

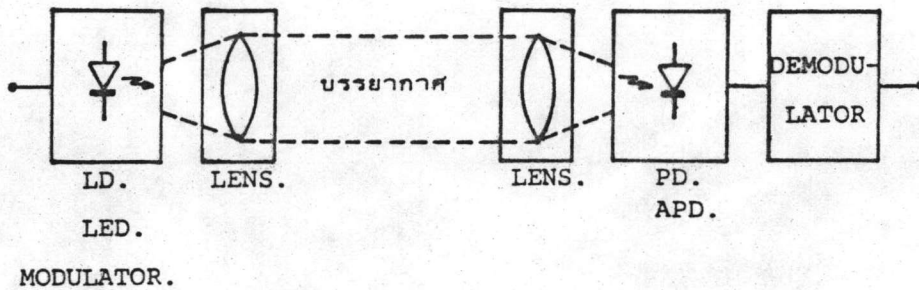


โครงสร้างและหลักการการออกแบบระบบสื่อสารข้อมูล เชิง เลขที่ใช้แสงอินฟราเรดส่งผ่านบรรยากาศ

ในบทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างและหลักการการออกแบบระบบสื่อสารข้อมูล เชิง เลขที่ใช้แสงอินฟราเรดส่งผ่านบรรยากาศ พร้อมทั้งแสดงผลการทดลอง เพื่อเก็บข้อมูลพื้นฐานที่จะใช้ในการออกแบบต่อไป

### 2.1 โครงสร้างของระบบการสื่อสารข้อมูล เชิง เลขที่ใช้แสงอินฟราเรดส่งผ่านบรรยากาศ

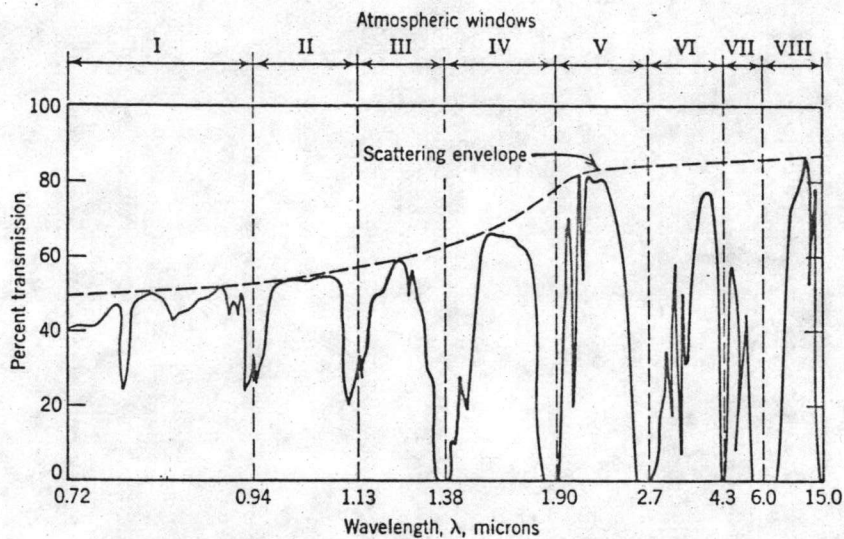
โครงสร้างของระบบการสื่อสารข้อมูล เชิง เลขที่ใช้แสงอินฟราเรดส่งผ่านบรรยากาศ ซึ่งเป็นระบบการรับ - ส่งข้อมูลโดยอาศัยคลื่นพาห้ที่เป็นลำแสงอินฟราเรดนั้น ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักเหมือนกับที่แสดงไว้ในรูป 1.1 โดยเริ่มต้นจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้า (ในที่นี้คือข้อมูล เชิง เลข) เป็นสัญญาณแสงซึ่งก็คือตัวกำเนิดแสงร่วมกับวงจรผสมสัญญาณ (Modulator) ที่ทำหน้าที่ ผสมสัญญาณข้อมูลที่จะส่ง เข้ากับลำแสงจากตัวกำเนิดแสง ในที่นี้จะเป็นการผสมโดยการควบคุมความเข้มของแสงให้ เปลี่ยนไปตามสัญญาณไฟฟ้าของข้อมูล ในส่วนต่อไปก็คือ อุปกรณ์ทางภาครับ ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณทางแสงมาเป็นสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าเช่น เดิม เพื่อนำไปใช้งานโดยจะประกอบไปด้วยโฟโตไดโอดซึ่งจะทำหน้าที่รับและ เปลี่ยนสัญญาณแสงอินฟราเรดที่รับ เข้ามาได้ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปของการเปลี่ยนแปลงทางด้านกระแสไฟฟ้า จากนั้นก็ส่งต่อไปยังวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่โฟโตไดโอดส่งมาให้ เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้งานต่อไปได้ แต่เนื่องจากตัวกลางของการส่งผ่านแสง คือบรรยากาศบนพื้นโลกจึงทำให้โครงสร้างของระบบมีส่วนที่ต้องคำนึงถึง เกี่ยวกับการลู่ออกของลำแสงดังแสดงในรูปที่ 2.1 เพราะว่าตัวกำเนิดแสงที่ใช้มีขนาดเล็ก แต่การส่ง เป็นการส่งระยะไกลจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมลำแสงให้สามารถส่งและรับได้ในทิศทางที่ต้องการ และลำแสงที่ส่งออกจะต้องมีการควบคุมที่ดีมีการสูญเสียในรูปการลู่ออกของลำแสงน้อยที่สุด ทั้งทางด้านรับตัวโฟโตไดโอดเอง พื้นที่ของการรับแสงก็มียขนาดเล็กจำเป็นต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการใช้ระบบ เลนซ์ เข้ามาช่วยให้พื้นที่ของการรับแสงมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้สามารถรับ - ส่งสัญญาณได้ที่ระยะทางไกลขึ้น



