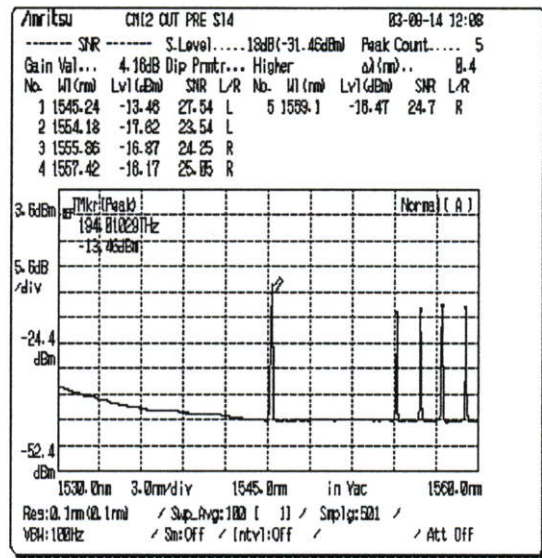


(ข)

รูปที่ 4.6 ผลการวัดของ section 1.1 แบบ C&R จากสถานี A ถึง B (ก) Terminal A, (ข) Terminal B

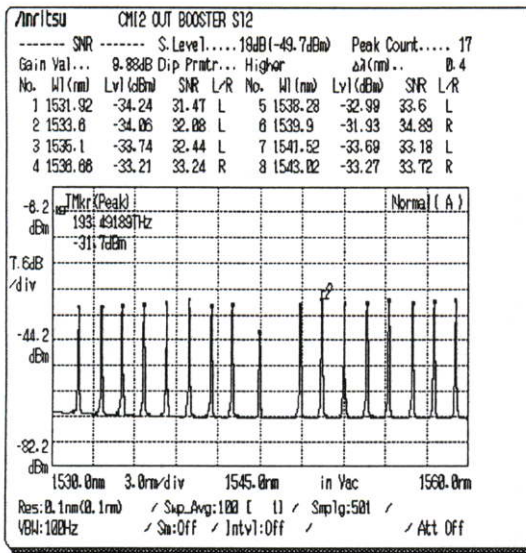


(ค)

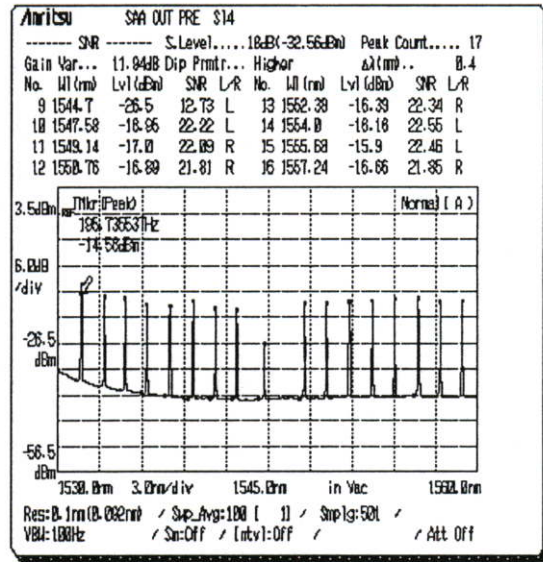


(ข)

รูปที่ 4.7 ผลการวัดของ section 1.1 แบบ C&R จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal A

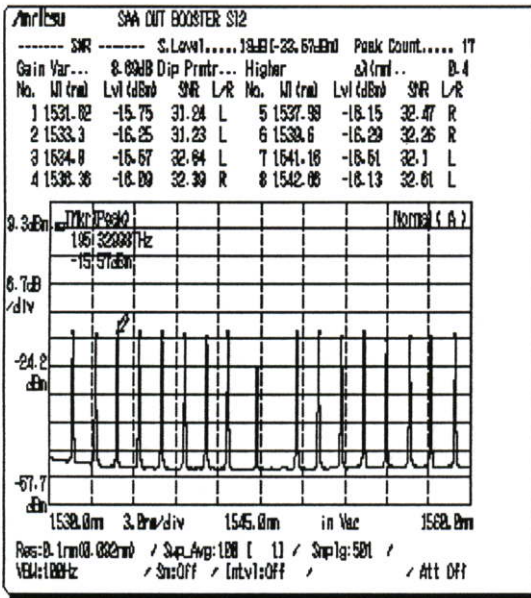


(ก)

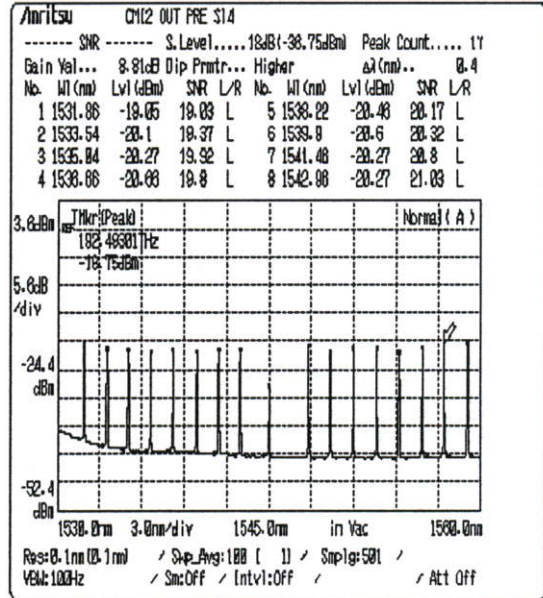


(ข)

รูปที่ 4.8 ผลการวัดของ section 1.1 แบบ F&R จากสถานี A ถึง B (ก)Terminal A, (ข) Terminal B

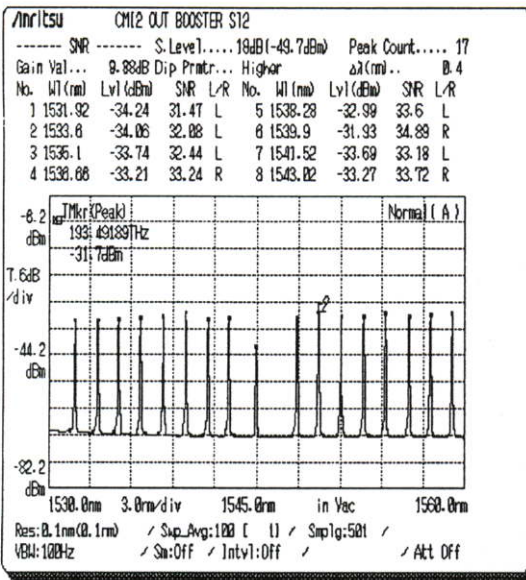


(ก)

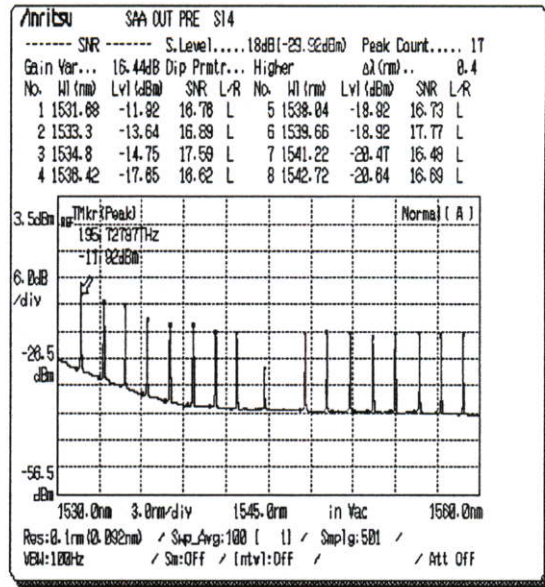


(ข)

รูปที่ 4.9 ผลการวัดของ section 1.1แบบ F&R จากสถานี B ถึง A (ก)Terminal B, (ข) Terminal A

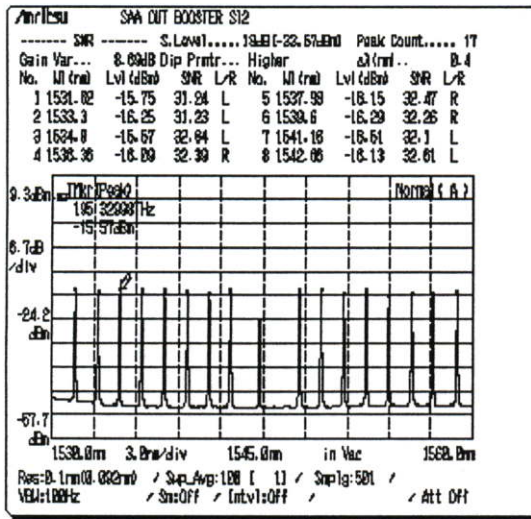


(ก)

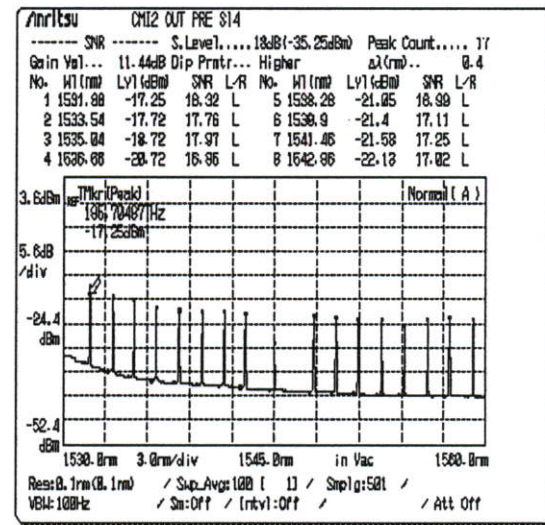


(ข)

รูปที่ 4.10 ผลการวัดของ section 1.1 แบบ F&M จากสถานี A ถึง B (ก) Terminal A, (ข) Terminal B



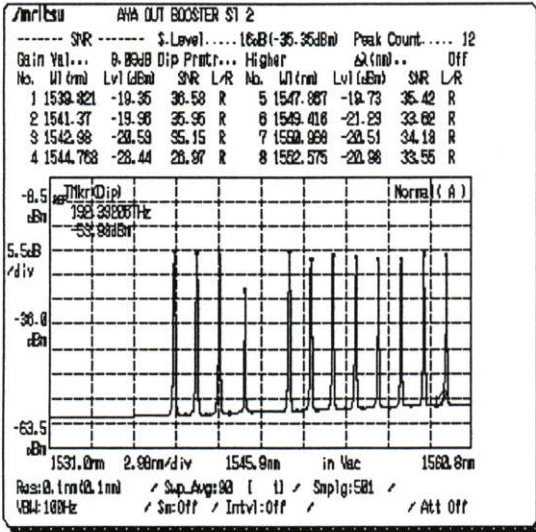
(ก)



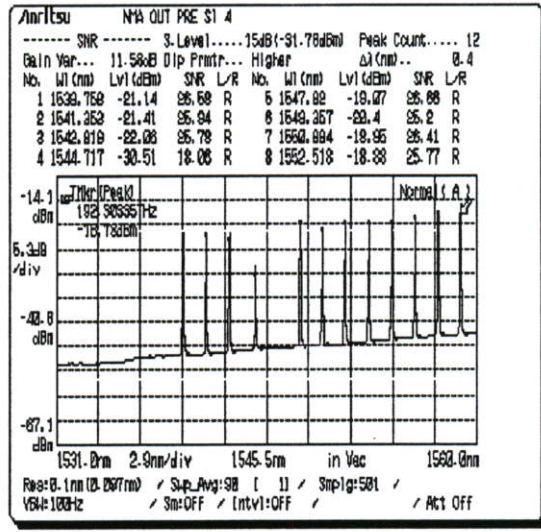
(ข)

รูปที่ 4.11 ผลการวัดของ section 1.1 แบบ F&M จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal A

4.5.2.2 ผลการวัดจาก OSA ของ section 4

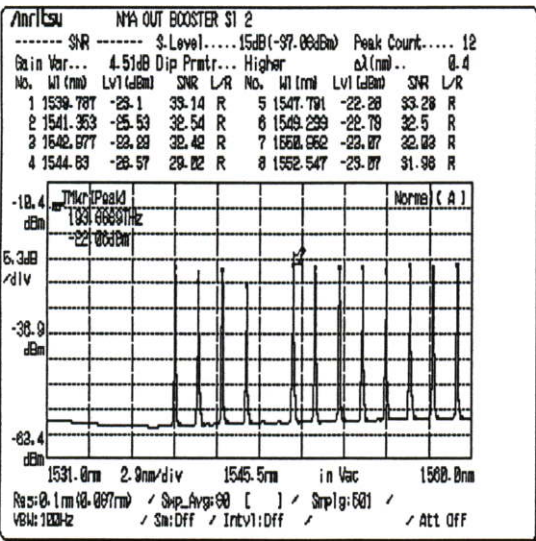


(ก)

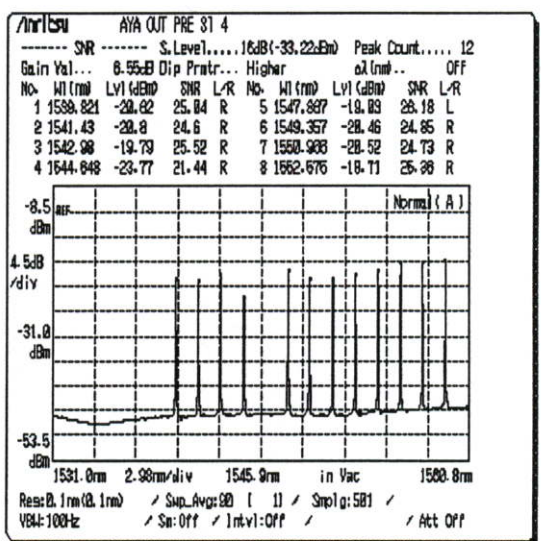


(ข)

รูปที่ 4.12 ผลการวัดของ section 4 แบบ C&R จากสถานี A ถึง B (ก)Terminal A, (ข) Terminal B

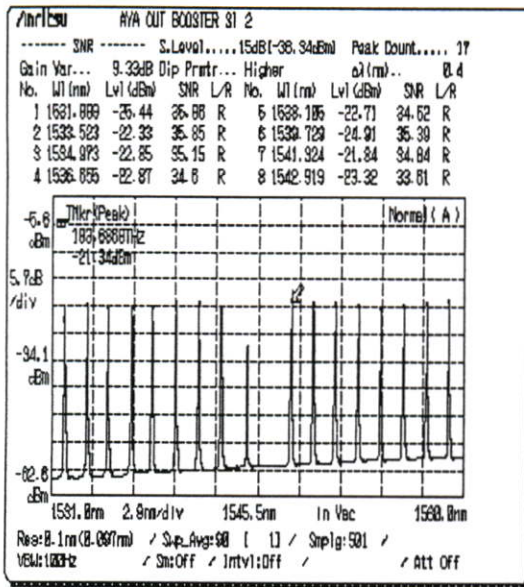


(ค)

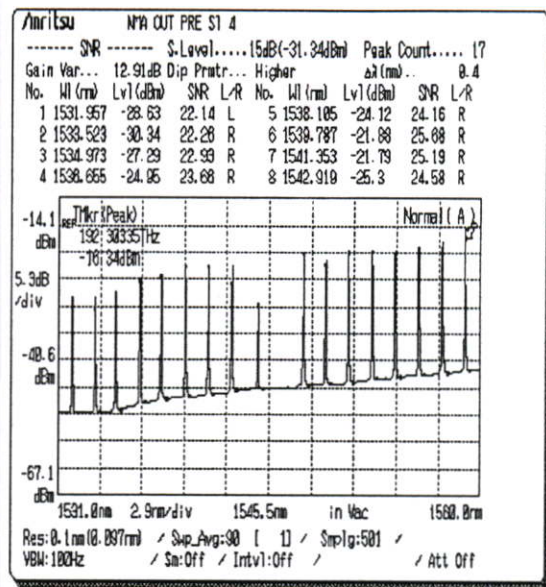


(ง)

รูปที่ 4.13 ผลการวัดของ section 4 แบบ C&R จากสถานี B ถึง A (ค)Terminal B, (ง) Terminal A

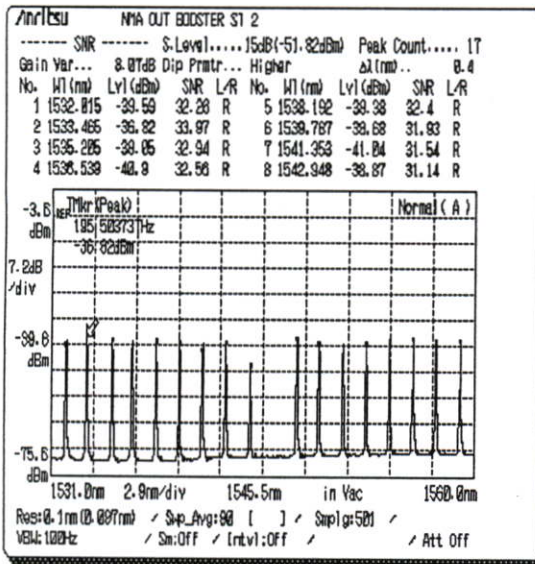


(ก)

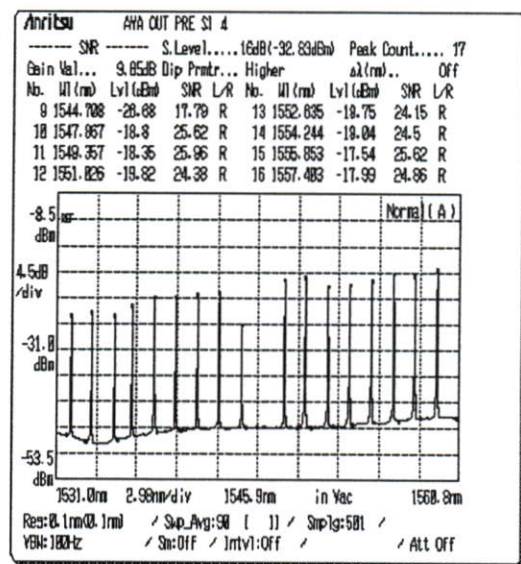


(ข)

รูปที่ 4.14 ผลการวัดของ section 4 แบบ F&R จากสถานี A ถึง B (ก)Terminal A, (ข) Terminal B

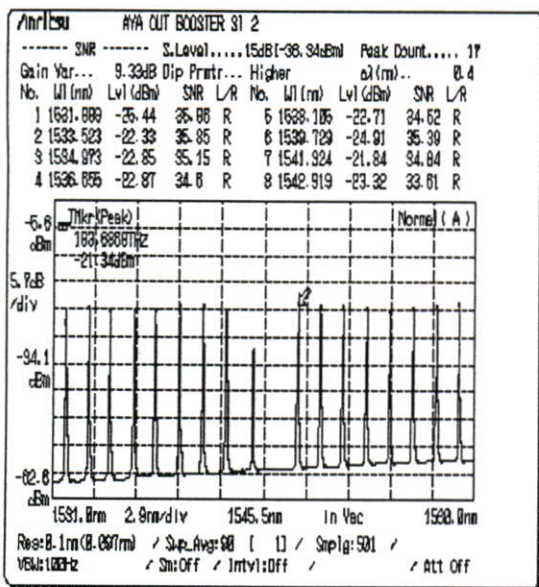


(ก)

