โครงการวิจัยย่อยลำดับที่ 16

เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง ปีที่ 3

ชื่อผู้รับผิดชอบโครงการ อาจารย์ ดร. ดวงฤดี วรสุชีพ

ปัญหา และความเป็นมา

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงเป็นเทคโนโลยีใหม่ใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เนื่องจากสมรรถภาพอันสูงทั้งปริมาณการส่งข้อมูลที่มากกว่าสื่อประเภทอื่นๆ และระยะทางส่งได้ไกลกว่า หากแต่ระบบนี้ยังไม่เป็นที่รู้จักดีในประเทศไทย หนึ่งในสาเหตุอาจมาจากการลงทุนสูงในการวางสายเคเบิลเส้นใยนำแสงต่อกันเป็นเครือข่าย ทำให้จำนวนเครือข่ายมีน้อยและเนื้อที่ครอบคลุมถูกจำกัดด้วยวงเงินลงทุน อีกทั้ง แต่ละเครือข่ายถูกออกแบบมาจำเพาะเพื่อการใช้งานภายในองค์กรนั้นๆ จึงขาดความสามารถในการเชื่อมโยงเข้าถึงกันเพื่อการแลกเปลี่ยนข้อมูลได้อย่างทั่วถึง ยิ่งไปกว่านั้น อุปกรณ์รับส่งสัญญาณแสงก็มีราคาแพงมากเพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่วนใหญ่จะสั่งซื้อทั้งระบบมาติดตั้งทีละครั้งคราวไปตามความต้องการที่เพิ่มขึ้น ถ้าหากระบบที่ถูกเลือกมาดีเยี่ยม แต่กลับไม่เหมาะสมกับเครือข่ายที่ได้ลงทุนวางลงไป ก็จะทำให้ไม่ได้รับประโยชน์อย่างเต็มที่ หรืออย่างกรณีที่เครือข่ายเดิมไม่สามารถรองรับระบบใหม่ได้ จนจำเป็นต้องมีการวางเครือข่ายเส้นใยนำแสงชนิดใหม่ขึ้นมาใช้แทน อันถือว่าเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากร และไม่ได้ใช้ประโยชน์จากสิ่งที่ลงทุนไปแล้วให้คุ้มค่าและเต็มประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้น จึงสมควรที่จะศึกษาและวิเคราะห์ระบบสื่อสารบนเครือข่ายเส้นใยนำแสงที่มีใช้งานอยู่จริงในประเทศไทย เพื่อสามารถบ่งชี้ถึงขีดจำกัดของเครือข่ายนั้นๆ และช่วยให้ข้อเสนอแนะในการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลของระบบให้มากขึ้น

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและวิเคราะห์ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงบนเครือข่ายเส้นใยนำแสงที่มีใช้งานอยู่จริง
2. ตรวจวัดสภาพและค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของเส้นใยนำแสง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในงาน simulation
3. เสนอแนะวิธีการต่างๆ ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลของเครือข่ายเส้นใยนำแสง
4. ออกแบบและประกอบชุดสาธิตตัวส่งและตัวรับสัญญาณทางแสงอัตราความเร็วสูงถึง 2.5 Gb/s
5. ทดลองรับส่งข้อมูลความเร็วสูงผ่านช่องสัญญาณแสงแบบ WDM (Wavelength Division Multiplexing)

แนวเหตุผล และทฤษฎี

วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงได้ถูกคิดค้นขึ้นมาไว้หลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่หาได้ในแต่ละยุคสมัย แต่โดยหลักการแล้วสามารถแบ่งออกเป็นสองแนวทางหลักคือ การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลให้เร็วขึ้น และการเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณให้มากขึ้น

สำหรับแนวทางแรก จำนวนเส้นใยนำแสงที่วางเชื่อมโยงไว้เป็นเครือข่ายยังคงเท่าเดิม แต่เพิ่มอัตราการส่งข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณให้เร็วขึ้น ข้อจำกัดของการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วสูงสุดในการรับส่งและประมวลผลสัญญาณของอุปกรณ์ติดตั้งในระบบ อาทิเช่น ตัวมอดูเลตสัญญาณแสงที่สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงสุด 10×10^9 บิดต่อวินาทีหรือ 10 Gb/s ถ้าหากต้องการความเร็วที่สูงขึ้นอีก อาจต้องใช้เทคโนโลยีอื่นที่สามารถกำเนิดแสงแบบ Ultra short pulse ปัญหาที่ตามมาเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเร็วขึ้นคือ การเพิ่มขึ้นของสัญญาณสอดแทรกและปริมาณคลื่นรบกวน ซึ่งจะทำให้กระบวนการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์สำคัญๆ ในการออกแบบระบบจำเป็นต้องมีความละเอียดรอบคอบมากขึ้น เพื่อการคัดเลือกตัวอุปกรณ์ที่เหมาะสมมาประกอบใช้งาน อีกทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงที่ความเร็วสูงก็หายากและมีราคาแพงทำให้ต้นทุนโดยรวมของระบบยิ่งสูงมากขึ้น ดังนั้น การนำแนวทางนี้มาประยุกต์ใช้งานอาจปฏิบัติได้ถึงแค่ระดับอัตราความเร็วระดับหนึ่ง ซึ่งจะไม่เพิ่มค่าการลงทุนมากจนเกินไปกว่าประโยชน์ที่จะได้รับกลับคืนมา

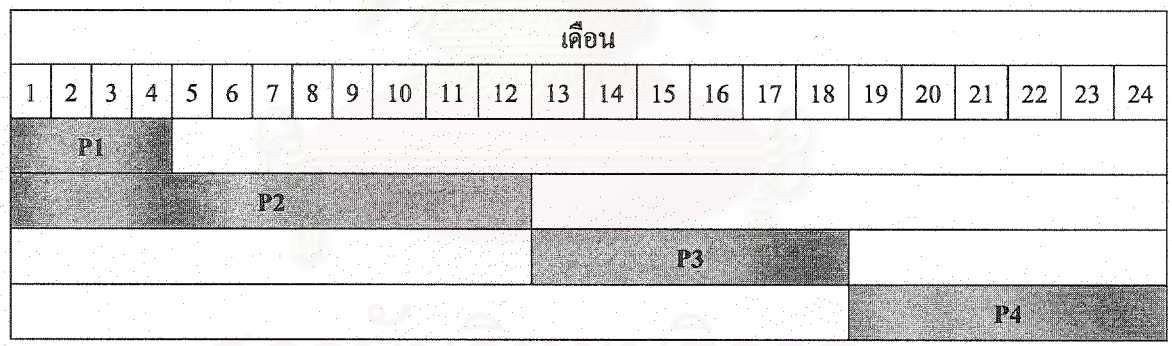
สำหรับแนวทางที่สอง การเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณในระบบสามารถกระทำได้หลายวิธี วิธีแรกคือการวางสายเคเบิลเส้นใยนำแสงเพิ่ม แต่วิธีนี้ไม่ได้ใช้ประโยชน์จากเครือข่ายเดิมและเป็นการลงทุนที่สูง วิธีถัดไปซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือเทคนิคการมัลติเพลกซ์สัญญาณตามค่าความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing - WDM) จำนวนช่องส่งสัญญาณทั้งหมดในแต่ละเส้นใยนำแสงจะเท่ากับจำนวนค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ทำให้การเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณทีละน้อยเพื่อตอบสนองต่อความต้องการส่งข้อมูลที่ค่อยๆมีมากขึ้นและวงเงินในการปรับปรุงระบบที่จำกัดก็สามารถปฏิบัติตามได้ อุปกรณ์สำคัญที่ต้องติดตั้งเสริมคือตัวมัลติเพลกซ์และตัวดีมัลติเพลกซ์ทางแสงเพื่อใช้สำหรับรวบรวมและแยกแยะสัญญาณจากแต่ละช่องสัญญาณ คุณสมบัติต่างๆ ของตัวอุปกรณ์เสริมต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบพร้อมไปกับปัจจัยอื่นๆ ที่คำนึงถึงในการออกแบบระบบ อาทิเช่น ช่วงห่างระหว่างช่องสัญญาณที่เกิดปัญหาสัญญาณสอดแทรกน้อยที่สุด จำนวนช่องสัญญาณเข้าออกมากสุดที่จะเหมาะสมกับขนาดของเครือข่ายและอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการรับส่งข้อมูลในอนาคต และท้ายที่สุด ปริมาณการสูญเสียกำลังแสงเมื่อส่งผ่านอุปกรณ์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์งบประมาณกำลังในแต่ละช่วงต่อของเครือข่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัดสภาพและค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของเครือข่ายเส้นใยนำแสงก่อนที่จะสามารถนำเทคนิค WDM มาประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสมเพื่อเพิ่มปริมาณการส่งข้อมูลให้มากที่สุด

จากผลการศึกษาและวิเคราะห์เครือข่ายเส้นใยนำแสงในช่วงระยะทำงานปีที่ 1 พบว่าทั้งสองแนวทางที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำมาผสมประสานใช้งานร่วมกันได้ กล่าวคือทั้งเพิ่มอัตราการส่งข้อมูล

ในแต่ละช่องสัญญาณให้เร็วขึ้นถึงระดับ Gb/s พร้อมกับเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณแบบ WDM ให้มากกว่าหนึ่งช่องสัญญาณต่อหนึ่งเส้นใยนำแสง แต่จะกระทำได้ถึงแค่ระดับหนึ่งเท่านั้นจึงจะคุ้มกับการลงทุนและนำไปปฏิบัติใช้งานจริงได้ เพราะความต้องการในการส่งผ่านข้อมูลบนเครือข่ายภายในมหาวิทยาลัยหรือในระดับ LAN (Local Area Network) ในปัจจุบันยังมีไม่มากถึงขนาด 10 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณแสง ที่ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์หายากและมีราคาแพง ด้วยเหตุผลนี้เอง ทางทีมงานวิจัยจึงเลือกแนวทางแรกคือการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลให้เร็วขึ้นมาดำเนินการก่อนในช่วงระยะทำงานปีที่ 2 โดยได้ตั้งเป้าหมายในการออกแบบและประกอบชุดสาธิตตัวส่งและตัวรับสัญญาณแสงให้มีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงถึง 2.5 Gb/s ของในแต่ละช่องส่งสัญญาณแสงแบบ WDM สำหรับในช่วงระยะทำงานปีที่ 3 และ 4 ที่กำลังจะเริ่มดำเนินการต่อไปนั้น จะนำแนวทางที่สองคือการเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณแบบ WDM ให้มากกว่าหนึ่งช่องสัญญาณต่อหนึ่งเส้นใยนำแสง มาทำการศึกษาและทดลองต่อไป แล้วเมื่อใดที่เครือข่ายมีความต้องการส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ก็จะสามารถเสียบเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณแสงแบบ WDM ได้ทันที ซึ่งจะเป็นการใช้ประโยชน์จากเส้นใยนำแสงคู่เดิมอย่างเต็มที่ แทนที่จะต้องเปลี่ยนไปใช้คู่ใหม่หรือติดตั้งเพิ่มเติม ซึ่งจะเป็นการพิสูจน์ถึงการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงให้มากที่สุดนั้นเอง

ขั้นตอนการวิจัย

แผนการดำเนินงานสำหรับระยะเวลาทำงาน 2 ปี (1 มิ.ย. 2548 - 31 พ.ค. 2550) มีดังแสดงในตารางข้างล่างนี้



Phase 1: *ตรวจวัดและเก็บรวบรวมข้อมูลค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆของเส้นใยนำแสงบนเครือข่ายเส้นใยนำแสงภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยเครื่องมือวัด OTDR แล้วเชื่อมต่อเครือข่ายให้ได้ระยะทางไกลมากสุดไว้สำหรับการทดลองรับส่งสัญญาณแสงด้วยชุดสาธิตที่ประกอบขึ้นผ่านเครือข่ายจริง*

Phase 2: *เพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของชุดสาธิตตัวส่งและตัวรับสัญญาณแสงที่ประกอบขึ้น ให้มีความเร็วจาก 155 Mb/s สูงขึ้นไปถึง 2.5 Gb/s ต่อจากนั้นออกแบบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความเร็ว*

สูงเองด้วยซอฟแวร์ที่จะจัดซื้อและประกอบชุดสาธิตเพิ่มขึ้นอีกอย่างน้อย 2 ชุด และเขียนรายงานสรุปผลงานในปีแรก

Phase 3: *ทดลองรับส่งสัญญาณแสงโดยไม่ให้มีบิตผิดพลาดเกิดขึ้นที่ความเร็ว2.5 Gb/s เมื่อใช้ช่องส่งสัญญาณแบบ WDM อย่างน้อย 3 ช่องสัญญาณร่วมกันในหนึ่งเส้นใยนำแสง ตรวจสอบถึงอุปสรรค ความเป็นไปได้ และวัดค่าความสัมฤทธิผลของการรับส่งสัญญาณแสง*

Phase 4: *ผลลัพธ์ที่ได้จากงาน simulation โดยการป้อนข้อมูลจริงลงใน Optiwave™ simulation software จะสามารถนำมาใช้คาดการณ์ถึงขีดจำกัดและประสิทธิภาพที่สูงสุดของการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเส้นใยนำแสง ท้ายที่สุดเขียนรายงานสรุปผลโครงการ*

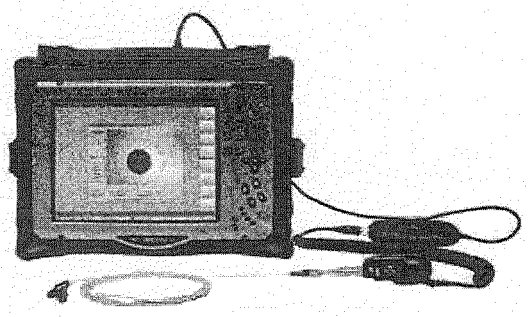
ขอบเขต และเป้าหมาย

โครงการวิจัยนี้เน้นที่จะให้ผู้วิจัยและนิสิตได้มีโอกาสสัมผัสกับระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงที่ใช้งานอยู่จริง อย่างเช่น เครือข่ายเส้นใยนำแสงภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ตอบรับให้ความร่วมมือมาแล้ว โดยให้มีส่วนร่วมในกระบวนการวัดค่าพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ของเส้นใยนำแสง ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสบการณ์การเรียนรู้แบบทำจริง (Hands-on) ส่วนขอบเขตของงานในทางปฏิบัติ ย่อมขึ้นอยู่กับขีดความร่วมมือของเจ้าของเครือข่ายว่าจะยอมให้กลุ่มวิจัยเข้าเก็บรวบรวมข้อมูลได้นานมากน้อยเพียงใดทราบที่ไม่กระทบกระเทือนถึงบริการการส่งข้อมูลสดบนเครือข่าย หลังจากนั้น ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และใช้เป็นฐานข้อมูลจริงในงาน simulation ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถบ่งชี้ถึงข้อจำกัดและประสิทธิภาพสูงสุดของการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเส้นใยนำแสงนั้นๆ สำหรับเป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือ การเสนอแนะวิธีการและขั้นตอนที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลในเครือข่าย โดยที่วิธีการเหล่านั้นสามารถนำมาทดลองปฏิบัติตามหรือประยุกต์ใช้งานได้จริง

ส่วนงานที่ได้ดำเนินการไปแล้ว

1) <u>การตรวจวัดและเก็บรวบรวมข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยนำแสงบนเครือข่าย CHULANET</u>

ได้เรียนรู้วิธีการใช้งานเครื่องมือวัด OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) จากวิศวกรของบริษัท บางกอกดาต้าคอม จำกัด ซึ่งเครื่องมือวัดดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ยี่ห้อ NetTest รุ่น CMA 5000 ดัง



รูปที่ 1: เครื่อง OTDR ยี่ห้อ NetTest รุ่น CMA 5000

แสดงในรูปที่ 1 โดยมี plug-in module สองแบบ คือ (1) CMA5235 single-mode fiber type สามารถวัดค่าของเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวด้วยความยาวคลื่นแสง 1310 และ 1550 นาโนเมตร และ (2) CMA5266 multimode fiber type สามารถวัดค่าของเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมดด้วยความยาวคลื่นแสง 850 และ 1310 นาโนเมตร ซึ่งทั้งสองโมดูลมาพร้อมอุปกรณ์เสริมชื่อ Visual Fault Locator (VFL) ซึ่งเป็นแสงสีแดงที่สามารถช่วยระบุตำแหน่งของความบกพร่อง เช่น สายขาด ภายในเส้นใยนำแสง และสามารถระบุคู่ต้นทางไปยังปลายทางของเส้นใยนำแสงที่ทดสอบได้

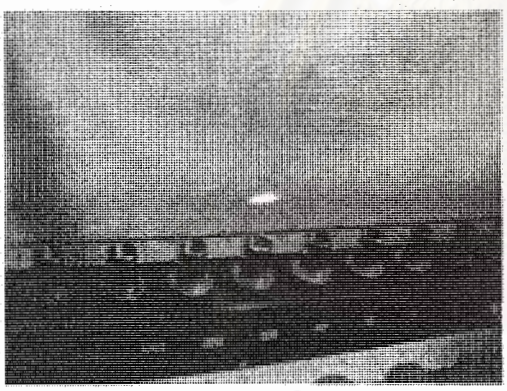
ได้ทำความคุ้นเคยเกี่ยวกับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องวัด OTDR อย่างเช่น pulsewidth และ resolution โดยทำการทดลองใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัย ด้วยระยะความยาวแตกต่างกันตั้งแต่ 2 กิโลเมตรเศษไปจนถึง 50 กิโลเมตรเศษ เพื่อวิเคราะห์ผลการวัดว่าควรจะใช้ค่าพารามิเตอร์ชุดใดให้เหมาะสมกับการวัดระยะทางใกล้และไกล จากผลการทดลองวัดหลายครั้งพบว่าเครื่องยังรายงานผลได้ไม่ตรงตามค่าที่ระบุมากับม้วนเส้นใยนำแสงนัก แต่จะต่างไปเพียงเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น การแสดงค่าการลดทอน (attenuation) ภายในเส้นใยนำแสงด้วยความชัน (slope) ของผลเส้นกราฟ จะได้ค่าความชันที่น้อยกว่าหรือมากกว่าบ้างอย่าง 0.19dB/km และ0.23dB/km จากค่าที่ระบุไว้ที่ 0.22 dB/km

อีกปัญหาที่พบคือขีดจำกัดของตัวเครื่องในการระบุเหตุการณ์ต่างๆภายในเส้นใยนำแสงให้ถูกต้องตรงตามตำแหน่งและระยะทางของสาย เนื่องจากค่า event deadzone และ event threshold ของการรายงานแต่ละเหตุการณ์จะมีช่วงเฉพาะกับชุดค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ ทำให้ผลการรายงานเหตุการณ์อาจคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงบ้าง ตัวอย่างเช่น ม้วนเส้นใยนำแสงที่ทดสอบจะมีตำแหน่งของ fusion splice ห่างจากหัวต่อที่ต้นสายและที่ปลายสายไปประมาณ 1 เมตรทุกม้วน แต่จากผลการทดสอบจะรายงานเหตุการณ์เพียงตำแหน่งของหัวต่อ ไม่มีการแสดงตำแหน่งของ fusion splice ถัดจากหรือก่อนหน้าหัวต่อเลย ทำให้สรุปได้ว่าเครื่องมือวัด OTDR นี้อาจมีศักยภาพในการวัดที่ยังไม่สมบูรณ์นัก แต่ก็เป็นเพียงเครื่องเดียวที่สามารถจัดหางบซื้อมาใช้งานได้

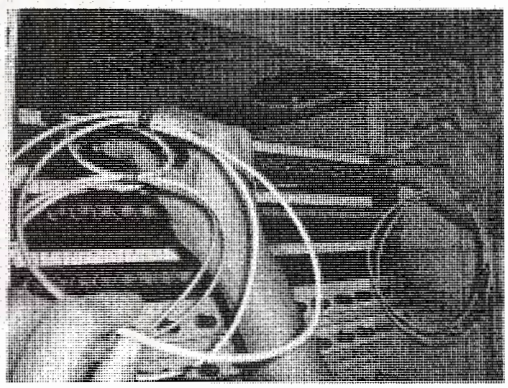
สำหรับการตรวจวัดและเก็บรวบรวมข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเส้นใยนำแสงบนเครือข่าย CHULANETได้ติดต่อประสานงานกับเจ้าหน้าที่ของสำนักเทคโนโลยีสารสนเทศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้รับอนุญาตให้นำเครื่อง OTDR เข้าไปทำการทดสอบได้ โดยทดลองวัดผลในส่วนของเครือข่ายที่ยังไม่มีการใช้งาน เพื่อที่จะไม่ส่งผลกระทบกับเส้นใยนำแสงที่กำลังมีการรับส่งข้อมูลอยู่ เส้นใยนำแสงที่ได้ทดสอบเป็นชนิดโหมดเดี่ยวจำนวน 24 เส้น เชื่อมต่อระหว่างอาคารบรมราชกุมารี คณะอักษรศาสตร์ กับอาคารจามจุรี 3 ชั้น 4 ซึ่งเป็นที่ตั้งของสำนักเทคโนโลยีสารสนเทศ โดยมีระยะทางในแต่ละเส้นประมาณ 800 เมตร เดินสายเคเบิลเส้นใยนำแสงตามท่อเหล็กและพาดผ่านถนนพญาไทไปบนสะพานลอยคนเดินข้าม (หมายเหตุ เส้นใยนำแสงที่ทำการทดสอบครั้งนี้แตกต่างจากเส้นใยนำแสงที่ได้สำรวจและรายงานไว้ในเมื่อปีก่อน เนื่องจากมีการใช้งานในเส้นทางนั้นไปแล้ว จึงไม่สะดวกในการเข้าไปเชื่อมต่อและทำการทดสอบ)

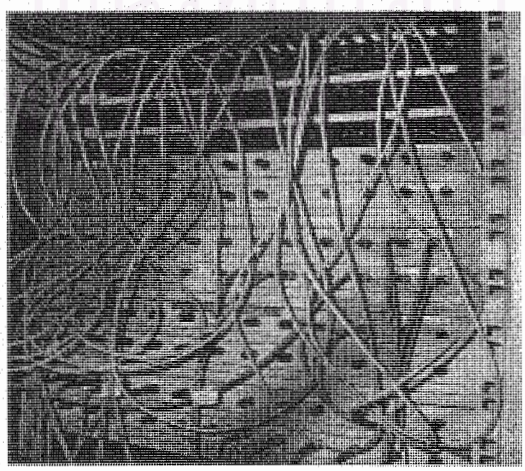
เริ่มต้นกระบวนการวัดด้วยการแบ่งทีมออกเป็น 2 กลุ่ม ไปประจำการที่ห้องเครือข่ายของทั้งอาคารจามจุรี 3 ชั้น 4 และอาคารบรมราชกุมารี คณะอักษรศาสตร์ ทำการยิงพัลส์แสงสีแดงจากเครื่อง OTDR ที่อาคารจามจุรี 3 ไปยังอาคารบรมราชชนนี เพื่อทดสอบว่าเส้นใยนำแสงทั้ง 24 เส้นมีปัญหา หรือมีตัวเลขของ port ที่ต้นทางและปลายทางตรงตามที่ระบุไว้หรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 2 ถัดไปทำการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงทีละเส้นด้วยสาย fiber jumper เพื่อเพิ่มระยะทางวัดระหว่างสองอาคารดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2: การยิงแสงสีแดงเพื่อตรวจสอบ port



