

เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น Visible Light Communication Technology

อดิศร แก้วภักดี¹, ปิยะ โควิพันธ์วิวัฒน์², เจษฎา สาททอง³, เฉลิมชนม์ ตั้งวชิรพันธ์⁴, สาธิต ดำรงประเสริฐ⁵,
เพิ่มพล ธนาปุณณมาส⁶ และธนภัทร เปรมทองสุข⁷

^{1,2,3,4}โปรแกรมวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

adisorn@npru.ac.th¹, piya@npru.ac.th², sartthong@yahoo.com³, shalerm123@yahoo.com⁴

^{5,6,7}โปรแกรมวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

satit_art219@hotmail.com⁵, permpol.thanapunnamas@gmail.com⁶, paraa40@gmail.com⁷

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการสื่อสารข้อมูลด้วยแสงได้ถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เทคโนโลยีด้านแสงสว่างของหลอดแอลอีดีถูกพัฒนาให้มีความสว่างพอที่จะนำมาใช้งานแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดไส้ ซึ่งในปัจจุบันกำลังเป็นที่นิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะหลอดแอลอีดีมีคุณสมบัติดีกว่าหลอดไฟที่ให้แสงสว่างในปัจจุบัน อาทิเช่น ประหยัดพลังงานได้มากกว่า มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า สามารถใช้แสงเป็นตัวกลางในการสื่อสารข้อมูลได้ ในงานวิจัยฉบับนี้จะได้กล่าวถึงวิวัฒนาการของหลอดแอลอีดี การนำหลอดแอลอีดีมาใช้ในการสื่อสารข้อมูล และประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ ภายในอาคารที่ต้องการแสงสว่างเฉพาะจุด ภายในโรงพยาบาลที่ต้องการความปลอดภัย ภายในเครื่องบิน ประยุกต์ใช้กับงานจราจร และห้องสำนักงาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้นำเสนอแบบจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น แบบจำลองช่องสัญญาณเพื่อใช้วิเคราะห์ผลกระทบด้านการแพร่กระจายแสง แสดงให้เห็นเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นกับงานประยุกต์ในหลายๆ ด้าน

คำสำคัญ: การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น, หลอดแอลอีดีสีขาว, แสงแอลอีดี

Abstract

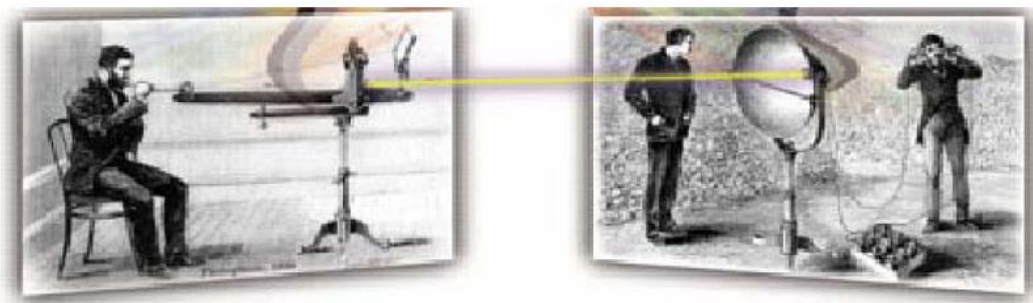
Currently, an LED light is the media for communications because its luminance and cost are developed and many applications are created from LEDs. LED lighting has to instead fluorescent and incandescent. It is most popular because it's more efficiency than the current lamps such as power consumption, long lifetime and transmission device. In this paper, we presents an innovation of LED, it can be using for the communication and many applications of visible light communication, indoor wireless communication, in the hospital, air plan, traffic, and home office. Additional, we presented a visible light communication system model using for simulation the system to analyze influence the light distribute on the place, to demonstrated the many VLC applications.

