

การศึกษาคุณสมบัติของระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ที่ใช้การมอดูเลตแบบ VPPM  
A Study of Visible Light Communication Systems with VPPM Modulation Techniques

ดิสพล ฉ่ำเฉียวกุล<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 73170

E-mail: ditsapon.chu@mutr.ac.th

**บทคัดย่อ**

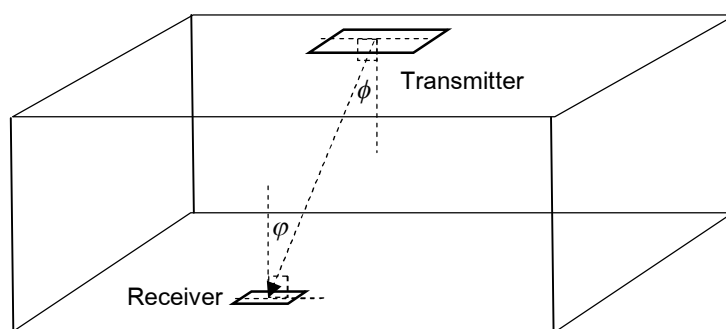
บทความนี้นำเสนอการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของระบบสื่อสารที่ใช้การประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ เป็นการนำแหล่งกำเนิดแสงสว่างประเภทหลอดไดโอดเปล่งแสงแบบ MR-16 สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ที่ขายเป็นผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาดมาทดสอบและนำข้อมูลที่ได้เหล่านั้นมาใช้ประกอบการจำลองระบบสื่อสาร มีการจำลองการทำงานของภาครับและส่งข้อมูลแบบดิจิทัลที่ใช้การมอดูเลตแบบ Variable Pulse Position Modulation และวิเคราะห์คุณสมบัติในการรับและส่งข่าวสารดิจิทัล ผลลัพธ์จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการจำลองระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองจริงบางส่วนประกอบการจำลองระบบสื่อสารให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการทดลองด้วยอุปกรณ์จริง แหล่งกำเนิดแสงประเภทหลอดไดโอดเปล่งแสงสำหรับการส่องสว่างที่เป็นผลิตภัณฑ์วางขายตามท้องตลาดสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงของระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ อย่างไรก็ตามมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงอัตราเร็วของการรับและส่งข่าวสารดิจิทัลเนื่องจากการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราที่มากเกินไปส่งผลให้ระบบสื่อสารมีอัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้นจนอาจไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน

คำสำคัญ: การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ หลอดไดโอดเปล่งแสง การจำลองระบบสื่อสาร

**1. บทนำ**

การสื่อสารทางแสง (Optical communications) [1] เป็นการสื่อสารรูปแบบหนึ่งซึ่งใช้แสง (Light) หรือรังสี (Ray) เป็นพาหะในการส่งถ่ายข้อมูลระหว่างต้นทางและปลายทาง ปัจจุบันระบบสื่อสารทางแสงได้รับการนำไปใช้งานหลากหลายรูปแบบ อาทิ การรับส่งข้อมูลโครงข่ายอินเทอร์เน็ตระหว่างประเทศ และ การรับส่งข้อมูลระยะใกล้สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (Visible light communications หรือ VLC) [2] คือการสื่อสารทางแสงรูปแบบหนึ่งซึ่งใช้แหล่งกำเนิดแสงประเภทหลอดไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode) ซึ่งเปล่งแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเพื่อการส่งข้อมูล ระบบดังกล่าวสามารถใช้เป็นระบบสื่อสารและระบบส่องสว่างภายในอาคารได้ในเวลาเดียวกัน ปัจจุบันมีการนำหลอดไดโอดเปล่งแสงมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงภายในและภายนอกอาคารเนื่องจากมีอายุการใช้งานยาวนาน ประหยัดพลังงาน และ มีความร้อนระหว่างการใช้งานน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ดังนั้นระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้จึงได้รับความสนใจในการวิจัยในด้านต่าง ๆ ใน พ.ศ. 2547 T. Komine, และ M. Nakagawa ได้นำเสนอหลักการวิเคราะห์ระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ พ.ศ. 2551 L. Zeng D. O'Brien และคณะผู้วิจัยได้นำเสนอแนวทางเพิ่มอัตราเร็วสำหรับการส่งข้อมูลของการสื่อสารทางแสงด้วยการนำการปรับแต่งสัญญาณ (Equalization) มาใช้งาน [3] ใน พ.ศ. 2552 L. Zeng D. O'Brien และในเวลาต่อมาคณะผู้วิจัยก็ได้้นำเสนอการนำหลักการของระบบสื่อสารแบบ Multiple-Input, Multiple-Output (MIMO) มาใช้งานร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ [4] เพื่อเพิ่มอัตราเร็วสำหรับการรับส่งข้อมูล พ.ศ. 2555 S. Rajagopal R.D. Roberts บรรยายหลักการมอดูเลตสัญญาณของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้และการควบคุมการส่องสว่าง [5] พ.ศ. 2553 H.Q. Nguyen, J.H. Choi และคณะผู้วิจัยได้นำเสนอหลักการพัฒนาโปรแกรมจำลองการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ด้วยโปรแกรม MATLAB [6]

