PH-6

จำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นเพื่อประยุกต์ใช้งานระหว่างไฟส่องสว่างบนถนนกับยานยนต์

Modelling of Outdoor Wireless Visible Light Communication for Street Lamp to Vehicle Application

อดิศร แก้วภักดี[1] พีระพงษ์ อุฑารสกุล[1] และ เจษฎา สาททอง[2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี d6040512@g.sut.ac.th

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

บทคัดย่อ

อุบัติเหตุทางจราจรและผู้ประสบภัยที่เกี่ยวข้องมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างน่าสนใจ ด้วยเครือข่ายการสื่อสารข้อมูลเป็นสิ่งดีที่ช่วยเพิ่มความปลอดภัยบนท้องถนน บทความนี้นำเสนอแบบจำลองระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นเพื่อประยุกต์ใช้งานระหว่างไฟส่องสว่างบนถนนกับยานยนต์ เพื่อนำไปใช้งานกับระบบขนส่งอัจฉริยะ ที่ไฟส่องสว่างบนถนนทำงานในช่วงเวลากลางคืนและสามารถกระจายสัญญาณข้อมูลการจราจรจากสถานีกระจายสัญญาณข้างถนนของระบบขนส่งอัจฉริยะไปยังยานยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่บนถนน จำลองไฟส่องสว่างเป็นหลอดแอลอีดีที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่ให้แสงสว่างและแพร่กระจายข้อมูลได้ด้วย ตัวรับสัญญาณเป็นโฟโตไดโอดติดตั้งที่ยานยนต์รับสัญญาณแสงเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านวงจรภาครับเพื่อถอดรหัสให้ได้ข้อมูลข่าวสารกลับคืน

คำสำคัญ: การสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายนอกอาคาร ระบบขนส่งอัจฉริยะ โครงสร้างพื้นฐานกับยานยนต์

Abstract

Currently, traffic incidents and related victims have increased dramatically. With the data communication network is a great thing to improve transportation safety. Intelligent Transportation System (ITS) is promising to employ for distributing the traffic information to the vehicle on the road. This paper demonstrates a modelling of Outdoor Wireless Visible Light Communication (OWVLC) for Infrastructure to Vehicle (I2V) application. The transmitter is a Street Lamp (SL), Light Emitting Diode (LED) is widely used for illuminance on the road at nighttime. It not only for the luminance but also able to broadcast the traffic data. OWVLC can support an ITS by cooperating with the Road Side Unit (RSU) which is alternative communication for ITS. We show the model configuration of OWVLC-I2V system. The results illustrate that OWVLC-I2V system can communicate base on the simulation programming.

Keywords: Outdoor Wireless Visible Light Communication, Intelligent Transportation System, Infrastructure to Vehicle

1. บทนำ

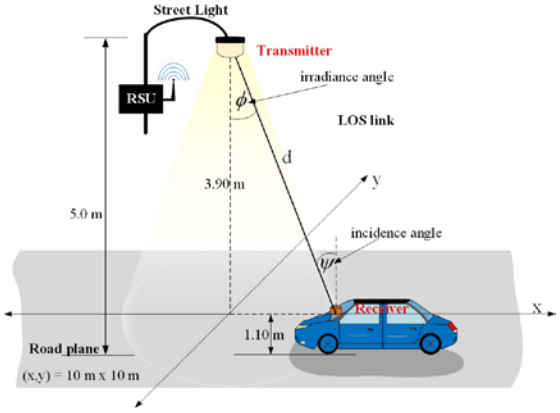
องค์การอนามัยโลกรายงานการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุบนท้องถนนมีจำนวน 1.35 ล้านคน ในปี ค.ศ. 2018 [1] เป็นอันดับที่ 8 ของการเสียชีวิต นักวิจัยพยายามนำเทคโนโลยีมาใช้งานกับการจราจร เพื่อช่วยลดจำนวนอุบัติเหตุและผู้เสียชีวิต ช่วยอำนวยความสะดวกด้านการจราจร ลดปัญหารถติด ลดการใช้พลังงาน ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นปัญหาหลักของสภาวะโลกร้อน เทคโนโลยีระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transportation System: ITS) นำเครือข่ายการสื่อสารยานยนต์เฉพาะกิจ (Vehicular Ad-hoc Networks: VANETs) ซึ่งมีหลายรูปแบบด้วยกัน อาทิเช่น การสื่อสารระยะสั้น (Dedicated Short-Range Communication: DSRC) การสื่อสารไร้สายแบบแอดฮอกสำหรับยานยนต์ (Wireless Ad-hoc Vehicular Environment: WAVE) และการสื่อสารด้วยโครงข่ายเซลลูล่าสำหรับยานยนต์กับทุกสรรพสิ่ง (Cellular-Vehicles to Everything: C-V2x) ในปัจจุบัน DSRC และ C-V2x ได้ทดลองใช้งานจริงโดยบริษัท Qualcomm Technologies, Inc. [2] เป็นการสร้างระบบ C-V2x เพื่อใช้งานด้านความปลอดภัยต่อเนื่องไปยังการใช้งานใน 5G NR C-V2x สำหรับยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติในอนาคต คาดว่านำมาใช้งานร่วมกับระบบ DSRC ที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.11p ซึ่งพัฒนามาจาก IEEE 802.11a