Keyword: Visible Light Communication, VLC, White LED and Optical Wireless Communication

1. บทนำ

ปัจจุบันการสื่อสารข้อมูลด้วยคลื่นย่านความถี่วิทยุ (Radio frequency: RF) จะค่อยข้างมีข้อจำกัดสูง อาทิเช่น แบนด์วิดท์แคบ ความปลอดภัยน้อย สัญญาณรบกวนสูง เป็นต้น นอกจากการสื่อสารในย่านความถี่แล้วยังมี ย่านความถี่อื่นๆ อีก เช่น ย่านความถี่

อินฟราเรด ย่านความถี่เอ็กสเรย์ ย่านความถี่ไมโครเวฟ ย่านความถี่เรด้า เป็นต้น และที่ย่านความถี่แสงที่มองเห็นมีแนวความคิดที่ใช้แสงเป็นตัวกลางของการสื่อสารข้อมูลได้กำเนิดมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1880 [1] โดยแกรแฮม เบลล์และผู้ช่วย ใช้เทคโนโลยีกราฟ (Alexander Graham Bell and Charles Sumner-Tainter in 1880) ทำการมอดูเลตสัญญาณเสียงกับลำแสง สร้างเป็นเครื่องโทรศัพท์ที่สื่อสารด้วยแสง รหัสมอร์ส (Mores code) [2] เป็นการส่งรหัสมอร์สด้วยแสงใช้ในการสื่อสาร การเดินเรือ เป็นต้น การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ถูกนำมาใช้เป็นช่องทางของการสื่อสารข้อมูลแบบต่างๆ โดยใช้แสงที่มองเห็น ซึ่งแสงที่กล่าวถึงเป็นแสงจากหลอดแอลอีดีสีขาว (White LEDs) ในอนาคตหลอดแอลอีดีจะถูกใช้เป็นหลอดไฟให้แสงสว่าง และจะถูกนำมาแทนหลอดไฟที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน หลอดแอลอีดีไม่เพียงให้แสงสว่างแต่สามารถส่งข้อมูลได้อีกด้วย ได้มีการประยุกต์ใช้งานหลอดแอลอีดีทั้งให้ความสว่างและส่งข้อมูลด้วยพร้อมๆ กัน ที่ภายในห้องทำงานสำนักงาน ห้องภายในอาคาร บ้าน ภายในเครื่องบิน โรงพยาบาล ใช้ในงานจราจร เป็นต้น การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (visible light communication) ถูกพัฒนามาจากการสื่อสารแบบอินฟราเรด (Wireless infrared communication) พบมากในอุปกรณ์จำพวกรีโมท (remote control) เนื่องจากข้อจำกัดของแสงอินฟราเรดที่กำลังส่งสูงๆ แสงอินฟราเรดจะอันตรายต่อตาของมนุษย์ได้ การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นจึงถูกพัฒนาต่อ



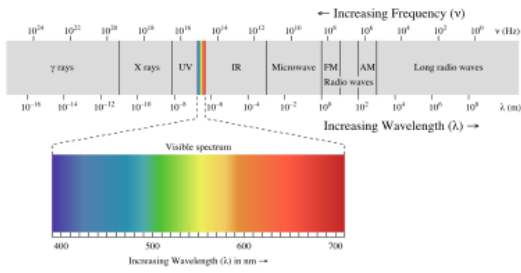
ภาพที่ 1: การสื่อสารด้วยแสงครั้งแรกด้วย Heliograph โดยแกรแฮม เบลล์กับผู้ช่วย

ปัจจุบันการประหยัดพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการใช้ชีวิตประจำวัน การทำงาน การดำเนินธุรกิจ และด้านอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องใช้พลังงาน ต้องคำนึงถึงสิ่งที่สามารถช่วยประหยัดพลังงานเป็นสิ่งสำคัญ หลอดแอลอีดี (LED lamp) ที่สามารถให้ความสว่างสูงพอๆ กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent lamp) และหลอดไส้ (incandescent lamp) เมื่อนำมาแทนจะทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้อย่างมาก จากงานวิจัยพบว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์จะต้องใช้พลังงานเป็นสองเท่าของหลอดแอลอีดี [3] แต่หลอดแอลอีดีสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าอีกด้วย

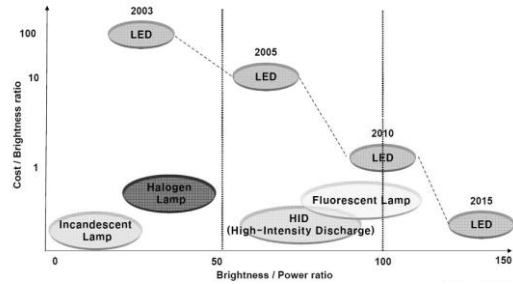
2. วิวัฒนาการความสว่างของหลอดแอลอีดี (Innovation Illuminance of LED)