งานวิจัยข้างต้นส่วนใหญ่เป็นการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงด้วยหลอดไดโอดเปล่งแสงเพื่อการใช้ประกอบการวิจัยในลักษณะต่าง ๆ เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีบริษัทต่าง ๆ ผลิตและวางจำหน่าย



รูปที่ 1 พื้นฐานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้

แหล่งกำเนิดแสงประเภทหลอดไดโอดเปล่งแสงเพื่อการส่องสว่างโดยทั่วไป ดังนั้นหากมีการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องคุณสมบัติของอุปกรณ์กำเนิดแสงเหล่านี้ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาปรับใช้กับการสื่อสารทางแสง จากสาเหตุข้างต้นบทความนี้จึงนำเสนอการจำลองคุณสมบัติของระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของระบบสื่อสารที่ใช้การประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ มีการนำข้อมูลคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงสว่างประเภทหลอดไดโอดเปล่งแสงแบบ MR-16 สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ที่ขายเป็นผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาดมาใช้ประกอบการทดสอบ มีการจำลองการทำงานของภาครับและส่งข้อมูลแบบดิจิทัลที่ใช้การมอดูเลตแบบ Variable Pulse Position Modulation (VPPM) ซึ่งง่ายแก่การพัฒนาต้นแบบและวิเคราะห์คุณสมบัติในการรับและส่งข้อมูลดิจิทัล ผลลัพธ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาต้นแบบระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ต่อไป

## 2. โครงสร้างระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้

รูปที่ 1 แสดงการทำงานพื้นฐานของระบบสื่อสารทางแสงสำหรับการสื่อสารภายในอาคาร แหล่งกำเนิดแสงซึ่งทำจากหลอดไดโอดเปล่งแสงถูกติดตั้งไว้บริเวณเพดานภายในอาคารโดยมีการควบคุมความเข้มแสงให้สัมพันธ์กับข่าวสารที่ต้องการส่งและปริมาณการส่องสว่างที่ต้องการใช้งาน สัญญาณทางแสงที่ถูกกำเนิดขึ้นโดยแหล่งกำเนิดแสง (Light source) แพร่ผ่านอากาศไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ภายในอาคาร สำหรับภาครับ (Receiver) เป็นการตรวจจับสัญญาณทางแสงด้วยโฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) เพื่อกำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อการประมวลผลต่าง ๆ ต่อไป การทำงานของระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้มีลักษณะดังรูปที่ 2 โดยที่เป็นการจำลองการส่งข้อมูลไบนารีจากภาคส่งไปสู่ภาครับ การทำงานของภาคส่ง (Transmitter) เป็นการนำข้อมูลไบนารี  $d_i$  ผ่านการมอดูเลต (Modulation) เพื่อกำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้า  $p_s(t)$  ซึ่งถูกนำไปขับหลอดไดโอดเปล่งแสง หากกำหนดให้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของหลอดไดโอดเปล่งแสง  $h_{LED}(t)$  มีคุณสมบัติดังสมการ [4]