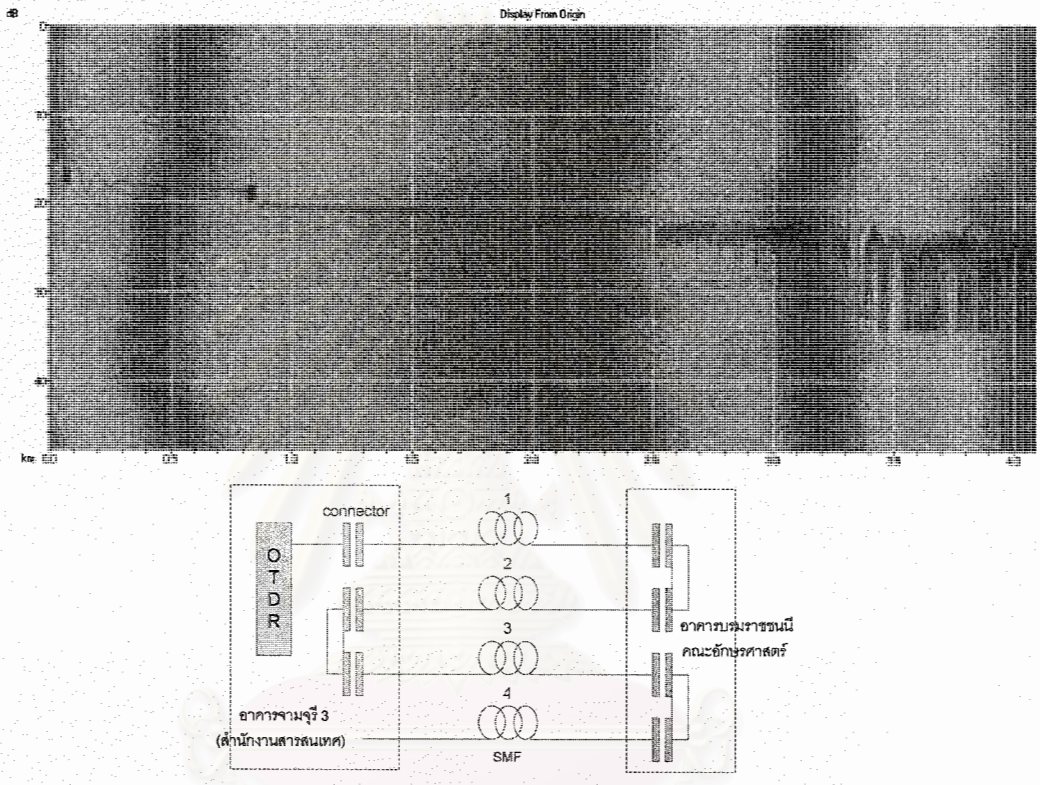
รูปที่ 3: การเชื่อมต่อด้วยสาย fiber jumper



รูปที่ 4: การเชื่อมต่อทั้ง 24 เส้น

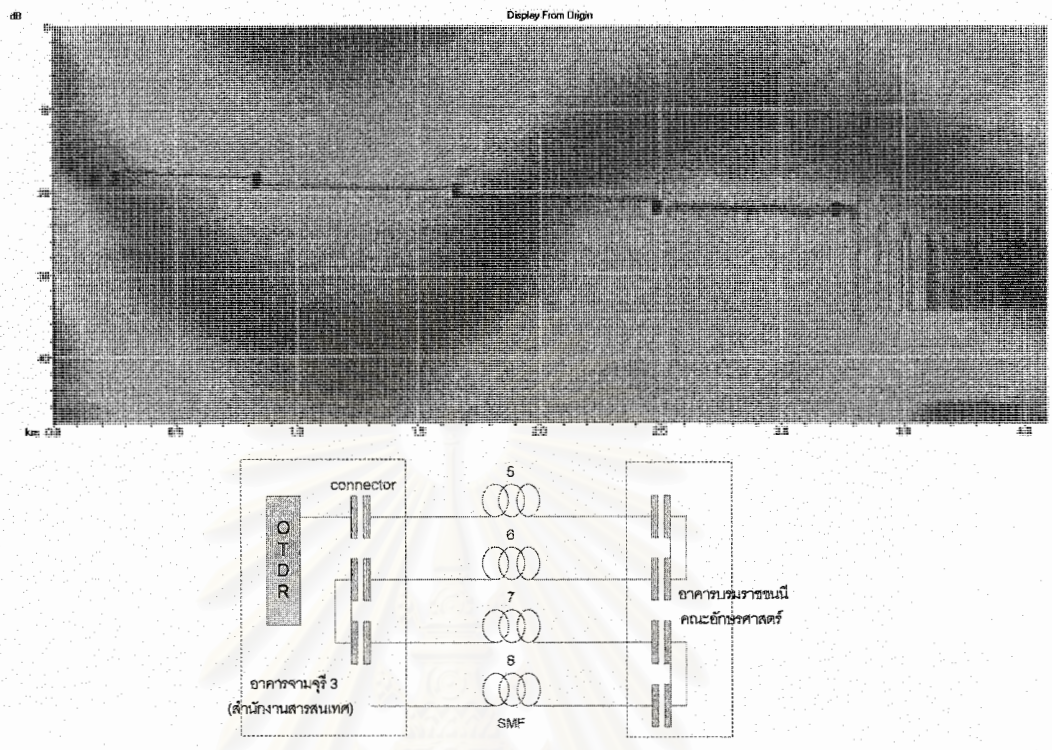
ได้ทดลองวัดคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงทั้ง 24 เส้น โดยเลือกทำการวัดทีละ 4 เส้น เริ่มต้นวัดที่ port 1 อาคารจามจุรี 3 และใช้สาย jumper เชื่อมต่อ port 2 กับ 3 ด้วยกัน ส่วนที่อาคารบรมราชชนนีก็เชื่อม port 1 กับ 2 และ port 3 กับ 4 เข้าด้วยกัน เพื่อให้พัลส์แสงสามารถวิ่งต่อเนื่องผ่านเส้นใยนำแสงทั้ง 4 เส้นระหว่าง 2 อาคารได้ จากนั้นเปลี่ยน port วัดไปทีละ 4 เส้นจนครบ 24 เส้น รูปที่ 4 แสดงการเชื่อมต่อสาย jumper เส้นสีเหลืองตลอดแนวแถวบนสุดเพื่อการทดสอบครบทั้ง 24 เส้น

ผลกราฟที่วัดได้และรูปภาพการเชื่อมต่อ port ทีละ 4 เส้น คือ 1 ถึง 4, 5 ถึง 8, 9 ถึง 12, 13 ถึง 16, 17 ถึง 20, และ 21 ถึง 24 เป็นดังแสดงในรูปที่ 5– 10 ตามลำดับ

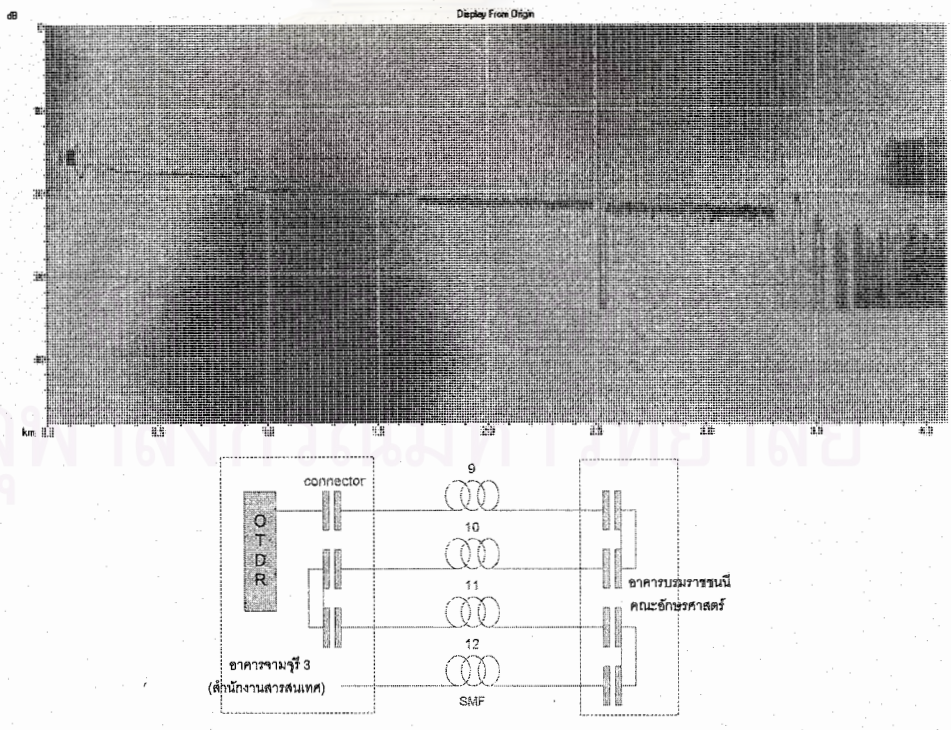


รูปที่ 5: ผลการวัดเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวเส้น 1 ถึง 4 ระหว่างอาคารจามจุรี 3 กับอาคารบรมราชชนนี

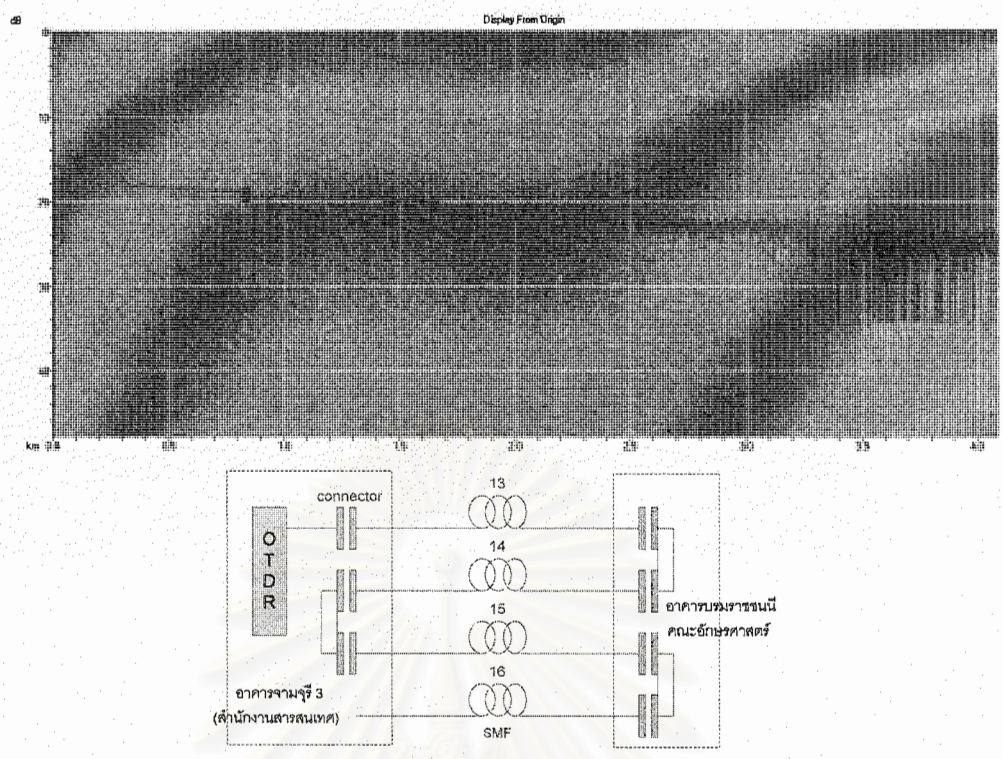
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



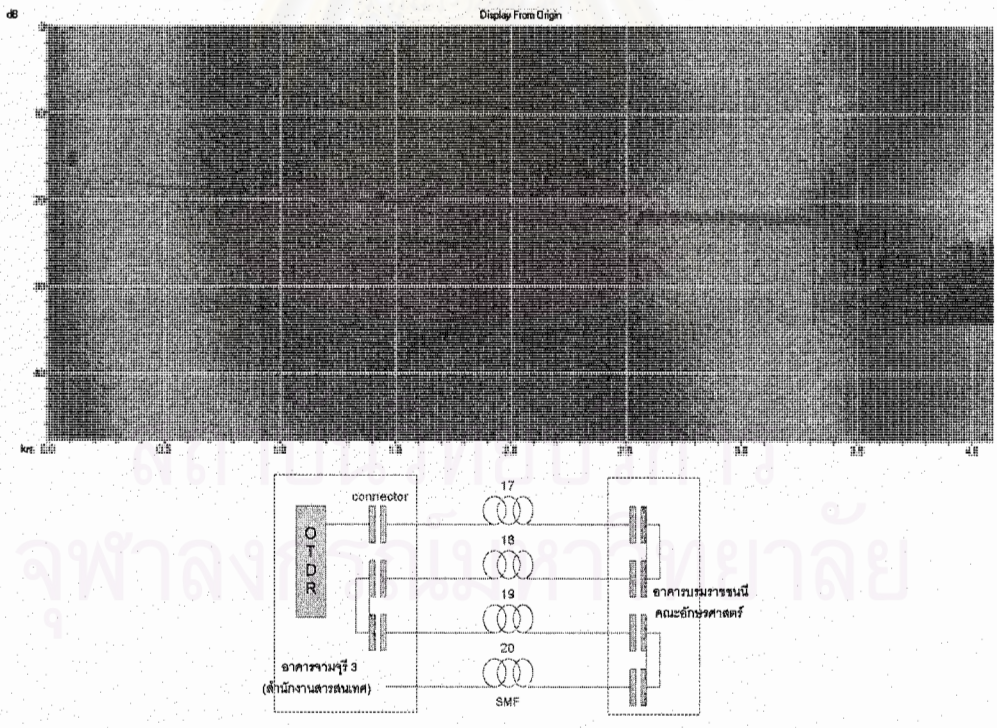
รูปที่ 6: ผลการวัดเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวเส้น 5 ถึง 8 ระหว่างอาคารจามจุรี 3 กับอาคารบรมราชชนนี



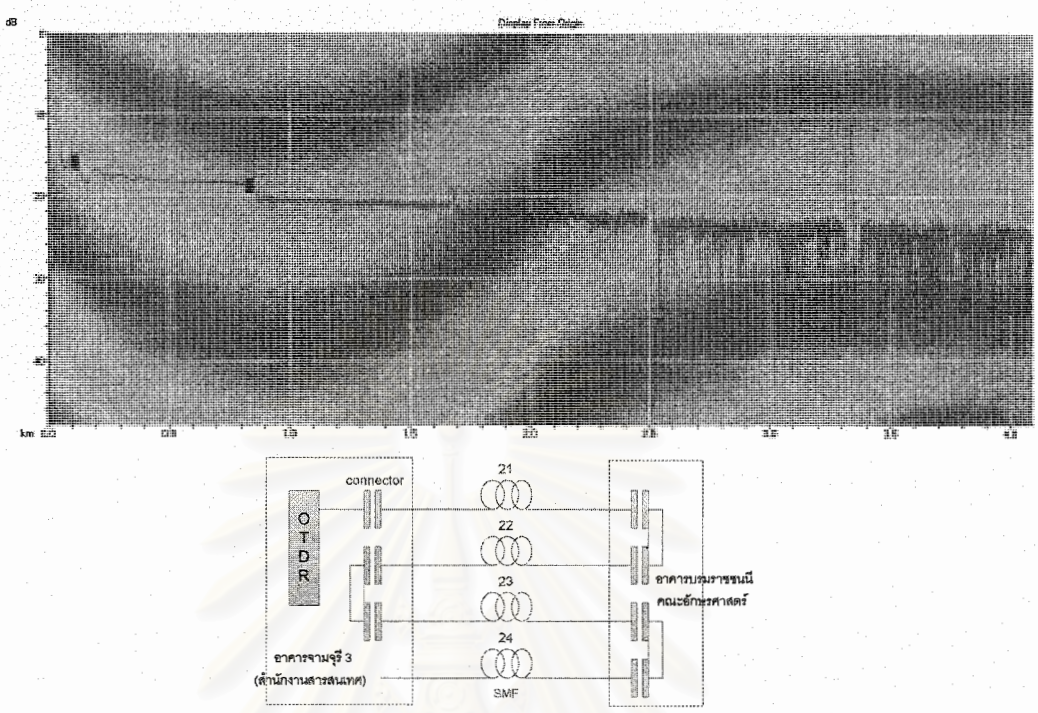
รูปที่ 7: ผลการวัดเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวเส้น 9 ถึง 12 ระหว่างอาคารจามจุรี 3 กับอาคารบรมราชชนนี



รูปที่ 8: ผลการวัดเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวเส้น 13 ถึง 16 ระหว่างอาคารจามจุรี 3 กับอาคารบรมราชชนนี



รูปที่ 9: ผลการวัดเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวเส้น 17 ถึง 20 ระหว่างอาคารจามจุรี 3 กับอาคารบรมราชชนนี



รูปที่ 10: ผลการวัดเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวเส้น 21 ถึง 24 ระหว่างอาคารจามจุรี 3 กับอาคารบรมราชชนนี

ผลของกราฟที่วัดได้ทั้ง 6 ใกล้เคียงกับทางทฤษฎี โดยช่วงเริ่มต้นแสดงเป็นกราฟเส้นโค้ง จากนั้นมีการลดทอนระดับกำลังแสงลงอย่างช้าๆ ตามความยาวของเส้นใยนำแสง สำหรับที่ตำแหน่งเชื่อมต่อด้วยสาย fiber jumper ซึ่งจะมีหัวต่อ (connector) ก็ตรวจพบการสะท้อนทั้ง 3 ตำแหน่งคือที่ระยะทาง 0.825, 1.65, และ 2.475 กิโลเมตร โดยแสดงผลเป็นยอดสี่เหลี่ยม ความสูงต่ำของยอดสี่เหลี่ยมนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของหัวต่อว่าแนบสนิทดีหรือมีช่องว่างอากาศหรือไม่ ยิ่งช่องว่างกว้างมากก็จะเกิดการสะท้อนกลับของพัลส์แสงมากทำให้ได้ผลวัดเป็นยอดสูง ดังตัวอย่างเช่นที่ตำแหน่งสิ้นสุดปลายสายหลังเส้นใยนำแสงที่ 4 ที่ระยะทาง 3.3 กิโลเมตร ซึ่งเป็นการสะท้อนกลับอันเนื่องมาจากอากาศได้ผลเป็นยอดสูงที่สุด จากนั้นเส้นกราฟจะสะท้อนกลับไปมาซึ่งไม่มีนัยสำคัญอันใด

เมื่อสังเกตเส้นกราฟทั้ง 6 อย่างละเอียดพบว่ากราฟมีความผิดปกติคือ ผลกราฟที่วัดได้จะมีการแกว่งค่าทำให้ได้เส้นกราฟที่ไม่เรียบ โดยจะมีความรุนแรงมากขึ้นในช่วงเส้นใยนำแสงลำดับที่ 3 และ 4 ของการวัดในแต่ละชุด จากสาเหตุความไม่เรียบของเส้นกราฟทำให้เครื่อง OTDR รายงานผลด้วยการระบุว่ามีเหตุการณ์เกิดขึ้นภายในเส้นใยนำแสงดังแสดงด้วยสัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใต้เส้นกราฟ ณ ตำแหน่งที่มีเหตุการณ์เกิดขึ้น อย่างเช่น สัญลักษณ์หมวกสี่เหลี่ยมระบุว่ามีการสะท้อนกลับของกำลังแสง หรือสัญลักษณ์เส้นลาดลงระบุว่ามีการลดทอนของกำลังแสงอย่างฉับพลัน และเมื่อมีการแกว่งค่ามากก็หยุดการระบุเหตุการณ์ต่างๆ ไปหมดสิ้น ส่วนในตำแหน่งที่เส้นกราฟมีการตกลงของ

กำลังแสงอย่างรุนแรงขนาดเกิน 10 dB จะทำให้เครื่อง OTDR รายงานว่าเป็นการสิ้นสุดปลายสาย โดยระบุเป็นสัญลักษณ์ตัวเอ็ม ถึงแม้ว่าจะยังไม่ใช่การสิ้นสุดปลายสายที่แท้จริง

ยิ่งไปกว่านั้น ความไม่เรียบของเส้นกราฟจะทำให้การวัดค่าความชันของเส้นกราฟอย่างถูกต้องทำได้ยากขึ้น ซึ่งค่าความชันของเส้นกราฟนี้คือค่าการลดทอนกำลังแสงภายในเส้นใยนำแสง และเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่ต้องวัด ดังนั้นการอ่านค่าความชันจึงต้องใช้การประมาณค่าจากเส้นกราฟที่ละช่วง ผลการอ่านค่าการลดทอนของเส้นใยนำแสงทั้ง 24 เส้นได้ดังแสดงในตารางที่ 1

เส้นที่	ค่าลดทอน (dB/km)	เส้นที่	ค่าลดทอน (dB/km)	เส้นที่	ค่าลดทอน (dB/km)	เส้นที่	ค่าลดทอน (dB/km)
1	0.887	7	0.487	13	0.932	19	0.817
2	0.841	8	0.549	14	0.787	20	0.727
3	0.619	9	0.854	15	0.654	21	0.639
4	0.732	10	0.735	16	0.814	22	0.808
5	0.891	11	0.757	17	0.822	23	0.897
6	0.605	12	0.547	18	0.957	24	0.632

ตารางที่ 1: ค่าการลดทอนของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวเส้นที่ 1 ถึง 24

จากผลในตารางจะเห็นได้ว่า ค่าการลดทอนของเส้นใยนำแสงที่ทดสอบนั้นมีค่าสูงมากกว่าค่าปรกติที่วัดได้จากในห้องปฏิบัติการทดลอง ซึ่งมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.2 – 0.3 dB/km เท่านั้น ที่มาของค่าการลดทอนที่สูงนี้อาจเนื่องมาจากการติดตั้งสายเคเบิลเส้นใยนำแสงเชื่อมโยงระหว่างสองอาคารที่มีการร้อยสายเคเบิลเข้าในท่อเหล็กพาดผ่านตามสะพานลอยและมีการฝังท่อลงดิน ซึ่งอาจทำให้มีการโค้งงอภายในสายหรืออาจมีแรงดึงที่สาย และคงมีความชื้นแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยนำแสงตามกาลเวลา รวมถึงความสะอาดของหัวต่อและจุดเชื่อมต่อแบบ splice (ถ้ามี) ที่ตำแหน่งต่างๆ ว่าสะอาดเพียงพอหรือไม่ อีกทั้งการติดตั้งสายเคเบิลนี้ก็ได้ทำมานานเกินกว่า 10 ปีแล้ว ทำให้เส้นใยนำแสงอาจมีการเสื่อมคุณภาพไปตามความร้อนและเวลา จึงอาจส่งผลต่อค่าการลดทอนที่วัดได้สูงนี้ เอง