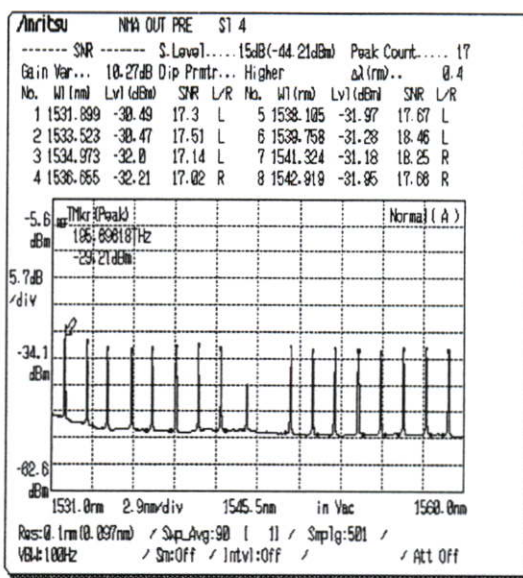


(ข)

รูปที่ 4.15 ผลการวัดของ section 4 แบบ F&R จากสถานี B ถึง A (ก)Terminal B, (ข) Terminal A

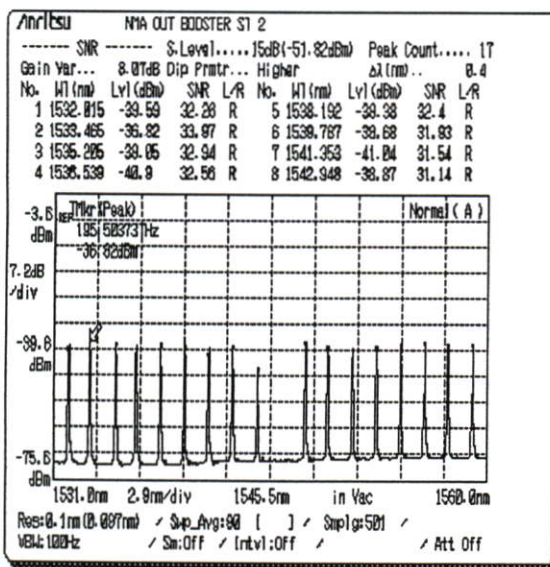


(ก)

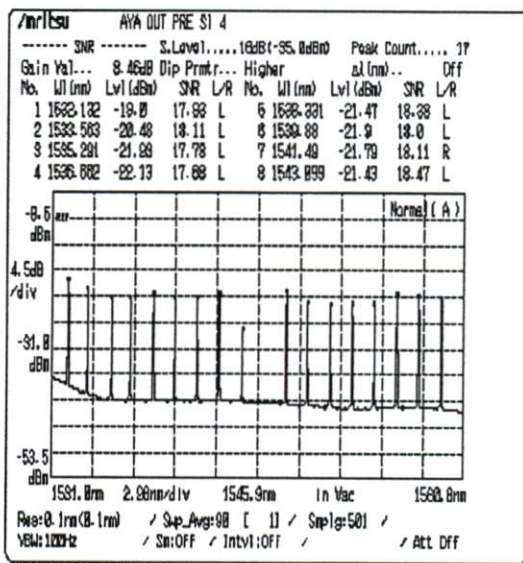


(ข)

รูปที่ 4.16 ผลการวัดของ section 4 แบบ F&R จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal



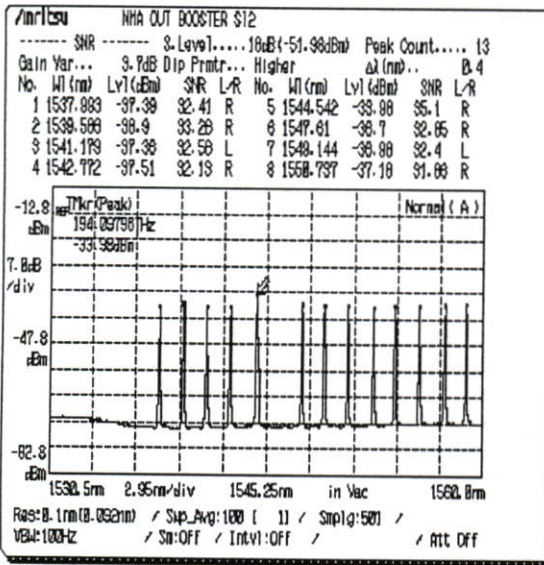
(ก)



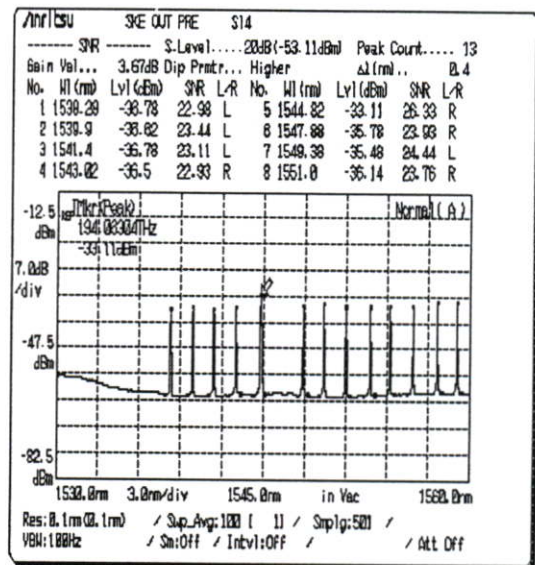
(ข)

รูปที่ 4.17 ผลการวัดของ section 4 แบบ F&M จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal A

## 4.5.2.3 ผลการวัดจาก OSA ของ section 7.1

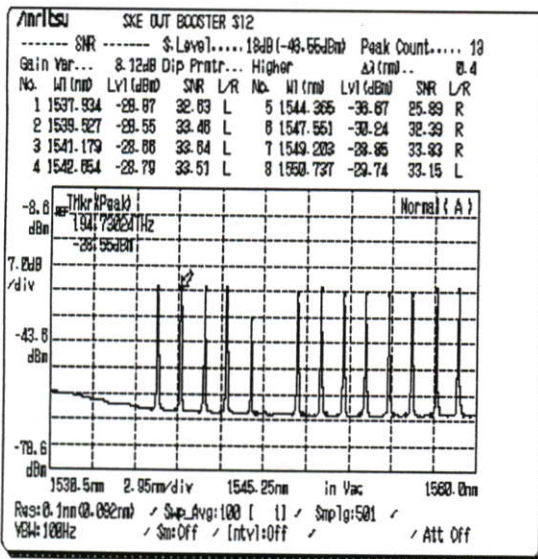


(ก)

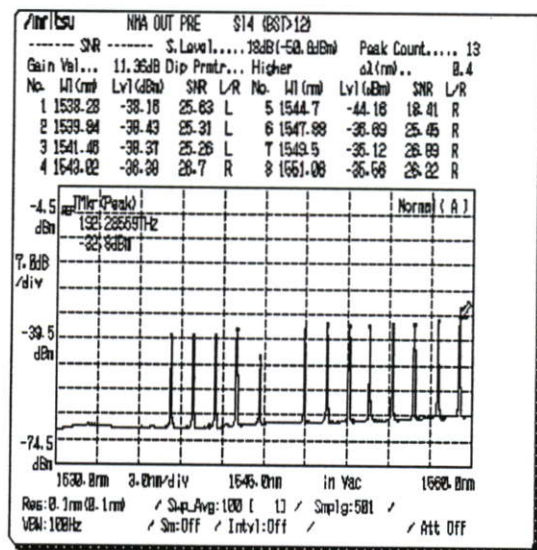


(ข)

รูปที่ 4.18 ผลการวัดของ section 7.1 แบบ C&amp;R จากสถานี A ถึง B (ก) Terminal A, (ข) Terminal B

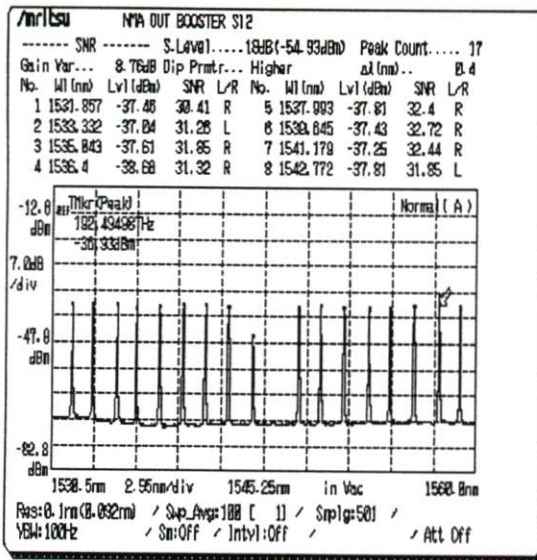


(ก)

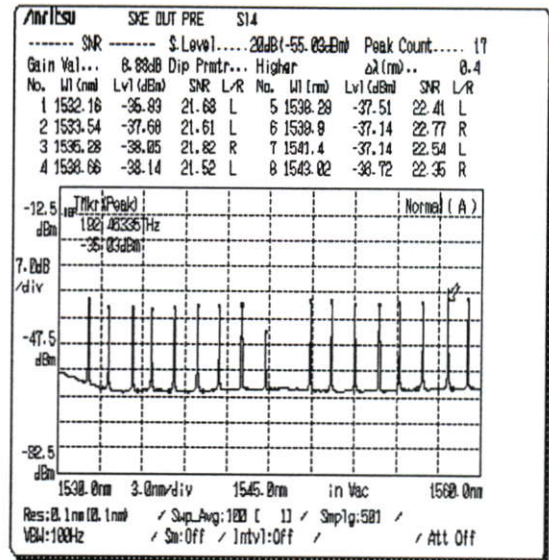


(ข)

รูปที่ 4.19 ผลการวัดของ section 7.1 แบบ C&amp;R จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal A

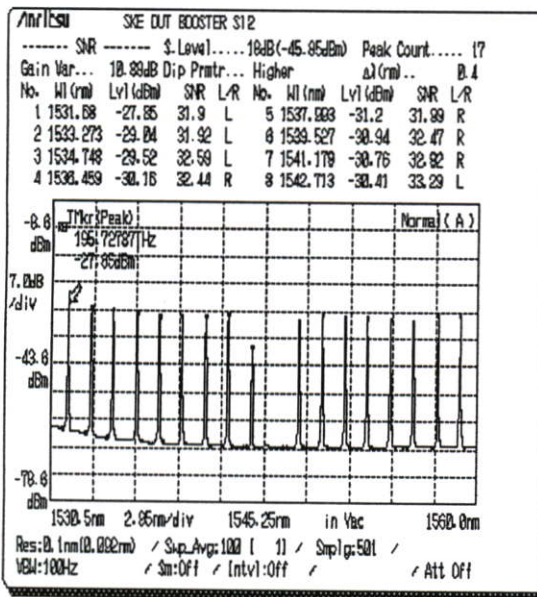


(ก)

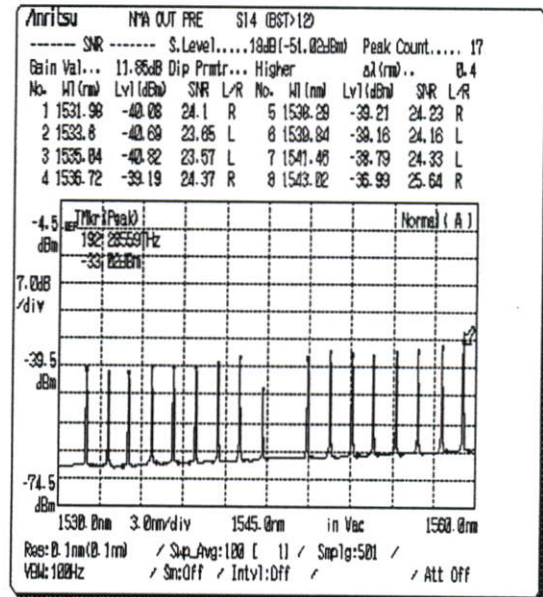


(ข)

รูปที่ 4.20 ผลการวัดของ section 7.1 แบบ F&R จากสถานี A ถึง B (ก)Terminal A, (ข) Terminal B

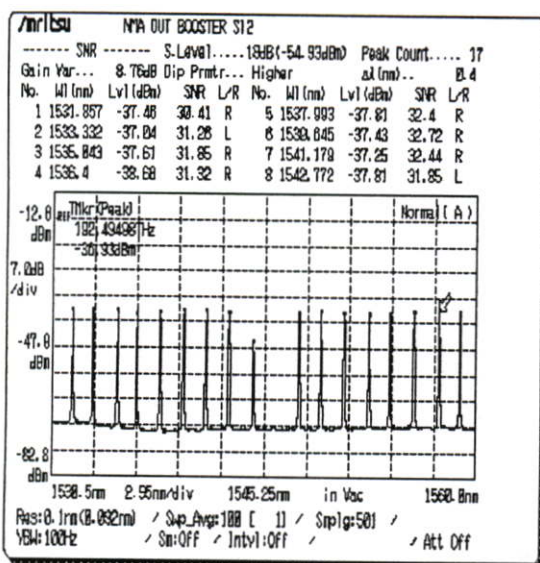


(ค)

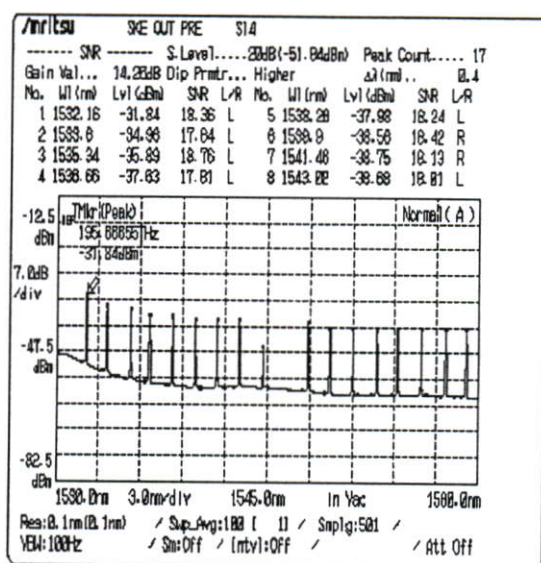


(ข)

รูปที่ 4.21 ผลการวัดของ section 7.1 แบบ F&R จากสถานี B ถึง A (ค)Terminal B, (ข) Terminal A

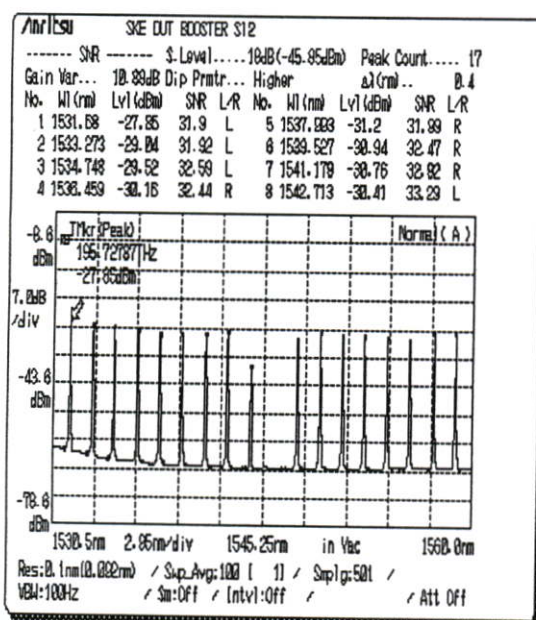


(ก)

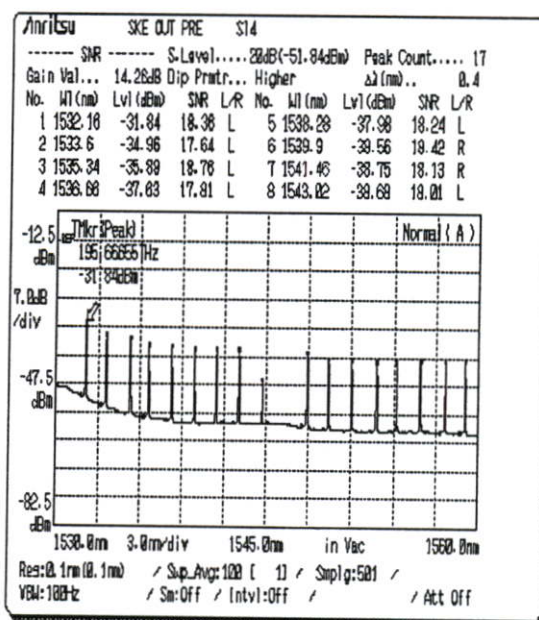


(ข)

รูปที่ 4.22 ผลการวัดของ section 7.1 แบบ F&M จากสถานี A ถึง B (ก) Terminal A, (ข) Terminal B



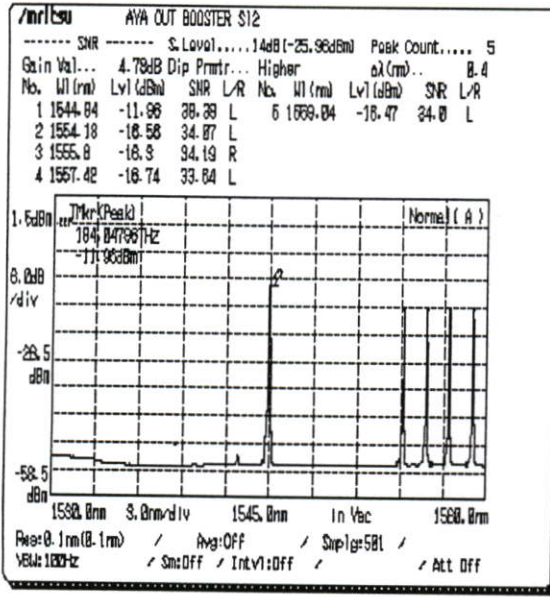
(ก)



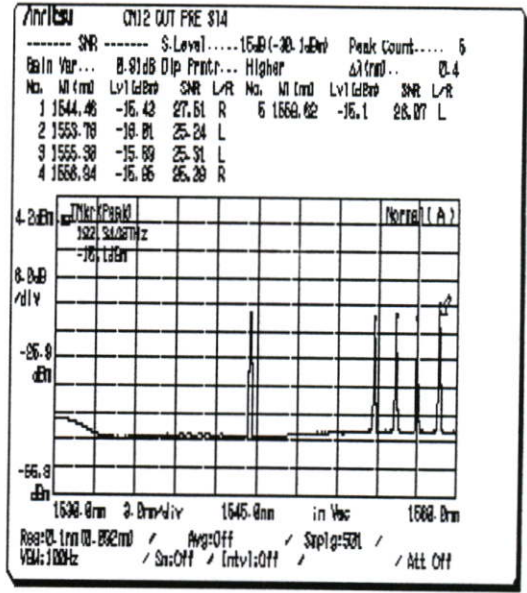
(ข)

