

การออกแบบ และการสร้างระบบ FTTH สำหรับ โครงสร้างพื้นฐาน

A DESIGN AND IMPLEMENTATION OF FTTH FOR INFRASTRUCTURE

ธนาชัย ปิยะศิริพานันท์  
TANACHAI PIYASIRWANANT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะเทคโนโลยีวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-010-286

**การออกแบบ และการสร้างระบบ FTTH สำหรับ โครงสร้างพื้นฐาน**

**A DESIGN AND IMPLEMENTATION OF FTTH FOR INFRASTRUCTURE**



**ธนาชัย ปิยะศิรินันท์**

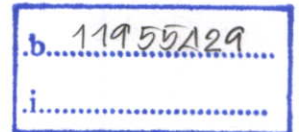
**TANACHAI PIYASIRINANANT**

วพ.

ค 24377

2551

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 82875  
วัน,เดือน,ปี..... 25 พ.ค. 2551



**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**

**สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม**

**บัณฑิตวิทยาลัย**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**พ.ศ.2551**

**KMITL-2008-EN-M-010-286**

**A DESIGN AND IMPLEMENTATION OF FTTH FOR INFRASTRUCTURE**

**TANACHAI PIYASIRINANANT**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2008**

**KMITL-2008-EN-M-010-286**

**COPYRIGHT 2008**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบ และการสร้างระบบ FTTH สำหรับ โครงสร้างพื้นฐาน
นักศึกษา	นาย ธนาชัย ปิยะศิรินันท์
รหัสประจำตัว	49060926
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. กอบชัย เดชหาญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบ ระบบ FTTH หรือ Fiber to the Home สำหรับโครงข่ายพื้นฐาน โดยจำลองระบบเน็ตเวิร์คสำหรับการสร้างระบบ FTTH โดยการใช้ ระบบไฟเบอร์ออฟติก และระบบเมนเฟรม ของศูนย์คอมพิวเตอร์ ของธนาคารแห่งหนึ่ง เพื่อเป็นอุปกรณ์ที่ทำการทดลอง ให้เหมือนกับการทำงานจริงมากที่สุด แล้วจึงวัดค่าต่างๆที่ได้จากการทดลอง ออกมาศึกษาและวิเคราะห์ ถึงความเป็นไปได้ และเงื่อนไขในการนำมาใช้จริงเพื่อการพาณิชย์

<b>Thesis Title</b>	A design and implementation of FTTH for infrastructure
<b>Student</b>	Mr. Tanachai Piyasirinanant
<b>Student ID.</b>	49060926
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunication Engineering
<b>Year</b>	2008
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Kobchai Deghan

### **ABSTRACT**

This thesis presents the design of FTTH or Fiber to the Home for infrastructure to simulate the systems by using fiber optic systems and mainframe systems of computer center of bank head quarter to implement the virtual system near real use and kept log and data of output result for learn and analyze to real using with commercial.

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูป.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการทำวิจัย.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษาและวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษาและวิจัย.....	3
1.5.1 การติดตั้งระบบ Optical Network.....	3
1.5.2 การออกแบบระบบจำลอง.....	3
1.5.3 การออกแบบการทดลอง.....	3
1.5.4 การทำการทดลอง.....	4
1.5.5 การสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	4
บทที่ 2 ระบบ FTTH.....	5
2.1 ระบบ FTTH พื้นฐาน.....	5
2.1.1 ความเป็นมาของ FTTH.....	5
2.2 FTTH ในเชิงพาณิชย์.....	8
2.2.1 FTTH กับความต้องการการใช้งานของผู้บริโภค.....	9
2.2.2 FTTH กับการแข่งขันในตลาดเก่า.....	10
2.3 การพัฒนาจากระบบ ADSL ไปสู่ระบบ FTTH.....	12
2.4 FTTH ในการสื่อสาร.....	14
2.5 ข้อดีของระบบ FTTH.....	16
2.5.1 High Capacity.....	16
2.5.2 System Reliability.....	17

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 เทคโนโลยีขับเคลื่อน FTTH.....	18
3.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์18	
3.2 ตัวแยก และตัวส่งผ่านสัญญาณตามความยาวคลื่น (Splitter and WDM Coupler)..	19
3.3 เครื่องขยายเชิงแสงแบบพาสซีฟหรือ PON (Passive Optical Network).....	20
3.4 ระบบจ่ายพลังงาน ไฟฟ้า (FTTH Powering).....	21
3.5 การสื่อสารข้อมูลด้วยระบบ เอทีเอ็ม (ATM Transport).....	21
3.6 การบีบอัดข้อมูล (Video Compression).....	25
บทที่ 4 โครงสร้างทางเทคนิค ของ FTTH.....	27
4.1 โครงสร้างพื้นฐาน.....	27
4.2 รูปแบบการเชื่อมโยงสายส่งสัญญาณ.....	30
4.3 เครื่องขยาย PON สำหรับ FTTH.....	33
4.4 แนวทางการทดสอบสายส่ง FTTH.....	34
4.5 การให้บริการผ่านระบบ FTTH.....	39
บทที่ 5 การสร้าง FTTH ในโครงข่ายพื้นฐาน.....	42
บทที่ 6 การทดลอง สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
6.1 การทดลองที่ 1.....	44
6.2 การทดลองที่ 2.....	49
6.3 การทดลองที่ 3.....	52
6.4 การทดลองที่ 4.....	55
6.5 การทดลองที่ 5.....	58
6.6 การทดลองที่ 6.....	61
6.7 การทดลองที่ 7.....	64
บทที่ 7 บทสรุป.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก ก.....	71
ภาคผนวก ข.....	78

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบความเร็วในการส่งสัญญาณของระบบ ADSL และระบบ FTTH กับระยะทาง.....12
2.2	ระบบข่ายสายเคเบิลเส้นใยแก้วนำแสงในระบบ FTTH แบบต่างๆ.....14
3.1	เปรียบเทียบเครือข่าย ATM กับระบบอินเทอร์เน็ต.....23
3.2	เครือข่าย ATM แบบ WAN.....23
4.1	โครงสร้างทางเทคนิคพื้นฐานของระบบ FTTH.....27
4.2	รายละเอียดโครงสร้างของ FTTH.....28
4.3	โครงสร้างการเชื่อมต่อของระบบ FTTH.....29
4.4	การแยกสายส่งสัญญาณแบบศูนย์กลาง (Centralized Splitting).....30
4.5	การแยกสายส่งสัญญาณแบบกระจาย (Distributed Splitting).....30
4.6	การเชื่อมโยงแบบกระจาย และแบบรวมศูนย์กลาง เพื่อแยกเส้นทางไปยังผู้ใช้.....32
4.7	ตัวอย่างการเชื่อมสาย จากอุปกรณ์จริงที่มีการใช้งานอยู่.....32
4.8	ภาพตัวอย่างอุปกรณ์ ONU ภายในอาคาร.....33
4.9	เครือข่ายเคเบิลเส้นใยนำแสงอย่างง่ายของระบบ FTTH.....35
4.10	กราฟแท่ง รายได้เกิดจากการทำธุรกิจบนเครือข่าย FTTH ในเขตพื้นที่หนึ่งของอเมริกา.....39
4.11	แสดงความสามารถของระบบ FTTH ที่ใช้ได้ในบ้านเรือนของผู้ใช้งาน.....41
5.1	แสดงแผนผังอย่างง่ายของ ระบบใยแก้วนำแสงของ ธนาคาร KCS.....42
5.2	แสดงระบบ FTTH แบบจำลองที่ผ่านการแทนอุปกรณ์แล้วจากระบบต้นแบบ.....43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองส่งข้อมูลในระบบ.....	45
6.2 แสดงกราฟของกำลังงานที่วัดจาก User ต่างๆ.....	47
6.3 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองส่งข้อมูลมากเกินไปที่ระบบจะรับได้.....	49
6.4 แสดงกราฟผลการทดลองเมื่อมีแพคเกจข้อมูล เข้ามาที่ระบบมากเกินไประบบจะรับได้.....	51
6.5 แสดงผลการทดลองในสถานการณ์ที่มีความผิดพลาดขึ้นระหว่างเส้นทางการเดินทางของระบบ Dark fiber ที่อยู่ระหว่าง Provider ทั้งสอง.....	52
6.6 แสดงกราฟผลการทดลองในสถานการณ์ที่มีความผิดพลาดขึ้นระหว่างเส้นทางการเดินทางของระบบ Dark fiber ที่อยู่ระหว่าง Provider ทั้งสอง.....	54
6.7 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Alternate path).....	55
6.8 กราฟแสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Alternate path).....	57
6.9 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Single path).....	58
6.10 กราฟแสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Single path).....	60
6.11 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบ failover path และ ระบบ Load Balancing.....	61
6.12 กราฟแสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบ failover path และ ระบบ Load Balancing.....	63
6.13 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบ failover path และ ระบบ Load Balancing.....	64
6.14 กราฟแสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบ failover path และ ระบบ Load Balancing.....	66

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงรายละเอียดของ PON แบบต่างๆ.....	33
6.1 แสดงผลที่ได้จากการวัดค่ากำลังงาน จาก Provider B ไปยัง Provider A.....	45
6.2 แสดงผลที่ได้จากการวัดค่ากำลังงาน ที่จุดเชื่อมต่อ Remote Node ต่างๆ.....	45
6.3 แสดงผลที่ได้จากการวัดค่ากำลังงาน ที่จุดเชื่อมต่อ User ต่างๆ.....	46
6.4 แสดงผลการทดลองเมื่อมีแพคเกจข้อมูล เข้ามาที่ระบบมากเกินไปที่ระบบจะรับได้.....	50
6.5 แสดงผลการทดลองในสถานการณ์ที่ มีความผิดพลาดขึ้นระหว่างเส้นทางการเดินทางของระบบ Dark fiber ที่อยู่ระหว่าง Provider ทั้งสอง.....	53
6.6 แสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Alternate path).....	56
6.7 แสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Single path).....	59
6.8 แสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบ failover path และ ระบบ Load Balancing.....	62
6.9 แสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบ failover path และ ระบบ Load Balancing.....	65

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถ้าจะกล่าวถึงการสื่อสารในปัจจุบัน สิ่งแรกที่ถูกถามจะนึกถึง ก็คือ การสื่อสารด้วย โทรศัพท์มือถือ ซึ่งนั่น เป็นการสื่อสาร แบบไร้สาย (Wireless) และ อินเทอร์เน็ต (Internet) ซึ่งทั้งสองเทคโนโลยีนี้ อาจจะถูกดูได้ว่า เป็นเทคโนโลยีที่ พัฒนากันไปคนละด้าน แต่ถ้าเรามองให้ลึก เทคโนโลยีทั้งสองนี้มีความเกี่ยวเนื่องในการพัฒนา คือ ถึงอาจจะไม่ใช่พัฒนาไปในทางเดียวกัน แต่เราสามารถโยงทั้งสองเทคโนโลยีถึงกันได้ และสามารถใช้ประโยชน์ร่วมกันได้ แต่ในบทนำ จะกล่าวถึง เทคโนโลยีแบบมีสาย (Wire Technology) ก่อนเป็นสิ่งแรก ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาไปไกลกว่าที่คิด และยังหาที่สิ้นสุดแห่งการพัฒนาไม่ได้

ในสมัยก่อนที่เรา ใช้เพียงโทรศัพท์บ้านติดต่อสื่อสารกันอย่างสะดวก การสื่อสารจึงเป็นการสื่อสารแบบง่ายๆ สื่อสารกันเพียงแค่เสียง จึงมีความต้องการในการใช้พื้นที่เส้นทางการสื่อสาร หรือจะเรียกอีกอย่าง ได้ว่า แบนวิธด์ (Bandwidth) น้อย จึงพอเพียงกับการสื่อสารผ่าน เส้นทางที่เป็นหลอดทองแดง แต่เมื่อมี เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ต เกิดขึ้น การพัฒนาการส่งข้อมูลมากขึ้น ตลอดจนความต้องการในการส่งข้อมูลได้เร็วแม่นยำมีมากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาระบบการส่งข้อมูลแบบใหม่ขึ้นมา เพื่อรองรับ แต่การพัฒนานั้น ไม่ใช่เรื่องที่ย่างๆเลย เนื่องจากว่า ติดอยู่กับปัญหาบางอย่าง เช่น ระบบสายทองแดงที่มีอยู่แล้วมีมากมาย อีกทั้งยังทั่วถึง จึงไม่คุ้มกับการลงทุนวางระบบใหม่ทั้งหมด จึงได้เกิด ระบบ ADSL (Asynchronous Digital Subscriber Line) ขึ้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าว แต่สุดท้าย ก็ไม่เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงต้องใช้ เทคโนโลยี เส้นใยแก้วนำแสง (ซึ่งในปัจจุบันอาจจะจะเป็นพลาสติก) มาใช้ ตามเครือข่าย หรือ node ต่างๆ แต่ในรายงานฉบับนี้ จะกล่าวถึง ระบบที่ใช้เส้นใยนำแสงสื่อสารข้อมูล ถึงที่บ้านของผู้ใช้ เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลไปอีกขั้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วที่บทนำ ระบบ FTTH (Fiber to the Home) จะเป็นระบบที่มีโอกาสมากที่จะเป็นระบบที่ใช้งานในอนาคต แทนที่ระบบเดิม ซึ่งมีข้อดีคือ การส่งข้อมูลที่รวดเร็ว ได้ปริมาณที่มาก และยังมีความแน่นอนสูง แต่ในเมื่อยังมีระบบนี้ใช้อยู่จริงไม่มาก ฉะนั้น เราจะไม่สามารถรู้ได้เลยว่า ถ้ามีการผิดพลาดใดๆขึ้นมานั้น ทางระบบจะมีการแก้ปัญหาอย่างไร และจะมีผลต่อการใช้งานอย่างไร

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษาและวิจัย

จากที่ได้กล่าวมาแล้วที่หัวข้อ ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการทำวิจัย ทำให้เราต้องมาศึกษากันในเรื่องของ ประสิทธิภาพ การใช้งาน ตลอดจนผลกระทบที่จะมีต่อระบบ และการใช้งานเมื่อมีความผิดพลาดทั้งที่เกิดขึ้นจากตัวระบบเอง และ ที่เกิดขึ้นมาจากสาเหตุอื่น เช่น สิ่งแวดล้อม หรือแม้กระทั่ง จากตัวผู้ใช้ระบบเอง ดังนั้น ในงานวิจัยชิ้นนี้ เราจึงทำการ สร้างระบบ FTTH จำลองขึ้นมา โดยการหาสถานที่ ที่มีการใช้งานระบบซึ่งคล้ายคลึงกับระบบ FTTH เพื่อใช้ในการจำลองระบบขึ้นมา และทำการทดลอง โดยการทดลอง จะทำการ ส่งข้อมูลผ่านระบบ ซึ่งทำเช่นเดียวกับ การใช้จริง ในขั้นแรก เราจะทำการศึกษา ประสิทธิภาพของระบบก่อน โดยการใช้การส่งข้อมูล และการติดต่อสื่อสารระหว่างแต่ละอุปกรณ์เป็นตัววัด และขั้นต่อมา จะเป็นการทดลองถึงผลกระทบเมื่อเกิดปัญหาขึ้นกับระบบ โดยเราจะทำการเข้าไปจัดการกับระบบด้วยตัวเอง โดยจำลองสถานการณ์ ต่างๆขึ้นมา แล้วจึงทำการวิเคราะห์ผล เพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบ และการใช้งาน และวิเคราะห์ และประเมิน ความเป็นไปได้ในการเกิดความผิดพลาด และการแก้ไข ซึ่งจะมี ความสำคัญต่อ การนำไปใช้จริง

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยชิ้นนี้ เป็นการสร้างระบบ FTTH จำลอง โดยการสร้างจากระบบ Fiber Optic ของ ธนาคารแห่งหนึ่ง โดยเราจะใช้ศูนย์คอมพิวเตอร์ของธนาคารนี้จำนวน 2 sites คือ Head Quarter Site และ Disaster Recovery Center Site หรือ DRC Site ซึ่งแทนศูนย์คอมพิวเตอร์ ทั้ง 2 site นี้แทน 2 Providers ที่ติดต่อกันและแต่ละ Provider นั้นจะมี Optical Network เป็นของตัวเองซึ่งในแต่ละ Network นั้น จะทำหน้าที่ เป็นเครือข่ายที่เรา สมมุติให้เป็น ระบบ FTTH ที่เชื่อมต่อจาก Provider ไปที่ Remote Node และสุดท้ายก็ไปสู่ Users ต่างๆ ตามระบบ

ในระบบจำลองที่สร้างขึ้นใหม่ จะประกอบด้วย DWDM Transponders ซึ่งในระบบจำลองจะแทนด้วย ตัว Provider ของแต่ละ Provider, Optical Switches ซึ่งจะประกอบด้วย Remote Node แต่ละตัว และ Optical Servers ซึ่งในระบบจำลองจะแทนด้วย Users ต่างๆ ซึ่งระบบ เดิมมีการจัดวางระบบได้เหมาะสมอยู่แล้ว โดยมีการจัดวางให้ Provider แต่ละตัว เชื่อมต่อกับ Remote Nodes 8 ตัว และ Remote Node แต่ละตัว เชื่อมต่อกับ Users ทั้งหมด 8 Users ซึ่งระบบจริงๆ ของทางธนาคาร มีการจัดวางอุปกรณ์และระบบซับซ้อน และจำนวนมากกว่านี้มาก แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้ เราจะยกตัวอย่างระบบ โดยการล้อมกรอบและ จำกัดระบบให้อยู่ในขอบเขตที่ไม่ใหญ่และซับซ้อนเกินไป โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงระบบไปจากเดิมเพื่อให้การทดลอง เป็นไปตามมาตรฐานที่ผู้เขียน ได้ทำการ Implement ไว้ก่อนหน้านี้ และเพื่อไม่เป็นการรบกวนระบบของทางธนาคารด้วย

การจำกัดขอบเขตของการทดลอง ต้องจำกัดขอบเขตการทดลองเพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อระบบที่ใช้งานอยู่ของธนาคาร ซึ่งการทดลองที่ได้ออกแบบนั้น เป็นการทดลองที่ส่วนมากทำอยู่บนส่วนที่ไม่ได้ใช้งานของระบบของธนาคาร แต่ก็มีบางส่วนที่จำเป็นต้องทำการทดลองอยู่บนเครือข่ายที่มีการใช้งานอยู่ของธนาคาร และที่สำคัญที่สุด ต้องไม่ให้เกิดผลกระทบต่อระบบของทางธนาคาร การทดลองทั้งหมดที่ทำการทดลอง เป็นไปตามเงื่อนไขที่ทางธนาคารยินยอมให้ทำการทั้งสิ้น โดยที่ตัวผู้ทำการทดลองนั้น เป็นวิศวกรระบบที่ทำการติดตั้ง และดูแลระบบนี้อย่างใกล้ชิดเป็นที่ไว้วางใจของทางธนาคารอยู่แล้ว จึงง่ายต่อการขอความร่วมมือ

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

- 1.5.1 ติดตั้งระบบ Optical Networks ของทางธนาคาร โดย ระบบนี้ได้ทำการติดตั้งไว้ก่อนแล้วเป็นเวลาประมาณ 6 เดือน ซึ่งผู้ทำการทดลองได้เป็นหนึ่งในทีมงานที่ทำการติดตั้งและดูแลระบบนี้ จึงมีความชำนาญในระบบนี้อยู่พอสมควร
- 1.5.2 ออกแบบระบบจำลอง ในขั้นแรกต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม ว่าเราจะสามารถนำส่วนใด หรือวงไหนของระบบออกมาทำการทดลองได้ ซึ่งส่วนหรือวงที่เรานำมาทำการทดลอง จะต้องไม่มีผลกระทบกับระบบจริงของทางธนาคาร แล้วจึงนำส่วนนั้น มาดัดแปลงเปลี่ยนให้เป็นระบบ FTTH ซึ่งขั้นนี้ต้องใช้เวลาศึกษา และเปรียบเทียบพอสมควร

- 1.5.3 ออกแบบการทดลอง โดยต้องคำนึงถึงความครอบคลุมใน หัวข้อที่จำเป็นต่อการนำไปวิเคราะห์ และศึกษาเพื่อการนำไปใช้จริง และที่สำคัญต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการทดลอง และต้องเป็นการทดลองที่ต้องตอบโจทย์ ของ วัตถุประสงค์ในการทำวิจัยได้
- 1.5.4 การทำการทดลอง ในการทำการทดลองจริงนั้น นอกจากที่เราจะต้องพยายามทำ การทดลองให้ได้ตามที่เราได้ออกแบบมาก่อนหน้านี้แล้ว เรายังจะต้อง สามารถที่จะปรับเปลี่ยนการทดลอง โดยการเพิ่มหรือเปลี่ยนการทดลองให้เหมาะสมกับ สถานการณ์ เมื่อเราคิดว่า การทดลองที่ทำอยู่ไม่ได้ตอบโจทย์ได้ดีพอ หรือเมื่อมี การทดลองใหม่ๆ ที่จะเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยในครั้งนี้ เราก็จำเป็นต้องมีการ เปลี่ยน เพื่อที่จะสามารถตอบ โจทย์ได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ
- 1.5.5 การสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง เราจะต้องทำการสรุปผลให้ครอบคลุม และ ตรงกับความต้องการของการทำวิจัย เพื่อให้ได้ผลสัมฤทธิ์สูงสุด ในการนำความรู้ที่ ได้จากการวิจัยไปใช้ในการทำระบบที่จะเกิดขึ้นจริง และยังคงพยายามหาข้อ แก้ไขและความรู้เพิ่มเติม เมื่อผลการทดลองมีข้อเสีย หรือไม่ได้เป็นอย่างที่คาดไว้ เพื่อที่จะตอบคำถามของการทดลองได้ และสุดท้าย ต้องเขียนอธิบายด้วยข้อความ ที่ก่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่าย เพื่อที่จะให้ผู้ที่มาอ่านงานวิจัยฉบับนี้ ได้ประโยชน์ ไป ไม่มากนัก

## บทที่ 2

# ระบบ FTTH

### 2.1 ระบบ FTTH พื้นฐาน

Fiber to the home (FTTH) คือเทคโนโลยีที่นำข้อมูล ข่าวสารต่างๆขนาดมหาศาลมาถึงบ้านผู้ใช้บริการ ด้วยเคเบิลใยแก้วนำแสงที่มีขนาดเล็กและเบาแต่สามารถส่งข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็วด้วยคุณภาพที่สูง

#### 2.1.1 ความเป็นมาของ FTTH

แนวความคิดในการนำระบบ FTTH เข้ามาใช้เพื่อเชื่อมโยงสายส่งสัญญาณด้วยเส้นใยนำแสงไปสู่บ้านผู้เช่าโดยตรง เริ่มขึ้นในราวกลางทศวรรษที่ 1970's แต่ก็ไม่ประสบความสำเร็จในเชิงพาณิชย์ อุปสรรคสำคัญในขณะนั้นคือ ระบบและเส้นใยนำแสงมีราคาแพงมาก เมื่อเทียบกับระบบสายส่งทองแดง ทำให้ภาคธุรกิจไม่สนใจลงทุนโดยเฉพาะ ในส่วนที่ต้องเชื่อมโยงเส้นใยนำแสงสู่บ้านผู้เช่าโดยตรง และเพื่อเป็นการลดต้นทุนส่วนนี้ ระบบ FTTC (fiber to the curb) และระบบ HFC (hybrid fiber/coax) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นมานี้จะใช้ระบบสายส่งสัญญาณแบบผสม คือมีทั้งเส้นใยนำแสงและสายส่งทองแดงใช้งานร่วมกันในโครงข่าย โดยระบบ FTTC จะเน้นที่การใช้งานสายส่งเส้นใยนำแสงตลอดโครงข่ายไปสิ้นสุดยังหัวถนนหรือปากทางเข้าหมู่บ้าน เท่านั้น ในส่วนของสายส่งที่เข้าถึงบ้านผู้เช่ายังคงเป็นสายทองแดงอยู่ ทำให้ระบบ FTTC และ HFC มีราคาถูกลง กว่า FTTH (ในขณะนั้น) มาก แต่ในขณะเดียวกัน ก็สามารถให้บริการข้อมูลความเร็วสูงได้ เพราะโครงข่ายส่วนใหญ่ใช้เส้นใยนำแสงเป็นท่อนำสัญญาณ ทั้งนี้ระบบ HFC กลับเป็นที่นิยมกว่า FTTC เพราะ ราคาค่อนข้างจะถูกกว่า เนื่องจากระบบสายส่งยังคงมีส่วนประกอบของสายส่งทองแดงมากกว่า ตัวอย่างของระบบ HFC ที่นำมาใช้ในบ้านเรา ได้แก่ ระบบเคเบิลทีวี

ต่อมาเมื่อถึงยุคของสารสนเทศข่าวสารข้อมูลยุคใหม่ ด้วยระบบอินเทอร์เน็ต ความต้องการในการสื่อสารข้อมูลเริ่มมีมากขึ้น ตัวอย่างในทุกๆเดือนจะมีผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ ความต้องการในการสื่อสารข้อมูลปริมาณมาก ที่มีความเร็วสูงมากขึ้น เช่น กลุ่มผู้ใช้ที่เป็นธนาคาร ต่างต้องการเชื่อมโยงระบบสื่อสารข้อมูลของตนเองระหว่างสาขาต่างๆ ที่อยู่บนพื้นที่ต่างๆ

ทั่วประเทศได้ เป็นต้น เพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าว ผู้ให้บริการจึงได้นำระบบบริการแบบ ISDN (Integrated Services Digital Network) เข้ามาใช้ โดยตัวระบบทำงานสื่อสารข้อมูลแบบดิจิทัล ทำให้ ข้อมูลต่าง ๆ ที่มีลักษณะพื้นฐานดั้งเดิมไม่เหมือนกัน สามารถสื่อสารร่วมกันได้ เนื่องจากข้อมูลทุกประเภทจะถูก ทำให้เป็นดิจิทัล ซึ่งมีสถานะเพียง 2 ระดับ คือ ศูนย์ “0” กับหนึ่ง “1” เท่านั้น ดังนั้นข้อมูลทุกชนิดจึงถูกระบบ มองเห็นเป็นแบบเดียวกันหมด ทำให้สื่อสารร่วมกันได้ นอกจากนี้ระบบ ISDN ยังถูกออกแบบให้ใช้สายส่ง เส้นใยนำแสงเชื่อมโยงไปยังบ้านผู้เช่าหรือสำนักงานได้โดยตรง ผู้เช่าเพียงแต่ จ่ายความจำนองและเสียค่าบริการ ก็สามารถใช้งานได้ สำหรับผู้ใช้บริการที่ต้องการสื่อสารข้อมูลส่วนตัวด้วยท่อสัญญาณขนาดใหญ่ ก็อาจทำได้ด้วยการด้วยการเช่าสายส่ง (leased line) ที่เป็นเส้นใยนำแสง

ระบบ ISDN เป็นระบบที่เสมือนเป็นก้าวแรกให้มีการใช้เส้นใยนำแสงเชื่อมโยงไปยังบ้านผู้เช่า แต่ ISDN เองถูกออกแบบขึ้น โดยเน้นที่ระบบสลับสายหรือสวิตชิง (switching) อีกทั้งการเช่า คู่สาย เส้นใยนำแสงเพื่อขอใช้ บริการ ค่อนข้างจะมีราคาแพง ทำให้ระบบ ISDN ไม่เป็นที่นิยมของผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ต แต่ด้วยปริมาณข้อมูล สื่อสารที่นับวันจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จึงได้มีการพัฒนาระบบ ADSL ขึ้น เพื่อให้ผู้เช่ายังคงสามารถใช้สายส่งทองแดงเดิมได้ แต่ในขณะเดียวกันก็สามารถสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงได้ด้วยการเพิ่มค่าบริการอีกมาก

การเติบโตของของระบบอินเทอร์เน็ตในอัตราก้าวหน้า (หากมองเป็นก้าวกระโดดก็คงไม่ผิดนัก) และความ ต้องการบริโภคข้อมูลในรูปแบบต่าง ๆ ทำให้ ADSL เริ่มมีปัญหาในการให้บริการ แม้ว่า HDSL จะสามารถ ให้บริการได้สูงถึง 40 Mbps ก็ตาม ความนิยมของผู้ใช้อินเทอร์เน็ตที่ต้องการสื่อสาร ข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น ข้อมูล ภาพนิ่งที่มีความละเอียดสูง และ ข้อมูลภาพเคลื่อนไหว ล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการแข่งขันในการให้บริการ แบบบรอดแบนด์ (Broadband) มากยิ่งขึ้น ประกอบกับเทคโนโลยีของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง มีการพัฒนาไปจากเดิมมาก ทำให้ระบบสื่อสารเชิงแสงราคาถูกลง จึงได้มีการนำเทคโนโลยี FTTH เข้ามาใช้ใหม่ เพื่อเป็นทางออกของการบริการแบบบรอดแบนด์

FTTH เริ่มทำให้ตลาดการให้บริการข้อมูลแบบบรอดแบนด์ชนิดเข้าถึงบ้านผู้ใช้โดยตรงเริ่มคึกคักขึ้นก็ ในช่วงเริ่มสหัสวรรษใหม่ (ตั้งแต่ปี.ศ. 2000 เป็นต้นมา) ปัจจุบันในแต่ละเดือนจะมีจำนวนผู้ใช้ FTTH เพิ่มขึ้นถึง ประมาณ 100,000 ราย ในบรรดาประเทศต่าง ๆ ที่เป็นผู้ดำเนินการให้บริการ FTTH เช่น อเมริกา ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น และบางประเทศในยุโรปนั้น ญี่ปุ่นจะเป็นประเทศที่มีอัตราการเติบโตของ FTTH มากที่สุดในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ญี่ปุ่นเริ่มนำระบบ FTTH เข้ามาใช้

อย่างจริงจังในปี ค.ศ. 2002 (พ.ศ. 2545) โดยบริษัท NTT ทั้งนี้ ผู้ใช้การจะสามารถสื่อสารข้อมูลด้วยความเร็วขั้นต่ำประมาณ 100-150 Mbps ด้วยการเสียค่าใช้จ่ายที่แพงกว่า ADSL ประมาณไม่เกินสองเท่า (แต่ข้อมูลมีความเร็วมากกว่ารวม 100 เท่า!) และเมื่อถึงเดือนพฤษภาคม ค.ศ. 2005 (พ.ศ. 2548) ได้มีสมาชิกผู้ใช้บริการมากถึง 2.8 ล้านราย ทั้งนี้บริษัท NTT ตั้งเป้าไว้ว่าน่าจะมีผู้ใช้บริการถึง 30 ล้านรายในปี ค.ศ. 2010 (พ.ศ. 2553)

ในส่วนของตลาดในประเทศไทย ระบบ ADSL เริ่มมีบทบาทในการทำให้ธุรกิจการให้บริการ ข้อมูลแบบบรอดแบนด์มีความคึกคักขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 เป็นต้นมา ด้วยการให้บริการข้อมูลด้วยอัตราเร็วประมาณ 1-2 Mbps โดย ผู้เช่าเสียค่าบริการในอัตราที่ยอมรับกันได้ อีกทั้งการแข่งขันที่กำลังก่อตัวขึ้น น่าจะมีแนวโน้มทำให้ค่าบริการถูกลง พร้อมกับการให้บริการด้วยอัตราการสื่อสารข้อมูลที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น จึงไม่น่าแปลกใจเลยว่า ปัจจุบัน (พ.ศ. 2551) เริ่มมีกลุ่มผู้ประกอบการหลายรายในเมืองไทย เริ่มหาพันธมิตรและวางแผนที่จะนำระบบ FTTH มาให้บริการในประเทศไทยแล้ว

## 2.2 FTTH ในเชิงพาณิชย์

แนวคิดด้าน Fiber Optics to the home (FTTH) มีการกล่าวถึงกันมานานแล้ว มีหลายบริษัทที่มีความพยายามนำแนวคิดนี้มาให้บริการแก่กลุ่มลูกค้ารายเล็กๆ โดยเฉพาะกลุ่มลูกค้า บ้านพักอาศัยที่เป็น โฮมยูสเซอร์ทั่วไปโดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่น ที่มีการวางระบบเครือข่าย Fiber Optic เพื่อให้บริการในรูปแบบ FTTH เช่นบริษัท BellSouth มีการวางสาย Fiber เข้าไปที่เขต Dunwoody ใน Atlanta ประมาณ 400 หลัง Future way บริษัทที่ให้บริการด้านโทรคมนาคมของแคนาดาเริ่มมีการสร้างระบบเชื่อมต่อ Fiber เข้าสู่ตามที่พักอาศัยแล้วในเมือง Toronto ในด้านผู้ผลิตอุปกรณ์ (Supplier) ในด้านนี้ Optical Solution มีอัตราการเติบโตที่ดีมียอดขายอุปกรณ์ด้าน Fiber เพิ่มมากขึ้น สิ่งต่างๆเหล่านี้เป็นเสมือนแนวโน้มและทิศทางที่ดีของการใช้งานด้าน Fiber Optics to the home แต่เมื่อมองดูความต้องการการใช้งานในตลาดจากผู้บริโภค ปรากฏว่ามีการขยายตัวน้อยมาก เมื่อพิจารณาทางด้านเทคโนโลยีแล้ว ไม่น่าจะมีอุปสรรคในการให้บริการ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า Fiber Optic มีการใช้งานมานานแล้วอย่างแพร่หลายในด้านของระบบโครงข่ายดังนั้นสิ่งที่เป็อุปสรรคของการเติบโตของ FTTH น่าจะมาจากปัจจัยด้านอื่นดังต่อไปนี้

- งบประมาณการลงทุนด้านการวางโครงข่าย Fiber Optics
- ความต้องการการใช้งานของผู้บริโภคที่แท้จริง
- การแข่งขันกับรายเก่าในตลาดงบประมาณการลงทุนด้านการวางโครงข่าย Fiber Optics

ที่ผ่านมาหลายบริษัทและหลายประเทศที่มีการทดลองในการให้บริการด้าน FTTH เช่น ญี่ปุ่น แคนาดา ฝรั่งเศส ซึ่งการทดลองสะท้อนให้เห็นว่าการลงทุนในการสร้างโครงข่ายให้ครอบคลุมทั่วพื้นที่ในการให้บริการนั้นต้องใช้เวลาในการลงทุนสูงมาก เนื่องจากราคาของ Fiber ยังค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับราคาของสาย Copper ในปัจจุบัน ประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจในเรื่องงบประมาณด้านการลงทุนของ Fiber network. ประเด็นคือการใช้ Fiber Optic ในรูปแบบของ Fiber Optics to the business (FTTB) ที่ปัจจุบันมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในบริษัทหรือองค์กรขนาดใหญ่ แต่ขนาดของตลาดก็ยังไม่ใหญ่พอที่จะทำให้ราคาของ Fiber Optic ลดลงมากนัก ดังนั้นในอนาคตการเติบโตของ Fiber Optics to the Business (FTTB) ซึ่งคาดการณ์ว่าจะมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย สิ่งที่มาคือ ราคาของ Fiber Optic และอุปกรณ์ จะมีราคาลดลง ปัจจัยนี้น่าจะเป็น

แรงผลักดันที่ทำให้ต้นทุนในการให้บริการในโครงข่ายของ FTTH ลดลงด้วย อีกประเด็นหนึ่งคือ ปัญหาด้านการวางโครงข่ายใหม่เข้าไปในย่านพักอาศัยมักจะมีอุปสรรคจากการขุดถนนเพื่อวางแนว Fiber ที่มักจะทับซ้อนกับระบบและระบบสาย Copper ปัญหานี้ก่อให้เกิดต้นทุนสูงในการก่อสร้างอีกด้วย

### 2.2.1 FTTH กับความต้องการการใช้งานของผู้บริโภค

ในปัจจุบันการใช้งานด้านการสื่อสารมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น การใช้งานด้าน Internet, TV on demand, Video conference การ access จากที่บ้านหรือที่พักอาศัยเข้าสู่โครงข่ายการให้บริการมีอยู่หลายเทคโนโลยีหลักๆ ได้แก่

- Digital subscriber line (DSL) เช่น ADSL เป็นเทคโนโลยีของการประยุกต์สาย Copper ของระบบโทรศัพท์มาใช้ประโยชน์ในการรับส่งข้อมูลให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สามารถส่งข้อมูลสูงสุด 8Mbps
- Leased Line เป็นอีกเทคโนโลยีที่ใช้สาย Copper มาใช้ในการรับส่งข้อมูลสามารถส่งข้อมูลได้อื่นด้วยความเร็วตั้งแต่ 9.6k, 64k, 128kจนถึง2Mbps
- Cable modem ใช้สาย Coaxial เป็นสื่อในการรับส่งข้อมูลที่ให้ความเร็วในการรับส่งข้อมูลประมาณ2-3Mbps

เมื่อพิจารณาการเลือกใช้งานด้านเทคโนโลยีของผู้บริโภคในปัจจุบันเพื่อเข้าไป Access ข้อมูลจากระบบสามารถสร้างความพอใจได้ในระดับหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ Modemในการเชื่อมต่อที่ให้ความเร็วเพียง 56 Kbps เมื่อมองความต้องการที่แท้จริงของผู้บริโภคในเรื่องของการใช้งานแน่นอนว่าในอนาคตความจำเป็นในการ Access จากที่พักอาศัยเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการให้บริการ Multimedia ที่จะเกิด ดังนั้นความต้องการในเรื่องความเร็วในการรับส่งเป็นเรื่องที่ผู้ใช้งานต้องการมากขึ้น ประสิทธิภาพทางเทคโนโลยีของ Fiber Optic แบบ FTTH สามารถรับส่งข้อมูลได้ถึง 100-1000 Mbps น่าจะตอบสนองการใช้งานของผู้บริโภคได้เป็นอย่างดี แต่เมื่อมองปัจจัยด้านราคาค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนเทคโนโลยีที่ใช้เข้ามาเป็น FTTH นั่นก็เป็นอุปสรรคเช่นกันที่ผู้ใช้งานจะยอมลงทุน ส่วนใหญ่อาจจะมองว่าเทคโนโลยีเก่าที่ใช้อยู่น่าจะเหมาะสมกว่าเมื่อเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายกับความต้องการของการใช้งาน