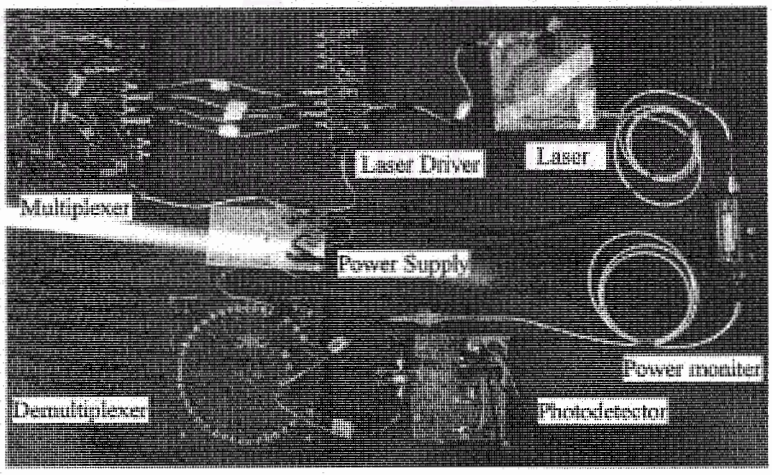
สรุปได้ว่าโครงข่ายเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวระหว่างอาคารจามจุรี 3 ชั้น 4 กับอาคารบรมราชชนนี คณะอักษรศาสตร์ ทั้ง 24 เส้นนั้นมีความผิดปกติเล็กน้อย กล่าวคือมีค่าการลดทอนที่สูงดังผลการทดสอบที่วัดได้ แต่ด้วยระยะทางสั้นอยู่ที่ 0.825 กิโลเมตร ทำให้ค่าการสูญเสียกำลังแสงสูงสุดอันเนื่องมาจากการค่าการลดทอนเพียงอย่างเดียวคำนวณได้เท่ากับ (0.957 dB/km x 0.825 กิโลเมตร) 0.79 dB ซึ่งหมายความว่ากำลังแสงที่ปลายสายจะคงเหลือเป็น 83% จากปริมาณแสงที่ส่งจากต้นสาย ซึ่งก็ยังคงถือว่าเป็นการสูญเสียที่น้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียจากตำแหน่งตัวต่อด้วยค่าประมาณ

1-2 dB ต่อหัวต่อ จึงสามารถนำเส้นใยนำแสงเหล่านี้มาใช้งานในการรับส่งสัญญาณข้อมูลทางแสงได้เป็นปรกติ

2) <u>เพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของชุดสาธิตตัวส่งและตัวรับสัญญาณแสงที่ประกอบขึ้น ให้มีความเร็วจาก 155 Mb/s สูงขึ้นไปถึง 2.5 Gb/s</u>

ได้พัฒนาชุดสาธิตตัวส่งและตัวรับสัญญาณแสง ให้สามารถรับส่งข้อมูลได้รวดเร็วมากขึ้นจากแต่เดิมที่ทำไว้ในรายงานปีที่แล้วที่อัตราความเร็ว 155 Mb/s จนสำเร็จเป็น 2.5 Gb/s ในเบื้องต้น โดยอาศัยการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันของตัว IC (Integrated Circuit) chips ความเร็วสูง อย่าง 16:1 multiplexer, 1:16 demultiplexer และ 2.5 Gb/s laser driver ที่ได้มีการบัดกรีตัว IC ดังกล่าวลงบน Evaluation boards มาพร้อมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็นเรียบร้อยแล้ว จากการที่ได้ประกอบตัว multiplexer และ demultiplexer เข้าไปด้วยทำให้ตัวส่งและรับสัญญาณแสงมีชื่อเรียกอื่นที่ใช้โดยทั่วไปว่าตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสง (Optical Transponder)

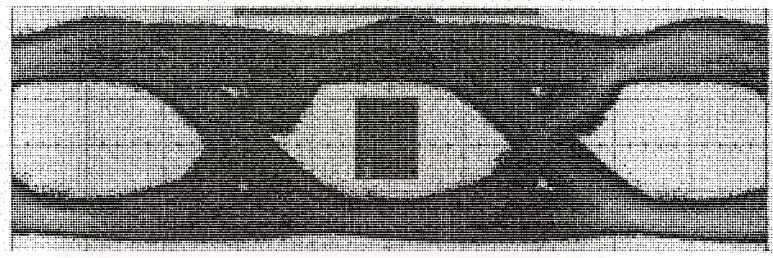
เริ่มต้นดำเนินการโดยการทดสอบวัดคุณลักษณะสมบัติของแต่ละตัวอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเลเซอร์ (Laser) และตัวตรวจจับแสง (Photodetector) (หมายเหตุ รายละเอียดของตัวเลเซอร์และตัวตรวจจับแสงได้นำเสนอไว้ในรายงานปีที่แล้ว) ว่าสามารถผลิตแสงและตรวจจับแสงได้ในระดับที่ระบุไว้ตรงตาม data sheet หรือไม่ โดยใช้อุปกรณ์ชื่อ Inline Power Monitor ในการแสดงค่าระดับกำลังแสงที่หน้าจอ แล้วจึงบัดกรีตัวเลเซอร์และตัวตรวจจับแสงลงบนแผ่นบอร์ดพร้อมด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์และไฟป้อน (Power Supply) ที่จำเป็น ถัดไปทำการทดสอบ Evaluation boards ทั้งสามบอร์ดว่าสามารถรับสัญญาณข้อมูลขาเข้าและสร้างสัญญาณขาออกได้ถูกต้องตามระดับมาตรฐานที่ต้องการหรือไม่ หลังจากนั้นทำการประกอบทีละชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 11



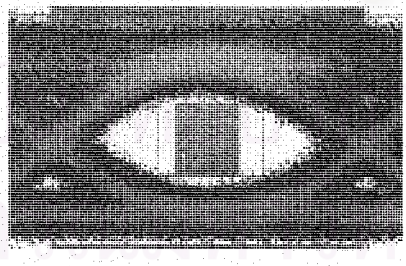
รูปที่ 11: ชุดสาธิตเบื้องต้นของตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสงความเร็ว 2.5 Gb/s

เมื่อได้ชุดสาธิตเบื้องต้นแล้ว ก็จะทดลองรับส่งข้อมูลความเร็ว 2.5 Gb/s ในห้องปฏิบัติการวิจัยก่อน ก่อนที่จะนำไปทดสอบบนเครือข่ายจริงภายในจุฬาฯ โดยจะส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่เหมือนกับของ CHULANET แต่ที่ระยะทางไกลกว่ามากถึง 15 กิโลเมตร ซึ่งเป็นเส้นใยนำแสงจำนวน 6 ม้วน ที่ได้รับบริจาคมาจากบริษัท Thai Fiber Optics จำกัด ก่อนที่จะสามารถทำการทดลองได้ก็จำเป็นต้องเชื่อมต่อปลายสายทั้ง 6 ม้วนด้วยหัวต่อชนิด SC/FC เอง โดยได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กโตรออปติกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่อนุญาตให้เข้าใช้เครื่องมือ fusion splicer และอุปกรณ์ต่างๆ จนเชื่อมต่อปลายสายทั้ง 6 ม้วนได้สำเร็จ

จากการทดลองรับส่งข้อมูล 2.5 Gb/s ด้วยชุดสาธิตเบื้องต้นดังกล่าว ผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวระยะทาง 15 กิโลเมตร ได้ตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณแสงส่งออกจากตัวเลเซอร์และสัญญาณไฟฟ้ารับจากตัวตรวจจับแสง โดยวิเคราะห์ดูจากแผนภาพรูปตา (Eye Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ ว่าแผนภาพรูปตาเปิดกว้าง และไม่มีความบิดเบี้ยวของตามากเกินไปจนล้นทับกรอบสี่เหลี่ยมที่อยู่ตรงกลางรูปตา กรอบสี่เหลี่ยมที่แสดงนี้คือ eye masking แบบหนึ่งซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันในการวัดคุณภาพของสัญญาณ และจะมีติดตั้งไว้อยู่แล้วในตัวเครื่องมือวัดสัญญาณความเร็วสูงอย่างตัว DCA (Digital Communication Analyzer) ที่ใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัย เพียงแต่ต้องเลือกใช้ eye masking ที่เหมาะสมกับอัตราความเร็วและประเภทของข้อมูลที่ทดสอบ



รูปที่ 12: 2.5 Gb/s Eye Diagram ของสัญญาณแสงออกจากตัวเลเซอร์



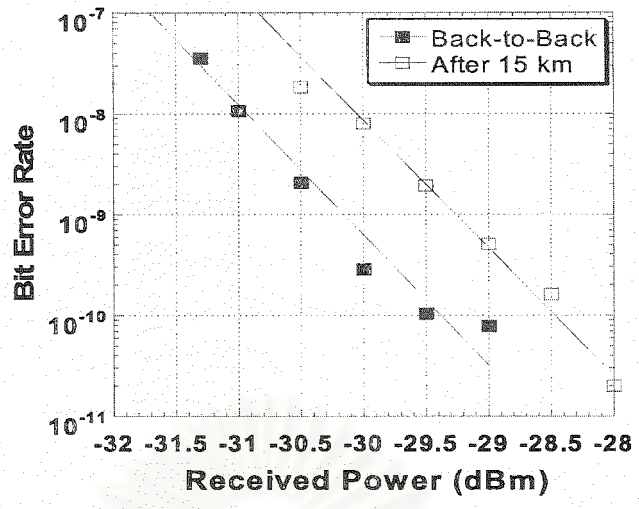
รูปที่ 13: 2.5 Gb/s Eye Diagram ของสัญญาณไฟฟ้าจากตัวตรวจจับแสง

จากการวิเคราะห์แผนภาพรูปตาที่วัดได้ จะเห็นว่าสัญญาณแสงขาออกจากเลเซอร์มีความบิดเบี้ยวของรูปตาบ้างเล็กน้อยที่ช่วงขาขึ้นของสัญญาณ และความหนาของสัญญาณดิจิตอลบิต '1' ที่ด้านบนจะหนามากกว่าความหนาของสัญญาณดิจิตอลบิต '0' ที่ด้านล่างเสมอ เนื่องจากการแกว่งค่า

ของระดับสัญญาณที่สูงกว่าอย่างบิต '1' ส่วนสัญญาณไฟฟ้าขาออกจากตัวตรวจจับแสงซึ่งได้มาจากการตรวจจับสัญญาณแสงขาออกจากเลเซอร์นั้น ก็จะมีลักษณะของสัญญาณเช่นเดียวกัน กล่าวคือมีความโค้งมนของรูปตา และมีความหนาของสัญญาณดิจิตอลบิต '1' ที่ด้านบนมากกว่าสัญญาณดิจิตอลบิต '0' ที่ด้านล่างเหมือนกันกับสัญญาณแสงขาออกจากตัวเลเซอร์

ถัดไปเป็นการพิสูจน์ว่าชุดสาธิตเบื้องต้นที่ประกอบขึ้นนี้ จะสามารถรับส่งสัญญาณโดยไม่มีความผิดพลาดของบิตข้อมูลเกิดขึ้นได้หรือไม่ จึงต้องทดสอบวัดหาค่าอัตราความผิดพลาดบิต(Bit Error Rate, BER) ของการรับส่งสัญญาณในกรณีนั้นๆ ในที่นี้ เนื่องจากห้องปฏิบัติการวิจัยยังไม่มีเครื่องมือวัดหาค่าอัตราบิตผิดพลาด (Bit Error Rate Tester, BERT) เราจึงประยุกต์ใช้บอร์ด FPGA (Field Programmable Gate Array) chip รุ่น Spartan XC3S200 ของบริษัท Xilinx จำนวน 2 บอร์ดต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ในการโปรแกรมชิพ FPGA ดังกล่าวเพื่อ (1) สร้างสัญญาณข้อมูลด้วยรูปแบบบิต (bit pattern) ที่ต้องการใช้ส่งตรงตามมาตรฐานอย่าง Pseudo Random Bit Sequence (PRBS) ที่ความยาว 2^7-1 บิต และ (2) เปรียบเทียบรูปแบบบิตที่ส่งไปยังภาคส่งกับบิตที่ตรวจจับได้จากภาครับ ว่ามีความแตกต่างกันกี่บิตจากจำนวนบิตทั้งหมดที่ส่งไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะคำนวณออกมาเป็นค่า BER ได้ตามต้องการ

รูปที่ 14 แสดงผลการทดลองวัดหา BER ที่อัตราความเร็ว 2.5 Gb/s ด้วยรูปแบบบิตข้อมูล PRBS 2^7-1 ในสองกรณีคือ Back-to-Back และผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวความยาว 15 km ที่ระดับค่าต่างๆของกำลังแสงขาเข้าที่ตัวตรวจจับแสง สำหรับกรณีแรก (Back-to-Back) จะเป็นการทดสอบว่าชุดสาธิตเบื้องต้นต้องใช้กำลังแสงขาเข้าขั้นต่ำที่ค่าใดในการตรวจจับข้อมูลแล้วให้ผล BER เท่ากับ 10^{-9} ซึ่งเป็นค่า BER มากที่สุดที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานของการรับส่งข้อมูลผ่านระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสง ส่วนกรณีที่สอง (After 15 km) จะเป็นการทดสอบวัดหาค่า Power Penalty ว่าชุดสาธิตเบื้องต้นจะต้องเพิ่มระดับกำลังแสงขาเข้าขั้นต่ำมากขึ้นเท่าไร เพื่อชดเชยกับการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงเป็นระยะทางยาวขึ้นถึง 15 km ซึ่งจะต้องประสบปัญหาเกี่ยวกับดิสเพอร์ชั่น (Dispersion) จากเส้นใยนำแสง จากการอ่านค่าเส้นกราฟทั้งสองได้ความแตกต่างระหว่างระดับกำลังแสงขาเข้าขั้นต่ำเป็นค่า Power penalty เท่ากับ (-29.3 –(-30.2)) 0.9 dB ซึ่งน้อยกว่า 1 dB จึงยอมรับได้ และเมื่อสังเกตแนวโน้มของเส้นกราฟทั้งสองจะพบว่าที่ระดับกำลังแสงขาเข้าสูงขึ้นจะให้ค่า BER ที่น้อยลงมากอย่างรวดเร็ว จนสรุปได้ว่าชุดสาธิตเบื้องต้นที่ประกอบขึ้นนี้สามารถรับส่งสัญญาณข้อมูลได้โดยไม่มีความผิดพลาดของบิตเกิดขึ้นนั้นเอง



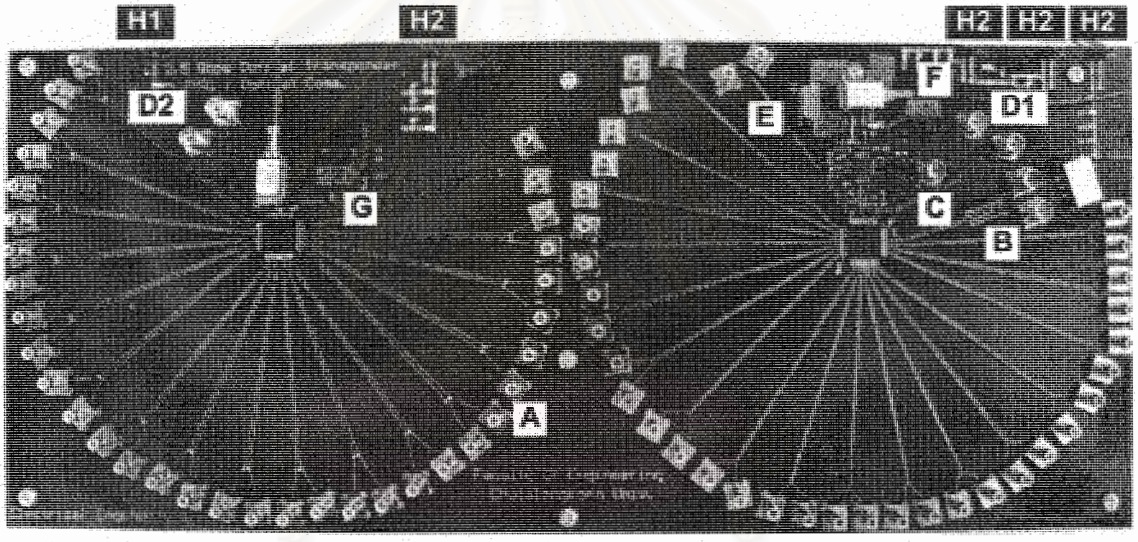
รูปที่ 14: ผลการวัดอัตราความผิดพลาดบิตที่ความเร็ว 2.5 Gb/s ในสองกรณี

3) <u>ออกแบบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูงและประกอบชุดสาธิตเพิ่มขึ้น</u>

หลังจากที่ได้ทดสอบชุดสาธิตเบื้องต้นว่าสามารถทำงานมีประสิทธิภาพตามต้องการแล้ว ต่อไปคือการออกแบบและกัด (Fabricate) แผ่นวงจรพิมพ์ Printed Circuit Board (PCB) ความเร็วสูง เพื่อนำตัว IC chips ทั้งสามซึ่งก็คือ 16:1 multiplexer, 1:16 demultiplexer และ 2.5 Gb/s laser driver รวมทั้งตัวเลเซอร์ และตัวตรวจจับแสงมาบัดกรีรวมกันลงบนแผ่น PCB แผ่นเดียว ให้เป็นชุดสาธิตตัวส่งและตัวรับสัญญาณแสงหรือที่เรียกกันว่าตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่สมบูรณ์ในขนาดเล็กและไม่ใช้ evaluation board

ในการออกแบบแผ่น PCB ความเร็วสูงสำหรับใช้กับข้อมูล 2.5 Gb/s นั้น จะแตกต่างจากการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เพราะต้องคำนึงถึงชนิดของวัสดุฉนวนและตัวนำ จำนวนชั้น ลายเส้นทางเดิน ขนาดและความยาวของลายเส้นวงจรที่จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปและเกิดเป็นปัญหาได้ที่ความถี่สูง การออกแบบลายวงจรกรณีนี้จึงต้องอาศัยซอฟแวร์พิเศษ เช่น Expedition หรือ Pads ที่รวม HyperLynx GHz ซึ่งเป็น signal integrity analysis tool ของบริษัท Mentor Graphics เพื่อช่วยวิเคราะห์ลายวงจรว่าเมื่อสัญญาณความถี่สูงวิ่งผ่านจะมีปัญหาหรือเกิดการแทรกสอดหรือไม่ มิฉะนั้นแผ่นวงจรที่กัดมาอาจใช้งานไม่ได้ทำให้ต้องกัดซ้ำหลายครั้งซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองทั้งเวลาและงบวิจัย แต่เมื่อสอบถามราคาซอฟต์แวร์จากตัวแทนจำหน่ายเพียงผู้เดียวในประเทศไทยก็ได้ราคาที่แพงมากถึง 4.5 แสนบาท ทำให้เราต้องตัดสินใจใช้โปรแกรม Protel ที่มีขายอยู่ทั่วไปที่พันทิพย์ในการออกแบบลายวงจร แต่อาศัยคำนึงถึงหลักการออกแบบวงจรความถี่สูงในการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของลายเส้นวงจร

ในส่วนของรายละเอียดด้านการออกแบบลายวงจร และการประกอบชุดสาธิตตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสงได้แจกแจงไว้ในภาคผนวก 1 ซึ่งอธิบายถึงขั้นตอนการเลือกใช้แผ่นวงจรแบบชนิดหลายชั้น โดยมี 4 ชั้นคือ Top layer เป็นชั้นที่วางเส้นสัญญาณข้อมูล ถัดไปเป็น Ground plane เป็นชั้นกราวด์ที่กั้นระหว่างชั้นของสัญญาณข้อมูลกับชั้นของไฟเลี้ยง และท้ายสุดคือ Power layer1 และ Power layer2 เป็นชั้นที่วางไฟเลี้ยงที่จะป้อนให้กับตัววงจรรวมต่างๆ ในการวาดลายวงจรทำการเขียนด้วยมือโดยใช้ซอฟแวร์ Protel ซึ่งมีรูปภาพของลายเส้นวงจรแสดงไว้ในภาคผนวก 1 รูปที่ 1.2 สำหรับการออกแบบลายวงจรของสัญญาณที่เป็นแบบ Differential นั้นจะต้องออกแบบให้มีความยาวเท่ากันที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ลายวงจรทั้งหมดถูกนำไปสั่งกัดเป็นแผ่นวงจรทรานส์พอนเดอร์ต้นแบบโดยใช้วัสดุ (Material) ชนิด FR4 ที่โครงการเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ (PCBTEC) และเมื่อนำได้อุปกรณ์ต่างๆ มาบัดกรีจะได้เป็นชุดสาธิตตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสงดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15: ชุดสาธิตตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสงความเร็ว 2.5 Gb/s

สำหรับประสิทธิภาพของชุดสาธิตตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ได้ประกอบขึ้นนี้ ได้ทำการทดสอบโดยแบ่งออกเป็น ทางภาคส่ง ทางภาครับ และการทดสอบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง จากผลการทดสอบปรากฏว่าทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ออกแบบและประกอบขึ้นสามารถทำงานได้ตามมาตรฐาน โดยสามารถสร้างสัญญาณทางแสงที่อัตราส่ง 2.5 กิกะบิตต่อวินาทีจากการรวมสัญญาณทางไฟฟ้าความเร็ว 155 เมกกะบิตต่อวินาที จำนวน 16 ช่องสัญญาณข้อมูลแบบ PRBS 2^{7-1} ด้วยตัว 16:1 multiplexer สัญญาณแสงขาออกจากภาคส่งได้ผ่านการทดสอบหน้ากากมาตรฐาน Eye Mask Test สำหรับข้อมูลอัตรา OC-48 และมีค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชั่น (Extinction Ratio)มากกว่า 8.2 dB ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ส่วนทางภาครับสามารถรับสัญญาณทางแสงความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาทีโดยรับสัญญาณแสงได้ที่ระดับกำลังแสงต่ำสุดถึง -29 dBm ก่อนแปลงกลับเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและส่งผ่านตัว 1:16 demultiplexer ออกมาเป็น 16 ช่องสัญญาณข้อมูลขาออก เมื่อทำการ

ทดสอบวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตได้ต่ำกว่าระดับ 10^{-9} และผ่านการทดลองส่ง-รับสัญญาณทางแสงบนเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะทาง 15 กิโลเมตรโดยให้อัตราความผิดพลาดบิตไม่เกิน 10^{-9} ได้สำเร็จ สำหรับรายละเอียดของการทดสอบ รวมถึงผลการวัดประสิทธิภาพของตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสงได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก 2