รูปที่ 4.23 ผลการวัดของ section 7.1 แบบ F&M จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal A

4.5.2.4 ผลการวัดจาก OSA ของ section 8

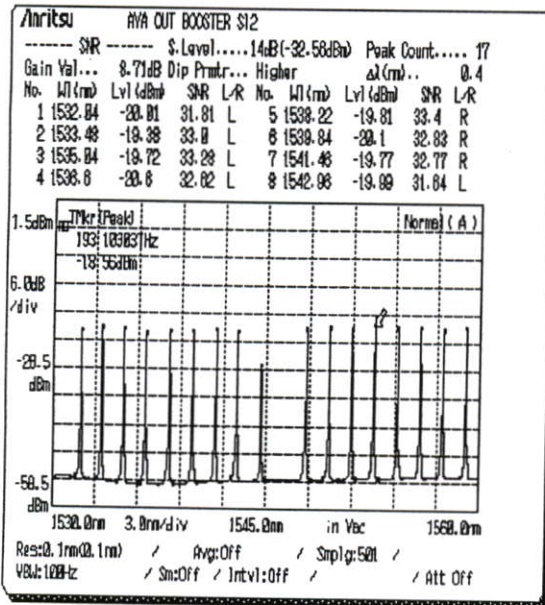


(ก)

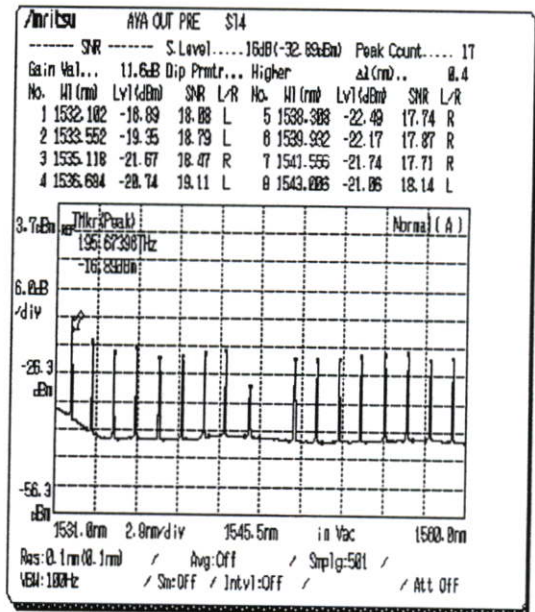


(ข)

รูปที่ 4.24 ผลการวัดของ section 8 แบบ C&R จากสถานี A ถึง B (ก) Terminal A, (ข) Terminal B

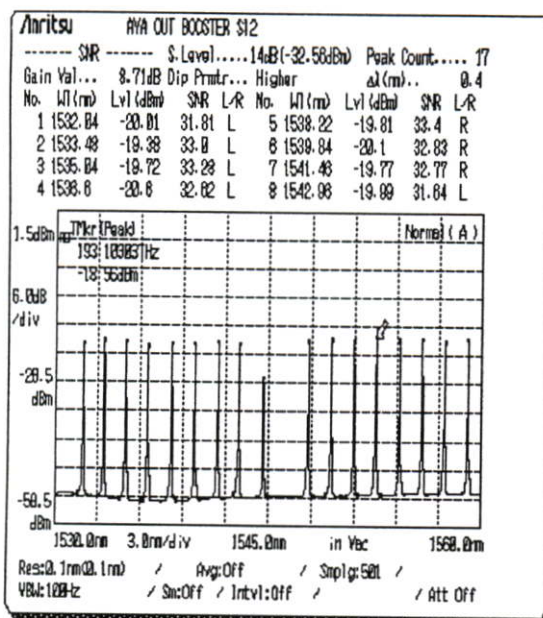


(ค)

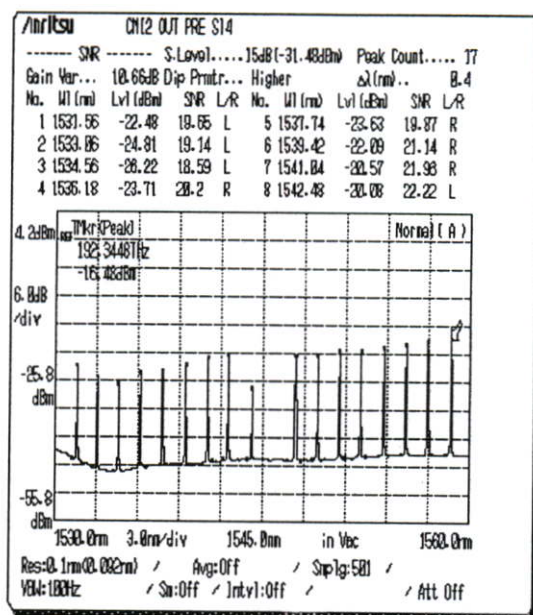


(ง)

รูปที่ 4.25 ผลการวัดของ section 8 แบบ C&R จากสถานี B ถึง A (ค) Terminal B, (ง) Terminal A

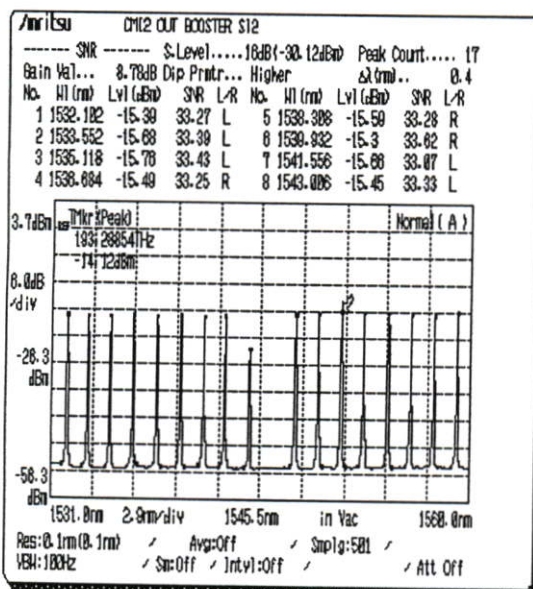


(ก)

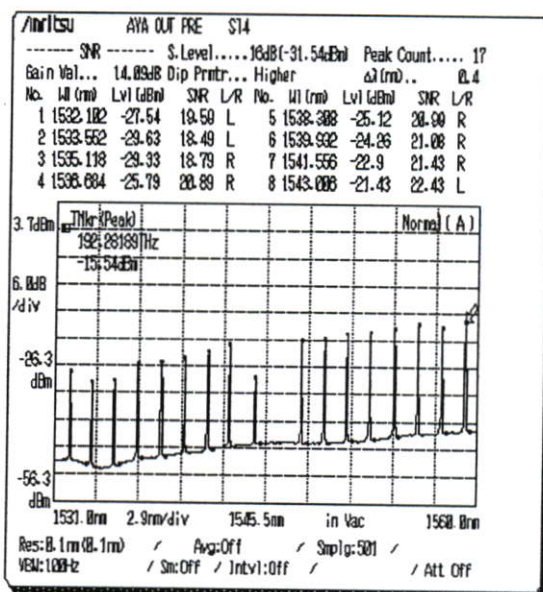


(ข)

รูปที่ 4.26 ผลการวัดของ section 8 แบบ F&R จากสถานี A ถึง B (ก) Terminal A, (ข) Terminal B

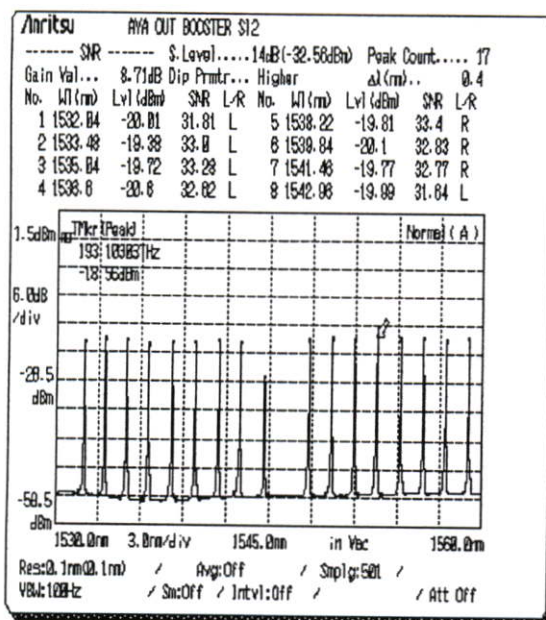


(ค)

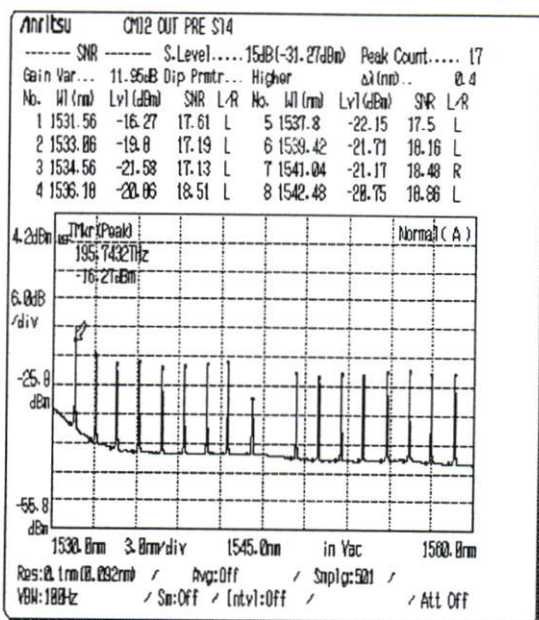


(ง)

รูปที่ 4.27 ผลการวัดของ section 8 แบบ F&R จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal A

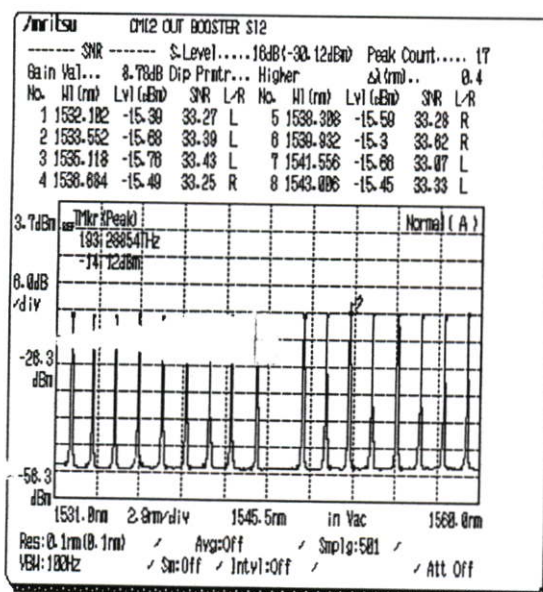


(ก)

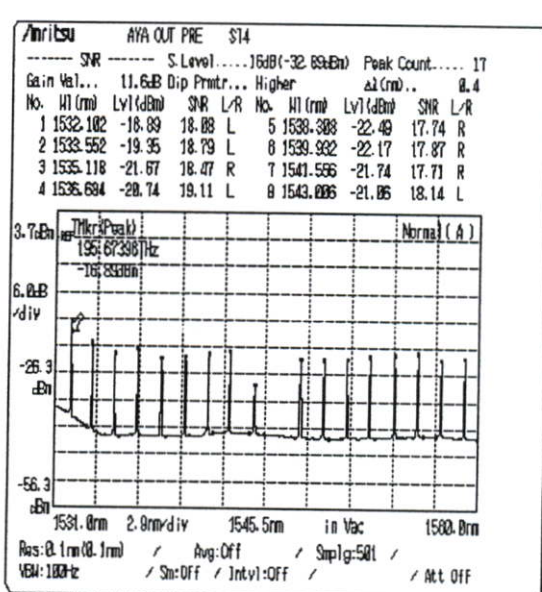


(ข)

รูปที่ 4.28 ผลการวัดของ section 8 แบบ F&amp;M จากสถานี A ถึง B (ก) Terminal A, (ข) Terminal B



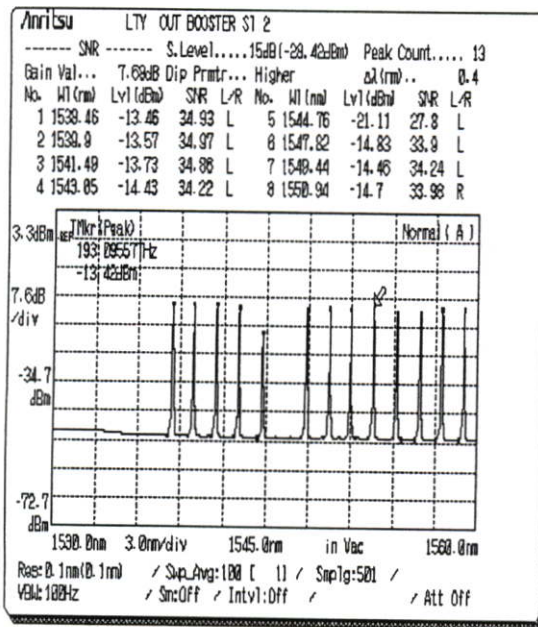
(ค)



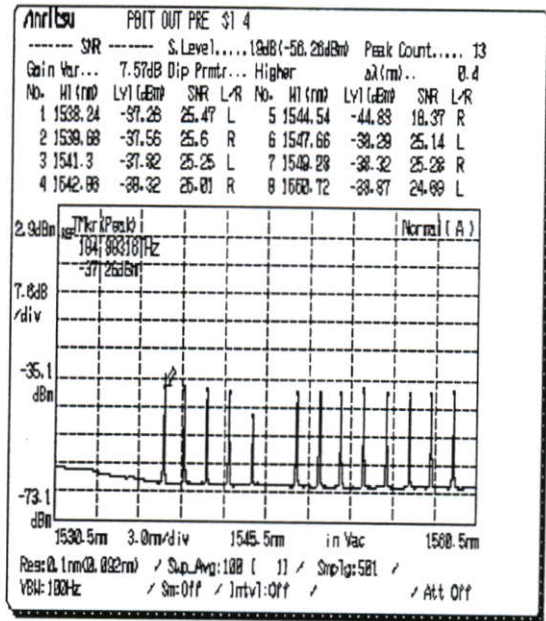
(ง)

รูปที่ 4.29 ผลการวัดของ section 8 แบบ F&amp;M จากสถานี B ถึง A (ค) Terminal B, (ง) Terminal A

4.5.2.5 ผลการวัดจาก OSA ของ section 11

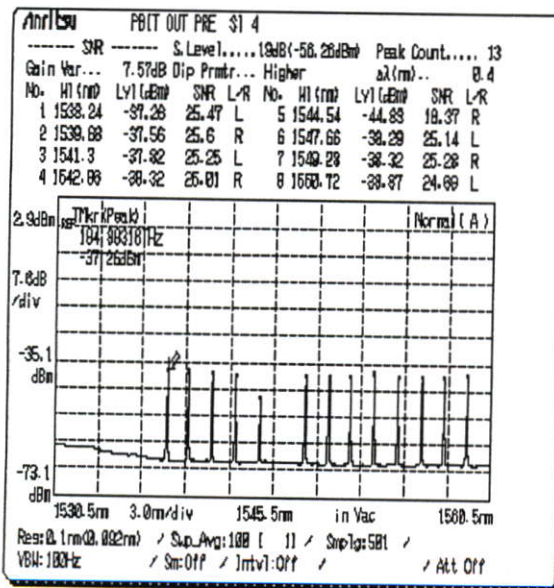


(ก)

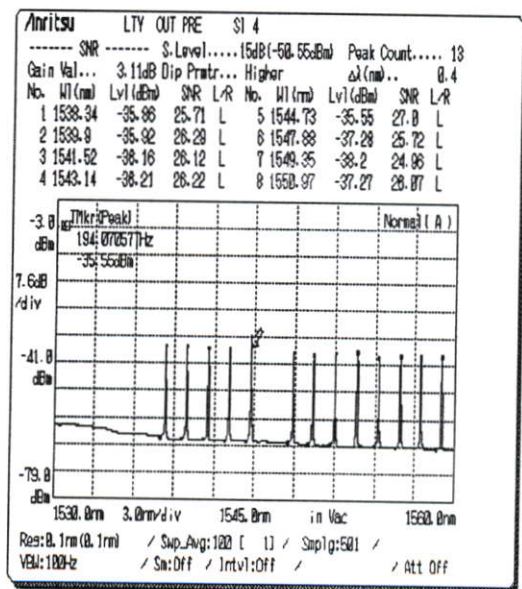


(ข)

รูปที่ 4.30 ผลการวัดของ section 11 แบบ C&R จากสถานี A ถึง B (ก) Terminal A, (ข) Terminal B

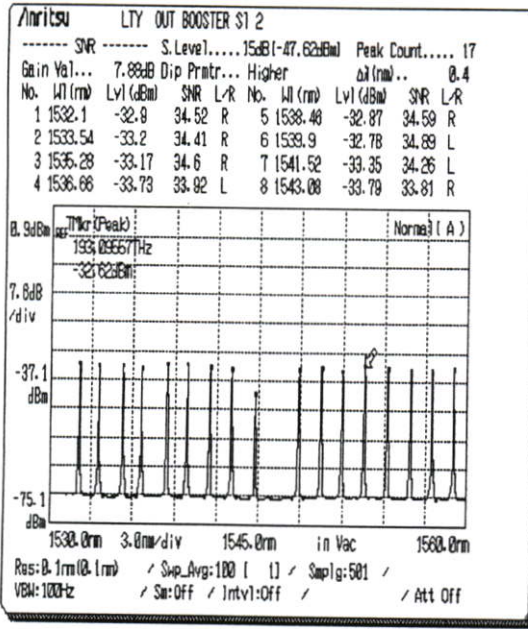


(ก)

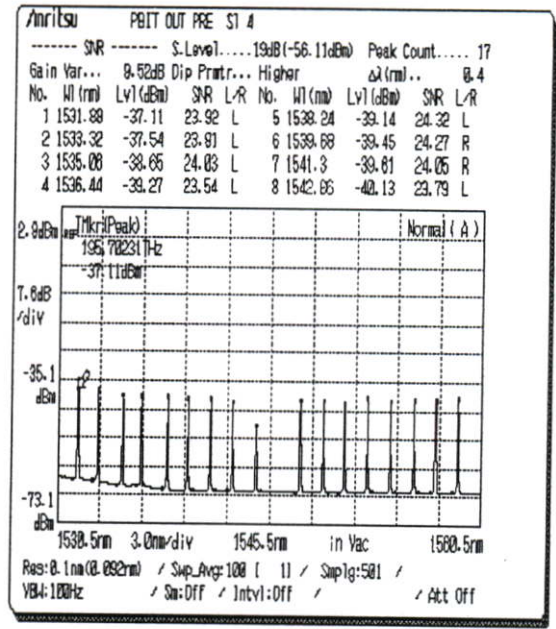


(ข)

รูปที่ 4.31 ผลการวัดของ section 11 แบบ C&R จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal A

