

## บทที่ 4

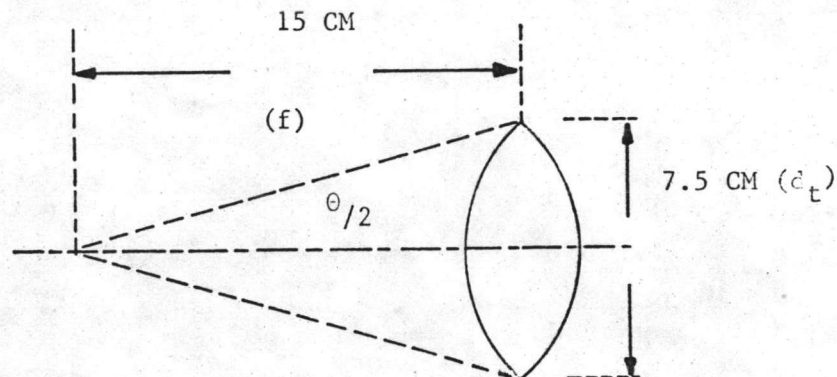
การออกแบบและสร้างชุดรับ - ส่งข้อมูลเชิง เลขที่ใช้แสงอินฟรา เรดส่งผ่านบรรยากาศ

จากบทที่ 2 และ 3 ที่ผ่านมามีได้กล่าวถึงพื้นฐานของระบบ การที่จะทำให้ระบบสามารถรับส่งข้อมูลได้ดี จำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบและเลือกอุปกรณ์ให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุด ดังนั้นในบทนี้จะได้อธิบายการออกแบบระบบ เลนซ์การเลือกอุปกรณ์ และการออกแบบวงจรภาคส่งและภาครับที่ใช้งานจริง

### 4.1 การเลือกใช้อุปกรณ์และการออกแบบระบบ เลนซ์

สำหรับระบบการรับ - ส่งข้อมูลเชิง เลขที่ใช้แสงอินฟรา เรดส่งผ่านบรรยากาศนั้น อุปกรณ์ที่สำคัญ ๆ ก็คือ ตัวกำเนิดแสง ตัวรับแสง และเลนซ์ที่จะใช้จากข้อมูลในบทที่ 2 พอจะสรุปได้ว่า การพิจารณาเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีแพทเทิร์นการส่องสว่าง เป็นมุมแคบ และใช้เลนซ์ที่มีค่าการสูญเสียจะทำให้การส่งพลังงานมีประสิทธิภาพและสามารถส่งได้ระยะทางไกล จากความสามารถในการผลิตของบริษัทผู้ผลิตประกอบกับความสะดวกในการจัดหา ได้พิจารณาเลือกตัวกำเนิดแสงแบบ LED เบอร์ FED081W ของบริษัท ฟุจิตสึ ประเทศญี่ปุ่น มีคุณสมบัติที่เหมาะสม กล่าวคือมีความยาวคลื่นศูนย์กลาง เป็น 865nm มีแพทเทิร์นที่มีขนาดความกว้างของลำแสง (Half - power beam width) เป็น  $10^\circ$  และเปล่งพลังงานแสงได้พลังงานประมาณ 10 mW เมื่อผ่านกระแส 100 mA (ดูรายละเอียดได้จากภาคผนวก ค.) แต่จากการทดสอบจริง ปรากฏว่าได้แพทเทิร์นของการส่องสว่างใกล้เคียงกับที่ให้รายละเอียดไว้ แต่พลังงานแสงที่เปล่งออกมาเมื่อผ่านกระแส 100 mA ในสภาพที่ไม่มีการใช้ระบบระบายความร้อน มีค่าประมาณ 7 mW ในกรณีที่ต้องการให้แหล่งกำเนิดแสงทำงานให้ประสิทธิภาพที่ดีจึงจำเป็นต้องจัดระบบระบายความร้อนให้ดี

เมื่อทำการคัดเลือกตัวกำเนิดแสงได้แล้ว จึงได้ทำการคัดเลือก เลนซ์ที่จะใช้สำหรับจัดระบบการส่งและรับลำแสง ในการคัดเลือกในตอนแรก ซึ่งได้ทำการคัดเลือกไว้เพื่อใช้กับ LED OC-1 โดยจัดระบบเลนซ์เป็นแบบระบบเลนซ์หลายตัว แต่อย่างไรก็ตามได้คัดเลือกเลนซ์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 ซม. และมีทางยาวโฟกัสขนาด 15 ซม. เป็นเลนซ์ที่ผลิตโดยบริษัท Rolyne ประเทศสหรัฐอเมริกา ตามข้อกำหนดเลนซ์จะมีค่าทรานสมิตติวิตี เป็น 90% ที่ความยาวคลื่น 850 nm แต่จากการทดสอบพบว่าค่าทรานสมิตติวิตีมีค่าประมาณ 73.8% ซึ่งต่ำกว่าข้อกำหนดของบริษัท ถ้าพิจารณาถึงความสามารถในการรับแสงของระบบ เลนซ์พิจารณาได้จากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เลนซ์ที่ใช้งาน

จะเห็นได้ว่า มุมของเลนซ์ที่สามารถรับแสงได้มีค่า  $= \theta$  เรเดียน

จากรูป  $\tan \theta/2 = d_t/2f$

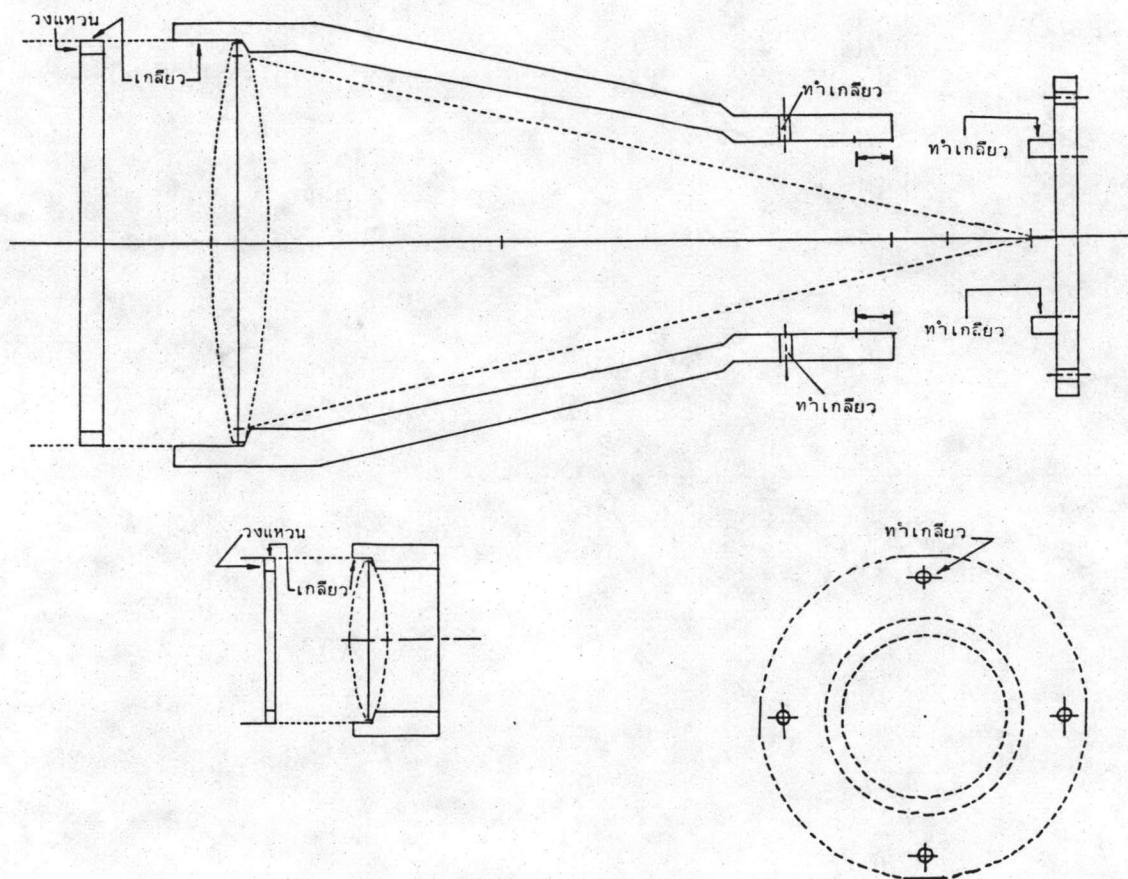
หรือ  $\theta/2 = \tan^{-1}(d_t/2f)$

ดังนั้น เลนซ์ที่ใช้จึงมีมุมรับภาพประมาณ  $(\theta) 28^\circ$

เปรียบเทียบกับ LED ที่ใช้ที่มีแพทเทิร์นของการส่องสว่างประมาณ  $10^\circ$  จะพบว่า ระบบเลนซ์สามารถรองรับพลังงานแสงที่เปล่งมาจากตัวกำเนิดแสงได้หมด จากการทดลองพบว่า ระบบเลนซ์สามารถส่งผ่านพลังงานของตัวกำเนิดแสงได้ 73.8%

สำหรับระบบเลนซ์ของภาครับก็มีโครงสร้างเช่นเดียวกันกับภาคส่ง โดยทำการรวมลำแสงให้ไปตกลงบนตัวรับแสงแบบ PIN PD เบอร์ TIL 100 ดังที่ได้กล่าวถึงคุณสมบัติไว้ในบทที่ 3 เพื่อให้การจัดวางระบบเลนซ์มีความมั่นคงจึงได้ทำการออกแบบชุดยึดเลนซ์ ดังมีโครงสร้าง

ตามรูปที่ 4.2 ตัวยึดทำขึ้นโดยการกลึงอลูมิเนียมให้ เป็นรูปกรวยมีขนาดของการ เรียงลงใหญ่กว่าขนาดมุมรับแสงของเลนส์ ด้านยึด เลนส์จะทำ เป็นวงแหวนชั้น เกลียวประกบ เลนส์ที่วางอยู่บนบ่ารองรับภายในกรวย ภายในทำการพ่นสีดำด้าน เพื่อป้องกันการสะท้อนแสงที่ไม่ต้องการจากการประกบเข้ากับ LED เบอร์ FED 081W พบว่าระบบเลนส์มีมุมลู่ออกประมาณ 2.6 มิลลิเรเดียน

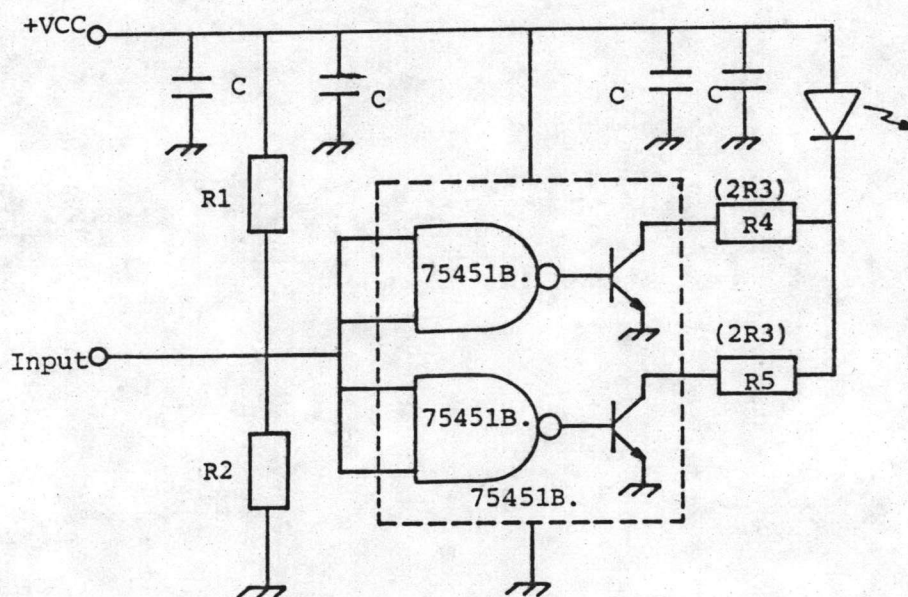


รูปที่ 4.2 โครงสร้างกรวยอลูมิเนียมยึดเลนส์

#### 4.2 การออกแบบวงจรมอดูเลชัน

เนื่องจากในระบบที่ใช้งานจริงนั้นชุดส่งและรับแสงนั้นจำเป็นต้องติดตั้งไว้ในที่สูง เช่น คาดฟ้าของตึก เป็นต้น จึงทำให้ชุดรับและส่งแสงอยู่ห่างจากอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณดิจิทัล ซึ่งทำให้ต้องคำนึงถึงชนิดสายนำสัญญาณที่จะใช้ เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาจากสัญญาณรบกวน ซึ่งอาจจะเข้ามา

ได้ระหว่างทางจึงได้เลือกใช้สายส่งแบบโคแอกเซียลที่มีความต้านทาน 50 โอห์ม เป็นสายนำสัญญาณ ดังนั้น การออกแบบภาคส่งของชุดส่งแสงอินฟราเรด จึงต้องคำนึงถึงการแมทช์อิมพีแดนซ์กับสายนำสัญญาณ และระบบรับแสงอินฟราเรดจำเป็นที่จะต้องส่งข้อมูลกลับไปตามสายนำสัญญาณ เช่นเดียวกัน ดังนั้น ในส่วนนี้จะได้อธิบายถึงหลักการของการแมทช์อิมพีแดนซ์พร้อมทั้งวงจรภาคส่ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรการแมทช์อิมพีแดนซ์และภาคส่ง

#### 4.2.1 การแมทช์อิมพีแดนซ์

การส่งสัญญาณที่ทีแอลผ่านสายโคแอกเซียลเป็นการส่งแบบทางเดียว (Simplex Mode) โดยภาคส่งเป็นแบบ Open-Collector ดังนั้น ภาครับจะต้องคำนึงถึงกระแสที่จะต้องป้อนให้กับภาคส่งผ่านทางสายโคแอกเซียล และค่าแรงดันขีดเริ่มที่ยังคงให้ภาครับสามารถตัดสินใจ

สัญญาณที่ส่งมามีสถานะ เป็นลอจิก "0" หรือลอจิก "1" คือไม่อยู่ในช่วงของสถานะที่ไม่เสถียร จากการออกแบบจะกำหนดให้สถานะที่เป็นลอจิก "1" จะมีขนาดแรงดันที่ทาง เข้าของ เกตแบบแนนด์ ไม่ต่ำกว่า 2 โวลต์ คือในที่นี้ให้มีความเท่ากับ  $\frac{3}{5}$  ของ  $V_{CC}$  ( $V_{CC}=5V$ ) ประมาณ 3 โวลต์ จากรูป 4.3 ในสถานะที่  $TR_1$  "ON" กระแสจะไหลจาก  $+V_{CC}$  ผ่าน  $R_1$  ผ่านมาทางสายโคแอกเซียล ผ่านขาคอลเลคเตอร์ของ  $TR_1$  ลงดินทางขาอิมิตเตอร์ ซึ่งสถานะนี้เป็นช่วงที่  $+V_{CC}$  จะต้องจ่ายกระแส หรือทางเข้าของ เกตแบบแนนด์เป็นลอจิก "0" จะได้แรงดันที่ทาง เข้ามีค่าประมาณศูนย์โวลต์ หรือเท่ากับ  $V_{CE1(sat)}$  ในทางตรงกันข้าม  $TR_1$  "OFF" แรงดันที่ทาง เข้าของ เกตแบบแนนด์ประมาณ  $\frac{R_2}{R_1+R_2} \times V_{CC}$  ในที่นี้กำหนดให้  $\frac{R_2}{R_1+R_2} \approx \frac{3}{5}$  ก็จะได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  แต่ค่าความต้านทานรวมคือ  $R_1$  ขนานกับ  $R_2$  จะต้องมีค่าประมาณ 50 โอห์ม ซึ่งทำให้  $R_1 = 82\Omega$  ,  $R_2 = 120\Omega$  (รายละเอียดของการออกแบบดูได้จากภาคผนวก ข.)