ส่วนงานที่จะดำเนินการต่อไปในปีหน้า

1) จัดซื้ออุปกรณ์ทั้งหมดเพิ่มเติมมาประกอบเป็นชุดต้นแบบอีกอย่างน้อย 2 ชุด เพื่อสามารถทดลองรับส่งสัญญาณแสงแบบ WDM อย่างน้อย 3 ช่องสัญญาณร่วมกันในหนึ่งเส้นใยนำแสง โดยทดสอบว่าไม่ให้มีบิตผิดพลาดเกิดขึ้นที่อัตราข้อมูลความเร็ว2.5 Gb/s

2) ตรวจสอบถึงอุปสรรค ความเป็นไปได้ และวัดค่าความสัมฤทธิผลของการทดลองรับส่งสัญญาณแสงเมื่อใช้อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างชนิดกัน และรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงที่ระยะทางต่างกัน

3) นำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองไปใช้คาดการณ์ถึงขีดจำกัดและประสิทธิภาพที่สูงสุดของการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเส้นใยนำแสง (ถ้ามีเวลาจะนำผลการทดลองไปป้อนลงใน Optiwave™ simulation software เพื่อให้ได้ผล simulation ออกมาใช้ประโยชน์ต่อไป) ท้ายที่สุดเขียนรายงานสรุปผลโครงการ

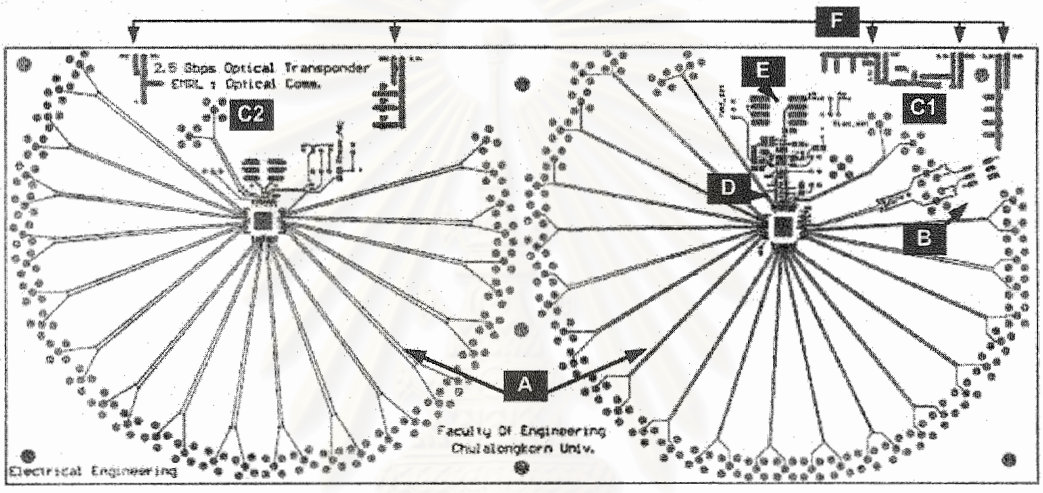
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก 1

การออกแบบลายวงจรและการประกอบทรานส์พอนเดอร์ทางแสง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดการออกแบบลายวงจรของตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสง ซึ่งใช้เทคนิคการมอดูเลตโดยตรงและการตรวจจับโดยตรงที่ความเร็วข้อมูล 2.5 กิกะบิตต่อวินาทีที่ได้ประกอบขึ้น

1.1 ลายวงจร

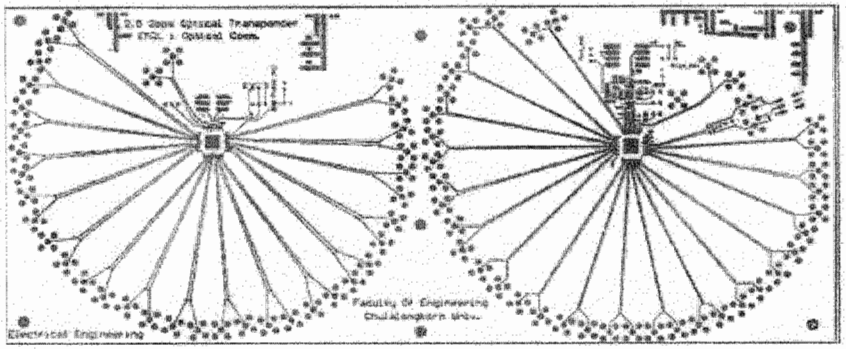


รูปที่ 1.1 ลายวงจรตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสงความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาทีทาง ด้านขวาเป็นลายวงจรของภาคส่งและทางด้านซ้ายเป็นลายวงจรของทางภาครับ

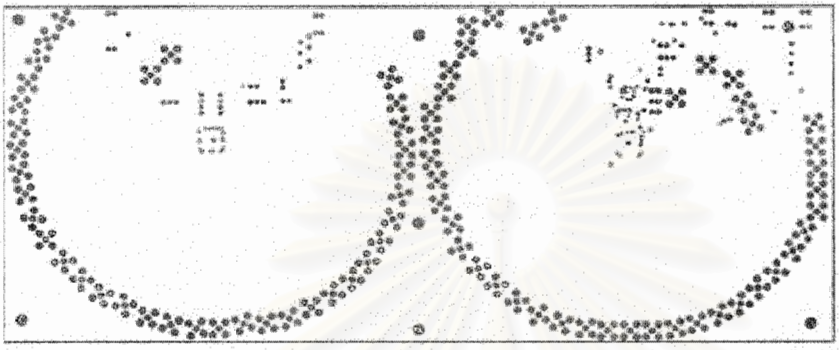
จากรูปที่ 1.1 แสดงลายวงจรของตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ได้ออกแบบขึ้น โดยวงจรนี้อยู่บนแผ่น PCB (Print Circuit Board) ชนิด FR4 ความหนารวม 1 มิลลิเมตร โดยมีทั้งหมด 4 ชั้นแบ่งเป็น

- Top Layer ใช้สำหรับเดินเส้นสัญญาณไฟฟ้าข้อมูล
- Inner Layer 1 (GND) เป็นชั้นกราวด์กั้นระหว่างสัญญาณข้อมูลกับไฟเลี้ยง เพื่อไม่ให้สัญญาณข้อมูลเกิดการกวนกันของสัญญาณรบกวนที่มาจากไฟเลี้ยง
- Inner Layer 2 (PWR) ใช้สำหรับเดินเส้นไฟเลี้ยง DR_VCC, PD_34, M_PLL, M_VCO, D_VCC, D_PLL, VCC_CLK, LD_3.3, AMP_3.3, DR_VCCL
- Bottom Layer ใช้สำหรับเดินเส้นไฟเลี้ยง D_VCO, M_DIC, M_O

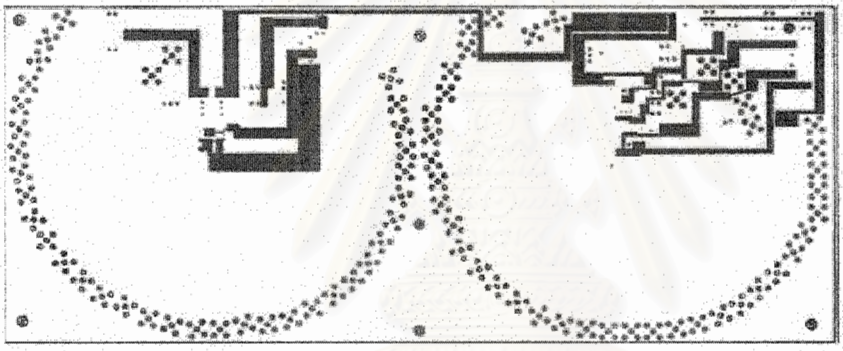
โดยมีลักษณะลายวงจรของแต่ละชั้นตาม
รูปที่ 1.2



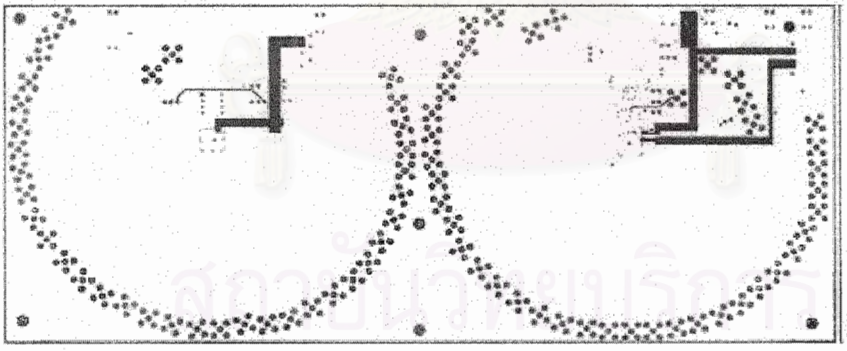
Top Layer
(Signal layer)



Inner Layer-1
(GND layer)



Inner Layer-2
(Power layer-1)

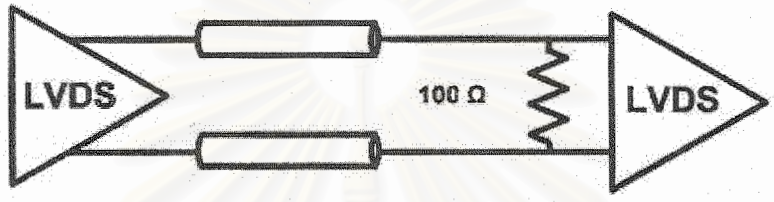


Bottom Layer
(Power layer-2)

รูปที่ 1.2 ลายวงจรของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงบนชั้นต่างๆ ทั้ง 4 ชั้นโดย แบ่งเป็น Top Layer ใช้สำหรับเดินเส้นสัญญาณไฟฟ้าข้อมูล Inner Layer 1 (GND) เป็นชั้นกราวด์กั้นระหว่างสัญญาณข้อมูลกับไฟเลี้ยง Inner Layer 2 (PWR) และ Bottom Layer ใช้สำหรับเดินเส้นไฟเลี้ยงจากรูปที่ 1.1 จะแบ่งส่วนของลายวงจรออกเป็น A-F ซึ่งจะอธิบายแต่ละส่วนตามหัวข้อ 1 - 1

1.1.1 ส่วนลายวงจรเส้นสัญญาณ 155 เมกกะบิตต่อวินาที (ส่วน A)

ลายวงจรบริเวณนี้เลือกใช้ขนาด 11 mil ซึ่งมีขนาดเท่ากับขาของตัวซิเรียลไลเซอร์และดิซิเรียลไลเซอร์พอดี สัญญาณผ่านเป็นสัญญาณระดับ LVDS ซึ่งเป็นสัญญาณแบบผลต่างที่มีค่าแรงดันที่ระดับบิต '0' และบิต '1' ที่ประมาณ 0.925 V และ 1.475 V ตามลำดับหรือก็คือมีผลต่างของระดับสัญญาณประมาณ 250-400 mV [i] ซึ่งมีอิมพิแดนซ์ขาออกอยู่ที่ 100 โอห์มทำให้จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานสำหรับ matching impedance ตามรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 การเชื่อมต่อวงจรระดับสัญญาณ LVDS กับระดับสัญญาณ LVDS ซึ่งจะต้องมีตัวต้านทานสำหรับ matching impedance 100 โอห์มขนานอยู่กับสัญญาณคู่ผลต่าง

สำหรับภาคส่งวงจร (ด้านขวามือ) ของรูปที่ 1.1 นั้น ในตัวซิเรียลไลเซอร์ที่เลือกใช้มีการต่อตัวต้านทาน 100 โอห์ม ไว้ภายในตัววงจรแล้วจึงไม่จำเป็นต้องต่อตัวต้านทานอีก ส่วนทางภาครับจะต้องต่อตัวต้านทานตามรูปแบบที่กำหนดไว้

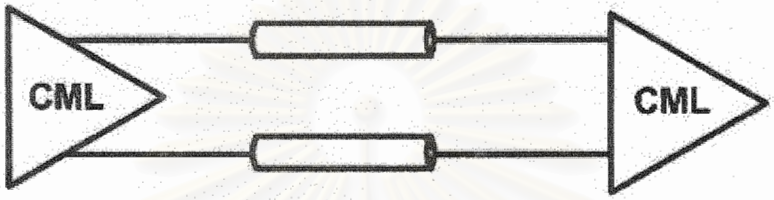
อีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการออกแบบลายวงจรของสัญญาณแบบผลต่างก็คือจำเป็นต้องให้ความยาวของเส้นสัญญาณคู่ขนานของผลต่างมีความยาวใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยลายวงจรของเส้นสัญญาณของแต่ละคู่ไม่ควรเหลื่อมกันเกิน 1 ส่วน 10 ของคาบบิตและเพื่อป้องกันปัญหาของสัญญาณรบกวนจึงเลือกใช้จุดเชื่อมต่อ (connector) เป็นแบบ SMB ซึ่งสามารถใช้งานได้ความเร็วสูงถึง 4 GHz

1.1.2. ส่วนลายวงจรเส้นสัญญาณนาฬิกาอ้างอิง 155 เมกะเฮิรตซ์ (ส่วน B)

ลายวงจรส่วนนี้ทำหน้าที่รับสัญญาณนาฬิกาอ้างอิง 155 เมกะเฮิรตซ์ โดยออกแบบให้สามารถเลือกได้ว่าจะรับสัญญาณระดับ PECL (Positive Emitter Coupled Logic) จาก VCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillator) หรือรับสัญญาณจากภายนอกผ่านจุดเชื่อมต่อแบบ SMA โดยมีการเตรียมตัวต้านทางไว้สำหรับการ matching impedance หากทำการรับสัญญาณนาฬิการะดับ LVDS หรือ CML (Common Mode Logic) จากภายนอก โดยการเชื่อมต่อตัวต้านทานสำหรับแปลง CML to LVDS และ PECL to LVDS นั้นจะไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้แต่สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้เอง

1.1.3. ส่วนลายวงจรการป้อนกลับ (Loop back) ทางไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับการทดสอบวงจร)ส่วน C1 และ C2(

ส่วนนี้จะเป็นระบบป้อนกลับสัญญาณ (System Loop Back) ทางไฟฟ้าเพื่อใช้ป้อนสัญญาณจากทางซิเรียลไลเซอร์ตรงไปสู่ดิซิเรียลไลเซอร์ได้ทันที เพื่อทำการทดสอบระบบทางไฟฟ้า เนื่องจากสัญญาณนี้เป็นสัญญาณแบบ CML ซึ่งเป็นสัญญาณแบบผลต่างที่มีค่าแรงดันที่ระดับบิต '0' และบิต '1' ที่ประมาณ 0.4 V และ 1.2 V ตามลำดับหรือก็คือมีผลต่างของระดับสัญญาณประมาณ 800 mV ที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อเป็นดังรูปที่ 1.4



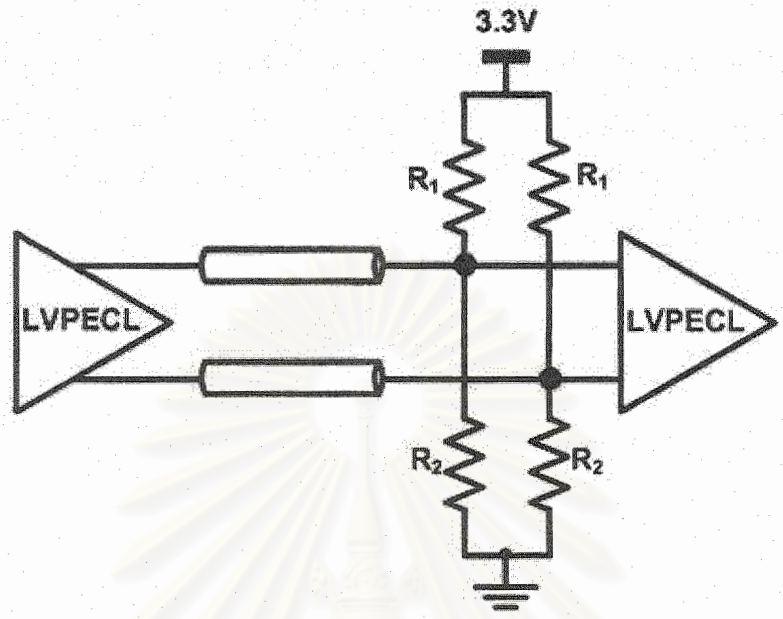
รูปที่ 1.4 การเชื่อมต่อวงจรระดับสัญญาณ CML กับระดับสัญญาณ CML สามารถต่อตรงเข้าหากันได้ทันที

จุดเชื่อมต่อเลือกใช้เป็น SMA เนื่องจากเป็นสัญญาณที่มีความเร็วสูงถึง 2.5 กิกะบิตต่อวินาที ซึ่งใกล้กับขีดจำกัดทางความเร็วสูงสุดที่สามารถใช้งานได้ของ SMB ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 4 GHz

1.1.4. ส่วนลายวงจรเส้นสัญญาณข้อมูล 2.5 กิกกะบิตต่อวินาที และสัญญาณนาฬิกา 2.5 GHz จากซิเรียลไลเซอร์ไปสู่ตัวขับเลเซอร์)ส่วน D)

ส่วนของลายวงจรบริเวณที่ออกจากซิเรียลไลเซอร์ไปจนถึงตัวขับเลเซอร์นั้นมีทั้งหมด 4 เส้น สัญญาณคือ คู่สัญญาณผลต่าง-v'สัญญาณข้อมูล และคู่สัญญาณผลต่าง-v'สัญญาณนาฬิกา สัญญาณทั้งหมดเป็นแบบผลต่าง LVPECL ซึ่งเป็นสัญญาณแบบผลต่างที่มีค่าแรงดันที่ระดับบิต '0' และบิต '1' ที่ประมาณ 1.6 V และ 2.4 V ตามลำดับหรือก็คือมีผลต่างของระดับสัญญาณประมาณ 800 mV ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการต่อตัวต้านทานเพื่อ matching impedance ตามรูปที่ 1.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.5 การเชื่อมต่อวงจรระดับสัญญาณ LVPECL กับระดับสัญญาณ LVPECL จะต้องทำการต่อตัวต้านทานสำหรับ matching impedance

โดยค่าตัวต้านทานชุดที่ 1 และ 2 นั้นมีค่าเป็น 130 โอห์ม และ 82 โอห์มตามลำดับ ซึ่งค่าตัวต้านทานชุดที่ 1 และ 2 ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนได้โดยการคำนวณตามสมการ (1.1) คือ

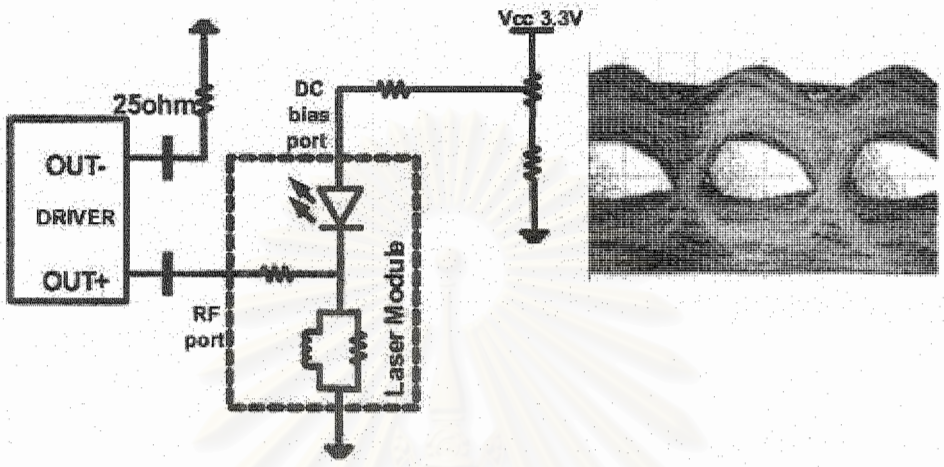
$$\frac{R_2 \times (3.3V)}{R_1 + R_2} = 2V \text{ และ } R_1 // R_2 = 50\Omega \qquad (1.1)$$

เพื่อลดระยะทางระหว่างตัวขับเลเซอร์กับซิเรียลไลเซอร์ให้ห่างน้อยที่สุดตัวต้านทานชุดที่ 1 และ 2 นั้นจึงเลือกใช้ขนาดเบอร์ 0402 โดยยังต้องคำนึงถึงลายวงจรของสัญญาณผลต่างว่าต้องไม่ให้มีความยาวต่างกันเกินไป นอกจากนี้ลายวงจรของเส้นสัญญาณนาฬิกากับสัญญาณข้อมูลนั้นต้องมีความยาวใกล้เคียงกัน เพราะจะมีผลในการกู้คืนสัญญาณที่ตัวขับเลเซอร์ได้หากสัญญาณนาฬิกาสุ่มสัญญาณข้อมูลผิดจังหวะ

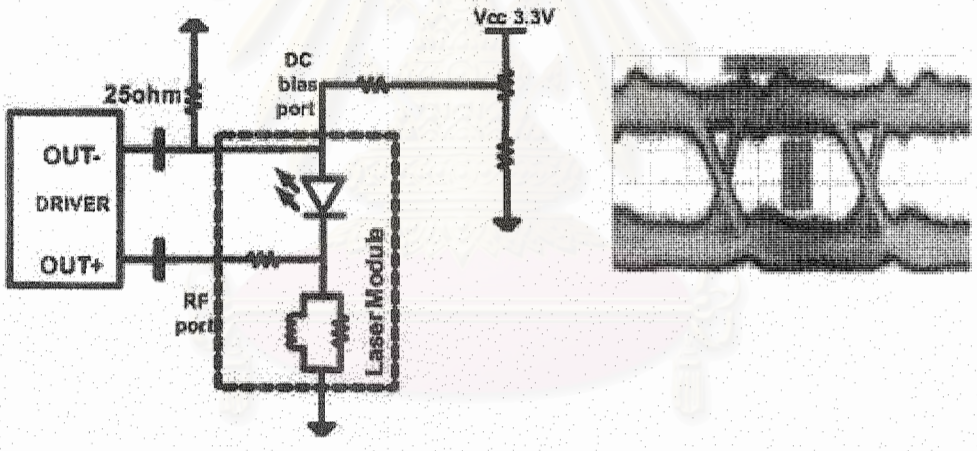
ในส่วนเส้นวงจรของสัญญาณนาฬิกามีการแยกสัญญาณมาเข้าที่จุดเชื่อมต่อ SMA ด้วยเพื่อใช้เป็นสัญญาณ Trigger เมื่อต้องการวัดสัญญาณความเร็วสูงด้วยเครื่องมือวัด DCA (Digital Communication Analyzer)

1.1.5. ส่วนลายวงจรเลเซอร์ (ส่วน E)