รูป 2.1 โครงสร้างของระบบสื่อสารข้อมูลเชิง เลขที่ใช้แสงอินฟราเรดส่งผ่านบรรยากาศ

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำไปอย่างมาก ทำให้สามารถสร้างตัวกำเนิดแสงและโฟโตไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำที่ใช้สะดวก สามารถช่วยแก้ปัญหาในส่วนของอุปกรณ์ที่สำคัญของระบบทั้งทางด้านรับและส่งได้อย่างมาก กล่าวคือ สามารถควบคุมกระแสที่ใช้ในการขับให้กำเนิดแสงที่ออกมาได้โดยตรงทำให้สามารถผสมสัญญาณไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ขับตัวกำเนิดแสงให้เป็นสัญญาณแสงได้ง่าย ความยาวคลื่นของแสงของตัวกำเนิดแสงแบบสารกึ่งตัวนำที่ใช้งานในปัจจุบันนี้ คือ  $0.85 \mu\text{m}$ . และ  $1.3 \mu\text{m}$  และโครงสร้างของตัวกำเนิดแสงที่สามารถใช้งานได้มี 2 แบบคือ LED และ LD โดยทั่วไปตัวกำเนิดแสงแบบ LD จะมีคุณสมบัติดีกว่า LED ทั้งในด้านการตอบสนองความถี่ที่ดีกว่า และความกว้างของสเปกตรัมของแสง (Spectrum width) ที่แคบกว่า แต่ก็มีข้อเสียที่โครงสร้างยุ่งยากกว่าทำให้ราคา LD สูงกว่าของ LED หลาย ๆ เท่าตัวขึ้นไป สำหรับการพิจารณาเลือกใช้ความยาวคลื่นของแสง

ในกรณีของการส่งผ่านบรรยากาศที่ความยาวคลื่น  $0.85 \mu\text{m}$  จะมีความเหมาะสมมากกว่า เพราะเป็นต้นกำเนิดแสงที่มีราคาถูกกว่า และยังมีการสูญเสียในบรรยากาศต่ำ ดังเห็นได้จากรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านบรรยากาศของแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ นอกจากนี้โฟโตไดโอดที่ใช้รับแสงความยาวคลื่นนี้ก็มีความถูกกว่าอีกด้วย



รูป 2.2 ความสามารถในการส่งผ่านของแสงในบรรยากาศ

โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำในปัจจุบันที่สามารถนำมาใช้งานได้มีอยู่ 2 โครงสร้างด้วยกัน คือ PIN Photo diode (ย่อว่า PIN PD) และ Avalanche photo diode (ย่อว่า APD) โดยทั่วไป APD จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าในด้านที่สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงกว่า และมีความไวสูงกว่า แต่มีข้อเสียในแง่ที่มีระดับสัญญาณรบกวน (Noise) สูงและราคาแพงกว่า

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับระบบสื่อสารข้อมูลเชิงเลขที่ใช้ลำแสงอินฟราเรดส่งผ่านบรรยากาศที่ระบบความยาวคลื่น  $0.85 \mu\text{m}$  ใช้ตัวกำเนิดแสง

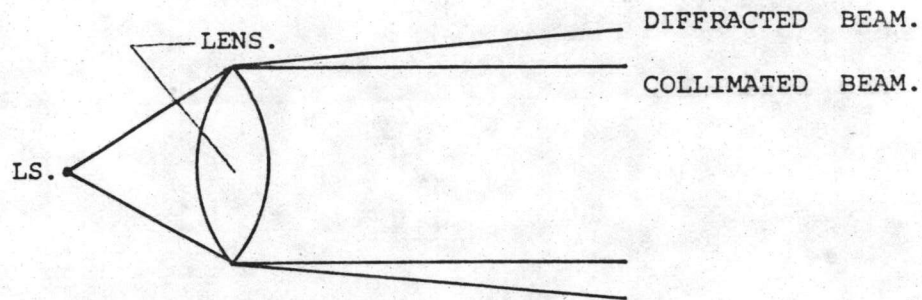
เป็นแบบ LED และตัวรับแสง เป็นแบบ PIN PD

## 2.2 หลักการออกแบบระบบสื่อสารข้อมูลเชิง เลขที่ใช้แสงอินฟราเรดส่งผ่านบรรยากาศ

ระบบการสื่อสารข้อมูลเชิง เลขที่ใช้แสงอินฟราเรดส่งผ่านบรรยากาศ ที่ใช้ตัวกำเนิดแสง และตัวรับแสง เป็นแบบสารกึ่งตัวนำนั้น พื้นที่การเปล่งแสงและรับแสงมีขนาดเล็ก ทำให้มีปัญหาจากการ ลู่ออกของลำแสง จึงจำเป็นต้องใช้ระบบ เลนซ์หรือกระจกสะท้อน เข้ามาช่วยขยายขนาดของพื้นที่ เปล่ง- แสง เพื่อให้การลู่ออกของลำแสงน้อยลง และสามารถเพิ่มพื้นที่ของการรับแสงและสามารถรวมลำแสง ให้ไปตกลงบนพื้นที่ของโฟโตไดโอดได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ดีถึงแม้ว่าจะได้นำระบบ เลนซ์ เข้ามาช่วย ในระบบการส่ง ถ้าหากจุดรับอยู่ไกลออกไปก็ยังคงมีการลู่ออกของลำแสง เนื่องจากพื้นที่ของ เลนซ์ ภาดส่งมีขนาดจำกัด เช่นกัน แต่อัตราการลู่ออกซึ่งแปรผกผันกับ เส้นผ่าศูนย์กลางของ เลนซ์ทางภาคส่ง จะน้อยลงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การส่งออกจากแหล่งกำเนิดแสงโดยตรง