#### 4.2.2 วงจรภาคส่ง

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าสัญญาณขาเข้าที่ผ่านมาถึงทาง เข้าของ เกตแบบแนนด์จะเป็นสัญญาณที่ทีแอล และสัญญาณขาออกจาก เกตแบบแนนด์จะทำหน้าที่ไปขับทรานซิสเตอร์ให้ขับ LED ให้เปล่งแสงอินฟราเรด การนำทางเข้าทั้ง 2 ทางของเกตแบบแนนด์มาต่อกันก็เพื่อทำให้เกตแบบแนนด์ทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์ เมื่อสัญญาณขาเข้าที่เข้ามาเป็นลอจิก "0" จะทำให้สัญญาณขาออกมีแรงดันสูงประมาณ 3.6 V ทำให้  $TR_2$  อยู่ในสภาพอิ่มตัว และจะทำให้  $TR_2$  นำกระแสไหลผ่าน LED ทำให้ LED เปล่งแสง  $R_3$  ทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่ไหลผ่าน LED ไม่ให้เกิน 100 mA ถ้าสัญญาณขาเข้าเป็นลอจิก "1"  $TR_2$  ก็จะหยุดนำกระแสและ LED ก็จะดับ การออกแบบนี้ได้ทำการเลือกอุปกรณ์ที่จะใช้งานดังนี้ก็คือ สำหรับระบบการขับ LED ทั้ง เกตแบบแนนด์และทรานซิสเตอร์ได้ถูกบรรจุอยู่ใน IC เบอร์ 75451B (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค.) ในตัวประกอบด้วยเกตแบบแนนด์ที่มีทาง เข้า 2 ทางต่อกับทรานซิสเตอร์ไว้เป็นแบบปล่อยขาคอลเลคเตอร์ลอย 2 ชุด โดยทรานซิสเตอร์สามารถนำกระแสสูงสุดได้ 300 mA เมื่อใช้พร้อมกันทั้ง 2 ชุด ระบบนี้ให้ Propagation Delay Time ประมาณ 25 nS และ  $V_{CE(sat)}$  ประมาณ 0.25 V ที่ 100 mA (รายละเอียดการออกแบบทั้งหมดอยู่ในภาคผนวก ข.)

### 4.3 การออกแบบวงจรภาครับ

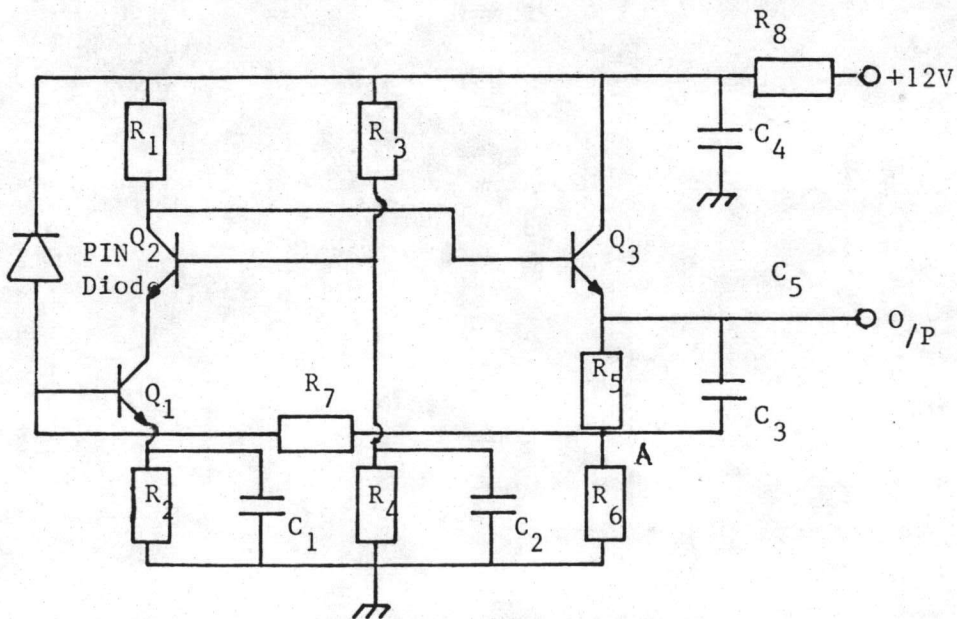
ในส่วนของภาครับประกอบไปด้วยการทำงาน 2 ส่วนคือ การแปลงสัญญาณทางความเข้มของแสงมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และภาคดีเทคเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.3.1 ภาคแปลงสัญญาณทางความเข้มของแสงมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

ในที่นี้ได้กำหนดความสามารถของระบบภาครับไว้ว่าจะต้องรับสัญญาณความเข้มของแสงได้ที่ความเข้มต่ำกว่า  $0.1 \mu\text{W}$  สามารถทำงานได้ถึงความถี่  $2 \text{ MHz}$

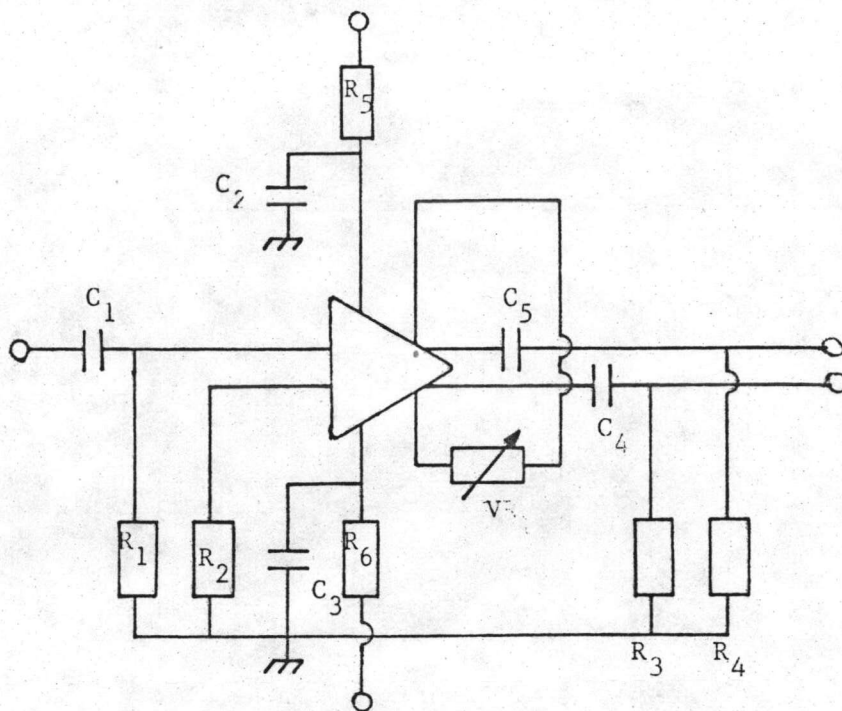
ถ้าตั้งสมมุติฐานไว้ว่าระดับต่ำสุดที่ภาคดีเทคเตอร์ต้องการในการเปลี่ยนเป็นสัญญาณที่ที่แอลคือ ขนาดแรงดันประมาณ  $300 \text{ mV}$  และประสิทธิภาพของตัวรับแสงในการแปลงพลังงานแสงมาเป็นกระแสเท่ากับ  $0.6 \text{ A/W}$  ดังนั้น อัตราการขยายที่ต้องการจะต้องมีค่าประมาณ  $(300 \times 10^{-3}) \div (.1 \times 10^{-6} \times 0.6) \approx 5 \times 10^6 \Omega$  นี่คือนอัตราขยายแรงดันจากกระแส Transresistance ดังนั้น เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพจึงได้ทำการออกแบบวงจรแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ภาคขยายกระแสจากโฟโตไดโอด และภาคขยายอะนาล็อก

ในที่นี้จะไม่ออกแบบให้ภาคแรกมีอัตราขยายสูงมาก ๆ แต่จะออกแบบให้ภาคแรกตอบสนองความถี่ได้กว้าง และให้ภาคขยายอะนาล็อกทำการขยายสัญญาณเพิ่มขึ้นโดยให้ภาคหลังมีการตอบสนองความถี่ที่ดี เช่นเดียวกัน วงจรภาคแรกได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรขยายกระแสจากโฟโตไดโอด

PIN PD จะทำหน้าที่แปลงความเข้มของแสง เป็นกระแสแล้วบ่อนให้ที่ขาเบสของ  $Q_1$  การต่อวงจร  $Q_1, Q_2$  เป็นการต่อแบบ Common Emitter - Common Base Amplifier  $R_2$  จะทำหน้าที่ไบแอสค่าอิมิตเตอร์ของ  $Q_1$  ไว้ประมาณ 10% ของค่า  $V_{CC}$  อิมิตเตอร์ของ  $Q_2$  จะทำหน้าที่เป็นภาระทางไฟฟ้าให้กับคอลเลคเตอร์ของ  $Q_1$  ทำนองเดียวกัน  $R_1$  จะทำหน้าที่ภาระทางไฟฟ้าให้กับ  $Q_2$   $R_3$  และ  $R_4$  ทำหน้าที่เป็นวงจรแบ่งแรงดันทำการแบ่งแรงดันค่าไบแอสให้กับขาเบสของ  $Q_2$   $Q_3$  ที่ต่อเพิ่มมาจะต่อแบบ Common Collector มีอัตราขยายทางแรงดันเท่ากับหนึ่ง การเพิ่มเข้ามาเพื่อทำหน้าที่เป็น Bootstrap Loader ให้กับภาคขยายลำดับต่อไป  $R_5$  และ  $R_6$  ทำหน้าที่ไบแอสค่าอิมิตเตอร์ของ  $Q_3$  ให้มีค่าเหมาะสมที่จะทำให้ขาเบสของ  $Q_3$  มีแรงดันเท่ากับคอลเลคเตอร์ของ  $Q_2$   $C_3$  จะทำหน้าที่ลัดคา  $R_5$  ทางสัญญาณ AC หรือทำให้ A เป็นจุดเสมือนอิมิตเตอร์ของ  $Q_3$  ค่า  $R_7$  จะทำหน้าที่ควบคุมกระแสไบแอสให้ค่าเบสของ  $Q_1$  โดยอาศัยแรงดันแตกต่างระหว่างจุด A และขาเบสของ  $Q_1$  และทำหน้าที่เป็นตัวบ่อนกลับแบบลบเป็นแบบ Parallel Output - Parallel Input  $C_1$  และ  $C_2$  ทำหน้าที่ผ่านสัญญาณทาง AC ลงดินหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งเป็นตัวกำหนดค่าความถี่คัตออฟด้านต่ำ  $R_8$  และ  $C_4$  เป็นวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากวงจรแหล่งจ่ายไฟเข้ามารบกวนวงจรภาคขยายจากการออกแบบจะได้อัตราขยายประมาณ 27 K $\Omega$  โดยพิจารณาเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BF 241 มี  $\beta \approx 36$ ,  $C_{CE} \approx 0.2$  PF และ TIL 100 จะทำการต่อแบบไบแอสกลับทางไว้ที่แรงดัน 12 V และจะมี  $C_p \approx 20$  PF ทำให้ระบบมีความถี่คัตออฟด้านสูงที่ 5.05 MHz จากการเลือก  $C_1, C_2, C_3$  ประมาณ .1  $\mu$ F จะได้ความถี่คัตออฟด้านต่ำ ประมาณ 1500 Hz ทั้งนี้เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากความถี่ของไฟ AC 220 โวลต์ 50 Hz ไม่ให้เข้ามารบกวนสัญญาณ



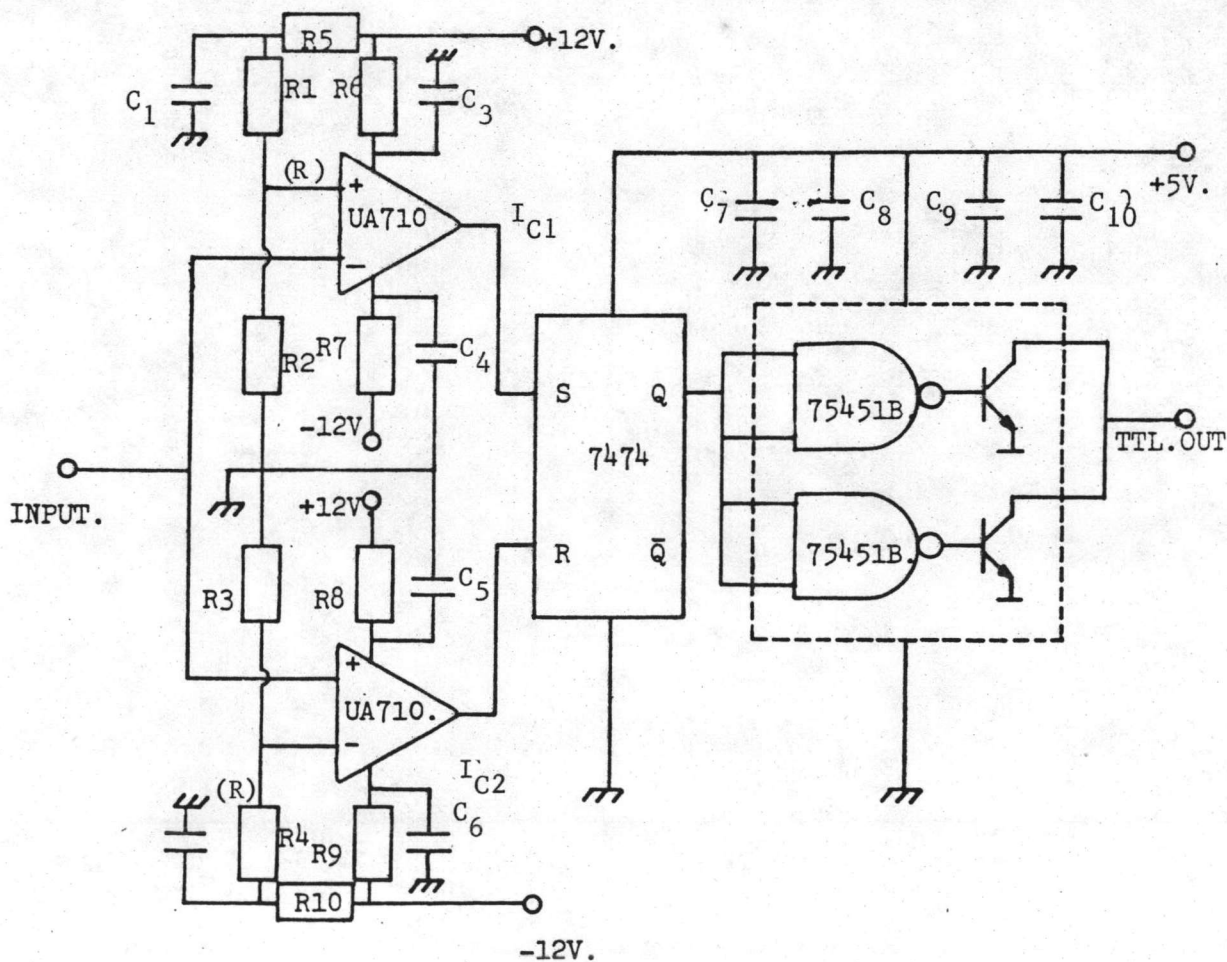
รูปที่ 4.5 วงจรขยายอะนาล็อก

สำหรับวงจรขยายอะนาล็อกจะต้องทำการขยายด้วยอัตราขยายประมาณ 200 เท่า ดังนั้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาเลือกใช้วงจรที่ดี ในที่นี้เลือกใช้วงจขยายโดยใช้ IC  $\mu\text{A 733}$  ซึ่งเป็นรีดิโอแอมพลิไฟที่มีอัตราขยายถึง 400 เท่าที่ให้แบนด์วิดท์ 40 MHz การใช้จะออกแบบวงจรให้มีการปรับอัตราการขยายได้โดยอาศัยการปรับค่าความต้านทาน จากรูป  $R_1$  และ  $R_2$  ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดความต้านทานขาเข้าให้มีค่า 1 k $\Omega$   $C_1$  ทำหน้าที่เป็น C เชื่อมต่อ และเป็นวงจรกรองผ่านสูงที่ความถี่ 150 Hz  $R_3$  และ  $R_4$  เป็นภาระทางไฟฟ้าของ  $\mu\text{A 733}$   $R_5$ ,  $C_2$  และ  $R_6$ ,  $C_3$  ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำป้องกันสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายไฟ  $VR_1$  จะทำหน้าที่ปรับอัตราการขยายให้ได้ตามความต้องการ