ลายวงจรที่จุดนี้เลือกใช้การขับสัญญาณแบบผลต่าง (Differential drive) ซึ่งปรับจากวงจรขับแบบเดี่ยว (single-ended drive) ซึ่งใช้ในตอนแรกสัญญาณที่ได้จากวงจรขับแบบเดี่ยวนั้นมีอัตราส่วนของสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณรบกวนที่มากจึงจำเป็นต้องทำการปรับเปลี่ยนวิธีการขับสัญญาณ โดยสัญญาณและวงจรก่อนเปลี่ยนและหลังเปลี่ยนมีลักษณะดังรูปที่ 1.6



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.6 วงจรการขับสัญญาณและลักษณะสัญญาณแสงขาออกที่วัดได้ (ก) ก่อนเปลี่ยนลักษณะการขับ (แบบเดี่ยว) (ข) หลังเปลี่ยนลักษณะการขับ (แบบผลต่าง)

การขับแบบผลต่างมีข้อดีคือทำให้กระแสไหลได้สะดวกขึ้น ข้อเสียของการขับแบบผลต่างคือต้องใช้พลังงานที่สูงขึ้นแต่สัญญาณที่ได้นั้นมีลักษณะที่ดีกว่าโดยมีอัตราส่วนของสัญญาณกับสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงกว่าการขับแบบเดี่ยวซึ่งรายละเอียดของการขับเลเซอร์แบบเดี่ยวและแบบผลต่าง

สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ [2] และรายละเอียดในการประกอบเลเซอร์เข้ากับตัวขับเลเซอร์ และการปรับปรุงสัญญาณรูปตาสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ใน [3]

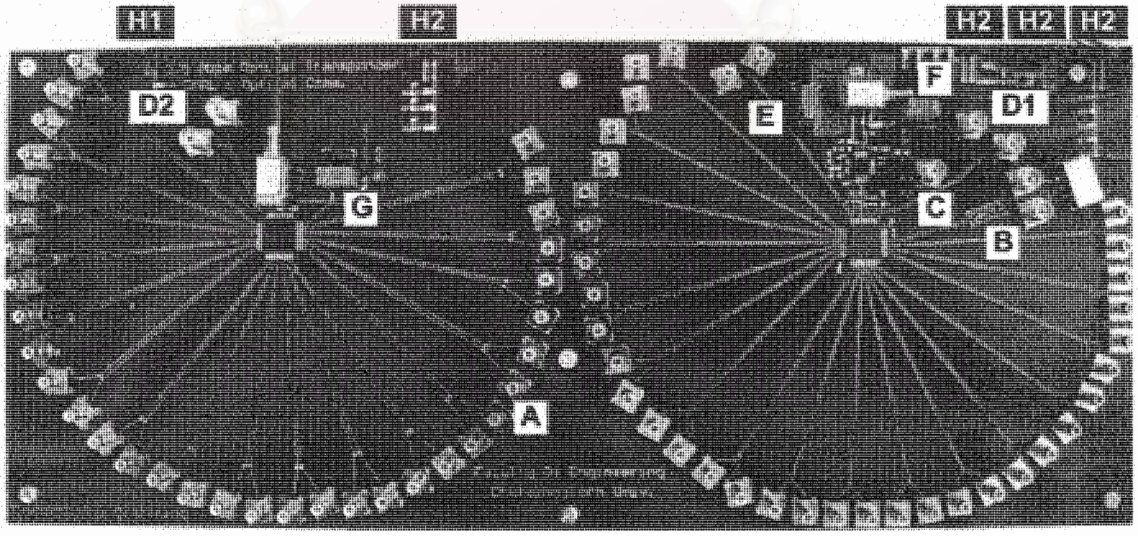
1.1.6. ส่วนลายสัญญาณไฟเลี้ยง)ส่วน F(

สำหรับลายวงจรไฟเลี้ยงจะรับไฟเลี้ยงจากชั้น Top layer แล้วไฟเลี้ยงจะถูกแยกเป็นหลายเส้นทางสำหรับป้อนวงจรส่วนต่างๆ โดยจะมีตัวเหนี่ยวนำ L ซึ่งทำหน้าที่เป็น Choke เพื่อลดสัญญาณรบกวนประเภท AC ที่จะแทรกเข้าไปในไฟเลี้ยง การออกแบบทำการเดินไฟเลี้ยงที่ inner layer-2 และ bottom layer ซึ่งจะมีชั้นกราวด์กั้น เพื่อไม่ให้สัญญาณรบกวนในไฟเลี้ยงมีผลต่อสัญญาณข้อมูลที่อยู่บน top layer

1.2 ทรานส์พอนเดอร์ทางแสงต้นแบบที่ประกอบขึ้น

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ประกอบขึ้นมา โดยแบ่งเป็นสองหัวข้อ คือหนึ่งส่วนควบคุมและการเชื่อมต่อ และสองคือรายละเอียดและฟังก์การทำงานของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ประกอบขึ้นซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 1.2.1 และ 1.2.2 ตามลำดับ

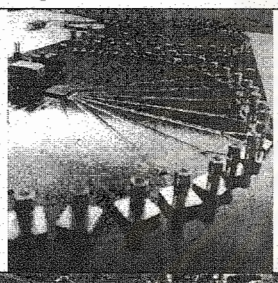
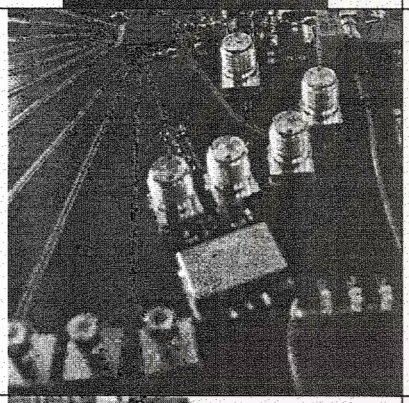
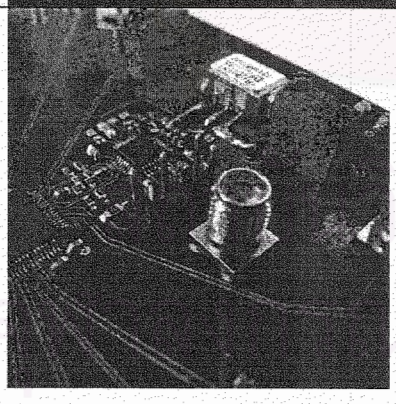
1.2.1. ส่วนควบคุมและการเชื่อมต่อ

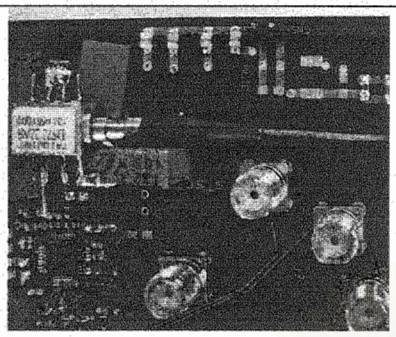
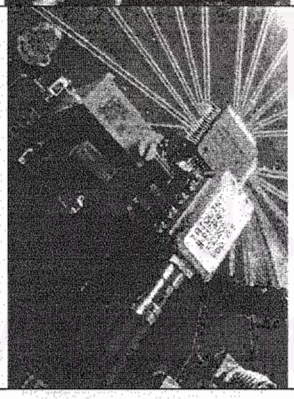
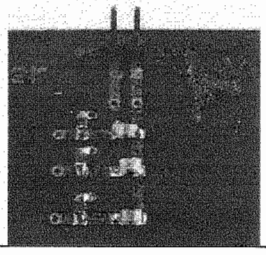


รูปที่ 1.7 วงจรทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ประกอบวงจร ซิเรียลไลเซอร์ ตัวขับเลเซอร์ เลเซอร์ ตัวรับแสงและดิซิเรียลไลเซอร์ และส่วนประกอบอื่นๆ ลงบนบอร์ด

จากรูปที่ 1.7 วงจรทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ประกอบซึ่งมีส่วนประกอบที่ใช้ในการควบคุมไม่ว่าจะเป็นการปรับกระแสไบแอส การปรับกระแสมอดูเลต การปรับเฟสของดิซิเรียลไลเซอร์ซึ่งจะมีรายละเอียดของบริเวณส่วนควบคุมและเชื่อมต่อพร้อมหน้าที่ตามตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงส่วนควบคุมและการเชื่อมต่อพร้อมหน้าที่ในวงจรทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ประกอบขึ้น

บริเวณ	รูปภาพส่วนประกอบ	หน้าที่
A		รับและส่งสัญญาณความเร็ว 155 เมกกะบิตต่อวินาที
B		จุดเชื่อมต่อสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงขาเข้าโดยหากจะใช้งานต้องนำตัวต้านทาน 50 โอห์มที่ต่อเชื่อมกับ VCXO ออกก่อน นอกจากนี้จะต้องเลือกว่าสัญญาณนาฬิกาขาเข้าจากภายนอกที่ต้องการเป็นระดับ CML หรือ LVDS ถ้าเป็นระดับ CML ต้องทำการ เชื่อม JP_RCLK ด้วย
C		สัญญาณนาฬิกาจากซิเรียลไลเซอร์เพื่อใช้เป็น Trigger สำหรับ DCA เมื่อต้องการที่จะไม่ส่งสัญญาณออกจากตัวขับเลเซอร์จะทำการเชื่อม JP_EN เมื่อไม่ต้องการใช้สัญญาณนาฬิกาในการสร้างสัญญาณกลับมาใหม่ที่ตัวขับเลเซอร์ให้ทำการเชื่อม JP_LATCH

D		จุดป้อนกลับสัญญาณ สำหรับการทำ system loop back หากต้องการทำระบบ system loop back ภาครับต้องเชื่อม JP_SIS กับ Vcc และภาคส่งจะต้องไม่เชื่อม JP_SOS [โดยปรกติ JP_SIS จะเชื่อมกับกราวด์เพื่อรับสัญญาณจากโมดูลตัวรับแสง]
E		ปรับกระแสมอดูเลตได้ระหว่าง 0-56 มิลลิแอมป์
F		ปรับกระแสไบแอสได้ระหว่าง 0-30 มิลลิแอมป์ (สามารถเปลี่ยนค่าตัวต้านทานเพื่อเพิ่มหรือลดกระแสไบแอสสูงสุดได้)
G		ปรับเฟสของ Phase lock loop ที่ ตัวดิชิเรียลไลเซอร์ ต้องทำการเชื่อม JP_Phase_adj เสียก่อน
H		จุดป้อนไฟเลี้ยงโดยมีไฟเลี้ยงที่ใช้ 2 ค่าคือ H1 26-34V และ H2 3.3V

1.2.2. รายละเอียดของทรานส์พอนเดอร์ทางแสง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสงโดยวิธีมอดูเลตโดยตรงและวิธีการตรวจจับโดยตรงที่ความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาทีที่ได้ประกอบขึ้น

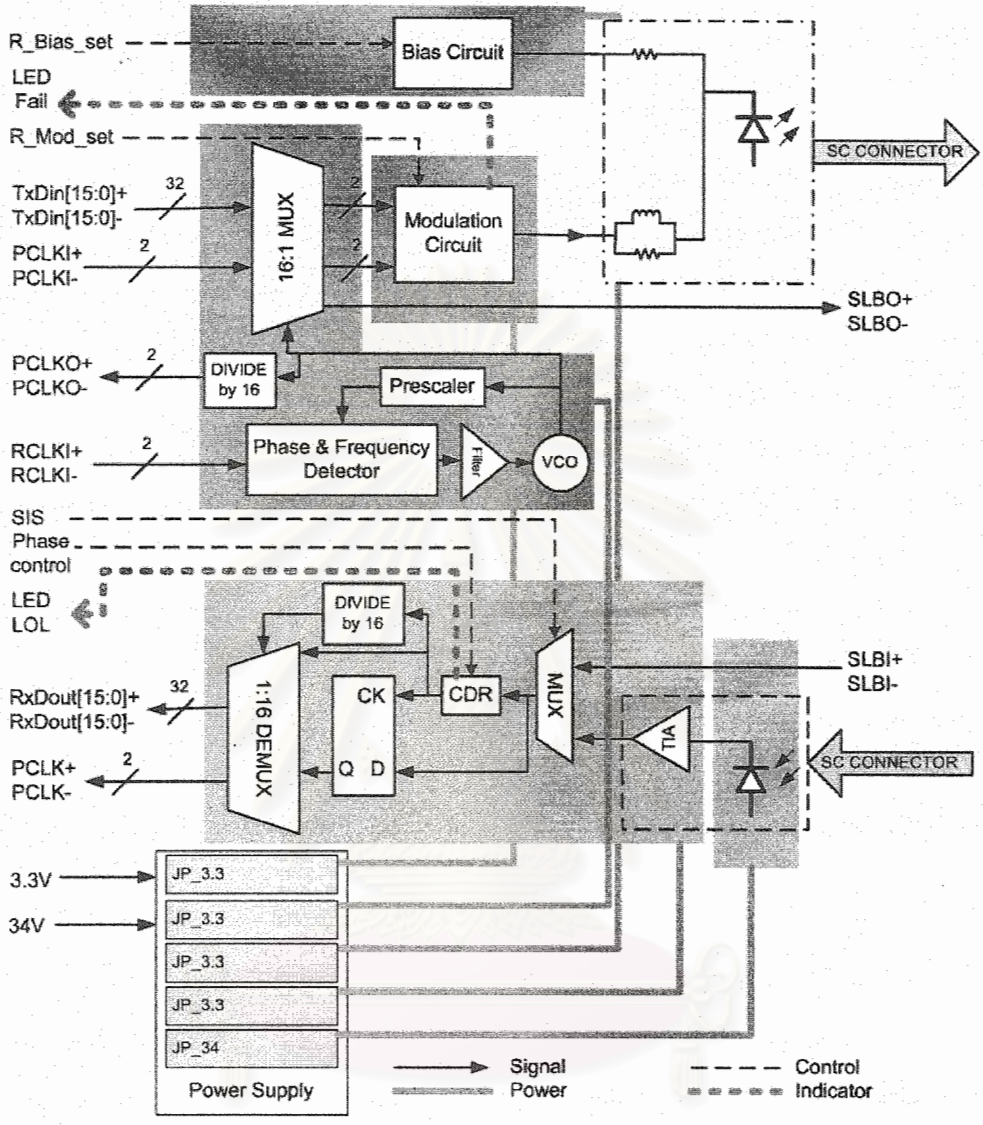
1.2.2.1. ลักษณะเฉพาะหลัก (Key Features)

- ส่งสัญญาณทางแสงความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาที
- ซิเรียลไลเซอร์สัญญาณความเร็ว 155 เมกะบิตต่อวินาที 16 ช่องสัญญาณเป็น 2.5 กิกะบิตต่อวินาที 1 ช่องสัญญาณ และดิซิเรียลไลเซอร์สัญญาณความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาที 1 ช่องสัญญาณกลับออกเป็นสัญญาณความเร็ว 155 เมกะบิตต่อวินาที 16 ช่องสัญญาณ
- สัญญาณขาเข้าและขาออกเป็นสัญญาณผลต่างแบบ LVDS
- ใช้สัญญาณนาฬิกาอ้างอิงที่ความเร็ว 155.52 เมกะบิตต่อวินาที
- สื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวแบบมาตรฐานด้วยระยะทาง 15 กิโลเมตร (เหมาะสำหรับใช้งานกับ SR (Short Reach) และ IR (Intermediate Reach))
- ส่งสัญญาณทางแสงโดยวิธีมอดูเลตโดยตรง ที่สัญญาณแสงความยาวคลื่นช่วง 1550 นาโนเมตร โดยใช้เลเซอร์ชนิด DFB แบบ Uncooled
- รับสัญญาณทางแสงโดยวิธีการตรวจจับโดยตรงโดยมีค่าความไวในการตอบสนองที่ -34 dBm ในช่วงความยาวคลื่น 1250-1610 นาโนเมตร
- สามารถประยุกต์ใช้งานกับการส่งข้อมูลตามมาตรฐาน OC-48 SONET/SDH

1.2.2.2. การทำงานของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ออกแบบขึ้น

รูปที่ 1.8 การทำงานของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงโดยวิธีมอดูเลตโดยตรงและวิธีการตรวจจับโดยตรงที่ความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาทีที่ออกแบบและประกอบขึ้นโดยรับสัญญาณ LVDS ทาง TxDin [15:0] +และ- จำนวน 16 ช่องสัญญาณผลต่างพร้อมสัญญาณนาฬิกา PCLKI ซึ่งจะถูกนำไปรวมกันเป็น 1 ช่องสัญญาณด้วยตัวซิเรียลไลเซอร์ ก่อนป้อนต่อให้กับวงจรขับ โดยสามารถควบคุมกระแสไบแอสและมอดูเลตได้ผ่านทาง R_Mod_set และ R_Bias_set สัญญาณจะถูกส่งให้กับเลเซอร์เพื่อขับเลเซอร์ให้ผลิตสัญญาณแสงออกไปยังเส้นใยนำแสงโหมดเดียวต่อไป

ที่ภาคส่งยังมี RCLKI เพื่อรับสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงขนาด 155.52 เมกกะเฮิร์ต สัญญาณนาฬิกานี้จะถูกส่งไปยัง Phase lock loop เพื่อ Synchronous กับสัญญาณนาฬิกาของตัวซิเรียลไลเซอร์ก่อนส่งสัญญาณที่ Synchronous กันแล้วกลับออกมาทาง PCLKO เพื่อป้อนให้กับตัวกำเนิดสัญญาณดังแสดงในรูป



รูปที่ 1.8 ขั้นตอนการทำงาน ส่วนควบคุมต่างๆ รวมทั้งไฟเลี้ยงของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงโดยแบ่งเป็นภาคส่งสัญญาณที่ครึ่งบนของภาพและภาครับสัญญาณที่ครึ่งล่างของภาพ

นอกจากนี้สัญญาณทางแสงที่ส่งไปจะถูกรับด้วยตัวรับแสงและขยายด้วย TIA ก่อนที่จะถูกส่งต่อไปยังวงจรกู้คืนสัญญาณนาฬิกา สัญญาณนาฬิกาที่กู้คืนได้จะถูกนำไปทำการกู้คืนสัญญาณข้อมูลและแยกสัญญาณกลับออกเป็น 155 เมกกะบิตต่อวินาที 16 ช่องสัญญาณออกทาง RxDout [15:0] + และ – นอกจากนี้ยังสามารถทำการทดสอบ system loop back ทางไฟฟ้าได้โดยเชื่อม SLBO+และ- เข้ากับ SLBI+ และ –

ไฟเลี้ยงจะแยกกันเป็น 5 ส่วน โดยจะแบ่งเป็น 3.3 V 4 ชุดและ 34 V 1 ชุดซึ่งแยกจ่ายวงจรจุดต่างๆ ซึ่งทั้งหมดรวมเป็นทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาที โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตโดยตรงที่ภาคส่ง และการตรวจจับโดยตรงที่ภาครับ

ในภาคผนวกนี้ได้แสดงลายวงจรของทรานส์พอนเดอร์ทางแสง ส่วนควบคุม จุดเชื่อมต่อต่างๆ รวมทั้งหน้าที่การทำงานของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ประกอบขึ้น ส่วนรายละเอียดของผลการวัดประสิทธิภาพของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ตำแหน่งต่างๆ จะนำเสนอในภาคผนวก 2 ถัดไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก 2

ผลการวัดประสิทธิภาพของทรานส์พอนเดอร์ทางแสง

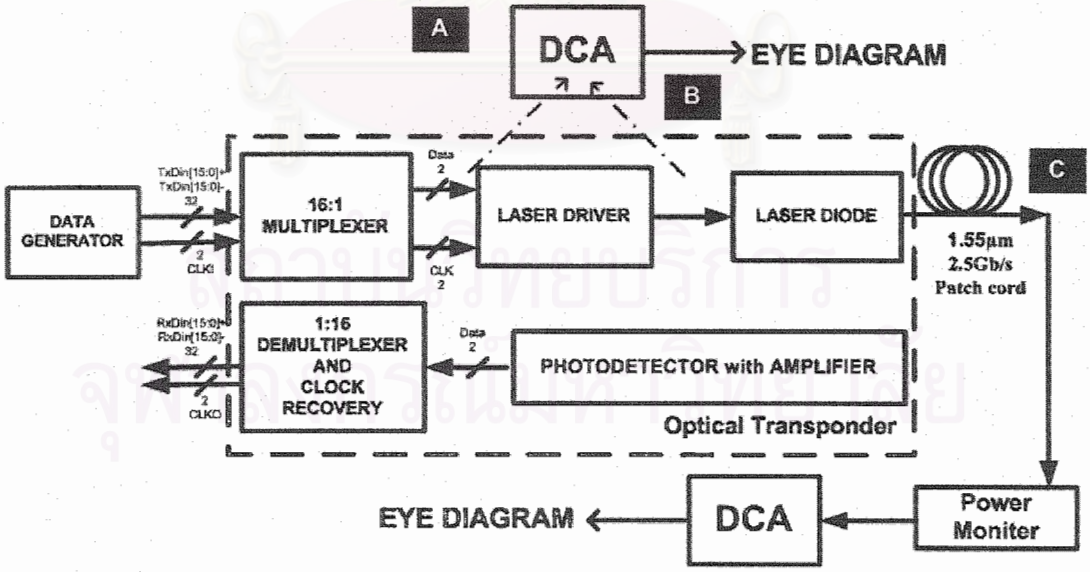
ในภาคผนวกนี้จะนำเสนอผลการวัดประสิทธิภาพของตัวทรานส์พอนเดอร์ทางแสงต้นแบบที่ประกอบขึ้น โดยทำการทดสอบการทำงานแบบแยกส่วนทางภาคส่ง ทางภาครับ และ การทำงานโดยรวมทั้งการส่งสัญญาณจากภาคส่งและรับด้วยภาครับโดยพิจารณาดังนี้

- การวัดประสิทธิภาพสัญญาณภาคส่งโดยการวิเคราะห์แผนภาพรูปตา
- การวัดประสิทธิภาพของสัญญาณภาครับโดยการวิเคราะห์แผนภาพรูปตา
- การวัดประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสง

ต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดการทดสอบทรานสพอนเดอร์ทางแสงโดยกล่าวแยกเป็นหัวข้อตามวิธีการวัดและทดสอบทรานสพอนเดอร์ทางแสงในหัวข้อ 2.1-2.3 ตามลำดับ

2.1 การวัดประสิทธิภาพสัญญาณภาคส่งโดยการวิเคราะห์แผนภาพรูปตา

ในการทดสอบภาคส่งสัญญาณทางแสงของทรานส์พอนเดอร์จะทำการวัดสัญญาณ โดยพิจารณาตามรูปที่ 2.1