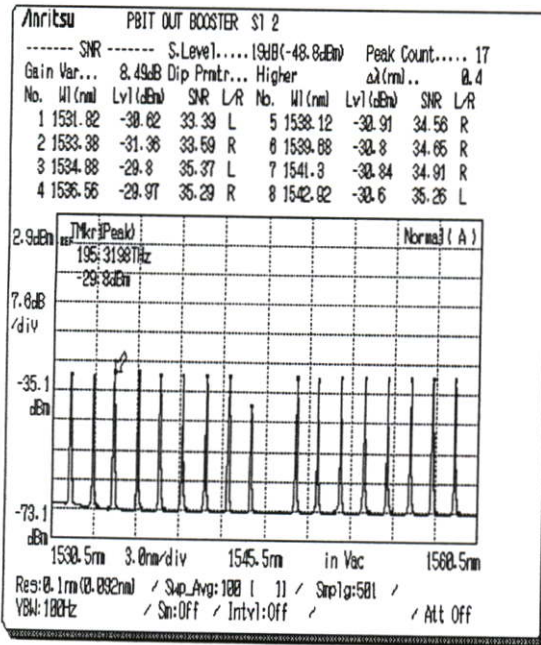


(ก)

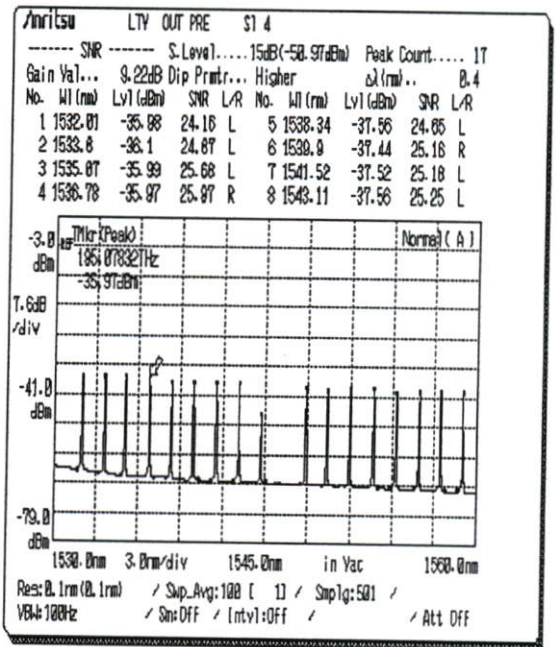


(ข)

รูปที่ 4.32 ผลการวัดของ section 11 แบบ F&R จากสถานี A ถึง B (ก) Terminal A, (ข) Terminal B

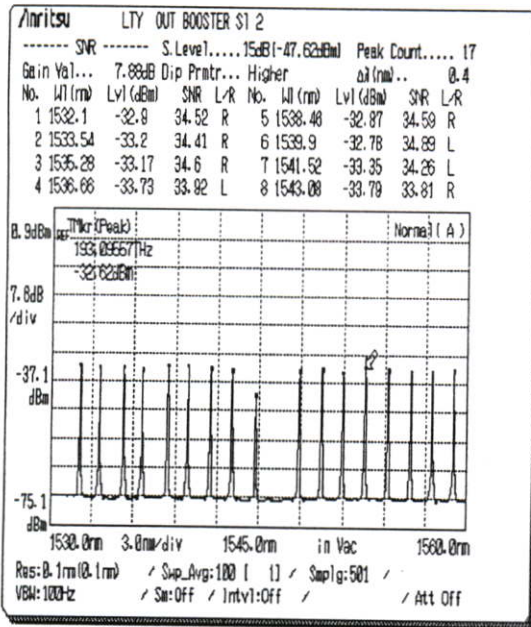


(ค)

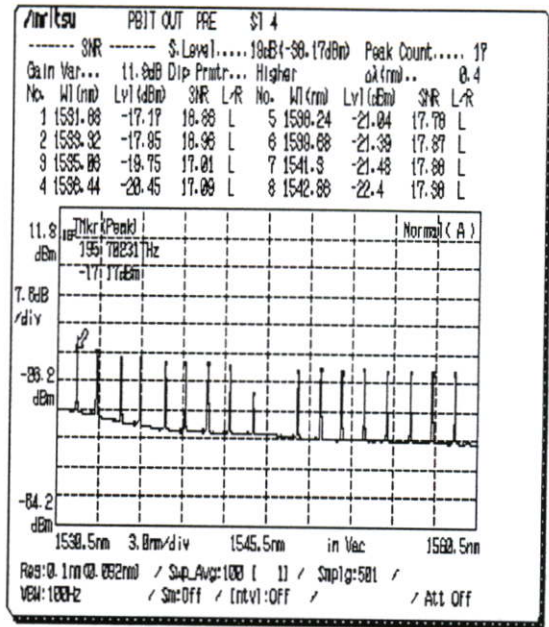


(ข)

รูปที่ 4.33 ผลการวัดของ section 11 แบบ F&R จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal A

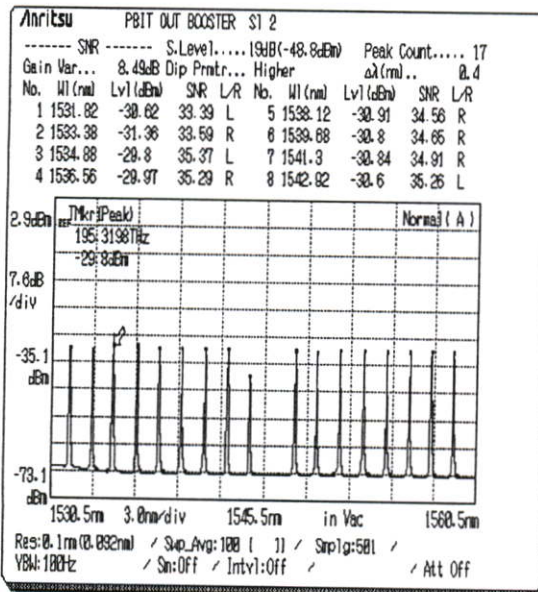


(ก)

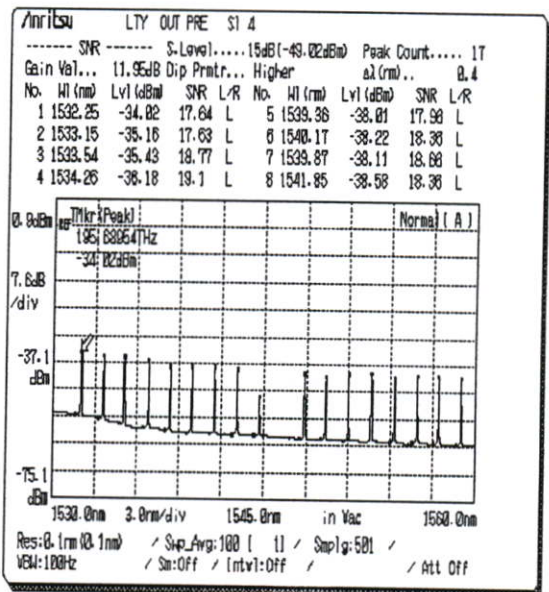


(ข)

รูปที่ 4.34 ผลการวัดของ section 11 แบบ F&M จากสถานี A ถึง B (ก)Terminal A, (ข) Terminal B



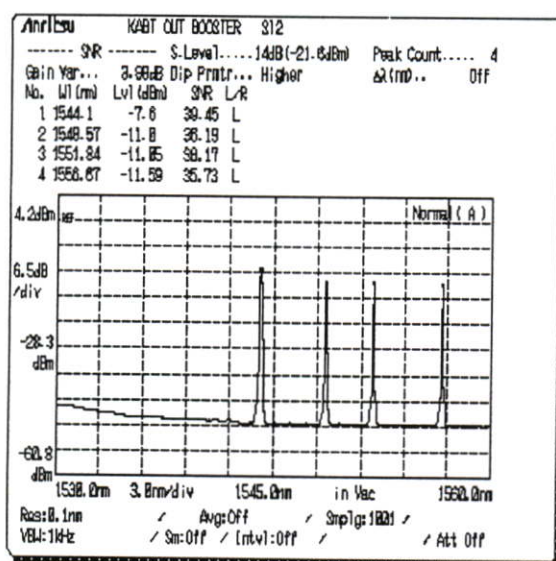
(ก)



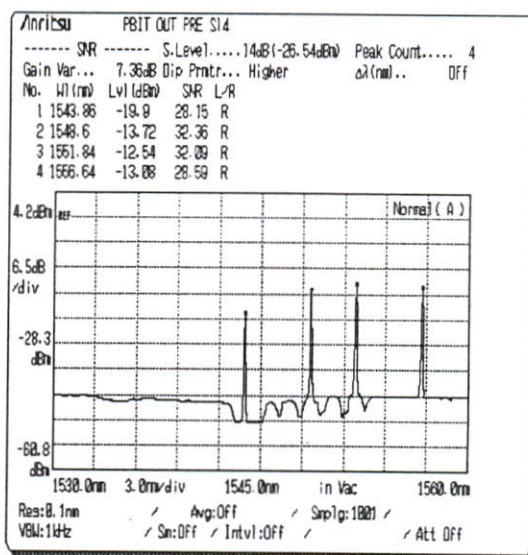
(ข)

รูปที่ 4.35 ผลการวัดของ section 11 แบบ F&M จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal A

## 4.5.2.6 ผลการวัดจาก OSA ของ section 14.2

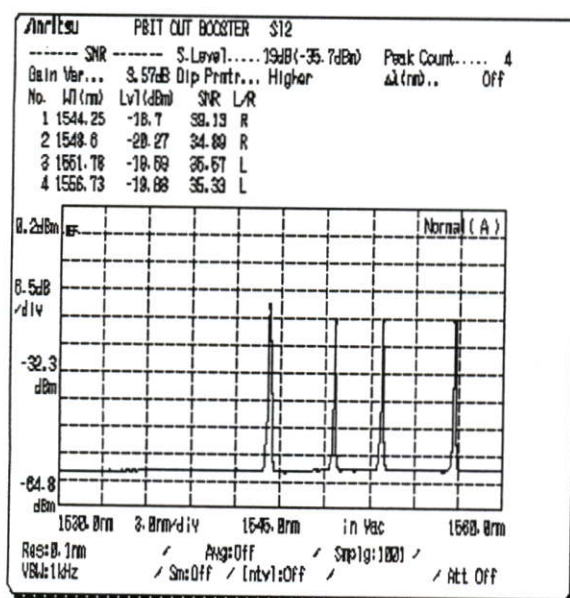


(ก)

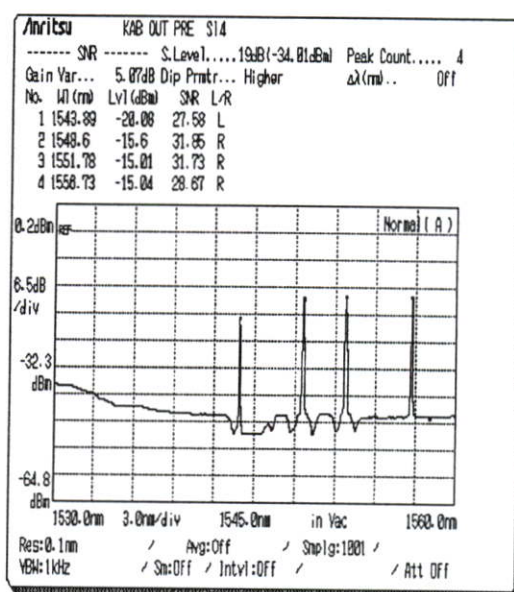


(ข)

รูปที่ 4.36 ผลการวัดของ section 14.2 แบบ C&R จากสถานี A ถึง B (ก) Terminal A, (ข) Terminal B

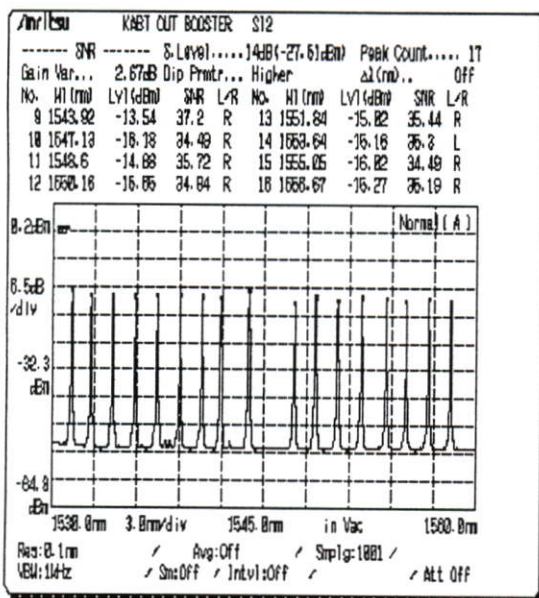


(ก)

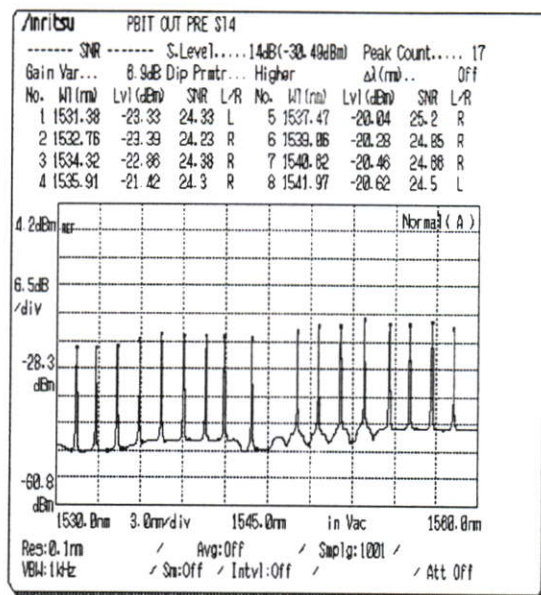


(ข)

รูปที่ 4.37 ผลการวัดของ section 14.2 แบบ C&R จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal A

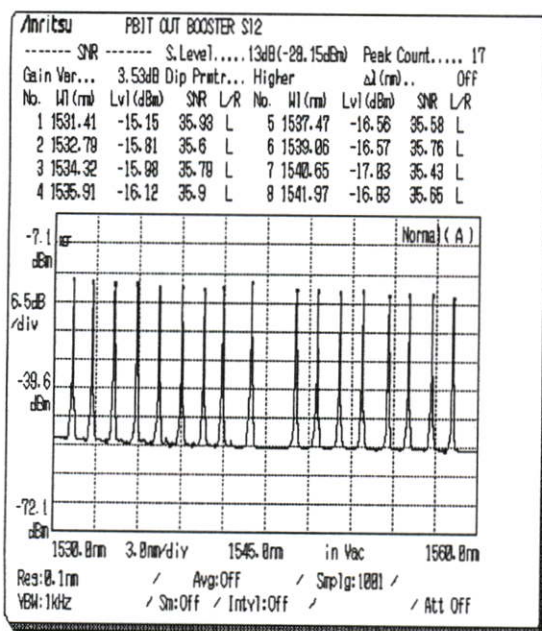


(ก)

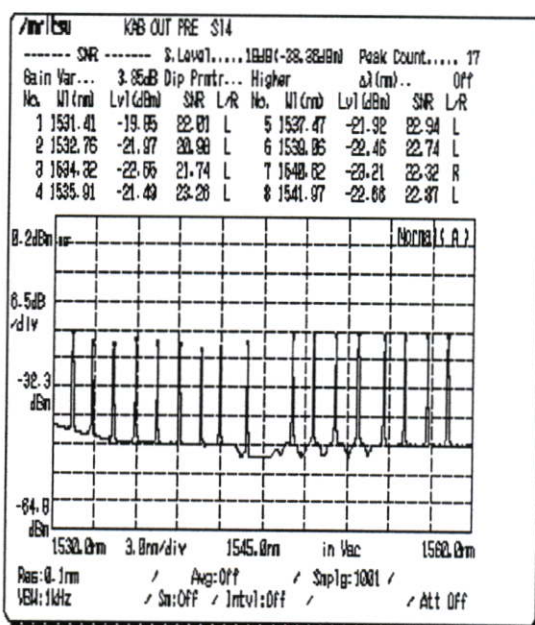


(ข)

รูปที่ 4.38 ผลการวัดของ section 14.2 แบบ F&R จากสถานี A ถึง B (ก)Terminal A, (ข) Terminal B

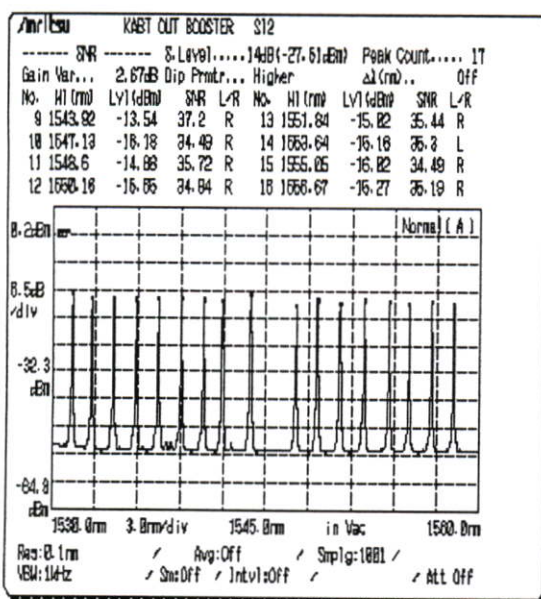


(ก)

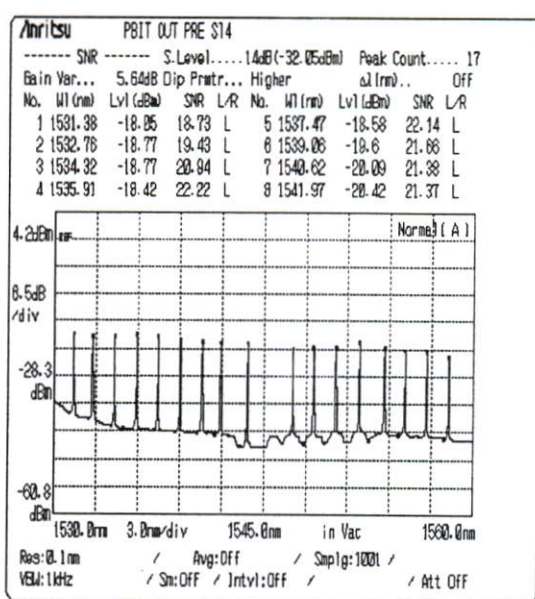


(ข)

รูปที่ 4.39 ผลการวัดของ section 14.2แบบF&R จากสถานี B ถึง A (ก)Terminal B, (ข) Terminal A