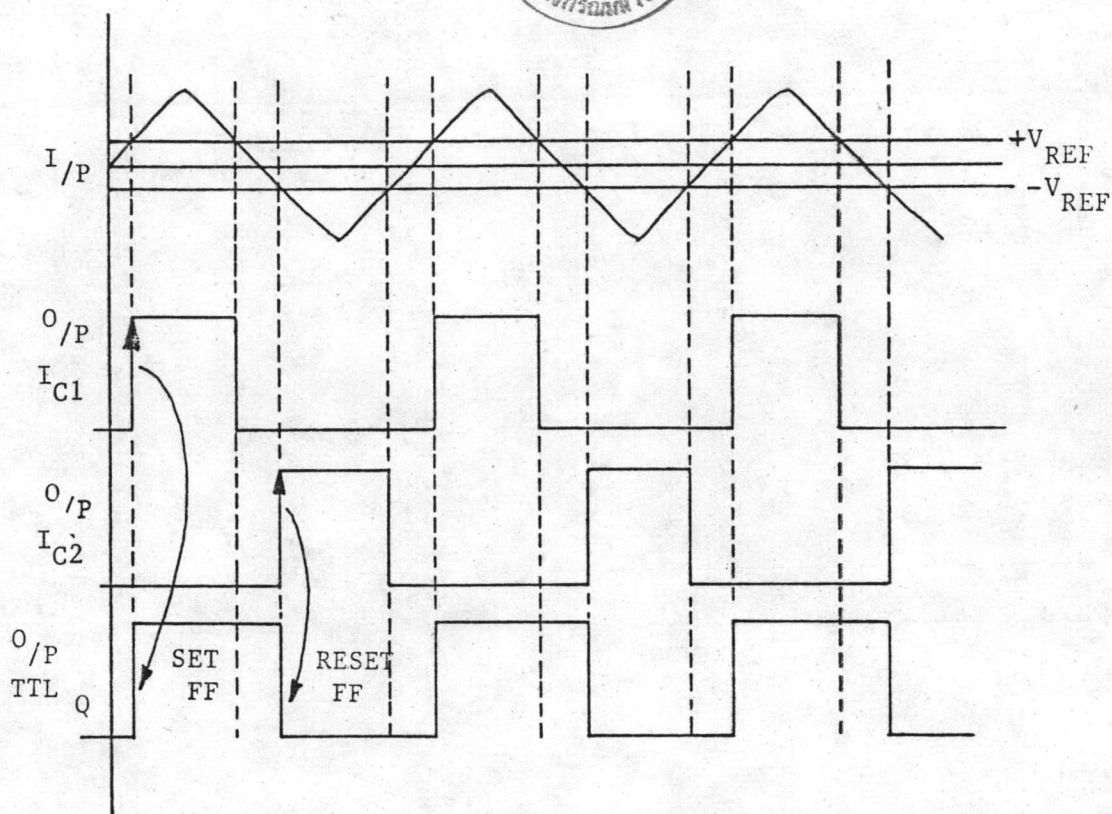


4.3.2 ภาคดีเทคเตอร์

ภาคส่งสัญญาณที่ทีแอล แบบการผสมสัญญาณกับความเข้มของแสง สภาวะลอจิก "1" คือความเข้มสูงสุด สภาวะลอจิก "0" คือสภาวะที่ความเข้มต่ำสุด แต่ในวงจรภาครับได้ออกแบบให้ระบบไม่ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม กล่าวคือวงจรจะยอมให้ เฉพาะสัญญาณผ่าน หรือมีการทำงานแบบวงจร AC สภาพความเข้มสูงสุดอาจเป็นช่วงที่มีแอมพลิจูดเป็นบวก และความเข้มต่ำสุดมีแอมพลิจูดเป็นลบ หรือในทางกลับกันช่วงความเข้มสูงสุดอาจมีแอมพลิจูดลบก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับเฟสของภาคขยาย ตั้งแต่ตัวโฟโตไดโอดผ่านภาคขยายมาแต่ละภาค ดังนั้นการตัดสินใจสภาวะลอจิก จึงได้ทำการตัดสินใจตรงประเด็นของการ เปลี่ยนค่าแอมพลิจูดจากบวกมาลบ หรือลบมาบวก ซึ่งก็คือตัดสินใจที่ระดับสัญญาณผ่านจุดศูนย์ แต่เนื่องจากมีความเกี่ยวเนื่องกับสัญญาณรบกวน ประกอบกับมีการใช้ตัวเปรียบเทียบที่มีความไวสูง สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากภาครับจะมีส่วนทำให้เกิดสัญญาณที่ทีแอล ที่ไม่ต้องการในช่วงที่ว่างจากการส่งสัญญาณ หรือช่วงสัญญาณกว้าง ๆ ดังนั้น การใช้งานจึงได้ทำการออกแบบการตัดสินใจแบบวงจรดับ เบิล เอน ลิมิต ดีเทคชั่น (Double-end-limit Detection) โดยการทำให้เกิดฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis) และ เป็นการป้องกันสัญญาณรบกวนได้อย่างดีด้วยรูปที่ 4.6 เป็นรูปวงจรภาคดีเทคเตอร์ที่ใช้หลักการของวงจรดับ เบิล เอน ลิมิต ดีเทคชั่น



รูปที่ 4.6 วงจรดีเทคเตอร์



รูปที่ 4.7 Wave form ของการเปรียบเทียบ

จากรูปที่ 4.6 R ทั้ง 2 ข้างจะเป็นตัวกำหนดจุดเปรียบเทียบสมดุลย์ทั้ง 2 ข้าง

$I_{C1}$  จะทำหน้าที่เปรียบเทียบในช่วงบวกและ  $I_{C2}$  จะทำหน้าที่ในช่วงลบ ดังรูปที่ 4.7 สัญญาณขาออกของ  $I_{C1}$  จะเปลี่ยนสภาวะจาก "0" ไปเป็น "1" ในทันทีที่สัญญาณขาเข้ามีค่ามากกว่าสัญญาณเปรียบเทียบ ทำนองเดียวกันสัญญาณขาออกของ  $I_{C2}$  จะเปลี่ยนจาก "0" ไปเป็น "1" ในทันทีที่สัญญาณขาเข้าน้อยกว่าสัญญาณเปรียบเทียบและสัญญาณขาออกจะไป เซทและรีเซทในจังหวะที่เปลี่ยนสภาวะจาก "0" ไป "1" เป็น Positive Edge Triggering จะทำให้สัญญาณขาออกของฟลิปฟล็อปมีลักษณะสมดุลย์.

การออกแบบจะใช้คอมพาราเตอร์เบอร์ UA 710 ที่มีความเร็วประมาณ 40 ns และมีอัตราการขยายแรงดันประมาณ 1500 เท่า ซึ่งต้องการกระแสไบแอสประมาณ 25  $\mu$ A การออกแบบให้  $VR_1$  ทำหน้าที่ปรับระดับ เปรียบเทียบได้ สำหรับแรงดันที่ป้อนให้กับการควบคุมระดับ เปรียบเทียบทั้งทางบวกและลบจะผ่านวงจรรองความถี่ผ่านต่ำเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งจ่ายไฟ ฟลิปฟล็อปที่ใช้เป็นแบบ Positive Edge Triggering มีเซตและรีเซตเบอร์ 7474 สัญญาณขาออกที่ได้จะเป็นสัญญาณทรีแอส เช่นเดียวกับสัญญาณขาเข้าที่ส่งมา แต่สัญญาณที่ได้จำเป็นต้องส่งผ่านสายโคแอกเซียล 50  $\Omega$  เพื่อไปใช้ยังภาคอื่น ๆ อีก วงจรที่ใช้ส่งสัญญาณผ่านสายโคแอกเซียลได้กล่าวถึงแล้วในส่วนวงจรภาคส่งโดยใช้ IC เบอร์ 75451 เช่นเดียวกับวงจรในภาคส่ง โดยอยู่ในสภาวะลอจิก "0" ทรานซิสเตอร์จะ ON และจะมีกระแสไหลประมาณ  $I = \frac{5 - 0.25}{82} = 58 \text{ mA}$  โดยจะแยกไหลผ่านทรานซิสเตอร์ตัวละ 29 mA

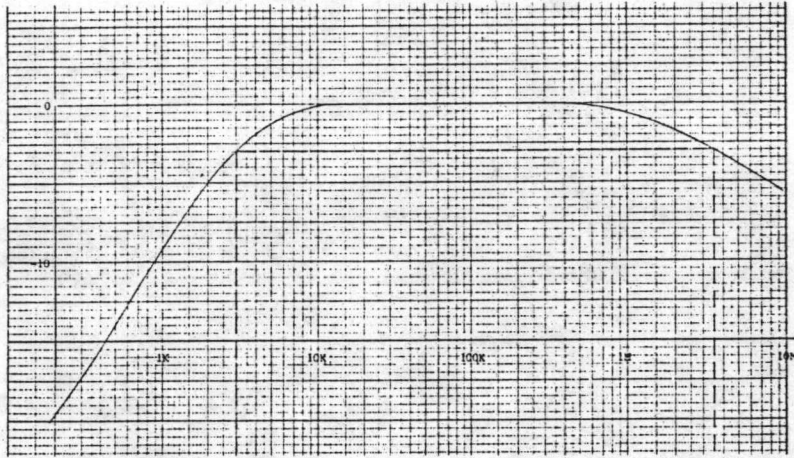
#### 4.4 ผลการทดสอบวงจร

หลังจากที่ได้ทำการประกอบวงจรทุกส่วนได้ทำการทดสอบคุณสมบัติและการทำงานของระบบ โดยพิจารณาถึงภาครับ เป็นหลัก เพราะจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและประสิทธิภาพของระบบ และจะทำการพิจารณาคงสมบัติตั้งแต่การตอบสนองความถี่ อัตราการขยาย และการรบกวนจากสัญญาณรบกวน จากการออกแบบระบบและทำการทดลองพบว่า ภาคขยายภาคต้นที่เปลี่ยนกำลังแสงเป็นกระแสไฟฟ้า เป็นภาคที่กำหนดความสามารถของระบบ เพราะอัตราการขยายที่ได้จะขึ้นอยู่กับความถี่ รูปที่ 4.8 เป็นกราฟแสดงความสามารถในการตอบสนองความถี่ของวงจขยายภาคต้น โดยแสดงเป็นอัตราเปรียบเทียบกับความถี่กลาง และพบว่าที่ความถี่ 200 kHz สามารถวัดอัตราการขยายได้ 11,228 V/W ถ้าตัวรับแสงมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าเป็น 0.6 A/W จะได้อัตราการขยายของภาคต้นนี้เท่ากับ 18,713 V/A หรือ 18,713  $\Omega$  จากผลการทดลองวัดวงจขยายภาคต้นนี้ ถ้านำมาเปรียบเทียบกับภาคขยายภาคที่สองที่ใช้ IC เบอร์ UA 733 ซึ่งให้ผลตอบสนองความถี่ที่ดีในช่วงความถี่ที่สนใจ คือไม่น้อยกว่า 5 MHz ดังรูปที่ 4.9 โดยสามารถให้อัตราการขยายแรงดันได้สูงถึง 46 dB หรือ 200 เท่า เท่ากับยืนยันว่าผลการตอบสนองความถี่ขึ้นอยู่กับภาคต้นเท่านั้น รูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงอัตราการขยายรวมของทั้ง 2 ภาค ซึ่งสามารถตอบสนองความถี่ได้ถึง 3.5 MHz และมีอัตราการขยายที่ความถี่ปานกลาง 200 kHz สูงถึง 3.9 M $\Omega$  และ 3.3 M $\Omega$  ที่ความถี่ 2 MHz ตามลำดับ

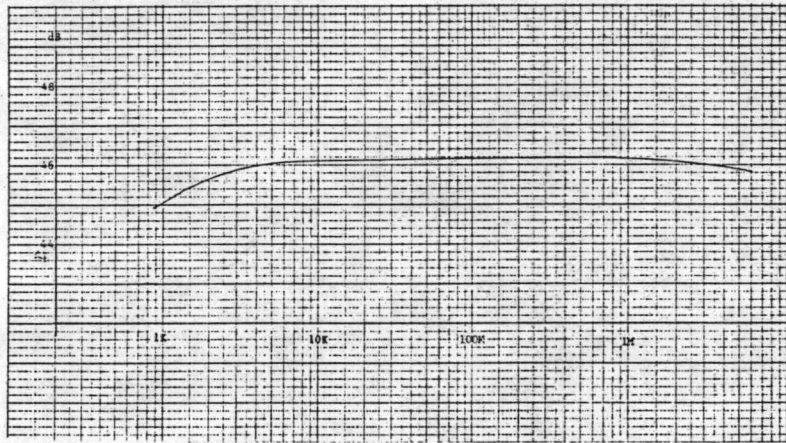
สำหรับระดับสัญญาณรบกวนนั้น จากการทดลองพบว่าระดับสัญญาณรบกวนมีค่าสูงพอสมควรคือ มีค่าประมาณถึง  $150 \text{ mV}_{p-p}$  ดังนั้น จึงได้ทำการปรับตั้งระดับสัญญาณเปรียบเทียบของคอมพาราเตอร์ไว้ที่ระดับประมาณ  $\pm 150 \text{ mV}$  ซึ่งเป็นระดับ เปรียบเทียบสูง เพียงพอที่จะป้องกัน การตีเทคผิดพลาดได้ จากการทดลองพบว่าระดับสัญญาณที่ออกจากภาคอะนาล็อกต่ำสุดที่ดี เทคโนโลยี มีค่าประมาณ  $400 \text{ mV}$  ซึ่งสามารถคำนวณออกมาเป็นกระแสที่ต้องการจากโฟโตไดโอดที่ความถี่  $2 \text{ MHz}$  จะได้เป็น  $400 \text{ mV} / 3.3 \text{ M}\Omega = 0.12 \text{ }\mu\text{A}$  ซึ่งเมื่อคิดเป็นกำลังของแสงแล้วจะได้เป็น  $0.12 / 0.6 = 0.2 \text{ }\mu\text{W}$  นั่นคือค่าความไวของอุปกรณ์ภาครับ เป็น  $0.2 \text{ }\mu\text{W}$

เมื่อทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความสามารถของระบบรับส่งทั้งชุดโดยการป้อนสัญญาณขาเข้าเป็นแบบที่ทีแอลที่ความถี่  $2 \text{ MHz}$  เป็นสัญญาณที่มีความกว้างของพัลส์  $50\%$  โดยทำการส่งจากอุปกรณ์ชุดที่หนึ่งไปยังอุปกรณ์ชุดที่สูง แล้วส่งสัญญาณนั้นย้อนกลับมายังอุปกรณ์ชุดที่หนึ่ง ซึ่งได้ผลการรับที่ให้ความกว้างของพัลส์เป็น  $50\%$  เช่นกัน แสดงว่าภาคตีเทคเตอร์สามารถทำงานได้ผล ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 ความล่าช้าของเฟสเกิดขึ้น เนื่องจากการทำงานของวงจร และการส่งผ่านของแสงระหว่างอุปกรณ์ทั้ง 2 ชุด สำหรับรูปที่ 4.12 เป็นการทดสอบในลักษณะเดียวกัน แต่เป็นการอินพุตแบบไบเฟส (Biphase) ที่ความเร็ว  $2 \text{ Mb/S}$  ซึ่งเป็นการสร้างสัญญาณเทียบเท่ากับสัญญาณที่จะใช้ส่งจริงของระบบ ซึ่งจะเห็นว่าช่วงกว้างของพัลส์ทางด้านส่งและรับใกล้เคียงกันมาก ถ้าจะพิจารณาละเอียดในรูปที่ 4.13 และ 4.14 จะแสดงสภาวะการเคลื่อนตัวของเฟสของสัญญาณ ทั้งที่ออกจากภาคอะนาล็อกและที่เป็นสัญญาณขาออกที่ทีแอลด้วย ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าการออกแบบระบบสามารถควบคุมให้มีการเคลื่อนตัวของเฟสได้น้อย ซึ่งหมายถึงจะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างดี

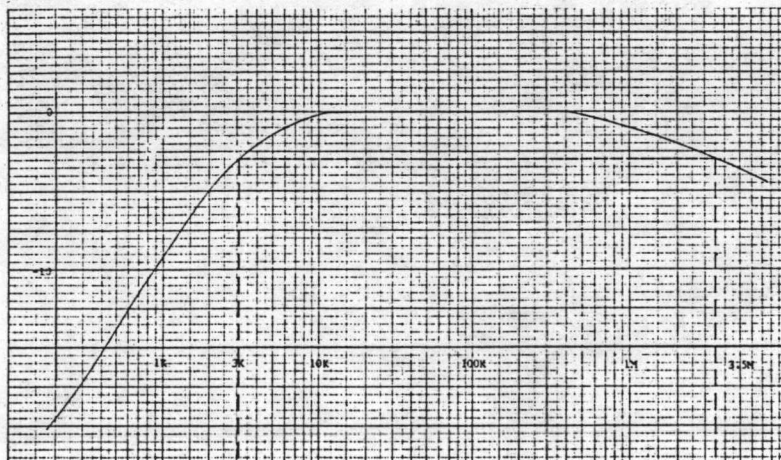
รูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นรูปของอุปกรณ์ชุดส่งและชุดรับสัญญาณข้อมูลเชิง เลขที่ใช้ระบบแสงอินฟราเรดส่งผ่านบรรยากาศที่สร้างขึ้นจริง ในแต่ละชุดจะประกอบด้วยวงจรถ่ายภาพส่ง, ระบบเลนซ์ภาพส่ง, วงจรภาครับและระบบเลนซ์ภาครับ รวมกันอยู่โดยที่เลนซ์ภาพส่งและภาครับเป็นเลนซ์ชนิดเดียวกันและติดตั้งอยู่ในสภาพที่แกนของเลนซ์ทั้งสองขนานและอยู่ในระดับเดียวกัน