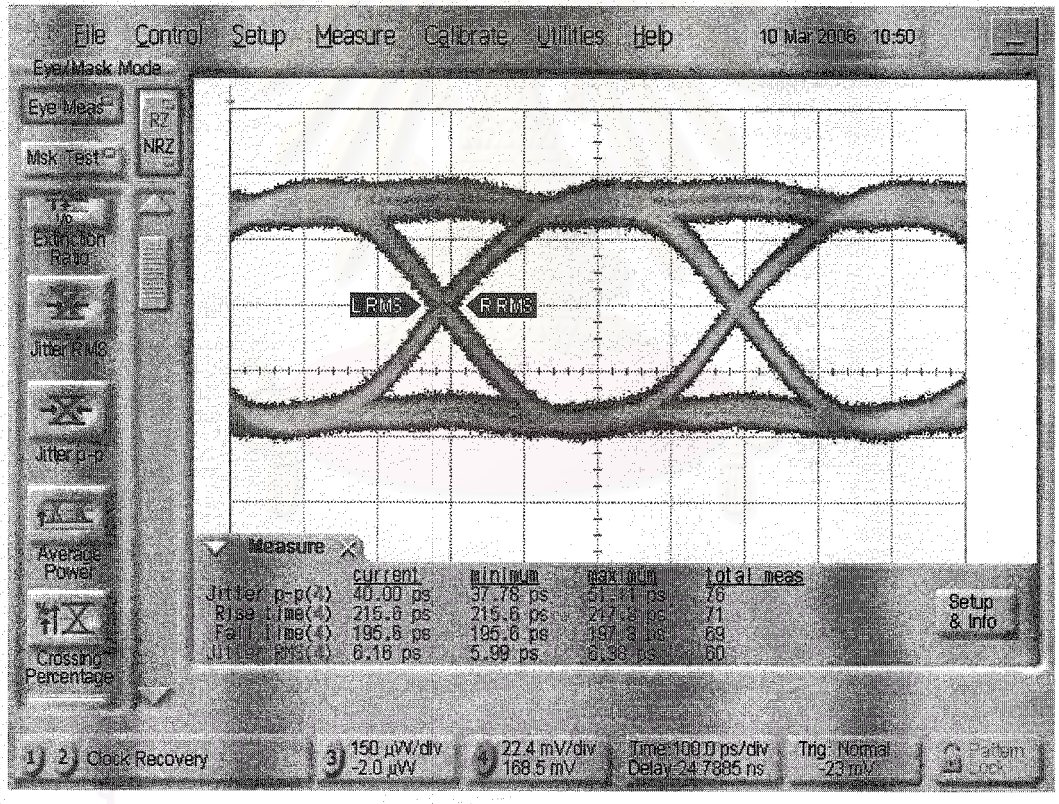


รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงตำแหน่งการวัดแผนภาพรูปตาของภาคส่งโดยทำการวัดแยกเป็นที่ตำแหน่ง [A] หลังจากซิเรียลไลเซอร์ [B] หลังจากตัวขับเลเซอร์ และ [C] หลังจากเลเซอร์

พิจารณาจากรูปที่ 2.1 เริ่มจากตัวสร้างสัญญาณจะสร้างสัญญาณข้อมูลแบบ PRBS ความยาว 2^7-1 ที่ความเร็ว 155 เมกกะบิตต่อวินาทีจำนวน 16 ช่องสัญญาณเข้าสู่ภาคส่งของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงหลังจากนั้นทำการวัดกำลังทางแสงขาออกของสัญญาณข้อมูลก่อนป้อนเข้าสู่ Digital Communication Analyzer (DCA) เพื่อวิเคราะห์แผนภาพรูปตาของสัญญาณซึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสัญญาณได้ตามที่กล่าวมาแล้ว โดยทำการทดสอบที่ภาคส่งที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้คือ จุด A วัดสัญญาณที่ได้จากซิเรียลไลเซอร์ จุด B วัดสัญญาณที่ได้จากตัวขับเลเซอร์ และที่จุด C วัดสัญญาณแสงที่ได้จากเลเซอร์ ซึ่งจะกล่าวถึงผลการวัดที่จุดต่างๆตามหัวข้อ 2.1.1-2.1.3

2.1.1. สัญญาณที่ได้จากซิเรียลไลเซอร์ (จุด A)

ในการวัดสัญญาณที่ออกจากซิเรียลไลเซอร์จะใช้ High Impedance Probe ซึ่งต่อเข้ากับ DCA โดยใช้ Trigger จากสัญญาณนาฬิกาซึ่งได้ออกแบบลายวงจรเตรียมไว้ สัญญาณที่วัดได้เป็นไปตามรูปที่ 2.2



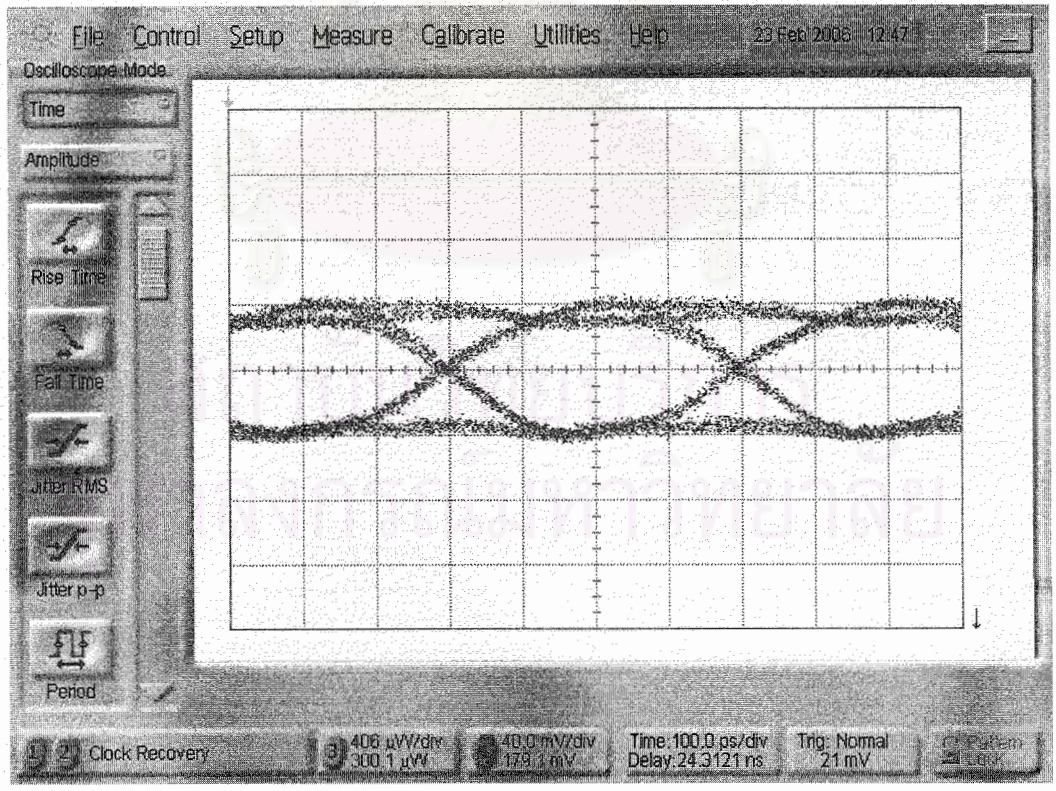
รูปที่ 2.2 แผนภาพรูปตาของสัญญาณที่ออกจากซิเรียลไลเซอร์ (ตำแหน่ง A)

สัญญาณที่ได้มีคาบบิต 402 ns เป็นสัญญาณแบบ LVPECL วัดค่า Rise time และ Fall time ที่ 10%-90% ได้เท่ากับ 215 ps และ 195 ps ตามลำดับ ซึ่งค่า Rise time ของ NRZ ตามมาตรฐานต้องไม่เกิน 70% ของคาบบิตหรือ 280 ps ซึ่งที่วัดได้ยังผ่านตามมาตรฐาน เมื่อวัดค่า Jitter p-p วัดได้เท่ากับ 40 ps คิดเป็น 10% ของคาบบิต

เนื่องจากสัญญาณจากตัวซิเรียลไลเซอร์นี้จะถูกส่งต่อไปยังตัวขับเลเซอร์ ซึ่งที่ตัวขับเลเซอร์นี้จะทำหน้าที่สร้างรูปสัญญาณใหม่โดยใช้สัญญาณนาฬิกาที่เข้ามาด้วยเป็นตัวสร้างสัญญาณใหม่ ดังนั้นค่า Rise time Fall time และ Jitter เหล่านี้จึงยังไม่ใช่ค่าของสัญญาณทางแสง

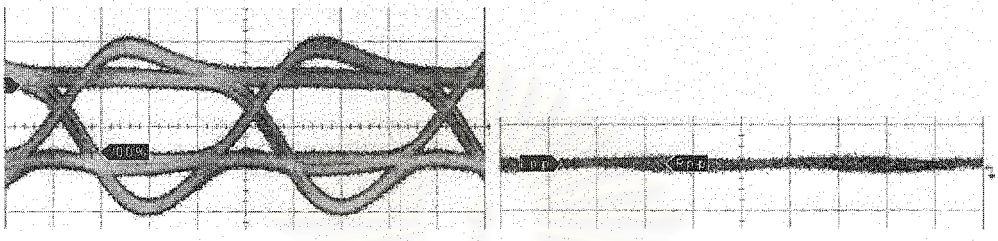
2.1.2. สัญญาณที่ได้จากตัวขับเลเซอร์ (จุด B)

ในการวัดสัญญาณหลังตัวขับเลเซอร์นั้นจะใช้ High Impedance Probe ซึ่งต่อเข้ากับ DCA เช่นกันสำหรับ Trigger ยังคงใช้สัญญาณนาฬิกาจากซิเรียลไลเซอร์ดังเดิมเนื่องจากตัวขับเลเซอร์ไม่ได้สร้างสัญญาณนาฬิกาออกมาด้วย สัญญาณที่วัดได้นี้เป็นสัญญาณที่เกิดจากการสร้างสัญญาณใหม่ภายในตัวขับเลเซอร์ด้วยสัญญาณข้อมูลและสัญญาณนาฬิกาที่ได้จากซิเรียลไลเซอร์



รูปที่ 2.3 แผนภาพรูปตาของสัญญาณหลังตัวขับเลเซอร์ (ตำแหน่งB)

ค่า Rise time และ Fall time ที่วัดที่ 10%-90% มีค่าเท่ากับ 124 ps และ 131 ps ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า Rise time และ Fall time ของสัญญาณดีขึ้นเนื่องจากการสร้างสัญญาณใหม่ภายในตัวขับเลเซอร์และวัดค่า Jitter p-p ได้เท่ากับ 51 ps ตามรูปที่ 2.3 และจากวงจรไบแอสและมอดูเลตที่ออกแบบขึ้นจะสามารถปรับระดับของกระแสไบแอสและกระแสมอดูเลตได้ในช่วง 0-30 มิลลิแอมป์และ 0-56 มิลลิแอมป์ตามลำดับ โดยจะได้รูปสัญญาณเมื่อทำการปรับกระแสมอดูเลตมากที่สุดและน้อยที่สุดตามรูปที่ 2.4



(ก) (ข)

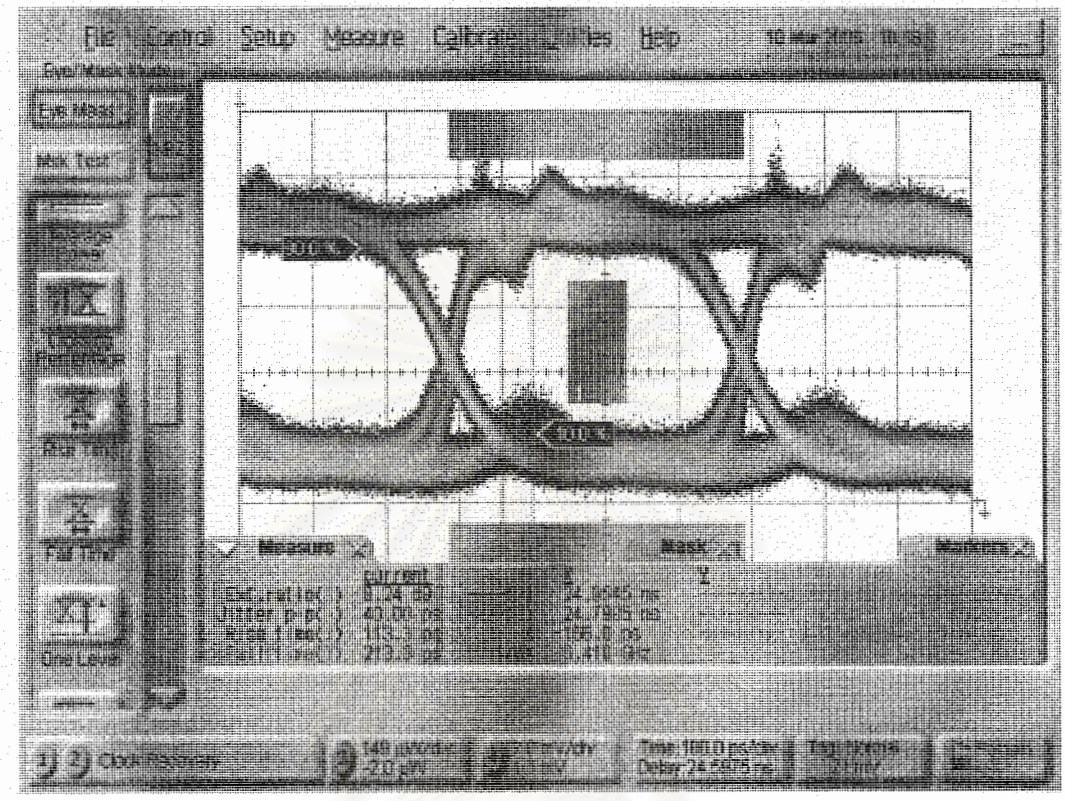
รูปที่ 2.4 แผนภาพรูปตาของสัญญาณที่ออกจากตัวขับเลเซอร์ (ก) เมื่อปรับกระแสมอดูเลตให้มีค่ามากที่สุด (ข) เมื่อปรับกระแสมอดูเลตให้มีค่าน้อยที่สุด

จากรูปที่ 2.4 (ก) แผนภาพรูปตาเมื่อปรับกระแสมอดูเลตมากที่สุดจะเห็นได้ว่าเกิดปรากฏการณ์ Overshoot และ Undershoot เด่นชัดมากขึ้น ดังนั้นการปรับระดับสัญญาณมอดูเลตไม่ควรปรับจนถึงสุด เพราะจะส่งผลต่อการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นสัญญาณทางแสงที่ตัวเลเซอร์ ทำให้มีความหนาของสัญญาณบิต '0' และ '1' เพิ่มมากขึ้น ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อค่าอัตราความผิดพลาดบิตของสัญญาณ

สัญญาณที่ได้จากตัวขับเลเซอร์นี้เองจะถูกนำไปขับตัวเลเซอร์เพื่อเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณทางแสงโดยการปรับกระแสไบแอสและกระแสมอดูเลตในค่าต่างๆ จะส่งผลไปถึงค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันของสัญญาณแสงที่ได้นั้นเอง

2.1.3.สัญญาณที่ได้จากเลเซอร์ (จุด C)

ในการวัดสัญญาณแสงออกจากเลเซอร์นั้นจะใช้โมดูลทางแสงของ DCA สำหรับการ Trigger สัญญาณจะใช้สัญญาณนาฬิกาที่ถูกกู้คืนมาจากโมดูลกู้คืนสัญญาณนาฬิกาบน DCA โดยก่อนที่จะทำการวัดสัญญาณแสงด้วย DCA จะใช้ Power Monitor เพื่อวัดระดับกำลังทางแสงของสัญญาณก่อน



รูปที่ 2.5 แผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงจากทรานส์พอนเดอร์(ตำแหน่งC) ที่กำลังทางแสง 0 dBm

รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงจากทรานส์พอนเดอร์ที่กำลังทางแสง 0 dBm ซึ่งเป็นกำลังทางแสงสูงสุดที่ปรับได้ สามารถเพิ่มกำลังทางแสงได้หากปรับปรุงวงจรไบแอสเลเซอร์ตามที่อธิบายไว้ใน

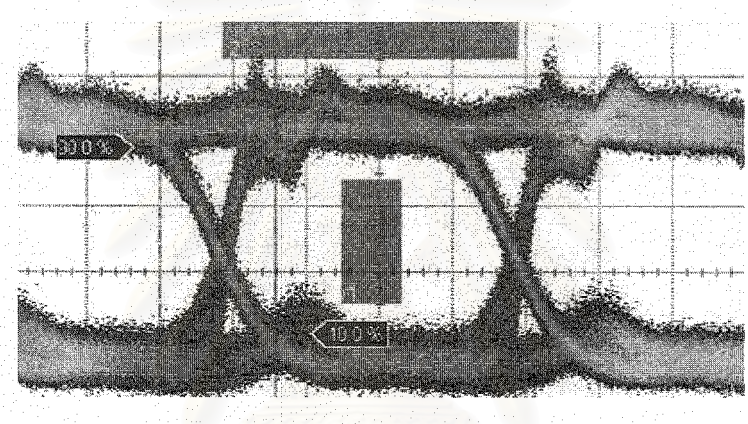
ตารางที่ 1.1 จากแผนภาพรูปตาที่ได้จะทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ ที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของภาคส่งของทรานส์พอนเดอร์

ค่า Rise time และ Fall time ที่ 10%-90% มีค่าเท่ากับ 113 ps และ 156 ps ตามลำดับ ซึ่งค่อนข้างจะสูงเมื่อเทียบกับคาบบิตคือ 400 ps คิดเป็น 33.25% และ 39.0% ของคาบบิต สาเหตุเนื่องมาจากตัวเลเซอร์ที่เลือกใช้มีค่าการตอบสนองที่ตามคุณลักษณะของเลเซอร์ค่อนข้างช้าคืออยู่ในช่วง 125-175 ns แต่เมื่อพิจารณาค่า Rise time ยังยอมรับได้เนื่องจากยังผ่านมาตรฐานคือ 70% ของคาบบิต ส่วนค่า Jitter p-p ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 40 ps

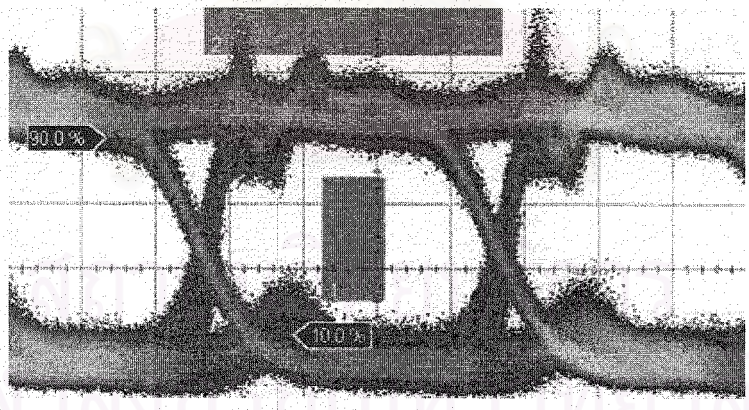
ถัดไปคือการทดสอบสัญญาณข้อมูลกับหน้ากากมาตรฐาน (Standard eye mask test) ตามมาตรฐาน ITU-T G.691 [ii] สำหรับสัญญาณ 2.5 กิกะบิตต่อวินาที ปรากฏว่าภายในกรอบสี่เหลี่ยมตรงกลาง

ในแผนภาพรูปตาไม่มีความผิดพลาดของบิตข้อมูลเกิดขึ้นเลย สำหรับกรอบสี่เหลี่ยมบนและล่างภายนอกแผนภาพรูปตามีความผิดพลาดขึ้นเนื่องจากการ Overshoot ของสัญญาณบิตที่ 1 ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากเลเซอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับกระแสขับจากค่าที่ต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจึงทำให้เกิดการหน่วงที่ขอบขาขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดพลังงานสะสมมากขึ้นจนทำให้เกิดการพุ่งเกินของสัญญาณ และสัญญาณรบกวนของบิตที่ 1 ที่มีขนาดกว้างซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากการออกแบบลายวงจรช่วงต่อระหว่างตัวขับเลเซอร์และตัวเลเซอร์ยังไม่ดีเพียงพอทำให้เกิดการสะท้อนเกิดขึ้น แต่ถึงกระนั้นความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่เกิดภายนอกกรอบสี่เหลี่ยมตรงกลางแผนภาพรูปตาก็จะไม่มีผลต่อการตัดสินบิตที่ภาครับ

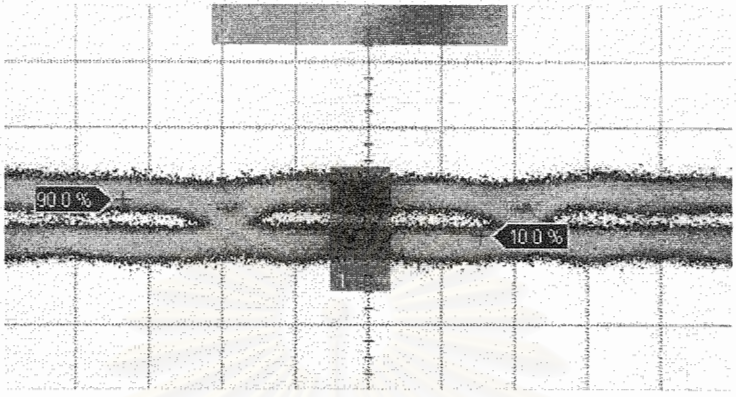
ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันมีค่าเท่ากับ 8.29 dB ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานคือ 8.2 dB และต้นแบบทรานส์พอนเดอร์ทางแสงนี้สามารถปรับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันได้สูงถึง 8.89 dB



(ก)



(ข)



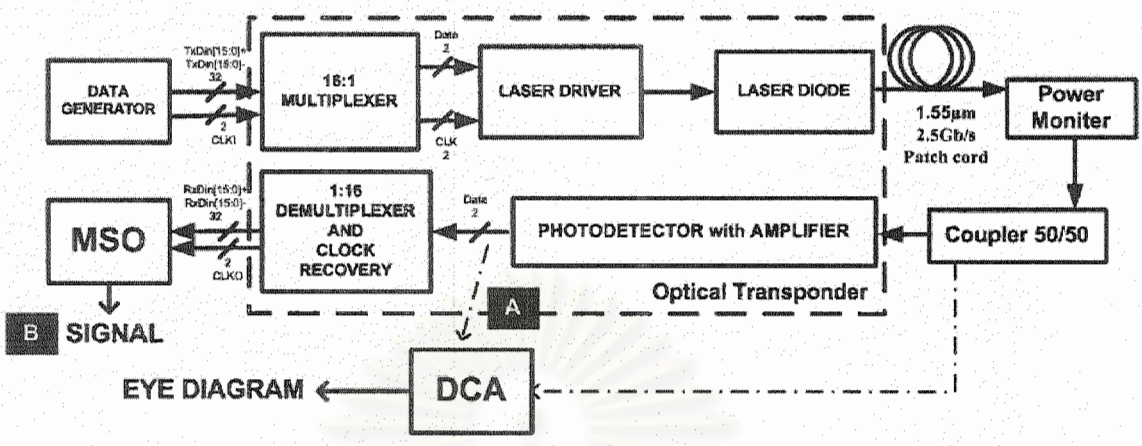
(ค)