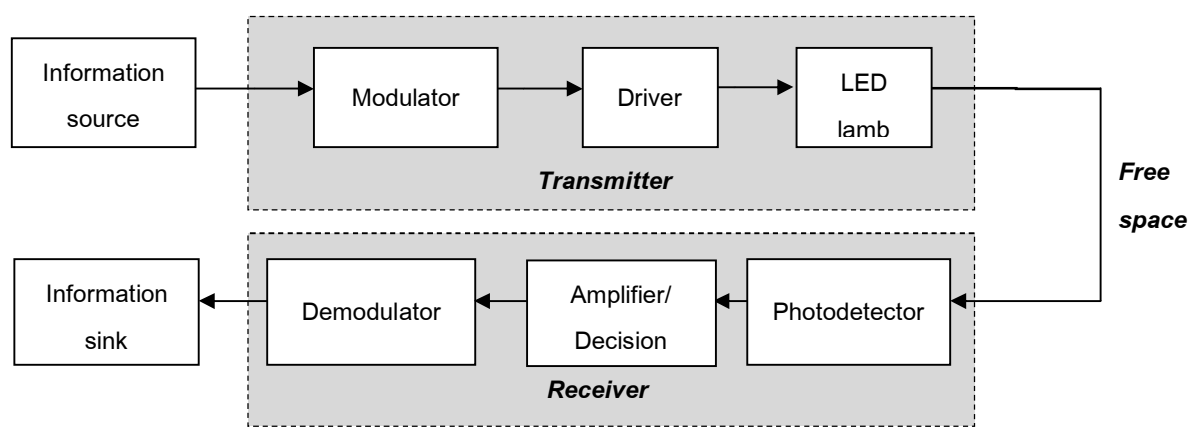
$$h_{LED}(t) = e^{-\omega_c t} \tag{1}$$

เมื่อ

$$\omega_c = \frac{p}{T_r + T_f} \tag{2}$$

โดย  $T_r$  และ  $T_f$  คือห้วงเวลาขอบขาขึ้น (Rise time) และขอบขาลง (Fall time) ของหลอดไดโอดเปล่งแสง ตัวแปร  $p$  เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง สัญญาณทางแสงที่ถูกขับออกมาจากหลอดไดโอดเปล่งแสงใด ๆ  $p_i(t)$  สามารถคำนวณได้จากการคำนวณค่าคอนโวลูชันระหว่าง  $p_s(t)$  และ  $h_{LED}(t)$

$$P_i(t) = P_s(t) * h_{LED}(t) \tag{3}$$



รูปที่ 2 การทำงานของระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้

สัญญาณทางแสงที่กำเนิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงถูกส่งผ่านอากาศไปยังภาครับซึ่งใช้โฟโตดีเทคเตอร์แปลงสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เนื่องจากหลอดไดโอดเปล่งแสงที่ใช้ในระบบอาจมีจำนวนมากว่าหนึ่งหลอดดังนั้นสัญญาณทางแสงที่ตรวจจับได้ที่อุปกรณ์ตรวจจับแสงจะเกิดจากผลรวมของผลคูณระหว่างความเข้มแสงที่กำเนิดจากหลอดไดโอดเปล่งแสงต่าง ๆ กับ Channel DC gain  $H_d(0)$  ระหว่างหลอดไดโอดเปล่งแสงและอุปกรณ์ตรวจจับแสง

$$P_r = \sum \left\{ P_i H_d(0) + \sum P_i dH_{ref}(0) \right\} \quad (4)$$

แสงที่แพร่จากหลอดไดโอดเปล่งแสงมาสู่อุปกรณ์ตรวจจับแสงโดยตรง (Line-of-sight propagation path) ของแสงที่เกิดจากแสงที่มีการเดินทางจากหลอดไดโอดเปล่งแสงมาสู่โฟโตดีเทคเตอร์โดยมีการสะท้อน กำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงมีการแผ่รังสีแบบ Lambertian โดยมีออร์เดอร์ของการแผ่รังสี (Order of order) ของการเปล่งแสงระหว่างหลอดไดโอดเปล่งแสงใด ๆ และโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าเป็น  $\phi$  องศาของการรับแสง (Half field of view) มีค่าเป็น  $\Psi$  จะได้ว่า Channel DC gain ระหว่างหลอดไดโอดเปล่งแสงใด

$$H_d(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) & ; 0 \leq \psi \leq \Psi \\ 0 & ; \psi > \Psi \end{cases} \quad (5)$$

แสงและโฟโตดีเทคเตอร์  $T_s(\psi)$  คืออัตราขยายของ Optical filter และ  $g(\psi)$  เป็นค่าอัตราขยายของ