ถึงแม้ว่าการลู่ออกของลำแสงจะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถของระบบแล้ว ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อระบบก็คือความสูญเสียในอุปกรณ์ของระบบ (Attenuation loss in system components) เช่น ความสูญเสียในระบบเลนซ์จะต้องต่ำ ระบบเลนซ์ต้องสามารถรับแสงจากแหล่ง กำเนิดแสงเพื่อส่งออกให้มากที่สุด และความสูญเสียในบรรยากาศ (Space propagation loss) ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญและมีผลต่อความสามารถของระบบ เช่นเดียวกัน

ถ้าพิจารณาการหาสมการของการส่งผ่านพลังงานของระบบ เลนซ์ภาคส่ง จะทำได้ใน ลักษณะเดียวกันกับในกรณีที่ใช้สายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture antenna) โดยการศึกษาถึง คุณสมบัติการแผ่ กระจายในบรรยากาศ ในที่นี้คือการแผ่กระจายของลำแสงจากระบบ เลนซ์ เป็น สายอากาศแบบช่องเปิดแบบกลม (Circular aperture antenna) ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 สายอากาศทางแสงแบบช่องเปิดทรงกลม  
(Circular aperture optical antenna)

การใช้เลนส์จะช่วยรวมลำแสงจากต้นกำเนิดแสงให้ออกเป็นลำแสงขนาน แต่ผลจากการเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction) [2], [10] ทำให้ลำแสงกระจายออก เมื่อพิจารณาที่ระยะทางไกล โดยขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศ [2] ในขณะที่ระยะทางเพิ่มขึ้นขนาดของลำแสงที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของแสงมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ถ้าระบบเลนส์ในภาคส่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ  $d_t$  ในทางทฤษฎีถ้าแหล่งกำเนิดแสงเป็นแบบจุด (Point source) ที่มีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic wave) มีลักษณะคลื่นแบบโคฮีเรนต์ (Coherent) และการจัดระบบเลนส์ทำได้อย่างสมบูรณ์แล้ว เฟสของแสงจะตรงกันบนช่องเปิดของเลนส์ และการลู่ออกของลำแสงจะเป็นไปตามกฎของการเลี้ยวเบน (Diffraction) ซึ่งถ้าความเข้มของแสงบนช่องเปิดเลนส์มีค่าเท่ากันหมดรูปแบบการกระจายพลังงาน (Power pattern) ที่ระยะทางไกล ๆ จะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้ [2]

$$P(\theta) = \left| \frac{2J_1(x)}{x} \right|^2 \quad (2.1)$$

โดยที่  $x = (d_t \sin \theta) / \lambda_C$  และ  $\theta$  คือมุมที่ทำกับแกนกลางของเลนส์ และ  $\lambda_C$  เป็นความยาวคลื่นของต้นกำเนิดแสง ถ้าพิจารณาจากรูป 2.4 P คือจุดที่รับสัญญาณโดยอยู่ที่พื้นที่ของการรับแสงที่ทำมุม  $\alpha'$  กับแกนกลางของระบบเลนส์ และต้นกำเนิดแสงมีค่ากำลังการส่งเท่ากับ  $P_A$  จะได้ค่าความเข้มเท่ากับ [2]

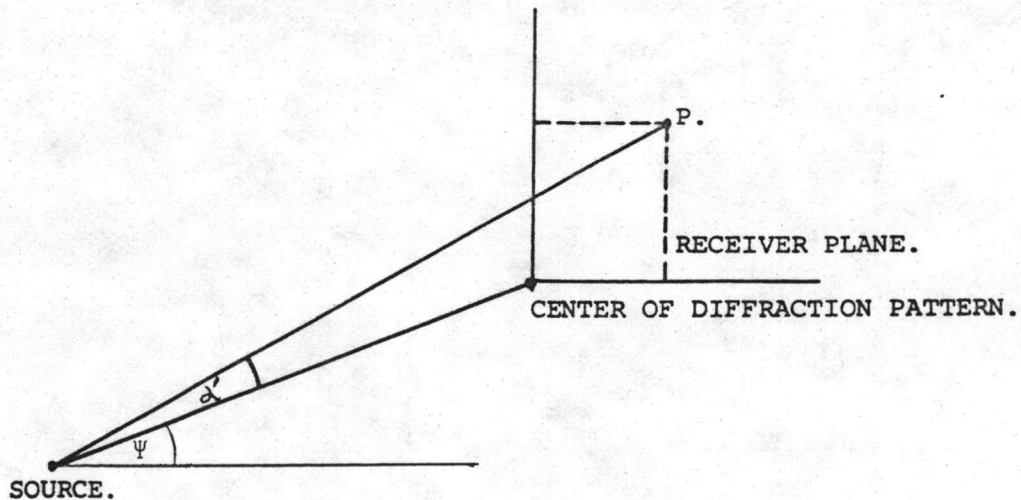
$$I(p) = I_0 \left| \frac{2J_1(x)}{x} \right|^2 \quad (2.2)$$