## 2.2.2 FTTH กับการแข่งขันในตลาดเดิม

ปัจจุบันผู้ให้บริการด้านโครงข่ายมากมายทั้งแบบ Wire line และ Wireless ที่สามารถสร้างวงจรการใช้งานเข้าไปสู่การใช้งานภายในบ้านพักอาศัย การที่ผู้ให้บริการด้าน FTTH จะเข้ามาแข่งขันไม่ใช่เรื่องที่ย่ายนักมีหลายปัจจัยที่จะต้องพิจารณาในการแข่งขัน เพื่อแข่งชิงตลาดกับผู้ให้บริการรายเดิมที่ให้บริการอยู่เช่น ด้านการลงทุนโครงข่ายที่ต้องใช้เวลาและเงินลงทุนที่สูง ในขณะที่ผู้ให้บริการรายเดิมมีการวางโครงสร้างไว้แล้วสิ่งนี้จะสะท้อนให้เห็นได้ ในเรื่องของราคาการให้บริการ มีการแข่งขันกันด้านราคา หรือเกิดจากผู้ให้บริการรายเดิมที่ให้บริการโครงข่ายเก่าอยู่และมีแนวคิดที่จะให้บริการด้าน FTTH อาจจะทำให้เกิดความลังเลในการให้บริการเนื่องจากการลงทุนในระบบเก่าไปแล้วแต่ยังไม่ได้ผลตอบแทนที่คุ้มค่ากลับมา

จากรายละเอียดที่กล่าวมาพอจะเห็นภาพได้ว่า Fiber Optics to home มีข้อจำกัดอยู่หลายด้านในการผลักดันระบบโครงข่ายให้เกิดการใช้งานกันอย่างแพร่หลายอย่างรวดเร็วในสถานการณ์ปัจจุบันแต่ในอนาคตนั้นบทบาทของการใช้ FTTH น่าจะเกิดขึ้นอย่างแน่นอนจากแรงผลักดันต่อไปนี้

Technology Push: มีการร่วมมือกันของบริษัทชั้นนำของโลก เช่น British Telecom, BellSouth, France Telecom, Nippon Telegraph and Telecom และ GTE เพื่อผลักดันมาตรฐานระบบ Full Service Access Network (FSAN). FSAN ได้รับการยอมรับจาก ITU ในด้านการให้บริการด้านระบบการใช้งานด้าน Fiber to Home and Business สิ่งที่เกิดขึ้นตามมาคือ มีการออกแบบระบบ Passive optical network ซึ่งระบบนี้นำไปสู่การลดต้นทุนของการให้บริการได้ไม่ว่าจะเป็นด้านอุปกรณ์ การติดตั้ง และการดูแลรักษา ซึ่งบริษัทที่มีการพัฒนามาตรฐาน FSAN อย่าง Lucent, NEC, British Telecom, BellSouth ได้ทำการพัฒนาระบบและตัวอุปกรณ์เพื่อนำไปสู่การให้บริการ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์ปลายทางที่ใช้สำหรับติดตั้งภายในบ้าน เรียกว่า Triplexes เป็นวงจรที่ผสมผสานระหว่าง Electrical และ Optical องค์กรประกอบและโครงสร้างได้แก่ Waveguides และ Filters ทำหน้าที่ส่งข้อมูลและแยก Photons ออกเป็น wavelength และ Planar Light Wave Circuit (PLC) เป็นอุปกรณ์คล้ายกับ Triplexes เช่นกัน สิ่งเหล่านี้คือแรงผลักดันของการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีที่จะทำให้ FTTH เกิดขึ้นเร็วขึ้น

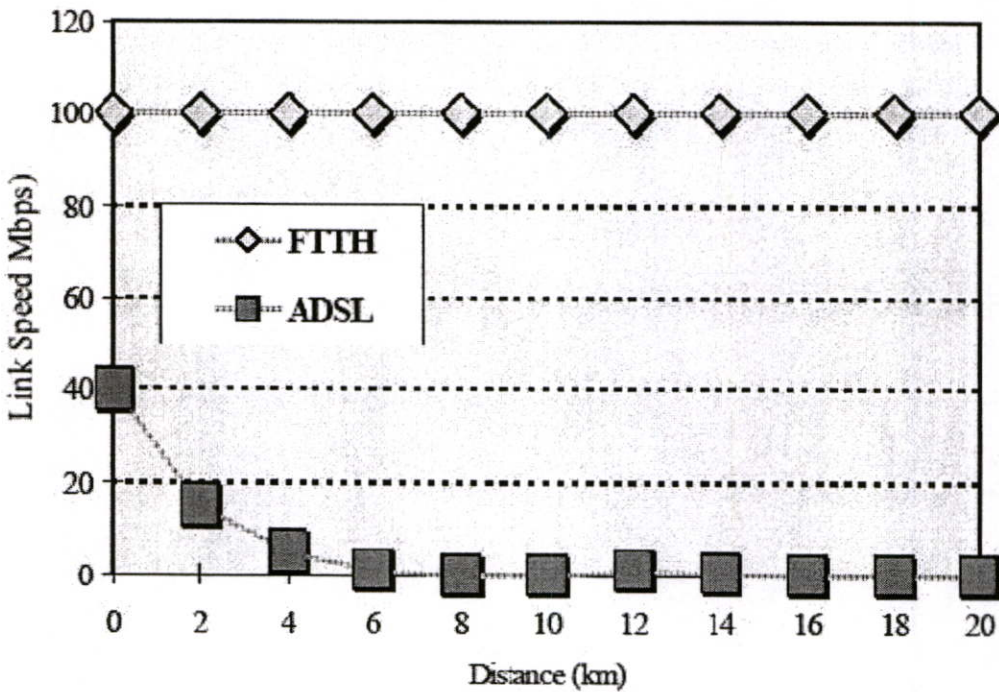
Market Pull : ระบบ Internet ปัจจุบันมีการใช้อย่างแพร่หลายทั้งด้านการทำงานและความบันเทิง การให้บริการ IP-TV , Video on demand และการบริการอีกมากมายในอนาคต เมื่อทั้งหมดมีความต้องการใช้งานจากที่บ้านพักอาศัย โดยเฉพาะครอบครัวขนาดใหญ่ที่มีความต้องการใช้งาน

แตกต่างกัน สิ่งนี้จึงสะท้อนไปที่ความต้องการของประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อโครงข่ายและความต้องการ bandwidth ขนาดใหญ่ในการรับส่งข้อมูลซึ่งความต้องการนี้ก็เป็นอีกแรงผลักดันที่จะทำให้ Fiber Optics to home เกิดขึ้นได้ สำหรับในประเทศไทยปัจจุบันได้เริ่มมีผู้ให้บริการด้าน Fiber Optics to home บ้างแล้ว คือบริษัทฟรีอินเทอร์เน็ต จำกัด ที่ร่วมมือทางด้านเทคโนโลยีกับบริษัทในประเทศออสเตรเลีย ซึ่งเป็นโครงการแลกเปลี่ยนเทคโนโลยีซึ่งกันและกันเพื่อพัฒนาการสื่อสารด้านโทรคมนาคมนอกจากนี้ยังมีการร่วมมือกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวงในด้าน การวางโครงข่ายสายไฟเบอร์ สำหรับการไฟฟ้านครหลวง มีการเปิดให้บริการ ในเขตพื้นที่ กรุงเทพมหานคร,นนทบุรีและสมุทรปราการ

ส่วนการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีการเปิดทดลองใช้ในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ชลบุรี ระยอง ภูเก็ตและสมุย ส่วนรูปแบบการให้บริการมี 3 บริการประกอบด้วย ระบบโทรศัพท์ โทรทัศน์ แบบอินเทอร์เน็ตแก็กทีฟทีวี และอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง

## 2.3 การพัฒนาจากระบบ ADSL ไปสู่ระบบ FTTH

ระบบ ADSL (Asynchronous Digital Subscriber Line) เป็นระบบการสื่อสารข้อมูลที่ช่วยให้ ข้อมูลที่มีแบนด์วิดท์สูง ๆ (เช่น ภาพ) สามารถเดินทางในระบบสายส่งทองแดงได้ โดยทั่วไปสายโทรศัพท์ที่เดินไปยังบ้านผู้เช่าหรือเรียกว่าสายครอบไวร์ (drop wire) ก็จะเป็นสายทองแดงเส้นเล็ก ๆ ที่มีขีดจำกัดในการส่งผ่านข้อมูลได้ ไม่มากแต่ผู้เช่าสามารถใช้สายทองแดงสื่อสารข้อมูลคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ เช่น สัญญาณภาพ หรือรวมไปถึงการสื่อสารสัญญาณดิจิทัลที่มีอัตราการส่งข้อมูลบิตเรต (bit rate) สูงได้นั้นก็เพราะเทคโนโลยี ADSL จะทำหน้าที่บีบอัดข้อมูลให้มีขนาดเล็กลงจากเดิม จนสามารถส่งผ่านไปนสายทองแดงซึ่งเปรียบเสมือนท่อที่มีขนาดเล็กได้ โดยปกติ ADSL ที่ให้บริการพื้นฐาน จะให้ความเร็วข้อมูลอยู่ที่ประมาณ 1-2 Mbps (บ้านเราเริ่มที่ 128 kb/s) แต่ตัวระบบเองก็มีความสามารถที่จะส่งข้อมูลผ่านสายทองแดงด้วยความเร็วที่สูงขึ้นเป็น 12, 24 และ 40 Mbps ได้ ซึ่งระบบที่มีความเร็วสูงขึ้นนี้บางทีอาจเรียกชื่อระบบเป็น HDSL (High bit rate Digital Subscriber Line) หรือ VHDSL (Very High bit rate Digital Subscriber Line) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การส่งข้อมูลผ่านสายส่งที่เป็นทองแดงก็มีข้อด้อยตรงที่ความเร็วในการส่งข้อมูลจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางมากขึ้น (ดูรูปที่ 2.1)

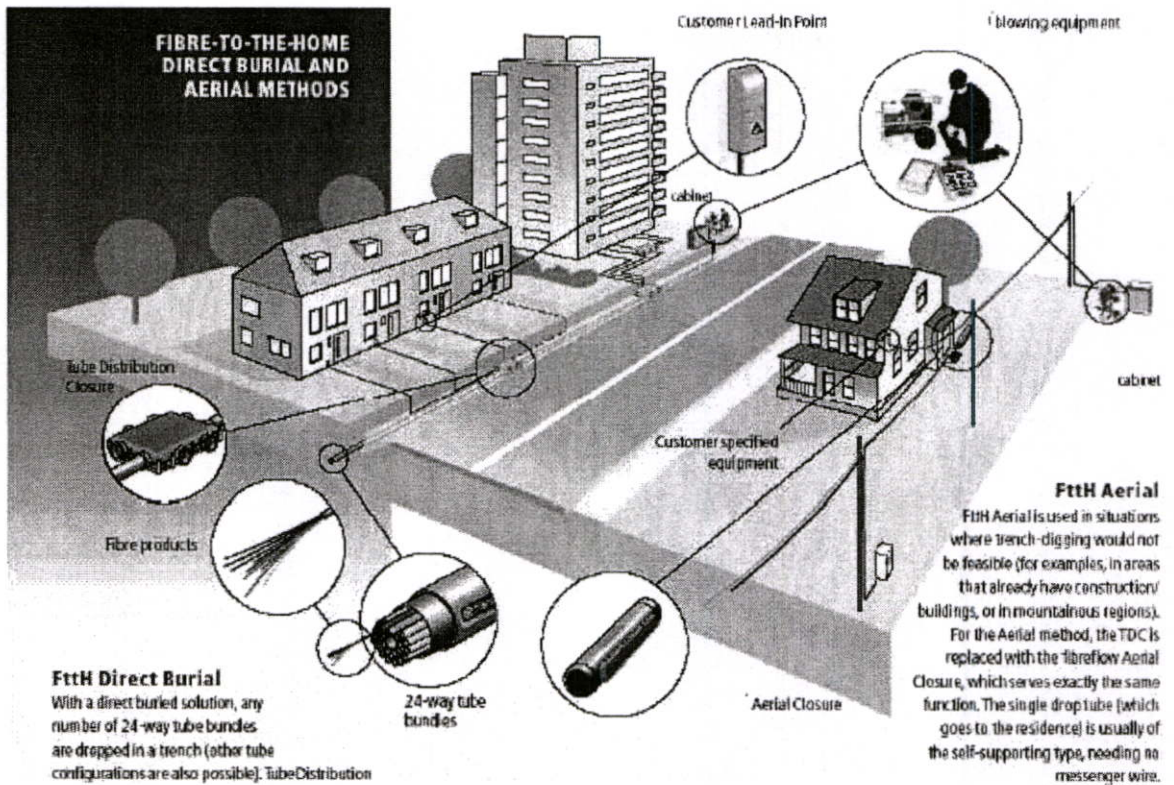


รูปที่ 2.1 เปรียบความเร็วในการส่งสัญญาณของระบบ ADSL และระบบ FTTH กับระยะทาง

แม้ว่า ADSL/HDSL/VHDSL จะสามารถส่งข้อมูลได้มากในช่วงเวลาสั้น ๆ ก็ตาม แต่เมื่อเทียบกับอัตราการเติบโตของผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ต ประกอบกับความต้องการสื่อสารข้อมูลในหลาย ๆ รูปแบบ โดยเฉพาะ ข้อมูลที่เป็นสัญญาณภาพอย่างต่อเนื่อง ความเร็วที่ระบบ xDSL (x หมายถึงอาจเป็น A หรือ H หรือ VH ก็ได้) สามารถตอบสนองได้ กลับจะช้าเกินไป จึงจำเป็นต้องหาทางออกใหม่ ซึ่งในที่สุดก็ถึงเวลาของการนำ เส้นใยแสงมาแทนที่ระบบสายส่งทองแดงเพื่อเข้าถึง (access) บ้านผู้เช่า (subscriber) ด้วยระบบที่เรียกว่า FTTH (Fiber-To-The-Home) (บางคนเรียก FTTP – Fiber To The Premise) ทั้งนี้เส้นใยนำแสงมีคุณสมบัติ เปรียบเสมือนท่อนำสัญญาณขนาดใหญ่ ที่สามารถส่งผ่านข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ด้วยความเร็วสูง ๆ ได้ (ปัจจุบันความเร็วข้อมูลสูงสุดที่เดินทางในเส้นใยนำแสงอยู่ในเทอมของ เทอราบิตต่อวินาที (Tb/s) หรือ 1,000,000,000,000 บิตต่อวินาที) ทำให้ FTTH สามารถให้บริการสื่อสารข้อมูลได้หลายรูปแบบพร้อมกัน เช่น ระบบเคเบิลทีวี (CATV) เป็นต้น จากคุณสมบัติดังกล่าว หลายคนเชื่อว่า FTTH จะเป็นทางเลือกที่สำคัญของระบบโครงข่ายที่ให้บริการผู้เช่าในอาคารบ้านเรือนด้วยระบบ บรอดแบนด์ความเร็วสูง อินเทอร์เน็ตความเร็วสูง และระบบเคเบิลจะเป็นการสื่อสารของระบบโครงข่ายในครัวเรือนด้วยระบบบรอดแบนด์ความเร็วสูงหรือ Broadband-access network

## 2.4 FTTH ในการสื่อสาร

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ FTTH เป็นระบบที่น่าสนใจสำหรับผู้เช่า (subscriber) หรือผู้ใช้ (user) โดยเฉพาะ ผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ตมีอยู่ 2 ประการ คือ ความสามารถในการสื่อสารข้อมูลด้วยความเร็วสูง (high capacity) และ ระบบมีความน่าเชื่อถือ (system reliability)



รูปที่ 2.2 ระบบข่ายสายเคเบิลเส้นใยแก้วนำแสงในระบบ FTTH แบบต่างๆ

โครงสร้างพื้นฐานของสายส่งที่ใช้ในระบบ FTTH ถูกกำหนดให้เป็นเส้นใยนำแสง ตลอดเส้นทางจากผู้ให้บริการไปจนถึงบ้านผู้เช่า ทำให้ได้ท่อนำสัญญาณที่มีขนาดใหญ่สามารถส่งข้อมูลปริมาณมากๆ ได้ในคราวเดียว ระบบโครงข่ายสื่อสารที่เป็นเส้นทางหลักขนาดใหญ่หรือแบ็กโบน (backbone) ต่างก็ใช้สายส่งที่เป็นเส้นใยนำแสงแทบทั้งสิ้น ดังนั้น การนำเส้นใยนำแสงมาใช้ในการเข้าถึง (access) ผู้เช่าโดยตรง ย่อมสามารถรองรับความเร็วในการสื่อสารข้อมูลได้ทั้งสิ้น ในระบบ FTTH ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลจะเริ่มต้นที่ 100 Mbps (บางทีก็เริ่มที่ 150 Mbps) ซึ่งถือว่าเร็วกว่า ADSL ถึง 100 เท่า (เมื่อเทียบกับ 1 Mbps) โดยหลักการแล้ว FTTH ได้ถูกออกแบบให้ทำงานร่วมกับระบบ ATM (Asynchronous Transfer Mode) ได้ด้วย ซึ่งในกรณีนี้ จะทำให้เพิ่มขึ้นเป็น 622 Mbps ยิ่งไปกว่านั้น โครงข่ายเส้นใยนำแสง ยังมีส่วนประกอบของอุปกรณ์ชนิด พอน

(PON - Passive Optical Network) ซึ่งเป็นลักษณะของโครงข่ายที่มีส่วนของอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (passive) คือสามารถทำงานได้โดยไม่ต้อง ป้อนกำลังงานจากภายนอก ซึ่งอุปกรณ์ชนิดพอน (PON) สามารถรองรับการทำงานในรูปแบบต่าง ๆ ที่อยู่ในโครงข่ายได้ในเวลาเดียวกัน การออกแบบให้ PON มีอัตราการใช้ร่วมกัน (sharing ratio) ลดลง หรือการเพิ่มความยาวคลื่นแสงที่เป็นคลื่นพาห์ สามารถทำให้ FTTH สื่อสารข้อมูลที่มีความเร็วขนาด 2.488 Gbps ได้อย่างสบาย

การใช้เส้นใยนำแสงเป็นสื่อสัญญาณ (Transmission) ของระบบ FTTH ทำให้ข้อมูลที่เดินทางระหว่างสถานีมีลักษณะเป็นแสง ซึ่งแตกต่างจากข้อมูลที่เป็นสัญญาณไฟฟ้าในระบบสายส่งทองแดง ลองนึกคิดถึงระบบโทรศัพท์แบบเดิม ในขณะที่มีการใช้งานสนทนากันอยู่อาจมีผู้ไม่หวังดีทำการลักลอบดักฟังด้วยการนำเครื่องโทรศัพท์มาต่อพ่วง (Tapping) กับสายโทรศัพท์ที่เชื่อมต่อเข้าบ้านคู่สนทนา (แน่นอนต้องต่อพ่วงนอกบ้านโดยไม่ให้ใครรู้) เพียงแค่ข้อมูลก็ไม่ใช่ความลับอีกต่อไป หรือหากว่ามีการสื่อสารเป็นข้อมูลดิจิทัล คนที่มีความรู้ (แต่ใช้ในทางที่ผิด) ก็สามารถนำสายไฟมาต่อพ่วง (Tapping) เพื่อดึงสัญญาณไฟฟ้าออกมาได้โดยง่าย ลักษณะเช่นนี้ทำให้การสื่อสารข้อมูลไม่มีความปลอดภัยและไม่น่าเชื่อถือ ในกรณีของเส้นใยนำแสง การดึงข้อมูลออกมาจากสายส่งไม่สามารถทำได้โดยง่ายเหมือนสายไฟฟ้า เพราะแสงจะเดินทางอยู่ภายในแนวแกนกลางของเส้นใยนำแสง ไม่มีการรั่วไหลออกสู่ภายนอกทางผิวโดยรอบ การนำเส้นใยนำแสงอื่นมาสัมผัสผิวเส้นใยนำแสง (เหมือนสายไฟฟ้า) ไม่อาจทำให้แสงส่งผ่านระหว่างกันได้ จึงทำให้การลักลอบดึงสัญญาณแสงไม่อาจทำได้โดยสะดวก (หากจะมีอุปกรณ์และวิธีการพิเศษ ซึ่งไม่คุ้มกัน) จึงทำให้การสื่อสารระบบ FTTH มีความปลอดภัยและน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ เส้นใยนำแสงในระบบสื่อสารมักทำมาจากแก้ว ไม่เป็นสนิมเหมือนสายไฟ ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมสูง อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานสูงกว่าสาย ทองแดงอีกด้วย

## 2.5 ข้อดีของระบบ FTTH

แนวความคิดของเทคโนโลยี FTTH มีมากกว่า 40 ปี แต่เพิ่งจะมีบทบาทต่อระบบสื่อสารในช่วงเวลาไม่กี่ปีมานี้ ทั้งนี้มีใช้เพียงแค่เหตุผลที่เส้นใยนำแสงมีราคาถูกลงเท่านั้น แต่ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่เป็นข้อดีของระบบ ดังนี้

### 2.5.1 ระบบมีความเร็วสูง (High Capacity)

เส้นใยแก้วนำแสงมีข้อดีเหนือระบบอื่นอย่างมากตรงที่สามารถสื่อสารข้อมูล ขนาดใหญ่ มาก ๆ ได้ เนื่องจากเส้นใยนำแสงมีคุณสมบัติเสมือนเป็นท่อส่งสัญญาณที่มีขนาดใหญ่มากนั้นเอง ในระบบสื่อสารปัจจุบัน การส่งข้อมูลแบบดิจิทัลกำลังเป็นที่นิยม เนื่องจากทำให้ข้อมูลมีคุณภาพสูง อย่างไรก็ตาม การสร้างข้อมูลดิจิทัลจากข้อมูลดั้งเดิมที่เป็นสัญญาณอนาล็อก (เช่น ภาพและเสียง) ทำให้ข้อมูลมีขนาดใหญ่กว่าเดิมมาก ดังนั้นหากต้องการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ให้ถึงปลายทางโดยรวดเร็ว ต้องส่งผ่านสายส่งด้วยอัตราเร็ว (Bit rate) ที่สูง ซึ่งเส้นใยนำแสงสามารถรองรับการทำงานในลักษณะเช่นนี้ได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่น เพิ่มเติมก็ได้ ในส่วนของระบบ FTTH เอง ก็ถูกออกแบบให้สามารถสื่อสารข้อมูลด้วยความเร็วปกติ ประมาณ 155 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) ซึ่งถือว่ามีความเร็วมากกว่าระบบ ADSL (ที่ความเร็ว 1.5 Mbps) รวมร้อยเท่าเลยทีเดียว

ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลของ FTTH ที่ให้บริการในบ้านเรา อาจเริ่มต้นที่ความเร็วต่ำกว่า 155 Mbps ซึ่งถือว่ายังต่ำกว่ามาตรฐานพื้นฐานของมัน แสดงให้เห็นว่าระบบ FTTH สามารถรองรับ การใช้ในงานการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงมากในอนาคตได้อย่างไม่ต้องสงสัย หากผู้ใช้บริการต้องการความเร็วที่เพิ่มขึ้น (แน่นอนก็ต้องเสียค่าบริการเพิ่มมากขึ้น) ก็สามารถเลือกความเร็ว (ตามที่ผู้ให้บริการกำหนด) ได้มากถึง 622 Mbps หากข้อมูลที่วิ่งอยู่ระบบ FTTH ทำงานร่วมกับระบบสื่อสารแบบ ATM (Asynchronous Transfer Mode) ในโครงข่ายสื่อสารที่ให้บริการ

ยิ่งไปกว่านั้น ระบบ FTTH ยังมีความยืดหยุ่นสูง หากมีการปรับปรุงระบบ PON (Passive Optical Network ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป) ให้มีสมรรถนะสูงขึ้น หรือ หากมีการนำระบบ DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) ซึ่งเป็นระบบการมัลติเพล็กซ์เชิงแสงที่ใช้ความยาวคลื่นแสงเป็นคลื่นพาห้ (carrier) มากกว่าหนึ่งความยาวคลื่น (ดังที่ใช้ในระบบมาตรฐานของ FTTH) ก็สามารถเพิ่มความเร็วของ FTTH ได้สูงถึง 2.488 Gbps เลยทีเดียว

เมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการสื่อสารข้อมูล กับราคาการให้บริการซึ่งอาจสูงกว่าระบบ xDSL ไม่มาก จะพบว่าค่าใช้จ่ายต่อหน่วยข้อมูล (เช่น y บาทต่อข้อมูลที่ 1 Mbps) จะถูกกว่าระบบที่ใช้ไฟฟ้าสื่อสารมาก

### 2.5.2 ระบบมีความน่าเชื่อถือ (System Reliability)

- จากผลสำรวจในกรณีของการพิจารณาเลือกใช้ระบบสื่อสารระยะไกล ลูกค้าในปัจจุบันให้ความสนใจต่อระบบสื่อสารที่มีความน่าเชื่อถือสูงเป็นอันดับต้นๆ เหนือรายละเอียดที่เกี่ยวกับ ราคา ค่าใช้จ่ายซึ่งสอดคล้องกับระบบ FTTH
- ความน่าเชื่อถือของระบบ FTTH เกิดจากระบบสายส่งที่เป็นเส้นใยนำแสง ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยนำแสงในระบบสื่อสารโทรคมนาคมมักเป็นแก้ว ทั้งนี้แก้วจะมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมสูง อีกทั้งแก้วไม่เป็นสนิม ทำให้เส้นใยนำแสงมีอายุการใช้งาน นานมาก (เมื่อเทียบกับสายไฟโลหะ) ในการใช้งานจริง วัสดุที่เป็นเปลือกหุ้มเส้นใยในลักษณะของสายเคเบิล อาจสึกกร่อนไปก่อนตัวใยแก้วนำแสงเอง อย่างไรก็ตาม เคเบิลเส้นใยนำแสงมักมีอายุการใช้งานอย่างน้อย 50 ปีขึ้นไป ซึ่งถือว่านานพอที่จะทำให้ผู้ใช้เกิดความมั่นใจในการนำสัญญาณ ของระบบ FTTH
- วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้วมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าโดยธรรมชาติ ทำให้ปราศจากปัญหาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้ข้อมูลสื่อสารไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนสายส่งทองแดง สัญญาณสื่อสารในระบบ FTTH จึงเป็นสะอาดและเชื่อถือได้

ระบบ FTTH ใช้เส้นใยนำแสงเป็นสายส่งสัญญาณส่งไปยังบ้านของผู้ใช้ผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า ONU (optical network unit) ซึ่งจะติดตั้งอยู่ภายในบ้านของผู้เช่า ONU นี้ทำหน้าที่กระจายสัญญาณซึ่ง ส่วนใหญ่เป็นสัญญาณไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ปลายทางที่อยู่ในบ้าน เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ หรือ โทรทัศน์ เป็นต้น เนื่องจากสายส่งสัญญาณที่ต่อเข้ากับ ONU เป็นเส้นใยนำแสง ทำให้ไม่มีส่วนของตัวนำเชื่อมต่อเหมือนระบบโทรศัพท์ ทำให้ช่วยลดแรงไฟกระชาก (electrical surge) ที่อาจเกิดจากฟ้าผ่า และการเหนี่ยวนำไฟฟ้า

## บทที่ 3

# เทคโนโลยีขับเคลื่อน FTTH

แรงขับเคลื่อนสำคัญที่ทำให้เทคโนโลยี FTTH ก้าวเข้าสู่เชิงพาณิชย์ ได้แก่เทคโนโลยีต่าง ๆ ที่ผ่าน กระบวนการพัฒนามาแล้วตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน โดยเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องโดยตรงมี 6 ประเภท ได้แก่

### 3.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

แหล่งกำเนิดสารกึ่งตัวนำที่มักใช้ในระบบสื่อสารเชิงแสงมี 2 ประเภท คือ แอลอีดี (LED – Light Emitting Diode) และเลเซอร์ไดโอด (LD – Laser Diode ) ในระบบสื่อสารข้อมูลที่มีความเร็วสูงจำเป็นต้องใช้เลเซอร์ไดโอด ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาของการเกิดดิสเพอร์ชัน (dispersion) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้สัญญาณพัลส์แสงเกิดการกระจายเชิงเวลาตามระยะทางที่เดินทาง (ยิ่งส่งระยะทางไกลขึ้นเท่าไร พัลส์จะยิ่งมีความกว้างมากขึ้นเท่านั้น) อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ หากจำเป็นต้องติดตั้งเลเซอร์ไดโอดในงานข่ายสายต่อนอก (Outside plant) ซึ่งมีช่วง เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามสภาพแวดล้อมค่อนข้างกว้าง (โดยเฉพาะเมืองไทย จะมีความร้อนสูงมากในตอนกลางวัน) จะทำให้การทำงานของเลเซอร์ไดโอดมีประสิทธิภาพลดลง โดยเฉพาะค่ากระแสเทอร์สโธลด์ (Threshold current) หรือกระแสต่ำสุดที่ใช้ขับเลเซอร์ไดโอด จะมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิของตัวมัน(ตามสภาพแวดล้อม)เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มแสงที่เปล่งออกมามีค่าลดลง โดยทั่วไปการแก้ปัญหาทำได้โดยการเพิ่มส่วนของวงจรตรวจวัดความเข้มแสงขาออก และเพิ่มส่วนของวงจรมีป้อนกลับเพื่อทำให้วงจรขับสัญญาณชดเชยค่ากระแสขับ ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ทำให้เลเซอร์ไดโอดขับความเข้มแสงตามต้องการออกมา นอกจากนั้นยังอาจต้องเพิ่มส่วนของอุปกรณ์ระบายความร้อนหรือตัวลดอุณหภูมิ (Cooler) เพื่อป้องกันไม่ให้ เลเซอร์ไดโอดร้อนเกินไป เหล่านี้ล้วนทำให้วงจรขับ เลเซอร์ไดโอดมีความซับซ้อนและยุ่งยากมากขึ้น

เทคโนโลยีปัจจุบัน สามารถออกแบบเลเซอร์ไดโอดให้มีความไวต่ออุณหภูมิตดลง ดังเช่น เลเซอร์ไดโอดชนิดเฟบริเพอโรต์ (FP: Fabry-Perot) ชนิดโหมคร่วมตามแนวยาว (multi-longitudinal mode) ซึ่งใช้เทคโนโลยีควอนตัมเวล (Strained-Layer Multi-Quantum-Well: SLMQW) ทำให้สามารถนำมาใช้งานในสภาพกลางแจ้ง เช่นงานข่ายสายต่อนอกได้ โดยที่วงจรขับกระแสไม่ต้องการความยุ่งยากดังที่กล่าวมาแล้ว จึงทำให้วงจรขับสัญญาณ มีต้นทุนที่ถูกลงทั้งใน ส่วนของการติดตั้งและในส่วนของารซ่อมบำรุง

การส่งผ่านสัญญาณแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังเส้นใยนำแสงในระบบสื่อสาร จำเป็นต้องถูกออกแบบให้มีค่าการส่งผ่านกำลังงาน (Coupling) สูง ในอดีตปัญหาการส่งผ่านกำลังงานต่ำเกิดจากขนาดของพื้นที่ที่เปล่งแสงซึ่งมักพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของโหมดสนาม (MFD – Mode Field Diameter) ระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับเส้นใยนำแสงมักมีค่าแตกต่างกันมาก แต่ในปัจจุบันสามารถพัฒนาในเรื่องของตัวถังอุปกรณ์ (Component packaging) ช่วยให้การต่อเชื่อมระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับเส้นใยนำแสงในแนวเดียวกันมีความแน่นหนา และมีเสถียรภาพ จึงทำให้ค่าการสูญเสียบริเวณรอยต่อระหว่าง เลเซอร์ไดโอด กับเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าน้อยมาก

เทคโนโลยีเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม (เช่น พลาสติกบางประเภท) ในการสร้างตัวถัง อุปกรณ์ มีส่วนทำให้เลเซอร์ไดโอดมีราคาถูกลงแต่ยังคงความแข็งแรงทนทานในการใช้งานอยู่ อีกทั้งยังช่วยให้เลเซอร์ไดโอดทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง โดยมีผลกระทบต่อความชื้นน้อยมากอีกด้วยซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ มีความจำเป็นต่อการใช้งาน FTTH เป็นอย่างมาก

### 3.2 ตัวแยก และส่งผ่านสัญญาณตามความยาวคลื่น (Splitter and WDM Coupler)

โครงสร้างของระบบเครือข่าย FTTH (รายละเอียดจะกล่าวถึงต่อไป) จำเป็นต้องมีอุปกรณ์แยก แสง (Splitter) ในงานข่ายสายตอนนอก เพื่อแยกสัญญาณไปยังบ้านผู้ใช้ อุปกรณ์แยกแสงที่นิยมใช้กันมาแต่ครั้งอดีต ได้แก่ คับเบิลอร์เส้นใยแก้ว (Fiber coupler) ชนิด FBT (Fused Bicolical Coupler) ชนิด 2x2 ซึ่งมีคุณสมบัติในการแบ่งแยกสัญญาณขาเข้าไปสู่ขาออกในเส้นทางต่าง ๆ โดยที่มีแสงแต่ละแนวทางเป็นไปตามที่ออกแบบ อีกทั้งคับเบิลอร์เส้นใยแก้วชนิด FBT ยังสามารถออกแบบให้การทำงานขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่นได้อีกด้วย (WDM coupler) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาตัวแยกแสงโดยใช้ท่อนำแสงแบบระนาบที่ใช้ซิลิกอนเป็นวัสดุหลัก (Silicon planar waveguide) ซึ่งราคาของตัวแยกแสงทั้งสองค่อนข้างจะมีราคาสูงหากมีการ สั่งซื้อเพียงไม่กี่ตัว เช่นในอดีต อย่างไรก็ตาม การที่ระบบ FTTH เริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้น ทำให้ความต้องการปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ทำให้ราคาของอุปกรณ์มีราคาถูกลงอย่างมาก (เพราะสามารถผลิตเป็น Mass product ได้) อีกทั้งคุณภาพของอุปกรณ์ยังดีกว่าเมื่อก่อนอีกด้วย

เทคโนโลยีปัจจุบันได้พัฒนาให้ตัวแยกแสงที่ใช้ท่อนำแสงแบบระนาบมีขนาดเล็กลง (เช่น 1.5 mm x2 cm) มีความสามารถในการแยกแสงให้มีแสงขาออกได้หลายทาง สามารถทำงาน ภายใต้อุณหภูมิสูงได้ (เช่น > 100C) และที่สำคัญ มีค่าการสูญเสียสัญญาณ (excess loss) ต่ำ (<0.5 dB) นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้มากกว่า 50,000 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่อง โดย คุณภาพสัญญาณยังคง

เดิมอีกด้วย

เทคโนโลยีการแยกแแสงแบบระนาบ ที่มีฟังก์ชันการทำงานขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสง (WDM Coupler) ดังเช่นอุปกรณ์ที่เรียกว่า WGR (Waveguide Grating Router) เป็นอุปกรณ์ที่อาจจะยัง ไม่มีให้เห็นในเชิงพาณิชย์นัก แต่ก็ถือว่าเป็นอุปกรณ์ในอนาคตของ FTTH ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเกี่ยวกับความเร็วในการสื่อสารสัญญาณ และการทับซ้อนของระบบสื่อสารสัญญาณต่าง ชนิดกันโดยไม่รบกวนกัน ทำให้เชื่อมั่นได้ว่า FTTH เป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน อีกทั้งยัง สามารถพัฒนาไปได้อีกมากในอนาคต

### 3.3 เครือข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟหรือ PON (Passive Optical Network)

ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ในการติดตั้งระบบสื่อสารมักเกี่ยวข้องกับงานขั้วสายคอนนอก ระบบ FTTH เป็นระบบที่อุปกรณ์ขั้วสายคอนนอกเป็นเครือข่ายเส้นใยนำแสงที่บรรจุข้อมูลได้มาก ทำให้สามารถสื่อสารข้อมูลสำหรับผู้ใช้จำนวนมากผ่านเส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียวได้ใน เส้นทางหลักของการสื่อสาร จากนั้นจึงค่อยใช้ตัวแยกแแสง ทำการแยกข้อมูลไปยังบ้านผู้ใช้อีกทีหนึ่ง การที่โครงสร้างของระบบเป็นเช่นนี้จะทำให้ระบบมีราคาถูกลง เพราะเส้นใยนำแสงสามารถใช้เป็น ทางรวมของการสื่อสาร ข้อมูลได้ประกอบกับตัวแยกแแสง (เช่น กับเพลอร์ชนิด FBT) เป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ (Passive) (หมายถึงอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องป้อนพลังงานจากภายนอกให้อุปกรณ์) ซึ่งลักษณะเครือข่ายเช่นนี้เรียกว่าเครือข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ หรือPON (Passive Optical Network) จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในของ เครือข่าย FTTH ไม่แพงเมื่อเทียบกับปริมาณข้อมูลที่ให้บริการ

ระบบ FTTH สามารถทำงานร่วมกับเทคโนโลยีมัลติเพล็กซ์เชิงแสงหรือ WDM (Wavelength Division Multiplexing) ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถสื่อสารข้อมูลต่างชนิดกันด้วยแสงที่มีความยาว คลื่นแสงแตกต่างกันไปในเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกันได้ อันจะทำให้ปริมาณข้อมูลหรือความเร็ว ในการสื่อสารข้อมูลเพิ่มขึ้นอย่างมากตามตัวคูณของจำนวนความยาวคลื่นแสงที่ใช้ ตัวอย่างเช่น เครือข่าย FTTH ที่ใช้แสงเพียงความยาวคลื่นเดียวให้บริการที่ความเร็ว 100 Mbps หากทำการ ปรับปรุงส่วนของภาคส่งให้มีความยาวคลื่นแสงสำหรับสื่อสารได้พร้อมกันเป็นจำนวน 4 ความยาวคลื่น ระบบเดิมจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า หรือ 400 Mbps ในทันที จากจุดนี้จะเห็นว่า ระบบเครือข่ายของ FTTH สามารถพัฒนาให้เป็นแบบ PON-WDM ได้โดยแทบไม่ต้องไป ปรับปรุง แก้ไขงานขั้วสายคอนนอกเลย จากรายงานในปัจจุบันพบว่า ระบบ FTTH ในเชิงพาณิชย์สามารถ ให้บริการเครือข่ายแบบ PON-WDM ที่ใช้ความยาวคลื่นแสงร่วมกันถึง 64 ความยาวคลื่นแสง และมี