การสื่อสารด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency: RF) มีย่านความถี่ที่ใช้งานจำกัด และมีต้นทุนที่สูง จึงได้พยายามนำเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (Visible Light Communication : VLC) ประยุกต์ใช้งานกับ ITS เพื่อเป็นทางเลือก หรือใช้งานร่วมกับระบบ RF ด้วยเทคโนโลยีหลอดแอลอีดี (Light Emitting Diode: LED) [3-4] ที่ให้แสงสว่างที่มากพอและใช้ส่งข้อมูลข่าวสารได้ คาดว่าหลอดแอลอีดีจะถูกนำมาแทนหลอดไฟแบบเดิม [3] ซึ่งงานวิจัยด้าน VLC ในระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายในอาคาร (Indoor Wireless Visible Light Communication: IWVLC) [5] ถูกพัฒนาให้การสื่อสารไร้สายภายในอาคารสามารถส่งข้อมูลระดับกิกะบิตต่อวินาที (Gb/s) [6]

พัฒนาไปสู่การสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายนอกอาคาร (Outdoor Wireless Visible Light Communication: OWVLC) [7] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นเพื่อยานยนต์นั้นถือว่ามีความท้าทาย จาก [8] ได้จำลองสถานการณ์ระบบ VLC เป็นการใช้งานบนทางหลวง เป็นการสื่อสารแบบ V2V ยานยนต์ที่ได้รับข้อมูลการจราจรด้วยตัวตรวจจับแสงและส่งข้อมูลที่ได้รับไปยังยานยนต์ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกันด้วยไฟหน้าและไฟท้าย และมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าระบบ VLC สามารถตอบสนองความต้องการต่อข้อกำหนดในเครือข่ายการสื่อสารของยานยนต์ในสภาพการใช้งานจริง [9] และ [10] ถูกค้นพบว่าเป็นระบบที่ทำงานร่วมกันได้กับการสื่อสารระหว่างยานยนต์จาก [11] ส่วนงานวิจัยใน

เชิงปฏิบัติเป็นการสื่อสารระหว่างไฟจราจรกับยานยนต์ [12] และการสื่อสารแบบ VLC-I2V สามารถทำงานร่วมกันได้กับไฟส่องสว่างบนถนนกับยานยนต์ [13] และ [14] ซึ่งแสดงเป็นระยะทางสั้นแบบคงที่ระหว่างไฟส่องสว่างบนถนนกับยานยนต์ที่ใช้กำลังงานที่สูงทำให้ช่วยเพิ่มอัตรการส่งข้อมูลได้ ทำให้มีเสถียรภาพการสื่อสารที่เพิ่มขึ้น ทำให้ VLC-I2V มีศักยภาพที่สูงในการพัฒนาต่อในอนาคต

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายนอกอาคารเพื่อประยุกต์ใช้งานระหว่างไฟส่องสว่างบนถนนกันยานยนต์ (OWVLC-I2V) จำลองตัวส่งเป็นไฟส่องสว่างบนถนน (Street Light) เป็นหลอดแอลอีดีแบบอาเรย์ (Array LED) ทำการส่งสัญญาณข้อมูลการจราจรผ่านช่องสัญญาณทางแสง เพื่อศึกษาการแพร่กระจายแสงของความสว่าง และการแพร่กระจายกำลังงานแสงที่ได้ของระนาบตัวรับสัญญาณแสง กำหนดให้ภาครับเป็นโฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ส่งไปยังภาคถอดรหัสให้ได้สัญญาณข้อมูลข่าวสารกลับคืน

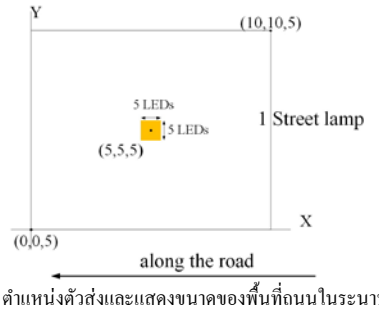


รูปที่ 1 จำลองระบบการสื่อสาร OWVLC-I2V

งานวิจัยประกอบด้วย อธิบายแบบจำลองระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายนอกอาคารเพื่อประยุกต์ใช้งานระหว่างไฟส่องสว่างบนถนนกับยานยนต์ ช่องสัญญาณการสื่อสารของระบบรวมถึงสัญญาณผลตอบสนองของช่องสัญญาณการสื่อสาร สัญญาณรบกวนของระบบ การทำงานของภาครับ ในหัวข้อที่สอง หัวข้อที่สามอภิปรายผลการทดลองเชิงตัวเลข และหัวข้อที่สี่สรุปผลการทดลอง

2. แบบจำลองระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นเพื่อประยุกต์ใช้งานระหว่างไฟส่องสว่างบนถนนกับยานยนต์

นักวิจัยได้ทำการออกแบบจำลองระบบการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นภายนอกอาคารเพื่อประยุกต์ใช้งานระหว่างไฟส่องสว่างบนถนนกับยานยนต์ (A modelling of OWVLC-I2V system) แสดงดังรูปที่ 1 ให้ตัวส่งสัญญาณเป็นไฟส่องสว่างบนถนน (Street Light) คือหลอดแอลอีดีอาเรย์ (Array LED) ขนาด 5 x 5 กำหนดแต่ละหลอดมีกำลัง 1 วัตต์ ตัวสถานีกระจายสัญญาณข้างถนน (RSU) ที่รับสัญญาณการจราจรจากศูนย์กลางการควบคุมจราจร (Traffic Control Center) เชื่อมต่อกับตัวส่งเพื่อให้ไฟส่องสว่างทำหน้าที่กระจายข้อมูลข่าวสารไปยังยานยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนถนน ดังตารางที่ 1 แสดงค่าตัวแปรของระบบ OWVLC-I2V ที่ได้ทำการออกแบบซึ่งประยุกต์จากระบบ IWVLC [5] และ [15] ที่มีการพัฒนาใช้งานภายในอาคาร รูปที่ 2 เป็นตำแหน่งและขนาดของพื้นที่สำหรับวิเคราะห์แบบจำลอง



รูปที่ 2 ตำแหน่งตัวส่งและแสดงขนาดของพื้นที่ถนนในระนาบ (x,y)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับจำลองระบบ OWVLC-I2V

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Value)
หลอดแอลอีดีอาเรย์	5 x 5 หลอด
กำลังงานหลอดแอลอีดี 1 หลอด	1 วัตต์
ความสว่างศูนย์กลาง (center luminous)	2500 ลูเมน
มุมการกระจายแสงของหลอดแอลอีดี	70 องศา
ขนาดพื้นที่ถนน (กว้าง x ยาว)	10 x 10 เมตร
ความสูงของตัวส่งจากพื้นถนน	5 เมตร
ความสูงของตัวรับจากพื้นถนน	1.10 เมตร
มุม Field of View (FOV) ของตัวรับ	120 องศา
สัมประสิทธิ์การสะท้อนของเลนน์ตัวรับ	1.0
ระยะทางจากตัวส่งไปยังตัวรับ (แนวตั้ง)	3.9 เมตร