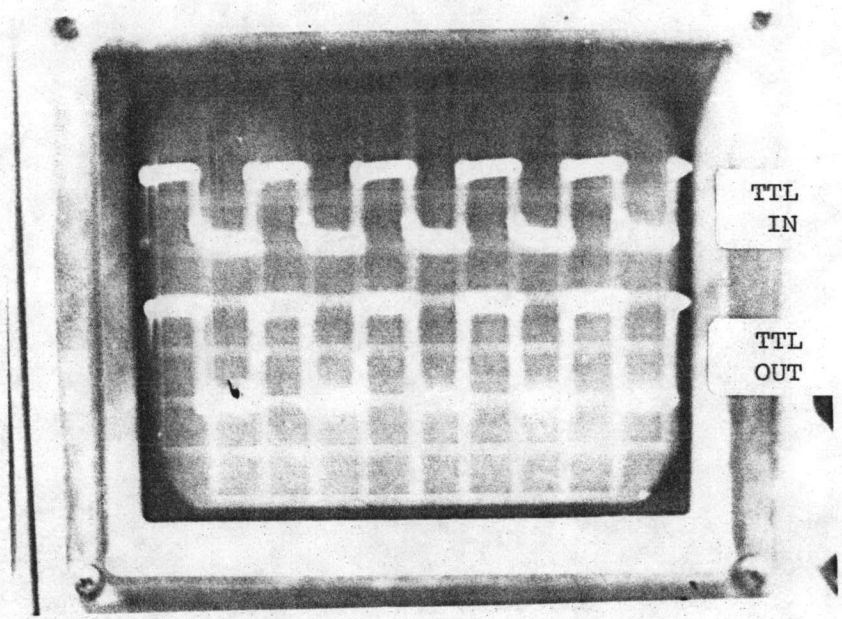
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรภาคต้น



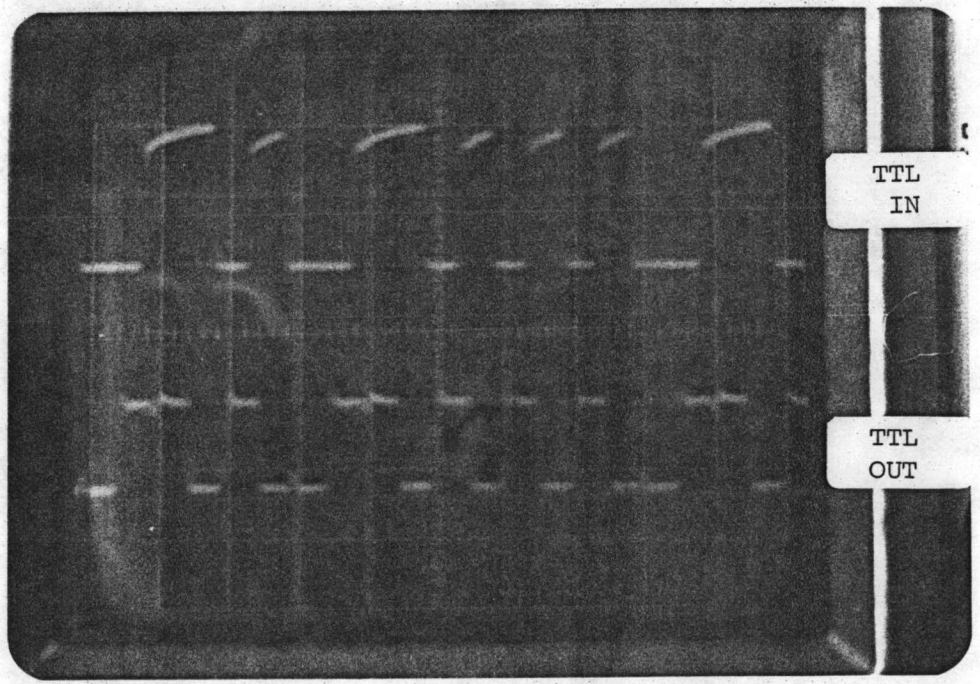
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรขยายภาคสอง



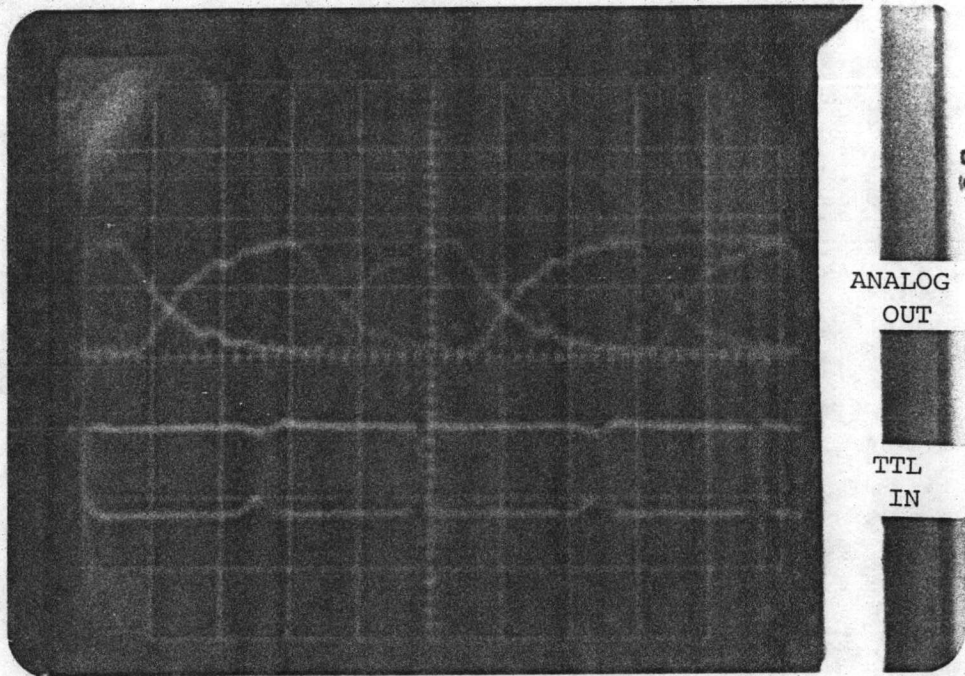
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการตอบสนองความถี่รวมของภาครีบ



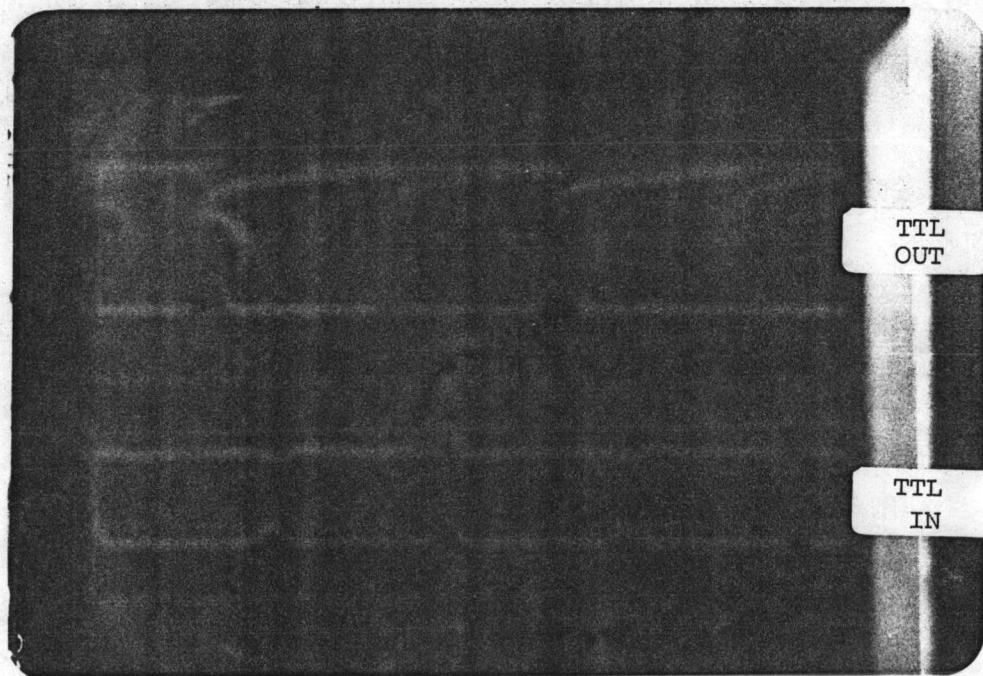
รูปที่ 4.11 ผลการรับและแปลงสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 2 MHz



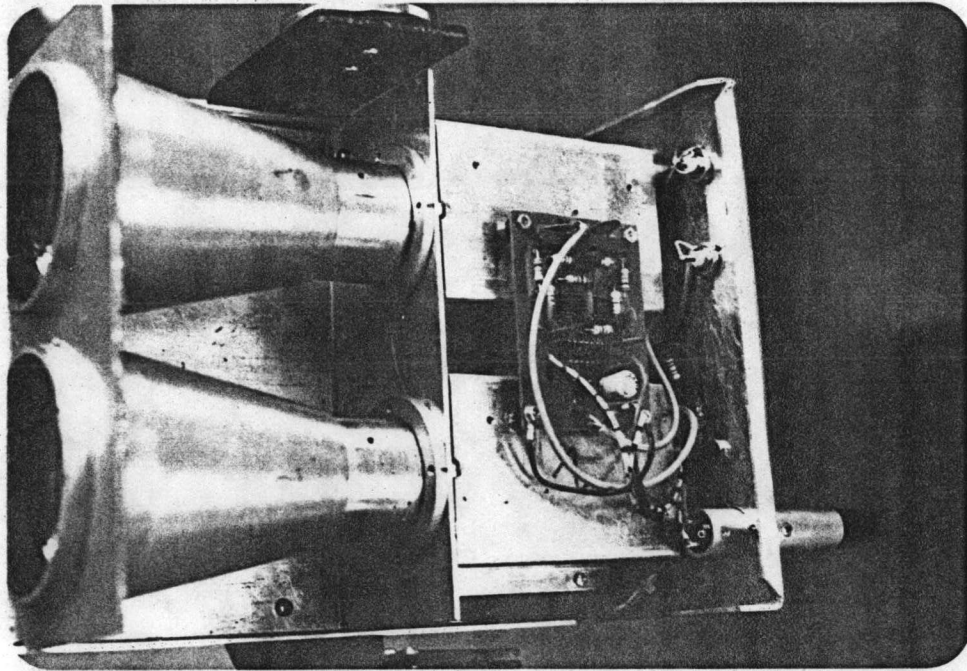
รูปที่ 4.12 ผลการรับและแปลงสัญญาณข้อมูลแบบ ไบ เฟส



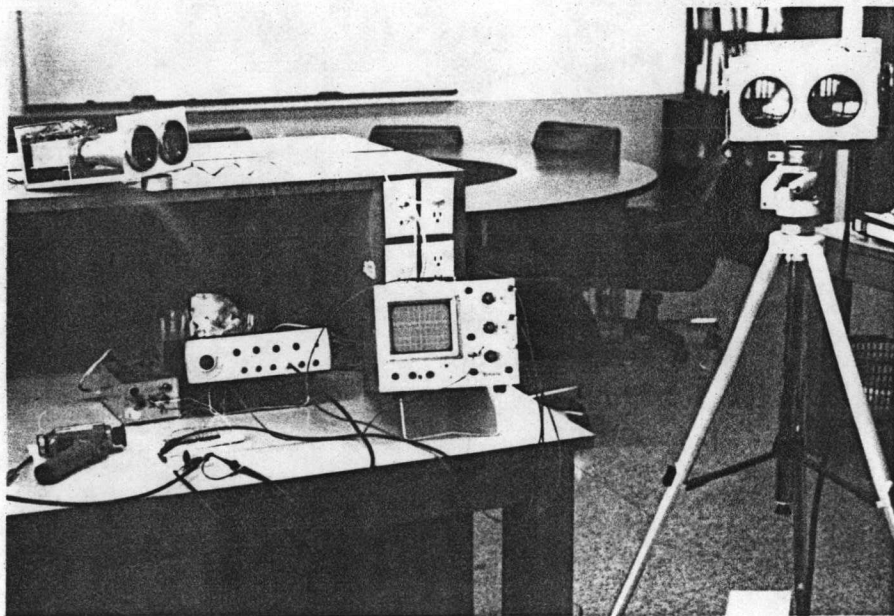
รูปที่ 4.13 รูปแสดงการเคลื่อนตัวของเฟสที่ภาคอะนาลอก



รูปที่ 4.14 รูปแสดงการเคลื่อนตัวของเฟสของสัญญาณที่ทีแอลที่ทางออก



รูปที่ 4.15 รูปชุดรับ - ส่งสัญญาณข้อมูล เวิง เลขที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.16 รูปชุดรับ - ส่งสัญญาณข้อมูลที่สร้างขึ้น



#### 4.5 การทดลองเพื่อหาข้อมูลการกระจายแสงและเพื่อคำนวณหาระยะทางที่สามารถส่งได้จากชุดใช้งาน

เนื่องจากผลการคำนวณทางทฤษฎีซึ่งสมมติให้แหล่งกำเนิดแสงเป็นแบบจุดและมีความยาวคลื่นเดียว กับผลการวัดที่แสดงไว้ในบทที่ 2 มีค่าต่างกันมาก จึงจำเป็นต้องทดลองกับชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริง เพื่อจะได้ทราบลักษณะการกระจายแสงของชุดอุปกรณ์ที่มีแหล่งกำเนิดแสงแบบ LED และหาวิธีการคำนวณที่ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด ถ้าพิจารณาสมการการคำนวณจากบทที่ 2 คือสมการที่ 2.5 จะพบว่า ความสามารถในการส่งหรือรับแสงที่ระยะทางต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1. ความสามารถของอุปกรณ์ เช่น ความสามารถในการส่งผ่านกำลังแสงของเลนส์ ( $\tau_L$ ) ความสามารถในการถ่ายทอดพลังแสงของระบบเลนส์ ( $\eta$ ) ซึ่งเป็นค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.1
2. ความสามารถของตัวกลาง ในที่นี้ก็คือ ความสามารถในการส่งผ่านกำลังแสงของบรรยากาศ ( $\tau_a$ )
3. ความสามารถของระบบเลนส์ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ รูปแบบของการกระจายแสงของระบบภาคส่ง ถ้าหากระบบเลนส์ให้รูปแบบการกระจายแสงแผ่กระจายกว้าง ทำให้กำลังแสงที่ควรรับได้น้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าระบบเลนส์ สามารถรวมแสงได้ดี ก่อให้เกิดลำแสงที่มีมุมลู่ออกน้อยจะทำให้สามารถส่งได้ระยะทางไกลขึ้น

จากองค์ประกอบทั้ง 3 นี้ พบว่าความสามารถของระบบที่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ 2 และที่ 3 เป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมาก เพราะถ้าหากมีการสูญเสียในบรรยากาศต่อลำแสงย่อมเดินทางได้ไกล และถ้ามุมลู่ออกของลำแสงน้อยทำให้เกิดการสูญเสียน้อย เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงได้ทดลองหาสัมประสิทธิ์ของการลดทอนในบรรยากาศและรูปแบบการกระจายของระบบ เพื่อหาข้อสรุปที่ดีที่สุด

ได้มีการทดลองในต่างประเทศ [18] เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนในบรรยากาศที่มีสภาพอากาศต่าง ๆ กัน โดยใช้ต้นกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 9020 Å ซึ่งใกล้เคียงกับความยาวคลื่นที่ใช้คือ 8650 Å ผลดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

Attenuation Co-efficient for various  
Meteorological conditions at 9020 Å

Meteorological description	Attenuation Co-efficient, $\alpha_a$ ( $\text{km}^{-1}$ )
Moderate fog	8
Light fog	4
Thin fog	2
Haze	1
Light haze	0.4
Clear	0.2
Very clear	0.08
Exceptionally clear (pure air)	0.014

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนของแสงในบรรยากาศที่สภาพอากาศต่าง ๆ กัน

จากตารางนี้ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนที่มีค่ามากที่สุดไม่ควรจะมีค่าเกิน  $8 \text{ km}^{-1}$  ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอน เพื่อใช้งานสำหรับต้นกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นขนาด  $865 \text{ nm}$ . โดยทำการวัดกำลังแสงที่รับได้ที่ระยะทางต่าง ๆ จากระยะ  $50$  เมตร จนถึง  $200$  เมตร โดยใช้ชุดรับแสงชุดเดียวกันตลอด จากสมการที่ 2.5 ถ้าหากทำการทดลองวัดกำลังแสงที่ระยะทางต่าง ๆ ในเชิงเปรียบเทียบโดยให้  $R_2$  และ  $R_1$  คือระยะทางที่ทำการวัดโดยที่  $R_2 > R_1$  จะได้สูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนของระยะทาง  $R_2 - R_1$  เป็นดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{P_1} &= \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \times \frac{\tau_{a_2}}{\tau_{a_1}} \\ &= \frac{R_1^2}{R_2^2} \times e^{-(\alpha_a + \alpha_s)(R_2 - R_1)} \end{aligned} \quad (4.1)$$

จากการทดลองวัดกำลังแสงที่ระยะทางต่าง ๆ โดยใช้เลนส์รับขนาด 7 ซม. และทำการทดลองวัดโดยใช้ต้นกำเนิดแสง 2 ชุด เพื่อเปรียบเทียบและนำผลการวัดมาคำนวณด้วยสมการที่ 4.1 ได้ผลดังตารางที่ 4.2 ดังนี้