แนวโน้ม ที่จะพัฒนาให้มีจำนวนมากขึ้นไปเรื่อย ๆ

### 3.4 ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า (FTTH Powering)

ในระบบโทรศัพท์ที่ใช้สายทองแดงแบบเดิม (POT – Plain Old Telephone) มีข้อดีตรงที่ระบบ ยังคงใช้งานได้เมื่อไฟดับ เนื่องจากพลังงานที่ใช้นั้น ได้มาจากชุมสายโทรศัพท์ระบบทำงานมาจากชุมสายโทรศัพท์ ไม่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าที่ใช้อยู่ภายในบ้าน แต่ในระบบ FTTH อุปกรณ์ ONU (Optical Network Unit) ที่ติดตั้งอยู่ภายในบ้านของผู้ใช้ถือเป็นอุปกรณ์ประเภท Active ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ที่ต้อง ใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ตัวมันทำงานได้ ประกอบกับเส้นใยนำแสงไม่สามารถนำพลังงาน ไฟฟ้าได้เหมือนระบบสายโทรศัพท์ทองแดง จึงจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานไฟฟ้าเฉพาะสำหรับ ONU นอกจากนี้ ONU ควรแบตเตอรี่สำรอง เพื่อให้ตัวมันสามารถทำงานได้แม้ไฟจะดับทำให้ระบบต้องมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง หรือ IFC (Installed first costs) และค่าใช้จ่ายตลอดการใช้งาน ( Life-cycle costs : LCC) เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีในปัจจุบัน สามารถออกแบบให้ ONU มีระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มี ขนาดเล็ก รวมทั้งกินไฟต่ำ ซึ่งเมื่อคิดคำนวณเปรียบเทียบกับระบบ POT ที่ต้องใช้ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากชุมสาย (ในขณะที่ระบบ FTTH ระบบพลังงานไฟฟ้าจะอยู่ที่บ้านผู้ใช้) กลับกลายเป็นว่าพลังงานรวม ที่ใช้ในระบบ FTTH กลับน้อยกว่า ซึ่งเป็นผลดีกับสภาพเศรษฐกิจของประเทศในระดับมหภาค

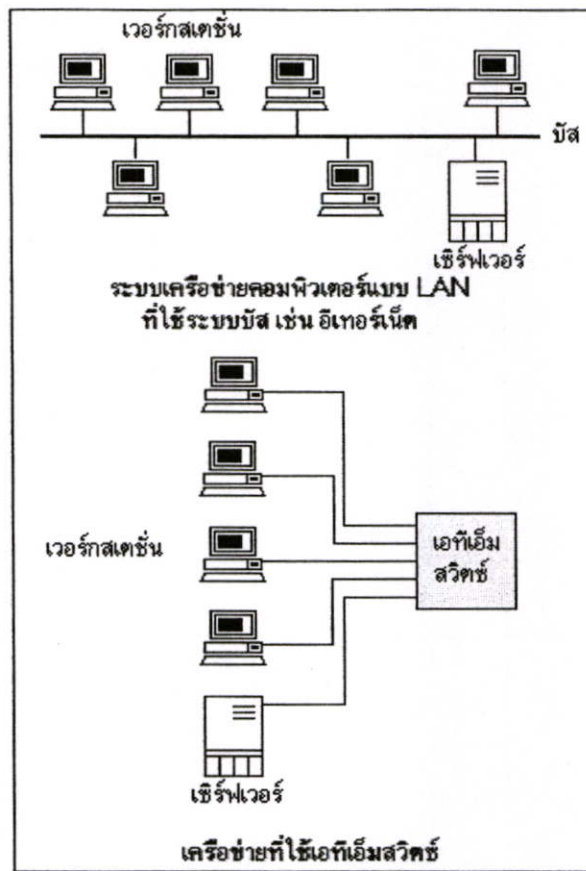
### 3.5 การสื่อสารข้อมูลด้วยระบบ เอทีเอ็ม (ATM Transport)

แม้ว่า FTTH จะมีข้อดีในเรื่องของความน่าเชื่อถือและความเร็วในการส่งข้อมูล แต่การที่จะต้อง ให้บริการเครือข่ายที่มีผู้ใช้บริการมากมายและหลากหลาย ทำให้มีข้อมูลหลากหลายชนิดเดินทางอยู่ในระบบ ปัญหาสำคัญในตอนนี้ก็คือ ทำอย่างไรที่จะทำให้ข้อมูลที่แตกต่างกัน สามารถสื่อสาร ร่วมกันได้ในระบบเดียวกัน ซึ่งทางออกของปัญหานี้ก็คือการนำระบบสื่อสารแบบ ATM (Asynchronous Transfer Mode) เข้ามาใช้บนเครือข่ายของ FTTH

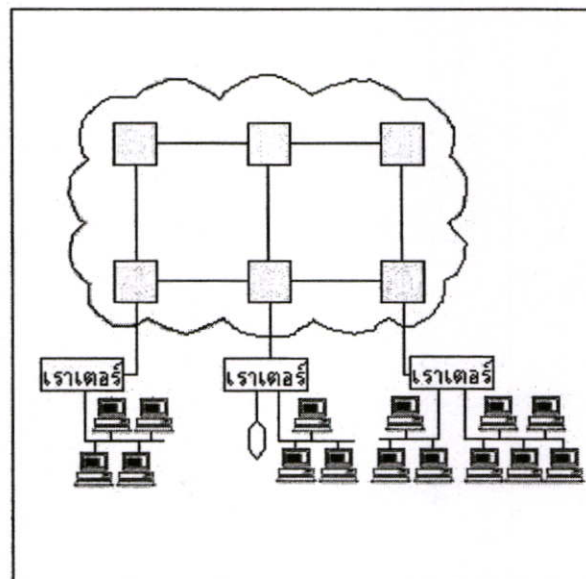
โพรโตคอลของ ATM เป็นโพรโตคอลที่มีความยืดหยุ่นสูง และเป็นที่ยอมรับใช้ในเครือข่ายสื่อสารทั่วไป ในระบบ ATM ข้อมูลต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเสียง ภาพ ข้อมูลคอมพิวเตอร์ หรืออื่น ๆ ที่มี ลักษณะแตกต่างกัน จะถูกทำให้เป็นข้อมูลดิจิทัลเหมือนกัน จากนั้นข้อมูลนี้จะถูกจัดกลุ่ม หรือเรียกว่า (cell) ก่อนถูกส่งออกไปยังปลายทางในลักษณะของการสื่อสารสัญญาณแบบแพ็กเก็ต (packet switching) ซึ่งจะช่วยให้ระบบสามารถสื่อสารข้อมูลที่มีรูปแบบหลากหลายได้ใน เครือข่ายเดียวกัน

มาตรฐานทางเทคนิคของระบบ ATM ที่ใช้งานบนเครือข่าย PON (เรียกว่า ATM-PON หรือ APON) ถือเป็นมาตรฐานสากล รายละเอียดทางเทคนิคสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จาก ITU-T G.983

ATM เป็นระบบสื่อสารข้อมูลที่ใช้รูปแบบการสื่อสารเป็นแบบ แพ็กเก็ต เหมือนเช่นในเครือข่าย X.25 หรือระบบ LAN อื่น ๆ เช่น อีเทอร์เน็ต โทเกนริง แต่การสื่อสารเป็นแบบอะซิงโครนัส กล่าวคือ ตัวรับและตัวส่งใช้สัญญาณนาฬิกาแยกจากกันไม่เกี่ยวข้องกัน สิ่งที่ ATM แตกต่างจากระบบ แพ็กเก็ตสวิตชิงอื่น ๆ คือ ATM ส่งข้อมูลด้วยขนาดของแพ็กเก็ตที่ทุกแพ็กเก็ตมีจำนวนข้อมูลเท่ากันเสมอ แพ็กเก็ตของ ATM มีขนาด 53 ไบต์ โดยให้ 5 ไบต์แรกเป็นส่วนหัวที่จะบอกรายละเอียดของแอดเดรสและมีส่วนข้อมูลข่าวสารอีก 48 ไบต์ตามมา เราเรียก แพ็กเก็ตของ ATM ว่า " เซล " การออกแบบให้เซลล์ข้อมูลมีขนาดสั้นก็เพื่อความเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้อย่างกว้างขวางขึ้นคือ ใช้รับส่งข้อมูล เสียง ภาพหรือข้อมูลต่างๆ ที่ต้องการส่งผ่านกันและกันด้วยความเร็วสูง



รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบเครือข่าย ATM กับระบบอีเทอร์เน็ต



รูปที่ 3.2 เครือข่าย ATM แบบ WAN

การรับส่งสัญญาณ ATM จึงใช้ช่องสื่อสารที่มีความเร็วต่าง ๆ ได้ซึ่งผิดกับ LAN เช่น อีเทอร์เน็ต ใช้ความเร็ว 10 Mbps หรือโทเคนริงใช้ 16 Mbps แต่ ATM ใช้กับความเร็วได้ตั้งแต่ 64 Kbps, 45 Mbps, 155 Mbps, 622 Mbps หรือ สูงกว่าก็ได้

เครือข่าย ATM เป็นเครือข่ายที่ประยุกต์ได้หลายรูปแบบ ทั้งแบบ LAN หรือ WAN ใช้กับตัวกลางได้ทั้งแบบลวดทองแดงหรือเส้นใยแสง แต่โครงสร้างการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างโหนดเป็นแบบสวิตช์ที่เรียกว่า ATM Switch การส่งผ่านข้อมูลแต่ละเซลล์จึงขึ้นกับ แอดเดรสที่กำหนด (รูปที่ 1) จากโครงสร้างการผ่านข้อมูลแบบสวิตช์ด้วยเซลล์ข้อมูลขนาดเล็กของ ATM จึงทำให้เหมาะกับเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบ WAN ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานที่ต้องการใช้ความเร็วข้อมูลสูง เครือข่าย WAN ก็เป็นอีก รูปแบบหนึ่ง ที่สามารถใช้เทคนิคของ ATM ได้เช่นกัน (รูปที่ 2) งานประยุกต์ที่กำลังกล่าวถึงกันมากอย่างหนึ่งคือ ระบบหลายสื่อ หรือที่เรียกว่า Multi-Media ระบบการประยุกต์นี้ประกอบด้วย การประมวลผล และส่งข้อมูล ทั้งภาพเคลื่อนไหว ภาพนิ่ง เสียง ข้อมูลตัวอักษร ฯลฯ ระบบ ATM จึงเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่จะทำให้ระบบหลายสื่อประสบความสำเร็จในการใช้งาน

เครือข่าย ATM จะใช้โปรโตคอล ATM (Asynchronous Transfer Mode) เป็นมาตรฐานการส่งข้อมูลความเร็วสูง โดย ATM ถูกพัฒนามาเพื่อให้ใช้กับงานที่มีลักษณะ ข้อมูลหลายรูปแบบและต้องการความเร็วในการส่งข้อมูลสูงมาก ๆ มีความเร็วในการส่งข้อมูลได้ตั้งแต่ 2 Mbps ไปจนถึง 622 Mbps สื่อที่ใช้ในเครือข่ายนี้ได้ตั้งแต่สายโคแอกเซียล สายไฟเบอร์ออปติก หรือสายไขว้คู่ (Twisted pair) โดย ATM นั้นถูกพัฒนามาจากเครือข่าย Packet-switching ซึ่งจะแบ่งข้อมูลที่จะส่งออกเป็นหน่วยย่อยๆ เรียกว่า packet ที่มีขนาดเล็กและคงที่แล้วจึงส่งแต่ละ Packet ออกไป แล้วนำมาประกอบรวมกันเป็นข้อมูลเดิมอีกครั้งที่ปลายทาง ข้อดีของ ATM คือสามารถใช้กับข้อมูลได้หลากหลายรูปแบบ เช่น ภาพเคลื่อนไหว, ข้อมูลคอมพิวเตอร์ หรือเสียง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความเร็วของข้อมูลสูง และยังมีกำกับการรับประกันคุณภาพของการส่ง เนื่องจากมี Quality of Service (QoS)

จุดเด่นของเครือข่าย ATM ที่เหนือกว่าเครือข่ายประเภทอื่น คือ อัตราการส่งผ่านข้อมูลสูง และเวลาในการเดินทางของข้อมูลน้อย จึงทำให้มีบางกลุ่มเชื่อว่า ATM จะเป็นเทคโนโลยีหลักของเครือข่าย LAN ในอนาคต เนื่องจากสามารถรองรับ Application ที่ต้องการอัตราส่งผ่านข้อมูลสูง เช่น การประชุมทางไกล (Video conferencing) หรือแม้กระทั่ง Application แบบตอบโต้กับระหว่าง Client กับ Sever

ATM เป็นระบบเครือข่ายแบบแพ็กเก็ตสวิตช์ชนิดพิเศษ เนื่องด้วยกลุ่มข้อมูลที่ส่งแบบแพ็กเก็ตสวิตช์โดยทั่วไปจะเรียกว่า "แพ็กเก็ต" แต่ ATM จะใช้ "เซลล์" แทน ที่ใช้คำว่าเซลล์เนื่องจาก

เซลล์นั้นจะมีขนาดเล็กและคงที่ ในขณะที่แพ็กเก็ตมีขนาดไม่คงที่ และใหญ่กว่าเซลล์มาก โดยมาตรฐานแล้วเซลล์จะมีขนาด 53 ไบต์ โดยมีข้อมูล 48 ไบต์ และอีก 5 ไบต์ จะเป็นส่วนหัว(Header) ทำให้สวิตช์ของ ATM ทำงานได้เร็วกว่าสวิตช์ของเครือข่ายอื่น ๆ

QoS(Quality of service) หรือคุณภาพของการให้บริการ ใน ATM จะหมายถึงการรับรองอัตราข้อมูลขั้นต่ำ และอัตราข้อมูลสูงสุดที่เครือข่ายสามารถรองรับได้ ในกรณีที่มีข้อมูลมากกว่าอัตราที่กำหนด แพ็กเก็ตอาจจะไปส่งไม่ถึงปลายทางก็เป็นได้ จากปัญหานี้ ATM จึงได้ปรับเทคนิคเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียของข้อมูล โดยใช้เทคนิคการปรับจราจร (Traffic Shaping) เพื่อกำหนดให้แพ็กเก็ตเป็นไปตามข้อกำหนดที่วางไว้ และอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้คือ การกำหนดนโยบายจราจร (Traffic Policing)

กลไกการส่งข้อมูลของ ATM มีรูปแบบในการรับส่ง คือ สถานีส่งและสถานีรับ จะมีการสร้างเส้นทางเสมือน (Virtual Path) สำหรับข้อมูลก่อนที่จะทำการส่ง สวิตช์ที่อยู่ในเส้นทางเสมือนจะมีหน้าที่ส่งแพ็กเก็ตต่อกันเป็นทอดๆ โดยใช้ข้อมูลในส่วนหัว

### 3.6 การบีบอัดข้อมูลภาพ (Video Compression)

ในบรรดาข้อมูลชนิดต่าง ๆ ที่ใช้สื่อสารกัน ข้อมูลภาพจัดว่าเป็นข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ แถบความกว้างความถี่หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของสัญญาณภาพเคลื่อนไหวยี่ค่าประมาณ 6 MHz และเมื่อผ่านกระบวนการแปลงสัญญาณให้เป็นข้อมูลดิจิทัลตามปกติจะต้องใช้อัตราเร็วในการสื่อสารข้อมูลถึง 96 Mbps!! ซึ่งจะเห็นว่าการสื่อสารข้อมูลภาพเคลื่อนไหวผ่านเครือข่ายที่เป็น สายไฟทองแดงไม่สามารถทำได้เลย อย่างไรก็ตาม ได้มีการพัฒนาเทคนิคการบีบอัดภาพให้มี ขนาดเล็กลง ทำให้สามารถสื่อสารผ่านสายส่งที่มีแบนด์วิดท์แคบอย่างสายทองแดงได้ แต่ถ้าสังเกตให้ดี จะพบว่ารายละเอียดหลายอย่างขาดหายไป ภาพที่ได้อาจไม่ชัดตามเวลาจริงร้อยเปอร์เซ็นต์ (มีหน่วงเวลาไปบ้าง) หรืออาจมีลักษณะการเคลื่อนไหวแบบไม่ต่อเนื่องจริง ๆ (จุดนี้ สังเกตได้ชัดหากขยายจอภาพให้ใหญ่ขึ้น)

แม้ว่าระบบ FTTH จะใช้เส้นใยนำแสงเป็นสายส่ง ซึ่งโดยปกติเส้นใยนำแสงมีแบนด์วิดท์สูงกว่า สายส่งทองแดงมาก แต่การออกแบบระบบสวิตซ์และหาเส้นทางที่ชุมสาย (ระบบ FTTH อาจ เรียกส่วนชุมสายนี้เป็น CO - Central Office) ก็ยังคงเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานด้วยความเร็วต่ำกว่าความสามารถของเส้นใยนำแสงมาก ทั้งนี้ด้วยเหตุผลเกี่ยวกับการควบคุม ค่าใช้จ่าย

ของต้นทุน เพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถจ่ายค่าบริการในอัตราที่สามารถจ่ายได้ตามสภาพ เศรษฐกิจ ดังนั้น การสื่อสัญญาณภาพเคลื่อนไหวที่ต้องอาศัยความเร็วสูง จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคบีบอัดสัญญาณเช่นเดียวกับสายส่งทองแดง อย่างไรก็ตาม การที่มีเส้นใยนำแสงเป็นสายส่ง ทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงปัญหาในการสื่อสัญญาณเลย โดยส่งที่ต้องสนใจก็คือคุณภาพของสัญญาณมากกว่า

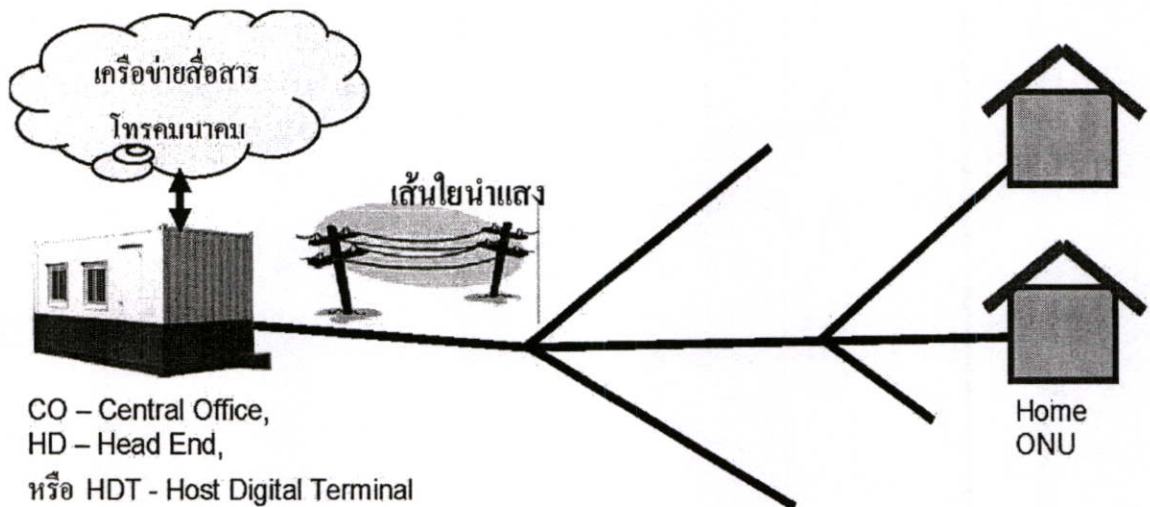
เทคโนโลยีการบีบอัดสัญญาณภาพในปัจจุบันได้พัฒนาไปมาก ตัวอย่างเช่น การบีบอัดภาพตามมาตรฐานของเทคนิค MPEG ซึ่งมีหลายระดับตั้งแต่ MPEG-1, MPEG-2, ... , MPEG-5, ... ทำให้สัญญาณภาพที่ถูกบีบอัดมีขนาดเล็กลง ในขณะที่เดียวกันคุณภาพของสัญญาณที่ได้ก็เพิ่มขึ้น ในกรณีของมาตรฐาน MPEG-2 สามารถบีบอัดสัญญาณลงมาได้เหลือเพียง 1.5 – 6 Mbps โดยที่คุณภาพของภาพ ยังเคลื่อนไหวตามเวลาจริง (Real time) อยู่ในเกณฑ์ที่ดีทีเดียว ยิ่งไปกว่านั้นในระบบของสัญญาณภาพความละเอียดสูงหรือ (HDTV – High Definition Television) ซึ่งมี ขนาดของข้อมูลดิจิทัลอยู่ที่ 1 Gbps สามารถใช้เทคโนโลยีของ MPEG บีบอัดลงได้เหลือเพียง 20 Mbps เท่านั้น !! และที่สำคัญอุปกรณ์ที่เป็นชิพ (Chip) ในการประมวลสัญญาณภาพ ก็มี ราคาถูกลง และเมื่อต้องซื้อเป็นปริมาณมากเพื่อมาใช้ในระบบ FTTH ก็ยังทำให้ต้นทุน รวมต่อ ปริมาณข้อมูลไม่แพงเลย

ระบบ FTTH เป็นระบบที่สามารถสื่อสารสัญญาณภาพที่ผ่านกระบวนการบีบอัดภาพแบบดิจิทัลดังกล่าวได้เมื่อพิจารณาความเร็วพื้นฐานของ FTTH ที่ประมาณ 100-150 Mbps แล้วจะพบว่า ช่องสัญญาณมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะสื่อสัญญาณภาพที่มีคุณภาพสูงได้อย่างสบาย หลายช่องพร้อมกัน อันจะทำให้การบริการข้อมูลเป็นไปอย่างไร้ขีดจำกัด

## โครงสร้างทางเทคนิค ของ FTTH

### 4.1 โครงสร้างพื้นฐาน

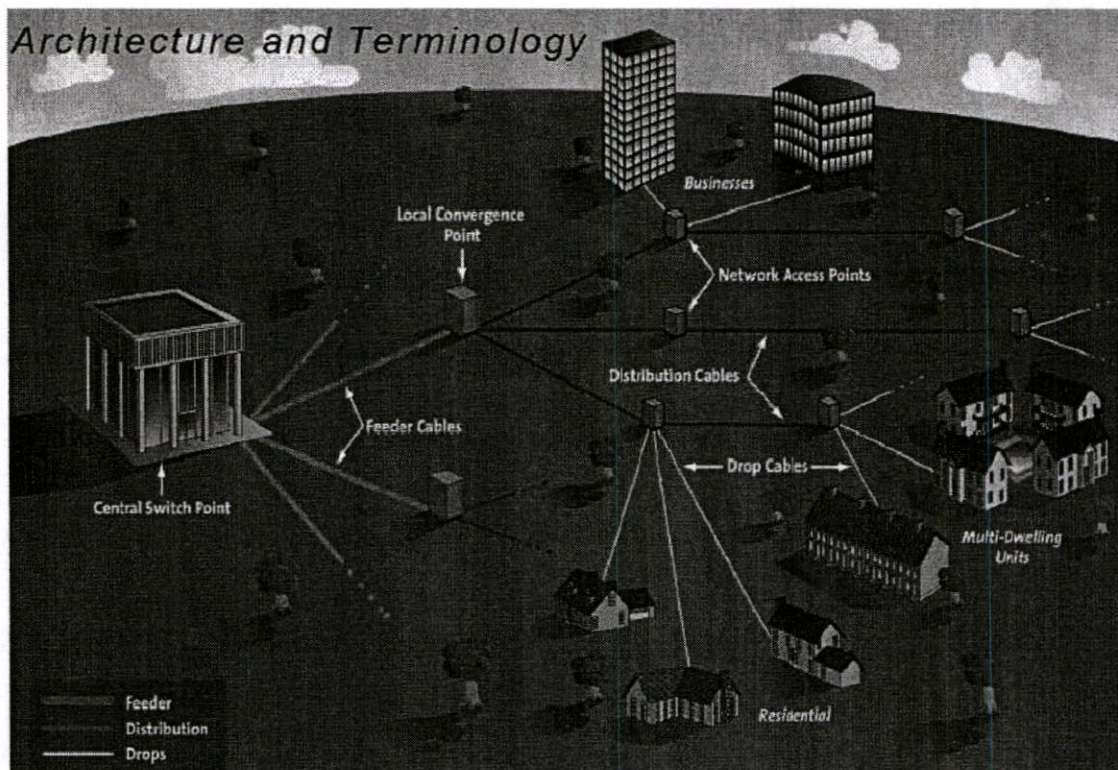
โครงสร้างทางเทคนิคพื้นฐานของระบบ FTTH แสดงดังรูปที่ 3 หากเราจินตนาการถึงเครือข่ายสื่อสาร โทรคมนาคมทั่วไป ให้นึกถึงภาพคล้ายก้อนเมฆในรูป ซึ่งหมายความว่า โครงสร้างภายในโครงข่ายจะเป็นอะไรก็ตาม เราจะไม่สนใจ (เพราะมันคงไม่ซับซ้อนมาก) รู้แต่ว่ามันสามารถทำให้ข้อมูลเดินทางจากต้นทางไปถึงปลายทางได้ก็พอ ในระบบ FTTH จะมีชุมสายที่เป็นสำนักงานกลางเรียกว่า CO (Central Office) หรือบางทีเรียกว่า HDT (Host Digital Terminal) หรือ HD (Head End) ทำหน้าที่จัดการเกี่ยวกับสัญญาณการให้บริการไปยังผู้ใช้ที่อยู่ใน เขตควบคุมของ CO อีกทั้งยังต้องทำหน้าที่เชื่อมโยงข้อมูลเข้ากับระบบสื่อสารโทรคมนาคม (กลุ่มก้อนเมฆในรูป) เพื่อรับส่งข้อมูลไปยังที่อื่นตามความต้องการของผู้ใช้



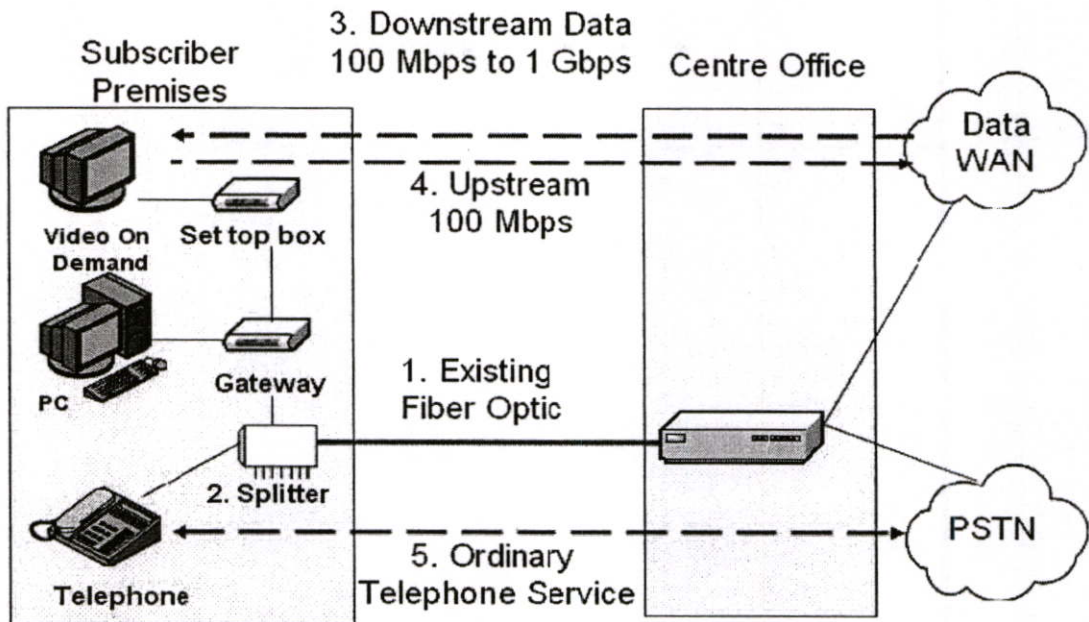
รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางเทคนิคพื้นฐานของระบบ FTTH

ภายใน CO จะประกอบด้วยอุปกรณ์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่ประมวล สัญญาณ เช่น ตัดต่อหรือสลับสาย (switching) จัดหาเส้นทางการเดินทางของข้อมูล (routing) และอื่น ๆ ตามที่ จำเป็น ระหว่าง CO กับบ้านผู้ใช้ เป็นงานข่ายสายตอนนอก ประกอบด้วย

เส้นใยนำแสงเชื่อมโยงไปยังกลุ่มบ้าน ผู้ใช้ในลักษณะของการกระจาย (distribution) ไปยังชุมชน เข้าสู่มบ้านผู้ใช้ตามลำดับ เส้นใยนำแสงที่ออกจาก CO ต้องมีความสามารถในการสื่อสารสัญญาณที่มี ปริมาณมากข้อมูลมาก ๆ ได้ ส่วนของเคเบิลเส้นใยนำแสงส่วนนี้เรียกว่า **ฟีดเดอร์ (Feeder)** (ดูรูปที่ 4.1) เส้นทางเดินของสายส่งเส้นใยนำแสงจากฟีดเดอร์จะถูกแยกออกเป็น เส้นทางย่อยเพื่อส่งข้อมูล ไปยังชุมชนต่าง ๆ ส่วนของเคเบิลเส้นใยนำแสงส่วนนี้เรียกว่า **ดิสทริบิวชัน (Distribution)** ในแต่ละ ชุมชนหรือกลุ่มผู้ใช้ปลายทาง จะมีตัวแยกข้อมูลส่งผ่านสายส่งเส้นใยนำแสงไปแต่ละบ้าน โดยเฉพาะ ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่าการเข้าถึงหรือ **แอกเซส (access)** และสายเคเบิลเส้นใยนำแสงใน ส่วนของ access นี้จะถูกเรียกว่าเป็น **drop cable** (ในทำนองเดียวกับระบบโทรศัพท์สายทองแดง) คำนปลายของ เส้นใยนำแสงที่เข้าไปยังบ้านผู้ใช้ จะต่อ เข้ากับอุปกรณ์ที่เรียกว่า **ONU (Optical Network Unit)** หรือบางคน เรียกว่า **ONT (Optical Network Termination)** เพื่อทำหน้าที่กระจาย สัญญาณทั้งในรูปแบบของสัญญาณแสง และไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ใช้งาน ซึ่งอาจเป็น โทรศัพท์ โทรทัศน์ โทรสาร หรือ เครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ทั้งนี้จำนวนอุปกรณ์ใช้งานในบ้านของผู้ใช้อาจมีได้ มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ ขึ้นกับปริมาณข้อมูล(ความเร็ว)ที่ใช้บริการ (จ่ายเงินมากก็ได้ข้อมูลมาก) และ รูปแบบการให้บริการของผู้ให้บริการ (Operator)



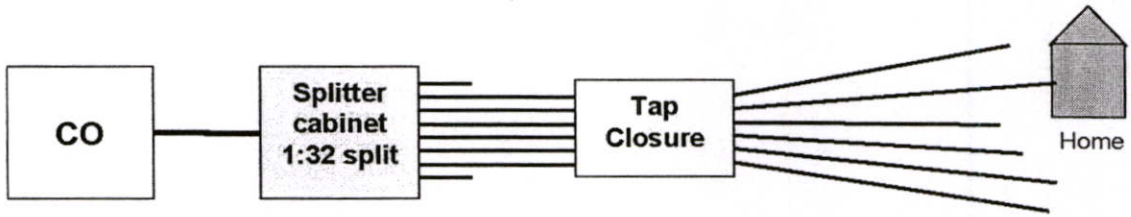
รูปที่ 4.2 รายละเอียดโครงสร้างของ FTTH



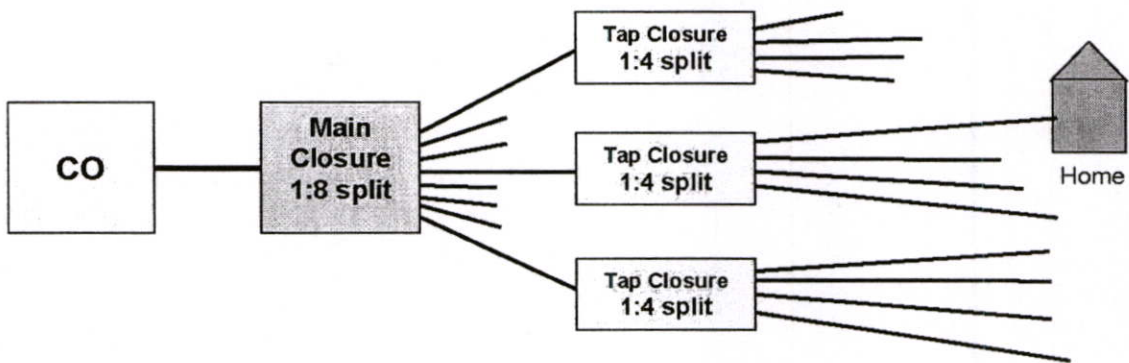
รูปที่ 4.3 โครงสร้างการเชื่อมต่อของระบบ FTTH

รูปแบบการส่งสัญญาณระหว่าง CO ไปยัง ONU ในบ้านผู้ใช้และการกระจายสัญญาณข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องยกเลิกสายโทรศัพท์เดิมก็ได้ เพราะระบบโทรศัพท์เดิมที่ข้อมูลวิ่งอยู่บนเครือข่าย พื้นฐาน PSTN (Public Switching Telephone Network) ก็ยังคงทำงานตามปกติ แม้ว่า CO ของ FTTH จะมี การให้บริการโทรศัพท์ก็ตาม อุปกรณ์ ONU ภายในบ้าน อาจประกอบด้วยส่วนของตัวแยกสัญญาณและอุปกรณ์ ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมกับการต่อเชื่อมเครื่องใช้ไฟฟ้าปลายทาง (เช่น โทรทัศน์ หรือ คอมพิวเตอร์) เพื่อให้เครื่องใช้ไฟฟ้านั้นทำงานได้อย่างถูกต้อง โดยปกติ การสื่อสารข้อมูลจาก CO ถึงบ้านผู้ใช้ซึ่งถือเป็นการสื่อสาร ข้อมูล ขาลง (downstream) และจากบ้านผู้ใช้ไปยัง CO ซึ่งถือเป็นการสื่อสารข้อมูลขาขึ้น (upstream) มักมี ค่า ความเร็วแตกต่างกัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.3 ที่แสดงถึงระบบที่มีความเร็วข้อมูลขาลง (downstream) เปลี่ยนแปลง ได้ระหว่าง 100 Mbps – 1 Gbps ในขณะที่ความเร็วข้อมูลขาขึ้น (upstream) มีค่าไม่เกิน 100 Mbps นอกจากนี้ระบบ FTTH ยังสามารถกำหนดให้ความยาวคลื่นแสงที่เป็นคลื่นพาห์ (carrier) ระหว่างการส่งข้อมูลขาลง (downstream) และขาขึ้น (upstream) มีความแตกต่างกัน หรือใช้ความยาวคลื่นเดียวกันได้

## 4.2 รูปแบบการเชื่อมโยงสายส่งสัญญาณ



รูปที่ 4.4 การแยกสายส่งสัญญาณแบบศูนย์กลาง (Centralized Splitting)



รูปที่ 4.5 การแยกสายส่งสัญญาณแบบกระจาย (Distributed Splitting)

โครงสร้างพื้นฐานสำคัญของระบบ FTTH เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงเส้นใยนำแสงจาก CO ไปยังบ้านผู้ใช้ซึ่งระบบ FTTH มีจำนวนบ้านผู้ใช้เพิ่มขึ้นเท่าไร ก็จำเป็นต้องเชื่อมโยงเส้นใยนำแสงมากขึ้นเท่านั้น รูปแบบการเดินสายส่งสัญญาณจาก CO ไปยังบ้านผู้ใช้ มีลักษณะเป็นแบบ point-to-multipoint network (PTMPN) ซึ่งในระบบ FTTH สามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบรวมศูนย์กลาง (Centralized Splitting) และ แบบกระจาย (Distributed Splitting) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ใน ลักษณะของการเดินสายส่งแบบรวมศูนย์กลาง ระบบการแยกสายไปยังชุมชนต่าง ๆ จะถูกแยกไปในลักษณะ 1 สาย ต่อ 1 ชุมชน และเมื่อไปถึงชุมชนต่าง ๆ เส้นใยนำแสงจะถูกแบ่งแยกเข้าไปยังบ้านผู้เช่าอีกทีหนึ่ง เครือข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (Passive Optical Network) ที่ใช้ในระบบ FTTH อาจแบ่งแยกเป็นกลุ่มย่อยได้อีก ตามลักษณะของตัวแยกแสง (splitter) ที่ใช้ เช่นระบบ PON ทั่วไป อาจใช้ตัวแยกแสงชนิด 1:4 หรือ 1:8 ระบบ EPON ใช้ตัวแยกชนิด 1:16 ในขณะที่ระบบ BPON ใช้ตัวแยกชนิด 1:32 โดยที่ระบบสามารถทำงานได้กับความยาวคลื่น แสงสูงสุดถึง 3 ความยาวคลื่น (1490 nm และ 1310 nm สำหรับข้อมูลเสียงและข้อมูลดิจิทัลที่เป็น data และ 1550 สำหรับข้อ

มุลภาพ) ที่ความเร็วสูงสุดประมาณ 622 Mbps ปัจจุบัน เริ่มมีผู้ผลิตหลายรายพัฒนาระบบ GPON ขึ้นมา สำหรับทำงานกับตัวแยกแสง (splitter) ชนิด 1:64 ทั้งนี้ระบบ GPON ถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณสูงขึ้น มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงถึง 2.4 Gbps อีกทั้งยังสามารถให้บริการไปยัง บ้านผู้ใช้ที่อยู่ห่างไกลจาก CO ได้มากกว่า 30 กิโลเมตรได้