รูปที่ 2.6 แผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงที่ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันต่างๆ (ก) 8.24 dB (ข) 8.89 dB(ค) 1.2 dB

จากรูปที่ 2.6 คือแผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงเมื่อมีค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชัน(ก) เท่ากับ 8.24 dB (ขนาดเท่ากับมาตรฐาน 8.2 dB) (ข) เท่ากับ 8.89 dB (ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันสูงสุดที่ไม่เกิดจุดผิดพลาดบนหน้ากากทดสอบมาตรฐานบริเวณตรงกลางแผนภาพรูปตา) (ค) เท่ากับ 1.2 dB (ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันต่ำสุด) สัญญาณรูปตาที่มีค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันต่ำจะมีสัดส่วนของสัญญาณข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนที่ต่ำด้วย ดังนั้นหากทางภาคส่งเลือกปรับสัญญาณแสงให้มีค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันที่ต่ำมากถึงแม้กำลังทางแสงที่ภาครับจะสูงเพียงใดก็ตามค่าอัตราความผิดพลาดบิตก็จะมีค่าสูง โดยตามปรกติทรานส์พอนเดอร์ที่มีขายทั่วไปจะกำหนดค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันให้มีค่าคงที่ซึ่งสูงกว่า 8.2 dB ตามที่มาตรฐานกำหนด แต่เนื่องจากทรานส์พอนเดอร์ทางแสงต้นแบบนี้ต้องออกแบบเพื่อใช้สำหรับเป็นชุดทดสอบเพื่อการทำการทดลองและการเรียนรู้ด้วยดังนั้นจึงสามารถปรับระดับค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันได้

จากการทดสอบภาคส่งของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ออกแบบขึ้นถือว่าผ่านเกณฑ์การทำงานของตัวส่งตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ไม่ว่าจะเป็น ค่า Rise time Fall time ค่า Jitter p-p และค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชัน อีกทั้งได้ผ่านการทดสอบกับหน้ากากมาตรฐาน ในหัวข้อต่อไปจะทำการวัดประสิทธิภาพทางภาพรับของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงซึ่งในตอนท้ายของหัวข้อต่อไปนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้ภาคส่งสัญญาณนี้ในการสร้างสัญญาณแสงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพทางภาครับของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ออกแบบขึ้น เนื่องจากยังไม่มีตัวส่งสัญญาณทางแสงอ้างอิงมาใช้ในการทดสอบ แต่จากการวัดประสิทธิภาพทางภาคส่งดังที่ได้กล่าวมาก็ถือว่าตัวส่งที่ออกแบบขึ้นก็ผ่านมาตรฐานการใช้งานดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้ทดแทนตัวส่งสัญญาณทางแสงอ้างอิงได้

2.2. การวัดประสิทธิภาพของสัญญาณภาครับโดยการวิเคราะห์แผนภาพรูปตา



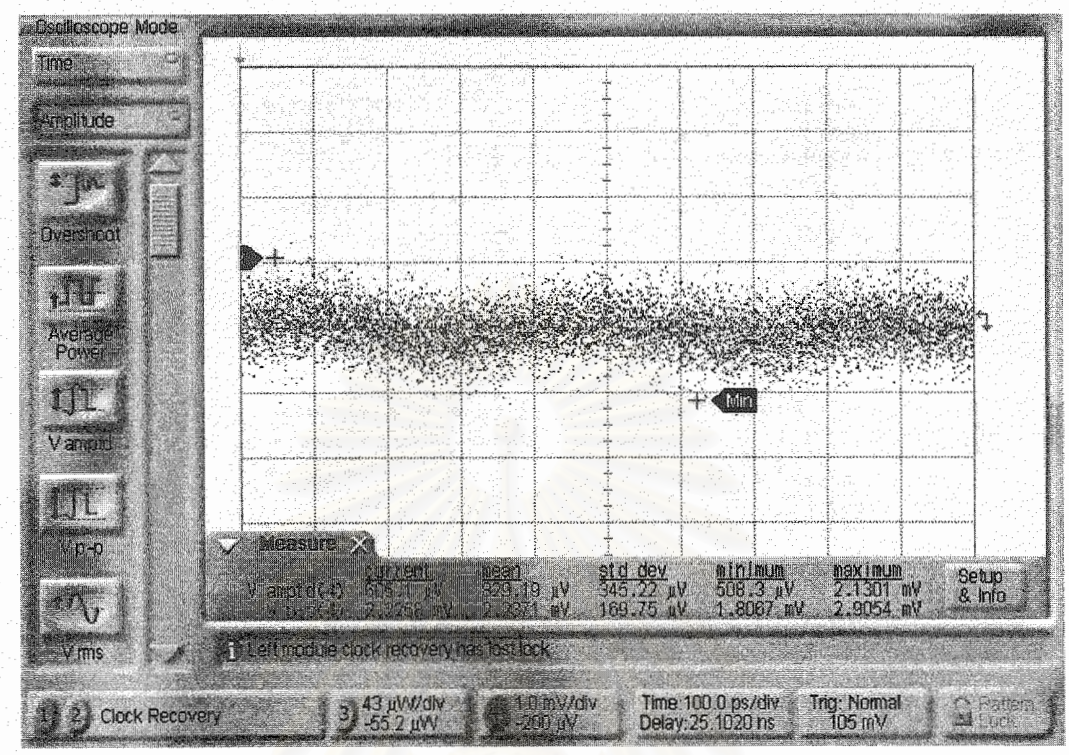
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงตำแหน่งการวัดประสิทธิภาพของสัญญาณภาครับโดยการวิเคราะห์แผนภาพรูปตาซึ่งแบ่งเป็น ตำแหน่ง [A] หลังโมดูลตัวรับแสง และ [B] หลังตัวดิชิเรียลไลเซอร์

จากรูปที่ 2.7 เริ่มจากตัวสร้างสัญญาณสร้างสัญญาณ PRBS ความยาว 2^7–1 ความเร็ว 155 เมกกะบิตต่อวินาทีจำนวน 16 ช่องสัญญาณเข้าสู่ภาคส่งของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงหลังจากนั้นสัญญาณก็ถูกส่งต่อจากภาคส่งไปยังภาครับโดยผ่านตัว Coupler 50/50 เพื่อแบ่งสัญญาณแสงออกไป 2 ทางเท่าๆ กัน คือส่งตรงให้ภาครับ และส่งให้กับ DCA เพื่อใช้ในการกู้คืนสัญญาณนาฬิกาที่ตัว DCA โดยทำการทดสอบวัดสัญญาณที่ภาครับออกเป็นตำแหน่งต่างๆดังนี้คือ จุด A วัดสัญญาณที่ได้จากตัวรับแสง จุด B วัดสัญญาณที่ได้จากตัวดิชิเรียลไลเซอร์ โดย ใช้เครื่องมือ Mixed Signal Oscilloscope (MSO) ซึ่งจะกล่าวถึงผลการวัดที่จุดต่างๆ ตามหัวข้อ 2.2.1 และ 2.2.2

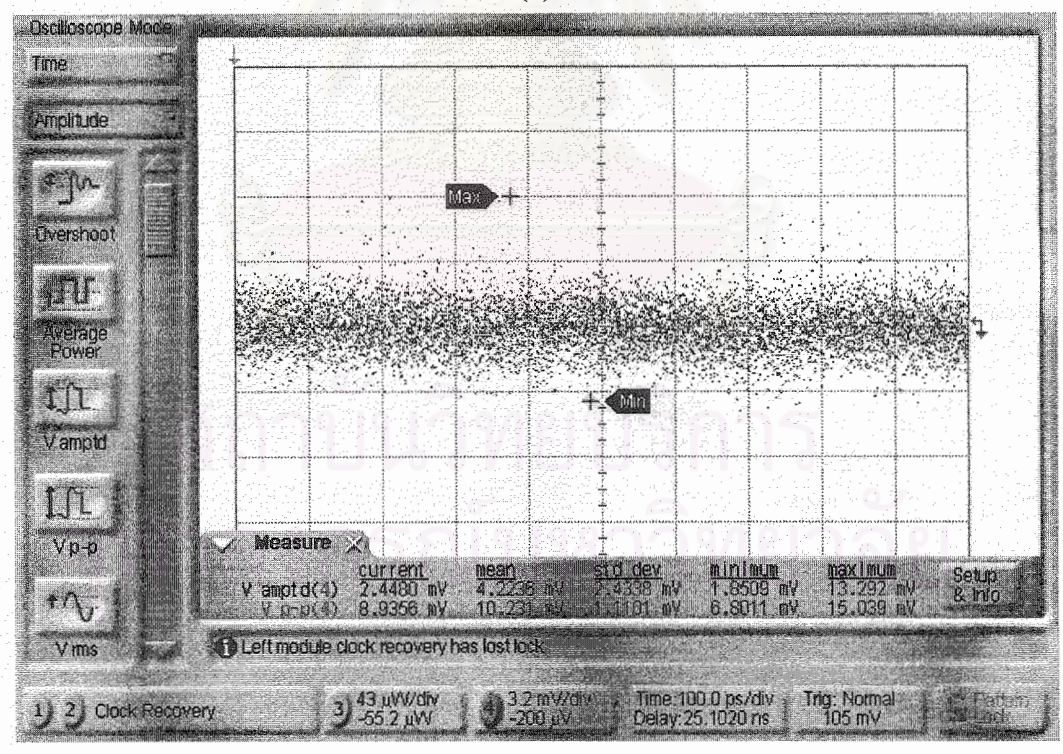
2.2.1. สัญญาณที่ได้จากตัวรับแสง

ในการวัดสัญญาณข้อมูลจากตัวรับแสงนั้นจะใช้โมดูลทางไฟฟ้าของ DCA โดยใช้สัญญาณ Trigger ที่ได้จากการกู้คืนสัญญาณนาฬิกาจากโมดูลกู้คืนสัญญาณนาฬิกา

เมื่อไม่ทำการป้อนแสงให้กับตัวรับแสงก็ยังคงมีสัญญาณออกมาซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับแสงดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.3 รวมกับสัญญาณรบกวนจากตัวขยายสัญญาณจากหัวข้อ 2.2.4 มีขนาดและลักษณะของสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 2.8



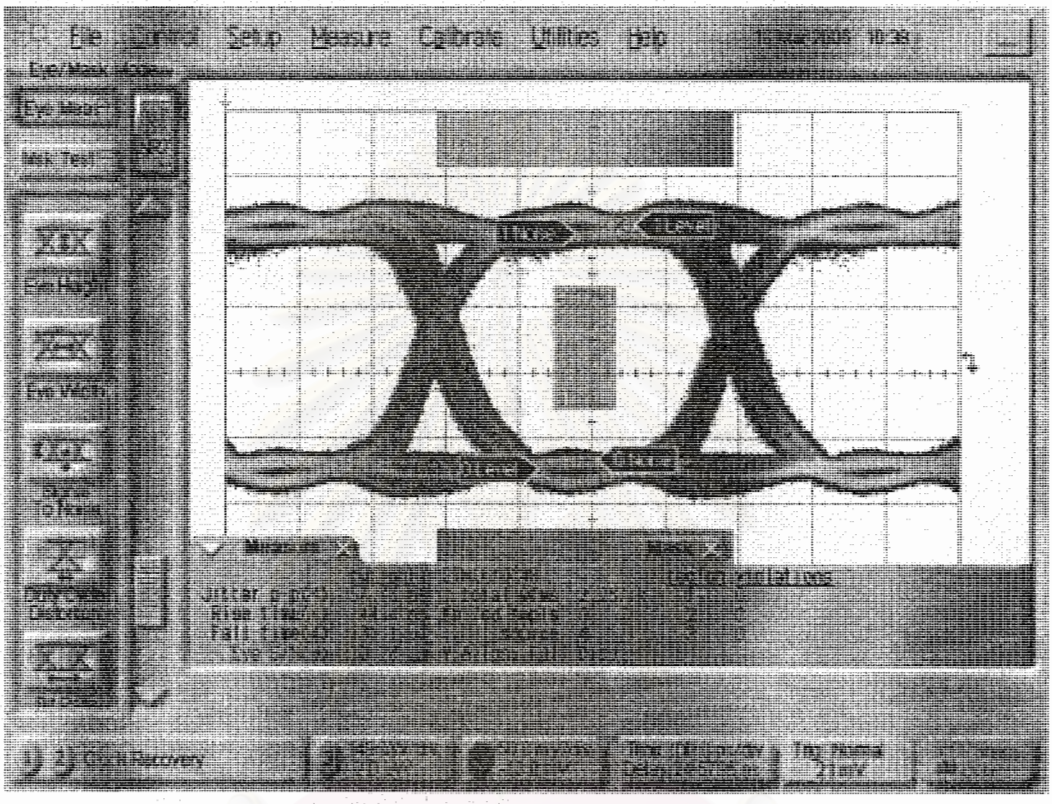
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.8 สัญญาณทางภาครับเมื่อไม่มีการรับสัญญาณทางแสง (ก) เมื่อไม่ได้ไบแอสย้อนกลับตัวรับแสงแต่จ่ายไฟให้ TIA (ข) เมื่อไบแอสย้อนกลับตัวรับแสงที่ 34V และจ่ายไฟให้ TIA

เมื่อพิจารณาสัญญาณจากภาครับเมื่อไม่มีการรับสัญญาณทางแสงจะพบว่ามีระดับสัญญาณรบกวนออกมาซึ่งวัดได้เป็น 0.6 mV และ 2.44mV ตามลำดับเมื่อเทียบกับ 25 mV ซึ่งคือระดับสัญญาณต่ำสุดที่ดิซิเรียลไลเซอร์จะสามารถกู้คืนสัญญาณนาฬิกากลับมาได้นั้นถือว่าอยู่ในระดับที่ต่ำมากจนสามารถละเลยได้

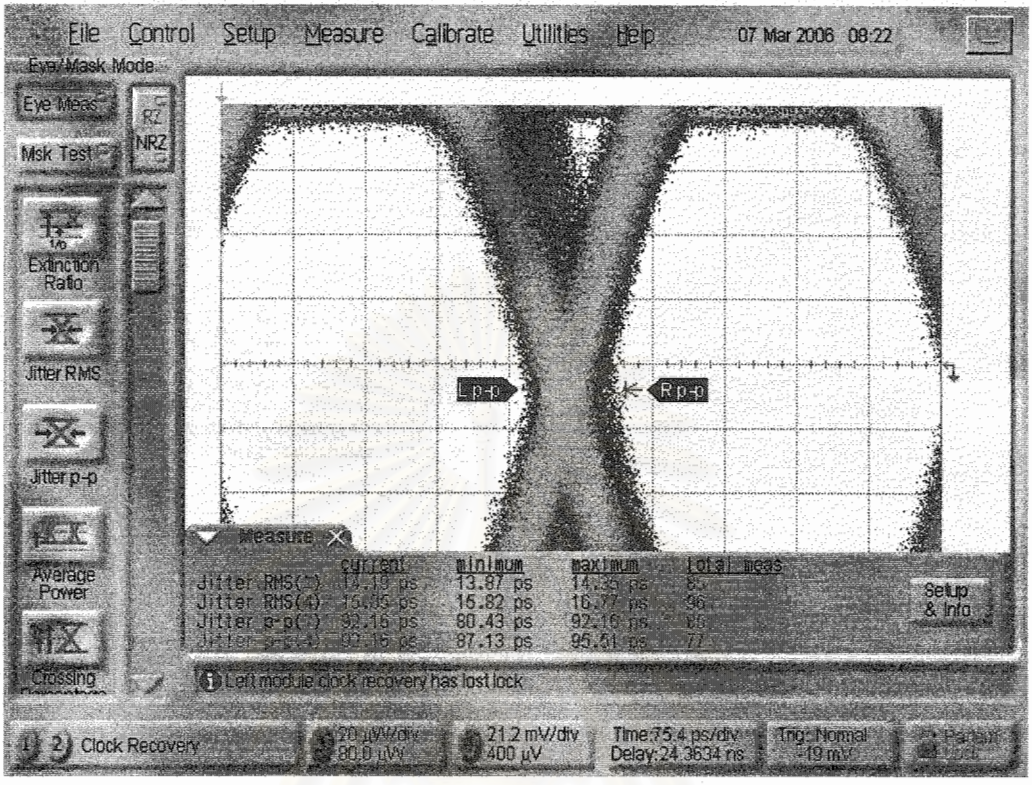


รูปที่ 2.9 แผนภาพรูปตาของสัญญาณจากตัวรับแสง (ตำแหน่งA)

เมื่อป้อนแสงให้กลับตัวรับแสง สัญญาณข้อมูล 2.5 กิกะบิตต่อวินาทีที่รับได้เป็นดังรูปที่ 2.9 โดยทำการไบแอสย้อนกลับตัว APD ที่ 33.75 V ซึ่งเมื่อทดสอบกับหน้ากากมาตรฐานแล้วไม่ว่าจะเป็นทั้งที่ตรงกลางของแผนภาพรูปตาหรือบริเวณข้างบนและข้างล่างก็ไม่เกิดจุดผิดพลาดขึ้น

จากการทดลองวัดสัญญาณได้ค่า Rise time และ Fall time เท่ากับ 144.4 และ 131.1 ตามลำดับซึ่งค่า Rise time ที่วัดได้เป็น 36% ของคาบบิตสำหรับสัญญาณ NRZ จะยอมรับได้ถึง 70% ของคาบบิต

ส่วนค่า Jitter p-p ที่วัดได้มีค่าสูงสุดที่ 95.51 ps ซึ่งมีขนาดมากกว่าสัญญาณแสงจากภาคส่ง ดังนั้นเมื่อพิจารณา Jitter ของสัญญาณก่อนเข้าโมดูลตัวรับแสงและหลังจากผ่านโมดูลตัวรับแสงจะเป็นไปตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 Jitter ของสัญญาณก่อนเข้าโมดูลตัวรับแสงและหลังจากผ่านโมดูลตัวรับแสง (ตำแหน่งA)

จากรูปสัญญาณที่อยู่ด้านหน้าคือสัญญาณแสงก่อนที่จะเข้าโมดูลตัวรับแสงซึ่งวัดค่า Jitter ได้ตามที่แสดงดังรูปที่กำกับด้วยหมายเลข (3) ส่วนสัญญาณทางด้านหลังคือสัญญาณที่วัดหลังจากผ่านโมดูลตัวรับแสงซึ่งก็คือผ่าน TIA นั้นเอง ค่า Jitter ที่วัดได้ถูกแสดงที่หมายเลข (4) ซึ่งเมื่อผ่าน TIA นั้น สัญญาณจะมี Jitter เพิ่มสูงขึ้น

ค่า Jitter p-p ที่วัดได้คิดเป็น 0.25 UIp-p ซึ่งขีดจำกัดของตัวดิซิเรียลไลเซอร์สำหรับการกู้คืนสัญญาณและสัญญาณนาฬิกาคือ 0.46 UIp-p

ระดับสัญญาณที่วัดได้นั้นมีขนาดแปรผันตามการไบแอสตัวรับแสงซึ่งอยู่ในช่วง 26-34 V ในแต่ละระดับการไบแอสสัญญาณที่ออกมาจากโมดูลตัวรับแสง (รวม TIA ด้วย) จะมีระดับสัญญาณต่างกันเป็นไปตามตารางที่ 2.1 เนื่องจากมีการใช้ตัว Coupler ดังนั้นจากสัญญาณส่งที่ 0 dBm จึงวัดได้ออกมาเหลือเพียง -3 dBm เท่านั้นเราจะทำการวัดขนาดของสัญญาณจนถึงที่ -34 dBm ซึ่งที่พลังงานแสงต่ำกว่านี้จะเกินความสามารถในการตรวจจับของตัว APD

ตารางที่ 2.1 แสดงระดับของสัญญาณที่วัดได้เมื่อไบแอสย้อนตัวรับแสงที่ระดับต่างๆ และรับแสงที่ระดับกำลังแสงต่างๆ

ระดับกำลังแสงที่รับ (dBm)	ระดับสัญญาณที่รับได้ (mV)				
	26 V	29 V	30.5 V	32 V	34 V
-3 dBm	194	194	195	196	198
-6 dBm	191	192	194	194	198
-9 dBm	192	191	191	192	194
-12 dBm	188	192	191	189	190
-15 dBm	183	184	186	188	187
-18 dBm	161	167	170	175	177
-21 dBm	142	142	141	147	159
-24 dBm	81	84	98	97	101
-27 dBm	55	60	61	71	69
-29 dBm	19	20	23	25	32
-30 dBm	11	10	19	21	26
-32 dBm	9	9	15	16	19
-34 dBm	-	-	9	9	10

ตารางที่ 2.1 เมื่อพิจารณาจากตัวดิซิเรียลไลเซอร์ที่ใช้ซึ่งรับสัญญาณในช่วง25 – 400 mV ดังนั้นสัญญาณที่ทำให้ตัวดิซิเรียลไลเซอร์สามารถกู้คืนสัญญาณข้อมูลและสัญญาณนาฬิกาได้จึงอยู่ในช่วงที่แรเงาในตาราง ดังนั้นหากต้องการให้ดิซิเรียลไลเซอร์กู้คืนสัญญาณและสัญญาณนาฬิกาได้เมื่อรับสัญญาณแสงที่ระดับ -30 dBm ควรปรับค่าไบแอสให้อยู่ที่ 34 V

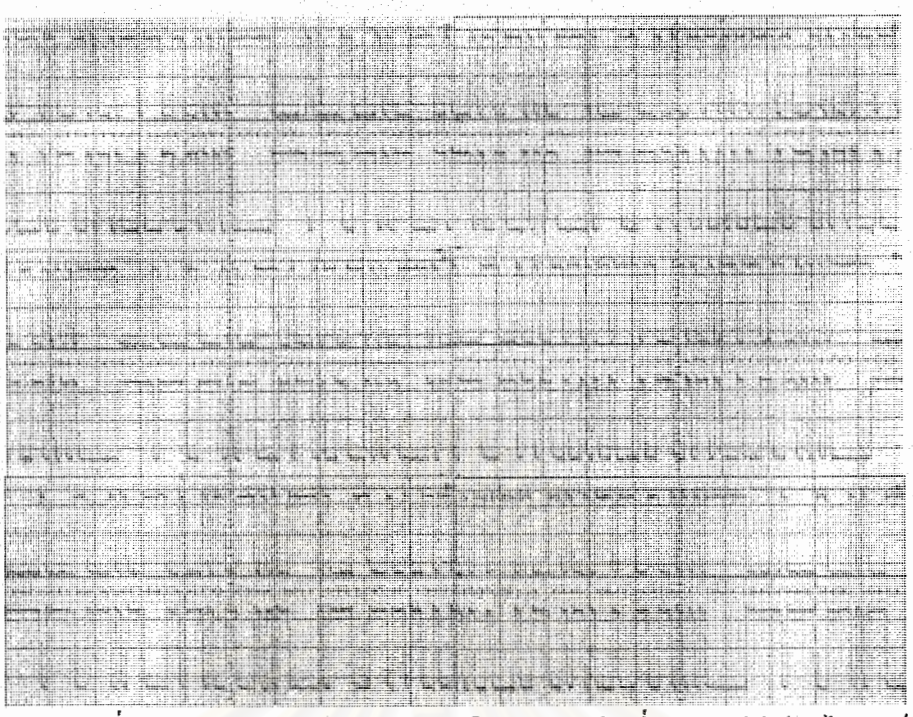
เมื่อไม่มีความจำเป็นที่จะต้องรับสัญญาณแสงที่ค่าต่ำกว่า -30 dBm ก็สามารถเลือกที่จะปรับค่าไบแอสให้อยู่ที่ระดับต่ำลงไปได้ โดยที่ระดับสัญญาณแสง -27 dBm สามารถเลือกใช้ค่าไบแอสระดับใดก็ได้เนื่องจากระดับสัญญาณขาออกสูงพอที่ตัวดิซิเรียลไลเซอร์จะกู้คืนสัญญาณและสัญญาณนาฬิกา