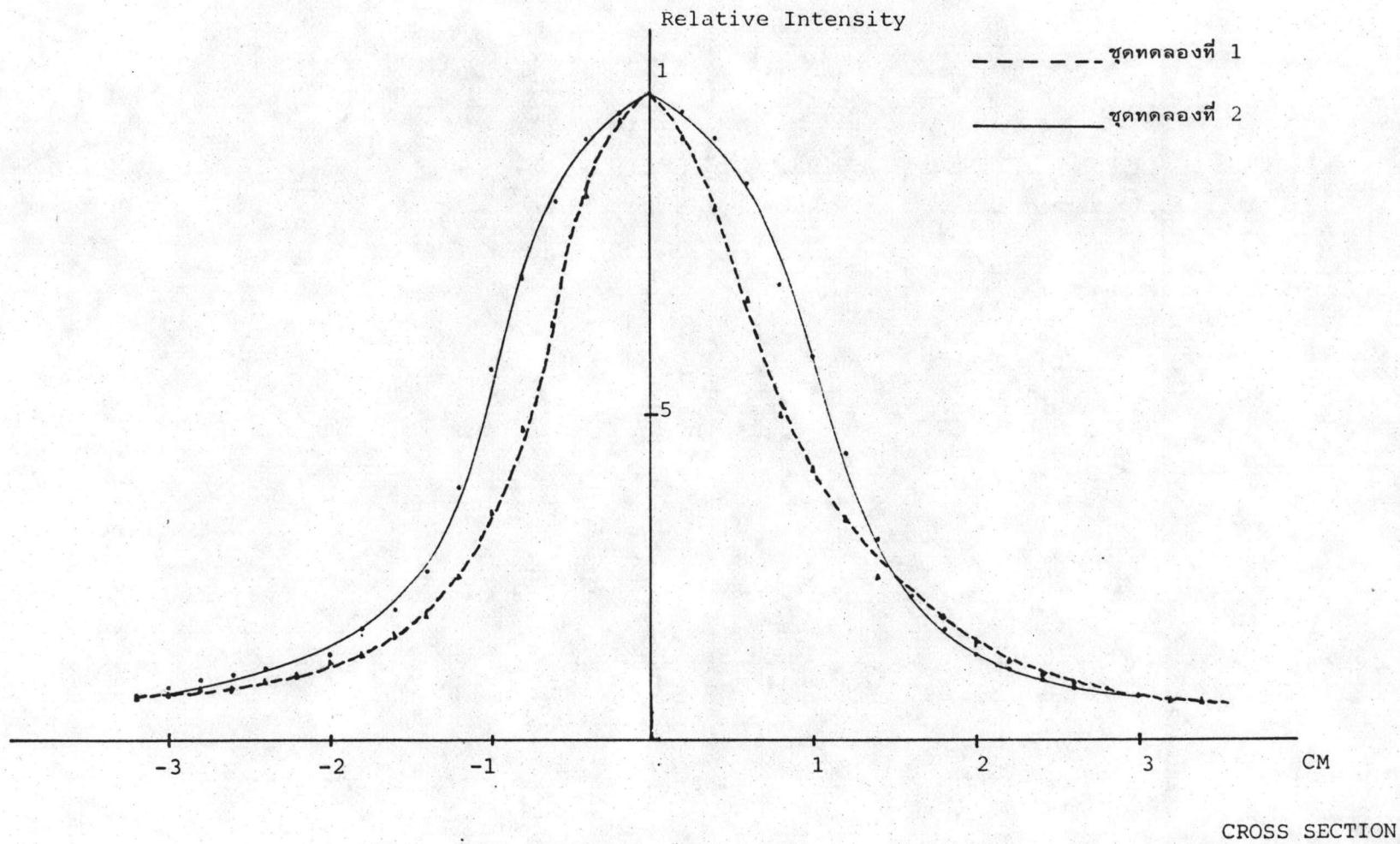
กำลังแสงที่รับได้ ระยะทาง (เมตร)	ชุดที่ 1 ( $\mu\text{W}$ )	ชุดที่ 2 ( $\mu\text{W}$ )
หน้าเลนส์ภาคส่ง	810	1600
50	94.5	223.5
100	21.8	52.0
150	8.9	21.5
200	4.6	11.3
$(\alpha_a + \alpha_s) (\text{km}^{-1})$ (average)	1.54	1.45

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดกำลังแสงที่ระยะทางต่าง ๆ

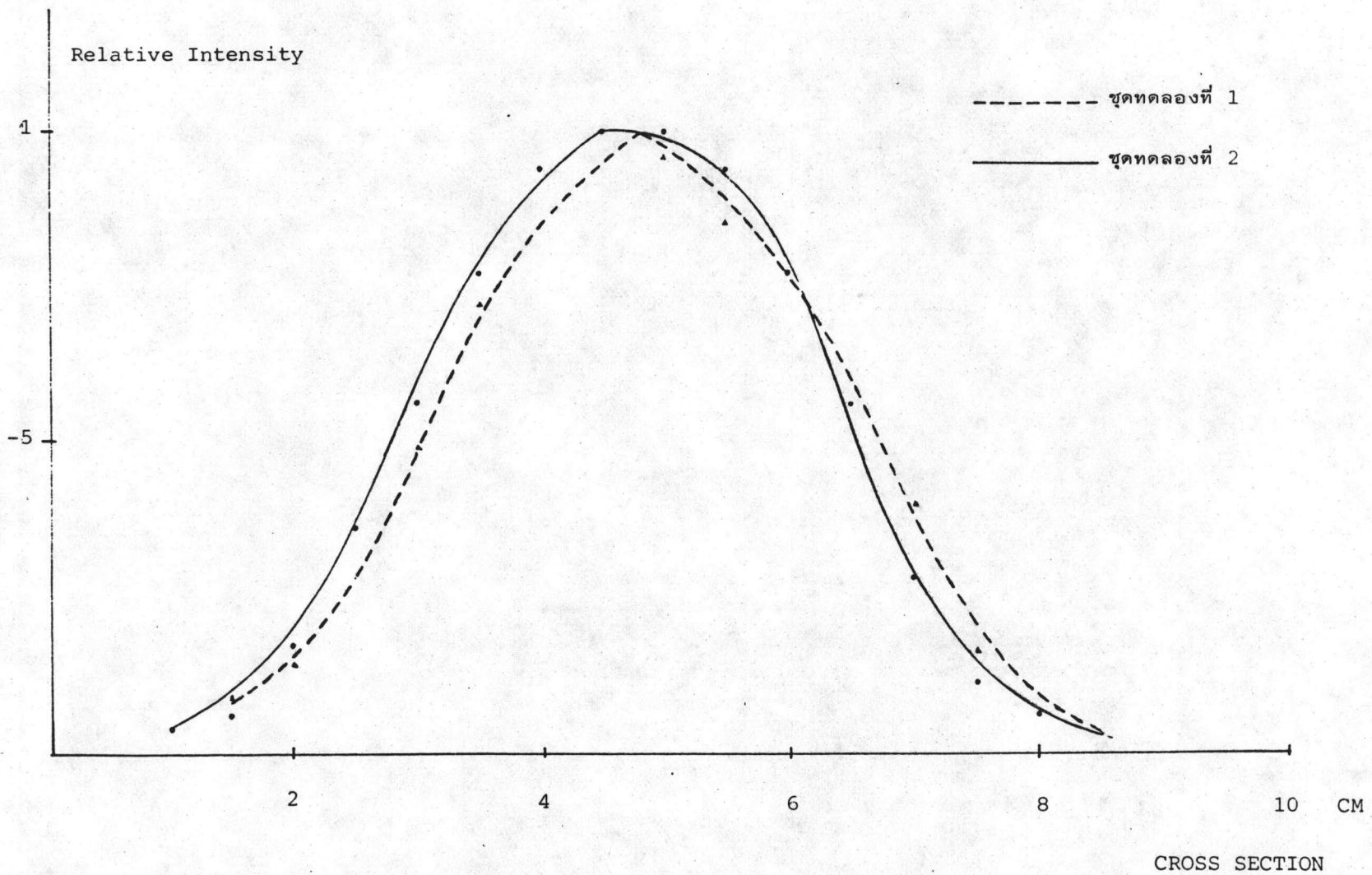
จากตารางที่ 4.2 พบว่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนของชุดส่งทั้ง 2 ชุด มีค่า  $1.54 \text{ km}^{-1}$  และ  $1.45 \text{ km}^{-1}$  ตามลำดับ นับเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าในสภาวะอากาศแบบเดียวกัน ถ้าหากนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.1 พบว่า สภาพอากาศที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนเช่นนี้ จะมีสภาพอากาศที่อยู่ระหว่าง บรรยากาศที่มีควันจาง ๆ (Haze) กับสภาพอากาศที่มีหมอกบาง ๆ (Thin fog) หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ สภาพอากาศที่มีไอน้ำอยู่ในบรรยากาศมาก แต่ไม่หนาแน่นพอที่จะจับตัวเป็นหมอกบาง ๆ ซึ่งเป็นสภาพอากาศที่ใกล้เคียงกับสภาพอากาศของประเทศไทยที่มีสภาพอากาศร้อนชื้น ดังนั้น จะได้ใช้ค่า  $\alpha_a + \alpha_s$  ดังที่ปรากฏในตารางที่ 4.2 เพื่อคำนวณในการทดลองลำดับต่อ ๆ ไป

หลังจากที่ทำการทดลองเพื่อหาองค์ประกอบที่ 2 ได้แล้วขั้นต่อไปได้ดำเนินการทดลองเพื่อหารูปแบบการกระจายแสงของระบบส่ง เพื่อใช้ในการคำนวณโดยเริ่มต้นการทดลองวัดรูปแบบการกระจายแสงของชุดใช้งานทั้ง 2 ชุด จากระยะทาง 5 ซม., 15 เมตร, 50 เมตร และ 150 เมตร จากหน้าเลนส์ ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.17, 4.18, 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ

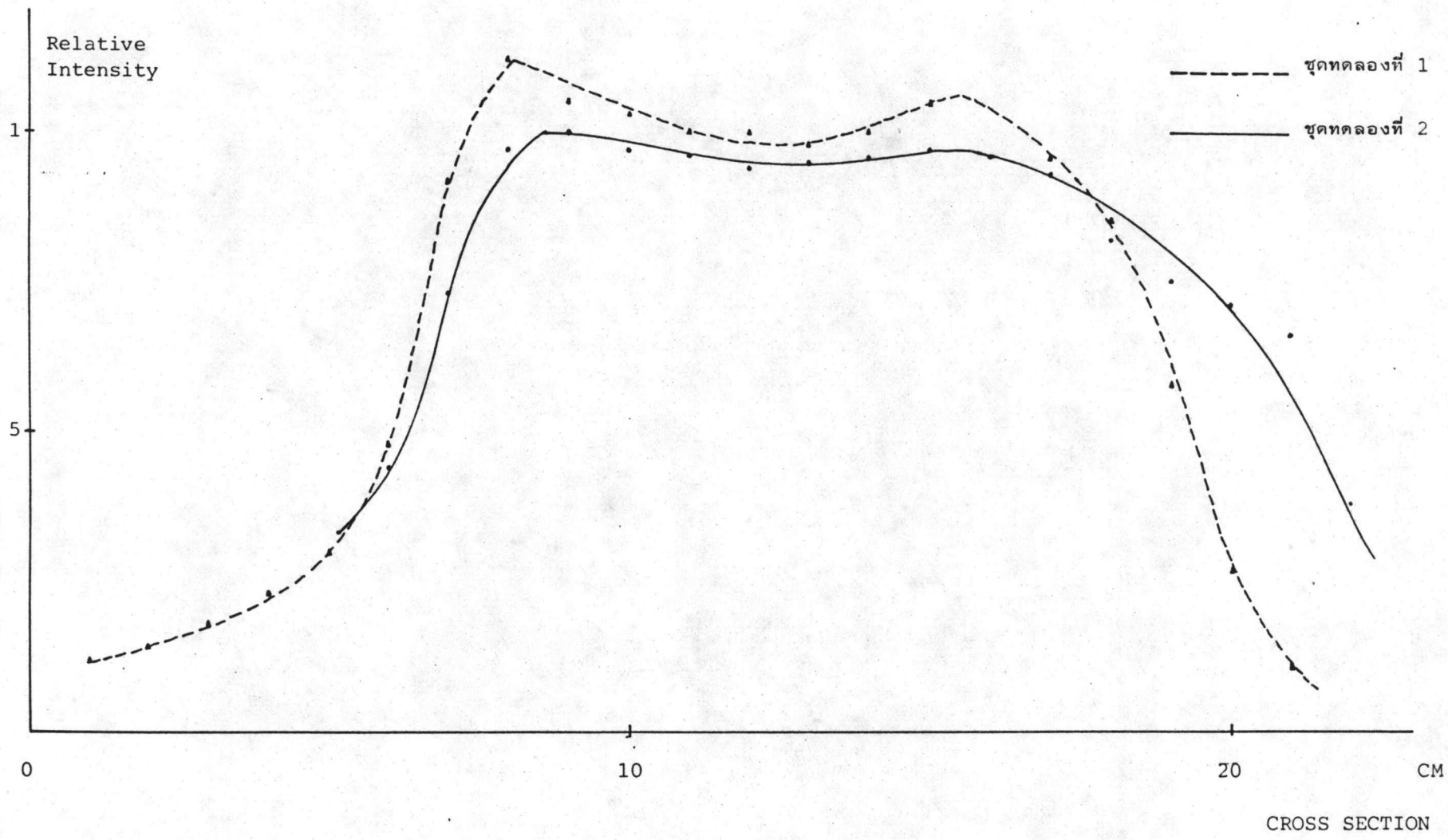




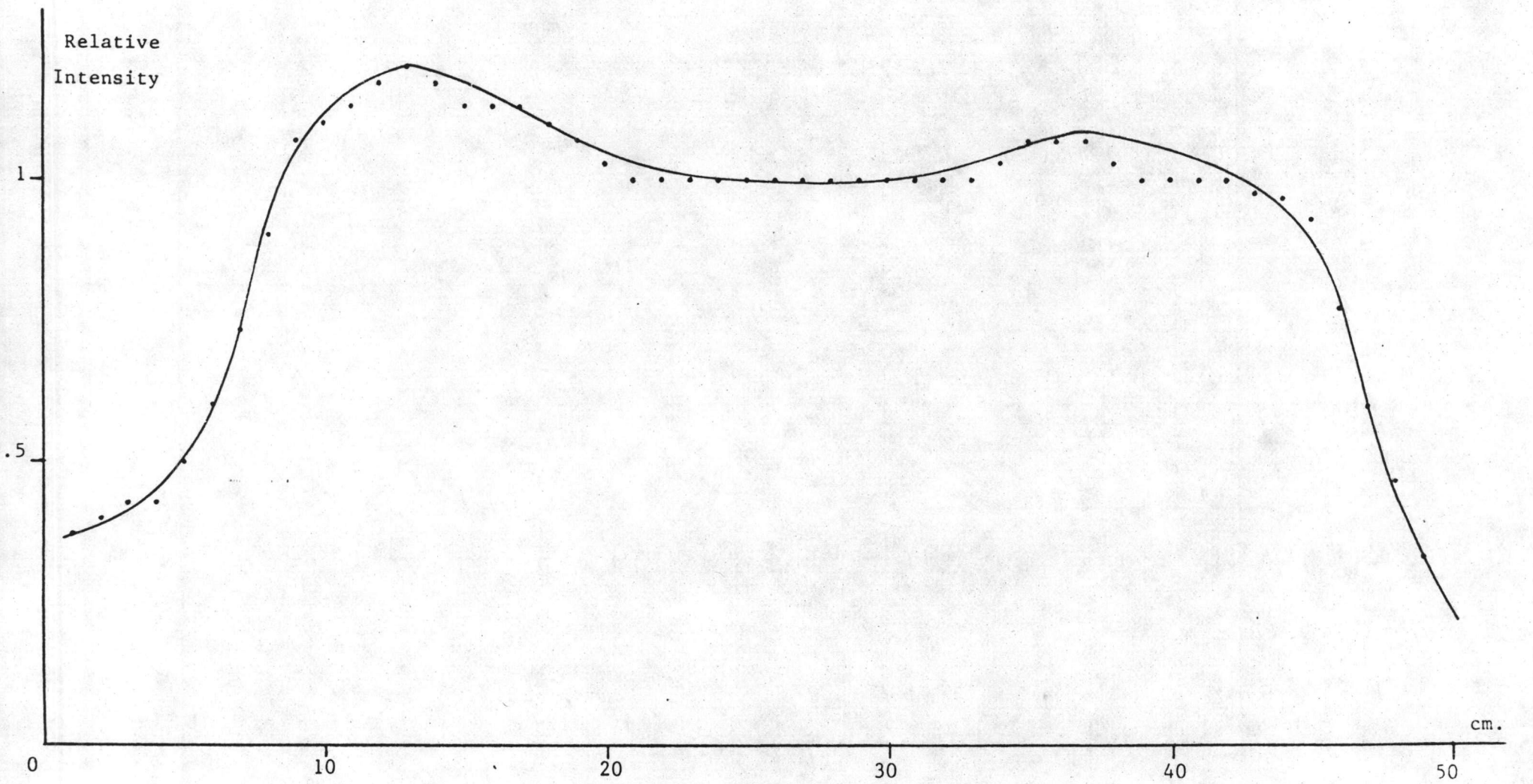
รูปที่ 4.17 การกระจายแสงของ LED หน้าเลนซ์



รูปที่ 4.18 การกระจายแสงของ LED ที่ระยะทาง 15 เมตร



รูปที่ 4.19 การกระจายแสงของ LED ที่ระยะทาง 50 เมตร



รูปที่ 4.20 ภาพแสดงการกระจายคลื่นที่ระยะทาง 150 เมตร

Cross Section.