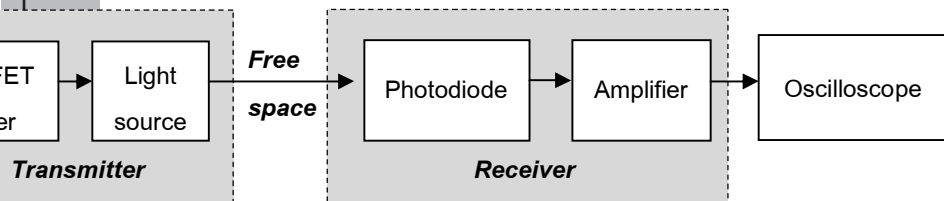
$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c} & ; 0 \leq \psi \leq \Psi \\ 0 & ; \psi > \Psi \end{cases} \quad (6)$$

index) สำหรับภาครับมีการใช้โฟโตดีเทคเตอร์เพื่อตรวจจับแสงในย่านความยาวคลื่นที่ตาของมนุษย์ ทางไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงที่ตรวจจับได้ดังสมการ

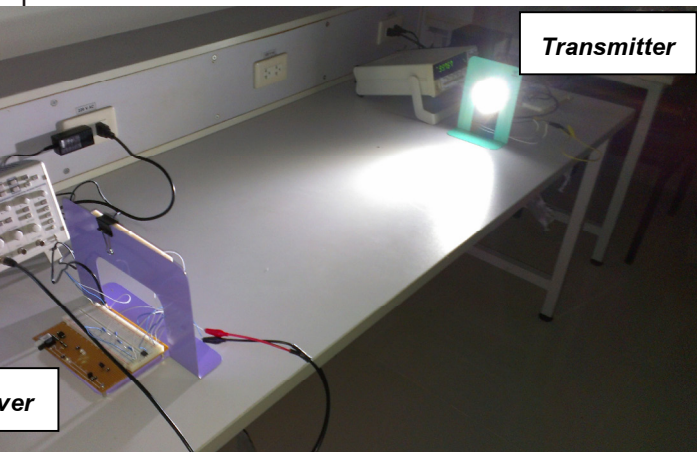
$$I_r(t) = \mathcal{R}P_r(t) \quad (7)$$

โฟโตดีเทคเตอร์ สัญญาณ  $I_r$  ที่ได้จะถูกใช้ในการตีโมดูเลตเพื่อกำเนิดบิตข่าวสาร  $d_i$  เพื่อการใช้งานต่อไป สัญญาณรบกวนแบบช็อต (Shot noise) และสัญญาณรบกวนอุณหภูมิ (Thermal noise) ในกรณีที่ใช้ Off Keying (OOK) ค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณข่าวสารต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio) ด้วยแสงที่มองเห็นได้สามารถคำนวณได้จาก

$$SNR = \frac{(\mathcal{R}P_r)^2}{2\sigma_T^2} \quad (8)$$



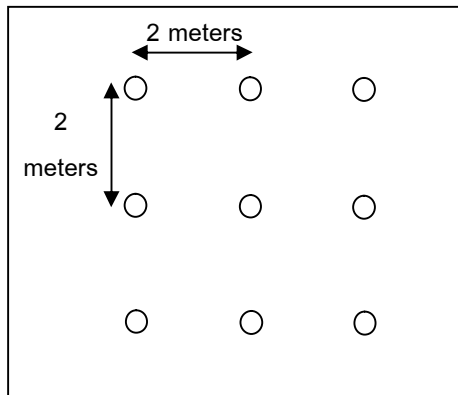
รูปที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติของหลอดไดโอดเปล่งแสง



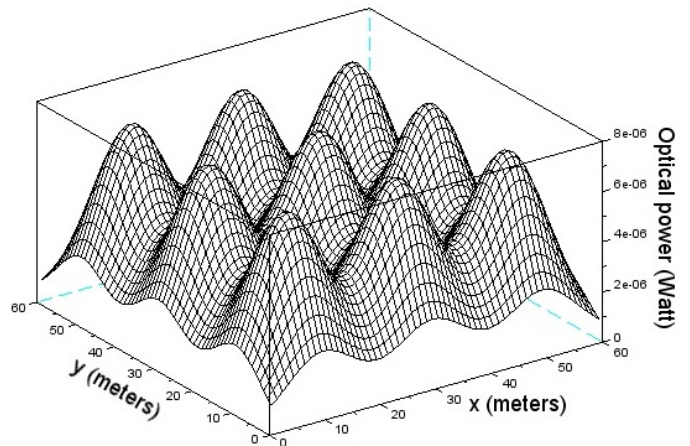
จัดวางอุปกรณ์เพื่อการทดสอบผลตอบสนองอิมพัลส์ของหลอดไดโอดเปล่งแสง