การเดินสายส่งแบบรวมศูนย์กลาง (Centralized Splitting) มีข้อดี ดังนี้

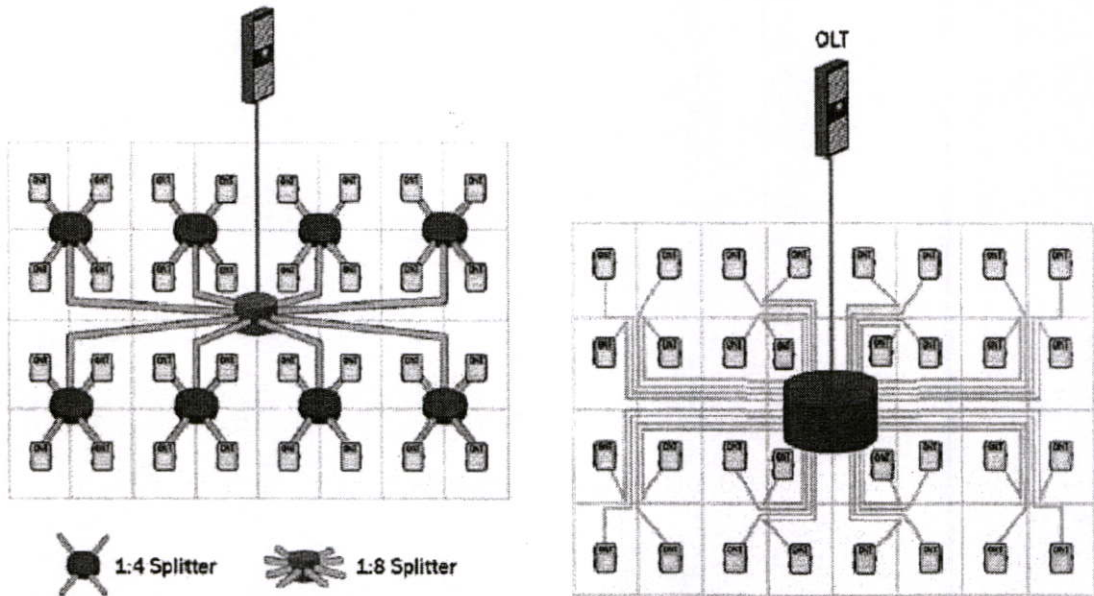
- การทดสอบเครือข่ายเส้นใยนำแสงทำได้โดยง่าย
- การเปลี่ยนแปลงไปใช้ตัวแยกสัญญาณที่มีมีอัตราส่วนการแยกมากขึ้น
- มักจะใช้เป็นระบบพื้นฐานก่อนที่จะเปลี่ยนไปเป็นระบบอื่นในอนาคต
- การเดินสายส่งแบบการกระจาย (Distributed Splitting) มีข้อดีดังนี้
- ใช้เคเบิลเส้นใยนำแสงน้อยกว่า ทำให้มีต้นทุนในการดำเนินการที่ต่ำกว่า
- ค่าใช้จ่ายในส่วนของตู้แยก (cabinet) จะถูกกว่า เพราะส่วนใหญ่ตู้แยกจะมีขนาดเล็ก อีกทั้งยัง
- สามารถใช้การเชื่อมต่อแบบสไปลิตส์ (splice) ที่หัวต่อ (closure) ซึ่งมีราคาถูก ในตู้แยกได้

อย่างไรก็ตาม การเชื่อมโยงสายส่งด้วยรูปแบบการกระจาย (Distributed Splitting) มีข้อด้อยตรงที่การ ทดสอบเครือข่ายมีต้นทุนเพิ่มขึ้น ทำให้การใช้งานโครงข่ายในอนาคตขาดความยืดหยุ่น ดังนั้น ผู้ให้บริการส่วนใหญ่จึงมักเลือกใช้รูปแบบของการเดินสายแบบรวมศูนย์กลาง (Centralized Splitting) ในเครือข่าย FTTH แม้ว่า ราคาในการติดตั้งจะสูงกว่าก็ตาม

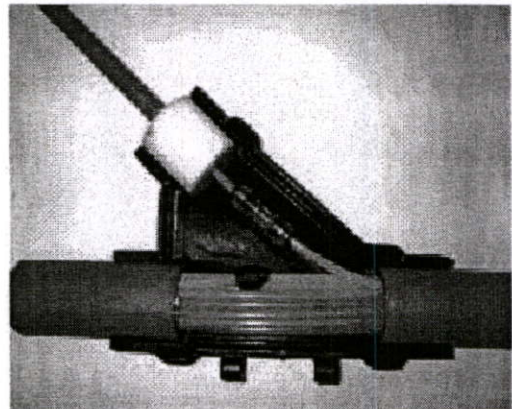
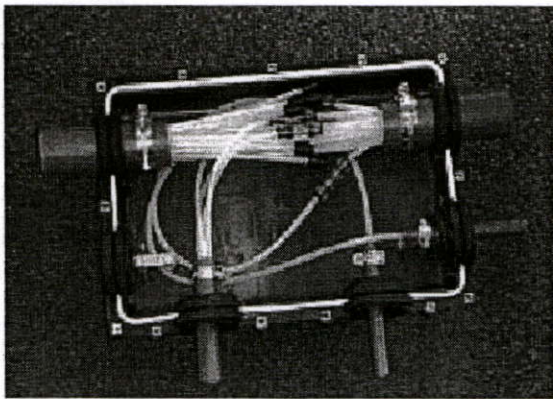
รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายเชื่อมโยงของเคเบิลเส้นใยนำแสงทั้ง 2 รูปแบบเปรียบเทียบ กัน ภาพด้านซ้ายแสดงรูปแบบการแยกเส้นทางสายส่งแบบกระจาย (Distributed Splitting) ที่ใช้ตัวแยกแสงชนิด

1:8 และ 1:4 ต่อเรียงลำดับกันไป (คล้ายแบบ cascade) ในขณะที่ภาพด้านขวาแสดงรูปแบบการ

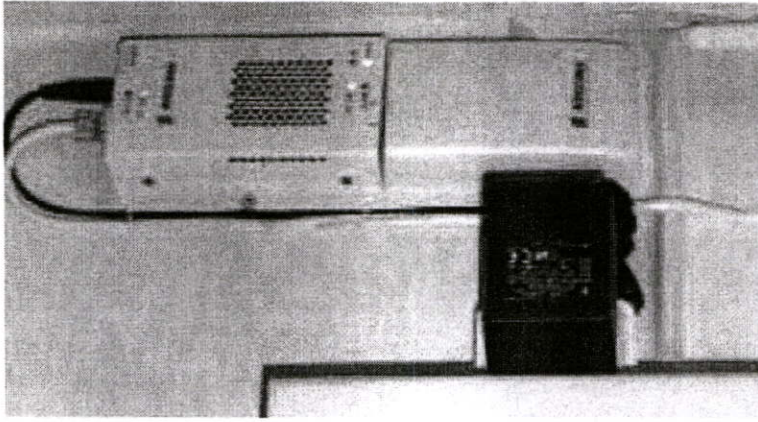
รวมศูนย์กลาง เพื่อแยกเส้นทางไปยังบ้านผู้ใช้ (Centralized Splitting) โดยใช้ตัวแยกแสง (splitter) ชนิด 1x32 เพียงตัวเดียว จะ เห็นว่าระบบมีความยุ่งยากน้อยกว่าแต่ต้องใช้เคเบิลเส้นใยนำแสงมากกว่า (หมายเหตุ OLT ในรูปที่ 11 หมายถึง Optical Line Termination) ส่วนรูปที่ 13 แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์ในส่วนต่าง ๆ ในระบบสายส่งของ FTTH



รูปที่ 4.6 การเชื่อมโยงแบบกระจาย (ซ้าย) และแบบรวมศูนย์กลาง (ขวา) เพื่อแยกเส้นทางไปยังผู้ใช้



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการเชื่อมสาย จากอุปกรณ์จริงที่มีการใช้งานอยู่



รูปที่ 4.8 ภาพตัวอย่างอุปกรณ์ ONU ภายในอาคาร

### 4.3 เครื่องข่าย PON สำหรับ FTTH

ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้นว่า ระบบ FTTH ใช้เครือข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟหรือ PON (Passive Optical Network) ที่สามารถให้บริการกับผู้ใช้ที่อยู่ห่างออกไปตั้งแต่ไม่กี่ร้อยเมตรไปจนถึงหลายกิโลเมตรได้ ดัง รายละเอียดได้แสดงไว้สำหรับ PON แบบต่าง ๆ ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดของ PON แบบต่างๆ

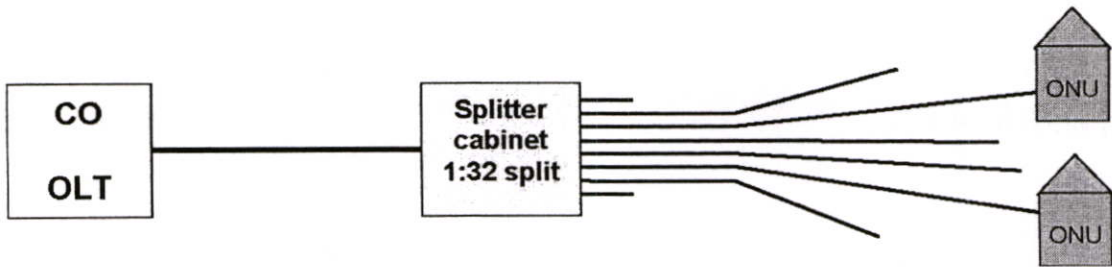
ชนิด และ โปรโตคอล	ความเร็ว และ ระยะทาง	สัดส่วน การ แยก แสง	มาตรฐานที่ใช้	Power Budget	ชนิดของ เส้นใยนำแสง
<b>BPON</b> Broadband Passive Optical Network ATM	622 or 155 Mbps Downstream 1490 nm 155 Mbps upstream 1310 nm 20 km (max)	1:32 (max)	ITU G.983.3 2001	Class A Optics 20 dB	SMF ITU G.652c/d (low or zero water peak) ITU G.652 (std. SMF)

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

<b>GPON</b>	2.488 or 1.244 Gbps downstream Passive Optical Network ATM or Ethernet 60 km (max)	1:64 (max)	ITU G.984.2	Class A Optics 20 dB Class B Optics 25 dB Class C Optics 30 dB	SMF ITU G.652c/d (low or zero water peak) ITU G.652 (std SMF)
<b>EPON</b>	1.25 Gbps downstream(D) and upstream(U) 1000BASEPX10 10km 1000BASEPX20 20 km.	1:16 (nominal) 1:32 (permitted)	IEEE802.3ah	PX-10U 23dB PX-10D 21dB PX-20U 26dB PX-20D 26dB	SMF ITU G.652c/d (low or zero water peak) ITU G.652 (std SMF)

#### 4.4 แนวทางการทดสอบระบบสายส่ง FTTH

ระบบเครือข่าย FTTH ที่ติดตั้งเสร็จแล้ว จำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าระบบสามารถทำงานได้ที่ออกแบบไว้ การทดสอบเครือข่าย FTTH มีรูปแบบในทำนองเดียวกับการทดสอบระบบสายส่งเส้นใยนำแสงทั่วไป เนื่องจากระบบ FTTH เป็นเทคโนโลยีค่อนข้างใหม่ในเมืองไทย หัวข้อนี้จึงขอแนะนำหลักการเบื้องต้นในการทดสอบระบบสายส่ง FTTH ที่มีโครงสร้างอย่างง่ายดังรูปที่ 9 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำงานต่อไป



รูปที่ 4.9 เครือข่ายเคเบิลเส้นใยนำแสงอย่างง่ายของระบบ FTTH

- Step 1) verify total loss budget
- Step 2) Link Characterization
- Step 3) Couplers and splice Characterization
- Step 4) End-to-end loss & back reflection testing
- Step 5) OLT and ONUs turn-up

สมมุติเรามีระบบเครือข่าย FTTH แบบง่ายไม่ซับซ้อนดังรูปที่ 4.9 ขั้นตอนการทดสอบระบบเครือข่าย เชื่อมโยง อาจเป็นดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** ตรวจสอบค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบสายส่ง (Total budget) จาก CO ไปยัง ONU ที่ บ้านของผู้เช่าแต่ละรายว่าเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ ทั้งนี้การทดสอบต้องเริ่มจากการทดสอบอุปกรณ์แต่ละตัวที่นำมาใช้ในเส้นทางเชื่อมโยงก่อนดำเนินการติดตั้งเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น

- ระบบ PON class-B ควรมีค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบสายส่งไม่เกิน 25 dB ในขณะที่ระบบ PON class-C มีค่าไม่เกิน 30 dB เป็นต้น
- ค่าการสูญเสียสัญญาณที่ตัวแยกแสง มักเป็นส่วนหลักที่ทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณในระบบตัวอย่าง เช่น ตัวแยกแสงชนิด 1:32 ควรมีค่าการสูญเสียสัญญาณไม่เกิน 16 dB
- สำหรับคัปเปอร์ WDM ควรมีการลดทอนประมาณ 0.7 – 1 dB ค่าการสูญเสียสัญญาณรวมทั้งหมดของหัว ต่อ (connector) และการเชื่อมต่อแบบสไปลซ์ (splice) ในระบบสายส่งควรมีค่าประมาณ 2-3 dB
- ค่าการลดทอนสัญญาณแสงของเส้นใยนำแสงมีค่าขึ้นกับความยาวคลื่นที่ใช้และค่าความยาวรวม

ของสายส่ง (เช่น 0.33 dB/km @ 1310nm) ซึ่งจะส่งผลให้สายส่งในระบบ FTTH โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 4-20 กิโลเมตร

- หากมีการสื่อสารสัญญาณภาพแบบแอนะล็อก ต้องคำนึงถึงค่าการลดทอนสัญญาณ การสะท้อนแสงตอนปลายเส้นบปลายเส้นใยแก้วนำแสง และค่าระยะสูงสุดระหว่างต้นกับปลายทางเป็นพิเศษ โดยทั่วไป ค่าลดทอน ณ จุดที่ ONT ควรมีค่าประมาณ 3-5 dB
- ค่าการลดทอนสูงสุดที่เกิดขึ้นจริงในระบบสายส่ง ต้องมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังงานสูญเสียสูงสุด (Loss budget หรือ power budget) ที่ได้ออกแบบไว้

**ขั้นตอนที่ 2** ตรวจสอบคุณสมบัติของสายเชื่อมโยงแต่ละเส้น ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 9 สายเชื่อมโยงจาก OC ไปสู่บ้านผู้เช่า 1 หลังประกอบด้วยสายเชื่อมโยง (link) 2 เส้น ในขณะเดียวกันก็ต้องพิจารณาว่า เส้นทางแต่ละประกอบด้วยสายเคเบิลที่เส้นนำมาเชื่อมต่อกัน (สำหรับระยะทางที่ยาวกว่าความยาวเคเบิลที่ถูกผลิต) จากนั้นจึงทำการตรวจสอบคุณสมบัติ ของเส้นใยนำแสง แต่ละเส้นทุกเส้นที่นำมาใช้ ขั้นตอนนี้เป็น การ ตรวจสอบเส้นใยนำแสงที่นำมาใช้ในระบบ FTTH ว่ามีค่าการลดทอนสัญญาณเป็นไปตามที่กำหนดหรือไม่ การทดสอบอาจใช้โอทีดีอาร์ (OTDR) ตรวจสอบกับสายเคเบิลแต่ละเส้นในขณะที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อใดๆ ในระบบเครือข่ายเลย

ตัวอย่างเช่น ระบบ PON ที่เลือกใช้เคเบิลเส้นใยนำแสงตามมาตรฐาน G.652C ค่าการลดทอนสัญญาณที่ตรวจสอบด้วย OTDR ควรมีค่าประมาณ 0.33 dB/km @ 1310 nm, 0.21 dB/km @ 1490 nm และ 0.19 dB/km @ 1550 nm เป็นต้น

- การพิจารณาตรวจสอบขนาดของคอร์ของเส้นใยแก้ว (เช่นค่ามากที่สุดและน้อยสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ตามสเป็ก) ก็ช่วยให้เกิดความมั่นใจได้ว่า การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วสามารถกระทำได้โดยมีค่าลดทอนต่ำที่สุด
- หากสามารถทำการทดสอบเมื่อเคเบิลเส้นใยนำแสงถูกจัดวางในเส้นทางที่กำหนดก่อนเชื่อมต่อ จะทำให้ทราบเงื่อนไขในการทำงานได้ดียิ่งขึ้น เพราะในการติดตั้ง บางครั้งอาจทำให้เคเบิลเส้นใยนำแสงมี ค่าการโค้งงอไม่เป็นไปตามสเป็ก อีกทั้งบางกรณีอาจทำให้เกิด Micro bending ซึ่งเหล่านี้ล้วนทำให้ เกิดค่าการลดทอนสัญญาณเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไป ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจาก Micro bending มักมีค่า เมื่อใช้ความยาวคลื่นแสงที่มากขึ้น

**ขั้นตอนที่ 3** ตรวจสอบคุณสมบัติของจุดเชื่อมต่อและจุดแยกสาย หลังจากทำการเชื่อมต่อปลายสาย เส้นใยนำแสงที่เดินมาจาก CO เข้ากับคัปเปิลอร์ที่ทำหน้าที่แยกสายแล้ว ควรทำการทดสอบค่าการสูญเสีย สัญญาณและค่าการสะท้อนกลับ (Back reflection) ที่จุดเชื่อมต่อนี้ด้วย OTDR เพื่อให้แน่ใจว่า เป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ผลิตในขั้นตอนที่ 1 ที่แต่ละเส้นทางขาออกของตัวแยกแสงที่ค่าความยาวคลื่น 1310, 1490, และ 1550 นาโนเมตร เทคนิคการตรวจวัดที่สำคัญต้องตั้งค่าการป้อนแสงของ OTDR ให้ สามารถแสดงคุณสมบัติของตัวแยกแสงได้ มิฉะนั้นค่าการสูญเสียสัญญาณของตัวแยกแสงอาจอยู่ใน ช่วง Dead zone ของ OTDR ซึ่งทำให้ไม่สามารถมองเห็นค่าที่ต้องการได้อีกทั้งบางคนที่ไม่เข้าใจการทำงานของ OTDR อาจคิดว่าไม่มีค่าการสูญเสียสัญญาณเกิดขึ้นที่ตัวแยกแสงอันจะทำให้การติดตั้งและทดสอบมีความผิดพลาดได้

- ค่าการสะท้อนกลับ (back reflection) ของสัญญาณแสงที่จุดเชื่อมต่อของคัปเปิลอร์หรือตัวแยกแสง ควรค่าประมาณ -35 dB หรือดีกว่านี้ ตามมาตรฐานของ ITU-T G.983.1

**ขั้นตอนที่ 4** หลังจากทำการเชื่อมโยงเส้นใยนำแสงเข้ากับเส้นทางขาออกของตัวแยกแสง และเชื่อมโยง เส้นใยนำแสงเข้ากับ ONU ที่บ้านผู้ใช้แล้ว ต้องทำการทดสอบค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นจริงใน ระบบสายส่ง และในแต่ละส่วนย่อยในระบบ รวมถึงค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณแสง (back reflection) ทั้งหมดภายในระบบจาก CO ไปยัง ONU ที่บ้านของผู้ใช้แต่ละราย (end-to-end testing) ว่าเป็นไปตามที่ กำหนดไว้หรือไม่ การทดสอบจะต้องกระทำทั้งสองด้านจาก CO มองเข้าไปในสายส่ง และจาก ONU มอง ย้อนกลับไปหา CO ที่ความยาวคลื่น 1310, 1490, และ 1550 นาโนเมตร (nm)

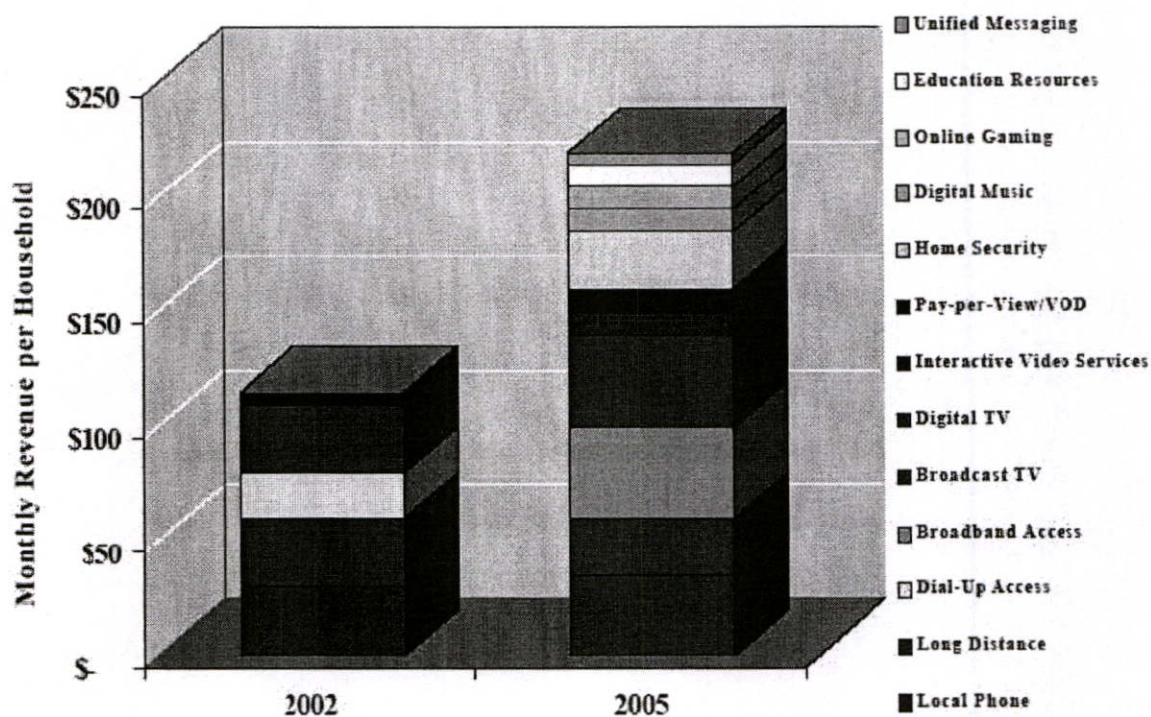
- ค่าการสูญเสียสัญญาณรวมทั้งหมดในระบบ PON Class-B ต้องมีค่าไม่เกิน 25 dB
- ค่าการสูญเสียสัญญาณรวมทั้งหมดในระบบ PON Class-C ต้องมีค่าไม่เกิน 30 dB
- อย่าลืมว่าการใช้ OTDR เพื่อวัดค่าการสูญเสียสัญญาณของคัปเปิลอร์และตัวแยกแสง ต้องปรับค่า เริ่มต้นของ OTDR ให้สามารถวัดค่าต่าง ๆ ที่ต้องการได้ นอกจากนี้การใช้ OTDR ยังช่วยให้เรา ตรวจสอบระยะทางของระบบในแต่ละส่วนได้อีกด้วย

- ค่าการสะท้อนกลับ (Back reflection) ในแต่ละจุดควรมีค่าเป็นไปตามที่กำหนด โดยทั่วไป เมื่อมีการ ติดตั้งอุปกรณ์ใหม่ถ้ามีค่า  $-40$  dB ถือว่าดีมาก อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้ระหว่าง  $-30$  ถึง  $-35$  dB ถือว่าใช้ได้แต่ถ้ามีค่าต่ำกว่า  $30$  dB ควรทำการแก้ไข
- ค่าการสูญเสียสัญญาณ ณ จุดเชื่อมต่อแบบสไปลซ์ (splice) ควรมีค่าต่ำกว่า  $0.1$  dB

**ขั้นตอนที่ 5** หลังจากทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของเครือข่ายแล้ว ควรทำการตรวจสอบค่ากำลังงาน แสงที่ตอนปลายของเส้นใยนำแสงก่อนส่งผ่านไปที่ ONU/ONT ให้มีค่าเป็นไปตามที่กำหนด โดยทั่วไปมัก ออกแบบให้มีค่า  $+4$  dBm ก่อนส่งเข้า ONU ทั้งนี้ต้องทำการทดสอบในทุกค่าความยาวคลื่นคือ 1310/1490/1550 นาโนเมตร

#### 4.5 การให้บริการผ่านระบบ FTTH

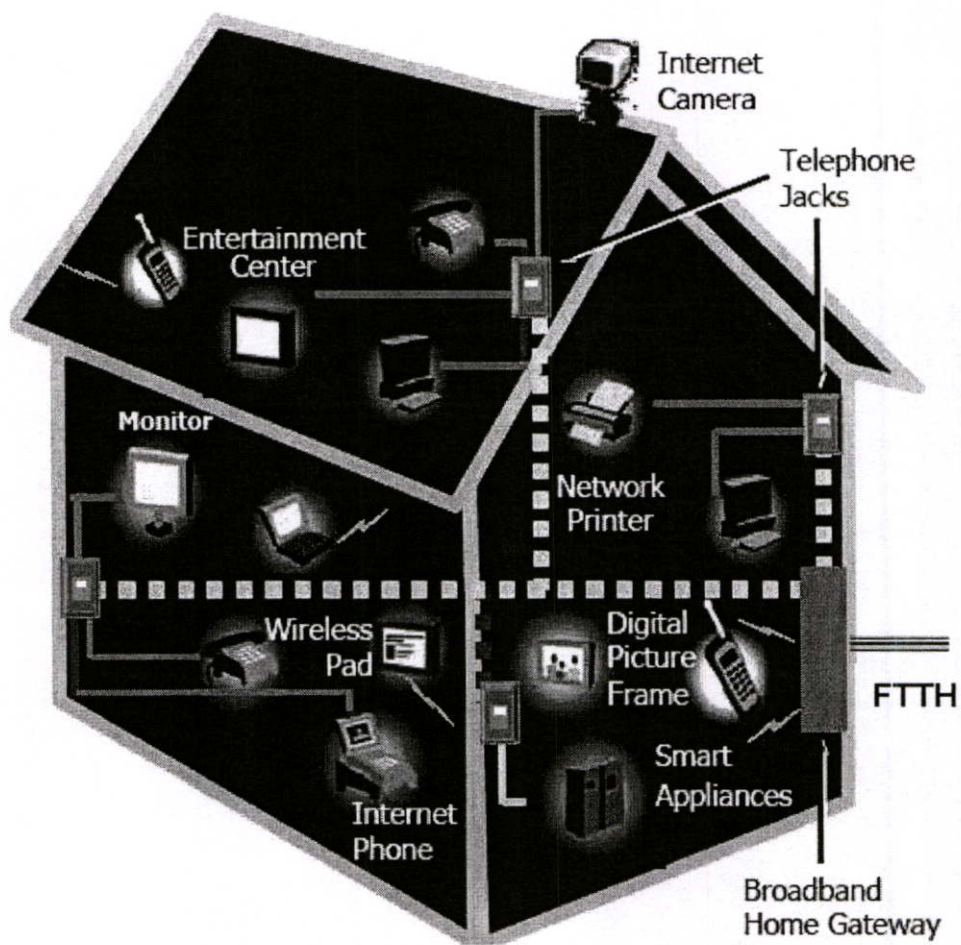
การที่ระบบ FTTH ใช้เครือข่ายเส้นใยนำแสงต่อเชื่อมโยงเข้าสู่บ้านผู้ใช้โดยตรง ทำให้ข้อมูลที่มีขนาดใหญ่สามารถเดินทางมาถึงผู้ใช้ด้วยความเร็วสูง ในยุคแรกของการสื่อสารโทรคมนาคม การสื่อสารจะทำรายได้จากการสนทนาผ่านระบบโทรศัพท์ ต่อมานักธุรกิจเริ่มเห็นความสำคัญของระบบสื่อสารมากกว่าที่จะใช้เพียงแค่การติดต่อสื่อสาร โดยถือเป็นเครื่องมือเชิงกลยุทธ์ที่สำคัญ ที่ช่วยทำรายได้ให้กับภาคธุรกิจมากขึ้น จากจุดนั้นเป็นเหตุให้เกิดรูปแบบในการให้บริการแบบต่าง ๆ ทั้งรูปแบบทางเทคนิคและรูปแบบของเนื้อหาข้อมูลให้บริการ ยิ่ง ระบบสื่อสารโทรคมนาคมพัฒนาถึงขั้นไร้พรมแดนด้วยระบบสื่อสารสัญญาณความเร็วสูง ยิ่งทำให้ธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีสื่อสารโทรคมนาคมมีสีสันมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.10 กราฟแท่ง รายได้เกิดจากการทำธุรกิจบนเครือข่าย FTTH ในเขตพื้นที่หนึ่งของอเมริกา

รูปที่ 4.10 แสดงสัดส่วนรายได้ที่เกิดจากการทำธุรกิจบนเครือข่าย FTTH ในเขตพื้นที่บางแห่งในอเมริกา จะเห็นว่าในปี 2005 สัดส่วนรายได้มีมากขึ้นจากปี 2002 อีกเกือบเท่าตัว โดยที่รูปแบบของการให้บริการมีหลากหลายมากขึ้น ตัวอย่างเช่น

- การให้บริการ โทรศัพท์ท้องถิ่น และ โทรศัพท์ทางไกล
- การให้บริการข้อมูลชนิดบรอดแบนด์ รวมทั้งการให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง ซึ่งถือเป็นจุดขายหลัก ในปัจจุบัน
- การแพร่สัญญาณภาพ ไปยังสมาชิกเช่นเดียวกับระบบเคเบิลทีวี
- การให้บริการ โทรทัศน์แบบดิจิทัล (digital TV) ซึ่งมีคุณสมบัติของภาพและเสียงดีกว่าระบบแอนะล็อกในปัจจุบันมาก
- การให้บริการ Video on demand หรือ pay per view โดยที่ลูกค้าสามารถเลือกดูภาพยนตร์ที่ต้องการ ได้ ตามเวลาที่ต้องการ
- การให้บริการระบบความปลอดภัยภายในบ้านพักอาศัย (Home Security) โดยการใช้อุปกรณ์ที่ตรวจจับสัญญาณภาพภายในยังศูนย์บริการที่อยู่ห่างไกลออกไป ซึ่งมีเจ้าหน้าที่คอย ตรวจสอบความผิดปกติอยู่ตลอดเวลา ช่วยเจ้าของบ้านอุ่นใจในปลอดภัยมากขึ้น
- การให้บริการเพลงแบบดิจิทัล (Digital music) - ปัจจุบันคุณภาพเสียงที่ดี สามารถส่งผ่านระหว่าง ผู้สนใจในดนตรีผ่านระบบอินเทอร์เน็ต อย่างไรก็ตาม การสื่อสารผ่านระบบ FTTH ย่อมทำให้ได้คุณภาพ เสียงดียิ่งขึ้นไปอีก
- เกมออนไลน์ (Game online) เป็นบริการอีกรูปแบบหนึ่งที่กำลังมาแรง สามารถทำรายได้สูงมากหาก เกมสื่อนั้นได้รับความนิยมในหมู่นักจำนวนมาก
- การให้บริการในส่วนของระบบการศึกษา ไม่ว่าจะเป็นแหล่งข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต หรือระบบ e-learning ช่วยให้การเข้าถึงข้อมูลมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังทำให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเองอีกด้วย
- ระบบการแพทย์ทางไกล (Tele-medicine) ช่วยให้การวินิจฉัยโรค และการรักษาเบื้องต้นสามารถกระทำแม้ว่าผู้ป่วยและแพทย์ผู้เชี่ยวชาญ จะอยู่ห่างไกลกัน

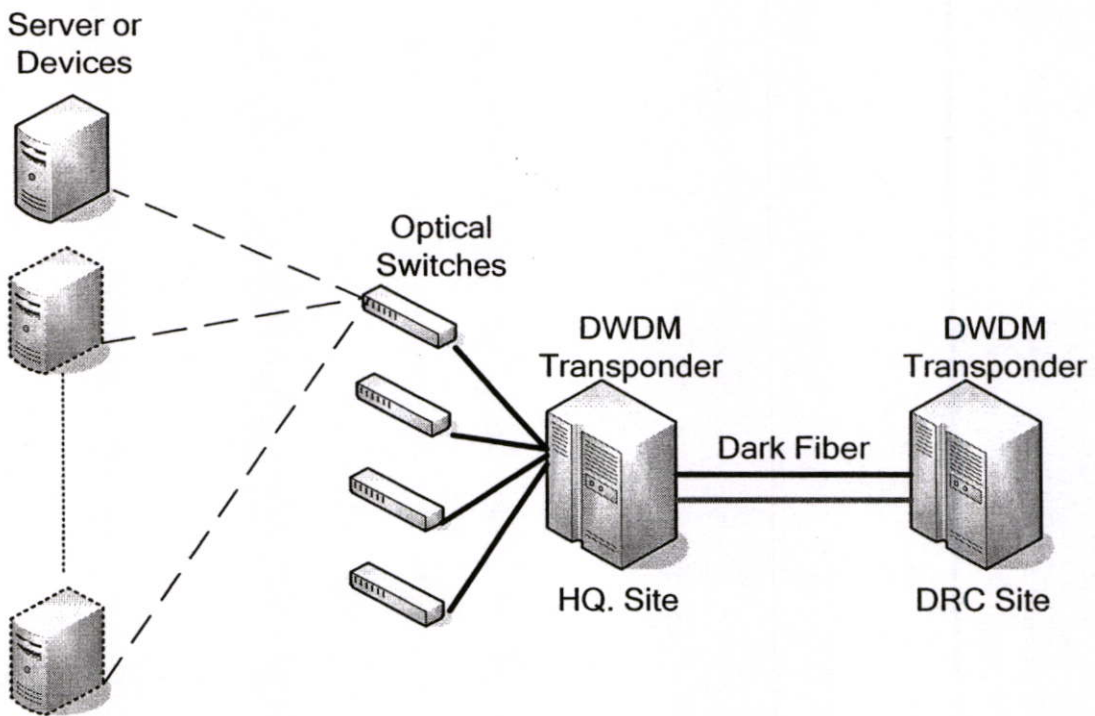


รูปที่ 4.11 แสดงความสามารถของระบบ FTTH ที่ใช้ได้ในบ้านเรือนของผู้ใช้งาน

## บทที่ 5

# การสร้าง FTTH ในโครงข่ายพื้นฐาน

การสร้าง FTTH ในรายงานฉบับนี้ เป็นการจำลองระบบขึ้นมาโดยการ ใช้ระบบ ไฟเบอร์ ออปติก และ ระบบเมนเฟรม ของ ศูนย์คอมพิวเตอร์ของ บริษัทแห่งหนึ่ง เพื่อใช้แทนอุปกรณ์ ไฟเบอร์ออปติกที่จะต้องใช้ในการสร้าง ระบบจำลองขึ้นมา ดังรูปที่ 5.1



Optical Network Diagram of a company

รูปที่ 5.1 แสดงแผนผังอย่างง่ายของ ระบบใยแก้วนำแสงของ ธนาคาร แห่งหนึ่ง

โดยที่ การทดสอบจะต้องใช้อุปกรณ์ทางแสง จากทั้งสองศูนย์ที่เชื่อมโยงกัน ทั้งศูนย์ สำนักงานใหญ่ (Head Quarter Site) และศูนย์สำรองฉุกเฉิน (Disaster Recovery Site) หรือ DRC Site ซึ่งเราให้ ตัวส่ง DWDM (DWDM Transponder) ที่ทั้งสองศูนย์นั้น แทน Central Unit (CO) ของแต่ละ ผู้ให้บริการ (Provider)

โดยให้ ผู้ให้บริการแรกเป็น Provider A และผู้ให้บริการที่สองเป็น Provider B ให้ Optical Switch แทน โหนดส่งผ่านข้อมูล (Remote Node หรือ RN) และให้ เซิร์ฟเวอร์ แทน ผู้ใช้ (Users) แสดงระบบจำลองที่กำหนดตัวอุปกรณ์แทนเรียบร้อยแล้ว เป็นดังรูปที่ 5.2

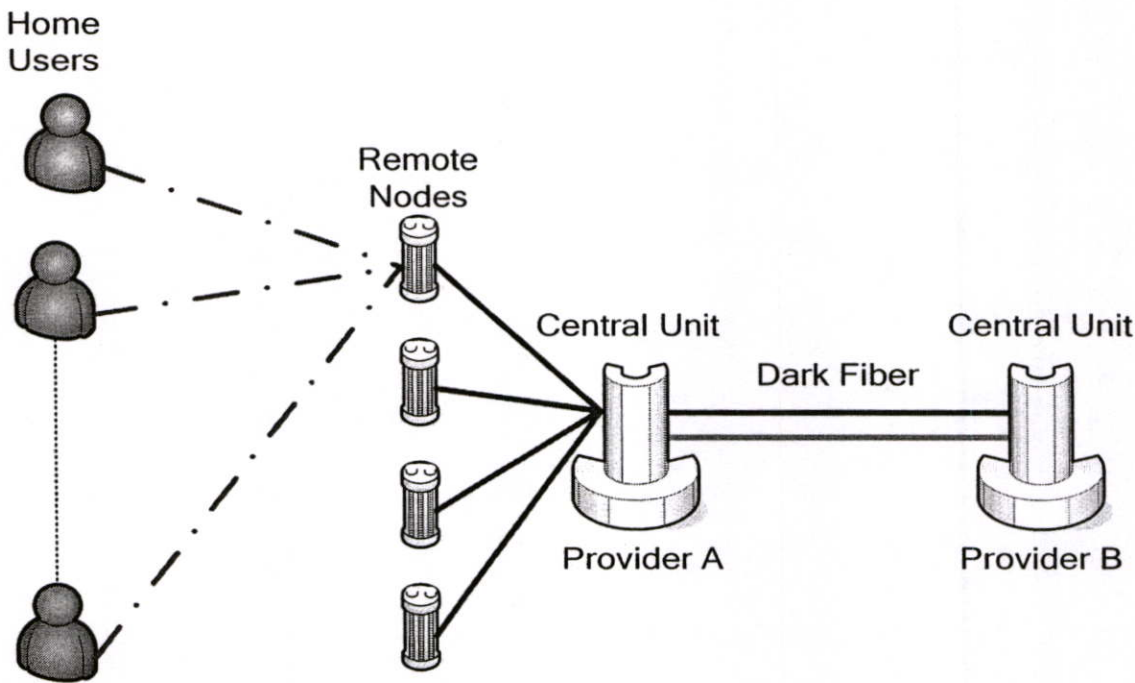


Diagram of Reproduction FTTH Network

รูปที่ 5.2 แสดงระบบ FTTH แบบจำลองที่ผ่านการแทนอุปกรณ์แล้วจากระบบต้นแบบ

เหตุที่ใช้ ระบบนี้ เป็นระบบที่จะทำการทดสอบ ก็เพราะ เราสามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่า เราจะใช้อุปกรณ์อะไร แทนอุปกรณ์อะไร อีกทั้ง การส่งข้อมูลในระบบนี้มีมากอยู่แล้ว เราจึงนำ ข้อมูลนั้นมาทำการวัดค่า และวิเคราะห์ได้ไม่ยาก