จากรูปดังกล่าวพบว่า การกระจายของความเข้มแสงบนหน้าเลนซ์ไม่เท่ากัน ตาม ทฤษฎีของการกระจายแสงบทที่ 2 ขณะที่ระยะทางเพิ่มขึ้นการกระจายของความเข้มแสงเริ่มแผ่ กระจายออกจากที่หน้าเลนซ์ และที่ระยะ 15 เมตร ที่มีรูปร่างคล้าย ๆ รัศมีมียอดความเข้มเพียง จุดเดียว แต่เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นไกลพอจะปรากฏสภาพความเข้มของแสงมีการกระจายค่อนข้าง สม่าเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด และเกิดจุดที่มีความเข้มมากกว่าหนึ่งจุด ซึ่งไม่ตรงกับทฤษฎีการกระจายแสง ในบทที่ 2 เพราะที่ระยะทางไกล ๆ การกระจายแสงของต้นกำเนิดแสงแบบจุดและที่ความถี่เดียว จะให้การกระจายแสงในรูปของ เบสเซลฟังก์ชัน สำหรับสาเหตุนี้ เกิดจากการที่เฟสของแสง บนหน้าเลนซ์ไม่สม่าเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีสเปกตรัมวิดท์กว้าง และ พื้นที่การเปล่งแสงมีขนาดใหญ่ไม่เป็นจุด ประกอบกับขนาดของกำลังแสงบนหน้าเลนซ์ก็ไม่สม่าเสมอ ด้วยจึง เป็นเหตุที่ทำให้รูปแบบการกระจายความเข้มของแสงที่บริเวณทางไกลบ้านออก ดังผลที่ได้ จากการทดลองข้างต้น

เมื่อ เปรียบเทียบการทดลองข้างต้นกับแนวความคิดในการคำนวณในบทที่ 2 จะ เห็นว่า มีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งถ้านำมาใช้เป็นพื้นฐานในการคำนวณ จะให้ผลที่แตกต่างกันได้ และจากการ ศึกษา [2], [9], [21] พบว่า ถ้าใช้หลักการทางด้านการวัดพลังงานของรังสี (Radiometry) หรือการวัดกำลังส่องสว่าง (Photometry) พบว่า ถ้าคิดว่ากำลังของแสงทั้งหมดถูกส่งออกไป ในกรวยกลมที่มีมุมยอดเท่ากับค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ลำแสงที่ส่งออกจะมีความเข้มของแสงเท่า ๆ กัน ตลอดพื้นที่หน้าตัด โดยสามารถวัดหรือคำนวณรูปกรวยกลมดังกล่าวในรูปของมุมโซลิด (Solid angle) เมื่อทราบค่าความเข้มของลำแสงที่ส่งออก และต้องการคำนวณกำลังแสงที่เข้าสู่เลนซ์ทางภาครับ ที่ระยะห่างอันหนึ่ง ก็จะทำให้ได้โดยการคำนวณมุมโซลิดของเลนซ์ภาครับ เมื่อมองจากแหล่งกำเนิดแสง และเมื่อคิดว่ามีการลดทอนของลำแสงในบรรยากาศด้วย ก็สามารถใช้สูตรที่ 4.2 เพื่อคำนวณหา กำลังแสงได้ คือ

$$P_R = \frac{S_R}{S} \times e^{-(\alpha_a + \alpha_s)R} \times \tau_R \times \eta \times P_t \quad (4.2)$$

$S$  = มุมโซลิดของกรวยลำแสงทั้งหมด

$S_R$  = มุมโซลิดของเลนซ์ภาครับ

$\tau_R$  = ค่าความสามารถในการส่งผ่านลำแสงของเลนซ์ภาครับ

$e^{-(\alpha_a + \alpha_s)R}$  =  $\tau_a$  ค่าลดทอนของลำแสง เมื่อผ่านบรรยากาศ

หลังจากที่ทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนของลำแสงได้ และเพื่อต้องการ คำนวณหาค่ามุมไซลิคของกรวยลำแสงที่เหมาะสมสำหรับชุดส่ง ส่งและรับแสงทั้งสองชุด จึงได้นำค่า จากการทดลองตามตารางที่ 4.2 แทนค่าลงในสมการที่ 4.2 ดังตัวอย่างการคำนวณที่ระยะทาง 100 เมตร ดังนี้ คือ

$$S_R = \pi(\theta_R)^2 = \frac{\pi(7 \times 10^{-2})^2}{100}$$

$$= 1.539 \times 10^{-6} \text{ Sr}$$

$$\tau_r \times \eta \times P_t = 810 \text{ } \mu\text{W} \quad : \text{ สำหรับชุดที่ 1}$$

$$= 1600 \text{ } \mu\text{W} \quad : \text{ สำหรับชุดที่ 2}$$

$$P_R = 21.8 \text{ } \mu\text{W} \quad : \text{ สำหรับชุดที่ 1}$$

$$= 52.1 \text{ } \mu\text{W} \quad : \text{ สำหรับชุดที่ 2}$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (4.2) จะได้

$$S = \frac{S_R \times \tau_a \times \tau_r \times \eta \times P_t}{P_R}$$

∴ จะได้

$$S = 11.95 \times 10^{-6} \text{ Sr} \quad : \text{ สำหรับชุดที่ 1}$$

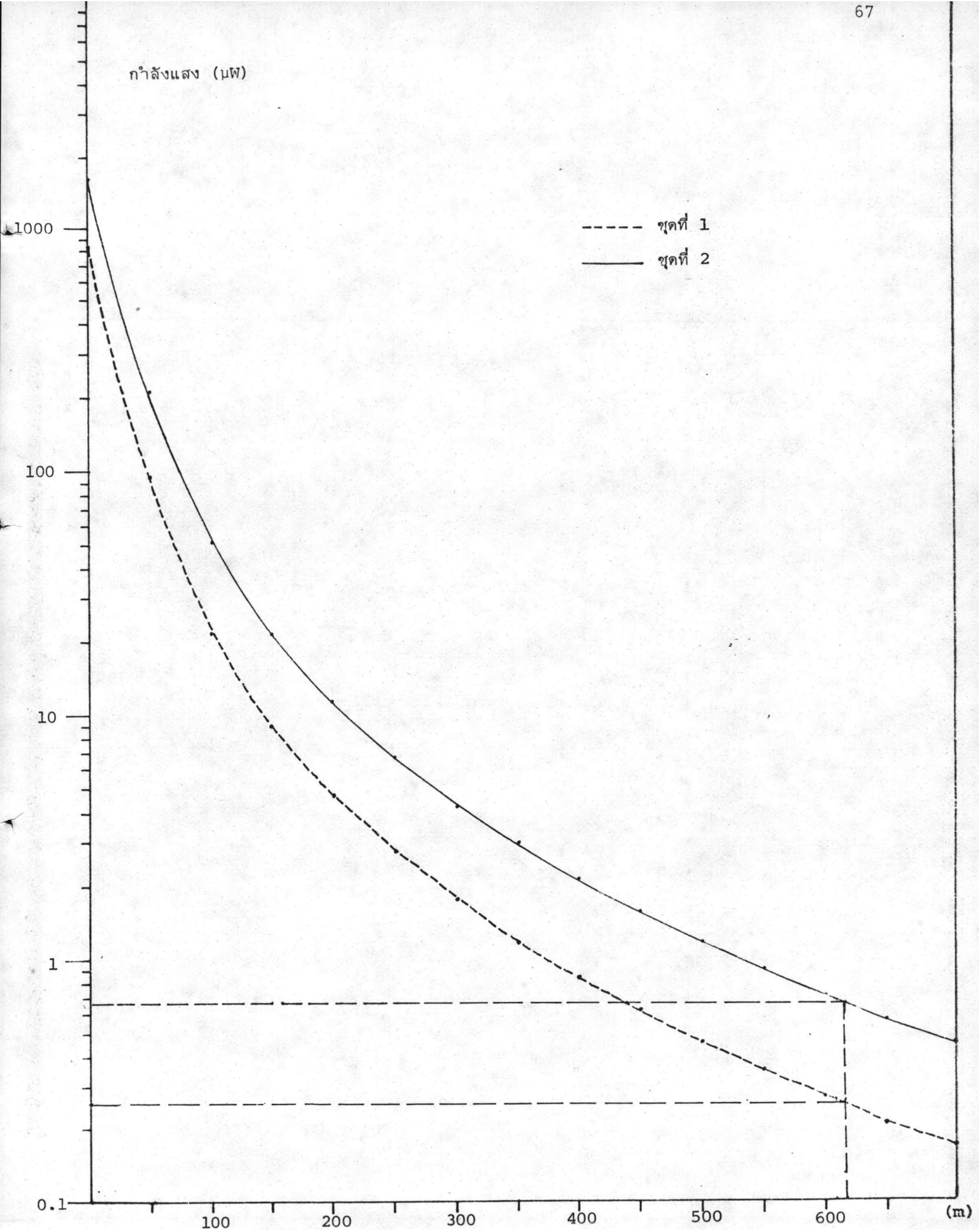
$$10.18 \times 10^{-6} \text{ Sr} \quad : \text{ สำหรับชุดที่ 2}$$

เมื่อคิดเป็นมุมลู่ออกจะได้เป็น  $3.9 \times 10^{-3}$  เรเดียน และ  $3.6 \times 10^{-3}$  เรเดียน

สำหรับชุดที่หนึ่งและชุดที่สอง ตามลำดับ

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหลายนี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังแสง ที่รับได้ที่ระยะทางต่าง ๆ ได้ ซึ่งผลการคำนวณได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.21 โดยที่ค่าจากการคำนวณที่ ระยะห่าง 50 เมตรถึง 200 เมตร จะมีค่าเกือบเท่ากับกับค่าที่จากการวัดและระยะมากกว่า 200 เมตร เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 4.1 ตามจุดประสงค์เดิมที่ต้องการติดตั้งที่ระยะทางประมาณ 620 เมตร จากรูปที่ 4.21 จะสามารถคำนวณกำลังแสงได้เป็น  $0.25 \text{ } \mu\text{W}$  และ  $0.65 \text{ } \mu\text{W}$  จาก ชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 ตามลำดับ ค่าทั้งสองนี้ต่างสูงกว่าค่าความไวของชุดรับแสงซึ่งเท่ากับ  $0.2 \text{ } \mu\text{W}$  แต่ชุดที่ 1 นั้นเนื่องจากใกล้เคียงกับค่าความไวของชุดรับแสงมากเวลาใช้จริงจะมีปัญหา สำหรับชุดที่ 2 นั้นมีค่าเพื่อ (Margin) อยู่ประมาณ 5.12 dB ซึ่งก็เป็นค่าเพื่อที่ไม่สูงมากนัก เวลาใช้งานจริง

กำลังแสง (μW)



รูปที่ 4.21 กำลังแสงที่รับได้ที่ระยะทางต่าง ๆ โดยใช้เลนส์ขนาด 7 ซม.

จะสามารถส่งได้ดีในสภาพอากาศปกติ แต่อาจมีปัญหาลมเวลาสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงมาก ๆ เช่น ฝนตก หรือมีหมอก ในบรรยากาศมาก การที่ค่ากำลังแสงที่รับได้มีค่าต่ำนั้น เป็นเพราะว่ากำลังแสงจาก LED มีค่าต่ำดังที่ได้กล่าวไว้ในต้นบทนี้ กรณีของชุดที่ 1 นั้นกำลังแสงจาก LED ได้เพียง 1.5 mW และกรณีของชุดที่ 2 ได้ประมาณ 3 mW ซึ่งต่ำกว่าที่คาดไว้มาก ถ้ากำลังแสงจาก LED เป็น 10 mW ดังที่กำหนดไว้ตอนต้น จะได้ค่ามาร์จิ้นสำหรับชุดที่ 1 เป็น 9.21 dB และชุดที่ 2 เป็น 10.35 dB ซึ่งจะทำให้การรับส่งระหว่างจุดที่ห่างกัน 620 เมตร มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

อนึ่งค่าเพื่อ ที่เหมาะสมสำหรับกรณีของประเทศไทยที่อยู่ในโซนร้อนยังไม่มีข้อมูล การทดลองอยู่จึงไม่ทราบแน่ชัดว่า เป็นค่าใด แต่จากการศึกษาข้อมูลจากประเทศอื่น ๆ พอจะสรุปได้ว่าค่ามาร์จิ้นที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 10-20 dB/km [8]

#### 4.6 ผลการทดลองจากการติดตั้งที่ระยะทาง 200 เมตร

จากหัวข้อ 4.5 ได้ทำการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติในด้านการกระจายแสงของระบบ และ เพื่อ เป็นการยืนยันถึงคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้ทำการติดตั้งชุดรับ-ส่งข้อมูลไว้ที่ระยะห่างกันประมาณ 200 เมตร เพื่อทดลองคุณสมบัติการกระจายแสงของระบบและเพื่อทดสอบวงจรที่ใช้รับ-ส่งในสภาพการส่งปกติ ประกอบกับ เพื่อประมวลผลข้อมูลและปัญหาในการจัดทำระบบสื่อสารทางแสงผ่านบรรยากาศ

##### 4.6.1 การติดตั้ง

การที่กล่าวถึงการติดตั้งก่อนก็เพื่อจะชี้ให้เห็นถึงสภาพของระบบได้ทั้งหมด เพราะ การทดลองขั้นนี้จะ เริ่มต้นจากการติดตั้ง เพราะต้องสามารถทำการติดตั้งได้ดีจึงจะได้ข้อมูลอื่น ๆ จากการทดลองทำการติดตั้งจริงพบว่า การติดตั้งระบบที่ติดตั้งนั้นจะต้องประกอบไปด้วยปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1. การปรับระบบเลนส์ชุดรับ-ส่ง (Alignment) เนื่องจากปัญหาของการปรับแต่ง เช่น การปรับโฟกัสของชุดรับ-ส่ง มีผลต่อการติดตั้งอย่างมากเพราะตัวรับแสงจะต้องอยู่ตำแหน่งของจุดโฟกัสของระบบเลนส์จริง ๆ จากการปฏิบัติงานพบว่า การที่ไม่สามารถติดตั้งได้เนื่องมาจาก ในตอนต้นได้ทำการปรับตัวรับแสงไว้ไม่อยู่ในสภาพที่ดี เมื่อทำการรับแสงที่ส่งมาซึ่งเสมือนกับเป็นลำแสงขนาด ลำแสงทั้งหมดจะถูกให้ไปตกที่จุดโฟกัสของเลนส์ภาครับ ถ้าหากปรับแต่งมีข้อผิดพลาดไม่ได้ปรับให้จุดโฟกัสตรงกับพื้นที่รับแสงของตัวรับแสงก็จะไม่สามารถรับสัญญาณได้ ประเด็นต่อไปก็คือ แกนของระบบเลนส์ภาคส่ง-รับจะต้องขนานกันอย่างดี เพราะขณะที่หมุนหรือยกชุดรับ-ส่ง เพื่อปรับทิศทาง

ความสามารถในการรับ-ส่งจะต้องเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกัน

## 2. ระบบการปรับชุดรับ-ส่งทางด้านกล (Mechanical Adjustment)

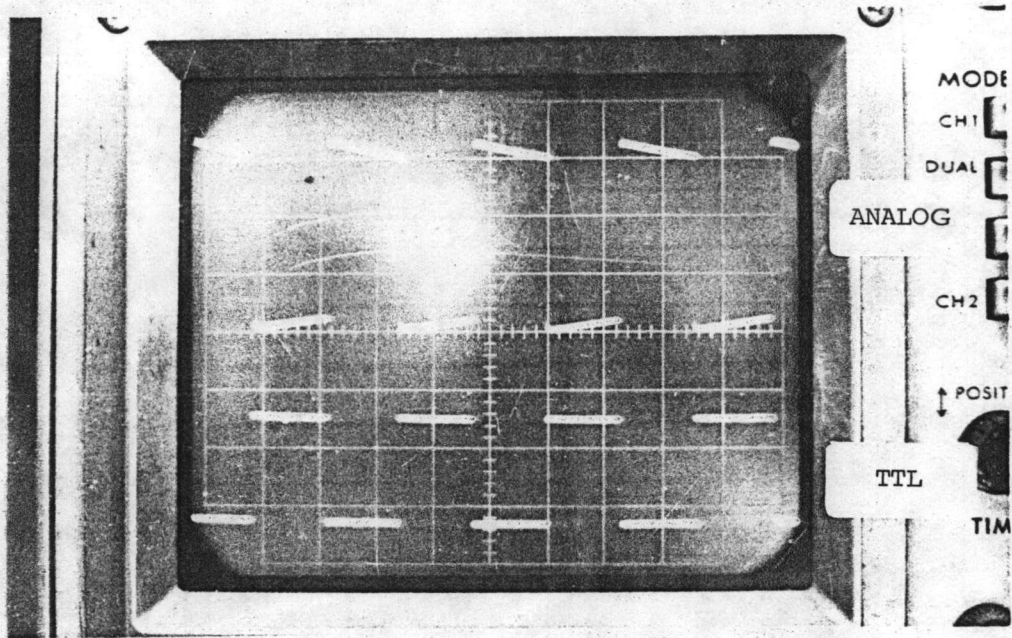
กล่าวคือความละเอียดในการปรับชุดทางด้านแนวนอน (Horizontal) และแนวตั้ง (Vertical) จะต้องมีความละเอียดและเที่ยงตรงอย่างมากเพราะเมื่อระยะทางไกล การเคลื่อนตัวเพียงเศษส่วนขององศาจะทำให้ลำแสงเคลื่อนที่เป็นระยะทางมากทำให้การปรับแต่งไม่เที่ยงตรงพอ และความมั่นคงของระบบ เช่น การปรับไปแล้วจะต้องควบคุมให้ระบบหยุดคงที่ไม่สั่นจะทำให้สามารถติดตั้งได้ดี

3. ระบบการช่วยติดตั้ง เช่น การใช้กล้องส่องทางไกลช่วย วิธีนี้จะช่วยให้การติดตั้งที่ระยะทางไกล ๆ มีความเป็นไปได้เพราะที่ระยะทางไกล ๆ ผู้ทำการติดตั้งไม่สามารถจะมองเห็นเป้าหมายได้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วยเล็ง

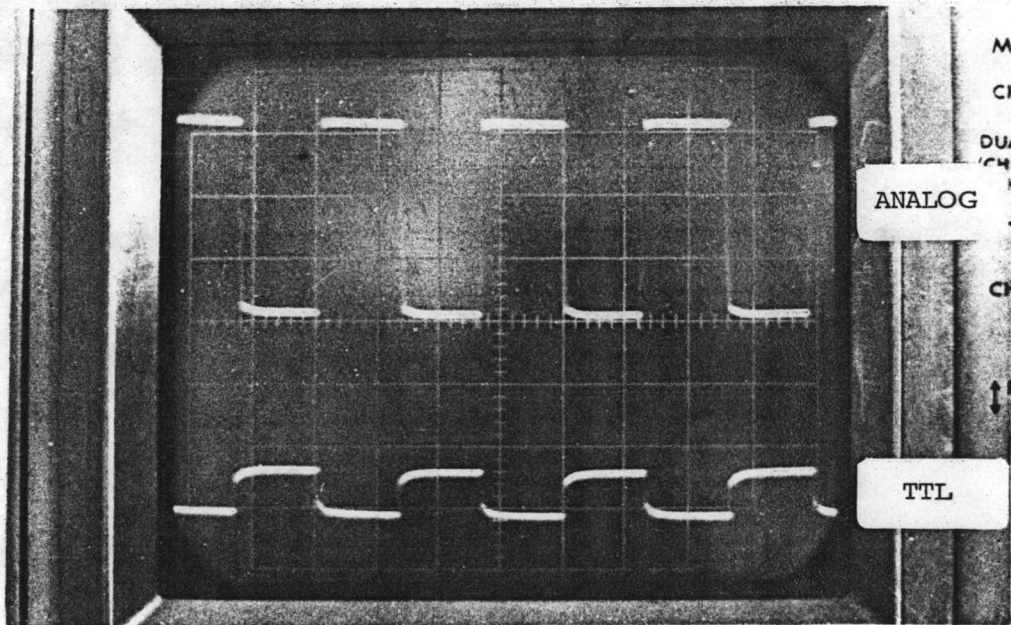
สำหรับชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนั้น ข้อที่ 1 ทำได้ดี ข้อที่ 2 ทำได้พอใช้ได้ และข้อ 3 ไม่ได้เตรียมไว้ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงตามสมควรเพื่อให้สามารถติดตั้งระหว่างจุดที่อยู่ไกล ๆ ได้

### 4.6.2 ผลการทดลองรับ-ส่งสัญญาณ

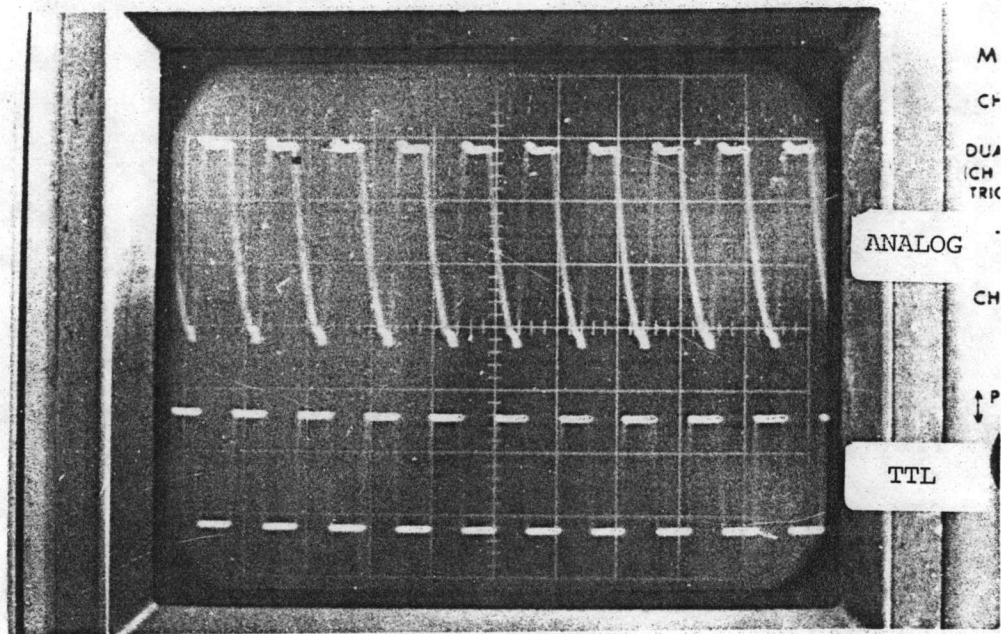
จากรูปที่ 4.21 พบว่าที่ระยะทางประมาณ 200 เมตร ภาครับจะรับกำลังแสงได้ประมาณ  $10 \mu\text{W}$  สำหรับชุดที่ 2 และ  $5 \mu\text{W}$  สำหรับชุดที่ 1 และเพื่อให้ผลการรับ-ส่งสมบูรณ์จึงได้ทำการเพิ่มกำลังส่งของชุดที่ 1 และวัดกำลังส่งที่หน้าเลนซ์เป็น  $1.2 \text{ mW}$  เพิ่มจากเดิมคือ  $.81 \text{ mW}$  ซึ่งประมาณว่าควรจะได้รับกำลังแสงที่ 200 เมตรได้  $9 \mu\text{W}$  ถ้าคำนวณจากอัตราการขยายของภาครับสัญญาณอะนาล็อก จะสามารถขยายสัญญาณได้แรงดันประมาณ  $19 \text{ V}_{\text{p-p}}$  ซึ่งเป็นค่าสัญญาณออกที่เกินกว่าภาคอะนาล็อกจะให้ได้จึงเกิดการอ้อมตัว ดังผลการจัดการทดลองในรูปที่ 4.22, 4.23 และ 4.24 ที่วัดที่ภาคอะนาล็อกและสัญญาณขาออกที่เป็นที่ที่แอลทีความถี่ตั้งแต่  $20 \text{ kHz}$ ,  $200 \text{ kHz}$  และ  $2 \text{ MHz}$  ตามลำดับ ในการวัดนั้นได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ชุดที่ 2 ไว้ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้าสื่อสาร (ชั้น 5 ตึกวิศวกรรมไฟฟ้า) และติดตั้งชุดที่ 1 ไว้บนคาบฟ้าของตึกโคลัมโบ ซึ่งห่างออกไปประมาณ 200 เมตร และให้อุปกรณ์ชุดที่ 1 ทำหน้าที่เหมือนเครื่องทวนสัญญาณ คือรับสัญญาณข้อมูลในรูปแสง เปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณแสง ส่งกลับมาที่อุปกรณ์ชุดที่ 2 รูปที่แสดงนั้นเป็นรูปของสัญญาณที่ทางออกของภาครับของอุปกรณ์ชุดที่ 2 และสัญญาณอะนาล็อกที่ทางออกของวงจรอะนาล็อกก่อนที่จะเข้าวงจรดีเทคเตอร์



รูปที่ 4.22 รูปแสดงการรับสัญญาณที่ความถี่ 20 kHz ในสถานะอ้อมตัว

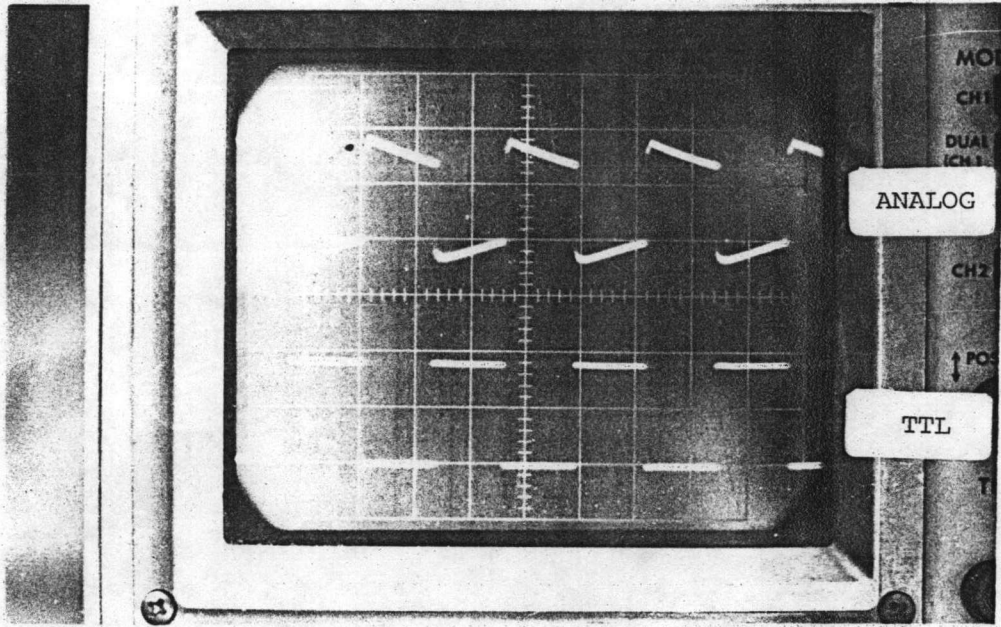


รูปที่ 4.23 รูปแสดงการรับสัญญาณที่ความถี่ 200 kHz ในสถานะอ้อมตัว

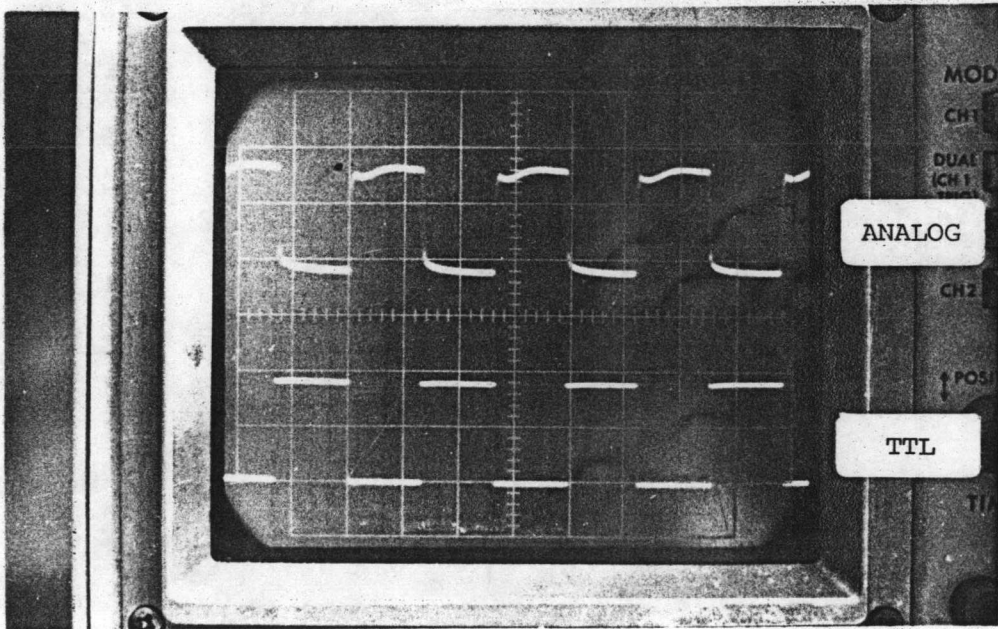


รูปที่ 4.24 รูปแสดงการรับสัญญาณที่ความถี่ 2 MHz ในสถานะอิมิตัว

จากรูป ถ้าหากสัญญาณที่รับได้ยังไม่ถึงจุดอิมิตัว ดังรูปที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 เช่นเดียวกันตั้งแต่ความถี่ 20 kHz, 200 kHz และ 2 MHz จะเห็นว่า Duty Cycle ของสัญญาณที่ที่แอลจะเป็น 50% สำหรับรูปที่ 4.28, 4.29 และ 4.30 เป็นรูปที่แสดงเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณขาเข้าที่มาจาก เครื่องกำเนิดสัญญาณและสัญญาณขาออกที่ได้จากระบบ จะเห็นได้ว่าชุดรับ-ส่งสัญญาณเชิงเลขที่ใช้แสงอินฟราเรดส่งผ่านบรรยากาศ สามารถรับ-ส่งสัญญาณได้ถึง 2 MHz โดยไม่ผิดเพี้ยน และสามารถวัดสัญญาณรบกวนที่มาจากบรรยากาศตามรูป 4.31 มีค่าประมาณ 200 mV

