

เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากสุด  
สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร  
Partial-Response Maximum-Likelihood Technique  
for Indoor Wireless Visible Light Communication System

อดิศร แก้วก้ำดี<sup>1\*</sup> เจษฎา สาททอง<sup>1</sup> และ ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนគรม

\*adisorn@npru.ac.th

### บทคัดย่อ

ในอนาคตอันใกล้นี้หลอดไฟฟ้าที่ให้แสงสว่างในบ้านกำลังจะถูกเปลี่ยนเป็นหลอดแอลอีดี เพราะมีข้อดีหลายอย่าง เช่น ประหยัดพลังงาน อายุการใช้งานยาว ขนาดเล็ก และระยะความร้อนดี เป็นต้น งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอวิธีการออกแบบ วงจรภาครับด้วยเทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากสุด ของระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยติดตั้งตัวรับส่งบนเพดานห้อง ตัวรับอยู่บนโต๊ะทำงาน และใช้การมอดูลเตด้วยความเข้มแสงแบบออโต้เคในการส่งสัญญาณ นอกจากระยะสั้นแล้ว ที่จะสามารถสื่อสารได้ในระยะใกล้ ที่ไม่ต้องติดตั้งตัวรับส่งบนเพดานห้องที่ใช้กันทั่วไปที่เป็นแบบออโนมัติกในรูปของอัตรา ข้อผิดพลาดบิต ณ อัตราสั่งข้อมูลต่างๆ

**คำสำคัญ:** การสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็น, เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากสุด, อีคาวไลเซอร์

### Abstract

In near future, the conventional electric lamps will be replaced by the white light emitting diode (LED) lamps because it offers many advantages such as low power consumption, long lifetime, small size, cool operation system. This work proposes the receiver design based on a partial-response maximum-likelihood technique for the indoor wireless visible light communication system, where a transmitter is placed on the ceiling, a receiver is on the table, and the signal transmission is based on the on-off keying intensity modulation. In addition, we also compare the performance between the proposed system and the conventional analog system in terms of bit-error rate at different data rates.

**Keywords:** visible light communication, partial-response maximum-likelihood technique, equalizer

### 1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการให้แสงสว่างจากแอลอีดี (LED: light emitting diode) เริ่มถูกนำมาแทนหลอดฟู๊ฟอเรสเซนต์ (fluorescent lamp) และหลอดอินแคนเดสเซนต์ (incandescent lamp) ที่ให้แสงสว่างภายในอาคาร เนื่องจากมีข้อดี มากมายเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการให้แสงสว่างแบบที่ใช้กันทั่วไป เช่น ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อย มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน มีขนาดที่เล็ก สามารถตอบสนองความต้องการได้ดี และระยะความร้อนได้ดี เป็นต้น นอกจากนี้เทคโนโลยีแอลอีดียังถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงคือใช้แสงเป็นตัวส่งผ่านข้อมูล [1] คาดการณ์ในอนาคตไม่ถึง 10 ปี หลอดแอลอีดีสีขาว (white LED) จะกลายเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ นำมาใช้เพื่อให้แสงสว่างภายในอาคารอย่างแพร่หลาย ซึ่งนอกจากให้ความสว่างแล้วยังสามารถนำมาเป็นตัวส่งสัญญาณข้อมูลของการสื่อสารไร้สายด้วยแสงในรูปแบบข้อมูลต่าง ๆ อาทิเช่น ส่ง

สัญญาณแอนะล็อก ส่งสัญญาณดิจิทัล เป็นต้น รูปแบบการส่งข้อมูลด้วยแสงนี้มีชื่อเรียกว่า การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (VLC: visible light communication) โดยใช้แหล่งอิเล็กทรอนิกส์

จากการบทววนวรรณกรรมพบว่า นักวิจัยจากประเทศญี่ปุ่นโดย Komine และ Nakagawa [1] นำเสนอหลักการของระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่ใช้หลอดแหล่งอิเล็กทรอนิกส์เป็นระบบโครงข่ายภายในอาคาร โดยตัวส่งเป็นอาร์เรย์แหล่งอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถให้แสงสว่างครอบคลุมทั่วพื้นที่ของห้อง และใช้โฟโตไดโอด (photodiode) ในการรับแสงที่ส่งมาจากตัวส่ง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แสงที่รับได้โดยตรง (directed light or line of sight) และแสงที่สะท้อนมาตกระยะ (reflected light) โดยสามารถแสดงการกระจายกำลังงานที่รับได้ทั่วพื้นที่ของห้องได้ ซึ่งมีกำลังงานโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2.5 dBm อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้น ก็จะส่งผลให้อัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR: signal-to-noise ratio) ลดลง โดยมีสาเหตุมาจากการสื่อสารทั้งน้ำหนักและตកกระยะของแสง และการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI: intersymbol interference) ซึ่งสามารถลดผลกระทบจากปัญหาดังกล่าวได้โดยการใช้ช่วงจรริยาอิเลคทรอนิกส์ (equalizer) เพื่อทำการปรับปรุงสัญญาณก่อนส่งไปยังวงจรตรวจหา นอกเหนือไปจากนี้ Zeng และคณะ [2] ได้นำเสนอการรับ-ส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่งข้อมูล 16-32 Mb/s (เมกะบิตต่อวินาที) โดยการออกแบบวงจรกรอง (filter) เพื่อปรับคุณภาพของสัญญาณครับก่อนส่งไปยังวงจรตรวจหา อย่างไรก็ตาม Nguyen และคณะ [3] ได้นำเสนอแบบจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามพื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น เช่น ตำแหน่งของตัวส่ง และการสื่อสารทั้งของแสงที่ตกกระยะกับผนังทั้งสี่ด้านภายในห้อง จากนั้นก็คำนวณความเร็วที่แสงเดินทางจากตัวส่งไปยังตัวรับ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการส่งข้อมูลแบบ NRZ-OOK มีสมรรถนะมากขึ้นถ้ามีการใช้เทคนิคการมอดูลูตเข้ามาช่วย สุดท้าย Lee และคณะ [4] ได้แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารเป็นสเปกตรัมกำลังงานตลอดช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคลื่นแสงจากหลอดแหล่งอิเล็กทรอนิกส์ช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้างประมาณ 380 ถึง 780 นาโนเมตร ซึ่งทำให้สามารถส่งสัญญาณได้มากต่อตัวส่วนของความยาวคลื่น ในขณะที่แสงอินฟราเรดจะมีแบนด์วิดท์ที่แคบกว่า [4] ดังนั้นสรุปได้ว่าปริมาณของแบบดิจิทัลที่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหลอดแหล่งอิเล็กทรอนิกส์และค่าสัมประสิทธิ์การสื่อสารทั้งของวัสดุตัวรับและตัวส่งที่มองเห็นภายในห้อง

นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบ VLC มีลักษณะเป็นแบบแอนะล็อก [2] ซึ่งทำให้การตรวจหาข้อมูลมีสมรรถนะไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้นำเสนອการออกแบบวงจรภาครับโดยใช้เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนค่าจะเป็นมากสุด [5] (PRML: partial-response maximum-likelihood) ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบดิจิทัล สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร ซึ่งจากการทดลองในระบบ VLC ภายในอาคารที่ติดตั้งตัวส่งไว้บนเพดานเพื่อแพร่กระจายแสงสว่างให้ทั่วพื้นที่ของห้อง และตัวรับสัญญาณ (โฟโตไดโอด) วางอยู่บนเตียง อัตราการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล พบร่วมกันที่ 2.5 Mb/s ที่ความสว่างของหลอดแหล่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งตัวส่งไว้บนเพดานเพื่อแพร่กระจายแสงสว่างให้ทั่วพื้นที่ของห้อง และตัวรับสัญญาณ (โฟโตไดโอด) วางอยู่บนเตียง ทำให้สามารถสื่อสารได้远

## 2. แบบจำลองระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร

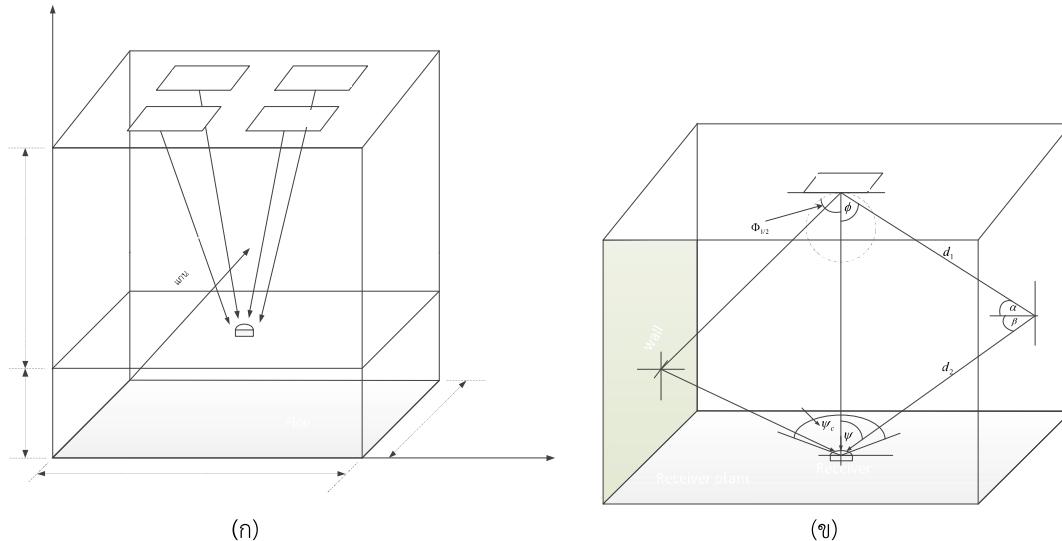
ระบบ VLC ภายในอาคารเกิดจากการใช้แสงสว่างจากหลอดแหล่งอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวกลางในการส่งข้อมูล โดยหลอดแหล่งอิเล็กทรอนิกส์จะติดตั้งเป็นอาร์เรย์ (array LED) [1] เพื่อให้แสงสว่างเป็นไปตามมาตรฐานสากลคือ 300 ถึง 1,500 ลักซ์ (lux) สำหรับห้องทำงานภายในอาคาร [1] และ [2] ภาพที่ 1 แสดงแบบจำลองของห้องที่มีขนาด  $5 \times 5 \times 3$  เมตร โดยตัวส่ง (transmitter) จะใช้หลอดแหล่งอิเล็กทรอนิกส์ติดตั้งบนเพดานห้องเพื่อแพร่กระจายแสงสว่างไปบริเวณรอบ ๆ ห้อง และตัวรับ (receiver) จะใช้โฟโตไดโอดที่วางบนเตียงทำงานที่สูงจากพื้น 0.85 เมตร นอกจากนี้ยังกำหนดให้หลอดแหล่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งตัวมีกำลังงานเท่ากับ 30 มิลลิวัตต์ โดยความเข้มแสงภายในห้องสามารถคำนวณได้จาก [3]

$$I(\phi) = I(0) \cos^m(\phi) \quad (1)$$

เมื่อ  $I(\phi)$  คือความเข้มแสงที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่งนั้นมุறะหัวใจทั่วไป ของห้อง ที่ตั้งกันทั่วบริเวณห้อง,  $I(0)$  คือความเข้มแสงที่ตำแหน่งศูนย์กลางของอาร์เรย์แหล่งอิเล็กทรอนิกส์ที่กำหนดให้มีรูปแบบการแพร่กระจายแบบ Lambertian (Lambertian radiation),  $m$  คือเลขลำดับการแพร่ของแสงแบบ Lambertian ซึ่งนิยามโดย

$$m = -\ln(2) / \ln(\cos \Phi_{1/2}), \quad (2)$$

เมื่อ  $\Phi_{1/2}$  คือมุขของตัวส่ง ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของกำลังงานทั้งหมดของแอลอีดี, และ  $\phi$  คือมุขของแสงแพร่อกมาจากตัวส่ง (irradiance angle) นอกจากนี้ค่าความเข้มแสงที่ได้รับจะเปลี่ยนแปลงไปตามมุmur ระหว่างตัวรับแสงกับตัวส่ง แสง โดยค่าความสว่างในแนวนานกับพื้นห้องหาได้จาก [3]



ภาพที่ 1 ระบบ VLC เมื่อ ก) ตัวรับสัญญาณได้รับแสงจากแอลอีดีโดยตรง (direct light) [2] และ ข) ตัวรับสัญญาณได้รับแสงจากแอลอีดีที่ผ่านการสะท้อนจากผนังห้อง (reflection light)

$$E_{hor}(x, y, z) = \frac{I(\phi)}{d^2 \cos(\psi)}, \quad (3)$$

เมื่อ  $d$  คือระยะทางระหว่างตัวส่งกับตัวรับ และ  $\psi$  คือมุขที่แสงตกกระทบ (incidence angle) กับไฟโตไดโอด ในทางปฏิบัติคุณลักษณะการแพร่กระจายของแสงสว่างจากหลอดแอลอีดีจะถูกกำหนดให้มีการแพร่กระจายแบบแอลเบอร์เชียน [1-3] ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่องมาจากตัวส่งที่มุ  $\phi$  ถูกกำหนดโดย

$$R_o(\phi) = [(m+1)/2\pi] \cos^m(\phi), \quad (4)$$

ดังนั้นกำลังงานที่ถูกส่งออกมากจากหลอดแอลอีดีสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{tx} = P_{LED} \times R_o(\phi), \quad (5)$$

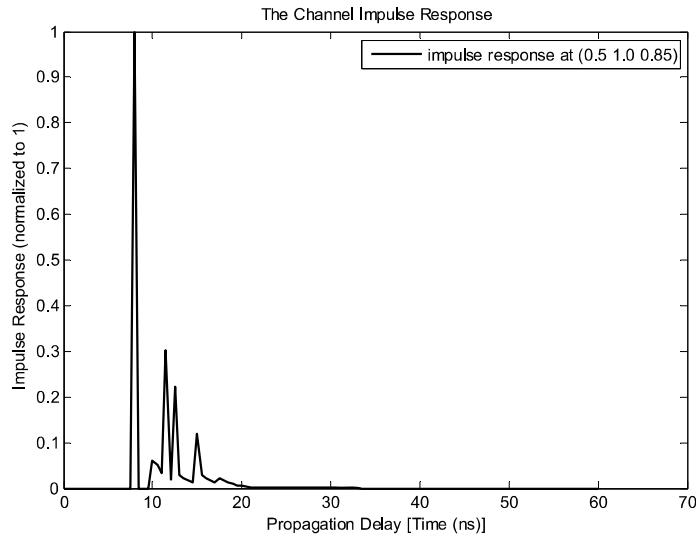
เมื่อ  $P_{LED}$  คือกำลังงานที่แผ่กระจายของแสงแอลอีดี เพราะฉะนั้นกำลังส่องสามารถหาได้โดยบริเวณรอบ ๆ พื้นที่ห้องตามที่นำเสนอใน [3]

โดยทั่วไปการเดินทางของแสงจากตัวส่งไปยังตัวรับแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แสงที่มาตกระบบโดยตรง และแสงที่สะท้อนมา โดยช่องสัญญาณแสงที่ได้รับทั้งสองแบบ [1, 2] เป็นการเดินทางของแสงมายังตัวรับโดยตรง ซึ่งเชียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้คือ

$$H(0)_{LOS} = \begin{cases} \frac{A_{rx}}{d^2} R_o(\phi) \cos(\psi) & ; 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & ; \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (6)$$

เมื่อ  $A_{rx}$  คือพื้นที่ของตัวตรวจจับ,  $d$  คือระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับ, และ  $\psi_c$  คือมุขที่ไฟโตไดโอดสามารถรับแสงได้ (FOV: field of view) ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดของแอลอีดีที่แพร่่ายังตัวรับโดยตรงคำนวณได้ดังนี้

$$P_{rx,LOS} = \sum_{i=1}^{LEDs} P_{tx} H_{LOS}^i(0), \quad (7)$$



ภาพที่ 2 ผลตอบสนองอิมพลัสของช่องสัญญาณ VLC ณ ตำแหน่งห้อง ( $x, y, z$ ) = (0.5, 1.0, 0.85)

เมื่อ  $H_{LOS}^i(0)$  คือช่องสัญญาณที่ได้รับโดยตรงจากแหล่งอีดีตัวที่  $i$  นอกจากนี้กำลังงานที่ได้รับในรูปแบบการสะท้อนของแสงสามารถคำนวณได้จาก [1]

$$dH(0)_{reflection} = \begin{cases} \frac{A_{rx}}{d_1^2 d_2^2} R_o(\phi)(\rho)(dA_{wall}) \cos(\alpha) \\ \times \cos(\beta) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) & ; 0 \leq \psi \leq \psi_c, \\ 0 & ; \psi > \psi_c \end{cases} \quad (8)$$

เมื่อ  $d_1$  และ  $d_2$  คือระยะทางจากตัวส่งกับผนังห้องและระยะทางจากผนังห้องไปยังตัวรับตามลำดับ,  $\rho$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุ,  $dA_{wall}$  คือพื้นที่ส่วนเล็ก ๆ ที่แสงตกกระทบที่ผนังทำให้เกิดมุม  $\alpha$ ,  $\alpha$  คือมุมที่แสงจากตัวส่งตกกระทบกับผนังห้อง, และ  $\beta$  คือมุมที่แสงสะท้อนจากผนังห้องไปยังตัวรับ ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่ตัวรับได้รับก็คือผลรวมของกำลังงานจากแสงโดยตรงกับแสงที่สะท้อน นั่นคือ

$$P_{rx,total} = \sum_{i=1}^{LEDs} \left[ P_{tx} H_{LOS}^i(0) + \sum_{reflections} P_{tx} H_{ref}(0) \right] \quad (9)$$

ในทางปฏิบัติผลตอบสนองอิมพลัสของระบบ VLC หาได้จาก

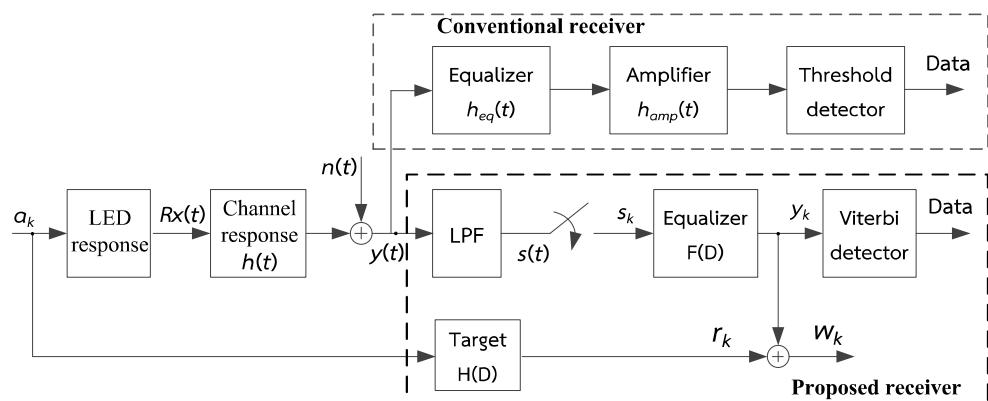
$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

เมื่อ  $h(t)$  คือรูปแบบกำลังงานแสงที่เดินทางจากตัวส่งไปยังตัวรับ ซึ่งโดยปกติจะมีรูปแบบคงที่ แต่ถ้าตัวส่งหรือตัวรับมีการเคลื่อนที่หรือมีสิ่งกีดขวางอยู่ภายในห้อง ก็จะทำให้รูปแบบการเดินทางของแสงที่ตัวรับเปลี่ยนแปลงไปด้วย ภาพที่

2 แสดงผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ VLC เมื่อตัวรับวางอยู่ ณ ตำแหน่งตามแนวแกน x เท่ากับ 0.5 เมตร ตามแนวแกน y เท่ากับ 1.0 เมตร และสูงจากพื้นเป็น 0.85 เมตร และใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ส่งจะมาถึงตัวรับภายใน 10 นาโนวินาที จากนั้นในช่วงเวลา 10 – 20 นาโนวินาที จะเป็นสัญญาณที่ส่องจากผนังมาถึงตัวรับ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ VLC [2]

พารามิเตอร์	ขนาด	พารามิเตอร์	ขนาด
Room size	$5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$	Wall reflectivity	0.7
Desk height from the ceiling	2.15 m	FOV at the receiver	$120^\circ$
Single LED power PLED	30 mW	Detector physical area of PD	$1.0 \text{ cm}^2$
LED response time	150 ns	Transmission coefficient of optical filter	1.0
Semi-angle at half power	$70^\circ$	Refractive index of lens at PD	1.5
Number of LEDs arrays	4	Photodiode responsivity (R)	0.4
Number of LEDs per array	25 (5 x 5)	Turning Parameter (P)	2
LED pitch	1 cm	Amplifier noise density	$5 \text{ pA}$
Floor reflectivity	0.15	Ambient light photocurrent	5840 uA
Ceiling reflectivity	0.8	Noise-bandwidth factor ( $I_2$ )	0.562



ภาพที่ 3 แบบจำลองช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่ม่องเห็น (VLC)

### 3. การออกแบบจราจรครับที่ใช้เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากสุด

พิจารณาแบบจำลองช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่ม่องเห็นในภาพที่ 3 เมื่อกำหนดให้ลำดับข้อมูลอนุพุต  $a_k$  ถูกส่งเข้าไปยังช่องสัญญาณที่มีผลตอบสนองแอลอีดี [2] และผลตอบสนองของช่องสัญญาณ [1, 2] โดยสัญญาณที่เอ้าต์พุตของไฟโตไดโอดเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y(t) = Rx(t) \otimes h(t) + n(t) \quad (11)$$

เมื่อ  $\otimes$  คือตัวดำเนินการคอนโวลูชัน,  $y(t)$  คือสัญญาณข้อมูลที่ว่างจราจรรับได้รับ,  $R$  คือผลตอบสนองของตัวรับไฟโตไดโอด,  $x(t)$  คือผลตอบสนองของแอลอีดี [2, 6],  $h(t)$  คือผลตอบสนองของช่องสัญญาณตามสมการที่ (10), และ  $n(t)$  คือสัญญาณรบกวนแก่สีขาวแบบบวกที่มีความหนาแน่นスペกตรัมกำลังแบบสองด้านเท่ากับ  $N_0 / 2$

สำหรับวงจรอากาศที่ใช้กันทั่วไป สัญญาณที่รับได้จากไฟโตไดโอดจะถูกส่งผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นวงจรกรองแบบแอนะล็อก [2] จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณ (amplifier) ก่อนส่งต่อไปยังวงจรอตรวจหาขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold detector) ตามที่แสดงในภาพที่ 3 อย่างไรก็ตามสำหรับวงจรอากาศที่ใช้เทคนิคผลตอบสนอง

บางส่วนควรจะเป็นมากสุด (PRML) สัญญาณ  $y(t)$  จะถูกส่งไปยังวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF: low-pass filter) และวงจรซักตัวอย่าง (sampler) ทำให้ได้เป็นลำดับข้อมูล  $s_k$  และถูกส่งไปยังวงจรตรวจหาเพื่อหาค่าประมาณของลำดับข้อมูลอนุพุต  $\hat{a}_k$

เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากสุดเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างอีคิวอลิเซอร์และวงจรตรวจหาไวเตอร์บี (Viterbi detector) [7] โดยจะต้องทำการออกแบบอีคิวอลิเซอร์และทาร์เก็ต (target) ให้เหมาะสมกับระบบ VLC ดังนี้น้ำ้าให้อีคิวอลิเซอร์มีรูปสมการคณิตศาสตร์ในโดเมน  $D$  คือ [7]

$$F(D) = \sum_{k=-K}^K f_k D^k \quad (12)$$

เมื่อ  $D$  คือตัวดำเนินการหน่วยเวลาหนึ่งหน่วย,  $K$  คือเลขจำนวนเต็มบวก, และ  $2K + 1$  คือจำนวนแท็ปหรือสัมประสิทธิ์ของอีคิวอลิเซอร์ ในทำนองเดียวกันกำหนดให้ทาร์เก็ตที่มีจำนวนแท็ปเท่ากับ  $L$  แท็ป ก็สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ในโดเมน  $D$  คือ [7]

$$H(D) = \sum_{k=0}^{L-1} h_k D^k \quad (13)$$

โดยที่  $f_k$  และ  $h_k$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นเลขจำนวนจริงในแต่ละแท็ปของอีคิวอลิเซอร์และทาร์เก็ต จุดประสงค์ของการออกแบบอีคิวอลิเซอร์และทาร์เก็ตคือทำให้ค่าข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE: mean-squared error) ระหว่างข้อมูลเอาต์พุตของอีคิวอลิเซอร์  $y_k$  และข้อมูลเอาต์พุตของทาร์เก็ต  $r_k$  ซึ่งนิยามโดย

$$E[w_k^2] = E[(s_k \otimes f_k) - (a_k \otimes h_k)]^2 \quad (14)$$

มีค่าน้อยสุด เมื่อ  $w_k = y_k - r_k$  คือข้อผิดพลาดที่ได้จากการออกแบบทาร์เก็ต, และ  $E[\cdot]$  คือตัวดำเนินการค่าคาดหมาย (expectation operator) นอกจากนี้ในกระบวนการออกแบบอีคิวอลิเซอร์และทาร์เก็ตจะใช้เงื่อนไขแบบมอนิคชั่งกำหนดให้ตัวสัมประสิทธิ์ของแท็ปตัวแรกของทาร์เก็ตมีค่าเท่ากับหนึ่ง ( $h_0 = 1$ ) [8] โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบเป็นไปตามที่อธิบายใน [7]

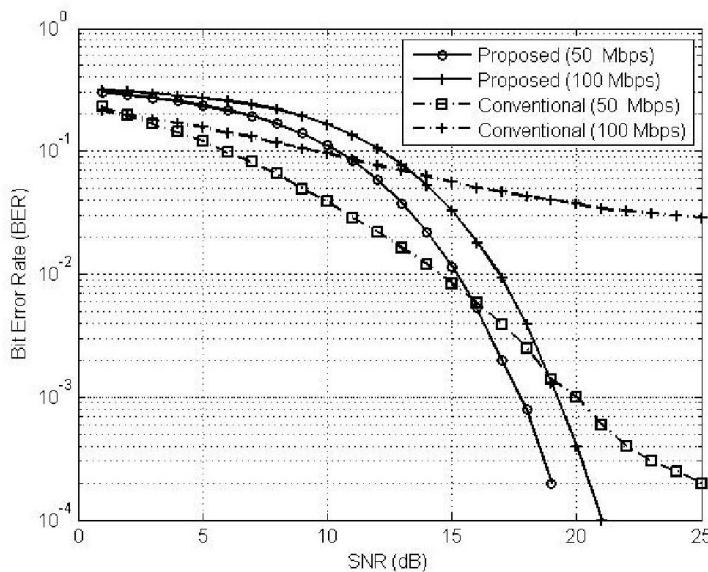
#### 4. ผลการทดลอง

ในที่นี้วงจรภาครับแบบที่นำเสน�建ใช้อีคิวอลิเซอร์ที่มีจำนวน 7 แท็ป ( $K = 3$ ) และทาร์เก็ตที่มีจำนวน 4 แท็ป ( $L = 4$ ) และค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR) นิยามโดย

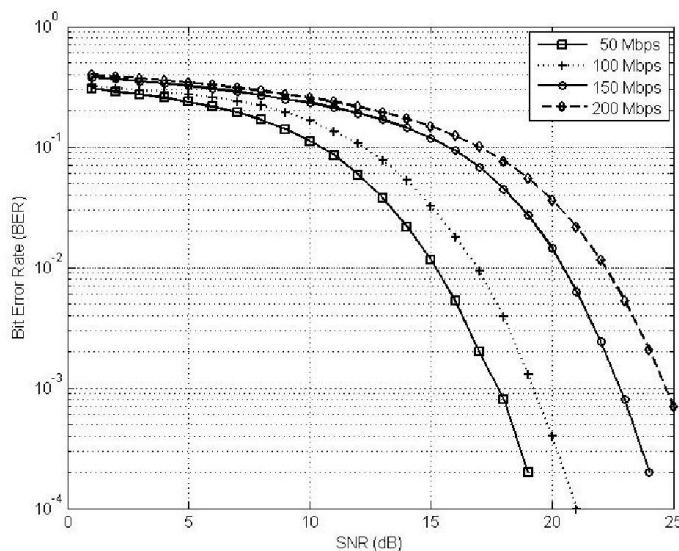
$$SNR = \frac{(RP_{rx})^2}{\sigma_{total}^2} \quad (15)$$

เมื่อ  $R$  คือผลตอบสนองของตัวรับโพโตไดโอด,  $\sigma_{total}^2$  คือค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนได้แสดงไว้โดย [2] ภาพที่ 4 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ VLC ในรูปของอัตราของผิดพลาดบิต (BER: bit-error rate) ระหว่างวงจรภาครับแบบที่ใช้กันทั่วไป (conventional receiver) และวงจรภาครับแบบที่นำเสนอด (Proposed receiver) ซึ่งพบว่าสมรรถนะของระบบจะลดลง เมื่อใช้อัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าสมรรถนะของวงจรภาครับแบบที่ใช้กันทั่วไปจะเกิดปัญหาพื้นข้อผิดพลาด (error floor) เมื่อ SNR มีค่าสูงเพียงพอ ซึ่งตรงข้ามกับสมรรถนะของวงจรภาครับแบบที่นำเสนอดที่ไม่เกิดปัญหาเรื่องพื้นข้อผิดพลาด จากราฟที่ 4 พบว่าเมื่อระบบ VLC ทำงาน ณ ค่า SNR ที่เพียงพอ วงจรภาครับแบบที่นำเสนอดจะมีสมรรถนะดีกว่าวงจรภาครับแบบที่ใช้กันทั่วไป

ภาพที่ 5 แสดงสมรรถนะของระบบ VLC ที่ใช้วงจรภาครับแบบที่นำเสนอด ณ อัตราการส่งข้อมูล 50, 100, 150 และ 200 Mb/s ซึ่งพบว่าเมื่อระบบใช้อัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้น ก็จะทำให้ระบบเกิดอัตราข้อผิดพลาดบิตสูงขึ้นด้วย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการสัญญาณที่ได้รับเชิงข้อมูลกับผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างสัญญาณที่เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้น



ภาพที่ 4 สมรรถนะของระบบ VLC ที่ใช้งานภาคับแบบที่ใช้กันทั่วไปและวงจรภาคับแบบที่นำเสนอด้วยอัตราการส่งข้อมูล 50 Mb/s และ 100 Mb/s



ภาพที่ 5 สมรรถนะของระบบ VLC ที่ใช้งานภาคับแบบที่นำเสนอด้วยอัตราการส่งข้อมูล 50, 100, 150 และ 200 Mb/s

## 5. บทสรุป

ระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็น (VLC) ภายในอาคารจะมีผลกระทบที่เกิดขึ้นกับช่องสัญญาณจำนวนมาก โดยเฉพาะการแทรกสอดระหว่างสัญญาณซึ่งทำให้ระบบ VLC ที่ใช้งานภาคับแบบที่ใช้กันทั่วไป (แบบแอนะล็อก) ไม่สามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวงจรภาคับแบบดิจิทัลที่ใช้เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากสุดในการออกแบบอีโคว่าเลเซอร์และทาร์เก็ต ซึ่งจากการทดลองพบว่างจรภาคับแบบที่นำเสนอมีสมรรถนะดีกว่าวงจรภาคับแบบที่ใช้กันทั่วไป ณ อัตราการส่งข้อมูลต่าง ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าระบบ VLC จะมีสมรรถนะดีอย่างมากเมื่อระบบใช้อัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Komine and M. Nakagawa, “Fundamental Analysis for Visible Light Communication System using LED Light,” IEEE Transaction on Consumer Electronics, vol. 50, no. 1, pp. 100 - 107, February, 2004.
- [2] L. Zeng, et al., “Improvement of Date Rate by using Equalization in an Indoor Visible Light Communication System”, accepted for presentation at IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications ©2008 IEEE, pp. 678 - 682, 2008.
- [3] H. Q. Nguyen, et al., “A Matlab-Based Simulation Program for Indoor Visible Light Communication System,” CSNDSP2010 OWC-5 ©2010 IEEE, pp. 537 - 541, 2010.
- [4] K. Lee, H. Park, et al., “Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications,” IEEE Communications Letter, vol. 15, no. 2, pp. 217 - 219, February 2011.
- [5] R. D. Cideciyan, et. al., “A PRML system for digital magnetic recording,” IEEE J. Selected Areas Commun., vol. 10, no.1, pp. 38 – 56, January 1992.
- [6] D. O’Brien, H. Le Minh, et al., “Indoor Visible Light Communications: challenges and prospects,” Free-Space Laser Communications VIII, Proc. of SPIE vol. 7091, 709106, 2008.
- [7] ปิยะ โควินท์ทวีวนน์, การประมวลผลสัญญาณสำหรับการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล เล่ม 2: การออกแบบวงจรภาครับ, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค), 2550.
- [8] J. Moon and W. Zeng, “Equalization for maximum likelihood detector,” IEEE Trans. on Magnetics, vol. 31, no. 5, pp. 2340 – 2342, September 2002.