## บทที่ 6

# การทดลอง สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 6.1 การทดลองที่ 1

การทดลองในการส่งข้อมูลผ่านระบบที่ได้ออกแบบไว้

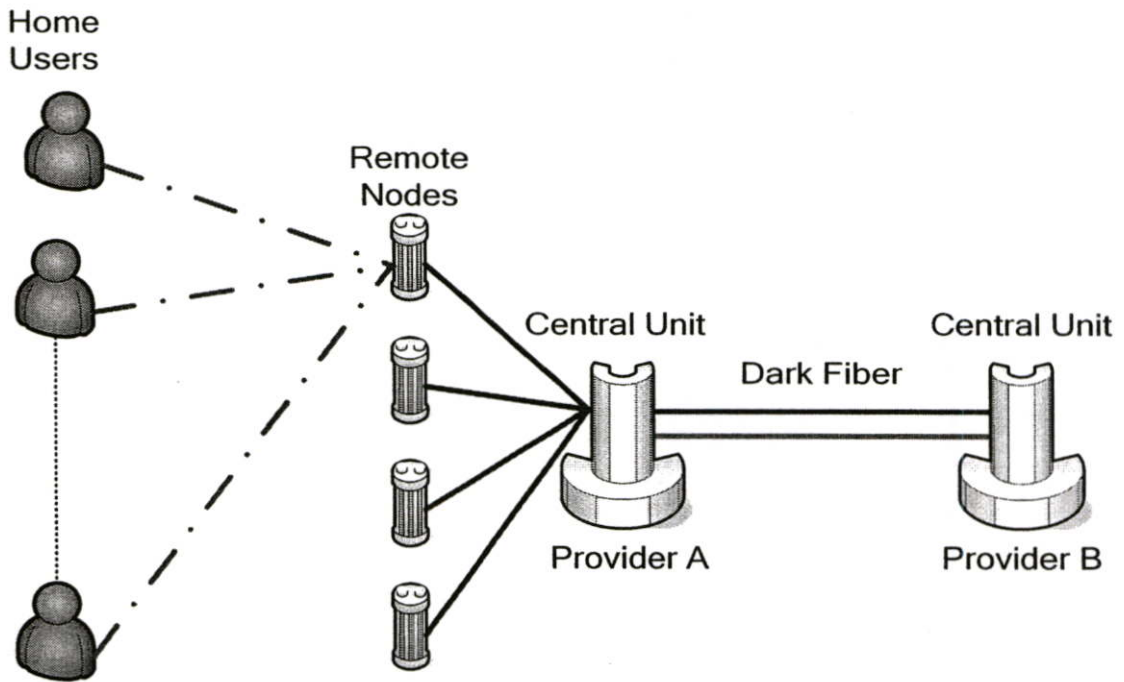


Diagram of Reproduction FTTH Network

รูปที่ 6.1 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองส่งข้อมูลในระบบ

#### คำอธิบายการทดลอง

ในการทดลองในขั้นแรก เราจะทำการส่ง Packet ของข้อมูลจาก Provider A ไปยัง Provider B และวัด กำลังงานที่ทุกจุดที่มีการเชื่อมต่อ (เท่าที่จะสามารถวัดได้) เพื่อที่จะให้ได้ทราบว่า จากจุดเชื่อมต่อต่างๆในระบบนั้น มีการสูญเสียเท่าไร ซึ่งการทำการทดลองเช่นนี้จะทำให้เราสามารถทราบได้ว่า อุปกรณ์ที่เราใช้นั้น จะมีผลเกี่ยวกับการส่งข้อมูลอย่างไรบ้าง ซึ่งจะมีผลต่อการออกแบบและนำไปใช้งาน เช่น ถ้าอุปกรณ์ที่เราใช้มีผลทำให้เกิดการลดทอนมาก ก็คือมีการสูญเสียมาก จึงมีผลเวลาเมื่อเราทำการออกแบบระบบเมื่อเราจะใช้งานจริง อาจจะทำให้เราต้องปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เรา

ทำการส่ง หรืออาจจะต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์การขยายสัญญาณเข้าไป ซึ่งเป็นสิ่งที่เราจะต้องคิดก่อน เมื่อเราต้องการที่จะสร้างระบบเพื่อการใช้งานจริง และความเป็นไปได้ในการนำ ระบบ FTTH ที่ ออกแบบนี้ไปใช้งานจริง

### วิธีการทดลอง

1. ส่งตัวอย่างข้อมูลผ่านระบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้
2. วัด input และ output power ที่ทุกจุดเชื่อมต่อ ที่กำหนดไว้
3. นำข้อมูลมาวิเคราะห์ เทียบกับข้อมูลที่ได้มาจากการวัดที่จุดอื่นๆ ก่อนหน้า เพื่อทำการ วิเคราะห์และสรุปผล

ตารางที่ 6.1 แสดงผลที่ได้จากการวัดค่ากำลังงาน จาก Provider B ไปยัง Provider A

	Input Power	Output Power
Provider B	-	3.78 dBm
Provider A	-13.72 dBm	-15.98 dBm

ตารางที่ 6.2 แสดงผลที่ได้จากการวัดค่ากำลังงาน ที่จุดเชื่อมต่อ Remote Node ต่างๆ

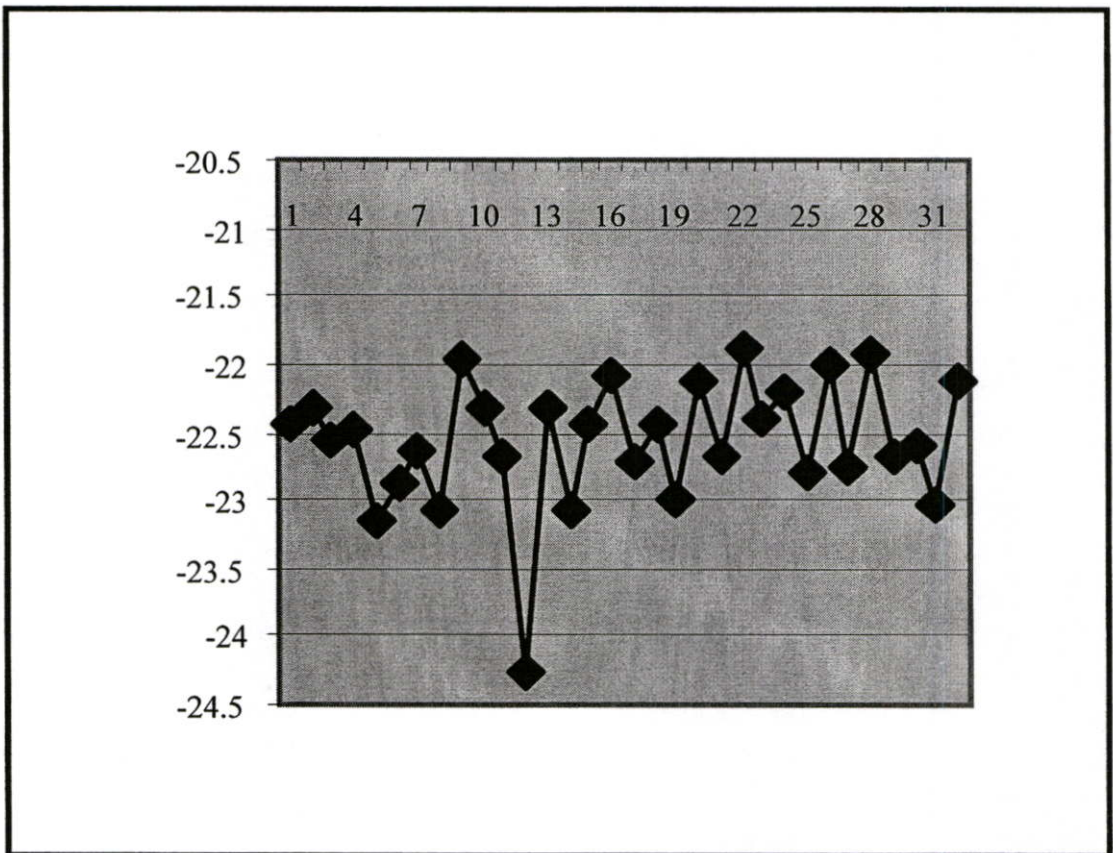
	Input Power	Output Power
Remote Node 1	-18.54 dBm	-20.48 dBm
Remote Node 2	-18.65 dBm	-20.55 dBm
Remote Node 3	-18.80 dBm	-20.76 dBm
Remote Node 4	-19.09 dBm	-21.23 dBm

ตารางที่ 6.3 แสดงผลที่ได้จากการวัดค่ากำลังงาน ที่จุดเชื่อมต่อ User ต่างๆ

	Input Power	Output Power
User1- Remote Node 1	-22.43 dBm	-
User2- Remote Node 1	-22.34 dBm	-
User3- Remote Node 1	-22.57 dBm	-
User4- Remote Node 1	-22.49 dBm	-
User5- Remote Node 1	-23.14 dBm	-
User6- Remote Node 1	-22.87 dBm	-
User7- Remote Node 1	-22.64 dBm	-
User8- Remote Node 1	-23.09 dBm	-
User1- Remote Node 2	-21.97 dBm	-
User2- Remote Node 2	-22.34 dBm	-
User3- Remote Node 2	-22.66 dBm	-
User4- Remote Node 2	-24.28 dBm	-
User5- Remote Node 2	-22.34 dBm	-
User6- Remote Node 2	-23.09 dBm	-
User7- Remote Node 2	-22.44 dBm	-
User8- Remote Node 2	-22.10 dBm	-
User1- Remote Node 3	-22.71 dBm	-
User2- Remote Node 3	-22.45 dBm	-
User3- Remote Node 3	-22.99 dBm	-
User4- Remote Node 3	-22.12 dBm	-
User5- Remote Node 3	-22.66 dBm	-
User6- Remote Node 3	-21.88 dBm	-
User7- Remote Node 3	-22.40 dBm	-
User8- Remote Node 3	-22.21 dBm	-
User1- Remote Node 4	-22.78 dBm	-
User2- Remote Node 4	-21.99 dBm	-
User3- Remote Node 4	-22.76 dBm	-
User4- Remote Node 4	-21.91 dBm	-

ตารางที่ 6.3 (ต่อ)

User5-Remote Node 4	-22.68 dBm	-
User6- Remote Node 4	-22.59 dBm	-
User7- Remote Node 4	-23.03 dBm	-
User8- Remote Node 4	-22.11 dBm	-



รูปที่ 6.2 แสดงกราฟของกำลังงานที่วัดจาก User ต่างๆ โดยที่

แกน X คือ User ที่ทำการทดลอง

แกน Y คือ ค่ากำลังงาน (Power) เป็น dBm

## วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลของตารางการทดลองที่ 1 ผลที่ได้จากการวัดค่ากำลังงาน (Power) ของจุดเชื่อมต่อของ ทั้งสอง Provider นั้น มีการสูญเสีย มากพอสมควร เนื่องจาก ระบบจริง มี Provider สองตัวอยู่ห่างกันมาก ซึ่ง จากระบบ ของทางธนาคารนั้น Provider หนึ่งจะเป็น DWDM Transponder อยู่ที่ ศูนย์สำนักงานใหญ่ (Head Quarter Site) และอีก provider หนึ่งจะอยู่เป็น DWDM Transponder ของ ศูนย์สำรอง (DRC Site) ซึ่งมีระยะห่างประมาณ 30 กม. (เป็นระยะห่างที่วัดจากเส้นทางเดินของ Dark Fiber ตามข้อมูลที่ได้มา) ซึ่ง เป็นระยะที่ไกล มาก เกินกว่าที่ความสามารถของ Transponder จะส่งผ่านข้อมูลแสงได้ จึงต้องมี อุปกรณ์ขยายกลางทาง (In Line Amplifier) เพื่อที่จะขยายสัญญาณให้สามารถส่งผ่านในระยะทางไกลได้

จากผลของตารางการทดลองที่ 2 ผลที่ได้จากการวัดค่ากำลังงาน (Power) ที่ Remote Node ทั้ง 4 ตัว มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ กำลังงานขาออก (Output Power) จะน้อยกว่า กำลังงานขาเข้า (Input Power) อยู่เล็กน้อย เนื่องจาก การลดทอนที่จุดเชื่อมต่อ (Joint Connection) และระยะทางจาก ตัว DWDM Transponder ไปยัง Remote Node นั้น มีระยะทางไม่มาก เนื่องจากทาง ธนาคารนั้น ได้จัดให้อยู่ในห้องเดียวกัน ซึ่งมีระยะห่าง ประมาณ 10 เมตร ทำให้ ค่ากำลังงานที่วัดได้ ที่ กำลังงานขาออกของ DWDM Transponder และค่ากำลังงานขาเข้า ของทาง Remote Node นั้นต่างกันไม่มาก เกิดการลดทอนน้อย

จากผลของตารางการทดลองที่ 3 ผลที่ได้จากการวัดค่ากำลังงาน (Power) ที่ User เอง ที่เชื่อมต่อกับ Remote Node ทั้ง 4 ตัว โดยเชื่อมต่อ 4 User ต่อ 1 Remote Node พบว่า User ต่างๆนั้น (อันที่จริง ก็คือ server ต่างๆที่ ทำงานเชื่อมต่อกับ ระบบ ไฟเบอร์ ออปติก ของทางธนาคาร ซึ่งเชื่อมต่อ ผ่านทาง Optical Switch) มีค่า การลดทอนที่ใกล้เคียงกัน (จากการวิเคราะห์จาก กำลังงานขาออก จาก Remote Node และ กำลังงานขาเข้าที่ User) ทั้งที่ User ต่างๆมีระยะห่างจาก Remote Node ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะ ระบบ ออปติกไฟเบอร์นั้น มีการลดทอนที่มีผลมาจาก ระยะทาง น้อย ดังกราฟที่ ได้เปรียบเทียบ กับ ระบบ ADSL ที่กล่าวมาแล้ว ในเรื่อง การพัฒนาจาก ระบบ ADSL ไปสู่ระบบ FTTH ซึ่งนี่เป็นข้อ ได้เปรียบ ที่สำคัญ ตัวหนึ่ง ที่ทำให้ระบบ FTTH มีประสิทธิภาพ มากกว่าระบบอื่น

## 6.2 การทดลองที่ 2

การทดลองเมื่อมีแพคเกจข้อมูล เข้ามาที่ระบบมากเกินไประบบ จะเกิดปัญหาอย่างไร.

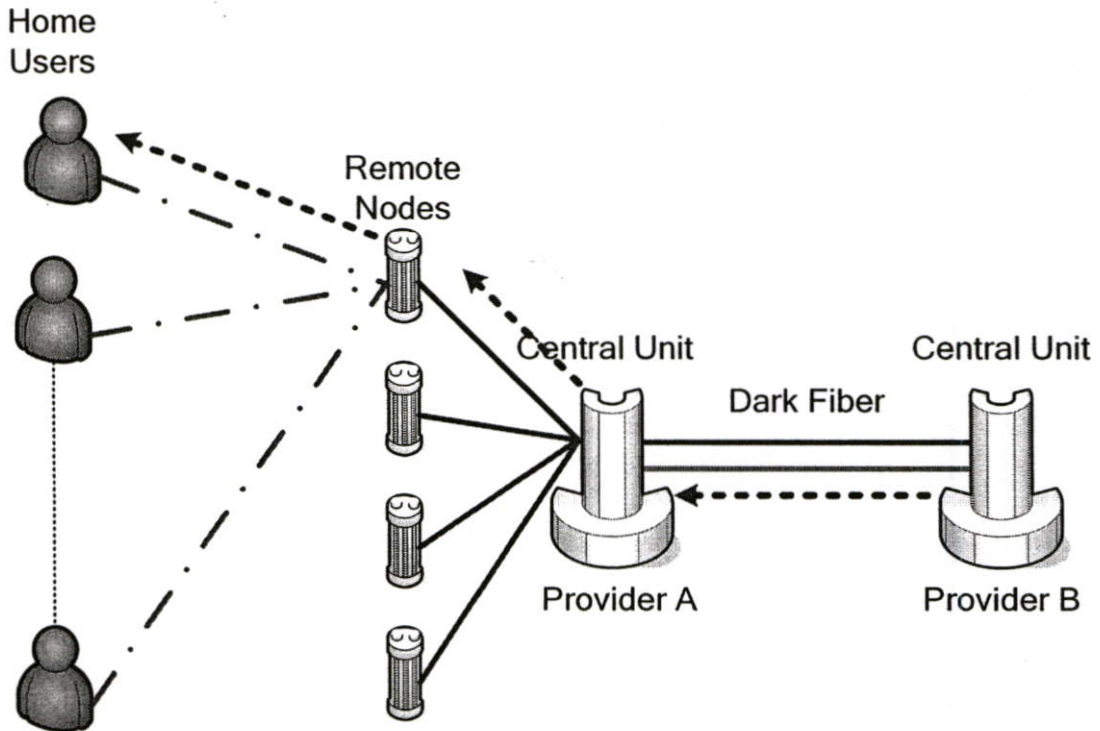


Diagram of Reproduction FTTH Network

รูปที่ 6.3 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองส่งข้อมูลมากเกินไปที่ระบบจะรับได้

### คำอธิบายการทดลอง

การทดลองนี้ เป็นการทดลองที่จำลองเหตุการณ์เมื่อระบบ FTTH มีการส่งผ่าน packet ที่เกินกว่าที่ แบนวิคท์ของระบบ จะรับได้ วิธีการทำการทดลอง ทำได้โดยการที่ ทดลองส่งข้อมูล มากๆ เช่นการเข้าใช้ข้อมูลจากหลาย ๆ users โดยผ่านทางช่องทางเดียวกัน ซึ่งในระบบจำลองนี้ จะ สมมุติให้ทุก users ทำการ upload เพิ่มข้อมูล เพิ่มเดียวกัน ที่อยู่บน storage ที่อยู่อีกด้านหนึ่งของ DWDM Transponder ซึ่งในระบบจำลอง จะเป็นการดึงข้อมูล จาก user หนึ่ง เข้าที่ remote node1 จากนั้นจะเข้าไปที่ Provider A แล้วผ่านระบบใยแก้วนำแสง หรือ Dark Fiber ไปที่ Provider B และต่อเข้าไปที่ remote node1 ของทางฝั่ง Provider B แล้วเข้าไปที่ users ทั้ง 8 users ที่เรียก เพิ่มข้อมูลนั้นๆ

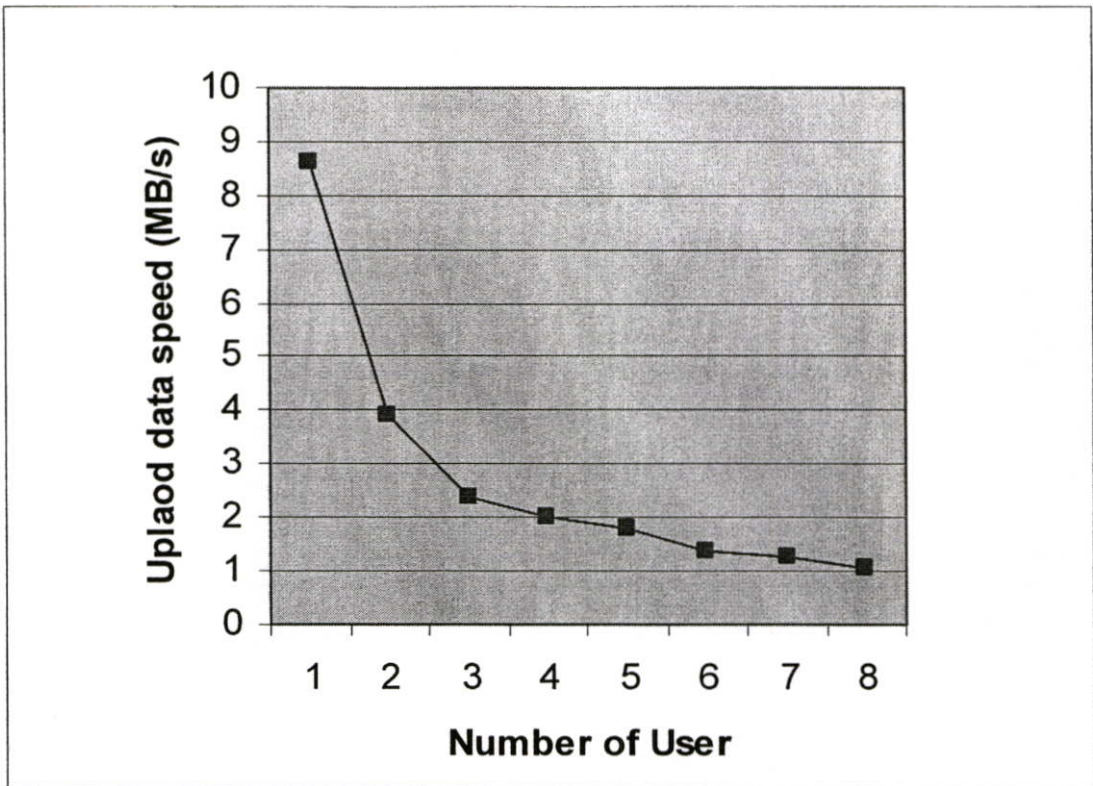
### วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งโปรแกรมวัดประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลไว้ในระบบ
2. สั่งให้ users ทั้ง 8 users ที่ต่ออยู่กับ Remote node1 ที่ Provider B upload ข้อมูลเพิ่มเติมเดียวกัน จาก user หนึ่งที่อยู่ที่ทาง Provider A
3. สังเกตการณ์ และบันทึกผลการทดลอง

### ผลการทดลอง

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดลองเมื่อมีแพคเกจข้อมูล เข้ามาที่ระบบมากเกินไปที่ระบบจะรับได้

Number of users access same data	Upload data speed (Mbps)
1	8.625
2	3.897
3	2.405
4	2.024
5	1.783
6	1.354
7	1.296
8	1.075



รูปที่ 6.4 แสดงกราฟผลการทดลองเมื่อมีแพคเกจข้อมูล เข้ามาที่ระบบมากเกินไประบบจะรับได้

#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลปรากฏว่า เมื่อเราใช้งานเส้นทางการส่งสัญญาณเพียงช่องสัญญาณเดียวด้วยข้อมูลหลายๆ นั้นมีผลกระทบทำให้การส่งข้อมูลช้าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากระบบนี้ไม่มีระบบที่ช่วยในเรื่องการแชร์การส่งข้อมูล ซึ่งอาจจะต้องใช้ Software ในการจัดการ ทำให้แต่ละเส้นทางส่งข้อมูลอย่างเป็นเอกเทศ แต่สำหรับการทดลองนี้ ถ้าเราทำการแบ่ง wavelength ให้กับ เส้นทางการส่ง มากกว่า 1 wavelength เพื่อให้เส้นทางการส่งเส้นทางนี้ มี bandwidth มากขึ้น ก็จะเป็นการแก้ไขปัญหากเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้

### 6.3 การทดลองที่ 3

การทดลองในสถานการณ์ที่ มีความผิดพลาดขึ้นระหว่างเส้นทางการเดินทางของ ระบบ Dark fiber ที่อยู่ระหว่าง Provider ทั้งสอง

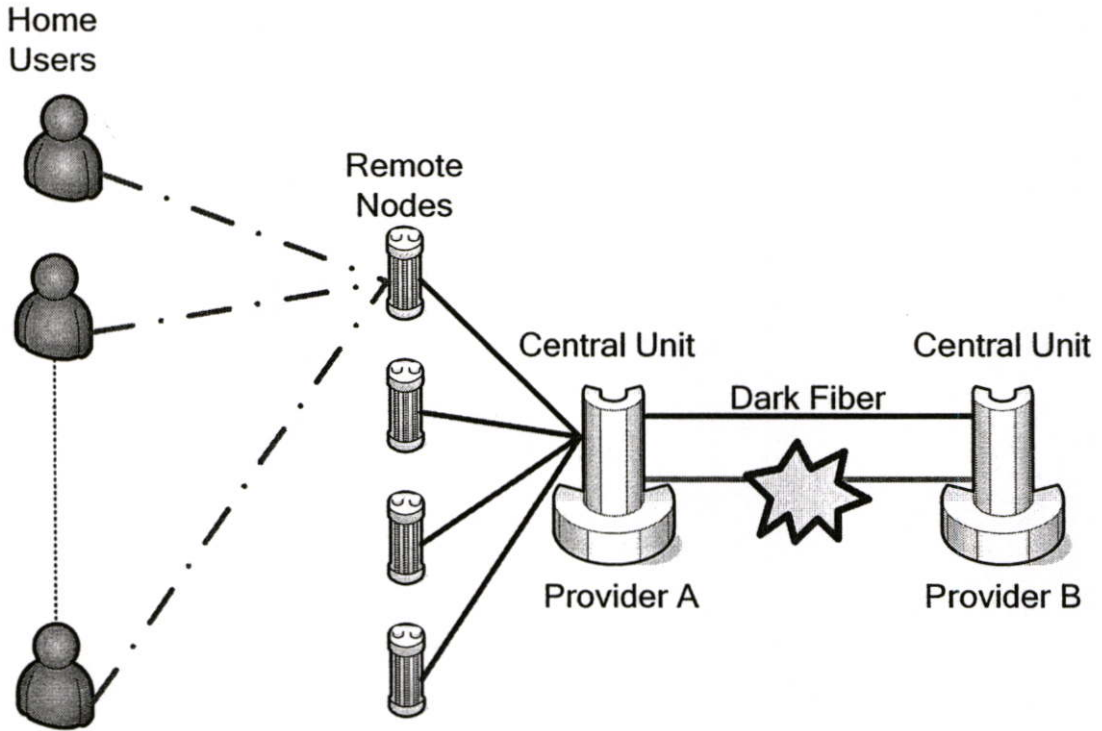


Diagram of Reproduction FTTH Network

รูปที่ 6.5 แสดงการทดลองในสถานการณ์ที่ มีความผิดพลาดขึ้นระหว่างเส้นทางการเดินทางของ ระบบ Dark fiber ที่อยู่ระหว่าง Provider ทั้งสอง

#### คำอธิบายการทดลอง

การทดลองนี้ เป็นการทดลองถึงประสิทธิภาพของระบบ เมื่อระบบ Dark fiber เกิด fail ขึ้นมา ซึ่งจะเกิดได้โดยยาก เนื่องจากทาง บริษัทเจ้าของเส้นทางได้ดูแลคืออยู่แล้ว แม้กระนั้น ทาง ธนาคารที่ทำการทดลองระบบ ก็ยังมี เส้นทางสำรองของอีกบริษัทหนึ่งเพื่อใช้ในกรณีฉุกเฉิน ซึ่งถ้า ระบบ Dark fiber เกิด fail ขึ้นมา ทาง Head quarter site และ DRC site ก็จะไม่สามารถส่งผ่านข้อมูล ระหว่างกันได้ การทดลองนี้ จึงเป็นการทดลองที่จะทดสอบและศึกษาผลกระทบของระบบ เมื่อมี

การ fail ของระบบ Dark fiber และมีการ redundancy ของเส้นทางการส่งผ่านข้อมูล ไปที่เส้นทาง Dark fiber สำรองที่ทางธนาคารเตรียมไว้

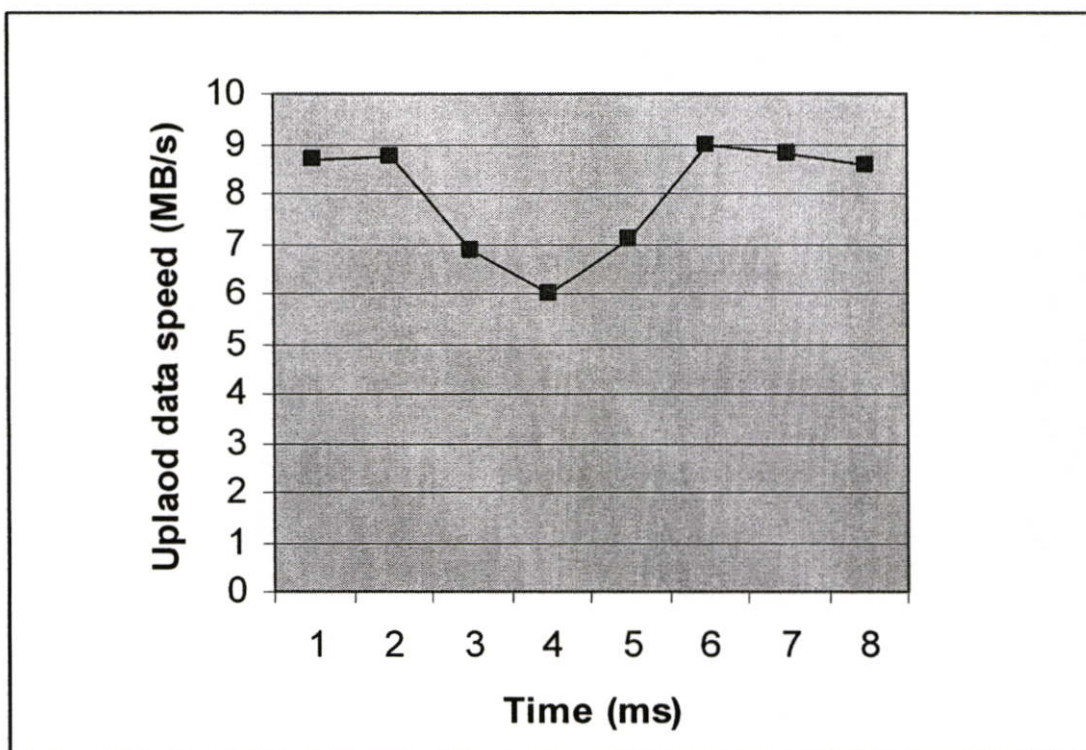
#### วิธีการทำการทดลอง

1. นำโปรแกรมวัดประสิทธิภาพ ของการส่งสัญญาณ ไปติดตั้งไว้ในระบบ เพื่อทำการวัดช่วงเวลา ที่ระบบใช้ในการสลับเส้นทางการส่งสัญญาณ
2. รอช่วงเวลา ที่ระบบ Dark fiber เกิดการเสียหาย
3. เก็บข้อมูลจากโปรแกรมที่วัดได้ ว่าระหว่างที่มีการสลับเส้นทางการส่งข้อมูลนั้น มีความผิดพลาดที่การส่งข้อมูลปกติ และข้อมูลที่ต่อเนื่องอย่างไร

#### ผลการทดลอง

ตารางที่ 6.5 แสดงผลการทดลองในสถานการณ์ที่ มีความผิดพลาดขึ้นระหว่างเส้นทางการเดินทาง ของ ระบบ Dark fiber ที่อยู่ระหว่าง Provider ทั้งสอง

Time (ms)	Upload data speed (Mbps)
1	8.685
2	8.755
3	6.877
4	5.988
5	7.102
6	8.998
7	8.786
8	8.568



รูปที่ 6.6 แสดงกราฟผลการทดลองในสถานการณ์ที่มีความผิดพลาดขึ้นระหว่างเส้นทางการเดินทาง ของ ระบบ Dark fiber ที่อยู่ระหว่าง Provider ทั้งสอง

#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษา ประสิทธิภาพของการรับส่งสัญญาณ เมื่อมีการ Fail ของ Dark fiber ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้นั้น ระบบจะทำการสลับเส้นทางการส่งสัญญาณ จากเส้นทางเดิมของ vender หนึ่ง ไปที่อีก vender หนึ่ง ทั้งนี้เพราะจากการทำการทดลองนั้น ได้ทำการส่ง ข้อมูลผ่าน ระบบ Dark Fiber ไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อรอจังหวะที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับ ระบบ ซึ่ง ตัว Dark Fiber เองมีโอกาศที่จะเกิดความผิดพลาดค่อนข้างน้อย ในเรื่องนี้จึงต้องใช้เวลาในการรอให้เกิดความผิดพลาดค่อนข้างนาน แต่เมื่อ ระบบ Dark fiber link ที่ทางธนาคารใช้อยู่เป็น Link หลัก คือ Link ของทาง TOT vender เกิดความเสียหาย และ Link ของทาง Violin vender สลับเข้ามาทำงานแทนนั้น ข้อมูลที่กำลังส่งผ่านอยู่ ไม่ได้เกิดความผิดพลาด ในการส่งข้อมูลแต่อย่างใด

## 6.4 การทดลองที่ 4

การทดลองในสถานการณ์ที่ มีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่เส้นทางการส่งข้อมูล ที่อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node ที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Alternate path)

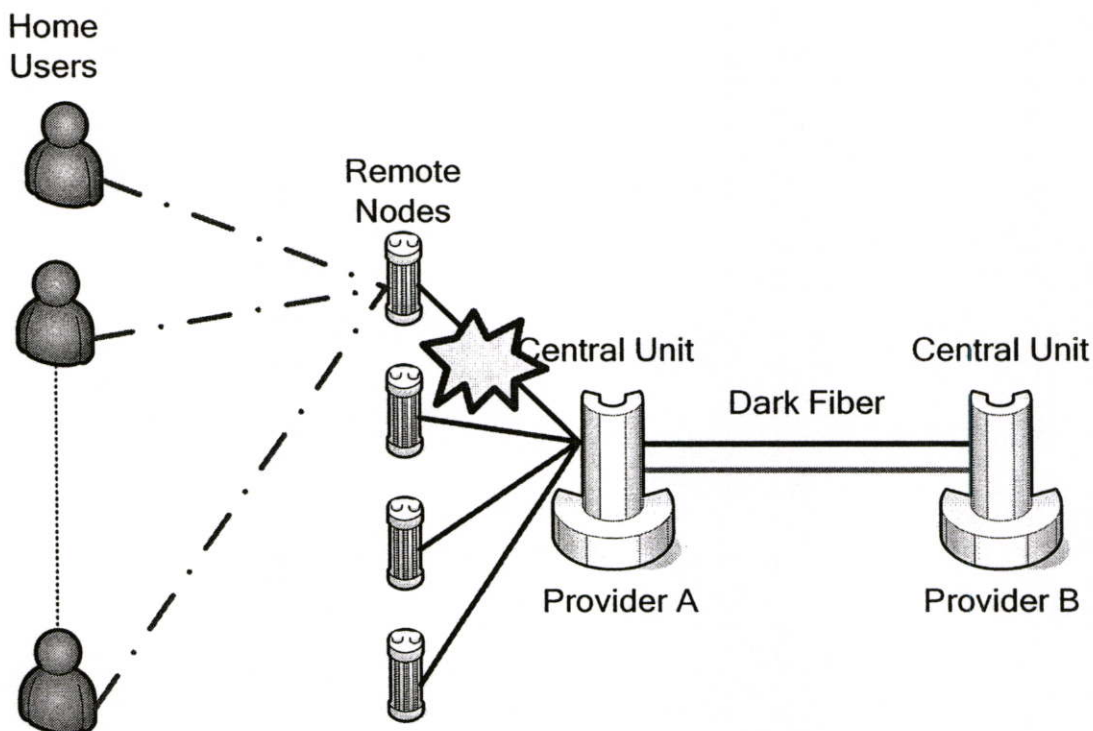


Diagram of Reproduction FTTH Network

รูปที่ 6.7 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Alternate path)

### คำอธิบายการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษา ประสิทธิภาพ และผลกระทบของระบบ เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่ เส้นทางการส่งข้อมูลระหว่าง Provider และ Remote node ซึ่งในระบบที่ทำการทดลองนี้ เส้นทางดังกล่าว มีอยู่ 2 ลักษณะ ได้แก่ เส้นทางการส่งผ่านข้อมูลที่จะส่งผ่านข้อมูลไปยังอุปกรณ์ที่มีความสำคัญ จึงได้มีการป้องกันความผิดพลาดเนื่องจาก Link fail ซึ่งจะมีการสร้างเส้นทางการส่งข้อมูลสำรอง (Alternate path) ไว้ เมื่อมีการผิดพลาดของเส้นทางการส่งข้อมูลที่ใช้อยู่ ก็จะมีการสลับเส้นทางการเดินไปอีกเส้นทางหนึ่งทันที และอีกลักษณะหนึ่งก็คือ เส้นทางที่ไม่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Single path) ซึ่งจะไม่มีการส่งข้อมูลสำรอง และใน

การทดลองนี้ เราจะทำการทดลองในเส้นทางที่มีระบบเส้นทางสำรอง (Alternate path) โดยเราจะวัดประสิทธิภาพ และผลกระทบของการส่งข้อมูล เมื่อเส้นทางสำรองข้อมูลที่อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node เกิดการ fail โดยที่ระบบจะทำการสลับเส้นทางสำรองสัญญาณมาที่เส้นทางสำรอง (Alternate path) โดยเราจะศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการสลับเส้นทางสำรองข้อมูล และผลกระทบของข้อมูลเมื่อมีการสลับเส้นทางสำรองข้อมูล

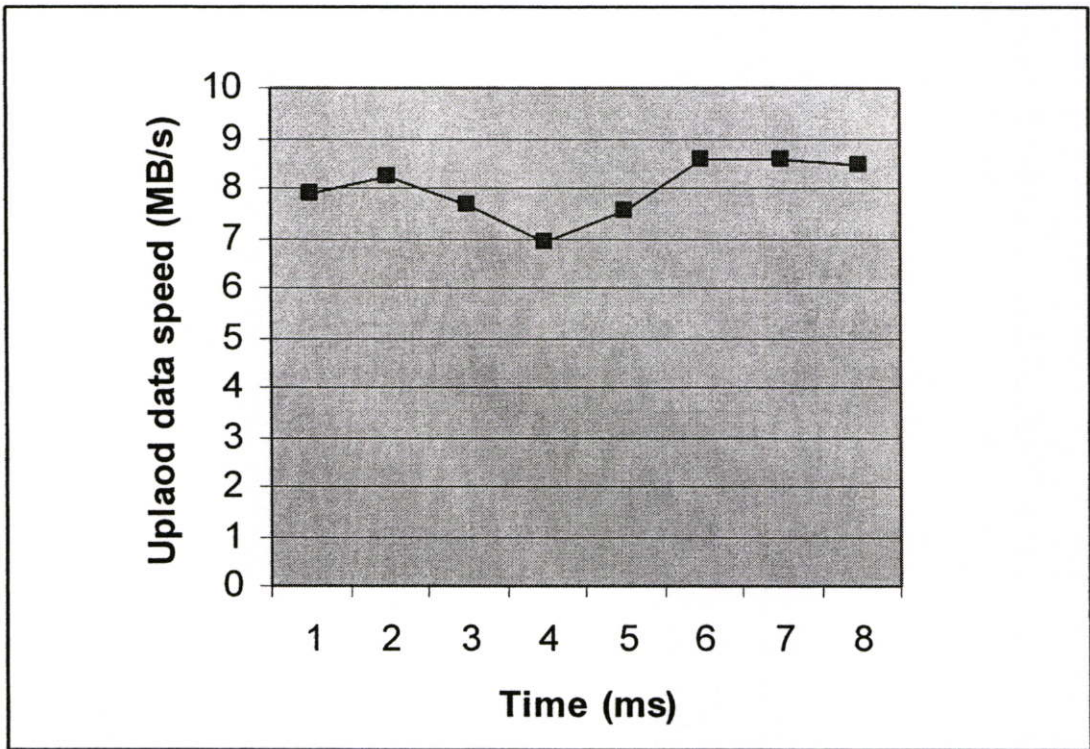
### วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งโปรแกรมวัดประสิทธิภาพไว้ที่ตัว user ที่ทำการทดลอง
2. ทดลองด้วยการ unplug สายไฟเบอร์ ที่เชื่อมระหว่าง Provider และ Remote node
3. บันทึกผล ว่ามีผลอย่างไรต่อ การรับ-ส่งข้อมูลของ user