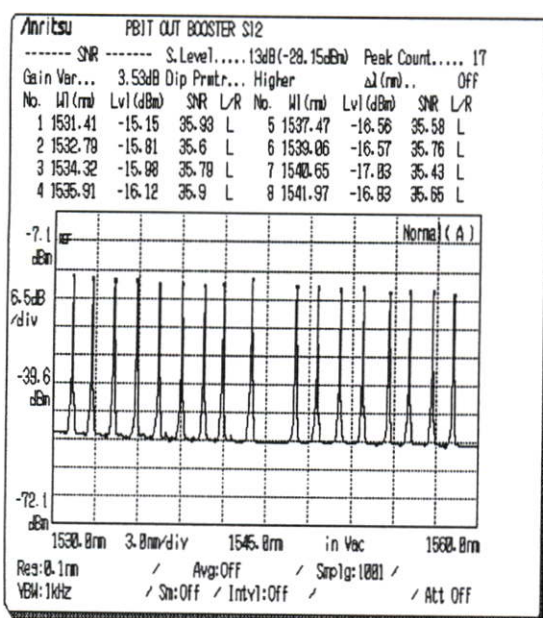


(ก)

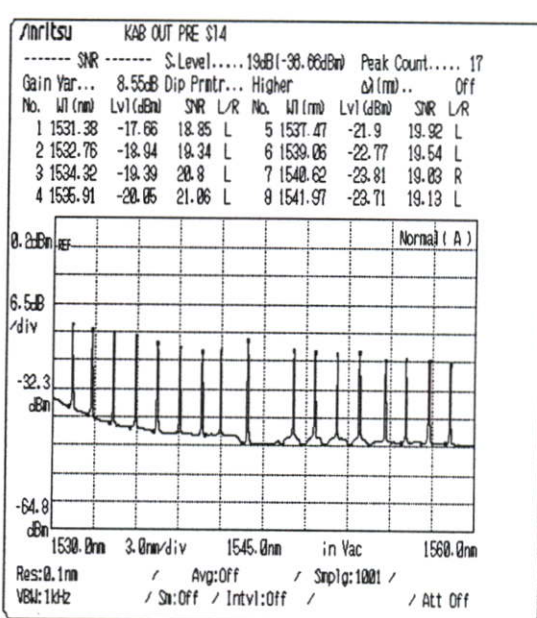


(ข)

รูปที่ 4.40 ผลการวัดของ section 14.2 แบบ F&M จากสถานี A ถึง B (ก) Terminal A, (ข) Terminal B



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.41 ผลการวัดของ section 14.2 แบบ F&M จากสถานี B ถึง A (ก) Terminal B, (ข) Terminal A

## บทที่ 5

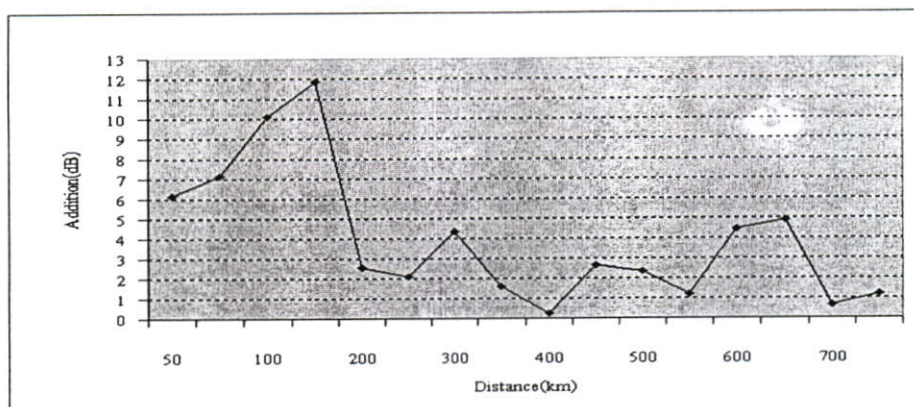
# คุณลักษณะโอเอสเอ็นอาร์ของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม

### 5.1 คุณลักษณะของโอเอสเอ็นอาร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบ

คุณลักษณะของโอเอสเอ็นอาร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบเป็นการนำผลการวิเคราะห์จากผลการวัดและการคำนวณมาทำการประมาณการหาค่าลักษณะเฉพาะของแต่ละ section เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการบำรุงรักษาระบบ ในงานวิจัยนี้มุ่งความสนใจที่การใช้งานความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทางจริง พบว่าผลการเปรียบเทียบของผลการวัดและการคำนวณในแต่ละ section จะมีลักษณะเฉพาะของแต่ละ section ที่แตกต่างกันเนื่องมาจากเหตุผลหลักๆ ในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.4 ดังนั้นคุณลักษณะของโอเอสเอ็นอาร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบจึงมีลักษณะที่แตกต่างกัน ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างการคำนวณกับการวัด โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอค่าการชดเชยหรือเพิ่มเติมโอเอสเอ็นอาร์ของแต่ละ section เพื่อชดเชยค่าการคำนวณและการวัดให้มีผลที่ใกล้เคียงกันมีนิยามดังต่อไปนี้

$$\text{Addition} = \Delta \{ \text{OSNR}_{\text{Measure}} - \text{OSNR}_{\text{Calculate}} \} \quad (5.1)$$

addition หมายถึงค่าความแตกต่างระหว่างการวัดและการคำนวณ,  $\text{OSNR}_{\text{Measure}}$  คือค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัด ในหน่วย dB,  $\text{OSNR}_{\text{Calculate}}$  ค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการคำนวณ ในหน่วย dB จากผลการทดสอบพบว่าในแต่ละ section จะมีค่าของ addition ของช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณที่ไม่เท่ากันเนื่องจากค่าจากการวัดจะมีระดับสัญญาณไม่เท่ากันทุกช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแสงที่แต่ละความยาวคลื่นแต่ค่าจากการคำนวณจะใช้ค่าเท่าๆ กันในทุกๆ ช่องสัญญาณ ค่าของ addition จึงมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าจากการวัดและจากตารางที่ 5.1 จะพบอีกว่า section 1.1, 1.2, 2, 4, 6, 7.1, 7.2, 8, 9, 12, 14.1, 14.2, 16 จะมีค่าเฉลี่ยระหว่างการวัดและการคำนวณที่ไม่แตกต่างกันมากประมาณ -5 dB ถึง +5 dB โดยมีระยะทางระหว่าง Terminal อยู่ระหว่างประมาณ 200-750 กม.(รูปที่ 5.1) และมีจำนวนของ span ระหว่าง section ตั้งแต่ 3 span ขึ้นไป ค่าคุณลักษณะเฉพาะที่ได้จากการทดสอบนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพการใช้งานเช่น ค่าการลดทอนของเส้นใยแก้วที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการซ่อมแซม, ค่ากำลังงานของเลเซอร์และอุปกรณ์ที่เสื่อมคุณภาพตามระยะเวลาการใช้งาน เป็นต้น



รูปที่ 5.1 ค่าความแตกต่างระหว่างการวัดและการคำนวณ(addition)เปรียบเทียบกับระยะทาง

ตารางที่ 5.1 คุณลักษณะเฉพาะของแต่ละ section

Channel	23	25	27	29	31	33	35	37	43	45	47	49	51	53	55	57	
Section 11	calculation	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	
	Measurement	24.39	24.03	23.58	23.29	22.60	22.87	21.93	22.20	22.22	21.96	21.14	19.87	20.20	18.59	19.14	19.65
	Addition	3.85	3.49	3.04	2.75	2.06	2.33	1.39	1.66	1.68	1.42	0.60	-0.67	-0.34	-1.95	-1.40	-0.89
Section 12	calculation	24.76	24.76	24.76	24.76	24.76	24.76	24.76	24.76	24.76	24.76	24.76	24.76	24.76	24.76	24.76	
	Measurement	25.13	23.86	24.27	24.70	24.71	24.54	24.35	24.60	22.99	23.39	23.13	22.04	21.96	20.27	20.18	20.07
	Addition	0.37	-0.90	-0.49	-0.06	-0.05	-0.22	-0.41	-0.16	-1.77	-1.37	-1.63	-2.72	-2.80	-4.49	-4.58	-4.69
Section 2	calculation	25.40	25.40	25.40	25.40	25.40	25.40	25.40	25.40	25.40	25.40	25.40	25.40	25.40	25.40	25.40	
	Measurement	25.36	24.65	25.00	24.61	23.48	23.70	23.12	23.31	22.11	22.80	22.13	22.25	21.05	20.63	19.94	20.17
	Addition	-0.04	-0.75	-0.40	-0.79	-1.92	-1.70	-2.28	-2.09	-3.29	-2.60	-3.27	-3.15	-4.35	-4.77	-5.46	-5.23
Section 4	calculation	27.10	27.10	27.10	27.10	27.10	27.10	27.10	27.10	27.10	27.10	27.10	27.10	27.10	27.10	27.10	
	Measurement	25.99	25.64	25.04	24.62	24.92	25.45	24.61	25.86	24.58	25.19	25.68	24.16	23.66	22.93	22.26	22.14
	Addition	-1.11	-1.46	-2.06	-2.48	-2.18	-1.65	-2.49	-1.24	-2.52	-1.91	-1.42	-2.94	-3.44	-4.17	-4.84	-4.96
Section 5	calculation	37.32	37.32	37.32	37.32	37.32	37.32	37.32	37.32	37.32	37.32	37.32	37.32	37.32	37.32	37.32	
	Measurement	32.17	31.37	31.13	31.64	31.98	31.61	30.93	31.51	31.12	31.59	30.58	30.77	30.44	30.19	30.55	30.75
	Addition	-5.15	-5.95	-6.19	-5.68	-5.34	-5.71	-6.39	-5.81	-6.20	-5.73	-6.74	-6.55	-6.88	-7.13	-6.77	-6.57
Section 6	calculation	26.09	26.09	26.09	26.09	26.09	26.09	26.09	26.09	26.09	26.09	26.09	26.09	26.09	26.09	26.09	
	Measurement	25.76	25.76	25.80	25.77	25.15	24.69	25.30	24.50	23.75	23.24	23.59	23.24	22.76	22.05	21.42	21.02
	Addition	-0.33	-0.33	-0.29	-0.32	-0.94	-1.40	-0.79	-1.59	-2.34	-2.85	-2.50	-2.85	-3.33	-4.04	-4.67	-5.07
Section 7.1	calculation	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	
	Measurement	23.55	23.70	23.09	23.06	22.97	23.22	23.85	23.57	22.35	22.54	22.77	22.41	21.52	21.82	21.61	21.68
	Addition	0.55	0.70	0.09	0.06	-0.03	0.22	0.85	0.57	-0.65	-0.46	-0.23	-0.59	-1.48	-1.18	-1.39	-1.32
Section 7.2	calculation	24.97	24.97	24.97	24.97	24.97	24.97	24.97	24.97	24.97	24.97	24.97	24.97	24.97	24.97	24.97	
	Measurement	26.02	25.44	25.82	25.00	30.28	29.98	29.83	30.72	29.99	29.26	28.65	29.96	24.97	24.97	24.97	24.97
	Addition	1.05	0.47	0.85	0.03	5.31	5.01	4.86	5.75	5.02	4.29	3.68	4.99	-0.04	-0.23	-2.74	-0.63
Section 8	calculation	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	20.54	
	Measurement	24.39	24.03	23.58	23.29	22.60	22.87	21.93	22.20	22.22	21.96	21.14	19.87	20.20	18.59	19.14	19.65
	Addition	3.85	3.49	3.04	2.75	2.06	2.33	1.39	1.66	1.68	1.42	0.60	-0.67	-0.34	-1.95	-1.40	-0.89
Section 9	calculation	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	
	Measurement	26.05	25.77	25.32	25.59	24.86	24.89	25.03	24.33	24.81	25.01	24.35	24.13	23.00	22.32	22.20	21.79
	Addition	6.06	5.78	5.33	5.60	4.87	4.90	5.04	4.34	4.82	5.02	4.36	4.14	3.01	2.33	2.21	1.80
Section 10	calculation	38.88	38.88	38.88	38.88	38.88	38.88	38.88	38.88	38.88	38.88	38.88	38.88	38.88	38.88	38.88	
	Measurement	28.78	29.59	29.58	27.91	32.33	31.26	30.69	30.70	28.23	27.17	28.94	29.08	27.02	27.05	26.60	25.64
	Addition	-10.10	-9.29	-9.30	-10.97	-6.55	-7.62	-8.19	-8.18	-10.65	-11.71	-9.94	-9.80	-11.86	-11.83	-12.28	-13.24
Section 11	calculation	40.64	40.64	40.64	40.64	40.64	40.64	40.64	40.64	40.64	40.64	40.64	40.64	40.64	40.64	40.64	
	Measurement	28.78	29.59	29.58	27.91	32.33	31.26	30.69	30.70	28.23	27.17	28.94	29.08	27.02	27.05	26.60	25.64
	Addition	-11.86	-11.05	-11.06	-12.73	-8.31	-9.38	-9.95	-9.94	-12.41	-13.47	-11.70	-11.56	-13.62	-13.59	-14.04	-15.00
Section 12	calculation	26.58	26.58	26.58	26.58	26.58	26.58	26.58	26.58	26.58	26.58	26.58	26.58	26.58	26.58	26.58	
	Measurement	25.86	25.09	24.99	23.99	23.50	23.06	23.26	23.60	21.55	21.60	22.23	20.88	19.30	18.28	17.37	19.13
	Addition	-0.72	-1.49	-1.59	-2.59	-3.08	-3.52	-3.32	-2.98	-5.03	-4.98	-4.35	-5.70	-7.28	-8.30	-9.21	-7.45
Section 14.1	calculation	22.19	22.19	22.19	22.19	22.19	22.19	22.19	22.19	22.19	22.19	22.19	22.19	22.19	22.19	22.19	
	Measurement	25.39	25.61	25.69	25.73	26.13	25.64	24.96	24.27	22.15	21.96	22.01	21.86	20.63	18.63	17.09	17.28
	Addition	3.20	3.42	3.50	3.54	3.94	3.45	2.77	2.08	-0.04	-0.23	-0.18	-0.33	-1.56	-3.56	-5.10	-4.91
Section 14.2	calculation	20.37	20.37	20.37	20.37	20.37	20.37	20.37	20.37	20.37	20.37	20.37	20.37	20.37	20.37	20.37	
	Measurement	24.12	25.18	24.53	24.72	27.81	27.16	27.27	26.62	24.50	24.66	24.85	25.20	24.30	24.38	24.23	24.33
	Addition	3.76	4.82	4.17	4.36	7.45	6.80	6.91	6.26	4.14	4.30	4.49	4.84	3.94	4.02	3.87	3.97
Section 16	calculation	31.28	31.28	31.28	31.28	31.28	31.28	31.28	31.28	31.28	31.28	31.28	31.28	31.28	31.28	31.28	
	Measurement	29.75	30.01	29.55	30.40	30.49	29.58	28.87	29.37	29.69	29.10	28.37	29.75	28.48	28.23	26.65	28.19
	Addition	-1.53	-1.27	-1.73	-0.88	-0.79	-1.70	-2.41	-1.91	-1.59	-2.18	-2.91	-1.53	-2.80	-3.05	-4.63	-3.09

## 5.2 ตารางคำนวณโอเอสเอ็นอาร์

การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์จะต้องคำนึงถึงค่าความแตกต่างของแต่ละ section เพื่อให้ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณน้อยที่สุด จากผลการวัดในบทที่ 5 จะเห็นว่าค่าการลดทอนจะเป็นตัวแปรสำคัญที่จะมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ โอเอสเอ็นอาร์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้การสร้างเครื่องมือการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ จะนำค่าการลดทอนจากผลการวัดและการคำนวณที่ได้จากการทดสอบระบบมาสร้างเป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณ โดยค่าจากการวัดของแต่ละ section จะใช้ค่าโอเอสเอ็นอาร์ในแบบ F&R ซึ่งเป็นแบบที่ใช้ค่าการลดทอนตามที่ใช้งานจริงและที่ความยาวคลื่นเต็มระบบจากทุกช่องสัญญาณ จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการหาความแตกต่างกับค่าจากการคำนวณ(addition) ค่า addition ที่ได้นี้จะเป็นค่าตัวแปรที่ใช้ในการปรับให้ค่าจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงการวัด ขั้นตอนการสร้างตารางการคำนวณแสดงในหัวข้อต่อไป

### 5.2.1 ตารางบันทึกผล

ตารางการบันทึกผลจะเก็บข้อมูลเกี่ยวกับผลการวัด, ผลการคำนวณและคุณลักษณะของแต่ละ section รูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างตารางบันทึกผลของ section 8

Lambda (nm)	Freq. (THz)	OSNR(F&R)		OSNR Calculaton & Measurement		
		Term.A	Term.B	calculation	Measurement	Addition
1558.98	192.3	32.84	24.39	20.537	24.39	3.853
1557.36	192.5	32.43	24.03	20.537	24.03	3.493
1555.75	192.7	32.64	23.58	20.537	23.58	3.043
1554.13	192.9	32.43	23.29	20.537	23.29	2.753
1552.52	193.1	32.04	22.6	20.537	22.6	2.063
1550.92	193.3	32.31	22.87	20.537	22.87	2.333
1549.32	193.5	31.99	21.93	20.537	21.93	1.393
1547.72	193.7	32.48	22.2	20.537	22.2	1.663
1542.94	194.3	32.55	22.22	20.537	22.22	1.683
1541.35	194.5	32.79	21.96	20.537	21.96	1.423
1539.77	194.7	32.67	21.14	20.537	21.14	0.603
1538.19	194.9	33.33	19.87	20.537	19.87	-0.667
1536.61	195.1	32.73	20.2	20.537	20.2	-0.337
1535.04	195.3	33.58	18.59	20.537	18.59	-1.947
1533.47	195.5	33.2	19.14	20.537	19.14	-1.397
1531.9	195.7	33.03	19.65	20.537	19.65	-0.887

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างตารางบันทึกผล section 8

### 5.2.2 ตารางการคำนวณโอเอสเอ็นอาร์และการลดทอน

ตารางการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์และการลดทอนเป็นตารางที่ใช้ในการคำนวณและบันทึกผลการคำนวณ โดยใช้ค่าจากการออกแบบในเบื้องต้นแบ่งออกได้เป็น 4 ตารางได้แก่

1. ตารางแสดงค่ากำลังงานและค่าการลดทอน (Power and attenuation table): ใช้สำหรับการบันทึกค่ากำลังงานของสัญญาณที่ทุกสถานีและทำการคำนวณค่าการลดทอนของแต่ละ span
2. ตารางแสดงค่าการเชื่อมโยง (Link budget table): เป็นตารางระบุรายละเอียดการเชื่อมโยงของ section ต่างๆ เช่น สถานีที่เชื่อมโยง, ระยะทางระหว่าง span, ค่าการลดทอนจากการคำนวณ
3. ตารางแสดงค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการคำนวณ (OSNR calculation table): ใช้ในการคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์ตามสมการ ITU-T G.652

Term A - ILA 1			ILA1 - ILA 2			ILA2 - TERM.B		
Output BST Term A	Input Pre.	Attenuation(dB)	Output BST ILA1	Input Pre.	Attenuation(dB)	Output BST ILA3	Input Pre.	Attenuation(dB)
14	-5.51	19.51	14	-9.11	23.11	14	-7.3514	21.3514

รูปที่ 5.3 ตารางแสดงค่ากำลังงานและค่าการลดทอน (Power and attenuation table)