หลอดแอลอีดีหรือ LED ย่อมาจาก Light Emitting Diodes [3] เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับไดโอด เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบไบอัสตรงจะทำให้แอลอีดีเปล่งแสงออกมา แสงจากหลอดแอลอีดีจะมีสเปกตรัมตั้งแต่ที่ความถี่ 400 เทราเฮิรต ถึง 800 เทราเฮิรต (หรือเป็นความยาวคลื่นที่ 380 นาโนเมตร ถึง 780 นาโนเมตร) ดังแสดงในภาพที่ 2 ปรากฏการณ์นี้อยู่ในรูปของ electroluminescence สีของแสงที่เปล่งออกมานั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุกึ่งตัวนำที่ใช้ และเปล่งแสงได้ใกล้ช่วงอัลตราไวโอเล็ต ช่วงแสงที่มองเห็น และช่วงอินฟราเรด ผู้พัฒนาไดโอดเปล่งแสงขึ้นเป็นคนแรก คือ นิก โฮโลนยัค (Nick Holonyak Jr.) (เกิด ค.ศ. 1928) แห่งบริษัทเจเนรัล อิเล็กทริก (General Electric Company) โดยได้พัฒนาไดโอดเปล่งแสงในช่วงแสงที่มองเห็น และสามารถใช้งานได้เชิงปฏิบัติเป็นครั้งแรก เมื่อ ค.ศ. 1962 [3]

ภาพที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบเทคโนโลยีของแอลอีดีในช่วง ค.ศ. 2003 ถึง ค.ศ. 2015 แสดงให้เห็นว่าราคาจะถูกลงเรื่อยๆ ในขณะที่แอลอีดีให้ความสว่างเพิ่มสูงขึ้น และที่ความสว่างสูงขึ้นแต่กลับใช้พลังงานที่น้อยลง เปรียบเทียบกับหลอดชนิดอื่นๆ อาทิเช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดฮาโลเจน หลอดอินแคนเดสเซนต์หรือหลอดไส้ และหลอดเอชไอดี จากภาพที่ 3 คาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2015 หลอดแอลอีดีถูกนำมาแทนหลอดไฟที่ให้แสงสว่างต่างๆ ไป ที่ความสว่างเท่ากันหลอดแอลอีดีใช้พลังงานน้อยที่สุด ซึ่งจะใช้พลังงานเพียงครึ่งหนึ่งของหลอดตะเกียบแบบประหยัดไฟ ข้อดีอีกมากของหลอดแอลอีดีคือ ใช้พลังงานน้อยเพื่อช่วยลดภาวะโลกร้อนได้ ไม่มีรังสียูวี และมีความร้อนต่ำ มีอายุการใช้งานนานกว่า 50,000 ชั่วโมง หรือประมาณ 6 ถึง 12 ปี มีสีให้เลือกมากมาย ถ้าเป็นแบบให้แสงสว่างธรรมดาที่เป็นสีขาว (white LED) รองรับแรงดันช่วงกว้าง



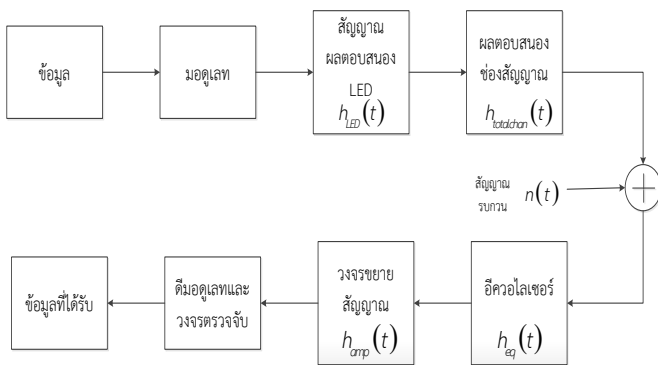
ภาพที่ 2: สเปกตรัมแสงที่มองเห็น (Visible spectrum)



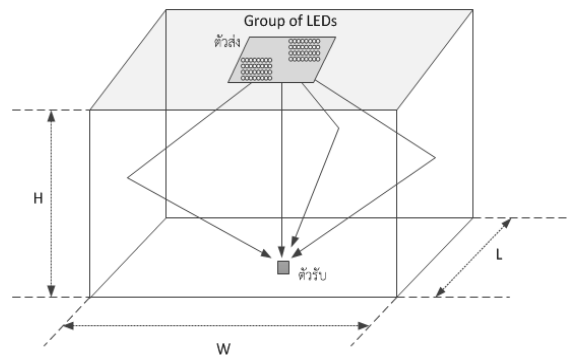
ภาพที่ 3: วิวัฒนาการเทคโนโลยีแอลอีดี (by:Suisse 2-11-2006)

3. แบบจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (A visible light communication system model)

รูปแบบจำลองพื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นโดยการใช้แสงจากหลอดแอลอีดีสีขาวนี้ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย T. Komine และ M. Nakagawa [4] ในงานวิจัยฉบับนี้จำลองระบบใช้ตามภาพที่ 4 ส่วนที่สำคัญคือการมอดูเลทแบบจำกัดแบนด์วิดท์ที่เป็นอัตราการส่งข้อมูล ข้อมูลที่ผ่านการมอดูเลทถูกนำมาคูณประสานกับสัญญาณผลตอบสนองของแอลอีดีและคูณอีกทีกับผลตอบสนองช่องสัญญาณ สัญญาณที่ได้จากจุดนี้เป็นสัญญาณที่เกิดในช่องสัญญาณแบบไร้สายด้วยแสงแอลอีดีโดยการจำลองขึ้นได้ศึกษาค้นหาหาเทคนิคใหม่ๆ สำหรับการปรับแต่งสัญญาณ หรือเทคนิคของอีควอไลเซอร์ในการพัฒนาในงานวิจัยนี้ด้วยตามลักษณะของพื้นที่ที่ได้จำลองไว้ ภาพที่ 5 เป็นการจำลองระบบภายในห้อง แสงของแอลอีดีถูกส่งลงมาจกเพดาน (Ceiling) ด้านบนมายังตัวรับแสงด้านล่าง พื้นที่ของห้องกำหนดด้วยความกว้าง W ความยาว L และความสูง H



ภาพที่ 4: ไดอะแกรมระบบสื่อสารข้อมูลด้วยแสงที่มองเห็น [5]

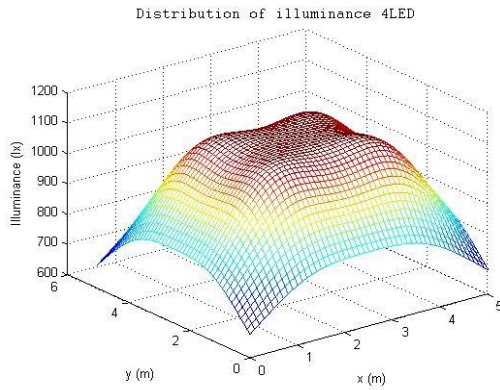


ภาพที่ 5: การแพร่กระจายแสงจากส่งมายังตัวรับภายในห้อง [6]

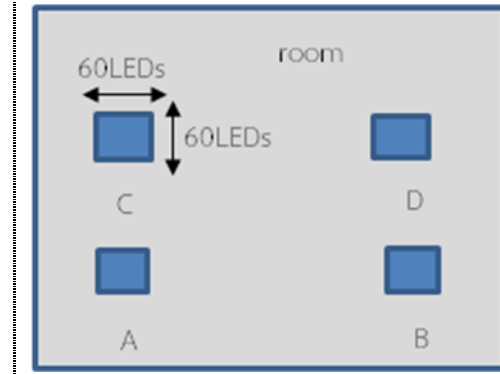
ภาคส่ง (Transmitter) สำหรับตัวส่งจะสมมติให้แอลอีดีมีการแผ่ความเข้มแสงเป็นแบบแลมเบิร์ตเซียน (Lambertian radiant intensity) ตามสมการที่ (1) [5]