โดยที่  $I_0$  คือค่าความเข้มที่ตรงจุดแกนกลางของระบบเลนส์ เท่ากับ

$$(d_t^2 P_A) / 4\lambda_C^2$$

$\theta$  คือมุม  $\alpha'$

$$\text{และ } x = (d_t \sin \alpha') / \lambda_C$$



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงการเกิดการหักเหของสายอากาศ

รูป 2.5 คือรูปร่างของรูปแบบการกระจายพลังงาน และรูป 2.6 คือรูปแสดงให้เห็นถึงการใช้เลนส์รับที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกันจะทำให้รับพลังงานแสงได้ไม่เท่ากัน นั่นคือถ้าทำการหาพลังงานที่พื้นผิวของภาครับที่ทำมุม  $\alpha'$  เมื่อมองจากภาคส่งและถ้าในบรรยากาศมีความสามารถในการส่งผ่านพลังงานแสงเท่ากับ  $\tau_a$  จะได้

$$P(\alpha') = \tau_a I(0) \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha'} \left[ \frac{2J_1(x)}{x} \right]^2 \alpha d\alpha d\psi \quad (2.3)$$

โดยที่  $x = (\pi d_t \alpha) / \lambda_C$  และ  $\alpha \approx \sin \theta$   
 $\psi =$  มุมรอบจุดศูนย์กลางมีค่าเท่ากับ  $360^\circ$

จะได้

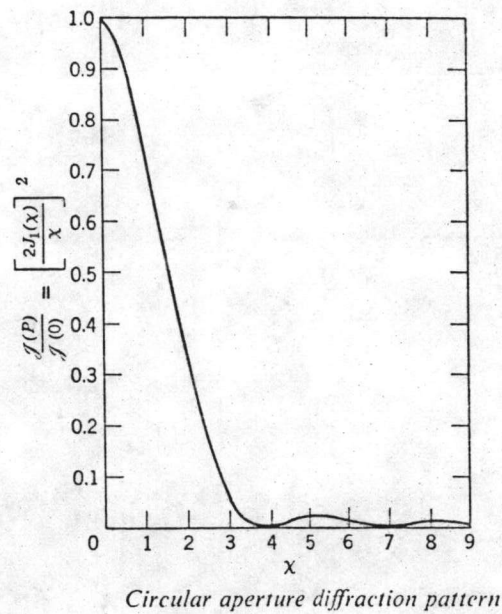
$$P(\alpha') = \tau_a P_A \left[ 1 - J_0^2(x') - J_1^2(x') \right] \quad (2.4)$$

เมื่อ  $x = (\pi d_t \alpha') / \lambda_C$  และ  $P_A = \eta P_T$

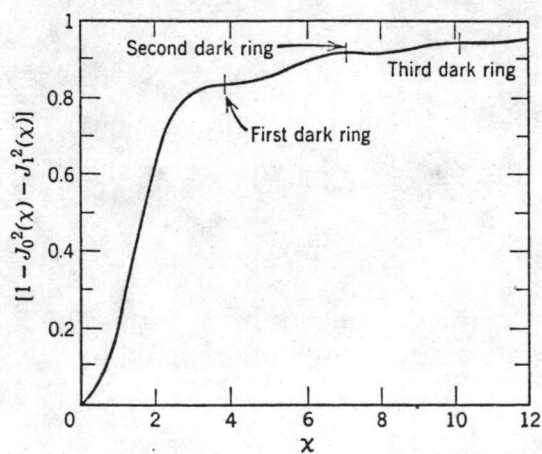
ซึ่งแสดงค่าไว้ ดังรูป 2.6 แต่อย่างไรก็ดีถ้าระยะของจุดส่งและจุดรับอยู่ห่างกันมาก มีค่าเท่ากับ  $R$  ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของภาคส่งและภาครับเป็น  $d_t$  และ  $d_r$  ตามลำดับ ความยาวคลื่นที่ใช้เป็น  $\lambda$  จะได้มุมออก  $(\theta) \approx \frac{\lambda}{d_t}$  โดยที่ถ้าพิจารณาจากด้านภาคส่งแล้ว  $\alpha' \approx d_r / 2R$  และมีค่าเล็กมาก มากจนค่าความเข้มที่จุดนี้ไม่เปลี่ยนแปลงมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มที่จุดกึ่งกลาง และเสมือนว่าภาครับอยู่ตรงกับแกนกลางของระบบ เลนส์ภาคส่ง จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงที่ได้รับ  $P_R$  และพลังงานแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสง  $P_T$  ดังนี้คือ [2]

$$P_R = \frac{\pi^2 d_t^2 d_r^2}{16R^2 \lambda^2} \tau_a \cdot \tau_r \cdot \eta \cdot P_T \quad (2.5)$$

ในขณะที่  $\eta$  คือประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อ (Coupling efficiency) ของระบบ เลนส์ภาคส่ง  $\tau_r$  คือค่าความสามารถในการส่งผ่านพลังงานแสงของเลนส์ในภาครับ