### 3. การวิเคราะห์ผลตอบสนองของอิมพัลส์ของหลอดไดโอดเปล่งแสงสำหรับส่องสว่าง

เพื่อให้สามารถจำลองคุณสมบัติของระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ที่มีผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์จริง งานวิจัยนี้มีการทดสอบการรับส่งสัญญาณโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงและโฟโตดีเทคเตอร์เพื่อนำผลลัพธ์จากการทดลองมาปรับแต่งตัวแปรในการจำลองระบบสื่อสารต่อไป แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดสอบเป็นแหล่งกำเนิดแสงประเภทหลอดไดโอดเปล่งแสงแบบ MR-16 ที่ใช้แรงดันกระแสไฟฟ้า 12 โวลต์ สำหรับการส่องสว่างภายในอาคาร มีความสว่าง 860 แคนเดลาหรือ  $1.25915 \text{ W.sr}^{-1}$  ตัวแปร Half beam angle มีค่าเป็น 18 องศา การทดสอบคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงเป็นไปดังภาพที่ 3 และ 4 เป็นการนำสัญญาณลูกคลื่นพัลส์ซึ่งกำเนิดจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ส่งต่อเข้าสู่ภาคขับหลอดไดโอดเปล่งแสงซึ่งต่อกับแหล่งกำเนิดแสง การตรวจจับสัญญาณแสงที่กำเนิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงใช้โฟโตไดโอดในการตรวจจับแสง สัญญาณที่ได้ถูกขยายและส่งเข้าสู่ออสซิลโคปเพื่อการแสดงผล แหล่งกำเนิดแสงและโฟโตดีเทคเตอร์อยู่ห่างกัน 1 เมตร จากการทดสอบข้างต้นพบว่าเมื่อป้อนสัญญาณลูกคลื่นพัลส์ซึ่งมีความถี่ 100Hz เข้าสู่วงจรขับหลอดไดโอดเปล่งแสงจะได้ว่าสัญญาณลูกคลื่นพัลส์ที่ภาคส่งและสัญญาณที่ตรวจจับได้ที่ได้ที่ภาครับมีห้วงเวลาขอบขาขึ้น  $t_r$  และขอบขาลง  $t_f$  ของสัญญาณขาออกมีค่าเป็น 2.4ms และ 3.8ms ตามลำดับ ค่าของตัวแปร  $p$  ในสมการผลตอบสนองอิมพัลส์ของหลอดไดโอดเปล่งแสงที่ใช้งานมีค่าเป็น 4.75



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการจำลองระบบสื่อสาร (ก) ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง (ข) กำลังงานแสงที่ตรวจจับได้ที่โฟโตดีเทคเตอร์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของห้อง

### 4. ผลการจำลองระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้

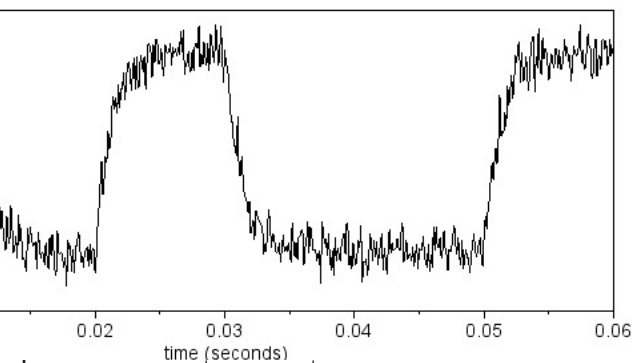
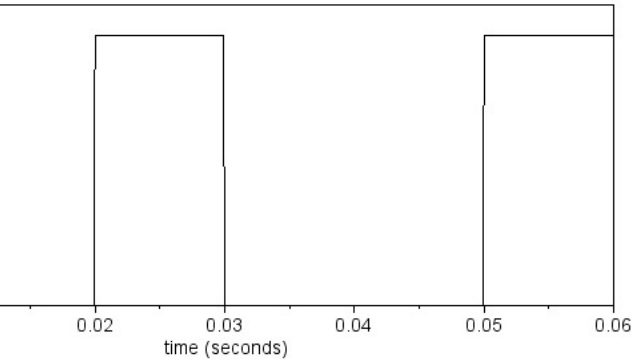
เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ที่มีการมอดูเลตแบบ VPPM และใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงที่มีคุณสมบัติดังในหัวข้อที่ 3 มีการจำลองระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ด้วยโปรแกรมจำลองระบบสื่อสารโดยนำข้อมูลแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากการทดสอบจริงมาใช้ประกอบการจำลองระบบสื่อสาร โปรแกรมจำลองระบบสื่อสารเป็นการจำลองการส่องสว่างภายในห้องที่มีความกว้างและยาวขนาด 6 เมตร ระยะห่างระหว่างเพดานและภาครับบนพื้นห้องมีค่าเป็น 2.5 เมตร ภายในห้องติดตั้งแหล่งกำเนิดแสง 9 จุดโดยแต่ละจุดมีระยะห่างสองเมตรดังแสดงในรูปที่ 5(ก) การจำลองระบบไม่มีการนำผลของการสะท้อนของแสงที่ผนังมาประกอบการพิจารณา ภาครับติดตั้งอยู่บริเวณกลางห้อง ตัวแปรต่าง ๆ ของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปดังหัวข้อที่ผ่านมา โฟโตดีเทคเตอร์ที่ใช้งานมีค่า Radiant sensitive area เป็น 7 ตารางมิลลิเมตร ค่า Responsitivity และองศาสูงสุดในการรับแสงของโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าเป็น 0.54 A/W และ 55 องศาตามลำดับ กำลังงานแสงที่ตกกระทบพื้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของห้องมีลักษณะดังรูปที่ 5(ข)