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

เมื่อ m คือเลขลำดับการแผ่ของแสงแบบแลมเบิร์ตเซียน และมีความสัมพันธ์กับมุม $\phi_{1/2}$ เป็นส่วนหนึ่งของมุมของตัวส่ง (ที่ครึ่งหนึ่งของกำลังงานทั้งหมด) ซึ่ง $m = -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2})$ กำลังงานที่แผ่กระจายของแสงแอลอีดีคือ P_{LED} ϕ คือมุมที่แสงแผ่ออกมาจากตัวส่ง (irradiance angle) ψ คือมุมที่แสงตกกระทบกับโฟโตไดโอด (incidence angle) ดังนั้นกำลังงานที่ถูกส่งออกมาหาได้จาก $P_{rx} = P_{LED} * R_o(\phi)$ ถ้าแสงที่แผ่ออกมาจากแอลอีดีไปยังตัวรับโดยหลักๆ จะมีอยู่ 2 ช่องทางคือแสงที่แพร่ไปหาตัวรับโดยตรง (light of sight: LOS) กับแสงแพร่มาจากการสะท้อน (diffuse channels) ทั้งสองช่องสัญญาณนี้จะได้อธิบายในลำดับต่อไป 1) ช่องสัญญาณแบบโดยตรง (light of sight) ขนาดของกระแสโดยตรง (direct current DC gain) จะหาได้โดยถูกต้องและแม่นยำจะต้องทำการพิจารณาในส่วนเฉพาะช่องสัญญาณที่เป็นแสงของการแพร่ที่มาจกช่องสัญญาณโดยตรงเท่านั้น ซึ่งในสมการที่ (2) แสดงช่องสัญญาณแบบโดยตรง เมื่อ A_{rx} คือพื้นที่ของตัวตรวจจับ d คือระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับ



ก) การแพร่กระจายความเข้มแสง



ข) ตำแหน่งแอลอีดี

ภาพที่ 6: จำลองการแพร่กระจายความเข้มแสงภายในห้อง

$R_o(\phi)$ คือความเข้มแสงที่ส่งมาจากตัวส่งที่มุม ϕ หาได้จากสมการที่ (1) ψ คือมุมที่แสงตกกระทบกับโฟโตไดโอด ψ_c คือมุมทั้งหมดที่โฟโตไดโอดสามารถรับแสงได้ (field of view: FOV)

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

ตัวรับจะถูกสมมติให้เป็นส่วนเล็กๆ ถ้าคิดจากพื้นผิวของห้อง ดังนั้น P_{diff} คือกำลังงานที่ตัวรับรับได้จากช่องสัญญาณแบบแพร่กระจายนี้หาได้จากสมการที่ (3)

$$P_{diff} = A_{rx} I \quad (3)$$

และ A_{rx} คือพื้นที่ของตัวรับ

ที่ตัวรับแสงที่ส่งมาจะผ่านตัวกรองแสง (optical filter) และหัวเลนส์ (concentrator lens) ถึงจะได้พลังงานที่แท้ หาได้จากสมการที่ (4) [5]

$$P_{rx} = (P_{LOS} + P_{diff}) * T_f(\psi) * g(\psi) \quad (4)$$

เมื่อ $T_f(\psi)$ คือสัมประสิทธิ์การตัวส่งผ่านของตัวกรองแสง และ $g(\psi)$ คือสัมประสิทธิ์การเพิ่มของหัวเลนส์
หน้าที่ของโฟโตไดโอดใช้เป็นตัวเปลี่ยนกำลังงานแสงที่รับได้เป็นกระแสไฟฟ้า และกระแสเอาต์พุตหาได้จากสมการที่ (5)

$$i = P_{rx} * R \quad (5)$$

เมื่อ R คือความไวของการตอบสนองของโฟโตไดโอด (มีหน่วยเป็น A/W)
อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) คำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$SNR = \frac{(RP_{rx})^2}{\sigma_{total}^2} \quad (6)$$

ซึ่ง σ_{total}^2 คือความแปรปรวนสัญญาณรบกวนทั้งหมด และคำนวณหาได้จากสมการที่ (7)

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{amplifier}^2 \quad (7)$$

เมื่อ σ_{shot}^2 คือความแปรปรวนสัญญาณรบกวนแบบสั้น (shot-noise) คำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$\sigma_{shot}^2 = 2qR(P_x + P_n)B_n \quad (8)$$

เมื่อ B_n คือแบนด์วิธของสัญญาณรบกวน และ P_n คือกำลังงานของสัญญาณรบกวนที่เป็นแสงที่อยู่รอบๆ $B_n = I_2 R_b$ เมื่อ R_b คืออัตราข้อมูล และ I_2 คือตัวคูณแบนด์วิธสัญญาณรบกวน

ตัวขยายความแปรปรวนสัญญาณรบกวนกำหนดตามสมการที่ (9)

$$\sigma_{amplifier}^2 = i_{amplifier}^2 B_a \quad (9)$$

เมื่อ B_a คืออัตราขยายแบนด์วิธ

ดังนั้นสัญญาณรบกวนทั้งหมดจะเป็นไปตามสมการที่ (10) [5]