รูปที่ 2.5 รูปแพทเทอรันกำลังคลื่นของสายอากาศช่องเปิดกลม



Fraction of laser power in circle about diffraction pattern center

รูปที่ 2.6 แสดงสัดส่วนของพลังงานที่เกิดรอบศูนย์กลางของรูปที่ 2.5



เนื่องจากว่าแสงต้องเดินทางไปในบรรยากาศเป็นระยะทางไกล การสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่เกิดจากการที่แสงเคลื่อนที่ปะทะกับฝุ่นละออง หรือไอน้ำในบรรยากาศแล้ว เกิดการกระจัดกระจาย (Scattering) และบางส่วนจะสูญเสียไปเนื่องจากการดูดกลืน (Absorption) ค่า  $\tau_a$  สามารถเขียนได้ในรูปดังต่อไปนี้ คือ

$$\tau_a = \text{EXP}[-(\alpha_s + \alpha_a)R] \quad (2.6)$$

โดยที่  $\alpha_s$  และ  $\alpha_a$  เป็นค่าคงตัวของ การลดทอน (Attenuation constant) เนื่องจากการกระจัดกระจายของแสง และเนื่องจากการดูดกลืนพลังงานแสงของอากาศตามลำดับ สำหรับ  $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$  ค่า  $\alpha_s + \alpha_a$  จะมีค่าประมาณ  $0.844 \text{ km}^{-1}$  หรือประมาณ  $-3.66 \text{ dB/km}$

### 2.3 ผลการทดลอง เพื่อเก็บข้อมูลพื้นฐาน

จากสมการ (2.5) จะเห็นได้ว่า นอกจากค่า  $d_t$  และ  $d_r$  แล้วค่า  $\tau_a, \tau_r$  และ  $\eta$  ก็มีผลต่อระบบอย่างมาก รวมทั้งค่าของมุมลู่ออกของลำแสงด้วย เพื่อเป็นการทดสอบและเก็บข้อมูล ให้กับการออกแบบระบบ จึงได้ทำการจำลองระบบขึ้น เพื่อทดสอบและทดลองหาข้อมูลค่าต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยได้จำลองตามโครงสร้างรูป 2.1 จากการใช้เลนซ์ภาคส่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 4.5 ซม. จำนวน 2 อัน และเลนซ์ทางภาครับก็ใช้ขนาดเท่ากัน และเป็นเลนซ์ชนิดเดียวกัน จากการทดลองได้ลองใช้ตัวกำเนิดแสงแบบ LED โมเดล OC-1 ที่ให้แสงอินฟราเรดขนาดความยาวคลื่น  $0.85 \mu\text{m}$  โดยสามารถขับให้มีพลังงานแสงออกมาประมาณ 4 มิลลิวัตต์ ทางด้านตัวรับแสงใช้อุปกรณ์เครื่องวัดพลังงานแสง (Optical power meter) ซึ่งสามารถอ่านค่าพลังงานแสงที่ตกกระทบบตัวรับแสงออกมาเป็นค่าสมมุติได้

#### 2.3.1 การวัดค่าประสิทธิภาพการเชื่อมต่อ (Coupling efficiency)

ในการวัดค่าประสิทธิภาพการเชื่อมต่อ ( $\eta$ ) ใช้วิธีวัดพลังงานแสง ที่ออกจาก LED และพลังงานแสงที่ผ่านระบบเลนซ์ทางภาคส่ง พลังงานแสงตกจาก LED นั้นใช้โฟโตดีเทคเตอร์ (Photo detector) จ่อวัดโดยตรงซึ่งวัดได้ 4 mW สำหรับพลังงานแสงที่ผ่านระบบเลนซ์ทางภาคส่งนั้นใช้วิธีวัดโดยจัดระยะเลนซ์ให้แสงที่ออกไปเป็นลำแสงที่มีการลู่ออกน้อยที่สุด แล้วจึงเลื่อนเลนซ์ตัวนอกให้รวมแสงเข้าหาโฟโตดีเทคเตอร์ แล้ววัดพลังงานแสงใน

ขณะนั้น ซึ่งวัดได้  $43 \mu\text{W}$  จากค่าที่วัดได้นี้เมื่อนำไปคำนวณหาค่า  $\eta$  ก็จะได้

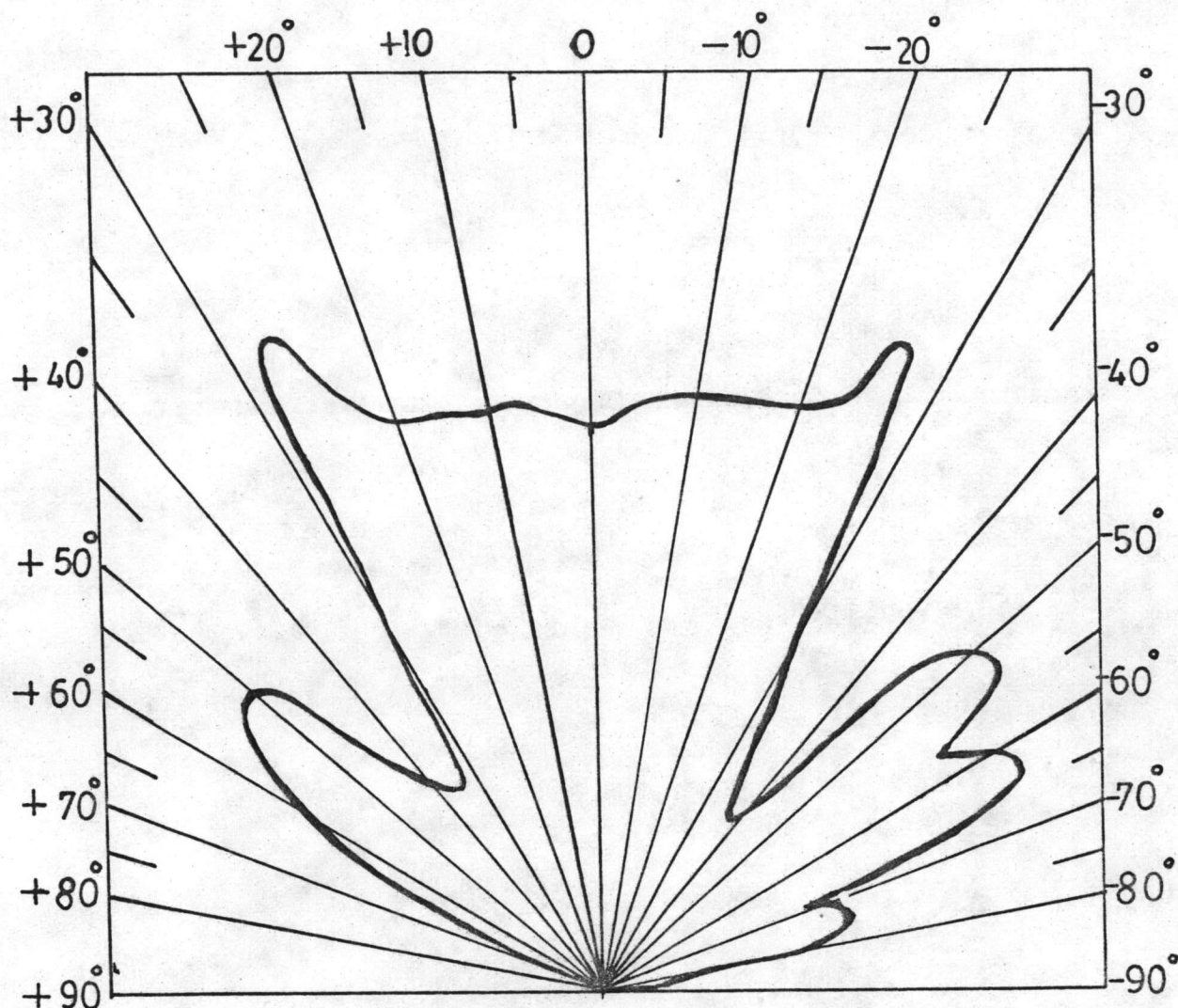
$$\eta = \frac{43 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-3}} = 1.075 \times 10^{-2} \quad (2.7)$$

หรือ  $\eta = 1.075\%$  ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ สาเหตุที่มีค่าต่ำก็เนื่องมาจากค่ารูปแบบการกระจายการส่องสว่างของ LED และการสูญเสียในเลนส์ ดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 2.3.2 รูปแบบการกระจายการส่องสว่างของ LED เบอร์ OC-1

รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบการกระจายการส่องสว่างของ LED เบอร์ OC-1 จากรูปจะเห็นว่า LED เบอร์ OC-1 มีมุมของการส่องสว่างกว้างมาก แต่มีลักษณะคล้ายกับจุดที่มีความเข้มของการส่องสว่างมากกว่าหนึ่งจุด ซึ่งจะมีผลต่อค่า  $\eta$  เพราะพลังงานแสงส่วนใหญ่จะไปตกนอกเลนส์ แต่จากการทดลองได้ข้อสรุปว่า ค่า  $\eta$  จะมีค่าสูงเมื่อรูปแบบการกระจายการส่องสว่างมีค่ามุมของการส่องสว่างแคบ ๆ แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าจะพิจารณาในด้านคุณสมบัติของต้นกำเนิดแสงการที่ต้นกำเนิดแสงมีมุมการส่องสว่างกว้างเกือบ  $180^\circ$  หรือ  $180^\circ$  นั้น (ยกตัวอย่างเช่นต้นกำเนิดแสงแบบจุดมคติจะให้มุมการส่องสว่างเท่ากับ  $180^\circ$ ) จึงมีผลทำให้เมื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดแสงของระบบเลนส์ และขณะที่ทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบเลนส์นั้น จะให้ความเข้มของแสงบนหน้าเลนส์สม่ำเสมอ และทำให้การกระจายของแสงใกล้เคียงกับทฤษฎีมากขึ้น [9]





รูปที่ 2.7 รูปแบบการกระจายการส่องสว่างของ LED เบอร์ OC-1

(จากการทดลองวัดในห้องปฏิบัติการ)

### 2.3.3 การวัดค่าคุณสมบัติในการส่งผ่านลำแสง (Transmittivity) ของเลนซ์

ระบบที่ทำการจำลองขึ้นมาี้ เลนซ์ที่ใช้ทั้งหมดทั้งในภาคส่งและภาครับ เป็น เลนซ์ชนิดเดียวกัน และเป็นเลนซ์แบบธรรมดาที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดมีราคาถูก เมื่อทำการวัดค่าคุณสมบัติในการส่งผ่านลำแสงของเลนซ์โดยเปรียบเทียบพลังงานที่ให้ผ่านและไม่ให้ผ่านเลนซ์ ปรากฏว่าได้ค่าเป็น 29  $\mu\text{W}$  และ 43  $\mu\text{W}$  ตามลำดับ เพราะฉะนั้นค่าคุณสมบัติในการส่งผ่านของเลนซ์ มีค่าดังต่อไปนี้

$$\tau_r = \frac{29}{43} = 0.674 \quad (2.8)$$

หรือ  $\tau_r = 67.4\%$  นั่นคือ มีการสูญเสียพลังงานไป 32.6% ถ้าหากในระบบเลนซ์ของภาคส่งใช้เลนซ์อย่างเดียวกัน 2 อัน จะมีการสูญเสียพลังงานแสงไปถึง 54.6% นับว่าเป็นตัวเลขที่สูงมาก และเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่า  $\eta$  มีค่าต่ำ ดังนั้นควรจะเลือกใช้เลนซ์ที่มีค่าการสูญเสียต่ำในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน

### 2.3.4 การวัดมุมที่ลำแสงลู่ออก

การวัดมุมลู่ออกของลำแสงนับว่าเป็นส่วนสำคัญในการคำนวณค่าพลังงานแสงที่ภาครับ จากสมการ (2.1) ซึ่งเป็นสมการรูปแบบการกระจายพลังงานของระบบทำให้ทราบถึงขนาดของมุมลู่ออกของลำแสงตามทฤษฎีโดยการพิจารณาที่ค่าพลังงานมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งดูจากรูปที่ 2.5 จะได้

$$x_1 = 3.83$$

จะได้ว่า

$$3.83 = (\pi d_t \sin\theta) / \lambda$$

$$\theta_1/2 \approx \sin\theta_1/2 \approx \frac{\lambda \times 3.83}{\pi d_t} = 2.3 \times 10^{-5} \text{ rad.}$$

ในทางปฏิบัตินั้นแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็น LED นั้น นอกจากจะไม่ได้เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด (Point source) แล้ว ความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมายังไม่ได้มีความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว นอกเหนือจากนี้การจัดระบบเลนส์ก็อาจจะไม่สมบูรณ์ ซึ่งสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้ลำแสงมีโอกาสลู่ออกมากขึ้น เพราะฉะนั้นจึงได้ทำการวัดมุมของการลู่ออกโดยใช้กล้องดูแสงอินฟราเรด (Infrared finder scope) ที่ระยะต่าง ๆ และในขณะเดียวกันก็ทำการวัดพลังงานแสงที่จุดนั้น ๆ โดยใช้เลนส์รับขนาด 4.5 ซม. ผลการวัดกับการคำนวณมุมลู่ออกแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 จากตารางได้ค่ามุมลู่ออกของลำแสงประมาณ  $3 \times 10^{-3}$  rad. ( $\theta'_1$ ) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่า  $\theta_1$  ที่คำนวณได้ทางทฤษฎีจะเป็นอัตราส่วนดังนี้ คือ

$$\frac{\theta_1}{\theta'_1} = \frac{2.3 \times 10^{-5}}{1.5 \times 10^{-3}} = 0.016 \quad (2.9)$$

หรือเมื่อคำนวณเป็นประสิทธิภาพของช่องเปิดสายอากาศ (Aperture efficiency) จะได้เพียง  $(0.016)^2 \times 100\%$  หรือเท่ากับ 0.026% นั่นคือในกรณีนี้เสมือนกับว่าเลนส์ทางภาคส่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นดังนี้ คือ

$$d'_t = d_t \times 0.016 = 4.5 \times 0.016 = 0.072 \text{ ซม.} \quad (2.10)$$

ซึ่งจัดได้ว่ามีค่าต่ำ เช่น เดียวกัน

ตารางที่ 2.1 ผลการวัดมุมลู่ออกของลำแสง

Distance R (m)	Power ( $\mu\text{W}$ )	beam diameter d (cm)	$\theta_{1/2} = \frac{d}{2R}$ (rad.)
3	31.62	4.3	-
23	16.60	7.5	$1.63 \times 10^{-3}$
29	11.22	9.0	$1.55 \times 10^{-3}$
35	7.76	10.0	$1.43 \times 10^{-3}$
41	5.13	12.0	$1.46 \times 10^{-3}$
47	3.98	14.0	$1.49 \times 10^{-3}$
53.2	3.24	16.0	$1.5 \times 10^{-3}$

## 2.3.5 การคำนวณหาพลังงานแสงที่รับได้

จากการทดลองที่ผ่านมาจะพบว่าระบบ เลนส์ภาคส่งนั้น เหมือนมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงค่าเท่ากับ  $d'_t$  คือประมาณ 0.072 ซม. เพื่อให้การคำนวณที่ใกล้เคียงความจริงจะ เปลี่ยนการใช้ค่า  $d_t$  เป็น  $d'_t$  และจากความเป็นจริงการคิดระยะทางของการส่ง R ยังไม่ไกลพอที่จะทำให้ความเข้มของแสงที่ตกบน เลนส์ภาครับมีค่าเท่ากันตลอดพื้นที่หน้าเลนส์จึงไม่สามารถใช้สมการ (2.5) มาคำนวณได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาจากสภาพความเป็นจริงโดยการใช้สมการ (2.3) และ (2.4) โดยพิจารณาพลังงานที่ภาครับจากสมการ (2.4) จะได้

$$P_R = [1 - J_0^2(x') - J_1^2(x)] \tau_a \cdot \tau_r \cdot \eta P_T \quad (2.11)$$