รูปที่ 6 และ 7 เป็นผลการจำลองลักษณะของสัญญาณทางแสงที่กำเนิดขึ้นจากภาคมอดูเลตของภาคส่งและสัญญาณทางแสงที่ตรวจจับได้ที่ภาครับในกรณีที่ระบบสื่อสารใช้การมอดูเลตแบบ OOK และ VPPM ตามลำดับ ค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณข่าวสารต่อสัญญาณมีค่า 20 เดซิเบลล์ ภาคส่งกำเนิดข้อมูลไบนารีด้วยอัตรา 100 บิตต่อวินาที (Bits/second หรือ BPS) การมอดูเลตแบบ VPPM มีระดับการส่องสว่าง 60% ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่ตรวจจับได้ที่โฟโตดีเทคเตอร์ของภาครับมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณที่

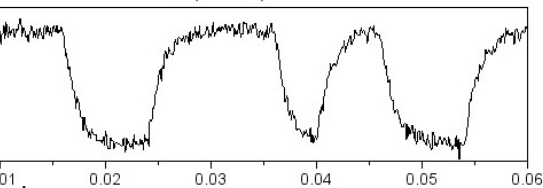
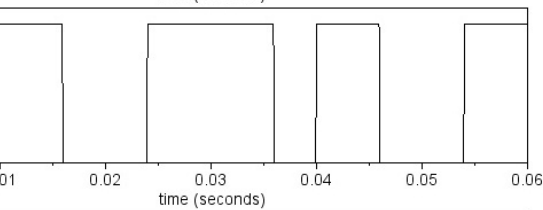
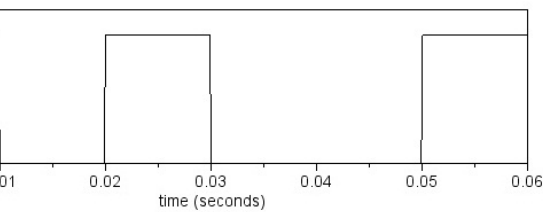


และผลการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองระบบสื่อสารได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการทดลองด้วย

ความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate หรือ BER) ของระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ซึ่งใช้ส่งข้อมูล 50 100 และ 200 บิตต่อวินาที จากการทดสอบพบว่า การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ระบบสื่อสารที่ใช้การมอดูเลตแบบ VPPM ที่มีอัตราการส่งข้อมูลบิตมากกว่ากรณีที่ส่งข้อมูลด้วยอัตรา 50 บิตต่อวินาที รูปที่ 8(ข) แสดงความสัมพันธ์แสงที่มองเห็นได้ซึ่งใช้การมอดูเลตแบบ VPPM ที่มีระดับการส่องสว่างเป็น 30% 50% และ ๗๐% ระดับการส่องสว่างเป็น 50% มีอัตราความผิดพลาดบิตน้อยที่สุด