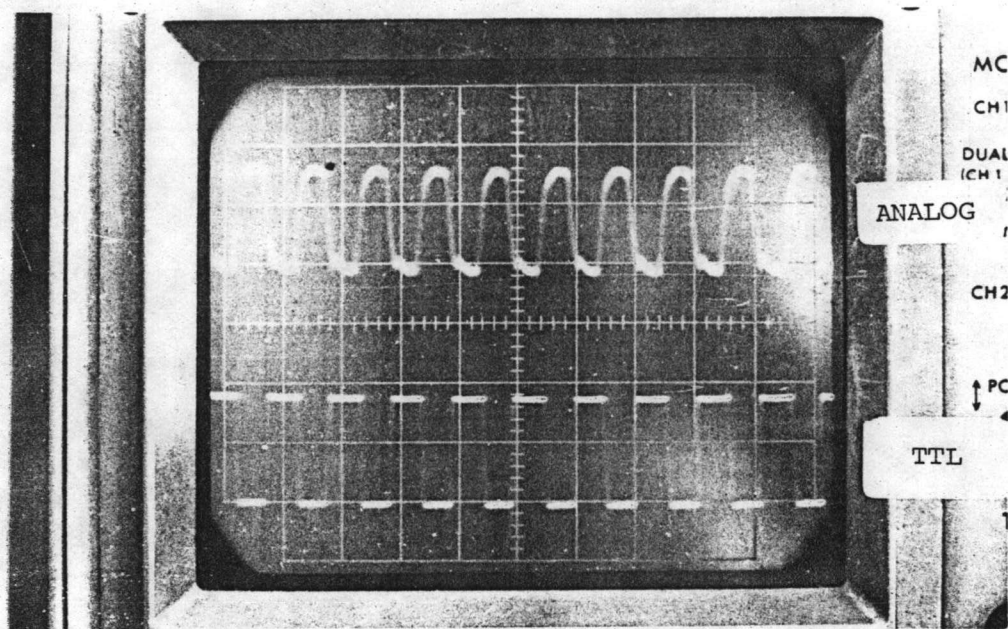


รูปที่ 4.25 รูปแสดงการรับสัญญาณที่ความถี่ 20 kHz

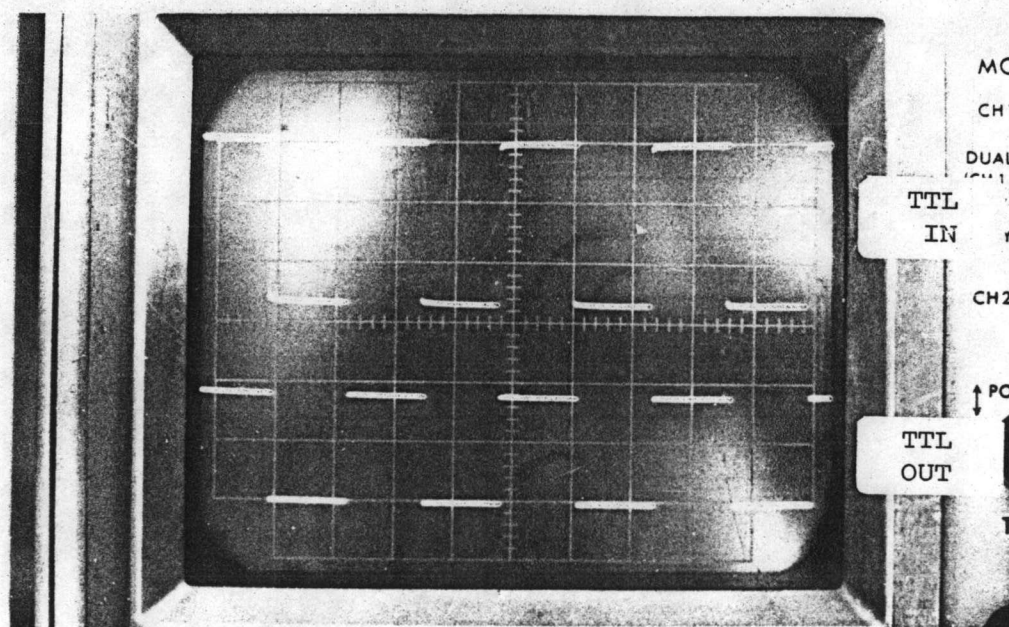


รูปที่ 4.26 รูปแสดงการรับสัญญาณที่ความถี่ 200 kHz

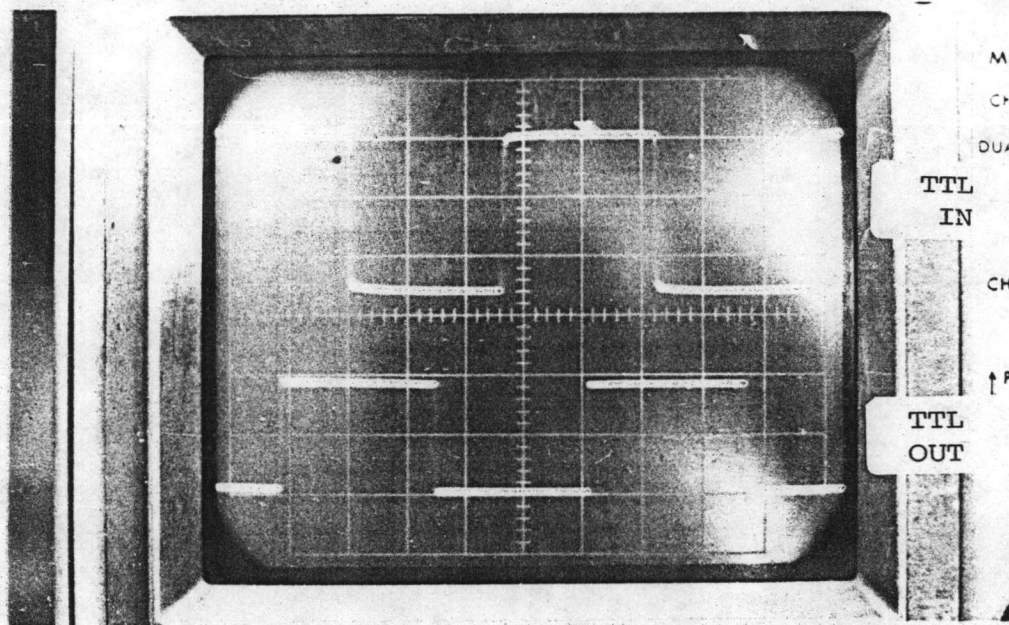




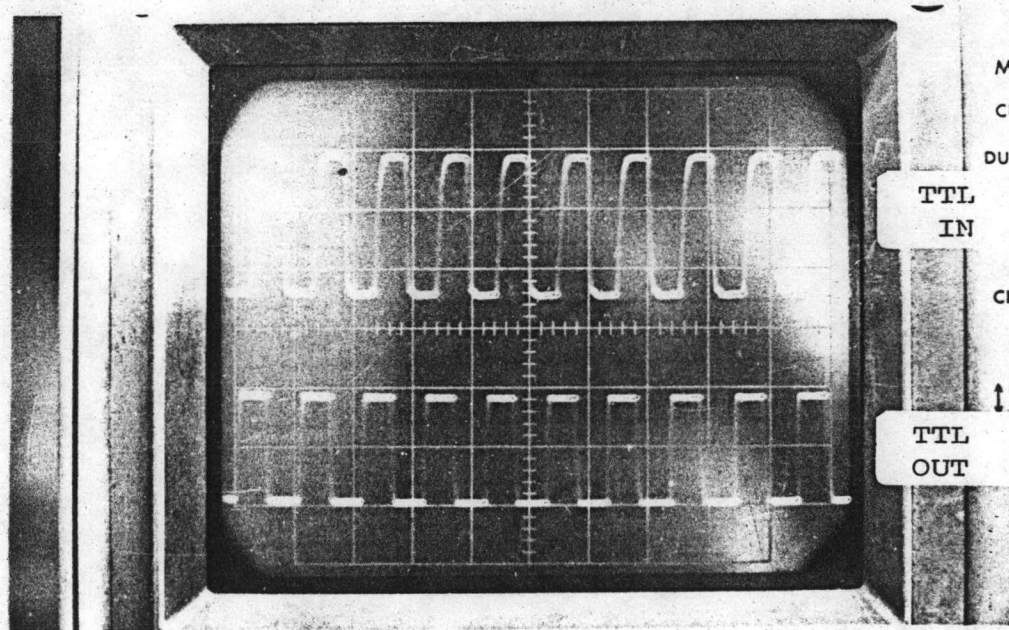
รูปที่ 4.27 รูปแสดงการรับสัญญาณที่ความถี่ 2 MHz



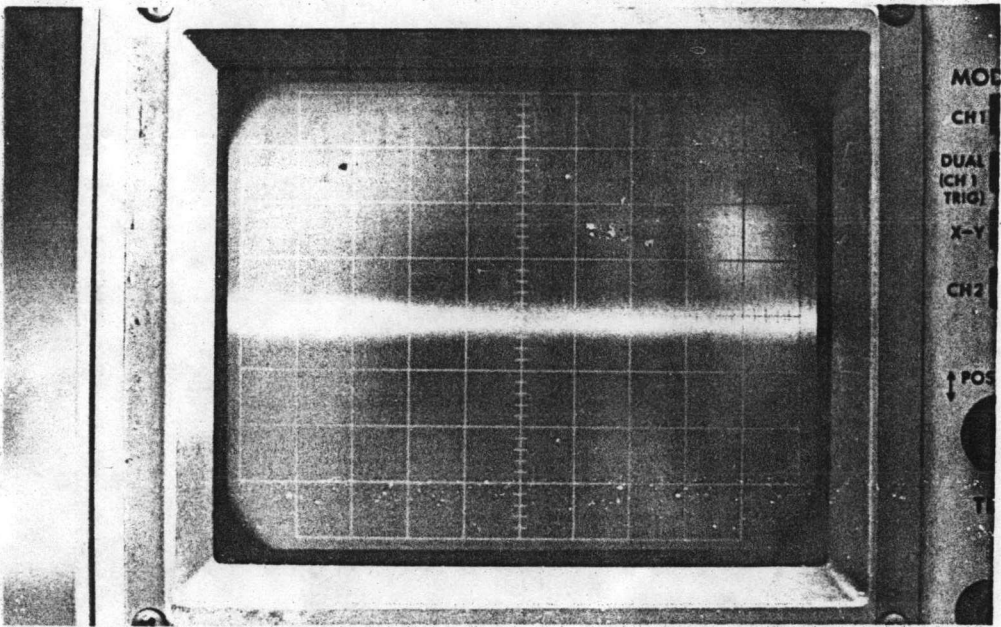
รูปที่ 4.28 รูปเปรียบเทียบสัญญาณที่บ่อนกับสัญญาณที่รับได้ที่ความถี่ 20 kHz



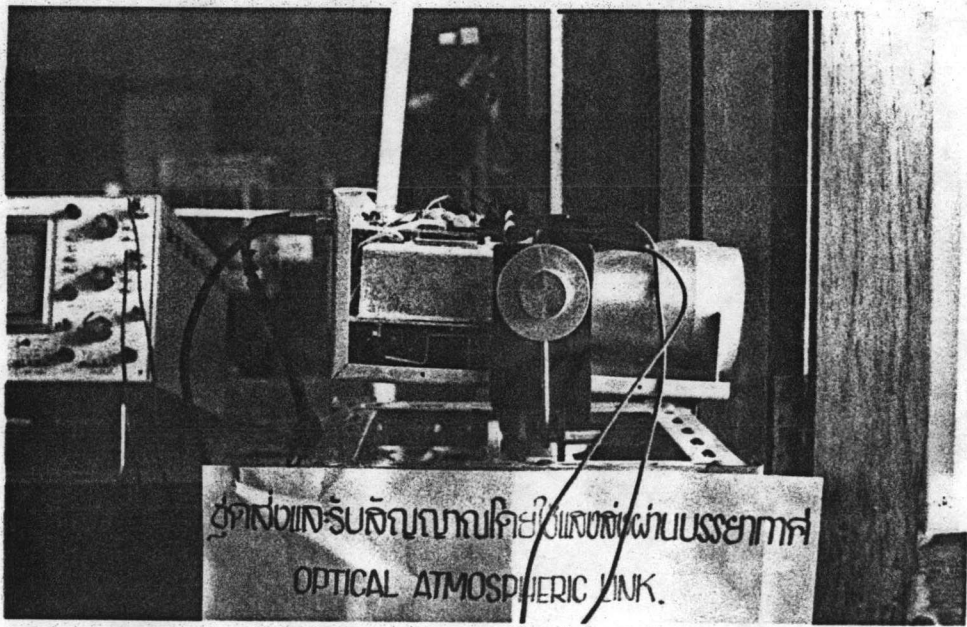
รูปที่ 4.29 รูป เปรียบ เทียบสัญญาณที่บ่อนกับสัญญาณที่รับได้ที่ความถี่ 200 kHz



รูปที่ 4.30 รูป เปรียบ เทียบสัญญาณที่บ่อนกับสัญญาณที่รับได้ที่ความถี่ 2 MHz



รูปที่ 4.31 รูปสัญญาณรบกวนในสภาวะติดตั้งจริง



รูปที่ 4.32 รูปการติดตั้งที่ห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าสื่อสาร



#### 4.7 บทสรุป

จากการที่ได้ออกแบบวงจรและสร้างชุดรับ-ส่งสัญญาณข้อมูลเชิง เลข โดยการใช้แสงอินฟราเรดส่งผ่านบรรยากาศที่กล่าวมาข้างต้น รวมทั้งการทดลองหาข้อมูลของระบบและทดสอบโดยทำการติดตั้ง สามารถสรุปผลได้ดังนี้ คือ

1. ทางด้านภาคส่งที่ทำการสร้างขึ้นทั้ง 2 ชุดนั้น ใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงและออกแบบวงจรขับ LED เหมือนกันทั้ง 2 ชุด แต่สามารถเปล่งกำลังแสงสัญญาณขาออกได้ 1.5 mW และ 3 mW ตามลำดับ และให้ประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อเป็น 73.8% และจากการทดสอบชุดส่งทั้ง 2 ชุด สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงกว่า 2 MHz ทั้งตัว LED เองและวงจรขับ
2. ชุดรับสัญญาณแสงทั้ง 2 ชุดที่สร้างขึ้นโดยอาศัยตัวรับแสงเป็นแบบ PIN PD ที่มีราคาถูกหาซื้อได้ในท้องตลาด สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงถึง 3.5 MHz และมีความเร็วเท่ากับ 0.2  $\mu$ W และมีอัตราขยายของวงจรรวมทั้งหมดประมาณ 3.9 MV/A ที่ความถี่ 200 kHz
3. ปัญหาที่สำคัญของการวิจัยก็คือ รูปแบบการกระจายแสงและการคำนวณเพื่อหากำลังแสงที่ระยะทางต่าง ๆ จากการทดลองได้สามารถหาข้อสรุปได้ว่า ถ้าแหล่งกำเนิดแสงมีพื้นที่การเปล่งแสงขนาดใหญ่ เช่น LED หรือ LD เองก็ตาม และมีสเปกตรัมวิดท์ที่กว้าง การกระจายแสงจะอยู่ในรูปการแผ่กระจายออกเป็นรูปกรวยกลมที่มีความเข้มค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด หรือมีการกระจายแสงด้วยมุมไซลิคที่แน่นอน ดังนั้น การคำนวณจึงได้อาศัยหลักการทางด้านการคำนวณกำลังการส่องสว่างมาคำนวณความเข้มที่ตกลงบนเลนซ์ภาครับ และถ้าหากคิดค่าลดทอนของแสงในบรรยากาศของ LED ก็สามารถทราบกำลังแสงที่รับได้ ณ ระยะทางต่าง ๆ ที่สนใจ เพื่อต้องการหาวิธีการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำจึงจำเป็นต้องมีการหาค่าลดทอนกำลังแสงในบรรยากาศที่เป็นจริง จึงได้ทดลองหาค่าลดทอนกำลังแสงในบรรยากาศของชุดที่สร้างขึ้นทั้ง 2 ชุด พบว่าชุดที่ 1 และชุดที่ 2 มีค่าลดทอนกำลังแสงในบรรยากาศเท่ากับ  $1.54 \text{ km}^{-1}$  และ  $1.45 \text{ km}^{-1}$  และเมื่อนำค่านี้ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของต่างประเทศ พบว่าค่าลดทอนขนาดนี้จะอยู่ในสภาพบรรยากาศแบบกึ่ง ๆ ระหว่างมีหมอกในบรรยากาศจาง ๆ ซึ่งก็คืออากาศค่อนข้างชื้น มีไอน้ำมากนั่นเอง และนอกเหนือจากค่าลดทอนนี้ ยังทราบว่าชุดทดลองที่ 1 และที่ 2 มีค่ามุมไซลิคประมาณ  $3.9 \times 10^{-3} \text{ R}$  และ  $3.6 \times 10^{-3} \text{ R}$  ตามลำดับ

4. หลังจากที่ได้ทราบค่าลดทอนกำลังแสงในบรรยากาศและสูตรสำหรับคำนวณ พบว่าถ้าจะใช้ชุดที่สร้างขึ้นรับส่งข้อมูลที่ระยะทาง 620 เมตร เมื่อใช้เลนซ์ภาครับขนาด 7 ซม. สำหรับชุดที่ 1

และชุดที่ 2 จะรับกำลังแสงได้  $0.25 \mu\text{W}$  และ  $0.65 \mu\text{W}$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร็วของชุดรับแสงแล้ว ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 จะส่งได้โดยมีค่าเฟื่อเป็น 1 dB และ 5.12 dB ตามลำดับ สำหรับค่าเฟื่อดังกล่าวจากการทดลองในต่างประเทศ [8] สำหรับการส่งข้อมูลเชิงเลขจะพบว่าค่าเฟื่อจะมีผลต่อค่าความผิดพลาดในการส่ง (Bit error rate) จากการทดลองโดยการใช้ต้นกำเนิดแสงเป็นแบบ LD และตัวรับแสงเป็นแบบ APD ทำการรับ-ส่งที่ระยะทาง 2.3 km พบว่า ถ้าตั้งระดับค่ากำลังแสงต่ำสุดที่ทำงานได้ ( $P_{\text{rth}}$ ) ไว้ที่ -43 dBm และสามารถรับกำลังแสงเฉลี่ย ( $P_{\text{av}}$ ) ที่ระยะทาง 2.3 km ได้มีค่าเท่ากับ -42 dBm ผลการรับจะให้ค่า Bit error rate ประมาณ  $10^{-7}$  หมายความว่าถ้าจะให้ผลการรับเที่ยงตรงควรจะมีค่าเฟื่อดังกล่าวมาก

5. และเพื่อเป็นการยืนยันการใช้งานของระบบจึงได้ทำการติดตั้งที่ระยะห่างกันประมาณ 200 เมตร ระหว่างห้องทดลองชั้น 5 ดึกไฟฟ้า และคาตฟ้าของดึกโคลัมโบ พบว่า การติดตั้งให้ได้ผลจะต้องปรับชุดรับและส่งให้อยู่ในสภาวะที่ดีตรงระบบไฟกัส แกนระบบเลนซ์ของชุดรับและส่งจะต้องขนานกัน ระบบปรับชุดรับ-ส่งจะต้องละเอียด และถ้าระยะทางมากขึ้นควรจะมีระบบช่วยปรับ เช่น กล้องส่องทางไกลช่วยในการติดตั้ง

6. จากชุดรับ-ส่งที่สร้างขึ้นเมื่อนำมาติดตั้งที่ระยะทาง 200 เมตร สัญญาณที่รับได้จะมีกำลังแสงทำให้เกิดการอ้อมตัว แต่ยังสามารถรับ-ส่งสัญญาณที่ 2 MHz ที่ Duty Cycle 50% ได้อย่างดี