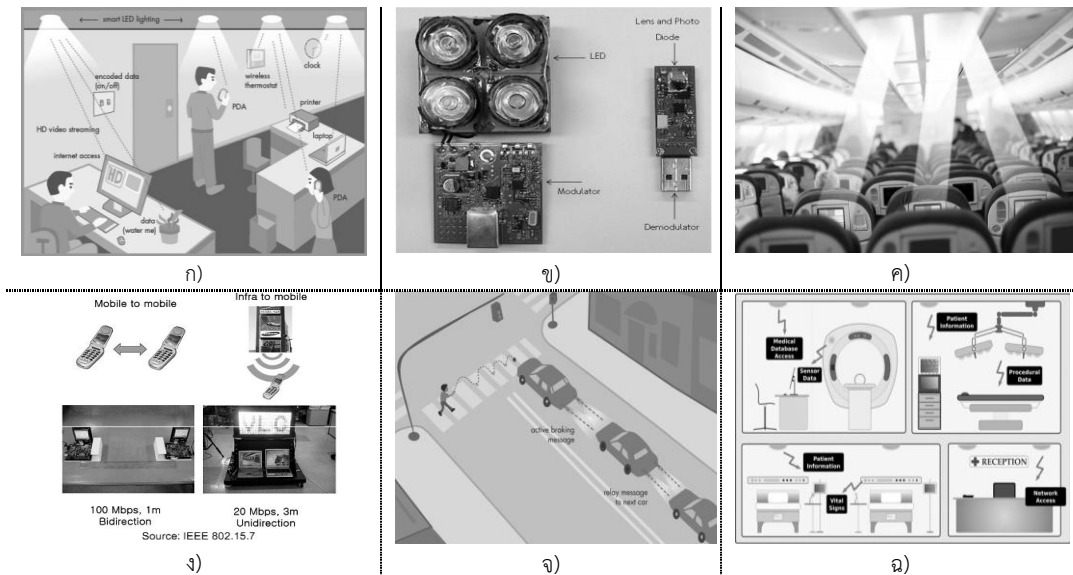
$$\sigma_{total}^2 = 2qR(P_r + P_n)I_2 R_b + i_{amplifier}^2 B_a \quad (10)$$

Bit error rate: BER ค่าผิดพลาดคำนวณได้จากสมการที่ (11)

$$BER = Q\sqrt{SNR} \quad (11)$$

$$เมื่อ Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

SNR (dB) จะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งตัวรับ ค่า SNR ภายในห้องมีค่าสูงเพราะว่าแอลอีดีทุกตัวจะส่งข้อมูลตัวเดียวกัน และกำลังงานทั้งหมดที่รับได้มีค่ามาก ที่ SNR (15.6 dB) [5] ต้องมีค่า BER ที่ 10^{-6} ที่ค่า SNR ที่เลวร้ายสุดๆ อยู่ที่ประมาณ 69 dB ซึ่งถ้ามากกว่านี้ระบบจะแสดงได้โดยไม่จำกัด SNR



ภาพที่ 7: การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารข้อมูลด้วยแสงที่มองเห็น ก) การสื่อสารภายในอาคาร [7] ข) VLC ID Kit Nakagawa. LAB. [8] ค) การสื่อสารในเครื่องบิน [9] ง) การสื่อสารแบบ mobile to mobile infrared และป้ายโฆษณา [10] จ) ใช้งานด้านจราจร [11] ฉ) การสื่อสารภายในโรงพยาบาล [12]

4. การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (VLC Applications)

แอลอีดีถูกนำมาให้แสงสว่างภายในห้องทำงานภายในอาคาร แสงที่ได้สามารถเป็นตัวกลางในการสื่อสารข้อมูลได้ เรียกว่าการสื่อสารแบบไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร (Indoor wireless visible light communication) [4] หรือระบบที่กว้างขึ้นไปอีกก็จะเรียกว่า การสื่อสารแบบไร้สายด้วยแสง (Optical wireless communication) การส่งสัญญาณเสียงด้วยแสงแอลอีดีเป็นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อน เพียงนำสัญญาณเสียงที่ต้องการส่งจ่ายให้กับแอลอีดี ภาครับใช้โฟโตดีเทคเตอร์ตรวจจับปริมาณแสงที่มากจนกระทบเกิดการเปลี่ยนแปลงเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแส ถ้าจะให้คุณภาพดีต้องใช้แอลอีดีที่มีผลตอบสนองสัญญาณที่กว้าง อาจจะเป็นแอลอีดีกำลังสูง และโฟโตดีเทคเตอร์ที่ไวต่อแสงมาก สัญญาณที่ได้นำไปขยายออกลำโพง การเชื่อมต่อโครงข่ายภายในห้องสำนักงานหรือภายในอาคารดังภาพที่ 7 ก) [7] การส่งสัญญาณด้วยแสงจากหลอดแอลอีดี ดังภาพที่ 7 ข) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ Nakagawa LAB.[8] ใช้เรียนรู้ระบบ VLC ภาพที่ 7 ค) ประยุกต์ใช้งานภายในเครื่องบิน [9] ภาพที่ 7 ง) ป้ายโฆษณาด้วยหลอดแอลอีดี (LED advertisement) [10] ใช้แอลอีดีแสดงป้ายโฆษณาร่วมกับการส่งข้อมูลแบบอินฟราเรดมีการประมวลผลด้วยภาพและการประมวลผลด้วยสัญญาณจากป้ายโฆษณาที่แสดงตามจุดต่างๆ การใช้แอลอีดีกับงานจราจร (LED for Traffic) [11] ใช้แอลอีดีกับไฟรถยนต์เป็นส่งข้อมูลระหว่างรถยนต์ และสัญญาณไฟจราจรตามสี่แยกทำจากหลอดแอลอีดี จะสามารถส่งข้อมูลให้กับผู้ใช้งานจราจรอยู่ให้ทราบโดยให้ตัวรับสัญญาณที่รถยนต์ [11] ภาพที่ 7 จ) และการสื่อสารในโรงพยาบาลที่ต้องการความปลอดภัยสูงและสะดวกในการใช้งาน [12] ดังภาพที่ 7 ฉ)

5. สรุป

เทคโนโลยีแสงจากหลอดแอลอีดีได้พัฒนาเพิ่มขึ้นทั้งให้แสงสว่างที่สามารถนำมาแทนหลอดฟลูออโรเรสเซนต์ และหลอดไส้ ซึ่งจะทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้มาก นอกจากนี้ยังสามารถนำแสงจากหลอดแอลอีดีมาใช้เป็นช่องทางในการสื่อสารข้อมูลได้อีกด้วย จึงทำให้เกิดงานประยุกต์ใหม่ๆ ที่ได้จากการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น ได้ศึกษาการสื่อสารไร้สายด้วยแสงตั้งแต่ยุคเริ่มแรก จนแอลอีดีมีวิวัฒนาการสูงขึ้นทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารได้ จำลองระบบการสื่อสารด้วยแสง การแพร่กระจายแสงจากตัวส่งมายังตัวรับภายในห้อง หรือพื้นที่เฉพาะจุดเป็นการจำลองระบบขั้นต้นที่ต้องพัฒนาต่อไป เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นเป็นสิ่งที่น่าสนใจสามารถนำไปประยุกต์ได้หลายๆ ด้านในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.bluehaze.com.au/modlight/ModLightBiblio.htm>,
<http://www.flickr.com/photos/fdctsevilla/4074931746/>
- [2] www.modulatedlight.org/Modulated_Light_DX/OpticalComms4Amateur79.html
- [3] <http://th.wikipedia.org/wiki/LED>
- [4] 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.
- [5] Lubin Zeng, et al., "Improvement of Data Rate by using Equalization in an Indoor Visible Light Communication System," IEEE, 2008.
- [6] H. Q. Nguyen, et al., "A Matlab-Based Simulation Program for Indoor Visible Light Communication System," IEEE, 2010.
- [7] <http://www.eetimes.com/electronics-news/4199568/Visible-light-illuminates-a-new-approach-for-wireless-comms>, <http://www.theengineer.co.uk/1007419.article>
- [8] http://www.naka-lab.jp/index_e.html
- [9] <http://www.mikroelektronik.fraunhofer.de/en/press-media/microelectronics-news/article/data-from-an-led-ceiling-light.html>
- [10] <http://www.bu.edu/smartlighting/program-3rd-ieee-workshop-on-optical-wireless-communications-owc12/>
- [11] <http://eetimes.prohost.mobi/11495/show/>
- [12] <http://visiblelightcomm.com/top-10-visible-light-communications-applications/>