เมื่อต้องการคำนวณหาพลังงานแสงที่ระยะทาง 53.2 เมตร โดยที่

$$x' = (\sqrt{d'_t \sin \theta}) / \lambda \quad \text{และ} \quad \theta = d_r / 2R \quad \text{จะได้}$$

$$\theta = \frac{d_r}{2R} \equiv \frac{4.5 \times 10^{-2}}{2 \times 53.2} = 4.23 \times 10^{-4}$$

$$x' = \frac{\sqrt{d'_t \sin \theta}}{\lambda} = \frac{\sqrt{0.072 \times 10^{-2}} \times 4.23 \times 10^{-4}}{850 \times 10^{-9}}$$

$$= 1.126$$

$$[1 - J_0^2(x') - J_1^2(x')] = [1 - J_0^2(1.126) - J_1^2(1.126)] = 0.29$$

จากการที่  $\alpha_s + \alpha_a = 0.844 \text{ km}^{-1}$  จะได้ค่า  $\tau_a$  ดังนี้

$$\begin{aligned} \tau_a &= \text{EXP}[-(0.844 \times 53.2 \times 10^{-3})] \\ &= 0.956 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore P_R &= 0.29 \times 0.956 \times 0.674 \times 0.725 \times 10^{-2} \times 4000 \text{ } \mu\text{W} \\ &= 5.4 \mu\text{W} \end{aligned}$$



เมื่อเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้กับค่าที่วัดได้จากตาราง 2.1 จะเห็นได้ว่า มีค่าแตกต่างกันอยู่มากพอสมควร ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะว่าการนำค่า  $\alpha_s + \alpha_a$  มาใช้ไม่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของเมืองไทยประกอบกับยังไม่มีข้อมูลการวัดค่าดังกล่าวในเมืองไทย จึงไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอน แต่จากการผลการทดลองตามตารางที่ 2.1 สามารถนำมาคำนวณหาค่า  $\tau_a$  ได้โดยอาศัยสมการ 2.11 ในรูปสมการ

$$\tau_a = P_R / [1 - J_0^2(x) - J_1^2(x)] \times \tau_r \times \eta \times P_T \quad (2.12)$$

โดยการคำนวณที่ระยะทางต่าง ๆ ตั้งแต่ระยะ 35 เมตร เป็นต้นไป จะได้ผลดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าการบั่นทอนพลังงานแสงที่คำนวณจากการทดลอง

R (M)	$\tau_a$	$\alpha_s + \alpha_a \text{ (km}^{-1}\text{)}$
35	0.79	6.7
41	0.57	13.7
47	0.58	11.6
53.2	0.59	9.9

ผลการคำนวณจากตาราง 2.2 นี้ ได้ตัวเลขค่อนข้างจะสูงมาก ซึ่งอาจเป็นเพราะในการคำนวณได้เริ่มต้นมาจากการสมมติให้แหล่งกำเนิดแสงมีการกระจายของสนามอย่างสม่ำเสมอบนหน้าเลนส์ (Uniform distribution) และมีเฟสตรงกันบนช่องเปิดของเลนส์ ซึ่งทำให้

แพทเทิร์นที่ได้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน เบสเซล แต่ในความเป็นจริงการใช้ LED มิได้มีเงื่อนไข ดังเช่นสมมุติฐานเบื้องต้น ทำให้ค่าที่คำนวณได้ เป็นค่าประมาณ และมีค่าใหญ่กว่าความเป็นจริงเสมอ ทั้งนี้ เป็นเพราะว่าเงื่อนไขดังกล่าวนี้จะทำให้รับแสงได้ที่รูปแบบการกระจายที่ปลายแหลมสุด ซึ่งทำให้ค่าอัตราของกำลังแสงที่ตกใน เลนซ์รับกับลำแสงทั้งหมดมีค่าสูงที่สุด

จากการศึกษารายละเอียดของการดูคลื่นพลังงานแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เมื่อพิจารณาความยาวคลื่นในแถบ 850 nm จะมีการดูคลื่นพลังงานอย่างมาก ๆ ที่หลาย ๆ ความถี่ด้วยกัน ในส่วนของ LED เอง ก็เป็นตัวกำเนิดแสงที่ไม่เป็นแบบโคฮีเรนต์ เฟสที่เกิดขึ้นก็มีค่าไม่แน่นอน มีแถบความยาวคลื่นกว้าง การวัดพลังงานแสงที่นำมาคำนวณ เป็นการหาค่ามาจากการวัดพลังงานแสงรวม ๆ แต่การคำนวณนำค่าเหล่านี้มาเปรียบเทียบ เป็นการคำนวณที่ความยาวคลื่นของการใช้งานเพียงค่าความยาวคลื่นที่สนใจเท่านั้น (และในสภาพภูมิอากาศที่ชื้นและฝุ่นละอองมากมาย เช่น กรุงเทพฯ) จึงทำให้ค่าที่ได้ผิดพลาดได้ และเนื่องจากการทดลองเริ่มมาจากการใช้ LED ที่มีแพทเทิร์นแบบ OC-1 ซึ่งมีคุณสมบัติไม่ดีนัก ดังนั้นจึงไม่สามารถนำไปใช้กับแหล่งกำเนิดแสงแบบอื่น ๆ ได้โดยตรง

#### 2.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นทำให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญหลายประการซึ่งพอสรุปได้ดังนี้ คือ

- (1) แหล่งกำเนิดแสงแบบ LED และโฟโตไดโอดแบบ PIN PD นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสม เมื่อคำนึงถึงความสะดวกในการประกอบระบบและต้นทุนของระบบ
- (2) แพทเทิร์นการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสงมีผลต่อประสิทธิภาพของการเชื่อมต่ออย่างมาก ขณะเดียวกันก็มีผลต่อรูปแบบการกระจายแสงของระบบอีกด้วย
- (3) ระบบที่นำ LED มาใช้จะมีการลู่ออกของลำแสงค่อนข้างสูง
- (4) การคำนวณกำลังแสงที่เข้าสู่ภาครับสามารถใช้หลักการของสายอากาศแบบช่องเปิดทรงกลม (Circular aperture antenna) ได้