Section No.	Station			distance (Km.)	Fibre lose dB/Km.	real (dB)	measure (dB)
	A	-	B				
8	AYA	-	SBR	82.85	0.2525	20.91963	20.920
	SBR	-	CNT	58.31	0.2525	14.72328	14.277
(161)	CNT	-	NSN	103.13	0.2525	26.04033	26.040
	NSN	-	KKG	78	0.2525	19.695	19.695
	KKG	-	TAK	116.86	0.2525	29.50715	29.196
	TAK	-	MPK	75.93	0.2525	19.17233	19.172
	MPK	-	LPG	117.97	0.2525	29.78743	29.787
	LPG	-	CMI II	112.34	0.2525	28.36585	28.366

รูปที่ 5.4 ตารางแสดงค่าการเชื่อมโยง (Link budget table)

Section	Pin(dB)	L(dB)	NF(dB)	N	10logN	OSNR(dB)
8	0	23.43168	5	8	9.03089987	20.537

รูปที่ 5.5 ตารางแสดงค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการคำนวณ (OSNR calculation table)

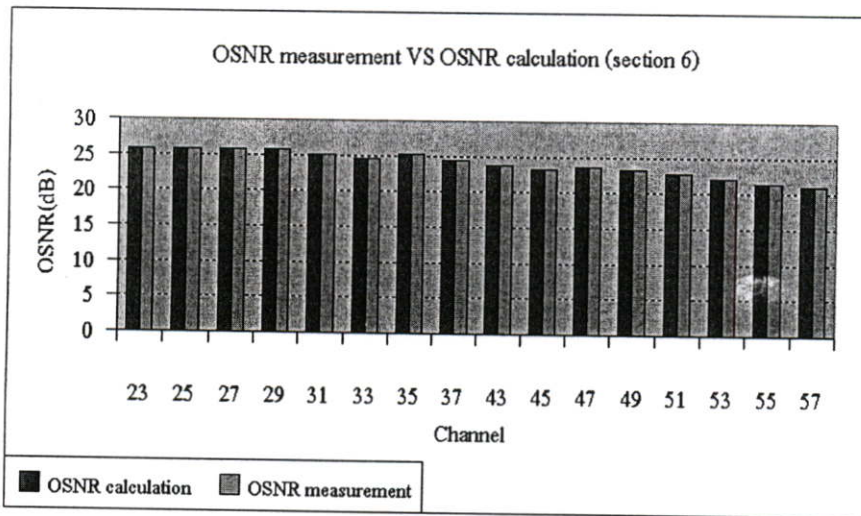
Channel	Calculation					
	OSNR cal.	OSNR mea.	Addition	OSNR tool	OSNR comp.	Lambda comp.
23	20.537	24.390	3.853	20.537	24.390	0.321
25	20.537	24.030	3.493	20.537	24.030	0.291
27	20.537	23.580	3.043	20.537	23.580	0.254
29	20.537	23.290	2.753	20.537	23.290	0.229
31	20.537	22.600	2.063	20.537	22.600	0.172
33	20.537	22.870	2.333	20.537	22.870	0.194
35	20.537	21.930	1.393	20.537	21.930	0.116
37	20.537	22.200	1.663	20.537	22.200	0.139
43	20.537	22.220	1.683	20.537	22.220	0.140
45	20.537	21.960	1.423	20.537	21.960	0.119
47	20.537	21.140	0.603	20.537	21.140	0.050
49	20.537	19.870	-0.667	20.537	19.870	-0.056
51	20.537	20.200	-0.337	20.537	20.200	-0.028
53	20.537	18.590	-1.947	20.537	18.590	-0.162
55	20.537	19.140	-1.397	20.537	19.140	-0.116
57	20.537	19.650	-0.887	20.537	19.650	-0.074

รูปที่ 5.6 ตัวอย่างตารางแสดงค่าการชดเชยโอเอสเอ็นอาร์(Addition table):

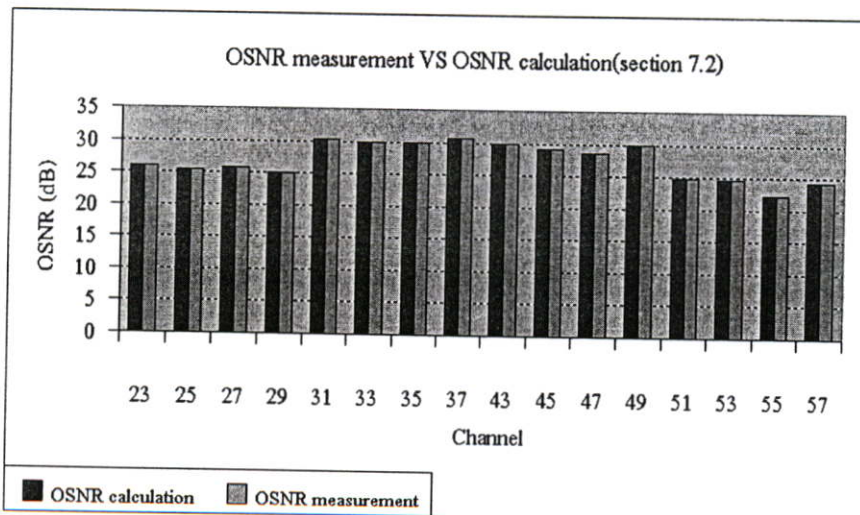
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการวัดกับผลจากตารางการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์

Channel	Section 6		Section 7.2		Section 142		Section 16	
	OSNR measurement	OSNR calculation	OSNR measurement	OSNR calculation	OSNR measurement	OSNR calculation	OSNR measurement	OSNR calculation
23	25.760	25.760	26.020	26.020	24.120	24.120	29.750	29.750
25	25.760	25.760	25.440	25.440	25.180	25.180	30.010	30.010
27	25.800	25.800	25.820	25.820	24.530	24.530	29.550	29.550
29	25.770	25.770	25.000	25.000	24.720	24.720	30.400	30.400
31	25.150	25.150	30.280	30.280	27.810	27.810	30.490	30.490
33	24.690	24.690	29.980	29.980	27.160	27.160	29.580	29.580
35	25.300	25.300	29.830	29.830	27.270	27.270	28.870	28.870
37	24.500	24.500	30.720	30.720	26.620	26.620	29.370	29.370
43	23.750	23.750	29.990	29.990	24.500	24.500	29.690	29.690
45	23.240	23.240	29.260	29.260	24.660	24.660	29.100	29.100
47	23.590	23.590	28.650	28.650	24.850	24.850	28.370	28.370
49	23.240	23.240	29.960	29.960	25.200	25.200	29.750	29.750
51	22.760	22.760	24.930	24.930	24.300	24.300	28.480	28.480
53	22.050	22.050	24.740	24.740	24.380	24.380	28.230	28.230
55	21.420	21.420	22.230	22.230	24.230	24.230	26.650	26.650
57	21.020	21.020	24.340	24.340	24.330	24.330	28.190	28.190

ตัวอย่างผลการคำนวณจากตารางการคำนวณแสดงในตารางที่ 5.2 เป็นการเปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณที่ได้ชดเชยค่า addition แล้วโดยจะแสดงที่ section 6, 7.2, 14.2 และ section 16 จะเห็นว่าหลังจากได้รับการชดเชยค่าโอเอสเอ็นอาร์ ค่าที่คำนวณได้จะมีความแม่นยำมากกว่าการคำนวณจากการใช้สมการโดยตรงและเมื่อได้ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าการลดทอนในแต่ละ span ค่าการคำนวณที่ได้จากตารางยังคงมีค่าใกล้เคียงการวัดมากกว่าการคำนวณจากสมการที่ยังไม่มีการชดเชยค่าโอเอสเอ็นอาร์ เมื่อนำผลจากตารางที่ 5.2 มาทำการพล็อตกราฟ (รูปที่ 5.7) จะเห็นว่าผลการวัดและการคำนวณจะมีค่าโอเอสเอ็นอาร์ ที่เท่าๆ กันในทุกๆ ความยาวคลื่น



(ก)



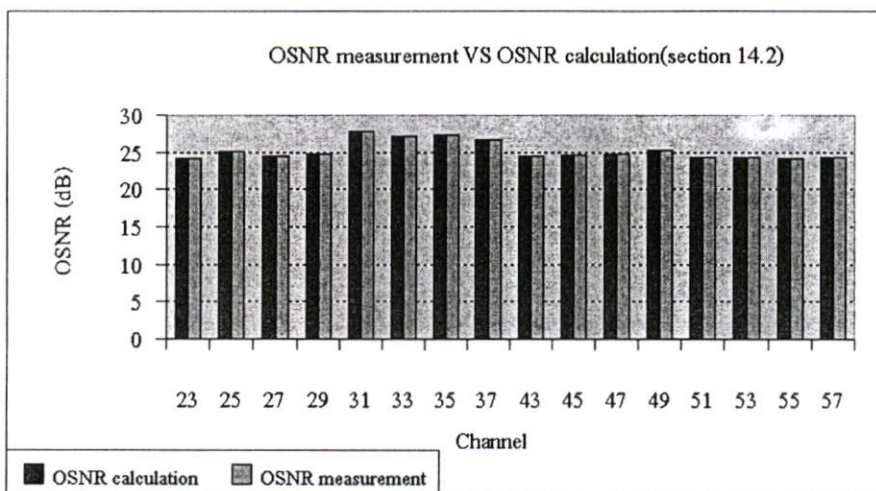
(ข)

รูปที่ 5.7 (ก) เปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณจากตาราง section 6

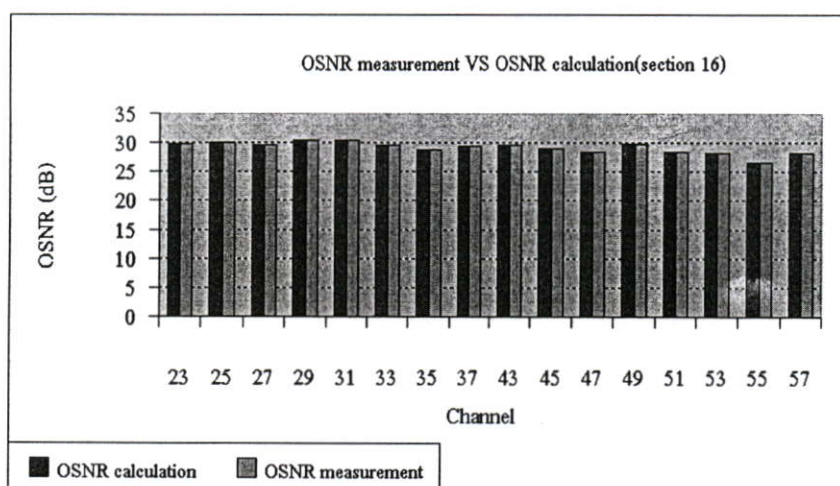
(ข) เปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณจากตาราง section 7.2

(ค) เปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณจากตาราง section 14.2

(ง) เปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณจากตาราง section 16



(ค)



(ง)

### รูปที่ 5.7 (ต่อ)

#### 5.2.3 การทดสอบตารางคำนวณโอเอสเอ็นอาร์

การทดสอบตารางคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์จะนำผลจากการวัดที่ความยาวคลื่นเต็มระบบบวกการลดทอน 5 dB (F&M)มาทำการเปรียบเทียบกับการคำนวณเมื่อเพิ่มค่าการลดทอน 5 dB ที่ทุก section โดยใช้ค่าจากการวัดและการคำนวณที่ section 6, 7.2, 14.2 และ section 16 เพื่อทดสอบความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อค่าการลดทอนของเคเบิลมีการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าค่าจากการคำนวณเมื่อทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงการลดทอนของเคเบิลแล้วจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในบางช่องสัญญาณเนื่องจาก 1).การเพิ่มค่าการลดทอนจะใช้ตัวลดทอนชนิดคงที่ (fix. attenuator) ซึ่งอาจมีค่าการลดทอนไม่ตรงตามค่าที่กำหนดไว้ที่ 5 dB 2). อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจะมี saturation lambda ซึ่งทำหน้าที่ในการชดเชยกำลังงานของความยาวคลื่นในระบบเพื่อให้ค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าใกล้เคียงกัน 3).

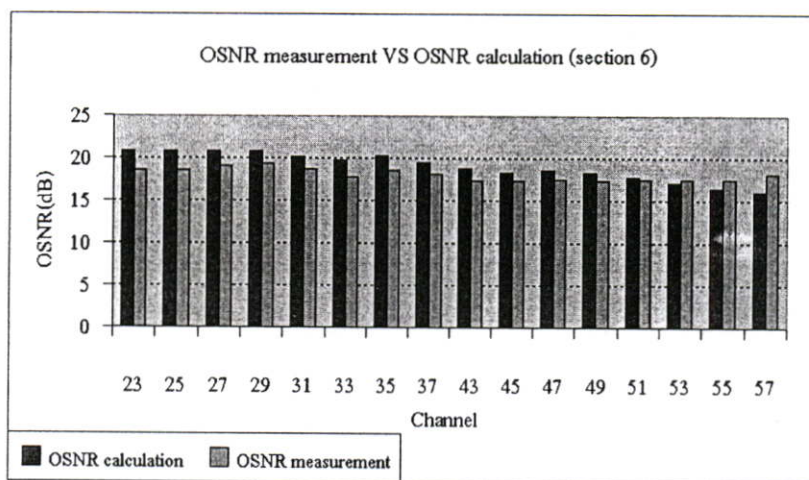
คุณสมบัติการขยายสัญญาณของ EDFA ที่ความยาวคลื่นต่างๆจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามแถบความยาวคลื่นที่ใช้เมื่อมีการลดทอนมีค่าเพิ่มขึ้นคุณสมบัติของ EDFA จะเปลี่ยนแปลงไปตามการลดทอนที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเฉลี่ยค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ทุกๆช่องสัญญาณของการวัดและการคำนวณเปรียบเทียบกับกันจะพบว่าค่าของโอเอสเอ็นอาร์จะมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันยิ่งขึ้นดังแสดงในตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.9

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการวัดกับคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการลดทอน

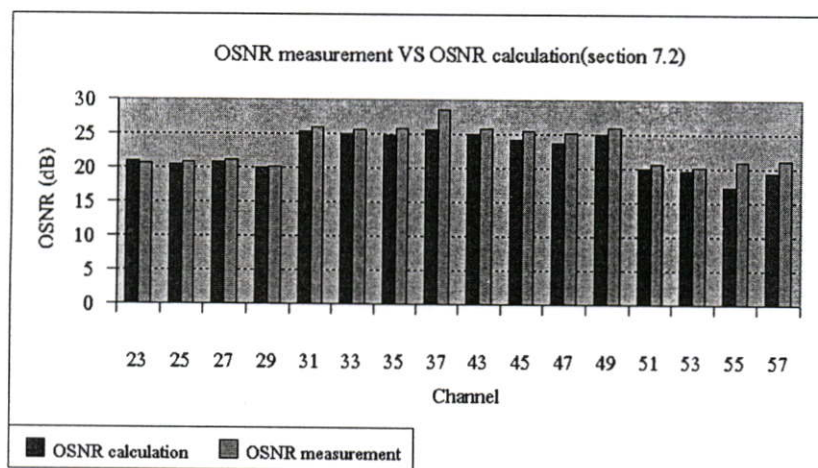
Channel	Section 6		Section 7.2		Section 14.2		Section 16	
	OSNR measurement	OSNR calculation	OSNR measurement	OSNR calculation	OSNR measurement	OSNR calculation	OSNR measurement	OSNR calculation
23	18.510	20.760	20.640	21.020	19.000	19.120	25.880	24.750
25	18.610	20.760	20.760	20.440	19.980	20.180	26.700	25.010
27	19.110	20.800	21.150	20.820	19.750	19.530	25.300	24.550
29	19.290	20.770	20.130	20.000	20.430	19.720	26.350	25.400
31	18.640	20.150	25.940	25.280	23.020	22.810	26.140	25.490
33	17.780	19.690	25.700	24.980	22.430	22.160	25.400	24.580
35	18.590	20.300	25.800	24.830	22.470	22.270	24.900	23.870
37	18.130	19.500	28.470	25.720	22.420	21.620	24.740	24.370
43	17.410	18.750	25.750	24.990	21.370	19.500	24.540	24.690
45	17.370	18.240	25.560	24.260	21.380	19.660	24.260	24.100
47	17.450	18.590	25.240	23.650	21.660	19.850	23.290	23.370
49	17.370	18.240	25.960	24.960	22.140	20.200	24.470	24.750
51	17.460	17.760	20.610	19.930	22.220	19.300	23.560	23.480
53	17.460	17.050	20.100	19.740	20.940	19.380	23.400	23.230
55	17.470	16.420	21.020	17.230	19.430	19.230	22.530	21.650
57	18.170	16.020	21.180	19.340	18.730	19.330	22.700	23.190

ตารางที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยผลการวัดกับคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์

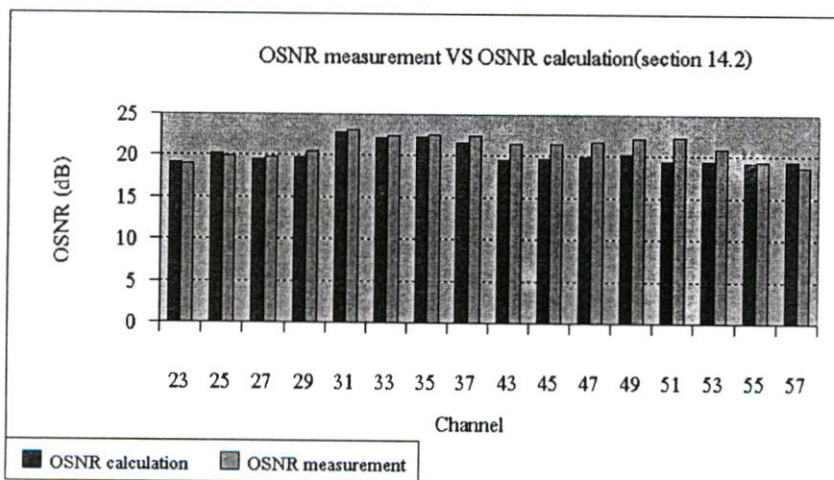
Channel	Section 6		Section 7.2		Section 14.2		Section 16	
	OSNR measurement	OSNR calculation	OSNR measurement	OSNR calculation	OSNR measurement	OSNR calculation	OSNR measurement	OSNR calculation
Average	18.051	18.988	23.376	22.324	21.086	20.241	24.635	24.155



(ก)

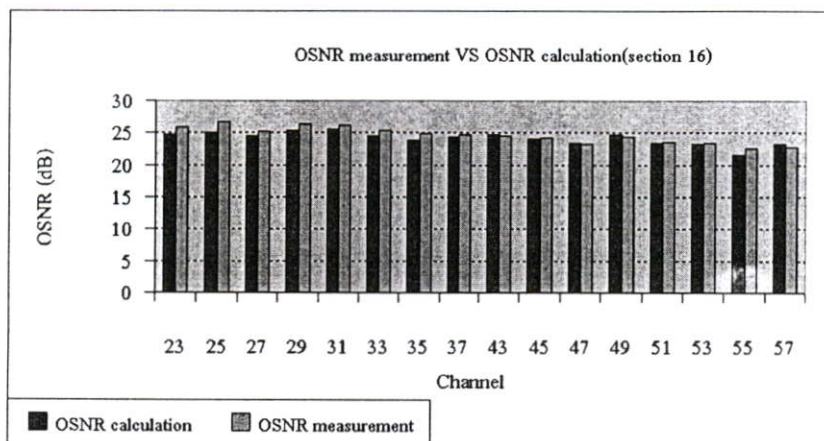


(ข)