ระดับของสัญญาณแสงนี้มีความสำคัญเพราะเป็นตัวกำหนดว่าตัวดิซิเรียลไลเซอร์จะกู้คืนสัญญาณและสัญญาณนาฬิกาได้หรือไม่ซึ่งจะส่งผลให้อัตราความผิดพลาดบิตมีค่าสูงหากดิซิเรียลไลเซอร์ไม่สามารถกู้คืนสัญญาณและสัญญาณนาฬิกาได้ ซึ่งจากตารางข้างบนแสดงให้เห็นว่าทรานสพอนเดอร์ทางแสงนี้จะรับสัญญาณแสงได้ต่ำสุดที่ประมาณ -30 dBm (เมื่อไบแอสด้วยระดับสัญญาณ 34 V) เท่านั้น หากต่ำกว่านี้ค่าอัตราผิดพลาดบิตจะสูงมาก ดังนั้นในการทดสอบการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงเพื่อวัดอัตราความผิดพลาดบิตในหัวข้อต่อไปจะทำการตั้งค่าไบแอสระดับ 34 V เพื่อให้ได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่น้อยที่สุดที่กำลังทางแสงที่รับที่มีค่าต่ำสุด

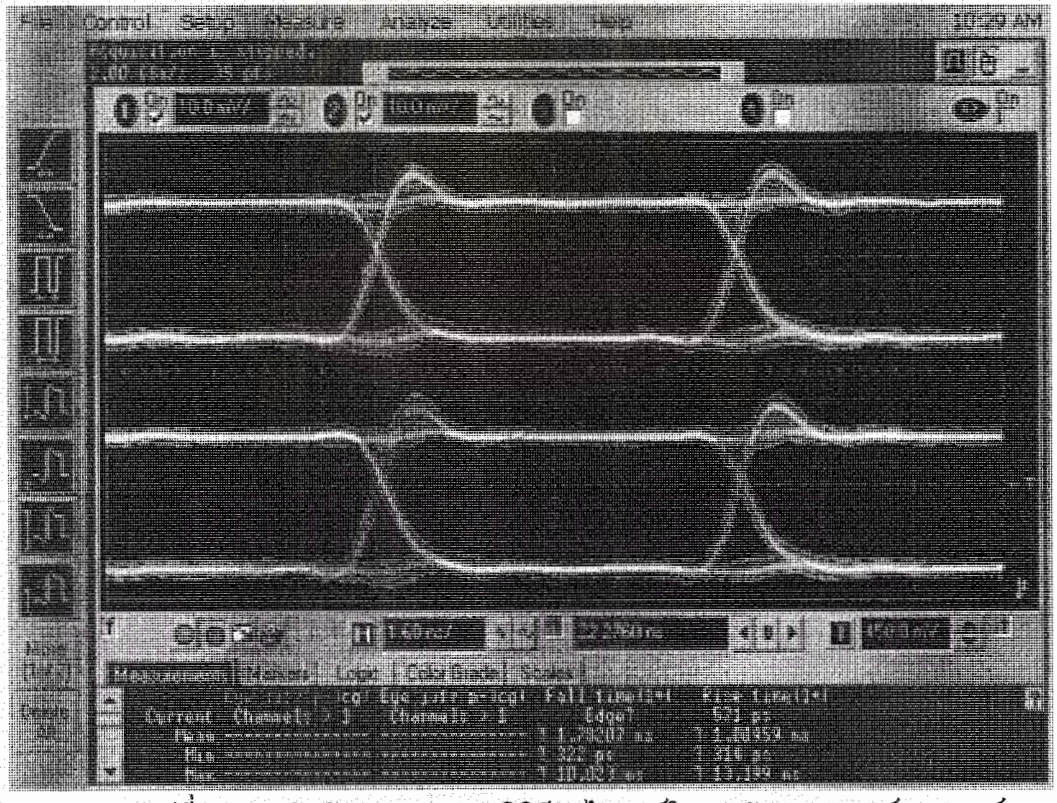
2.2.2. สัญญาณที่ได้จากตัวดิซิเรียลไลเซอร์

ในการวัดสัญญาณที่ออกจากตัวทรานส์พอนเดอร์ซึ่งมีความเร็ว 155 เมกกะบิตต่อวินาทีนั้นจะใช้ MSO ในการวัดสัญญาณซึ่งมีข้อดีเนื่องจากสามารถเห็นรูปสัญญาณได้โดยไม่ต้องใช้ Trigger เมื่อวัดสัญญาณโดยใช้โหมดแผนภาพรูปตานั้นจะเห็นลักษณะของสัญญาณเพียงโดยรวมเท่านั้น ซึ่งบางครั้งสัญญาณที่มีลักษณะรูปตาสวยอาจจะส่งบิตที่ผิดมากก็ได้ ดังนั้นการวัดสัญญาณด้วย MSO จึงเป็นการตรวจสอบค่าของสัญญาณในโหมด Oscilloscope ซึ่งจะเห็นรูปแบบของสัญญาณที่ส่งมาได้นอกเหนือจากการใช้โหมดแบบรูปตา

เนื่องจากสัญญาณที่ส่งเข้าไปเป็นสัญญาณ PRBS ความยาว 2^7-1 หรือ 127 บิตดังนั้นบิตข้อมูลจะซ้ำกันทุกๆ 127 บิตดังแสดงในรูปที่ 2.11 และมีสัญญาณที่ออกมาจากดิซิเรียลไลเซอร์เป็นสัญญาณ PRBS ขนาด 2^7-1 ซึ่งมี Sequence ของสัญญาณเป็นดังนี้ 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0
1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1
0 1 1 1 0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0



รูปที่ 2.11 สัญญาณ PRBS ความยาว 2^7-1 แบบผลต่างที่ออกจากดิซิเรียลไลเซอร์ที่ภาครับของทรานส์พอนเดอร์ (ตำแหน่งB)

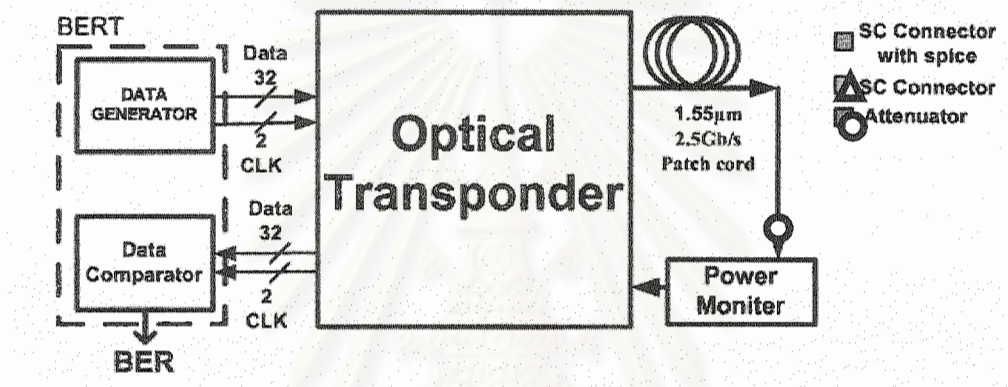


รูปที่ 2.12 ระดับสัญญาณออกจากดิซิเรียลไลเซอร์ในภาครับของทรานส์พอนเดอร์ (ตำแหน่งB)

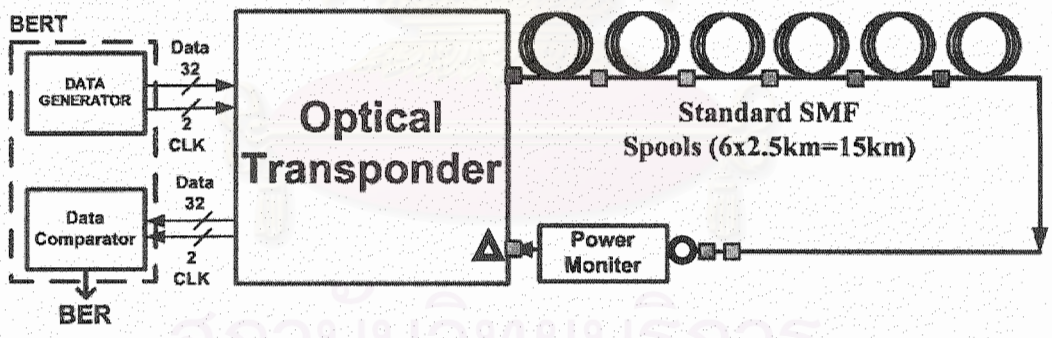
สัญญาณเป็นแบบระดับ LVDS มีค่า Jitter p-p ที่น้อยมากเมื่อเทียบกับคาบบิต ทางด้านค่า Rise time และ Fall time เท่ากับ 1 ns และ 1.7 ns ดังแสดงในรูปที่ 2.12

การวัดประสิทธิภาพของภาครับนี้สรุปได้ว่าภาครับสามารถรับแสงได้ที่ระดับกำลังแสงต่ำสุด -30 dBm เมื่อไบแอสย้อนที่ 34 V ซึ่งหากต่ำกว่านี้จะไม่สามารถกู้คืนสัญญาณทางแสงได้ และจะส่งผลต่ออัตราความผิดพลาดบิตที่วัดได้ในหัวข้อต่อไป

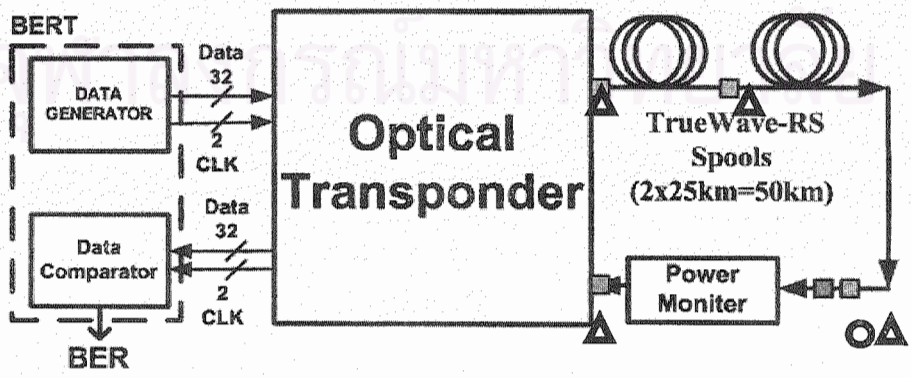
2.3 การวัดคุณสมบัติในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงการวัดอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง (ก) กรณี Loop Back (ข) กรณีผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะ 15 กิโลเมตร (ค) กรณีผ่านเส้นใยนำแสงแบบ TrueWave ระยะ 50 กิโลเมตร

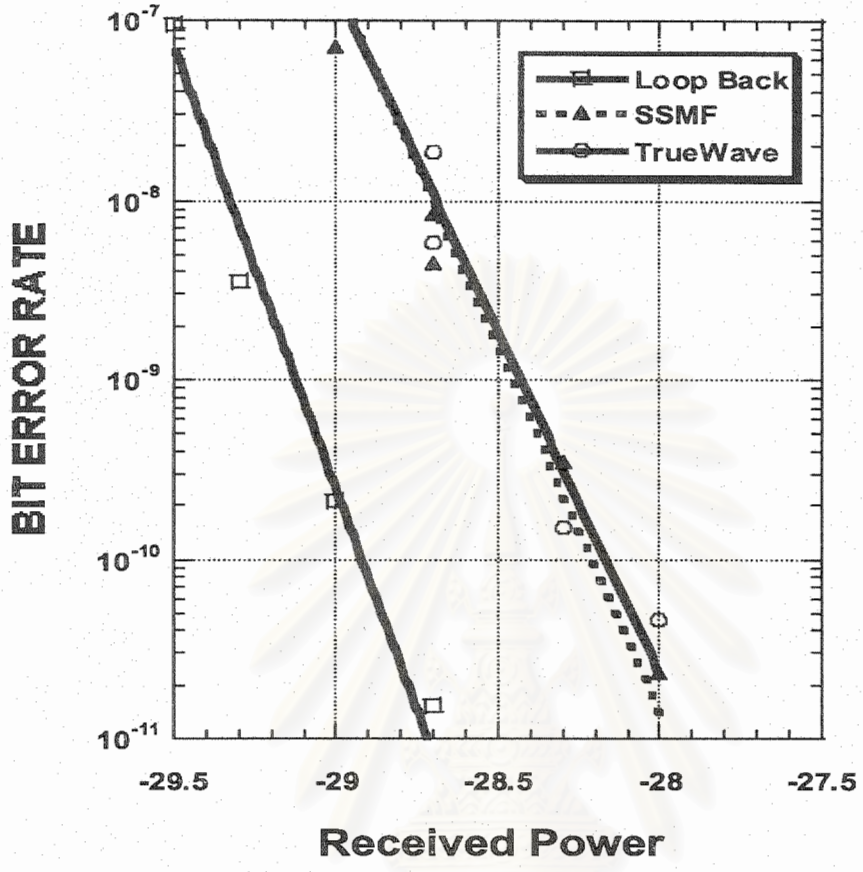
จากรูปที่ 2.13 ทำการวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิตของสัญญาณที่ผ่านทรานส์พอนเดอร์ทางแสงโดยเริ่มจากสร้างสัญญาณ PRBS จากตัวสร้างสัญญาณส่งสัญญาณเข้าสู่ ทรานส์พอนเดอร์ทางภาคส่ง หลังจากนั้นสัญญาณทางแสงจะถูกส่งเข้าไปยังม้วนเส้นใยนำแสง (Optical Fiber spools) โดยแบ่งพิจารณาเป็น 3 กรณีคือ (ก) แบบ loop back คือสัญญาณแสงถูกป้อนกลับสู่ภาครับทันที (ข) ผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะ 15 กิโลเมตร และ (ค) ผ่านเส้นใยนำแสงแบบ TrueWave ระยะ 50 กิโลเมตร โดยในการวัดจะมีการเปลี่ยนค่าของกำลังทางแสงเป็นค่าต่างๆ แล้วหาความสัมพันธ์ของอัตราความผิดพลาดบิตต่อกำลังทางแสงที่รับในกรณีต่างๆ

ความแตกต่างระหว่างการส่งสัญญาณแบบ loop back กับแบบที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงคือในกรณีหลังจะมีปัญหาดิสเพอร์ชั่นเกิดขึ้นซึ่งจะส่งผลให้การส่งข้อมูลอาจจะมีความผิดพลาดขึ้นได้ ส่วนการเปรียบเทียบกรณีที่เป็นเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะ 15 กิโลเมตรกับเส้นใยนำแสงแบบ TrueWave ระยะ 50 กิโลเมตรนั้น เส้นใยนำแสงทั้งสองชนิดมีที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแสดงความแตกต่างของค่าดิสเพอร์ชั่นตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความแตกต่างของการทดลองหาอัตราผิดพลาดบิตทั้ง 3 กรณี

	Loop Back	Standard single mode fiber	TrueWave single mode fiber
Dispersion@1550 ; ps/(nm·km)	18	18	5
Pulse spreading ; (t_{GVD};ps)	18x0x0.09=0	18x15x0.09=27	5x50x0.09=25
Attenuation loss +Insertion loss	-0.2 dB	-4.5 dB	-12.5 dB

จากตารางข้างบนค่าการกระจายออกของพัลส์จากการคำนวณในกรณี (ข) และ (ค) นั้นมีค่าเกือบเท่ากัน ดังนั้นเมื่อทำการหาอัตราความผิดพลาดบิตจึงน่าที่จะได้ความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันซึ่งหลังจากการทดลองได้ลักษณะความสัมพันธ์เป็นไปตามรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับกำลังแสงที่รับเมื่อทดสอบกรณี Loop Back (เส้นทึบสี่เหลี่ยม) กรณีผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวมาตรฐานระยะ 15 กิโลเมตร (เส้นประสามเหลี่ยม) กรณีผ่านเส้นใยนำแสงแบบ TrueWave ระยะ 50 กิโลเมตร (เส้นทึบวงกลม)

จากกราฟแกนตั้งคือค่าอัตราความผิดพลาดบิตแกนนอนคือค่ากำลังทางแสงที่รับที่ตัวทรานส์พอนเดอร์ เมื่อพิจารณาเส้นกราฟของทั้ง 3 กรณีจะเห็นได้ว่าในกรณี loop back สัญญาณจะไม่มีผลของดิสเพอร์ชั่นมาเกี่ยวข้อง ดังนั้นสัญญาณจึงมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตต่ำกว่าในอีก 2 กรณีถัดมา เมื่อพิจารณาต่อไปถึงสองกรณีหลังจากการคำนวณจะเห็นได้ว่าผลของดิสเพอร์ชั่นมีค่าเกือบเท่ากันดังนั้นจึงได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ใกล้เคียงกันด้วยซึ่งก็เป็นไปตามที่คำนวณไว้ก่อนหน้านี้

เมื่อพิจารณาที่อัตราความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-9} จะเห็นได้ว่ากรณีแรกอยู่ที่ค่ากำลังทางแสง -29.1 dBm ส่วนอีกสองกรณีหลังอยู่ที่ค่า –28.4 dBm ซึ่งจะได้ค่า Power penalty ประมาณ 0.7 dB ซึ่งสอดคล้องกับค่า Power penalty ในการหาอัตราความผิดพลาดบิตก่อนที่จะทำการประกอบต้นแบบขึ้นซึ่งตอนนั้นสามารถวัดค่า Power penalty ได้เป็น 0.65 dB โดยใช้ Evaluation board มาต่อกัน

สรุปผลการวัดประสิทธิภาพของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ประกอบขึ้นโดยแบ่งการวัดเป็นการวัดประสิทธิภาพทางภาคส่ง ภาครับ และท้ายที่สุดวัดประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณซึ่งต้องใช้ทั้งภาคส่งและภาครับทำงานร่วมกัน โดยทรานส์พอนเดอร์ทางแสงนี้สามารถสร้างสัญญาณทางแสงกำลังแสงสูงสุดได้ 0 dBm มีค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชันได้ถึง 8.89 dBซึ่งเกิน 8.2 dB ตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ โดยมีค่า Jitter p-p เป็น 40 ps มีค่า Rise time และ Fall time เท่ากับ 113 ps และ 156 ps ตามลำดับ ซึ่งค่า Jitter p-p ที่วัดได้ยังอยู่ในช่วงที่ดิซิเรียลไลเซอร์สามารถกู้คืนสัญญาณกลับได้ ส่วนค่า Rise time และ Fall time ยังอยู่ภายในช่วง 70% ของคาบบิตตามมาตรฐานของการส่งสัญญาณแบบ NRZ สำหรับภาครับสามารถรับสัญญาณทางแสงได้ต่ำถึงระดับ -29.1 dBm ในขณะที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-9} ซึ่งเมื่อนำค่าประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงมาหาขีดจำกัดของการทำงานจะได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงขีดจำกัดของระยะทางส่งสัญญาณของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ประกอบขึ้น

	ข้อกำหนด	ระยะทางที่แสงจะเดินทางได้ไกลสุด
ผลจาก Dispersion	$T_{r,bugget} < 70\% T_b$	$(18x0.09xL)^2+(113.3)^2+(350/2.5)^2=280^2$ L = 132 กิโลเมตร
ผลจาก Attenuation	Power Budget	$0-(-29.1)-0.4(Loss_{ins})-6dB(system\ margin)=0.25xL$ L = 90 กิโลเมตร

จากตารางจะพบว่าขีดจำกัดในการส่งสัญญาณแสงจะอยู่ที่ค่าลดทอนซึ่งสามารถส่งและรับสัญญาณด้วยทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ออกแบบขึ้นนี้โดยไม่มีตัวขยายสัญญาณได้ระยะทางไกลที่สุด 90 กิโลเมตรซึ่งถือว่าไกลกว่ามาตรฐานระยะทาง SR และ IR โดยระยะทางที่คำนวนได้นี้ถือว่าส่งได้ไกลถึงระดับ LR (Long Reach) (80 กิโลเมตร ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร)

ในภาคผนวกนี้แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ประกอบขึ้นโดยแบ่งการทดสอบเป็น ทางภาคส่ง ทางภาครับ และการทดสอบส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง โดยจากการทดสอบปรากฏว่าทรานส์พอนเดอร์ทางแสงที่ออกแบบและประกอบขึ้นสามารถทำงานได้ตามมาตรฐานโดยสามารถสร้างสัญญาณทางแสงที่อัตราส่ง 2.5 กิกะบิตต่อวินาทีจากสัญญาณทางไฟฟ้าความเร็ว 155 เมกกะบิตต่อวินาที 16 ช่องสัญญาณ โดยสัญญาณแสงที่ได้ผ่านการทดสอบหน้ากากมาตรฐานและมีค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชั่นมากกว่า 8.2 dB ทางภาครับสามารถรับสัญญาณทางแสงและแปลงกลับออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า 16 ช่องสัญญาณโดยสามารถรับสัญญาณแสงที่ความพลังงานทางแสงต่ำสุดถึง -29 โดยมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตอยู่ที่ระดับ 10^{-9} และผ่านการทดสอบส่งและรับสัญญาณทางแสงผ่านเส้นใยนำแสงระยะทาง 15 กิโลเมตรโดยอัตราความผิดพลาดบิตไม่เกิน 10^{-9} ได้สำเร็จ

Reference

1 Introduction to LVDS, PECL, and CML. Application Note. www.maxim-ic.com: Maxim's website

2 Single-Ended Differential Methods of Driving a Laser Diode. Application Note. www.maxim-ic.com: Maxim's website

3 Interfacing Maxim Laser Drivers with Laser Diodes. Application Note. www.maxim-ic.com: Maxim's website

4 ITU-T Recommendation G.691, *Optical interfaces for single channel SDH systems with optical amplifiers, and STM-64 systems*.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย