

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

อดิศร แก้วภักดี^{1*} เจษฎา สาททอง¹ และ ปิยะ โควิวิทวิวัฒน์¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
*adisorn@npru.ac.th

บทคัดย่อ

ในอนาคตอันใกล้หลอดไฟฟ้าที่ให้แสงสว่างในปัจจุบันกำลังจะถูกเปลี่ยนเป็นหลอดแอลอีดี เพราะมีข้อดีหลายอย่าง เช่น ประหยัดพลังงาน อายุการใช้งานยาว ขนาดเล็ก และระบายความร้อนดี เป็นต้น งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอวิธีการออกแบบวงจรการรับด้วยเทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากที่สุด ของระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยติดตั้งตัวส่งบนเพดานห้อง ตัวรับอยู่บนโต๊ะทำงาน และใช้การมอดูเลตด้วยความเข้มแสงแบบโอโอเคในการส่งสัญญาณ นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอกับระบบที่ใช้กันทั่วไปที่เป็นแบบแอนะล็อกในรูปแบบของอัตราข้อผิดพลาดบิต ณ อัตราส่งข้อมูลต่างๆ

คำสำคัญ: การสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็น, เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากที่สุด, อีควอลไลเซอร์

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) เริ่มถูกนำมาแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent lamp) และหลอดอินแคนเดสเซนต์ (incandescent lamp) ที่ให้แสงสว่างภายในอาคาร เนื่องจากมีข้อดีมากมายเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการให้แสงสว่างแบบที่ใช้กันทั่วไป เช่น ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อย มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน มีขนาดเล็ก สามารถตอบสนองความถี่สูงได้ดี และระบายความร้อนได้ดี เป็นต้น นอกจากนี้เทคโนโลยีแอลอีดียังถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงคือใช้แสงเป็นตัวส่งผ่านข้อมูล [1] คาดการณ์ในอนาคตไม่ถึง 10 ปี หลอดแอลอีดีสีขาว (white LED) จะกลายเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ นำมาใช้เพื่อให้แสงสว่างภายในอาคารอย่างแพร่หลาย ซึ่งนอกจากให้ความสว่างแล้วยังสามารถนำมาเป็นตัวส่งสัญญาณข้อมูลของการสื่อสารไร้สายด้วยแสงในรูปแบบข้อมูลต่าง ๆ อาทิเช่น ส่ง

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

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า นักวิจัยจากประเทศญี่ปุ่นโดย Komine และ Nakagawa [1] นำเสนอหลักการของระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่ใช้หลอดแอลอีดีเป็นระบบโครงข่ายภายในอาคาร โดยตัวส่งเป็นอาร์เรย์แอลอีดีที่สามารถให้แสงสว่างครอบคลุมทั่วพื้นที่ของห้อง และใช้โฟโตไดโอด (photodiode) ในการรับแสงที่ส่งมาจากตัวส่ง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แสงที่รับได้โดยตรง (directed light or line of sight) และแสงที่สะท้อนมาตกระบบ (reflected light) โดยสามารถแสดงการกระจายกำลังงานที่รับได้ทั่วพื้นที่ของห้องได้ ซึ่งมีกำลังงานโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2.5 dBm อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้น ก็จะส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR: signal-to-noise ratio) ลดลง โดยมีสาเหตุมาจากการสะท้อนและตกระบบของแสง และการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI: intersymbol interference) ซึ่งสามารถลดผลกระทบจากปัญหาดังกล่าวได้โดยการใช้วงจรอีควอไลเซอร์ (equalizer) เพื่อทำการปรับปรุงสัญญาณก่อนส่งไปยังวงจรตรวจหา นอกจากนี้ Zeng และคณะ [2] ได้นำเสนอการรับ-ส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่งข้อมูล 16-32 Mb/s (เมกะบิตต่อวินาที) โดยการออกแบบวงจรกรอง (filter) เพื่อปรับคุณภาพของสัญญาณการรับก่อนส่งไปยังวงจรตรวจหา อย่างไรก็ตาม Nguyen และคณะ [3] ได้นำเสนอแบบจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามพื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น เช่น ตำแหน่งของตัวส่ง และการสะท้อนของแสงที่ตกระบบกับผนังทั้งสี่ด้านภายในห้อง จากนั้นก็คำนวณความเร็วที่แสงเดินทางจากตัวส่งไปยังตัวรับ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการส่งข้อมูลแบบ NRZ-OOK มีสมรรถนะมากขึ้นถ้ามีการใช้เทคนิคการมอดูเลตเข้ามาช่วย สุดท้าย Lee และคณะ [4] ได้แสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคารเป็นสเปกตรัมกำลังงานตลอดช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคลื่นแสงจากหลอดแอลอีดีมีช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้างประมาณ 380 ถึง 780 นาโนเมตร จึงทำให้สามารถส่งสัญญาณได้มากตลอดช่วงความยาวคลื่น ในขณะที่แสงอินฟราเรดจะมีแบนด์วิดท์ที่แคบกว่า [4] ดังนั้นสรุปได้ว่าปริมาณของแบนด์วิดท์จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหลอดแอลอีดีและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวสะท้อนภายในห้อง

นอกจากนี้ยังพบว่าวงจรการรับแบบที่ใช้กันทั่วไป (conventional receiver) ในระบบ VLC มีลักษณะเป็นแบบแอนะล็อก [2] ซึ่งทำให้การตรวจหาข้อมูลมีสมรรถนะไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้แนะนำการออกแบบวงจรการรับโดยใช้เทคนิคผลตอบสองบางส่วนควรจะเป็นมากที่สุด [5] (PRML: partial-response maximum-likelihood) ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบดิจิทัล สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร ซึ่งจากการทดลองในระบบ VLC ภายในอาคารที่ติดตั้งตัวส่งไว้บนเพดานเพื่อแพร่กระจายแสงสว่างให้ทั่วพื้นที่ของห้อง และตัวรับสัญญาณ (โฟโตไดโอด) วางอยู่บนโต๊ะ อัตราการส่งข้อมูลแบบต่าง ๆ พบว่าวงจรการรับที่แนะนำมีสมรรถนะดีกว่าวงจรการรับแบบที่ใช้กันทั่วไป

2. แบบจำลองระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร

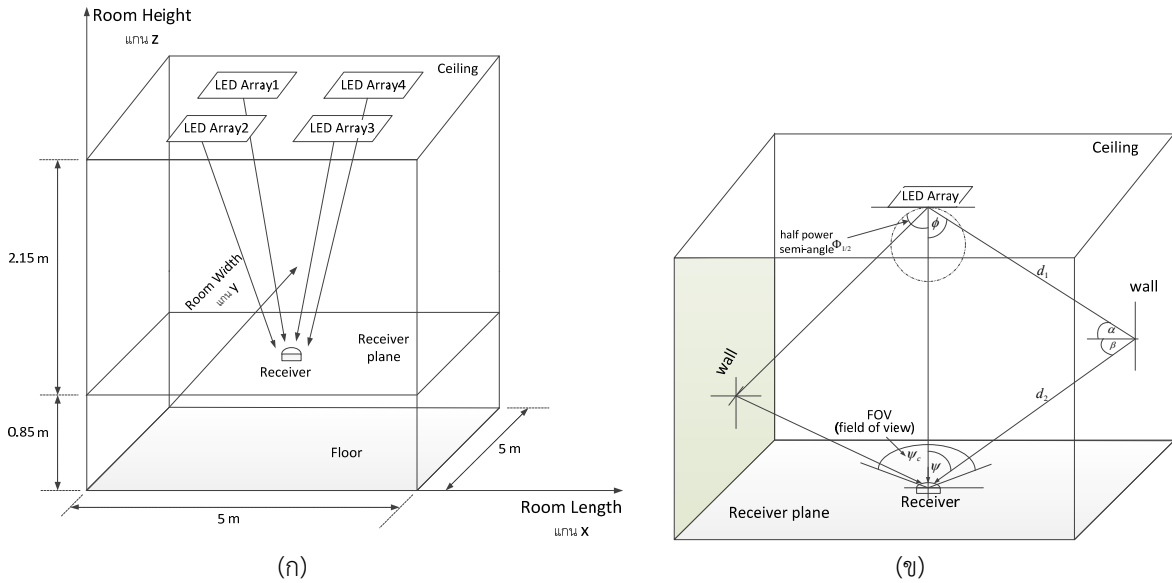
ระบบ VLC ภายในอาคารเกิดจากการใช้แสงสว่างจากหลอดแอลอีดีเป็นตัวกลางในการส่งข้อมูล โดยหลอดแอลอีดีจะติดตั้งเป็นอาร์เรย์ (array LED) [1] เพื่อให้แสงสว่างเป็นไปตามมาตรฐานสากลคือ 300 ถึง 1,500 ลักซ์ (lux) สำหรับห้องทำงานภายในอาคาร [1] และ [2] ภาพที่ 1 แสดงแบบจำลองของห้องที่มีขนาด 5 x 5 x 3 เมตร โดยตัวส่ง (transmitter) จะใช้หลอดแอลอีดีแบบอาร์เรย์ติดตั้งบนเพดานห้องเพื่อแพร่กระจายแสงสว่างไปบริเวณรอบ ๆ ห้อง และตัวรับ (receiver) จะใช้โฟโตไดโอดที่วางบนโต๊ะทำงานที่สูงจากพื้น 0.85 เมตร นอกจากนี้ยังกำหนดให้หลอดแอลอีดีหนึ่งตัวมีกำลังงานเท่ากับ 30 มิลลิวัตต์ โดยความเข้มแสงภายในห้องสามารถคำนวณได้จาก [3]

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

เมื่อ $I(\phi)$ คือความเข้มแสงที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่งมุมระหว่างตัวส่งกับตัวรับที่ต่างกันทั่วบริเวณห้อง, $I(0)$ คือความเข้มแสงที่ตำแหน่งศูนย์กลางของอาร์เรย์แอลอีดีที่กำหนดให้มีรูปแบบการแพร่กระจายแบบแลมเบิร์ตเซียน (Lambertian radiation), m คือเลขลำดับการแพร่ของแสงแบบแลมเบิร์ตเซียนซึ่งนิยามโดย

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

เมื่อ $\Phi_{1/2}$ คือมุมของตัวส่ง ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของกำลังงานทั้งหมดของแอลอีดี, และ ϕ คือมุมของแสงแผ่รออกมาจากตัวส่ง (irradiance angle) นอกจากนี้ค่าความเข้มแสงที่ได้รับจะเปลี่ยนแปลงไปตามมุมระหว่างตัวรับแสงกับตัวส่งแสง โดยค่าความสว่างในแนวขนานกับพื้นห้องหาได้จาก [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 ψ คือมุมที่แสงตกกระทบ (incidence angle) กับโฟโตไดโอด

ในทางปฏิบัติคุณลักษณะการแพร่กระจายของแสงสว่างจากหลอดแอลอีดีจะถูกกำหนดให้มีการแพร่กระจายแบบแลมเบิร์ตเซียน [1-3] ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งมาจากตัวส่งที่มุม ϕ ถูกกำหนดโดย

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

ดังนั้นกำลังงานที่ถูกส่งออกมาจากหลอดแอลอีดีสามารถคำนวณได้จาก

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

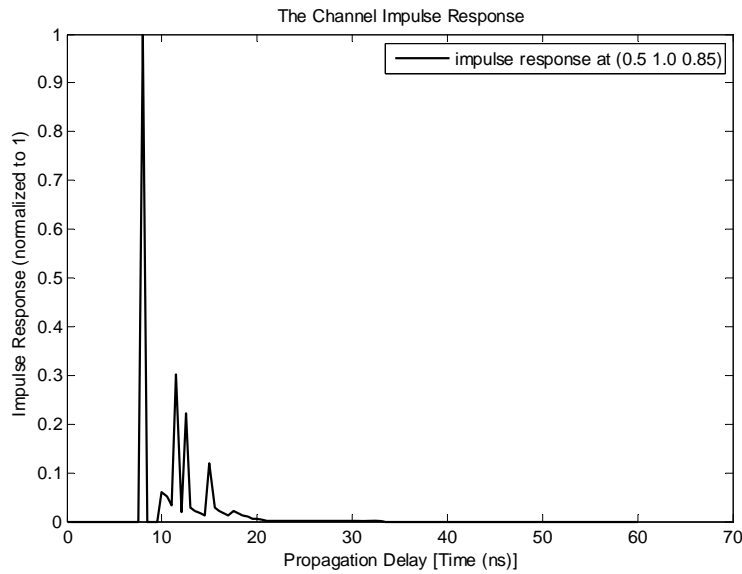
เมื่อ P_{LED} คือกำลังงานที่แผ่กระจายของแสงแอลอีดี เพราะฉะนั้นกำลังส่งสามารถหาได้โดยบริเวณรอบ ๆ พื้นที่ห้องตามที่น่าเสนอใน [3]

โดยทั่วไปการเดินทางของแสงจากตัวส่งไปยังตัวรับแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แสงที่มาตกกระทบโดยตรง และแสงที่สะท้อนมา โดยช่องสัญญาณแสงที่ได้รับทั้งสองแบบ [1, 2] เป็นการเดินทางของแสงมายังตัวรับโดยตรง ซึ่งเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้คือ

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

เมื่อ A_{rx} คือพื้นที่ของตัวตรวจจับ, d คือระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับ, และ ψ_c คือมุมที่โฟโตไดโอดสามารถรับแสงได้ (FOV: field of view) ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดของแอลอีดีที่แผ่มายังตัวรับโดยตรงคำนวณได้ดังนี้

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



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

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

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

เมื่อ d_1 และ d_2 คือระยะทางจากตัวส่งกับผนังห้องและระยะทางจากผนังห้องไปยังตัวรับตามลำดับ, ρ คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุ, dA_{wall} คือพื้นที่ส่วนเล็ก ๆ ที่แสงตกกระทบที่ผนังทำให้เกิดมุม α , α คือมุมที่แสงจากตัวส่งตกกระทบกับผนังห้อง, และ β คือมุมที่แสงสะท้อนจากผนังห้องไปยังตัวรับ ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่ตัวรับได้รับก็คือผลรวมของกำลังงานจากแสงโดยตรงกับแสงที่สะท้อน นั่นคือ

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

ในทางปฏิบัติผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ VLC หาได้จาก

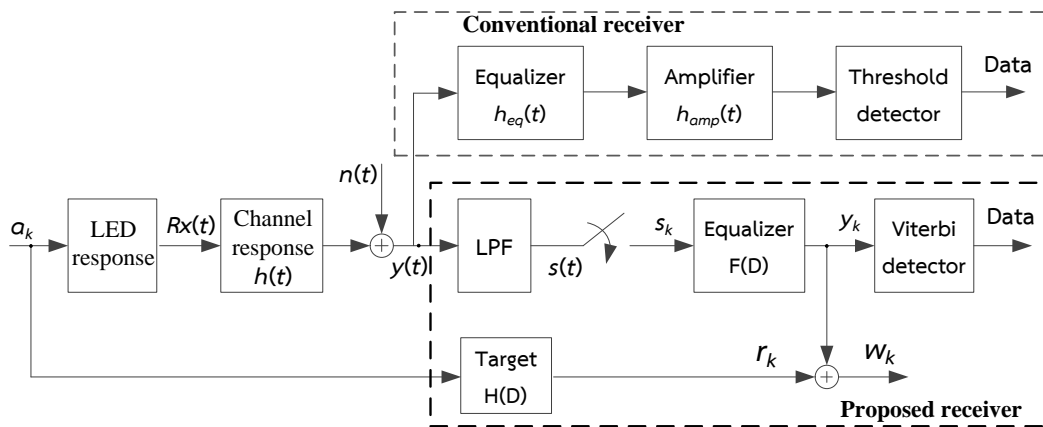
$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

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 จะเป็นสัญญาณที่สะท้อนจากผนังมาถึงตัวรับ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ 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° |
| Single LED power PLED | 30 mW | Detector physical area of PD | 1.0 cm^2 |
| LED response time | 150 ns | Transmission coefficient of optical filter | 1.0 |
| Semi-angle at half power | 70° | 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 pA |
| Floor reflectivity | 0.15 | Ambient light photocurrent | 5840 uA |
| Ceiling reflectivity | 0.8 | Noise-bandwidth factor (I_2) | 0.562 |



ภาพที่ 3 แบบจำลองช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็น (VLC)

3. การออกแบบวงจรภาครับที่ใช้เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากที่สุด

พิจารณาแบบจำลองช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นในภาพที่ 3 เมื่อกำหนดให้ลำดับข้อมูลอินพุต a_k ถูกส่งเข้าไปยังช่องสัญญาณที่มีผลตอบสนองแอลอีดี [2] และผลตอบสนองของช่องสัญญาณ [1, 2] โดยสัญญาณที่เอาต์พุตของโฟโตไดโอดเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

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

เมื่อ \otimes คือตัวดำเนินการคอนโวลูชัน, $y(t)$ คือสัญญาณข้อมูลที่วงจรภาครับได้รับ, R คือผลตอบสนองของตัวรับโฟโตไดโอด, $x(t)$ คือผลตอบสนองของแอลอีดี [2, 6], $h(t)$ คือผลตอบสนองของช่องสัญญาณตามสมการที่ (10), และ $n(t)$ คือสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวกที่มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังแบบสองด้านเท่ากับ $N_0 / 2$

สำหรับวงจรภาครับระบบที่ใช้กันทั่วไป สัญญาณที่รับได้จากโฟโตไดโอดจะถูกส่งผ่านวงจรอีควอไลเซอร์ที่เป็นวงจรรองแบบแอนะล็อก [2] จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณ (amplifier) ก่อนส่งต่อไปยังวงจรตรวจหาขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold detector) ตามที่แสดงในภาพที่ 3 อย่างไรก็ตามสำหรับวงจรภาครับที่ใช้เทคนิคผลตอบสนอง

บางส่วนควรจะเป็นมากที่สุด (PRML) สัญญาณ $y(t)$ จะถูกส่งไปยังวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF: low-pass filter) และวงจรซีกตัวอย่าง (sampler) ทำให้ได้เป็นลำดับข้อมูล s_k และถูกส่งไปยังวงจรตรวจหาเพื่อหาค่าประมาณของลำดับข้อมูลอินพุต \hat{a}_k

เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากที่สุดเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างอีควอลไลเซอร์และวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi detector) [7] โดยจะต้องทำการออกแบบอีควอลไลเซอร์และทาร์เก็ต (target) ให้เหมาะสมกับระบบ VLC ดังนั้นถ้าให้อีควอลไลเซอร์มีรูปสมการคณิตศาสตร์ในโดเมน D คือ [7]

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

เมื่อ D คือตัวดำเนินการหน่วงเวลาหนึ่งหน่วย, K คือเลขจำนวนเต็มบวก, และ $2K + 1$ คือจำนวนแท็ปหรือสัมประสิทธิ์ของอีควอลไลเซอร์ 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 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นเลขจำนวนจริงในแต่ละแท็ปของอีควอลไลเซอร์และทาร์เก็ต จุดประสงค์ของการออกแบบอีควอลไลเซอร์และทาร์เก็ตคือทำให้ค่าข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE: mean-squared error) ระหว่างข้อมูลเอาต์พุตของอีควอลไลเซอร์ 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 $E[\cdot]$ คือตัวดำเนินการค่าคาดหวัง (expectation operator) นอกจากนี้ในกระบวนการออกแบบอีควอลไลเซอร์และทาร์เก็ตจะใช้เงื่อนไขแบบโมนิกซึ่งกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแท็ปแรกของทาร์เก็ตมีค่าเท่ากับหนึ่ง ($h_0 = 1$) [8] โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบเป็นไปตามที่อธิบายใน [7]

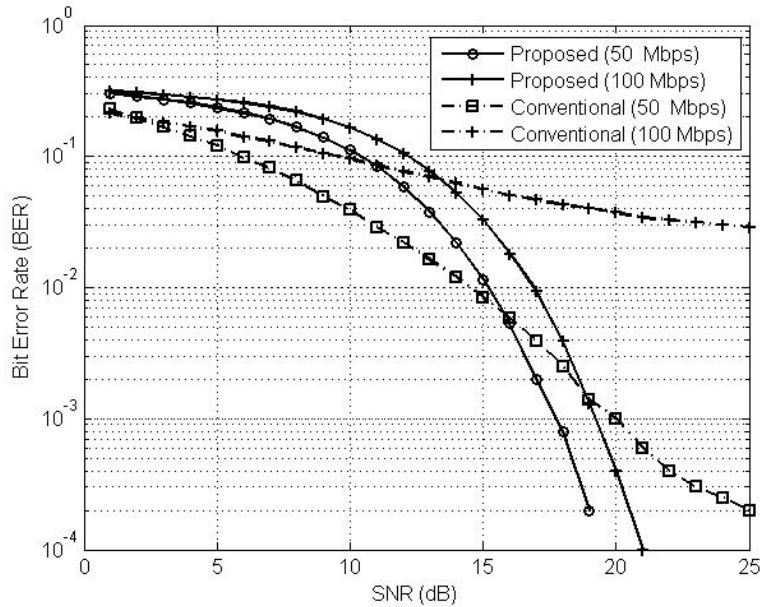
4. ผลการทดลอง

ในที่นี้วงจรภาครับแบบที่นำเสนอจะใช้อีควอลไลเซอร์ที่มีจำนวน 7 แท็ป ($K = 3$) และทาร์เก็ตที่มีจำนวน 4 แท็ป ($L = 4$) และค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR) นิยามโดย

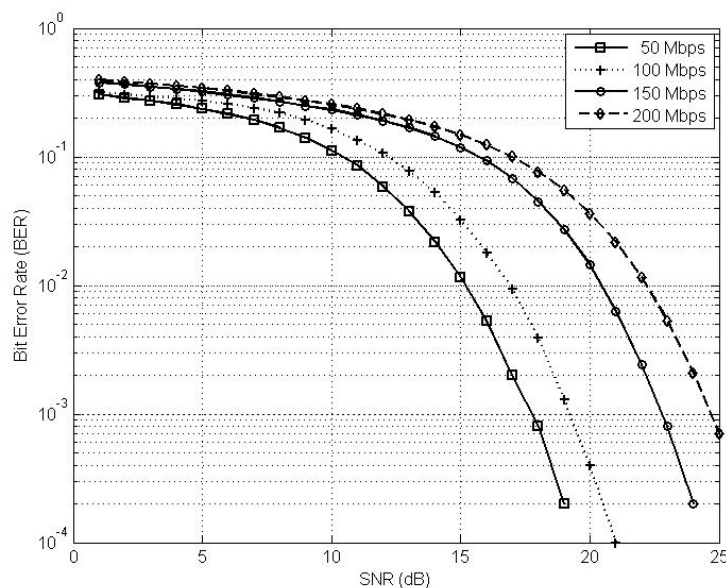
$$SNR = \frac{(RP_{rx})^2}{\sigma_{total}^2} \quad (15)$$

เมื่อ R คือผลตอบสนองของตัวรับโพโตไดโอด, σ_{total}^2 คือค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนได้แสดงไว้โดย [2] ภาพที่ 4 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ VLC ในรูปของอัตราของผิดพลาดบิต (BER: bit-error rate) ระหว่างวงจรภาครับแบบที่ใช้กันทั่วไป (conventional receiver) และวงจรภาครับแบบที่นำเสนอ (Proposed receiver) ซึ่งพบว่าสมรรถนะของระบบจะลดลง เมื่อใช้อัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าสมรรถนะของวงจรภาครับแบบที่ใช้กันทั่วไปจะเกิดปัญหาพื้นข้อผิดพลาด (error floor) เมื่อ SNR มีค่าสูงเพียงพอ ซึ่งตรงข้ามกับสมรรถนะของวงจรภาครับแบบที่นำเสนอที่ไม่เกิดปัญหาเรื่องพื้นข้อผิดพลาด จากภาพที่ 4 พบว่าเมื่อระบบ VLC ทำงาน ณ ค่า SNR ที่เพียงพอ วงจรภาครับแบบที่นำเสนอจะมีสมรรถนะดีกว่าวงจรภาครับแบบที่ใช้กันทั่วไป

ภาพที่ 5 แสดงสมรรถนะของระบบ VLC ที่ใช้วงจรภาครับแบบที่นำเสนอ ณ อัตราการส่งข้อมูล 50, 100, 150 และ 200 Mb/s ซึ่งจะพบว่าเมื่อระบบใช้อัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้น ก็จะทำให้ระบบเกิดอัตราข้อผิดพลาดบิตสูงขึ้นด้วย ซึ่งมีสาเหตุมาจากสัญญาณที่ได้รับเผชิญกับผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ที่เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้น



ภาพที่ 4 สมรรถนะของระบบ VLC ที่ใช้วงจรถอดรหัสแบบที่ใช้กันทั่วไปและวงจรถอดรหัสแบบที่นำเสนอ
 ณ อัตราการส่งข้อมูล 50 Mb/s และ 100 Mb/s



ภาพที่ 5 สมรรถนะของระบบ VLC ที่ใช้วงจรถอดรหัสแบบที่นำเสนอ
 ณ อัตราการส่งข้อมูล 50, 100, 150 และ 200 Mb/s

5. บทสรุป

ระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็น (VLC) ภายในอาคารจะมีผลกระทบที่เกิดขึ้นกับช่องสัญญาณจำนวนมาก โดยเฉพาะการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ซึ่งทำให้ระบบ VLC ที่ใช้วงจรถอดรหัสแบบที่ใช้กันทั่วไป (แบบแอนะล็อก) ไม่สามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวงจรถอดรหัสแบบดิจิทัลที่ใช้เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากที่สุดในการออกแบบอีควอไลเซอร์และทาร์เก็ต ซึ่งจากการทดลองพบว่าวงจรถอดรหัสแบบที่นำเสนอมีสมรรถนะดีกว่าวงจรถอดรหัสแบบที่ใช้กันทั่วไป ณ อัตราการส่งข้อมูลต่าง ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าระบบ VLC จะมีสมรรถนะด้อยลง เมื่อระบบใช้อัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น

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 Data 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 โควินท์ทวีวัฒน์, 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.