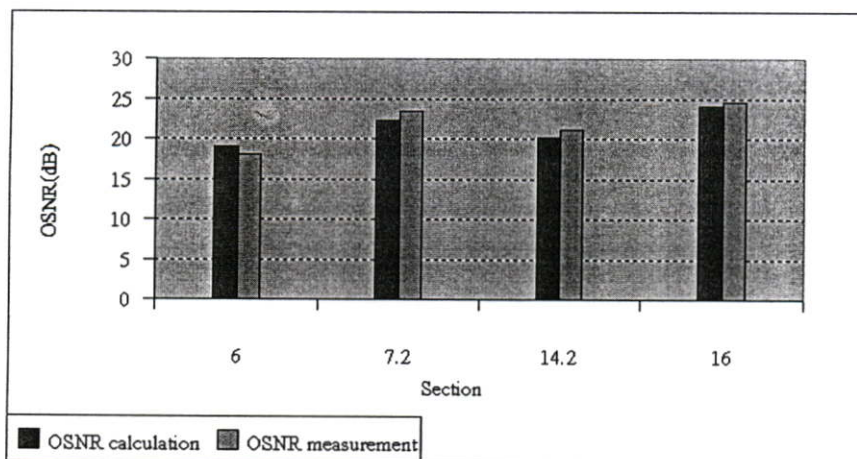
(ค)

รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณจากตารางเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าการลดทอนเพิ่มขึ้น 5 dB ทุกๆ span section (ก) section 6, (ข) section 7.2 , (ค) section 14.2, (ง) section 16



(ง)

รูปที่ 5.8 (ต่อ)



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโอเอสเอ็นอาร์ การวัดกับการคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าการลดทอน

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผล

ระบบดับเบิลยูดีเอ็ม เป็นระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง โดยมีข้อดีตรงที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูง สามารถนำไปใช้ในงานเชื่อมโยงโครงข่ายที่ต้องการแบนวิidth สูง ระยะทางไกล และมีการใช้เส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างคุ้มค่าที่สุด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม ที่ใช้ในการเชื่อมโยงโครงข่ายหลักผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีผลโดยตรงกับโอเอสเอ็นอาร์ในระบบ การเชื่อมโยงโครงข่ายหลัก การศึกษาจะทำการวัดและทดสอบโอเอสเอ็นอาร์ของระบบทั้งหมด 16 ส่วน โดยทำการทดสอบ 3 แบบได้แก่ 1. การวัดและทดสอบที่ความยาวคลื่นใช้งานต่อระยะทาง (Contractual load Real Span :C&R) 2. การวัดและทดสอบที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทาง (Full load Real Span :F&R) 3. การวัดและทดสอบที่ความยาวคลื่นเต็มระบบต่อระยะทางบวกค่าการลดทอน (Full load Max. Span:F&M) จากนั้นจะนำผลที่ได้จากการวัดและทดสอบมาทำการเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากสมการใน ITU-T G.692 ทำการหาคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละ section และสร้างตารางการคำนวณโอเอสเอ็นอาร์ตามคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละ section เพื่อใช้ในการบำรุงรักษาระบบในเบื้องต้น

ผลการทดสอบในแบบที่ 1 (C&R) แสดงให้เห็นว่าระยะทางมีผลกระทบกับโอเอสเอ็นอาร์โดยตรง

ผลการทดสอบในแบบที่ 2 (F&R) แสดงให้เห็นว่าจำนวนของความยาวคลื่นที่ใช้ในระบบมีผลกระทบต่อโอเอสเอ็นอาร์โดยตรง

ผลการทดสอบในแบบที่ 3(F&M) แสดงให้เห็นว่าที่ระยะทางเท่าเดิมค่าการลดทอนที่เพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบต่อโอเอสเอ็นอาร์

การคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ตามคำแนะนำใน ITU-T G.692 เราพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีผลลัพธ์ที่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัดในบางส่วน โดยการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกับการวัดที่ระยะทางระหว่างช่วง (span) 70-80 กม.และที่ระยะทางรวมระหว่างส่วน (section) มากกว่า 200 กม.ขึ้นไป ค่าของโอเอสเอ็นอาร์ที่แตกต่างกันในบางช่วงสถานีสาเหตุเนื่องมาจากการติดตั้งใช้งานจริงไม่สามารถใช้ระยะทางที่เท่าๆ กันทุกช่วงของสถานีและค่าของการลดทอนที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าที่คำนวณมาจากระยะทางตามแบบการติดตั้งเคเบิล ดังนั้นในการติดตั้งตามความเป็นจริงจะเห็นว่ามีส่วนแปรหลายตัวแปรที่อาจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปได้ เช่นค่าของการลดทอนจากการเชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสง (Splicing Attenuation) ซึ่งในการติดตั้งจริงค่าที่ได้อาจจะ

ค่าที่มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในการคำนวณก็ได้หรือค่าการลดทอนของเคเบิลใยแก้วนำแสง (Line Attenuation) ก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพในการผลิตของผู้ผลิตหรือค่าสูญเสียจากอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Connector Loss) ก็อาจจะมิต่ำที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในสมการซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะทำให้ค่าของการลดทอนที่ใช้ในการคำนวณเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลทำให้ค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่คำนวณได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย การที่จะทำให้ค่าจากการคำนวณมีความถูกต้องยิ่งขึ้นเราจะต้องมีแหล่งข้อมูลที่มีรายละเอียดที่มากขึ้นเช่นค่าของการลดทอน และกำลังงานในส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่มาจากการวัด และข้อมูลทางเทคนิคจากผู้ผลิตโดยละเอียดมาทำการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ที่ทุกสถานีก็จะทำให้เราคำนวณค่าของ โอเอสเอ็นอาร์ได้แม่นยำมากขึ้น

การสร้างตารางการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ โดยใช้ข้อมูลจากคุณลักษณะเฉพาะที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการวัดและการคำนวณของแต่ละ section ทำให้การคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ได้ผลใกล้เคียงการวัดมากขึ้นและสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการประมาณการค่าโอเอสเอ็นอาร์ของระบบได้ในเบื้องต้น เพื่อการบำรุงรักษาโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในขั้นต่อไปที่น่าสนใจ

1. งานวิจัยที่น่าสนใจเกี่ยวกับการวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ อีกด้านหนึ่งนอกเหนือจากงานวิจัยที่ได้เสนอไว้คือ งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลของ โอเอสเอ็นอาร์ที่มีต่ออัตราการส่งข้อมูล (bit rate) โดยจะศึกษาความสัมพันธ์, ผลกระทบที่มีต่ออัตราการส่งข้อมูล, การประมาณการค่าความผิดพลาด (error) ของอัตราการส่งข้อมูลที่เกิดจากค่าโอเอสเอ็นอาร์เพื่อใช้ประโยชน์ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาโครงข่าย

2. งานวิจัยที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งก็คือ การประมาณการค่าความสามารถใช้สอยได้ของ โอเอสเอ็นอาร์ในระบบดับเบิลดูดีเอ็ม ซึ่งอาจทำให้สามารถคาดการณ์คุณสมบัติของระบบที่ให้อยู่ได้และสามารถป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับโครงข่ายได้ก่อนเกิดปัญหาจริงหรือใช้ในการปรับปรุงระบบหรือการขยายระบบ

3. เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยโดยใช้ข้อมูลจากสถิติการวัดเป็นหลักในการวิเคราะห์ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถทำการทดสอบได้บ่อยครั้งเนื่องจากอาจทำให้การบริการในโครงข่ายเกิดปัญหาได้ ดังนั้นการพัฒนาคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์จากสมการใน ITU-T G.692 ให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานในงานวิจัยนี้ อาจสามารถทำให้การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ทำได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อธิคม ฤกษ์บุตร. 2546. **เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งาน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ด  
ยูเคชั่น.
- [2] J.P. LAUDE. **Wavelength Division Multiplexing**. Paris : Simon & Schuster International  
Group. 1993.
- [3] GOVIND P.AGRAWAL, **Fiber-Optic Communication System** .Thrid Edition. NY,  
John. Wiley & Son, Inc. 2002
- [4] A.R. Chraplyvy. "Limitations on lightwave communications laser for optical  
communication." **J. Lightwave Technology** ., vol.8, no.10, 1991. pp.1548-1557.
- [5] G.R.Waarts, A.Friesem, E.Lichtman, H.H.Yaffe, and R.P. Braum. "Nonlinear effects in  
coherent multichannel transmission through optical fibers." **J. Lightwave Technology**.,  
vol.78, no.8, 1990. pp.1344-1368.
- [6] A.E Wilner and S. Hwang. "Transmission of many WDM channel through a cascade op  
EDFA's in long-distance link and ring network." **J. Lightwave Technology**., vol.13,  
no.5, 1995. pp.841-849.
- [7] G.R.Hill. "Wavelength domain optical network technique." **Proc. IEEE**., vol.77, no.1,  
1990. pp.121-132.
- [8] Tony Antony, Ashwin Gumaste. **DWDM Network Designs and Engineering Solution**.  
Cissco Press, 2003.
- [9] A.Ehrhardt and Gladisch. "Test For WDM Field Trials Over 750 Km With Full  
Compensation of Chromatic Dispersion." **The Institution of Electrical Engineering**,  
**IEE Savoy Place** ., London WC2R OBL,1999. pp.5/1-5/5.
- [10] F.Pope, K. Wellington, G Keiser, GTE Government Systems Cooperation. "BIT ERROR-  
RATE MEASUREMENTS IN A WDM NETWORK." **IEEE**., 1995. pp.1284-1287.
- [11] Alcatel University . **Alcatel 1686 WM R3.3 Operation and Maintenance**. Italy , 2000.
- [12] ITU-T rec.G.652. **Characteristics of a single-mode optical fiber cable**., ITU-T G series,  
2002.
- [13] ITU-T rec.G.692 . **Optical interfaces for mutichannel systems with optical amplifiers**.,  
ITU-T G series, 2002.
- [14] ITU-T rec.G.661. **Definition and test methods for the relevant generic parameter of  
optical amplifier devices and sunsystem** ., ITU-T G series,2002

## ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

## คำย่อ

ASE	Amplifier Spontaneous Emission
APD	Avalanche Photo diode
AWG	Arrayed waveguide
BER	Bit errorate
CT	Crosstalk
DBR	Distribution Bragg Reflector
DCU	Dispersion Compensation Unit
DFB	Distribution-FeedBack
DMUX	Demultiplexer
DRA	Distribution Raman Amplifier
DWDM	Dense WDM
EDFA	Erbium-Dope Fiber Amplifier
FP	Fabry-perot
FSR	Ffree Spectral Rang
FWM	Four Wave Mixxing
ILA	In-Line Amplifier
LED	Light Emitting Diode
NF	Noise Figure
OMS	Optical Multiplex Section
OSA	Optical Spectrum Analyzer
OSC	Optical Supervisory Channel
OSNR	Optical signal to Noise Ratio
PAM	Plus Amplitude Modulation
PCM	Plus Code Modulation
RIN	Relative Intensity Noise,
SCM	Subcarrier Multiplexing
SMF	Single Mode Fiber
SPM	Self phase modulation

TDM	Time Division Multiplexing
TE	Transverse electric mode
TM	Transverse magnetic mode
WDM	Wavelength Division Multiplexing
Terminal	end station
Section	terminal to terminal
Span	station to station

## ภาคผนวก ข.

## ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. จรุงภพ รามางกูร และสุทธิชัย นพนาถิพงษ์. 2548. “การทดสอบ โอเอสเอ็นอาร์ต่อระยะทางการส่งสัญญาณของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม.” การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 สาขาไฟฟ้าสื่อสาร. ภูเก็ต : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ตุลาคม 2548. หน้า 825- 828.
2. จรุงภพ รามางกูรและคณะ. “การศึกษาความสามารถใช้สอย โอเอสเอ็นอาร์ของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม 16 ช่องสัญญาณเพื่อการขยายโครงข่ายหลัก.” การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 5 : กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ตุลาคม 2548.

## การทดสอบ โอ เอส เอ็น อาร์ต่อระยะทางการส่งสัญญาณ ของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม

### Test on OSNR and Transmission Distance of WDM System

จรุงภพ รามางกูร และสุทธิชัย นพนาทิงษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3ม. 2 ถนนจลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ. 10520

โทร. 0-2273-2427-8 โทรสาร 0-27392429 E-mail:jarungpob@yahoo.co.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่ากำลังสัญญาณต่อค่ากำลังสัญญาณรบกวน (OSNR) ของการส่งสัญญาณในระบบ WDM ระหว่างจังหวัดเชียงใหม่ถึงจังหวัดอุตรดิตถ์โดยทำการวัดค่าระดับสัญญาณของแต่ละช่องสัญญาณที่ถูกมอดูเลตจำนวน 16 ช่องสัญญาณ[1] จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาจัดให้อยู่ในรูปการลดทอนของระดับสัญญาณ OSNR กับระยะทาง โดยจะพบว่าค่าของ OSNR จะมีค่าลดลงตามระยะทางในการส่งสัญญาณ จากนั้นเราจะทำการคำนวณค่า OSNR ของสัญญาณจากสมการใน ITU-T G.692[2] และทำการเปรียบเทียบค่าจากการวัดและการคำนวณ ท้ายสุดเราจะทำการสรุปผลที่ได้จากการเปรียบเทียบและแนวทางในการปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพที่สุด

คำสำคัญ: โอ เอส เอ็น อาร์ , ดับเบิลยูดีเอ็ม, การลดทอน

#### Abstract

This study is to measure the Optical Signal-to-Noise Ratio (OSNR) of signal transmission in WDM system between Chiangmai and Ayutthaya by measuring the OSNR level of all 16 modulated channels[1]. The data can be presented as signal loss and level. It is found that OSNR will decrease as the transmission length increases. Then OSNR is estimated from the equation in ITU-T G.692[2] and the results from the measurement and the calculation are compared. Finally, the conclusion and guideline for improving the system performance are given.

Keywords: OSNR , WDM , Attenuation

#### 1. คำนำ

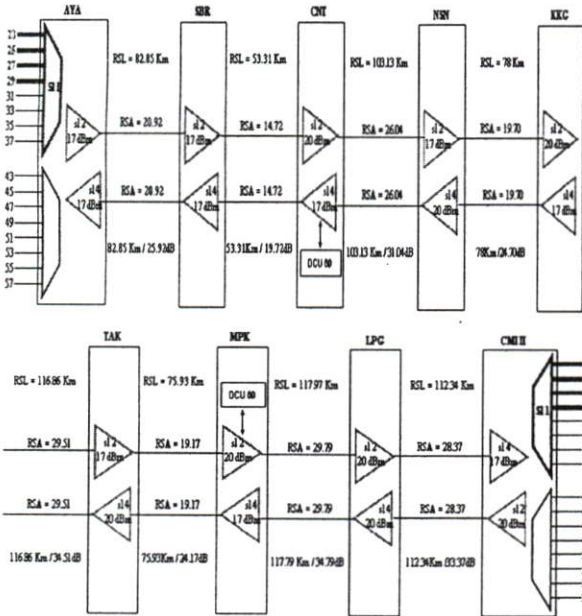
ปัจจุบันการสื่อสารข้อมูลในประเทศไทยมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ดังนั้นโครงข่ายของระบบการสื่อสารสัญญาณจะต้องมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้สามารถส่งสัญญาณที่มีความเร็วที่สูง และมีระยะทางในการส่งสัญญาณที่ไกลขึ้นเพื่อสามารถรองรับการเจริญเติบโตที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งระบบหนึ่งๆที่เริ่ม

นำมาใช้ก็คือเทคนิคการส่งสัญญาณระบบ WDM ในโครงข่ายใยแก้ว ในทางปฏิบัติค่าที่เป็นเครื่องบ่งชี้ว่าระบบทำงานได้มีประสิทธิภาพได้มากน้อยแค่ไหนก็คือค่าของ OSNR ค่าของ OSNR นี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายส่วนประกอบกัน เช่น ระยะทางของ Optical cable, ชนิดของ Optical cable, Noise figure ภายใน Amplifier ของระบบ, ขนาดกำลังการขยายสัญญาณของ Amplifier เป็นต้น ผลของปัจจัยต่างๆเหล่านี้จะทำให้ระดับกำลังงานของ OSNR, คุณสมบัติและความเชื่อถือได้ในการเชื่อมโยงการสื่อสารลดลง [3-6] ดังนั้นในการออกแบบติดตั้งระบบ WDM และการปรับปรุงระบบให้การทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและได้ผลดี ข้อมูลต่างๆเช่น ระยะทางระหว่าง Span, จำนวนของ Span, ค่า Noise figure ภายใน Amplifier ของระบบ, ขนาดกำลังการขยายสัญญาณของ Amplifier, จำนวนของช่องสัญญาณที่ใช้ สิ่งเหล่านี้จะเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการออกแบบและปรับปรุงระบบ WDM ITU ได้แนะนำสมการในการคำนวณค่าของ OSNR ไว้ใน ITU-T G.692[2] ในบทความนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการวัดค่า OSNR ในส่วนต่างๆของระบบในแต่ละ Span จากสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีอุตรดิตถ์ ทำการเปรียบเทียบการลดทอนของ OSNR กับระยะทาง และจัดรูปแบบข้อมูลที่ได้ในรูปแบบของกราฟ จากนั้นคำนวณค่า OSNR ตามคำแนะนำของ ITU-T G.692 จากข้อมูลที่ได้ ทำการเปรียบเทียบค่า OSNR ที่ได้จากการวัดกับการคำนวณ ท้ายสุดเราจะสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับการลดทอนของ OSNR, ค่า OSNR ต่อกิโลเมตร, ค่า OSNR จากการวัดกับการคำนวณและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณเปรียบเทียบกับระยะทาง

#### 2. สถานที่ติดตั้งและ การเชื่อมโยง

การวิจัยครั้งนี้เราได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ Terminal ที่สถานีเชียงใหม่และสถานีอุตรดิตถ์โดยทำการเชื่อมต่อด้วย Optical fiber ชนิด Single mode (SSMF) ตามมาตรฐาน ITU-T G.652[4] มีสถานีทวนสัญญาณ 7 สถานีที่ Terminal จะประกอบด้วยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความยาวคลื่น (Transponder), อุปกรณ์รวมและแยกความยาวคลื่นแบบ 8 ช่องสัญญาณ (Optical multiplexer), Pre-amplifier, Expansion และ Booster ในส่วนของสถานีทวนสัญญาณจะประกอบด้วยอุปกรณ์ Optical In-line Amplifier แบบ EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) การทดสอบจะ