### ผลการทดลอง

ตารางที่ 6.6 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบเส้นทางสำรองสัญญาณสำรอง (Alternate path)

Time (ms)	Upload data speed (Mbps)
1	7.899
2	8.245
3	7.665
4	6.887
5	7.568
6	8.557
7	8.576
8	8.445



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Alternate path)

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับการทดลองนี้ซึ่ง เป็นการทดลองในสถานการณ์ที่ มีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่เส้นทางการส่งข้อมูล ที่อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node ที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Alternate path) นั้น จากการทดลองเราพบว่า การส่งผ่านข้อมูล ผ่านระบบดังกล่าวจะไม่มีผลต่อข้อมูลที่กำลังส่งผ่านอยู่ เนื่องจาก การทดลองนี้ เป็นการทดลองระบบที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง จึงไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อการส่งข้อมูลเมื่อ มีความผิดพลาดต่อเส้นทางการส่งข้อมูลที่อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node ระยะเวลาที่ใช้ในการสลับสายนั้น ไม่มีผลต่อการส่งข้อมูล เนื่องจาก เส้นทางการส่งสัญญาณอีกเส้นหนึ่ง มีการ standby ไว้พร้อมอยู่แล้ว แต่ข้อเสียของระบบนี้จากการทดลองก็คือ เราจะต้องเสียเส้นทางเดินของข้อมูลไปอีกเส้นหนึ่ง โดยที่ไม่ได้ประโยชน์ทางด้านความเร็ว และปริมาณในการส่งข้อมูลที่มากขึ้นเลย

## 6.5 การทดลองที่ 5

การทดลองในสถานการณ์ที่ มีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่เส้นทางการส่งข้อมูล ที่อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node ที่ไม่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Single path)

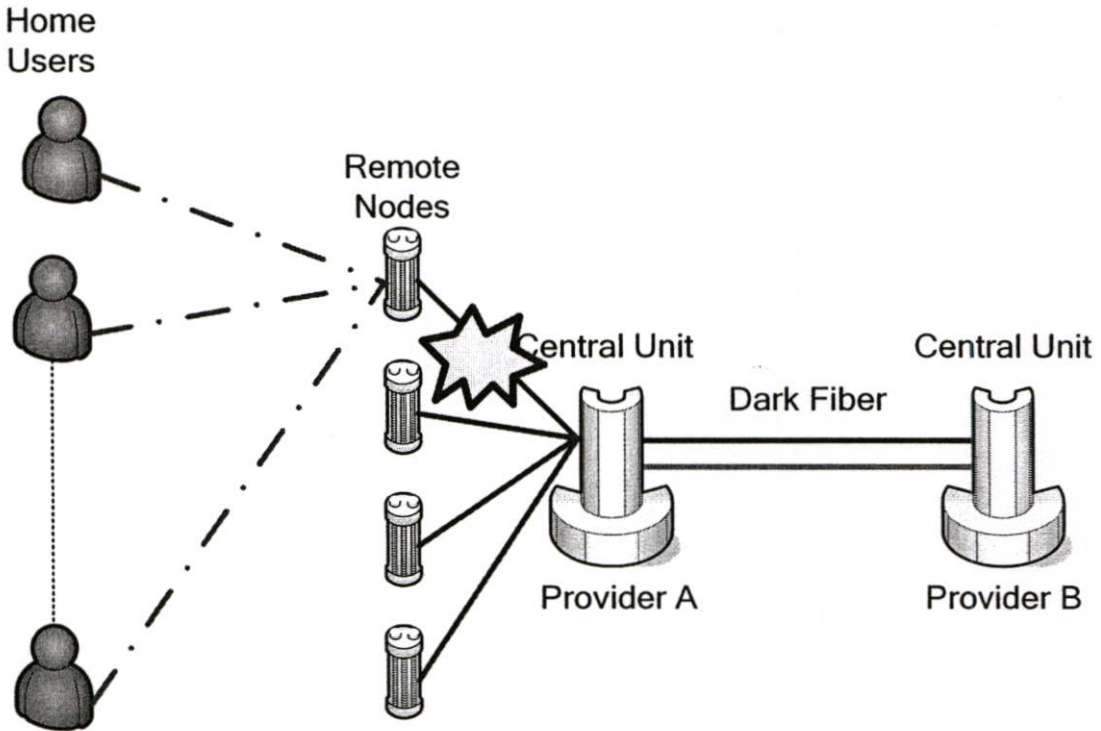


Diagram of Reproduction FTTH Network

รูปที่ 6.9 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Single path)

### คำอธิบายการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษา ประสิทธิภาพ และผลกระทบของระบบ เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่ เส้นทางการส่งข้อมูลระหว่าง Provider และ Remote node ซึ่งในระบบที่ทำการทดลองนี้ เส้นทางดังกล่าว มีอยู่ 2 ลักษณะ ซึ่งได้กล่าวไปแล้ว ในการทดลองที่ผ่านมา และในการทดลองนี้ เราจะทำการทดลองในเส้นทางที่ไม่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Single path) โดยเราจะวัดประสิทธิภาพ และผลกระทบของการส่งข้อมูล เมื่อ เส้นทางการส่งข้อมูลที่อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node เกิดการ fail โดยที่ไม่มีระบบระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง

(Alternate path) มารองรับโดยจะสังเกต และศึกษาจาก ข้อมูลที่มีการส่งผ่านระหว่างที่มีการ fail ของ link ทั้งข้อมูลสั้นๆ และข้อมูลแบบต่อเนื่อง

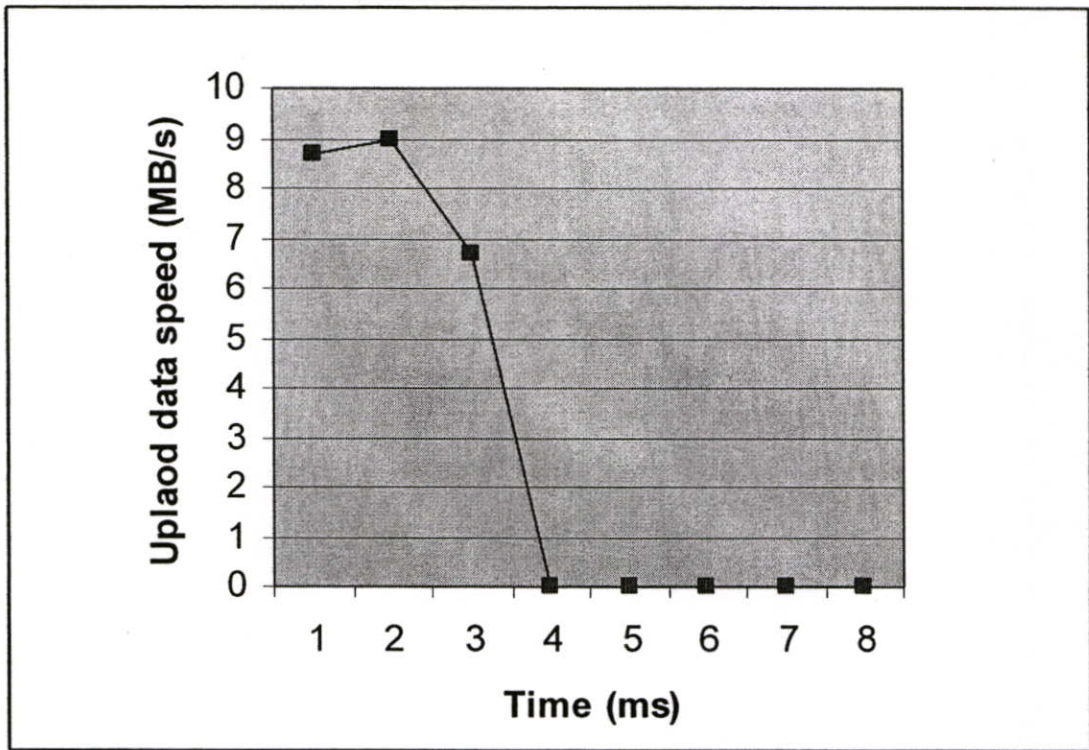
### วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งโปรแกรมวัดประสิทธิภาพไว้ที่ตัว user ที่ทำการทดลอง
2. ทดลองด้วยการ unplug สายไฟเบอร์ ที่เชื่อมระหว่าง Provider และ Remote node
3. บันทึกผล ว่ามีผลอย่างไรต่อ การรับ-ส่งข้อมูลของ user

### ผลการทดลอง

ตารางที่ 6.7 แสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบเส้นทางสำรอง (Single path)

Time (ms)	Upload data speed (Mbps)
1	8.678
2	8.987
3	6.667
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Provider และ Remote node เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Single path)

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองนี้ เป็นการทดลองในสถานการณ์ที่ มีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่เส้นทางการส่งข้อมูล ที่อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node ที่ไม่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Single path) โดยการทดลอง จะทำการ unplug สายไฟเบอร์ ที่เชื่อมระหว่าง Provider และ Remote node ในระบบการส่งที่ไม่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง ผลปรากฏว่า เมื่อเราเริ่มทำการ unplug สายไฟเบอร์ ที่เชื่อมระหว่าง Provider และ Remote node ออกนั้น ข้อมูลที่กำลังส่งอยู่ก็ได้หยุดการส่งในทันที ซึ่งในอันที่จริงแล้ว ในระหว่างที่เราเห็นว่าการหยุดส่งในทันทีนั้น ทางต้นทางได้มีการส่งข้อมูลไปยังปลายทาง แต่ไปไม่ถึงปลายทาง จึงไม่ได้คำตอบรับ จากทางปลายทางว่าได้รับข้อมูลแล้ว ต้นทางจะรออยู่ช่วงเวลาหนึ่งจึงจะตีความได้ว่า เส้นทางการส่งข้อมูลได้ขาด จึงยกเลิกการส่ง

## 6.6 การทดลองที่ 6

การทดลองในสถานการณ์ที่มีการผิดพลาดในการส่งข้อมูล อันเนื่องมาจาก Link ระหว่าง Remote node และ user ที่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing เกิด fail ขึ้นมา

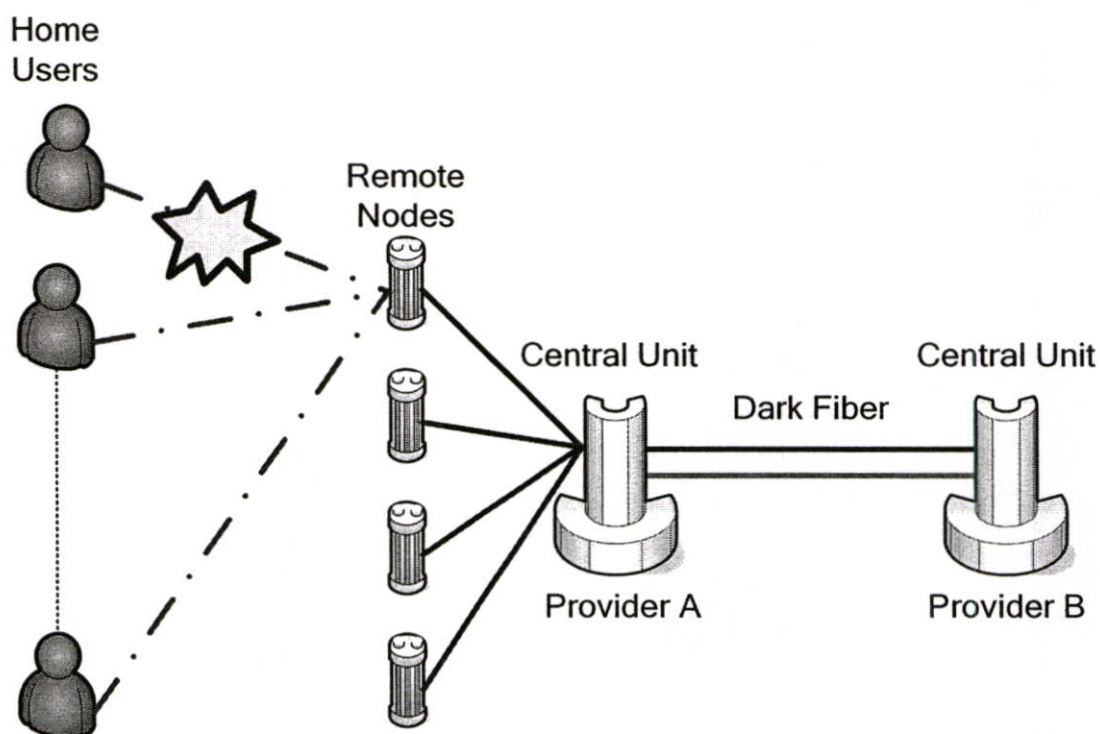


Diagram of Reproduction FTTH Network

รูปที่ 6.11 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing

### คำอธิบายการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพ และผลกระทบ เมื่อมีการผิดพลาดในการส่งข้อมูล อันเนื่องมาจาก Link ระหว่าง Remote node และ user fail ซึ่ง Link ระหว่าง Remote node และ user นั้นในระบบที่ทำการทดลองนั้น มีอยู่ 2 ลักษณะ คือ Link ที่มีระบบ fail over path ซึ่งจะ เป็นระบบที่มีเส้นทางในการส่งข้อมูล 2 เส้นทาง เข้าที่ user เดียว โดยทั้งสองเส้นทางนี้ โดยปกติจะ ไม่ได้เป็น Link active-stand by เหมือนดังเช่นระบบ Alternate path เหมือนเส้นทางในการส่งข้อมูล ที่ อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node แต่ในเส้นทางนี้ ทั้งสองเส้นทางจะทำหน้าที่ไปพร้อมๆกัน

โดยช่วยกันทำงาน เรียกว่า ระบบ Load Balancing โดยจะได้อัตราการส่งข้อมูลเป็นสองเท่า อีกลักษณะหนึ่งได้แก่ ระบบที่ไม่มีระบบ fail over path ซึ่งจะทำให้การส่งผ่านข้อมูลเพียงเส้นทางเดียว ซึ่งในการทดลองนี้ จะทำการทดลองระบบที่มีระบบ fail over path โดยจะศึกษาประสิทธิภาพ และผลกระทบของเส้นทาง การส่งผ่านข้อมูล เมื่อมีความผิดพลาด หรือ link fail ในเส้นทาง การส่งข้อมูล เส้นหนึ่งในสองเส้นที่ทำงานคู่กัน

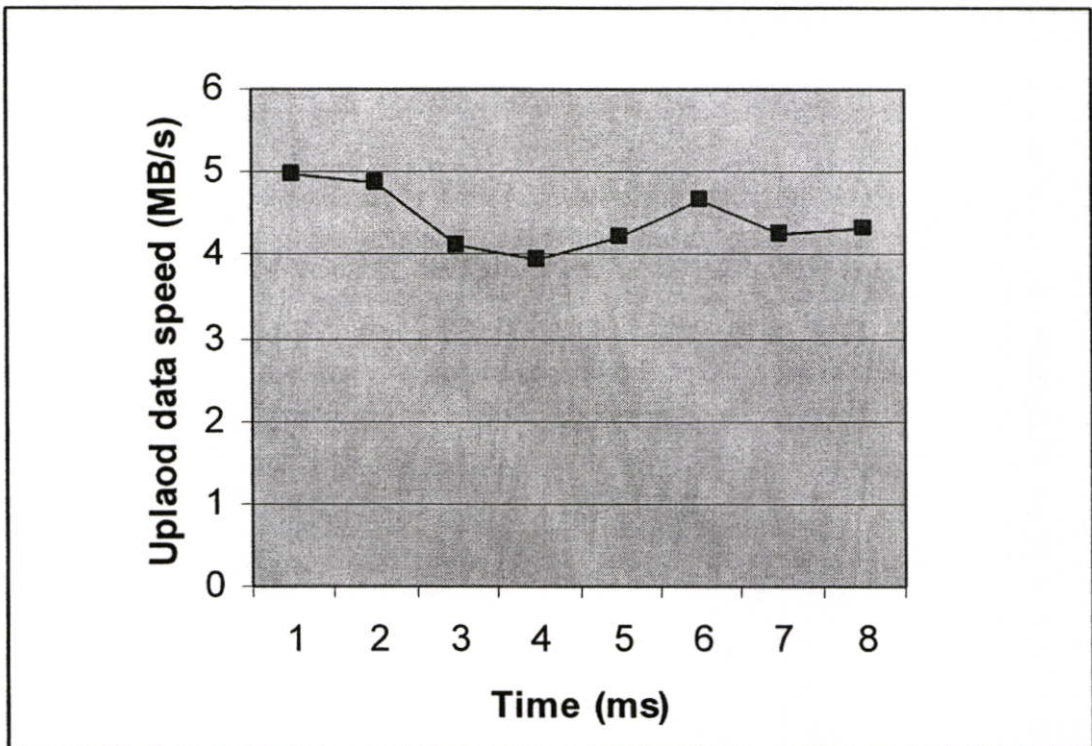
### วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งโปรแกรมวัดประสิทธิภาพของการส่งข้อมูล ไว้ที่ user
2. จำลองสถานการณ์ link fail โดยการ ถอดสาย fiber optic ที่อยู่ระหว่าง Remote node และ user ออก
3. บันทึกผลว่ามีผลอย่างไรต่อการรับ-ส่งข้อมูลของ user

### ผลการทดลอง

ตารางที่ 6.8 แสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing

Time (ms)	Upload data speed (Mbps)
1	4.988
2	4.873
3	4.122
4	3.945
5	4.234
6	4.675
7	4.254
8	4.303



รูปที่ 6.12 กราฟแสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองนี้ เป็นการทดลองในสถานการณ์ที่มีการผิดพลาดในการส่งข้อมูล อันเนื่องมาจาก Link ระหว่าง Remote node และ user ที่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing เกิด fail ขึ้นมา ซึ่งเดิมแล้วระบบนี้ เป็นการใช้เส้นทางในการส่งสัญญาณ สองเส้นทางในการทำหน้าที่เป็นเส้นทางสำรอง แล้วยังเส้นทางที่ช่วยกันทำงาน ทำให้ สามารถส่งข้อมูลได้มากขึ้นอีกด้วย ในการทดลองเมื่อเราทำการที่เหมือนทำให้ เส้นทางส่งสัญญาณเส้นหนึ่งขาดลง ข้อมูลทั้งหมดที่ ส่งผ่านอยู่ในเส้นทางส่งสัญญาณเส้นนั้น ก็จะเปลี่ยนมาเดินทางในเส้นทางส่งอีกเส้นหนึ่ง ซึ่งก็มีผลทำให้ ประสิทธิภาพ ในการส่งผ่านข้อมูลโดยรวม น้อยลงไปครั้งหนึ่ง แต่ถึงน้อยลงอย่างไร ก็จะใกล้เคียงกับการส่งข้อมูลในระบบที่ไม่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing

## 6.7 การทดลองที่ 7

การทดลองในสถานการณ์ที่มีการผิดพลาดในการส่งข้อมูล อันเนื่องมาจาก Link ระหว่าง Remote node และ user ที่ไม่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing เกิด fail ขึ้นมา

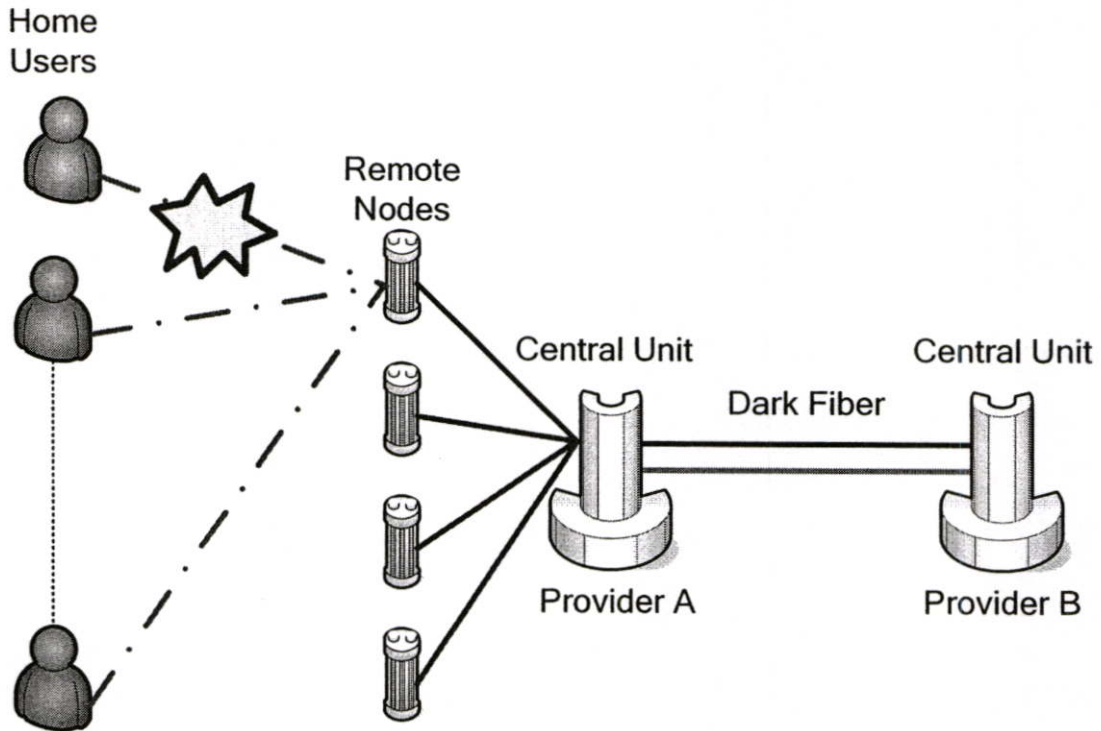


Diagram of Reproduction FTTH Network

รูปที่ 6.13 แสดงระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing

### คำอธิบายการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพ และผลกระทบ เมื่อมีการผิดพลาดในการส่งข้อมูล อันเนื่องมาจาก Link ระหว่าง Remote node และ user fail ซึ่ง Link ระหว่าง Remote node และ user นั้นในระบบที่ทำการทดลองนั้น มีอยู่ 2 ลักษณะ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในการทดลองที่ผ่านมา ซึ่งในการทดลองนี้ จะทำการทดลองระบบที่ไม่มีระบบ fail over path โดยจะศึกษาประสิทธิภาพ และผลกระทบของเส้นทางการส่งผ่านข้อมูล เมื่อมีความผิดพลาด หรือ link fail ในเส้นทางการส่งข้อมูลโดยจะใช้เครื่องมือในการวัด ว่าจะมีผลกระทบอย่างไร กับข้อมูลที่เป็นข้อมูลสั้นๆ และข้อมูลที่ต่อเนื่อง เมื่อการส่งข้อมูลได้ขาดลงอย่างกระทันหัน

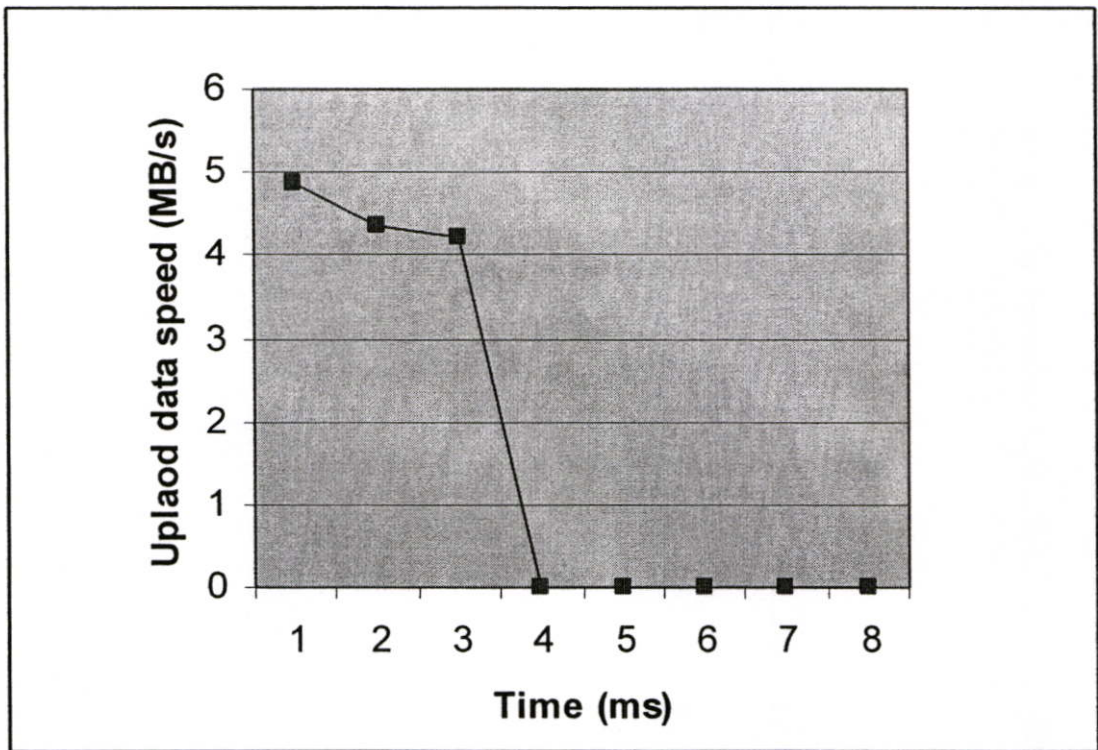
### วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งโปรแกรมวัดประสิทธิภาพของการส่งข้อมูล ไว้ที่ user
2. จำลองสถานการณ์ link fail โดยการ ถอดสาย fiber optic ที่อยู่ระหว่าง Remote node และ user ออก
3. บันทึกผลว่ามีผลอย่างไรต่อการรับ-ส่งข้อมูลของ user

### ผลการทดลอง

ตารางที่ 6.9 แสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing

Time (ms)	Upload data speed (Mbps)
1	4.875
2	4.368
3	4.223
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงผลการทดลองระบบ FTTH ที่ทำการทดลองเมื่อเส้นทางระหว่าง Remote node และ user เกิดความผิดพลาด ที่ไม่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองนี้ เป็นการทดลองในสถานการณ์ที่มีการผิดพลาดในการส่งข้อมูล อันเนื่องมาจาก Link ระหว่าง Remote node และ user ที่ไม่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing เกิด fail ขึ้นมา ซึ่งการทำการทดลอง จะทำโดยการ ถอดสาย fiber optic ที่อยู่ระหว่าง Remote node และ user ออก ในขณะที่ทำการส่งข้อมูลต่อเนื่อง และส่งข้อมูลแบบธรรมชาติออกไป ผลก็คือ การส่งข้อมูลทั้งสองแบบนี้ ได้หยุดลงในทันที เนื่องจากระบบนี้ เป็นระบบที่ไม่มีระบบ fail over path และ ระบบ Load Balancing จึงทำให้การส่งข้อมูลนั้นเกิดความผิดพลาด แต่ระบบนี้ก็มีข้อดีคือ เราไม่ต้องเปลืองเส้นทางการส่งข้อมูลอีกเส้นทางหนึ่งเพื่อใช้เป็นเส้นทางสำรอง ฉะนั้นระบบแบบนี้จึงเหมาะกับ ข้อมูลที่ไม่ค่อยสำคัญ และไม่ต้องการเวลาที่แน่นอนในการส่งเพราะเราสามารถ นำกลับมาส่งอีกครั้งเองได้ เมื่อมีความผิดพลาดในการส่งข้อมูล

## บทที่ 7

### บทสรุป

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งหมดข้างต้น ทำให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำเทคโนโลยี FTTH ไปใช้ในระบบจริง เนื่องจากว่า เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลสูง ซึ่งเป็นเพราะ การลดทอนที่น้อย เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้กันอยู่เดิม และจากการทดลองต่อมาจึงทำให้เราได้รู้ว่า เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นกับระบบ เช่น ในกรณี การทดลองที่ 2 ที่มีความผิดพลาดที่ระบบ Dark Fiber ระบบยังมีความสามารถที่จะปรับเปลี่ยนเส้นทางการส่งสัญญาณ ไปอีกเส้นทางหนึ่งโดยทันทีโดยที่ไม่มีผลกระทบต่อระบบ และเมื่อเราทำการทดลองที่ 3 และการทดลองต่อมา ทำให้เราทราบได้ว่า เราสามารถสร้างระบบและออกแบบระบบที่กำหนดและปรับเปลี่ยนในเรื่องของ ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือ ของข้อมูล หรือไม่ว่าเราสามารถ จะจำกัดในเรื่องของงบประมาณได้ เมื่อเราไม่ต้องการความน่าเชื่อถือของระบบมากนัก เราก็สามารถใช้ระบบที่เป็น Single Path ในการสร้างระบบได้ ถ้าเรามองในการทดลองต่อมา เราก็จะได้ทราบว่า เราสามารถออกแบบระบบ FTTH นี้ให้มีเส้นทางการส่งข้อมูล 2 ทางเพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลแล้ว เราก็ยังสามารถจัดการให้ ทั้งสองเส้นทางนั้น สามารถช่วยกันทำงาน เพื่อประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นได้อีกด้วย หรือระบบที่เรียกว่า ระบบ Load Balancing และอีกทั้ง ยังรองรับ เทคโนโลยี การรวมแบบใช้ความยาวคลื่นแสง (Wave Length Division Modulation หรือ WDM) ที่ใช้การแบ่งความยาวคลื่นแสงออกจากกัน เพื่อส่งไปยังสายส่งเดียวกันได้ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ส่งออกไปนั้น มี Bandwidth ที่มากขึ้นเป็นทวีคูณ ทำให้การส่งข้อมูลนั้นเร็วขึ้นอีกหลายเท่า ซึ่งแนวทางการพัฒนาระบบ FTTH นี้ ยังสามารถพัฒนาไปได้อีกหลายทางและอีกไกล อีกทั้ง ในปัจจุบันนี้ ก็มีแนวคิดที่จะนำระบบ FTTH มาใช้กันแล้ว

จากตัวอย่างของแนวทางการทำธุรกิจผ่านเครือข่ายความเร็วสูงเช่น FTTH ข้างต้น บางคนมองว่าอาจจะ เป็นการให้บริการไปยังหน่วยงาน มากกว่าการให้บริการแบบส่วนตัวไปยังบ้านพักอาศัย ซึ่งแสดงถึงการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านแบบต่างๆ โดยการใช้การสื่อสารสัญญาณผ่านเครือข่าย FTTH จะเห็นว่ามีอุปกรณ์ต่างๆ มากมายที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันส่วนบุคคล อีกทั้งยังช่วยอำนวยความสะดวกสบาย และความเพลิดเพลินใจให้กับผู้อยู่อาศัยได้อย่างดียิ่ง เช่น การใช้บริการอินเทอร์เน็ต การโทรศัพท์ระบบ VoIP (Voice over IP) ผ่านอินเทอร์เน็ต (VDO over IP ก็กำลังจะมาแล้ว) ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายถูกกว่าระบบปัจจุบันมาก การจัดทำห้องพักผ่อนแห่งความบันเทิง (Entertainment Center) ระบบเฝ้าระวังด้วยกล้องวงจรปิดผ่าน เครือข่าย (Internet Camera) การรับ

ส่งภาพดิจิทัล เป็นต้น ดังนั้น จึงไม่น่าแปลกใจเลยว่า ระบบ FTTH จะช่วย ทำให้ชีวิตประจำวันของคนเราเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเทคโนโลยีของ FTTH จะให้ความ สมบูรณ์ใน เรื่องของเทคนิค เส้นทางเดินของระบบ FTTH ในบ้านเรา คงต้องใช้เวลาในการเดินทางอีกระยะหนึ่งไม่มากนักยู่ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นสภาพเศรษฐกิจของสังคม ความพร้อมของโครงสร้างสาธารณูปโภคพื้นฐาน การส่งเสริมของภาครัฐ ทั้งในเรื่องของ ข้อกำหนดคกฏระเบียบและการส่งเสริมอุตสาหกรรม ตลอดไปถึง พฤติกรรมของประชาชนที่ เป็นผู้บริโภค แต่แล้วในที่สุดเชื่อว่า FTTH ต้องเกิดขึ้นและเป็นที่ยอมรับของสังคมบ้านเราอย่าง แน่นนอนแต่ก่อนที่จะถึงวันนั้น การเตรียมความพร้อมในเรื่องของความรู้ความเข้าใจในวันนี้ย่อมทำให้เกิดประโยชน์ต่อการตัดสินใจเลือกใช้ระบบในอนาคต และยังสร้างความได้เปรียบบนในเชิงธุรกิจอีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Aloisio, F. Cevenini, V. Izzo, "An Approach to DWDM for Real-Time Applications," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 51, No. 3, pp. 526-531, June 2004
- [2] F. Jia, B. Mukherjee, J. Iness, "Scheduling variable-length messages in a single-hop multi channel local lightwave network," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 3, pp. 477-488, Aug. 1995.
- [3] D. Sadot, E. Boimovich, "Tunable optical filters for dense WDM networks," IEEE Commun. Mag., vol. 36, pp. 50-55, Dec. 1998.
- [4] K. Kim, "On the evolution of PON-based FTTH solutions," Inform. Sci., vol. 149/1-2, pp. 21-30, Jan. 2003.
- [5] I. Van de Voorde and C. Van de Plas, "Full service optical access networks: ATM transport on passive optical networks," IEEE Commun. Mag., vol. 35, pp. 70-75, Apr. 1997.
- [6] T. Koonen, T. Muys, C. Van der Plaats, S. de Groot, H. Kenter, "TOBASCO: An innovative approach grading CATV fiber-coax networks for broadband interactive services," IEEE Commun. Mag., vol. 4, pp. 76-81, Apr. 1997.
- [7] O. Krauss, "DWDM and Optical Networks. Erlangen," Germany: Publicis., 2002, pp. 53-114.
- [8] J. P. Laude, "DWDM Fundamentals, Components, and Applications. Norwood," MA: Artech House, 2002, pp. 147-205.
- [9] CA16-Type 2.5 Gbit/s Translight™ DWDM Transponder with 16-Channel 155 Mbit/s Multiplexer/Demultiplexer, Mar. 2001. Advanced Data Sheet, DS01-120 OPTO.

- [10] OC-48/STM-16 Transponder Monitor, Alarm and Control Circuits, Aug. 2001. Tech. Note, TN01-007 OPTO.
- [11] Jitter and Timing Analysis Software TDSJIT1 (2002, Oct.). [Online]. Available: [http://www.tek.com/site/ps/0,,55-12908-INTRO\\_EN,00.html](http://www.tek.com/site/ps/0,,55-12908-INTRO_EN,00.html)
- [12] Press Release. Triquint Semiconductor (2002, Oct.). [Online]. Available: <http://www.triquint.com/investors/press/dspPressRelease.cfm?pressid=138>
- [13] CB64-Type DWDM Compatible 10 Gbit/s Transponder with 16-Channel 622 Mbit/s Multiplexer/Demultiplexer (2003, Mar.). [Online]. Available: [http://www.triquint.com/company/divisions/telecom\\_datacom/docs/CB64-type/CB64-Type.pdf](http://www.triquint.com/company/divisions/telecom_datacom/docs/CB64-type/CB64-Type.pdf)
- [14] Reference Document for Pluggable DWDM Transceivers Modules (2003, May). [Online]. Available: [http://www.hotplugwdm.org/Hot\\_Plug\\_MSA\\_PubDocV3.pdf](http://www.hotplugwdm.org/Hot_Plug_MSA_PubDocV3.pdf)
- [15] N. Sawyer, SONET Scramblers/Descramblers, Application Note XAPP-651, Nov. 2002. Xilinx [Online].
- [13] N. Sawyer, Word Alignment and SONET/SDH Deframing, Application Note XAPP-652, Nov. 2002. Xilinx [Online]

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยของผู้เขียนที่ได้รับการตีพิมพ์



# วิศวกรรมลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ปีที่ 25 ฉบับที่ 1

มีนาคม 2551

## วิศวกรรมโทรคมนาคม

1. การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสียบนเครือข่าย WLAN ด้วยโปรแกรมเลียนแบบโครงข่าย Network Simulation 2 1  
*กฤตมุข เจียมสุขสุจิตต์ กอบชัย เดชหาญ*
2. การทดสอบประสิทธิภาพขณะวิกฤตของ FTTH 7  
*ธนาชัย ปิยะศิรินันท์ กอบชัย เดชหาญ*
3. การเฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำที่จะผ่านเข้าไปยังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว 13  
*ทวีศักดิ์ กริโส สุวิพล สิริชีวะภาค*

## วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบบริดจ์ความถี่สูงที่ป้อนโดยวงจรรีโซแนนท์อนุกรม 19  
*ชัยพร อัดโตดตฺร*
5. การวิเคราะห์ฟลลด์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC 25  
*วรวุฒิ พงษ์ชัยศรีกุล จิระศักดิ์ พัฒน์เจริญ อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล อานันท์วัฒน์ คุณากร*

## วิศวกรรมเคมี

6. ผลของสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะของเอกซ์ทราคท์ที่ได้จากปลายข้าวโดยใช้เครื่องเอกซ์ทราคเตอร์แบบสกรูเดี่ยว 31  
*สันติ ทิทธิบุตร มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์*
7. เมโซพอร์สคาร์บอนแเจล : ปัจจุบันและอนาคต 37  
*เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒน์วงศ์ สุรียัภรณ์ ตันติธัญญกุล ชนิตา เวลุนุสิทธิ์ ฉัษพล ภักดีอาษา*
8. Kinetic Reaction Analysis by Model-Free Method for EVA-Based Encapsulant for Photovoltaic Modules 42  
*Thanomkhwan Thaworn Surat Areerat*

## วิศวกรรมเครื่องกล

9. การวิเคราะห์และออกแบบโครงร่างเครื่องเจาะแผ่นพลาสติกโดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ 47  
*ณัฐวุฒิ เตไปวา พิศาล มูลอำคา*

## วิศวกรรมอุตสาหกรรม

10. การประยุกต์ใช้ระบบผลิตแบบลีนร่วมกับการจัดการแบบโซ่อุปทาน 52  
*ศรัทธา เหล่าศิริหงษ์ทอง คลิตา ยิ่งสูง ทศพล เกียรติเจริญผล*

# การทดสอบประสิทธิภาพขณะวิกฤติของ FTTH

## Critical Performance Testing of FTTH

ธนาชัย ปิยะศิรินันท์ กอบชัย เดชหาญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบประยุกต์ประสิทธิภาพเพื่อการใช้งานจริงขณะเกิดวิกฤติของระบบ FTTH หรือ Fiber to the Home โดยการออกแบบระบบโครงข่ายสำหรับการสร้างระบบ FTTH โดยการใช้ระบบไฟเบอร์ออฟติก และระบบเมนเฟรม ของศูนย์คอมพิวเตอร์แห่งหนึ่ง เพื่อเป็นอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ ซึ่งจะเหมือนกับการทำงานจริงมากที่สุด โดยตั้งเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ในการทดสอบ ทั้งการใช้งานปกติ และการใช้งานเมื่อเกิดวิกฤตความผิดพลาด แล้ววัดค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบ ออกมาศึกษาและวิเคราะห์ ถึงความเป็นไปได้ และเงื่อนไขในการนำมาใช้จริงเพื่อการพาณิชย์

### Abstract

This paper presents the critical performance testing of FTTH or Fiber to the Home. To use optical fiber systems and mainframe system of computer center to implement the virtual system approach the real world and create factors for variable testing and kept data of output result for studying and analyzing to real use with commercial.

### 1. บทนำ

ในสมัยก่อนที่ ใช้เพียงโทรศัพท์บ้านติดต่อสื่อสารกันอย่างสะดวก การสื่อสารจึงเป็นการสื่อสารแบบง่ายๆ สื่อสารกันเพียงแค่เสียง จึงมีความต้องการในการใช้พื้นที่ เส้นทางในการสื่อสาร หรือเรียกอีกอย่าง ได้ว่า แบนวิธด์ (Bandwidth) น้อย จึงพอเพียงกับการสื่อสารผ่านเส้นทางที่เป็นลวดทองแดง แต่เมื่อมีเทคโนโลยี อินเทอร์เน็ต เกิดขึ้น การพัฒนาการส่งข้อมูลมากขึ้น ตลอดจนความต้องการในการส่งข้อมูลได้เร็วแม่นยำ มีมากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาระบบการส่งข้อมูลแบบใหม่ๆ ขึ้นมาเพื่อรองรับ แต่การพัฒนานั้น ไม่ใช่เรื่องง่ายๆเลย เนื่องจากว่า ติดอยู่กับปัญหาบางอย่าง เช่น ระบบสายทองแดงที่มีอยู่แล้วมีมากมาย อีกทั้งยังทั่วถึง จึงไม่คุ้มกับการลงทุนวางระบบใหม่ทั้งหมด จึงได้เกิด ระบบ ADSL (Asynchronous Digital Subscriber Line) ขึ้นเพื่อเป็นการ

แก้ไขปัญหาดังกล่าว แต่สุดท้าย ก็ไม่เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงต้องใช้ เทคโนโลยี เส้นใยแก้วนำแสง มาใช้ ตามเครือข่าย หรือ node ต่างๆ ในบทความฉบับนี้ จะกล่าวถึง ระบบที่ใช้เส้นใยนำแสง สื่อสารข้อมูล ถึงที่บ้านของผู้ใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลไปอีกขั้น

### 2. ระบบ FTTH

โครงสร้างพื้นฐานของสายส่งที่ใช้ในระบบ FTTH ถูกกำหนดให้เป็นเส้นใยนำแสงตลอดเส้นทาง จากผู้ให้บริการ ไปจนถึงบ้านผู้เช่า ทำให้ได้ท่อนำสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ สามารถส่งข้อมูลปริมาณมากๆ ได้ในคราวเดียวกัน ระบบโครงข่ายสื่อสารที่เป็นเส้นทางหลักขนาดใหญ่หรือแบ็กโบน (backbone) ต่างก็ใช้สายส่งที่เป็นเส้น

ใยนำแสงแทบทั้งสิ้น ดังนั้น การนำเส้นใยนำแสงมาใช้ในการเข้าถึง (access) ผู้เช่าโดยตรง ย่อมสามารถรองรับความเร็วในการสื่อสารข้อมูล ได้ทั้งสิ้น ในระบบ FTTH ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลจะเริ่มต้น ที่ 100 Mb/s (บางที่ก็เริ่มที่ 150 Mb/s) ซึ่งถือว่าเร็วกว่า ADSL ถึง 100 เท่า (เมื่อเปรียบเทียบกับ 1 Mb/s) โดยหลักการแล้ว FTTH ได้ถูกออกแบบ ให้ทำงานร่วมกับ ระบบ ATM (Asynchronous Transfer Mode) ได้ด้วย ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้เพิ่มขึ้นเป็น 622 Mb/s ยิ่งไปกว่านั้น โครงข่ายเส้นใยนำแสงมีส่วนประกอบของอุปกรณ์ ชนิดพอน (PON - Passive Optical Network) ซึ่งเป็นลักษณะของโครงข่ายที่มีส่วนของ อุปกรณ์แบบพาสซีฟ (passive) คือสามารถทำงานได้โดยไม่ต้อง ป้อนกำลังงานจากภายนอก ซึ่งอุปกรณ์ชนิดพอน (PON) สามารถ รองรับการทำงานในรูปแบบต่าง ๆ ที่อยู่ในโครงข่ายได้ในเวลาเดียวกัน การออกแบบให้ PON มีอัตราการใช้งาน (sharing ratio) ลดลง หรือการเพิ่มความยาวคลื่นแสงที่เป็นคลื่นพาห์ สามารถทำให้ FTTH สื่อสารข้อมูลที่มีความเร็วขนาด 2.488 Gb/s ได้อย่างสบาย

ข้อจำกัดของระบบ FTTH คือ ราคาของอุปกรณ์ต่อเชื่อม รวมถึงสายไฟเบอร์นั้น มีราคาแพงกว่าสายทองแดง และการติดตั้งจะต้องระวังไม่ให้สายไฟเบอร์หักหรืองอมากเกินไป

### 3. สมมุติฐานและวัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

สมมุติฐานและวัตถุประสงค์ของ การทำวิจัยชิ้นนี้ คือ ศึกษาผลกระทบของประสิทธิภาพ และการทำงานของระบบ FTTH เมื่อมีความผิดพลาดอย่างวิกฤติทั้งที่เกิดขึ้นจากตัวระบบเอง และ ที่เกิดขึ้นมาจากสาเหตุอื่น โดยทำการทดสอบทั้งในระบบที่มีการป้องกันเป็นอย่างดี และระบบที่ไม่มีการป้องกัน และทำการวิเคราะห์ และสรุปผล เพื่อให้ได้ทราบถึงการทำงานของระบบป้องกัน และผลกระทบของข้อมูลที่มีการส่งผ่านอยู่ในระบบ

การวิจัยชิ้นนี้ เป็นการสร้างระบบ FTTH จำลอง โดยการสร้างจากระบบ Fiber Optic ของหน่วยงานแห่งหนึ่ง โดยจะใช้ศูนย์คอมพิวเตอร์จำนวน 2 sites คือ Head Quarter Site และ Disaster Recovery Center Site หรือ

DRC Site ซึ่งแทนศูนย์คอมพิวเตอร์ ทั้ง 2 site นี้ แทน 2 Providers ที่ติดต่อกันและแต่ละ Provider นั้นจะมี Optical Network เป็นของตัวเองซึ่งในแต่ละ Network นั้น จะทำหน้าที่ เป็นเครือข่ายที่ สมมุติให้เป็น ระบบ FTTH ที่เชื่อมต่อจาก Provider ไปที่ Remote Node และ ไปสู่ users ต่างๆ ตามระบบ

## 4. การทดสอบระบบ

### 4.1 การทดสอบเงื่อนไขที่ 1

การทดสอบเมื่อมีแพคเกจข้อมูล เข้ามาที่ระบบมากเกินไประบบ จะเกิดปัญหาอย่างไร

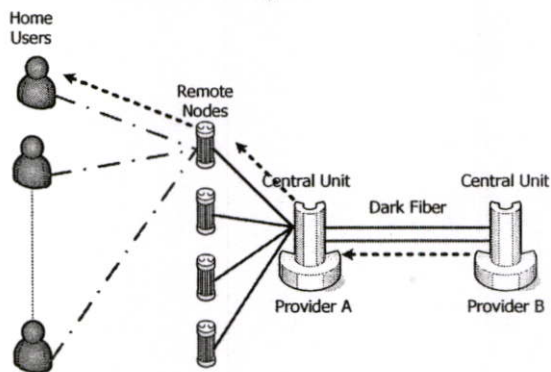


Diagram of Reproduce FTTH Network

### รูปที่ 1 แสดงระบบ FTTH ในการทดสอบเงื่อนไขที่ 1

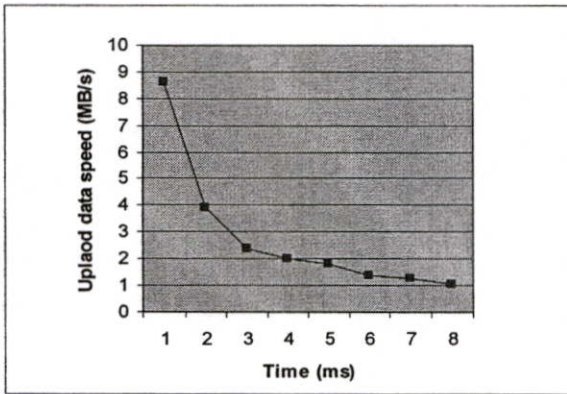
#### คำอธิบายการทดสอบ

การทดสอบนี้ เป็นการทดสอบเงื่อนไขที่จำลองเหตุการณ์เมื่อระบบ FTTH มีการส่งผ่าน packet ที่เกินกว่าที่ แบนวิคท์ของระบบ จะรับได้ วิธีการทำการทดสอบ ทำได้โดยการที่ ทดลองส่งข้อมูลหลายๆ เช่นการเข้าใช้ข้อมูลจากหลาย ๆ users โดยผ่านทางช่องทางเดียวกัน ซึ่งในระบบจำลองนี้ จะสมมุติให้ทุก users ทำการ download เพิ่มข้อมูล เพิ่มเดียวกัน บน Provider#B แล้วผ่านระบบใยแก้วนำแสง หรือ Dark Fiber ไปที่ Provider#A และต่อเข้าไปที่ remote node#1 ของทางฝั่ง Provider#A แล้วเข้าไปที่ users ทั้ง 8 users ที่เรียกเพิ่มข้อมูลนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 1

**ผลการทดสอบ**

**ตารางที่ 1** แสดงผลการทดสอบเงื่อนไขที่ 1

Number of access users (for same data)	Upload data speed /user (MB/s)
1	8.625
2	3.897
3	2.405
4	2.024
5	1.783
6	1.354
7	1.296
8	1.075



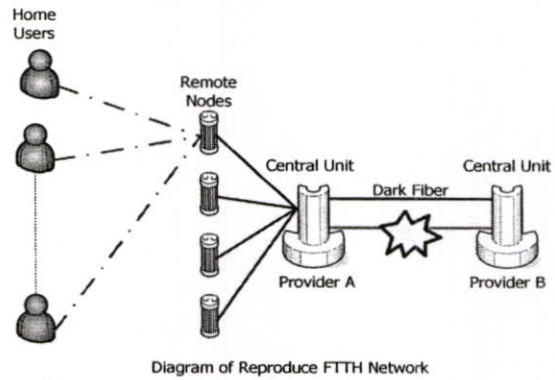
**รูปที่ 2** แสดงกราฟผลการทดสอบเงื่อนไขที่ 1

**วิเคราะห์ผลการทดสอบ**

ผลปรากฏว่า เมื่อใช้งานเส้นทางการส่งสัญญาณเพียงช่องสัญญาณเดียวด้วยข้อมูลมากานั้น มีผลกระทบทำให้การส่งข้อมูลช้าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากระบบนี้ไม่มีระบบที่ช่วยในเรื่องการแชร์การส่งข้อมูล ซึ่งอาจจะต้องใช้ Software ในการจัดการ ทำให้แต่ละเส้นทางส่งข้อมูลอย่างเป็นเอกเทศ แต่สำหรับการทดสอบนี้ ถ้าทำการแบ่ง wavelength ให้กับ เส้นทางการส่ง มากกว่า 1 wavelength เพื่อให้เส้นทางการส่งเส้นทางนี้ มี bandwidth มากขึ้น ก็จะเป็นการแก้ไขปัญหากเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้

**4.2 การทดสอบเงื่อนไขที่ 2**

การทดสอบในสถานการณ์ที่ มีความผิดพลาดขึ้นระหว่างเส้นทางการเดินทางของ ระบบ Dark fiber ที่อยู่ระหว่าง Provider ทั้งสอง



**รูปที่ 3** แสดงการทดสอบเงื่อนไขที่ 2

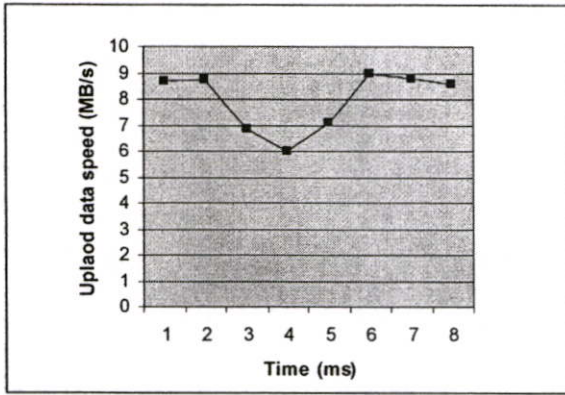
**คำอธิบายการทดสอบ**

การทดสอบนี้ เป็นการทดสอบ เมื่อระบบ Dark fiber เกิด fail ขึ้นมา ซึ่งจะเกิดได้โดยยาก เนื่องจากทางบริษัทเจ้าของเส้นทางได้ดูแลคืออยู่แล้ว แม้กระนั้น ที่ทำการทดสอบระบบ ก็ยังมี เส้นทางสำรองของอีกบริษัทหนึ่งเพื่อใช้ในกรณีฉุกเฉิน ซึ่งถ้าระบบ Dark fiber เกิด fail ขึ้นมา ทาง Head quarter site (ProviderA) และ DRC site (ProviderB) ก็จะไม่สามารถส่งผ่านข้อมูลระหว่างกันได้ การทดสอบนี้ จึงเป็นการทดสอบเงื่อนไขที่จะทดสอบ และศึกษาผลกระทบของระบบ เมื่อมีการ fail ของระบบ Dark fiber และมีกร redundance ของเส้นทางการส่งผ่านข้อมูล ไปที่เส้นทาง Dark fiber สำรองที่เตรียมไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3

**ผลการทดสอบ**

**ตารางที่ 2** แสดงผลการทดสอบเงื่อนไขที่ 2

Time (ms)	Upload data speed (MB/s)
1	8.685
2	8.755
3	6.877
4	5.988
5	7.102
6	8.998
7	8.786
8	8.568



รูปที่ 4 แสดงกราฟผลการทดสอบเงื่อนไขที่ 2

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อศึกษา ประสิทธิภาพ ของการรับส่งสัญญาณ เมื่อมีการ Fail ของ Dark fiber ซึ่งจากผลการทดสอบเงื่อนไขที่ได้นั้น ระบบจะทำการสลับเส้นทางการส่งสัญญาณ จากเส้นทางเดิมของ vendor หนึ่ง ไปที่อีก vendor หนึ่ง ทันทีเพราะจากการทำการทดสอบนั้น ได้ทำการ ส่ง ข้อมูลผ่าน ระบบ Dark Fiber ไปอย่างต่อเนื่อง จึงต้องใช้เวลาในการรอให้เกิดความผิดพลาดค่อนข้างนาน แต่เมื่อ ระบบ Dark fiber link ที่ใช้อยู่เป็น Link หลัก คือ Link ของทาง TOT vendor เกิดความเสียหาย( $t=2ms$ ) และ Link ของทาง Violin vendor สลับเข้ามาทำงานแทน( $t=6ms$ )นั้น ข้อมูลที่กำลังส่งผ่านอยู่ ไม่ได้เกิดความผิดพลาด ในการส่งข้อมูลแต่อย่างใด

4.3 การทดสอบเงื่อนไขที่ 3

การทดสอบในสถานการณ์ที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่เส้นทางการส่งข้อมูล ที่อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node ที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Alternate path)

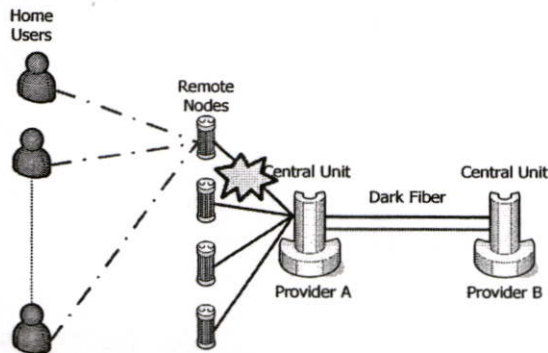


Diagram of Reproduce FTTH Network

รูปที่ 5 แสดงการทดสอบเงื่อนไขที่ 3

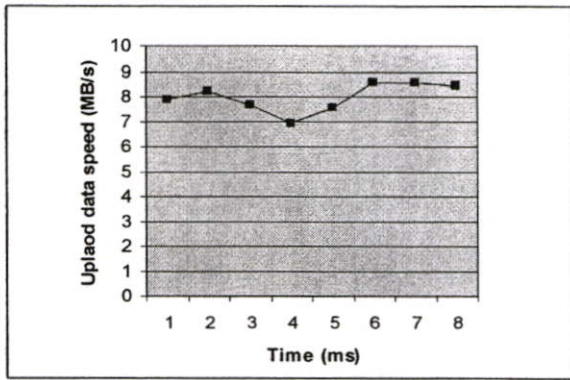
คำอธิบายการทดสอบ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อศึกษา ประสิทธิภาพ และผลกระทบของระบบ เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่ เส้นทางการส่งข้อมูลระหว่าง Provider และ Remote node ซึ่งในระบบที่ทำการทดสอบนี้ เส้นทางการกล่าว มีอยู่ 2 ลักษณะ ได้แก่ เส้นทางการส่งผ่านข้อมูล ที่อาจจะส่งผ่านข้อมูลไปยังอุปกรณ์ที่มีความสำคัญ จึงได้มีการป้องกันความผิดพลาดเนื่องจาก Link fail ซึ่งจะมีการสร้างเส้นทางการส่งข้อมูลสำรอง (Alternate path) ไว้ เมื่อมีการผิดพลาดของเส้นทางการส่งข้อมูลที่ใช้อยู่ ก็จะมีการสลับเส้นทางการเดิน ไปอีกเส้นทางหนึ่งทันที และอีกลักษณะหนึ่งก็คือ เส้นทางที่ไม่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Single path) ซึ่งจะไม่มีเส้นทางการส่งข้อมูลสำรอง และในการทดสอบนี้ จะทำการทดสอบในเส้นทาง ที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Alternate path) โดยจะวัดประสิทธิภาพ และผลกระทบของการส่งข้อมูล เมื่อเส้นทางการส่งข้อมูลที่อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node เกิดการ fail โดยที่ระบบ จะทำการสลับเส้นทางการส่งสัญญาณมาที่เส้นทางการส่งสำรอง (Alternate path) โดยจะศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการสลับเส้นทางการส่งข้อมูล และผลกระทบของข้อมูลเมื่อมีการสลับเส้นทางการส่งข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 5

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบเงื่อนไขที่ 3

Time (ms)	Upload data speed (MB/s)
1	7.899
2	8.245
3	7.665
4	6.887
5	7.568
6	8.557
7	8.576
8	8.445



รูปที่ 6 กราฟแสดงผลการทดสอบเงื่อนไขที่ 3

## วิเคราะห์ผลการทดสอบ

สำหรับการทดสอบนี้ซึ่งเป็นการทดสอบในสถานการณ์ที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่เส้นทางการส่งข้อมูลที่อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node ที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง (Alternate path) นั้น จากการทดสอบพบว่า การส่งผ่านข้อมูลผ่านระบบดังกล่าวจะไม่มีผลต่อข้อมูลที่กำลังส่งผ่านอยู่ เนื่องจากการทดสอบนี้เป็นการทดสอบระบบที่มีระบบเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง จึงไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อการส่งข้อมูลเมื่อมีความผิดพลาดต่อเส้นทางการส่งข้อมูลที่อยู่ระหว่าง Provider และ Remote node โดยช่วงเวลาที่สัญญาณเริ่มขาดคือ เวลา  $t=2\text{ms}$  และเวลาที่เส้นทางการส่งทำงานคือ  $t=6\text{ms}$  ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการสลับสายนั้น ไม่มีผลต่อการส่งข้อมูล เนื่องจากเส้นทางการส่งสัญญาณอีกเส้นหนึ่ง มีการ standby ไว้พร้อมอยู่แล้ว แต่ข้อเสียของระบบนี้จากการทดสอบก็คือ จะต้องเสียเส้นทางเดินของข้อมูลไปอีกเส้นหนึ่ง โดยที่ไม่ได้ประโยชน์ทางด้านความเร็ว และปริมาณในการส่งข้อมูลที่มากขึ้นเลย

## 4.4 การทดสอบเงื่อนไขที่ 4

การทดสอบในสถานการณ์ที่มีการผิดพลาดในการส่งข้อมูล อันเนื่องมาจาก Link ระหว่าง Remote node และ user ที่มีระบบ failover path และระบบ Load Balancing เกิด fail ขึ้นมา

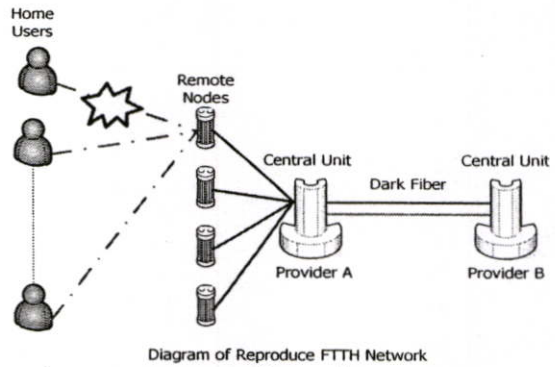


Diagram of Reproduce FTTH Network

รูปที่ 7 แสดงการทดสอบเงื่อนไขที่ 4

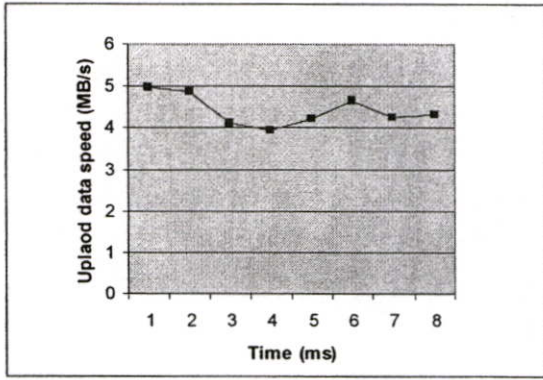
## คำอธิบายการทดสอบ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบระบบเมื่อมีการผิดพลาดในการส่งข้อมูล อันเนื่องมาจาก Link ระหว่าง Remote node และ user fail ซึ่ง Link ระหว่าง Remote node และ user นั้นในระบบที่ทำการทดสอบนั้น มีอยู่ 2 ลักษณะ คือ Link ที่มีระบบ failover path ซึ่งจะเป็นระบบที่มีเส้นทางการส่งข้อมูล 2 เส้นทาง เข้าที่ user เดียว โดยทั้งสองเส้นทางจะทำหน้าที่ไปพร้อมๆกัน โดยช่วยกันทำงาน เรียกว่า ระบบ Load Balancing โดยจะได้อัตราการส่งข้อมูลเป็นสองเท่า อีกลักษณะหนึ่งได้แก่ระบบที่ไม่มีระบบ failover path ซึ่งจะทำให้การส่งผ่านข้อมูลเพียงเส้นทางเดียว ซึ่งในการทดสอบนี้ จะทำการทดสอบระบบที่มีระบบ failover path โดยจะศึกษาประสิทธิภาพ และผลกระทบของเส้นทางการส่งผ่านข้อมูล เมื่อมีความผิดพลาด หรือ link fail ในเส้นทางการส่งข้อมูลเส้นหนึ่งในสองเส้นที่ทำงานคู่กัน ดังแสดงในรูปที่ 7

## ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบเงื่อนไขที่ 4

Time (ms)	Upload data speed (MB/s)
1	4.988
2	4.873
3	4.122
4	3.945
5	4.234
6	4.675
7	4.254
8	4.303



รูปที่ 8 กราฟแสดงผลการทดสอบเงื่อนไขที่ 4

#### วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การทดสอบนี้ เป็นการทดสอบในสถานการณ์ที่มีการผิดพลาดในการส่งข้อมูล อันเนื่องมาจาก Link ระหว่าง Remote node และ user ที่มีระบบ failover path และ ระบบ Load Balancing เกิด fail ขึ้นมา ซึ่งเดิมแล้วระบบนี้ เป็นการใช้เส้นทางในการส่งสัญญาณ สองเส้นทาง ในการทำหน้าที่เป็นเส้นทางการส่งสัญญาณสำรอง แล้วยังเส้นทางการส่งสัญญาณที่ช่วยกันทำงาน ทำให้ สามารถส่งข้อมูลได้มากขึ้นอีกด้วย ในการทดสอบเมื่อกระทำการที่เหมือนทำให้ เส้นทางการส่งสัญญาณเส้นหนึ่งขาดลง( $t=2\text{ms}$ ) ข้อมูลทั้งหมดที่ ส่งผ่าน อยู่ในเส้นทางการส่งสัญญาณเส้นนั้น ก็จะเปลี่ยนมาเดินทางในเส้นทางการส่งอีกเส้นหนึ่ง( $t=6\text{ms}$ ) ซึ่งก็มีผลทำให้ ประสิทธิภาพ ในการส่งผ่านข้อมูลโดยรวม น้อยลงไปครั้งหนึ่ง แต่ถึงน้อยลงอย่างไร ก็จะใกล้เคียงกับการส่งข้อมูลในระบบที่ไม่มีระบบ failover path และ ระบบ Load Balancing

#### 5.สรุป

จากการวิเคราะห์ ผลการทดสอบทั้งหมดข้างต้น พบว่าเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลสูง ซึ่งเป็น เพราะการลดทอนที่มีน้อย เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้กันอยู่เดิม และจากการทดสอบต่อมาจึงทำให้ได้รู้ว่า เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นกับระบบ เช่น ในกรณี การทดสอบเงื่อนไขที่ 1 ที่มีความผิดพลาดที่ระบบ Dark Fiber ระบบ ยังมีความสามารถที่จะปรับเปลี่ยนเส้นทางการ ส่งสัญญาณ ไปอีกเส้นทางหนึ่งโดยทันทีโดยที่ไม่มีผลกระทบใดๆต่อระบบ และเมื่อทำการทดสอบเงื่อนไขที่ 2 และการทดสอบต่อมา ทำให้ทราบได้ว่า สามารถ

สร้างระบบและออกแบบระบบที่กำหนดและปรับเปลี่ยนในเรื่องของ ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือ ของข้อมูล หรือไม่กี่สามารถ จะจำกัดในเรื่องของงบประมาณได้ เมื่อไม่ต้องการความน่าเชื่อถือของระบบมากนัก อีกทั้ง ยังรองรับ เทคโนโลยี การรวมแบบใช้ความยาวคลื่นแสง (Wave Length Division Multiplexing หรือ WDM) ที่ใช้การแบ่งความยาวคลื่นแสงออกจากกันเพื่อส่งไปยังสายส่งเดียวกันได้ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ส่งออกไปนั้น มี Bandwidth ที่มากขึ้นเป็นทวีคูณ ซึ่งแนวทางการพัฒนาระบบ FTTH นี้ ยังสามารถพัฒนาไปได้อีกหลายทางและอีกไกล อีกทั้ง ในปัจจุบันนี้ ก็มีแนวคิดที่จะนำระบบ FTTH มาใช้กันแล้ว

#### 6.เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Aloisio, F. Cevenini, V. Izzo, "An Approach to DWDM for Real-Time Applications," IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 51, No. 3, pp. 526-531, June 2004
- [2] F. Jia, B. Mukherjee, J. Iness, "Scheduling variable-length messages in a single-hop multichannel local lightwave network," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 3, pp. 477-488, Aug. 1995.
- [3] D. Sadot, E. Boimovich, "Tunable optical filters for dense WDM networks," IEEE Commun. Mag., vol. 36, pp. 50-55, Dec. 1998.
- [4] K. Kim, "On the evolution of PON-based FTTH solutions," Inform. Sci., vol. 149/1-2, pp. 21-30, Jan. 2003.
- [5] I. Van de Voorde and C. Van de Plas, "Full service optical access networks: ATM transport on passive optical networks," IEEE Commun. Mag., vol. 35, pp. 70-75, Apr. 1997.
- [6] T. Koonen, T. Muys, C. Van der Plaats, S. de Groot, H. Kenter, "TOBASCO: An innovative approach grading CATV fiber-coax networks for broadband interactive services," IEEE Commun. Mag., vol. 4, pp. 76-81, Apr. 1997.

ภาคผนวก ข

บทความบางส่วนที่ผู้เขียนใช้ในการอ้างอิง

# FTTH Standards, Deployments and Research Issues

David Gutierrez<sup>1</sup>, Kyeong Soo Kim<sup>2</sup>, Salvatore Rotolo<sup>2</sup>, Fu-Tai An<sup>1</sup>, Leonid G. Kazovsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Photonics and Networking Research Laboratory, Stanford University

<sup>2</sup>Advanced System Technology, STMicroelectronics

## Abstract

In this paper we investigate the current status of Fiber-to-the-Home Passive Optical Networks. We start by reviewing the driving forces behind the push for broadband from the customer and service provider sides. PONs are currently preferred for new FTTH deployments for a variety of reasons; we review their standards, new technologies and deployment plans in the United States, Japan and Korea. We then describe SUCCESS-HPON, a next-generation optical access architecture that allows a smooth transition from TDM to WDM-PON. We finalize by summarizing what we believe are the main open research issues in this area.

**Keywords:** FTTH, PON, WDM-PON.

## 1. Introduction

The driving forces for Fiber-to-the-Home/Curb/Node (FTTX) technologies in the telecom business can be better understood by briefly reviewing the history of broadband access. Traditionally, the two most common electronic communication services have been standard analog broadcast or cable TV and Plain Old Telephone Service (POTS). These two services were provided by separate infrastructures that coexisted peacefully for many years. The advent of the WWW created a marked increase in the demand of home data communication services. Starting about a decade or so ago, ILECs and MSOs started satisfying this demand in the form of Internet dial-up and DSL services the former, and HFC cable-modem services the latter, and thus started competing directly for customers.

The bandwidth offered by DSL and HFC networks has been enough for users' demands for now. However, the nature of the traffic that flows through the Internet is changing. New applications require higher bandwidths, support for constant-bit-rate (CBR) streaming media, symmetric data rates (e.g., for peer-to-peer file transfer), low delay for interactive applications and security. The Internet, originally designed to provide a best-effort service and make use of statistical multiplexing, will need many architectural upgrades in order to accommodate these new demands [1].

One of the main current Internet issues is the last-mile bottleneck. While data rates in LANs, MANs and WANs range in the 100 Mbit/s - 10 Gbit/s, in broadband access they range in the 100 Kbit/s to a few Mbit/s. This bottleneck prevents the development of high-bandwidth interactive consumer services.

ILECs, MSOs and others are all looking into ways to satisfy new broadband access demands. The Holy Grail is two-fold: First, have Fiber-to-the-Home (FTTH) connectivity to the customer premises; then, be able to provide voice, video and data, the so-called *triple-play*, over this single media. The ways to attain this Holy Grail are not at all clear, given intense competition, varying regulation and the uncertainty of customer take-rates [2]. New technologies, such as vDSL2 and WiMax, increase the array of possibilities, but also the uncertainty on the best way to proceed. It is clear, though, that none of these other technologies can provide the bandwidth that fiber does, making it the ideal medium for high-bandwidth applications and/or as the backhaul of wireless and DSL networks.

Several technologies can be used for FTTX. The most straightforward, but most expensive, is through a point-to-point (P2P) network with active components from the Central Office (CO) to the premises. Limited deployments have used this technology (e.g. in Japan), but its costs are high: P2P networks need a separate fiber for each user and/or maintenance of the active elements in the distribution network.

A good fraction of the installation and maintenance costs of access networks is due to active elements, when they are present. Because of this, Passive Optical Networks (PONs), those in which the distribution network has only passive elements, are currently viewed as the best alternative for FTTX. Most of the operating costs of the ILECs currently come from copper network maintenance; some argue that ILEC's operating costs can actually be reduced by aggressively deploying FTTH [3].

## 2. PONs

PONs have a tree topology in order to maximize their coverage with minimum network splits, thus reducing optical power loss. This is important, since a passive distribution network has no amplifiers or regenerators.

There are three standardized versions of PON: Ethernet PON (EPON), Broadband PON (BPON) and Gigabit PON (GPON). They all use two wavelengths, one for downstream and one for upstream data traffic. These wavelengths are time-shared among users, making them Time Division Multiplexed PONs (TDM-PONs). The total bandwidth available per user is thus limited by this time-sharing, especially if the connection is going to be used for CBR applications. A third wavelength can optionally be used for downstream analog video broadcasting (RF).

Wavelength Division Multiplexing (WDM) can be used in PONs to increase the overall throughput. The cost is, however, usually much higher due to the use of tunable and wavelength-sensitive optical components. WDM-PONs are regarded as the next step after TDM-PONs, and are currently mostly in research phase. Korea Telecom (KT) has, however, announced the launch of a 100Mbit/s WDM-PON in 2005. Table 1 compares some of the key characteristics of PONs.

	EPON	BPON	GPON	WDM-PON
Standard	IEEE 802.3ah	ITU G.983	ITU G.984	None
Framing	Ethernet	ATM	GFP/ATM	Protocol Independent
Maximum Bandwidth	1 Gbit/s	622 Mbit/s	2.488 Gbit/s	1-10 Gbit/s per channel
Users/PON	16	32	64	100's
Average Bandwidth per User	60 Mbit/s	20 Mbit/s	40 Mbit/s	1-10 Gbit/s
Video	RF / IP	RF	RF / IP	RF / IP
Estimated Cost	Lowest	Low	Medium	High

Table 1. PON Comparison.

## 2.1. BPON and GPON

In 1995, North American operators joined efforts in the FSAN committee to draft standards for PONs. The results of their efforts were later standardized by the ITU in the G.983 and G.984 recommendations.

The underlying transmission technology for the first set of standards is ATM cell-based. Because of this, they were at first named ATM PON (APON). The name was later changed to Broadband PON (BPON) to emphasize that they were not limited to ATM traffic. The BPON standards specify from the physical layer all the way up to OAM. The maximum speeds are 622 Mbit/s downstream and 155 Mbit/s upstream. Many manufacturers, including AFC, Alcatel, Calix, Motorola and Terawave, currently produce BPON products.

Since the encapsulation of IP traffic in ATM cells creates a high overhead, or *cell-tax*, and in an effort to make a more flexible standard, GPON was developed. In GPON, the encapsulation is done using the Generic Framing Protocol, a flexible method for both bursty and CBR traffic. The GPON standards are in development, having the physical and transmission layers already well defined. Since the OAM and other higher-layers have not been defined yet in the standards, operators are reluctant to deploy them for now. Flexlight and Optical Solutions are some of the current manufacturers of GPON equipment.

**Deployments.** Most of the North American operators have been involved in the development of the BPON and GPON standards. In their announced current and future FTTX deployments, they plan to use equipment based on these standards, because of their flexibility to support CBR applications and to adapt to their previous TDM-based infrastructure (e.g., T1 lines).

Verizon, SBC and Bellsouth issued a joint request for FTTX proposals in late 2003. Bellsouth has opted for FTTC deployments with Gigabit Ethernet (GigE) feeder links instead of PONs; SBC has decided to go for B/GPON FTTH in new housing complexes, while deploying GigE FTTN+DSL in existing units. Verizon has decided to go for B/GPON FTTH in all cases. SBC expects to have 1M B/GPON FTTH and 17M FTTC+DSL customers by 2007. Verizon had 1M customers passed by the start of 2005, and expects to have 3M by year's end, but the take-rate is not public.

In Japan, NTT had been deploying BPON for some years and it actually had about 100k customers by 2004. However, NTT intends to shift its customers to EPON for reasons explained below.

## 2.2. EPON

A separate PON standardization effort was started based on the IEEE Ethernet protocol. The idea here was to make use of the huge base of low-cost Ethernet designs to allow for simpler, less expensive technology to be used in PONs. The downside is that Ethernet is mostly engineered for bursty data and not for CBR or TDM services. EPON was developed and formalized in the IEEE 802.3ah standards. The scope of these standards is limited to the physical transmission layer and thus the interoperability of the higher layers is not guaranteed. The maximum rate for EPON is nominally 1.25 Gbit/s, but due to the use of 8B/10B coding, it is effectively 1 Gbit/s.

**Deployments.** Companies such as Alloptic, Centillium, Passavé and Teknovus produce EPON products, mostly for the Asian market. In Japan, both NTT and KDDI needed, due to intense competition, to

deploy Gigabit FTTH services and could not wait for the GPON standards to be fully developed. In addition, providing broadcast video or POTS services is not a top priority for them due to regulation issues. Thus, they decided to shift to EPON for new and old customers. NTT has currently about 1M FTTH subscribers (including PON and P2P), which are going to be progressively switched to EPON.

## 2.3. WDM-PONs

WDM-PONs, as we mentioned above, use expensive components and, unlike long-haul networks, their cost is shared by only a few tens of users per network. However, they can provide Gbit/s rates to each user, which TDM-PONs cannot. The issue is how to do this in a cost-efficient manner.

**Deployments.** In Korea, current vDSL systems provide 54 Mbit/s. The Korean government has a residential Internet connectivity rating system. In order to attain higher home connectivity ratings, KT has decided to go for 100 Mbit/s guaranteed per user with WDM-PONs, with a service scheduled to start later in 2005. The details of their architecture are not public.

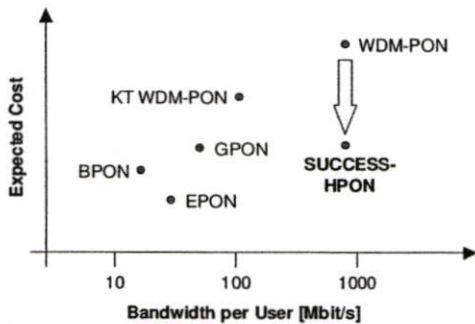


Figure 1. Relative costs and bandwidths of PONs.

## 2.4. Hybrid TDM/WDM-PONs

The deployment of TDM-PONs has started. It is expected that by 2009 the number of users will be more than 10M worldwide [4]. Given this installed base and the increasing bandwidth demands, the issue will be how to migrate to WDM-PONs in a flexible and cost-efficient manner. Some Hybrid TDM/WDM-PONs have been proposed, including Samsung's Hybrid PON [5] and Stanford's SUCCESS-DWA [6] and SUCCESS-HPON [7]. In this paper we will discuss the latter.

### 2.4.1. SUCCESS-HPON

The Stanford University aCESS - Hybrid TDM / WDM-PON [7], or SUCCESS-HPON, architecture

provides a smooth migration path from TDM to WDM-PONs. Figure 1 illustrates the place of SUCCESS-HPON among other PONs: it provides bandwidths comparable to regular WDM-PON, but at lower costs. This is achieved by (1) eliminating the need for lasers at the customer's premises and (2) sharing tunable components at the CO.

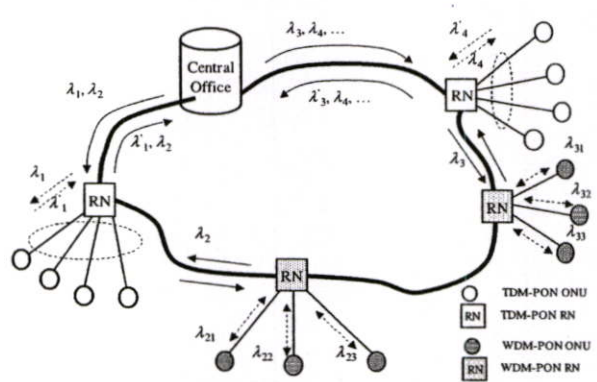


Figure 2. SUCCESS-HPON Architecture.

In SUCCESS-HPON (Figure 2), the need for fixed or tunable lasers at the customer's WDM Optical Network Units (ONUs) is eliminated by sending a continuous wave (CW) from the CO in which to modulate the upstream data. Avoiding the need of lasers, especially tunable ones, makes the ONUs considerably less expensive. There are several options for modulating the CWs at the ONUs. We propose to use Semiconductor Optical Amplifiers (SOAs), under the assumption that their potential integration with the electronics will decrease costs further.

Tunable lasers and receivers at the CO are shared by all the network users for both downstream and upstream data traffic. This allows decreasing the total amount of components needed. This approach is scalable, since the number of components can be gradually increased as new customers join the network. Sharing these components is not easy; in order to do so effectively, innovative scheduling algorithms were developed [8].

## 3. Open Research Issues

In FTTH PONs, issues similar to those that arise in other networks, such as QoS, fairness, security and reliability, are present. Beyond these issues, however, there are some that are particular to access networks.

**TDM-PONs.** The EPON standards specify only the network's physical layer; the algorithms and protocols used to assign bandwidth to the users, ensuring fairness and QoS, are left open to the implementer. Considerable work has gone into developing Dynamic Bandwidth Allocation algorithms

for this. A separate issue is how to provide open access for multiple ISPs to share the same fiber infrastructure when the local legislation requires it.

**Large-scale IP Video Networks.** As discussed above, some service providers plan to deploy large-scale IP video networks to provide HDTV and VoD services. Even though this has been done in limited-size trials, the concept of a national IP video network is new and challenging. Some have suggested that the ideal situation is a combination of analog and IP video [9] (this also depends on legislation and copyright issues). Some of the technical difficulties lie in the deployment of scalable multicasting protocols, mapping multicast groups to conventional video channels and the development of inexpensive integrated set-top boxes.

**Integrated ONU / Wireless Base Station / Home Gateway / DSLAM.** The integration of various components provides an opportunity to develop combined scheduling algorithms and MAC protocols that take into account multiple interfaces and users to optimize performance. Research on architectures, protocols and algorithms for such an integrated unit will be very valuable.

**Hybrid TDM/WDM-PON Architectures.** To provide a smooth transition from TDM to WDM, the proposed network architectures will most likely need to efficiently share expensive tunable components. In the case of SUCCESS-HPON, by sharing the most expensive components, the overall cost of the network decreased; however, this increased the computational complexity of the system. This tradeoff between number of components and computational complexity is an issue of further research.

**WDM-PON.** Research that lowers the cost of devices that are passive and WDM functional (e.g., athermal AWGs) and that facilitates the integration of optics with electronics (e.g., SOAs in an ONU) is very important. As in the case of Hybrid TDM/WDM PONs, how to select which devices to share and how to share them with fast scheduling algorithms is also a matter of further research.

## 4. Concluding Remarks

There are many possible approaches for FTTX, in terms of technologies used, fiber reach and services provided; each country also has a particular legislation that affects the best local choices. This variety of approaches and the uncertainty of customer take-rates make it difficult for U.S. service providers to promptly commit to invest in large-scale deployments, slowing down FTTX penetration. However, it is acknowledged that given the bandwidth limitations of DSL and wireless solutions, fiber optic access will probably

become commonplace, even if it takes longer than expected.

Once the bandwidth demands exceed the capacity of TDM-PONs, there will be a need to move to WDM-PONs. We have discussed the proposed SUCCESS-HPON architecture, which provides a smooth transition path from TDM to WDM-PON in a scalable and cost-efficient manner.

There are still many open research issues in both TDM and WDM-PONs, ranging from devices and systems integration to scheduling algorithms and communication protocols. These issues, added to the increasing residential bandwidth demands and competition among service providers, create a fertile ground for further research work with an industry impact.

## Acknowledgements

The authors would like to thank STMicroelectronics, Stanford's SNRC F/M/A program and OIDA's PTAP program for their support.

## 5. References

- [1] V.G. Cerf, "On the Evolution of Internet Technologies", IEEE Proceedings, Sep. 2004.
- [2] N.J. Frigo et al, "A View of Fiber to the Home Economics", IEEE Comm. Mag., Aug. 2004.
- [3] "FTTP: Revolutionizing the Bells' Telecom Networks", Bernstein Research - Telcordia Technologies Report, May 2004.
- [4] "PON IC Opportunities Expand as Market Ramps", RHK Report, June 2004.
- [5] D.J. Shin et al, "Hybrid WDM/TDM-PON with wavelength-selection-free transmitters", IEEE/OSA JLT, Jan. 2005.
- [6] Y.-L. Hsueh et al, "SUCCESS-DWA: a highly scalable and cost-effective optical access network", IEEE Comm. Mag., Aug. 2004.
- [7] F.-T. An et al, "SUCCESS: A next-generation hybrid WDM/TDM optical access network architecture," IEEE/OSA JLT, Nov. 2004
- [8] K.S. Kim et al, "Design and performance analysis of scheduling algorithms for WDM-PON under SUCCESS-HPON architecture," To appear in IEEE/OSA JLT.
- [9] F. Wiener, "Examining Video Architectures which Optimize the Network Infrastructure for Video Delivery over DSL and PON", Proceedings of OFC, NTuB2, March 2005.

# An Approach to DWDM for Real-Time Applications

Alberto Aloisio, Francesco Cevenini, and Vincenzo Izzo

**Abstract**—Dense wavelength division multiplexing (DWDM) is a technology that assigns to the users of an optical network specific wavelengths or “colors” and mixes them in a single strand of fiber. Heterogeneous data is transmitted simultaneously across lanes of light, which are demuxed at the receiving end and delivered to the clients. Instead of deploying more fibers or increasing the data transfer rate, the bandwidth of an optical link is scalable by adding more wavelengths to the system. DWDM has been pioneered for applications in long-haul telecom networks, requiring bulky, sophisticated, and custom instrumentations. Nowadays, most of the main components are available off-the-shelf as compact and reliable devices, making it possible to use this technology in real-time environments. In this paper, we investigate the possibility to deploy DWDM in data acquisition (DAQ) systems for future high-energy physics experiments. We present our tests of the AGEREs Translight CA16, a DWDM transponder capable of full-duplex optical operations at 2.48 Gbit/s (OC-48). The results are discussed in view of a future integration of the transponder with a field programmable-gate array (FPGA)-based controller aimed at real-time applications.

**Index Terms**—Data acquisition (DAQ), optical communication equipment, SONET.

## I. INTRODUCTION

THE concept of optical networking has undergone a deep revision in past years, modifying and extending the basic layout which is simply based on the presence of fibers in the physical transmission layers. The bandwidth of a single-mode fiber exceeds by orders of magnitude the requirements of the most demanding peer-to-peer producer/consumer pair. In order to avoid wasting fiber resources and to fully utilize the costly electronics that drives them, the physical channel can be shared among many tributary streams.

Dense wavelength division multiplexing (DWDM) is an optical technique that allows for simultaneous transmission of light at different wavelengths on a single strand of fiber. The ITU-T recommendation G.692 defines the window used for DWDM applications with 45 channels spaced 100 GHz apart (0.8 nm), spanning across the C-band from 1528.77 to 1563 nm. Each tributary channel maps to a specific wavelength in the frequency plan, and heterogeneous data with different formats and rates coexist on the same fiber. Light mixing is an analog technique based on basic physical principles. Passive optical equipments, such as lenses and gratings, implement the main I/O functions required for routing the data streams. Network operations are

inherently parallel and all virtual channels experience the same path, regardless of the original electronic format. Data handling could not be any faster, since the speed is that of light in the medium. Most of the standard single-mode fibers already in use can support DWDM. This allows upgrading the network bandwidth when needed, by lining more wavelengths instead of raising the transmission data rate.

## II. BASIC DWDM TOPOLOGIES

A simple unidirectional DWDM point-to-point network is shown in Fig. 1. Data originate from the end-users’ equipment [line terminal equipment (LTE)] with different protocols, rates, and physical layers.

Optical layers adopted by local area networks (LANs) for short and intermediate-reach (few meters to few kilometers) use 850 or 1310 nm center wavelengths with a broad spectrum. To be DWDM compliant, they must be mapped or *transposed* into a specific ITU channel. For this purpose, specific transponders perform optical-to-optical (O2O) conversion between LANs and DWDM domains. Copper-based physical layers are electrical-to-optical (E2O) converted by transponders. In both cases, the output of these devices is a “colored” light compliant with the ITU frequency plan that can feed a DWDM optical multiplexer.

At the receiving end of the network, an optical demux routes the different wavelengths to O2E or O2O transponders. They interface the network output to the user-specific LTE, an environment that could be either optical or electrical.

In order to support bidirectional full-duplex data traffic, the optical mux and demux must be replaced by more sophisticated devices. Optical Add-Drop Muxes (OADMs) and optical cross connects allow implementing full-duplex point-to-point, ring and star topologies. A review of optical devices and complex DWDM architectures can be found in [1], [2].

The transponder allows the tributary data channel to comply with the DWDM specifications and it allocates the data traffic to a specific wavelength. It can be specific for a given protocol and data rate hierarchy or “transparent.” This last type is mainly found in application in the Gbit/s range. High-speed (>2.5 Gbit/s) transponders are very often standard specific and they are available off-the-shelf for the most important protocols.

In order to evaluate the deployment of a DWDM network in a data acquisition (DAQ) system with real-time features, we have chosen the AGERE CA16 *Translight* [3], an OC-48 class (2.48 Gbit/s) SONET transponder. SONET is a well-established and documented standard, with a large availability of devices and debug tools. Moreover, SONET implements a synchronous deterministic data channel, a key issue in real-time operations. The OC-48 hierarchy has been chosen as a tradeoff between

Manuscript received June 9, 2003; revised November 30, 2003.

A. Aloisio is with INFN Sezione di Napoli, 80126 Naples, Italy, and also with the Università del Sannio, Benevento, Italy (e-mail: aloisio@na.infn.it).

F. Cevenini and V. Izzo are with the INFN Sezione di Napoli, 80126 Naples, Italy, and also with the Dipartimento di Scienze Fisiche, Università di Napoli “Federico II”, 80126 Naples, Italy (e-mail: cevenini@na.infn.it; izzo@na.infn.it).

Digital Object Identifier 10.1109/TNS.2004.828713

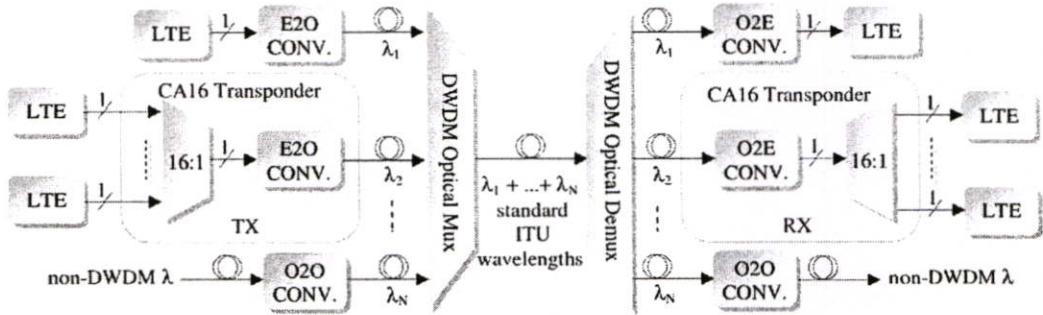


Fig. 1. Simple DWDM point-to-point unidirectional transport system.

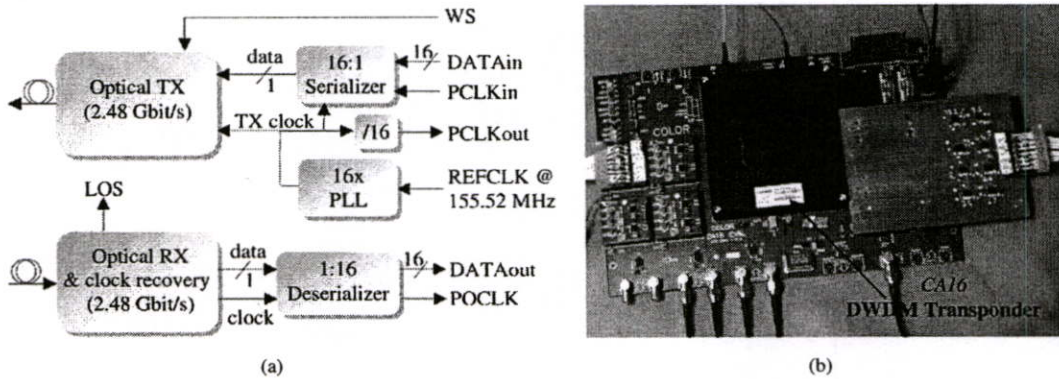


Fig. 2. (a) CA16 transponder simplified block diagram. (b) The transponder on the evaluation board.

cost, performance, availability of test instrumentation, and FPGA devices capable to handle the selected frequency range.

III. DWDM BENEFITS

A DAQ system designed around OC-48 SONET DWDM transponders would be able to transmit across a single fiber up to 45 independent data channels—using all the available ITU wavelengths. Taking into account protocol overheads and assuming a conservative 50% payload occupation, this means moving across a single fiber an aggregate bandwidth of up to 7 GByte/s. This value doubles if full-duplex architecture is considered. In addition to the available bandwidth, other factors concur in making DWDM an attractive technology for DAQ applications. For a medium-scale high-energy physics detector, a few fibers would suffice to carry all the data to the control room site. New generation transponders support long reach traffic (>40 Km) without signal regeneration. This feature is very interesting for DAQ systems of deep-sea experimental sites or in general when data must be routed to distant backbones. DWDM is inherently protocol-transparent: real-time data traffic can share the same fiber and physical layer with LANs and even commercial telecom traffic. Furthermore, each channel can be “hot-plugged” and turned on and off independently, without reconfiguring the network. Data routing is fully performed at the optical level, saving expensive switches and hubs. The entire architecture scales gracefully upgrading each data channel to the next available SONET hierarchy or lightening unused wavelengths. All these upgrades do not involve changing the network core (transport fiber, optical

devices, monitoring facilities). OC-192 (9.95 Gbit/s) SONET DWDM transponders are already available on the market. With this technology, the achievable bandwidth is boosted by a factor four, arriving at ~28 GByte/s payload bandwidth for half-duplex networks.

The design of a DAQ system based on DWDM requires the massive introduction of transponders in the detector readout scheme. Front-end modules and readout hubs should act the part of LTEs. Development of custom hardware is needed to interface the detector-specific electronics with off-the-shelf SONET transponders. Our case study aims at the feasibility of a low-cost FPGA-based DWDM transponder controller.

IV. THE CA16 TRANSPONDER

The CA16 transponder (Fig. 2) combines in a single package a 16-bit serializer, the optical transmitter, the optical receiver with clock and data recovery and a 1:16 deserializer. In the transmitter section, an internal 2.48 GHz oscillator is phase-locked to a user-supplied 155.52 MHz (OC-3) REFerence ClOcK (REFCLK). The 16-bit parallel input word from the LTE logic is latched by the Parallel In ClOcK (PICKL). This clock can be either a replica of REFCLK or can be derived by the Parallel ClOcK (PCLK), a divide-by-16 output of the internal 2.48 GHz clock. The serializer feeds the optical transmitter with a 2.48 Gbit/s stream which is launched into the optical fiber.

The transponder uses a cooled distributed feedback (DFB) laser for long reach applications (0 dBm typical power output, 100 Km reach) and must be purchased for the specific ITU grid

channel of interest. However, the DFB laser is tunable and the wavelength select (WS) logic input allows the user to hop on the adjacent lowest ITU channel (a 0.8-nm wavelength increase).

In the receiver section, an avalanche photodiode (APD) converts the optical signal in electrical format, and the 2.48 GHz bit-rate clock is recovered from the serial stream. The 1:16 deserializer arranges the data in a 16-bit parallel word clocked out by the Parallel Out CLoCK (POCLK), which has the same frequency and it is phase-locked to the PICLK on the transmitter side. The loss of signal (LOS) logic output is asserted when the clock recovery PLL circuit is not locked to the incoming data stream.

The I/O data busses and all the clock signals are in differential LVPECL standard, digital controls and status flags are TTL or LVTTTL compatible.

The CA16 transponder is powered from a 3.3 V supply and draws 2.6 A (typ.). It has a form factor of 8.9 cm × 10.2 cm × 1.4 cm (W × L × H).

## V. TRANSPONDER ISSUES

The CA16 transponder is designed to provide a SONET OC-48 compliant interface between the LTE and the DWDM optical layer. Mainly, it guarantees the SONET specifications in terms of optical output and clock synthesis and recovery at the specified 2.48 Gbit/s data rate. However, it does not parse the SONET frame structure, and the transmitter does not perform data scrambling—all these operations are left to the LTE.

The receiver relies upon the data scrambling defined by SONET to recover the clock. The SONET protocol specifies that transmission of constant runs of ones or zeros up to 2.3  $\mu$ s must not provoke a LOS, which instead must be asserted when the condition lasts for more than 100  $\mu$ s. In between, the protocol does not specify the LOS behavior, which is left to the equipment designer.

The transponder does not append any overhead to the serial stream. This makes all the bandwidth available to the payload, but at the same time it is also responsible for an arbitrary alignment of the received word. The lack of any synchronization character does not allow the receiver logic to align the word to the original byte boundaries. After the receiver has achieved the lock, a 16-bit word transmitted as  $b_{15} \dots b_0$  could be received as a cyclic permutation such as  $b_{13}, b_{14}, b_{15}, b_0, \dots, b_{12}$ . The offset in the byte boundary is constant until the receiver stays locked. It may change after a new lock procedure, a reset or a loss of signal. This unpredictable behavior is typical of many high-speed mux-demux architectures and it requires a specific rewiring feature to be implemented in the LTE. In the simplest rewiring algorithm, a constant unscrambled synchronization word is sent across the link. The receiver logic cyclically shifts the received word one bit at the time, until it recognizes the synchronization symbol. The shift offset can then be applied to the incoming data by using a classic barrel shifter circuit.

Apart from the required data scrambling and the rewiring algorithm, the transponder can transmit random data and it is restricted to the SONET paradigm only for the data rate. In the development of a DWDM-based network for real-time systems, this transponder offers the SONET feature of phase locked

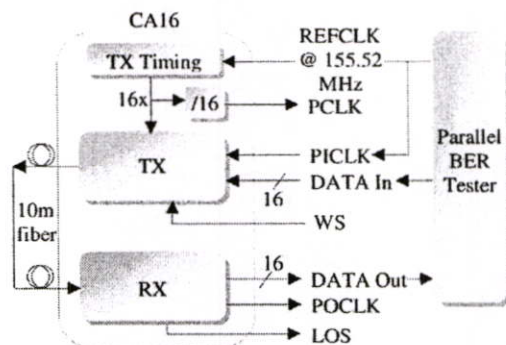


Fig. 3. Test setup block diagram.

timing between transmitter and receiver. It supports 16-bit word data transactions at 155.52 MHz, and OC-48 optical performance. The user can then superimpose the packet structure best suited for the specific application. This will require the development of a custom transponder controller based, for instance, on FPGAs.

## VI. TESTING THE TRANSPONDER

Interfacing the CA16 transponder with an FPGA requires a careful floorplanning of the design. Timing signals and data I/O are in differential LVPECL and they should be handled without using level translators to guarantee the highest signal and timing integrity. The newest FPGAs support the LVPECL standards and can cope with the 155-MHz data rate, offering a low-cost platform to implement and test different solutions. In view of integration with these programmable devices, we have characterized selected parameters of the transponder such as transmission latency, tolerance to long runs without transitions, receiver output timing, cycle-to-cycle jitter of the recovered clock, and bit error rate (BER).

We designed an evaluation board that interfaces the transponder to a parallel bit error rate tester [4]. The tester feeds the transponder data input with programmable parallel data patterns and verifies the data received by the transponder. In our setup (Fig. 3) the tester also drives REFCLK and PCLK. The transmitter output of the transponder is attenuated by 10 db (to avoid saturating the RX) and looped back into the receiver via a 10-m single-mode fiber.

A number of practical issues are involved in measuring the data transmission latency of the transponder. The data pattern used in this test must fulfill different requirements, somewhat in contrast. To remain locked, the RX needs a data stream with a sufficient transition density like a pseudorandom bit sequence (PRBS). On the other hand, triggering the oscilloscope on the PRBS input to measure the delay at the transponder RX output can be extremely difficult and give confusing results. Exploiting the Tester flexibility in generating and nesting arbitrary patterns, we have inserted gaps of zeros in between PRBS segments. The gap length is short enough not to compromise the receiver lock but allows us to trigger the oscilloscope on the sequence's starting point. With a 10-m fiber, the measured delay between the transmitter input and the receiver output is 110 ns (Fig. 4), which gives a transponder an intrinsic latency of  $\sim 60$  ns. The

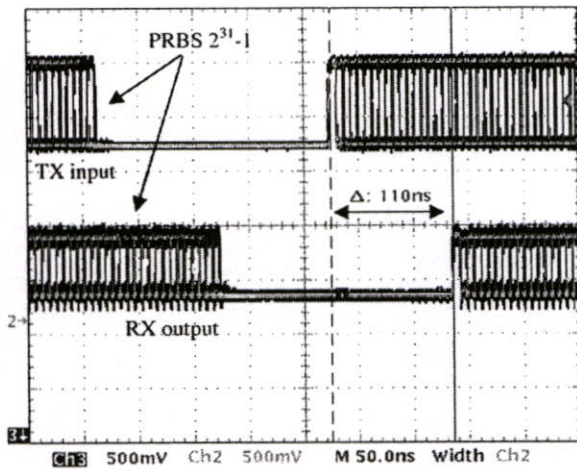


Fig. 4. Transmission latency with 10-m fiber.

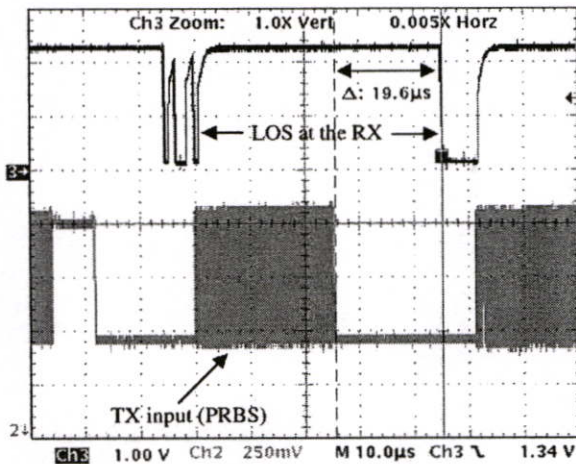


Fig. 5. LOS timing.

test also shows that the two data streams are phase-locked and that the latency value does not change after a reset, a power on-off cycle or selecting a different PRBS sequence.

The latency test setup can be easily modified to measure the transponder tolerance to long runs with low transition density. The gaps interlaced with the PRBS segments are programmed in the form of constant zeros or ones or runs with limited amount of transitions to stress the receiver clock recovery circuitry. The gap length was increased until a LOS occurred (Fig. 5). The test results show that the receiver asserts the LOS after  $19 \mu\text{s} \pm 20\%$  from the end of the PRBS sequence. This value is well within the SONET specifications and makes it possible to send unscrambled data across the link for thousands of OC-3 clocks without disrupting the clock recovery at the receiver side. This feature can be used for system level and network control applications such as connection bootstrap, rewiring, and insertion of specific unscrambled stamps in the data flow. According to the AGERE data sheet [5], the LOS output can oscillate or provide false indications in a no-light environment (broken fiber, transmitter disabled).

By simply removing the gaps, the Tester can feed the transponder with pure PRBS segments. In this way, it is possible to measure the receiver's data output timing. In this test, the oscilloscope is triggered by the POCLK and a single output bit is acquired in sampling mode obtaining an eye-diagram (Fig. 6). The eye-shaped waveform is a composite view of superimposed random data bits accumulated over a persistence time window defined by the oscilloscope's display control logic. The persistence can be set in the range from fractions of seconds to infinity and the display can be used to evaluate both amplitude and timing parameters of the data stream. Setup and hold times are measured with respect to the recovered clock rising edge and their values, 3.7 and 2.7 ns, respectively, are fully compatible with a low-cost FPGA family supporting LVPECL I/O such as the Xilinx SpartanII-E [6] (even considering the slowest speed-grade). These FPGAs also fully meet the input timing requirements of the transponder (1.5 ns setup, 0.5 ns hold) and hence can be considered as candidates to implement the transponder control logic.

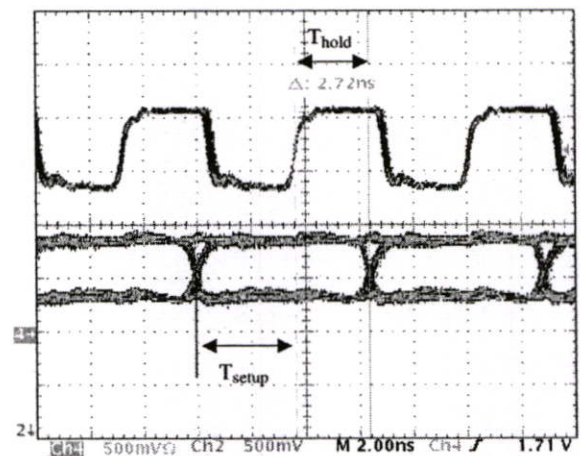


Fig. 6. RX output data timing.

Like the majority of high-performance FPGA families, the SpartanII-E offers a phase-locked circuitry that eliminates the on-chip clock-distribution delay. This technique shrinks setup, hold and clock-to-output timing and effectively improves the FPGAs I/O performances, but it also requires that the input clock complies with tight specifications in terms of cycle-to-cycle jitter [7]. This is the instantaneous displacement from the ideal position in sequential, adjacent clock edges. In our test, we have measured the receiver POCLK cycle-to-cycle jitter with a jitter analysis package [8] running on a 4 Gsample/s, 1-GHz bandwidth oscilloscope. During the test, we sent across the link a  $2^{31} - 1$  PRBS, clocking the transponder transmitter with the Tester clock source ( $<10$  ps rms jitter). The jitter distribution is displayed on the oscilloscope screen (Fig. 7) with the relevant statistical parameters and shows a peak-to-peak value of  $\pm 350$  ps. The SpartanII-E family specifies a maximum value for this jitter of  $\pm 150$  ps. We conclude that the advanced clocking circuitry should not be used when feeding the FPGA with the transponder's POCLK.

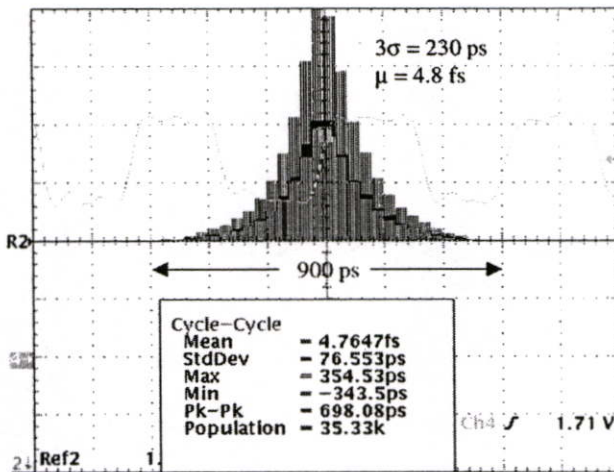


Fig. 7. RX output clock cycle-to-cycle jitter.

The BER performance test is widely used as an overall validation of a data link. It is expressed by the ratio between the bits received incorrectly, or "errored," and all the transmitted bits. This test requires sending patterns that emulate real traffic across the link and checking the received data against the transmitted ones. We used PRBS with different lengths—in the range from  $2^7 - 1$  to  $2^{31} - 1$ . Integrating all the conducted tests, we can set the BER upper limit to  $10^{-15}$  with a confidence level of 95%.

It takes a very long time to characterize a device with a direct BER measurement—up to months in our case. Optical layer measurements allow probing the signal integrity and checking accurately the compliance with the standard specifications in a reasonable amount of time. Amplitude modulations, data rate, and timing jitters can be observed simultaneously performing a mask test on an eye-diagram obtained with a PRBS. The "mask" is a standard-specific template of an inner and two outer keep-out regions. During the test, the mask is superimposed to a bit-rate period delimited by level transitions in the data. Amplitude distortions or excessive timing jitter push the waveforms in the restricted regions, violating the standard specifications. In our test, the signal on the fiber is first O2E converted and then acquired by a high-bandwidth sampling oscilloscope. The trigger is derived from the word clock PCLK generated by the transmitter. The screenshot in Fig. 8 shows a  $2^{31} - 1$  PRBS stream on the fiber (top) and the standard OC-48 mask recalled from the oscilloscope library and overlaid on a bit interval (bottom).

## VII. THE MARKET TREND

AGERE introduced the CA16 *Translight* SONET transponder on March 2001. In October 2002, following the serious crisis in the telecom market, AGERE sold most of the optoelectronic business to TRIQUINT [9], including the DWDM product line.

In this transition, many devices have been discontinued. The CB family has superseded the previous CA transponders, including the CA16. The CB64 transponder [10] supports bidirectional OC-192 (9.95 Gbit/s) SONET hierarchy, serializing and deserializing 16-bit data words and replacing the

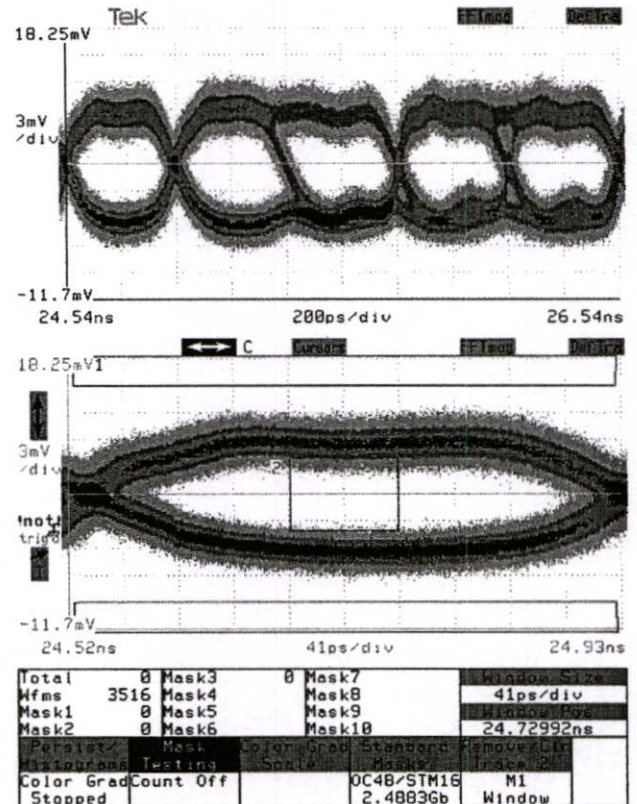


Fig. 8. (Top) Unfiltered optical eye-pattern during the BER test. (Bottom) Optical layer test using a standard OC-48 mask.

mature LVPECL with LVDS I/O standard. Like the CA, the CB transponder is available for all the ITU channels with 100 GHz spacing, but it lacks the tunable laser and its reach is limited to 40 Km. The new family has the same form factor of the CA-class devices.

According to the data sheets, all of the CA's features are present in the CB design, which offers a tremendous step forward in the design of a DWDM network. However, design strategies and issues we have addressed in the CA16 tests still apply to the new transponder family.

In June 2002, industry leader manufacturers announced a DWDM Pluggable Transceivers Multi Source Agreement (MSA)[11]. This Agreement establishes a standard that specifies package outlines, pin function definitions, optical and electrical interfaces and characteristics for DWDM transponders. A standard is essential to lever a wide adoption of the DWDM technology, protecting investments and research. MSA compliant transponders have been announced for OC-48 SONET applications, and they will be available on the market soon.

## VIII. CONCLUSION

We investigated the possibility to use DWDM in the design of future DAQ systems. In this framework, we focused on the integration of the transponder with an FPGA-based controller. The tests covered the main timing and functional issues which should be addressed in the design of the controller logic.

The presented results show that data scrambling and rewiring issues can be handled by low-cost FPGAs such as the Xilinx SpartanII-E. Their timing is compatible with the OC-3 transponder's parallel I/O, even if the advanced clocking circuitry is not used. Application notes and VHDL-based codes address the SONET data scrambling and alignment issues [12], [13], simplifying the design of a custom transponder controller.

The transponder guarantees synchronous phase-locked operations between transmitter and receiver with a low and deterministic latency. Front-end and readout electronics could enter a DWDM network using a specific wavelengths and transfer time-critical detector and trigger data. The network can simultaneously handle on the same fiber also telecom, computer and heterogeneous data without interfering with the real-time DAQ traffic.

Concerning costs, in 2002 the CA16 was bought for a price of ~US\$7000, approximately five times the cost of an equivalent solution based on optical Gigabit Ethernet hardware. The prices should decrease with the increasing availability of DWDM transponder compliant with the Multi Source Agreement.

#### REFERENCES

- [1] O. Krauss, *DWDM and Optical Networks*. Erlangen, Germany: Publicis, 2002, pp. 53–114.
- [2] J. P. Laude, *DWDM Fundamentals, Components, and Applications*. Norwood, MA: Artech House, 2002, pp. 147–205.
- [3] CA16-Type 2.5 Gbit/s Translighth™ DWDM Transponder with 16-Channel 155 Mbit/s Multiplexer/Demultiplexer, Mar. 2001. Advanced Data Sheet, DS01-120OPTO.
- [4] (2003, May) 81 250 ParBERT System User's Guide. Agilent Technologies. [Online]. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-4887EN.pdf>
- [5] OC-48/STM-16 Transponder Monitor, Alarm and Control Circuits, Aug. 2001. Tech. Note, TN01-007OPTO.
- [6] Spartan IIE FPGA Detailed Functional Description (2002, Nov.). [Online]. Available: [http://direct.xilinx.com/bvdocs/publications/ds077\\_2.pdf](http://direct.xilinx.com/bvdocs/publications/ds077_2.pdf)
- [7] Using Delay Locked Loops in Spartan II FPGA (2000, Jan.). [Online]. Available: <http://www.xilinx.com/xapp/xapp174.pdf>
- [8] Jitter and Timing Analysis Software TDSJIT1 (2002, Oct.). [Online]. Available: [http://www.tek.com/site/ps/0,,55-12908-INTRO\\_EN,00.html](http://www.tek.com/site/ps/0,,55-12908-INTRO_EN,00.html)
- [9] Press Release. Triquint Semiconductor (2002, Oct.). [Online]. Available: <http://www.triquint.com/investors/press/dspPressRelease.cfm?pressid=138>
- [10] CB64-Type DWDM Compatible 10 Gbit/s Transponder with 16-Channel 622 Mbit/s Multiplexer/Demultiplexer (2003, Mar.). [Online]. Available: [http://www.triquint.com/company/divisions/telecom\\_datacom/docs/CB64-type/CB64-Type.pdf](http://www.triquint.com/company/divisions/telecom_datacom/docs/CB64-type/CB64-Type.pdf)
- [11] Reference Document for Pluggable DWDM Transceivers Modules (2003, May). [Online]. Available: [http://www.hotplugwdm.org/Hot\\_Plug\\_MSA\\_PubDocV3.pdf](http://www.hotplugwdm.org/Hot_Plug_MSA_PubDocV3.pdf)
- [12] N. Sawyer, SONET Scramblers/Descramblers, Application Note XAPP-651, Nov. 2002. Xilinx [Online].
- [13] N. Sawyer, Word Alignment and SONET/SDH Deframing, Application Note XAPP-652, Nov. 2002. Xilinx [Online].