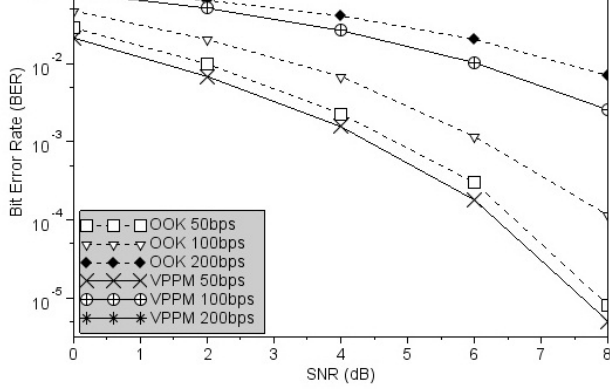


จากการจำลองระบบสื่อสารกรณีที่มีการมอดูเลตแบบ OOK

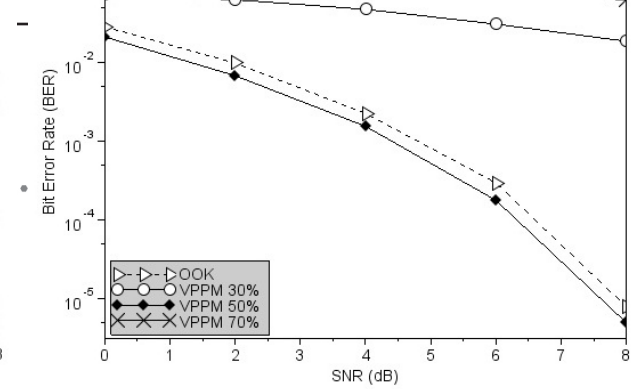


จากการจำลองระบบสื่อสารกรณีที่มีการมอดูเลตแบบ VPPM





(ก)



(ข)

รูปที่ 8 ผลการจำลองระบบสื่อสาร (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตและอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตและระดับความสว่างของการมอดูเลตแบบ VPPM

### บทสรุป

บทความนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติและความสามารถในการนำมาใช้ในการรับส่งสัญญาณทางแสงของแหล่งกำเนิดแสงประเภทหลอดไดโอดเปล่งแสงแบบ MR-16 ที่ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์และวางขายเป็นผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด มีการพัฒนาโปรแกรมจำลองการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และนำข้อมูลคุณสมบัติของหลอดไดโอดเปล่งแสงที่ได้จากการทดลองมาปรับใช้งานผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการจำลองระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองจริงมาบางส่วนมาประกอบให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการทดลองด้วยอุปกรณ์จริง ผลการจำลองระบบสื่อสารยังแสดงให้เห็นว่าแหล่งกำเนิดแสงประเภทหลอดไดโอดเปล่งแสงสำหรับการส่องสว่างที่เป็นผลิตภัณฑ์วางขายตามท้องตลาดสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงของระบบสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้อย่างไรก็ตามมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงอัตราเร็วของการรับและส่งข่าวสารดิจิทัลเนื่องจากการรับส่งข้อมูลด้วยอัตรามากเกินไปส่งผลให้ระบบสื่อสารมีอัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้น ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้ถูกนำไปใช้เพื่อกำหนดรูปแบบการมอดูเลตสัญญาณทางแสงและตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสมต่อการจัดทำโครงการวิจัยเพื่อพัฒนาต้นการสื่อสารภายในอาคารแบบประหยัดพลังงานด้วยแสงที่มองเห็นได้ต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Ray Tricker, *Optoelectronics and fiber optic technology*, 2002
- [2] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Light", *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, Vol. 50, No. 1, February, 2004
- [3] L. Zeng, D. O'Brien, "Improvement of Data Rate by Using Equalization in an Indoor Visible Light Communication System," *Proc. the 4<sup>th</sup> International Conference on Circuit and Systems for Communications*, pp. 678-682, May 2008.
- [4] L. Zeng, D.O'Brien, et. al., "High Data Rate Multiple Input Multiple Output (MIMO) Optical Wireless Communications Using White LEDs Lighting," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 27, No. 9, pp. 1654-1662, December 2009.
- [5] S. Rajagopal, R.D. Robert, et. al., "IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support," *IEEE Communication Magazine*, pp. 72-82, March 2012.
- [6] H.Q. Nguyen, J.H. Choi, et. al., "A MATLAB-based simulation program for indoor visible light communication system," *Proc. the 9<sup>th</sup> IEEE/IET International Symposium on COMMUNICATION SYSTEMS, NETWORKS & DIGITAL SIGNAL PROCESSING*, pp. 537-541, July 2010.