ทำการเชื่อมโยงอุปกรณ์ตามรูปที่ 1 โดยที่อุปกรณ์ Terminal จะถูกติดตั้งไว้ที่สถานีต้นทาง-สถานีปลายทางและเชื่อมต่อกับด้วย Optical fiber ผ่านสถานีทวนสัญญาณตามสถานีที่ได้ออกแบบทั้งหมด 7 สถานีและทำการวัดค่าของ OSNR ของระบบที่ความยาวคลื่นเต็มระบบกับค่าการลดทอนสูงสุด (full load, max span attenuation) โดยค่าการลดทอนสูงสุดจะบวกค่าของการลดทอนที่เผื่อไว้ในอนาคต (margin) เข้าไปอีก 4 dB และ 1 dB สำหรับ Connector loss ต่อหนึ่งช่วง (span) การเชื่อมโยงจะเริ่มต้นจากสถานี AYA ไปยังสถานีทวนสัญญาณ SBR-CNT-NSN-KKG-TAK-MPK-LPG ถึงสถานี CMI II ในการทดสอบนี้เราจะทำการวัดและเก็บผลการวัดโดยเริ่มต้นจากสถานี CMI II ไปยังสถานี AYA โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ RSL (Real span length : Km) = ค่าระยะทางในแต่ละช่วงสถานี, RSA (Real span attenuation : dB) = ค่าการลดทอนจากในแต่ละช่วงสถานีและได้แสดงค่าของค่าการลดทอนที่เพิ่ม margin 4 dB และค่าของ Connector loss 1 dB ไว้ที่ส่วนล่างของรูปการเชื่อมโยง นอกจากนี้ได้แสดงค่ากำลังส่งออกรวมทุกความยาวคลื่น (Power output) ของ Amplifier ในทุกๆ สถานี

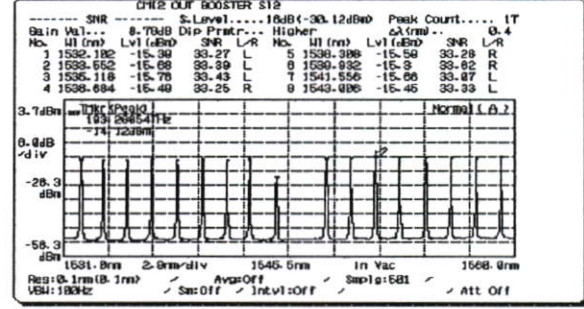


รูปที่ 1. การเชื่อมโยงอุปกรณ์ WDM ที่ใช้ในการทดสอบ

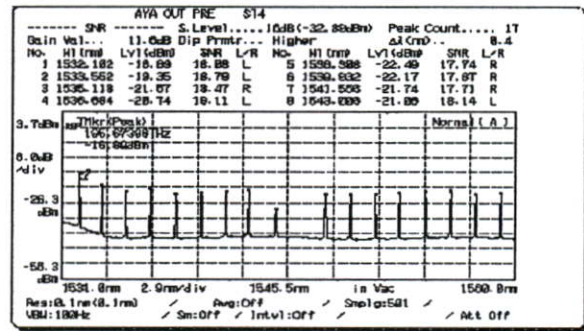
3. ผลการวัด

ค่าจากการวัด OSNR ที่แต่ละช่องสัญญาณเข้าไปจำนวน 16 ช่องสัญญาณ ที่ความเร็ว 2.5Gbps ในระบบ SDH STM-16 มีการชดเชย Dispersion = -990 ps/nm ที่สถานีแม่ทริก (MPK) แสดงในรูปที่ 2 และ 3 ในรูปที่ 2. แสดงค่า OSNR ที่สถานีเชียงใหม่ (CMI II) ซึ่งเป็นสถานีต้นทาง จะมี OSNR ของแต่ละช่องสัญญาณอยู่ที่ประมาณ 34 dB รูปที่ 3. แสดงค่า OSNR ที่สถานีอยุธยา (AYA) ซึ่งเป็นสถานีปลายทางจะมีค่า OSNR ของแต่ละช่องสัญญาณอยู่ที่ประมาณ 18 dB โดยมี Lambda Saturation (มีค่า

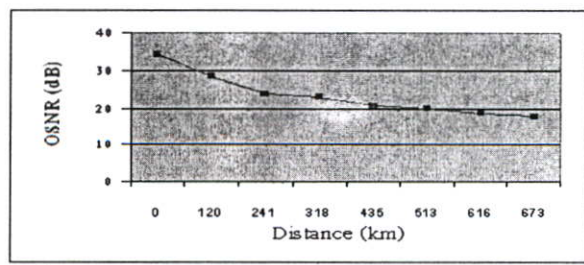
ต่ำที่สุดในรูปที่ 1, 2) เป็นตัวชดเชยกำลังงานของทุกช่องสัญญาณการประมาณ OSNR เราจะใช้การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าที่วัดได้ที่สถานีปลายทางเป็นค่าของ OSNR หลังจากผ่านสถานีทวนสัญญาณ 7 สถานี โดยมีระยะทางรวมประมาณ 760.99 กิโลเมตร จากผลการวัดที่แต่ละสถานีเราพบว่าค่าของ OSNR จะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าเราจะปรับเพิ่มกำลังงานของสัญญาณ โดยใช้ Booster ที่สถานีทวนสัญญาณหรือเพิ่มสถานีทวนสัญญาณในรูปที่ 1. ขึ้นมาก็ก็ตามค่าของ OSNR ก็ลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ของค่า OSNR กับระยะทางแสดงในกราฟรูปที่ 4. จะเห็นว่าค่าของ OSNR จะลดลงตามระยะทางสะสมที่เพิ่มขึ้นคิดเป็นค่าเฉลี่ยต่อกิโลเมตรประมาณ 0.022 dB/km (ค่าของในกราฟระยะทางจะต้องคูณด้วย 10) การจะปรับปรุงค่า OSNR ให้ดีขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่ม Terminal ขึ้นมาอีกเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณใหม่ก่อนที่จะส่งต่อไปยังปลายทางที่ต้องการต่อไป [5-6]



รูปที่ 2 OSNR ที่สถานีต้นทาง (CMI II)



รูปที่ 3 OSNR ที่สถานีปลายทาง (AYA)



รูปที่ 4. OSNR เปรียบเทียบกับระยะทางสะสม

#### 4. การคำนวณ OSNR จาก ITU-T G.692

ในบทความนี้จะทำการคำนวณค่า OSNR จากสมการที่ I-3 ใน ITU-T G.692 พารามิเตอร์ที่สำคัญมีดังนี้

1. กำลังงานของช่องสัญญาณ  $P_{out}$  จากการระบุคุณสมบัติของอุปกรณ์มีค่า 0 dB [1]
2. Noise figure ของ Amplifier NF มีค่า 6 dB [7]
3.  $10 \text{Log}[h\nu\Delta\nu_0]$  มีค่า -58 dB ในความยาวคลื่น  $1.55 \mu\text{m}$  ที่ resolution bandwidth 0.1 nm [2]

สูตรการคำนวณ OSNR มีดังนี้

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10 \text{Log}N - 10[h\nu\Delta\nu_0] \text{dB} \quad (1)$$

ค่าของ L ได้มาจากการ

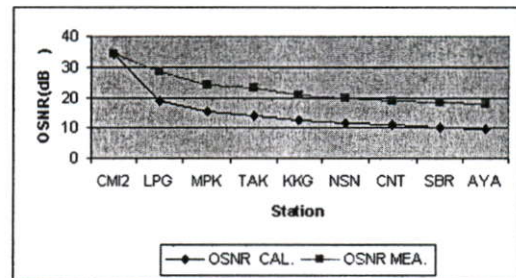
$$L = [D/4 * A] + [D * B] + [2 * C] \quad (2)$$

โดยที่ในงานวิจัยนี้กำหนดให้

1. ค่าของ Splicing attenuation A = 0.05 dB/Point
2. ค่าของ Line attenuation B = 0.024 dB/Km
3. ค่าของ Connector loss C = 0.5 dB/connector
4. D เป็นความยาวของเคเบิล ในหน่วย Km

ในสมการที่ (1) ค่า  $P_{out}$  และ NF เป็นค่าที่ได้จากคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ,  $P_{out}$  หมายถึง กำลังงานขาออกต่อช่องสัญญาณ ในหน่วย dB, NF หมายถึง External Noise figure ในหน่วย dB, L หมายถึงการลดทอนของ span ระหว่าง Amplifier ในหน่วย dB,  $\Delta\nu_0$  หมายถึง Optical Bandwidth, N หมายถึง จำนวนของ span ในช่วงระหว่างเทอร์มินัลถึงเทอร์มินัลโดยใน ITU-T G.692 สมมุติให้ทุกๆ span มีค่าเท่ากันและกำหนดไว้ว่าในความยาวคลื่น  $1.55 \mu\text{m}$  ที่ optical bandwidth 0.1 nm ให้ค่าของ  $10 \text{Log}[h\nu\Delta\nu_0]$  มีค่า -58 dB โดยสามารถนำไปใช้ในกรณีที่ L มีค่าไม่เท่ากันก็ได้ในบทความนี้จะใช้ค่า L ที่ได้จากการคำนวณจากระยะทางที่ได้มาจากการติดตั้งเคเบิล โดยใช้สมการที่ (2) ค่าของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหา L เราได้มาจากคำแนะนำใน ITU-T G.652[4] ซึ่งจะเห็นว่าค่าการลดทอนของแต่ละ span จะมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสถานีที่ติดตั้งอุปกรณ์เมื่อได้ค่าของ L แล้วเราจะทำการบวกค่า margin กับค่าของ Connector loss อีก 5 dB ก็จะได้ค่าของ L ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าของ OSNR ในสมการที่ (1) ในบทความนี้จะทำการคำนวณค่าของ OSNR โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณที่ 23 ( $192.3 \text{ GHz}$ ) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด สาเหตุที่ใช้ค่าจากช่องสัญญาณเพียงช่องสัญญาณเดียวเนื่องจากการคำนวณจะใช้พารามิเตอร์ค่าเดียวในทุกช่องสัญญาณ ดังนั้นจึงตั้ง

สมมุติฐานได้ว่าทุกช่องสัญญาณมีค่าพารามิเตอร์เท่ากัน ค่าที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับการวัดแสดงไว้ในรูปที่ 5. จะเห็นว่าค่าของ OSNR จากการคำนวณ(OSNR CAL.)กับค่า OSNR จากการวัด(OSNR MEA.)มีค่าของ OSNR ที่แตกต่างกันในช่วงสถานี สาเหตุเนื่องมาจากการติดตั้งใช้งานจริงไม่สามารถใช้ระยะทางที่เท่ากันทุกช่วงของสถานี เพราะในการติดตั้งใช้งานจริงเราจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ตามสถานีที่มีอยู่เดิมทำให้ไม่สามารถกำหนดระยะทางระหว่างสถานีให้เท่ากันทุกช่วงสถานีได้และค่าของ L ที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าที่คำนวณมาจากระยะทางตามแบบการติดตั้งเคเบิล ดังนั้นในการติดตั้งตามความเป็นจริงจะเห็นว่าตัวแปรหลายตัวแปรที่อาจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปได้ เช่นค่าของ Splicing Attenuation(A) ซึ่งในการติดตั้งจริงค่าที่ได้ อาจจะมีค่าที่มากกว่าหรือน้อยกว่าที่กำหนดไว้ใน การคำนวณก็ได้หรือค่าของ Line Attenuation(B) ของเคเบิลก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพในการผลิตของผู้ผลิตหรือค่าของ Connector Loss(C) ก็อาจจะมีค่าที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในสมการซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะทำให้ค่าของ L ที่ใช้ในการคำนวณเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลทำให้ค่า OSNR ที่คำนวณได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย จากข้อมูลที่ได้จะพบว่าที่ระยะทางรวม 745.39 กม. จะมี OSNR ที่ถูกลดทอนไปประมาณ 16.49 dB เมื่อคิดเป็นค่าการลดทอนของ OSNR ต่อกิโลเมตรจะมีค่าการลดทอนอยู่ที่ประมาณ 1 dB ต่อระยะทาง 45.20 กม. หรือประมาณ 0.022 dB/km โดยที่ OSNR ต่อระยะทางจากการคำนวณตามสมการที่ (1) ที่ระยะทาง 745.39 กม.เท่ากันมีค่าการลดทอนของ OSNR จากการคำนวณอยู่ที่ประมาณ 24.6 dB โดย เมื่อคิดเป็นค่าการลดทอนของ OSNR ต่อกิโลเมตรจะมีค่าการลดทอนอยู่ที่ประมาณ 1 dB ต่อระยะทาง 30.30 กม. หรือประมาณ 0.033 dB/km



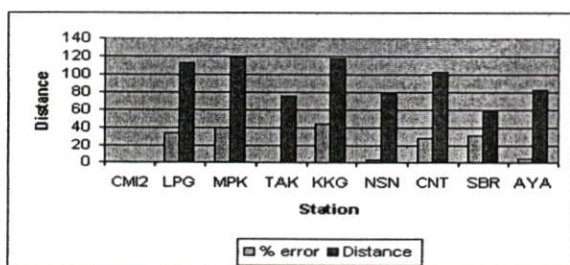
รูปที่ 5. OSNR จากการวัดเปรียบเทียบกับกรคำนวณ

จากผลที่ได้ถ้าเราอยากทราบว่าจะต้องทำการปรับปรุค่า OSNR เมื่อใดเราสามารถทำได้โดยเราจะต้องรู้ค่า Sensitivity ของอุปกรณ์และระยะทางรวมทั้งหมด เช่น ในการทดลองนี้อุปกรณ์ที่ใช้มีค่า Receiver Sensitivity 18 dB ที่ BER  $10^{-12}$  มีระยะทางจากต้นทางถึงปลายทาง 760.99 กม.จะได้ค่า OSNR ประมาณ 16.74 dB เมื่อนำค่าที่ได้นี้ไปลบออกจากค่า OSNR ที่สถานีต้นทาง 34 dB เราจะได้ค่า OSNR ที่ปลายทางประมาณ 17.25 dB ทำให้เราทราบว่าควรจะต้องมีการปรับปรุ

ค่า OSNR ซึ่งสามารถทำได้โดยการตั้ง Terminal ขึ้นใหม่เมื่อและเรายังสามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ปัญหาของระบบในกรณีที่เกิด Error ขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านระบบ WDM ได้ หลังจากนั้นเราทำการคำนวณ OSNR จากสมการใน ITU-T G.692 เราพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีผลลัพธ์ที่มีค่าแตกต่างออกไปจากค่าที่ได้จากการวัด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 44% และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดประมาณ 3% ดังแสดงในตารางที่ 1. และเมื่อเราทำการเปรียบเทียบกับระยะทางในแต่ละสถานีพบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะมีมากที่ช่วงระหว่างสถานี CM12-LPG,LPG-MPK,TAK-KKG,NSN-CNT,CNT-SBR ซึ่งเป็นช่วงที่มีระยะทางมากกว่า 100 กม. และในช่วงที่มีระยะทางต่ำกว่า 70 กม. ช่วงระยะทางที่มีความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณไม่มากอยู่ที่ระยะทางประมาณ 70 - 80 กม. ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบนี้เกิดจากหลายสาเหตุที่สำคัญได้แก่ระยะทางระหว่างแต่ละสถานีที่มีค่าไม่เท่ากัน,ค่าความคลาดเคลื่อนจากตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่า L กับค่าจากการติดตั้ง Optical cable เป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าจากการคำนวณมีการคลาดเคลื่อนออกไปจากค่าจากการวัด

ตารางที่ 1. เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณที่แต่ละสถานี

STATION	CM12	LPG	MPK	TAK	KKG	NSN	CNT	SBR	AYA
% error	0	34.424	40.685	0.0867	44.212	2.731	29.064	31.222	3.7267



รูปที่ 6. เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเปรียบเทียบกับระยะทาง

## 5. สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ผู้ทำวิจัยได้นำเสนอรายละเอียดข้อมูลของการทดลองที่เกิดจากระยะทางซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการลดทอนค่า OSNR ของระบบ WDM เมื่อระยะทางในการส่งสัญญาณเพิ่มมากขึ้น สิ่งที่ได้จากการทดลองบอกเราว่าการส่งสัญญาณระบบ WDM มีการเปลี่ยนแปลงแบบผกผันกับระยะทางสะสมที่เพิ่มขึ้นหรือค่าการลดทอนสะสมที่เพิ่มขึ้นตามระยะทาง หลังจากนั้นเราทำการคำนวณ OSNR จากสมการใน ITU-T G.692 เราพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีผลลัพธ์ที่

แตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัดในบางช่วง โดยการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกับการวัดที่ระยะทาง 70-80 กม. การที่จะทำให้ค่าจากการคำนวณมีความถูกต้องยิ่งขึ้นเราจะต้องมีแหล่งข้อมูลที่มีรายละเอียดที่มากขึ้นเช่นค่าของ L และ Pout ซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่มาจากการวัดและข้อมูลทางเทคนิคจากผู้ผลิตโดยละเอียดมาทำการคำนวณ OSNR ที่ทุกสถานีก็จะทำให้เราคำนวณค่าของ OSNR ได้แม่นยำมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Alcatel University , “ Alcatel 1686 WM R3.3 Operation and Maintenance ” , 2000.
- [2] 2002ITU-T rec.G.692 , “Optical interfaces for mutichannel systems with optical amplifiers” , ITU-T G series,2002.
- [3] Hidenori Taga , “ Long Distance Transmission Experiments Using the WDM Technology” ,IEEE Journal of lighthwave technolgy, Vol.14, no.6 , june 1996.
- [4] ITU-T rec.G.652, “Characteristics of a single-mode optical fiber cable” , ITU-T G series,
- [5] GOVIND P.AGRAWAL, “ Fiber-Optic Communication System” ,Thrid Edition, NY, John Wiley & Son, 2002
- [6] A.Ehrhardt and Gladisch, “Test For WDM Field Trials Over 750 Km With Full Compensation of Chromatic Dispersion” ,The Institution of Electrical Engineering, IEE Savoy Place, London WC2R OBL,1999.
- [7] ITU-T rec.G.661, “Definition and test methods for the relevant generic parameter of optical amplifier devices and sunsystem” , ITU-T G series,2002.



จรุงภพ รามางกูร, ปรริญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, ปัจจุบันทำงานที่ บ. ทศท คอร์ปอเรชั่นจำกัด (มหาชน), ศึกษาปริญญาโท วิศวกรรมโทรคมนาคม ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวางระบบ WDM ในประเทศไทย



สุทธิชัย นพาคิพงษ์, วศบ. (ไฟฟ้า), วศม. (ไฟฟ้า), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, Ph.D.Comm.Eng, Tokyo Tech, Japan, งานวิจัย Optical Fiber Communication

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายจรงภพ รามางกูร
วัน เดือน ปีเกิด	22 มกราคม 2510 จ.กรุงเทพมหานคร
การศึกษา	2539 ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรม ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี ราชมนงคล
การทำงาน	2534 บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) ตำแหน่งวิศวกร 6