2.1 การกระจายความแสงสว่างและกำลังงานแสงของไฟส่องสว่างบนถนน

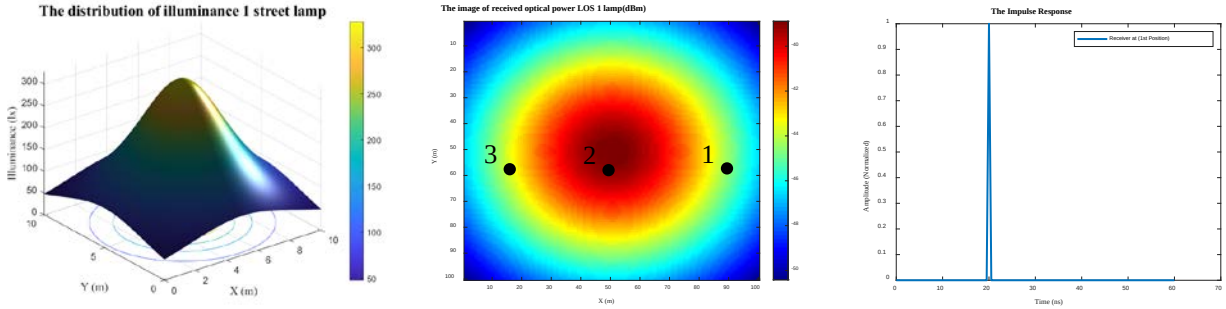
ในอุตสาหกรรมไฟส่องสว่างบนถนน (Street Light) พบว่าได้นำหลอดแอลอีดีมาใช้งานแทนหลอดไฟแบบเดิมอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลอดแอลอีดีแสงสีขาว (White LED) จากแบบจำลองระบบ OWVLC-I2V กำหนดให้ตำแหน่งไฟส่องสว่างบนถนนได้จัดวางไว้จุดศูนย์กลางของถนนขนาด 10 x 10 x 5 เมตร คือที่ตำแหน่ง (x,y,z) = (5,5,5) สมมติให้แอลอีดีอาเรย์เป็นหลอดไฟส่องสว่างบนถนนหนึ่งดวง ที่มีลักษณะการแพร่กระความเข้มแสงในแนวนอนแบบแลมเบอร์เซียน (Lambertian radiation) [15] แสดงดังสมการที่ (1)

$$E_{hor}(x,y,z) = I(\phi)/d^2.\cos(\psi) \quad (1)$$

เมื่อ $I(\phi) = I(0)\cos^m(\phi)$ คือเป็นค่าความเข้มแสงจากหลอดแอลอีดีที่มุม ϕ คือมุมที่แสงแพร่ออกมาจากหลอดแอลอีดี เป็นฟังก์ชันโคไซน์ยกกำลังด้วยค่าคงที่ d คือระยะทางระหว่างตัวส่งกับตัวรับ $I(0)$ คือความเข้มแสงศูนย์กลางของหลอดไฟแอลอีดี m คือตัวเลขแลมเบอร์เซียน แสดงตามสมการที่ (2) [15]

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

PH-6



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3 ผลการทดลองเชิงตัวเลขของระบบการสื่อสาร OWVLC-I2V (ก) การกระจายค่าความสว่างแสง (lux ลักซ์) (ข) การกระจายค่ากำลังงานแสง ของหลอดไฟส่องสว่างบนถนน (ค) สัญญาณผลตอบสนองช่องการสื่อสาร ณ ตำแหน่งที่ 1

โดย $\phi_{1/2}$ คือมุมครึ่งหนึ่งของมุมที่แสงแพร่จากตัวส่ง ψ คือมุมที่แสงตกกระทบที่ตัวรับซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่ามุมมองของตัวรับ FOV จากการคำนวณทางตัวเลขสามารถแสดงการกระจายความเข้มแสงบริเวณพื้นที่ที่ได้กำหนดตามที่แสดงในรูปที่ 3 (ก) และค่าการกระจายกำลังงานแสงที่รับได้ในรูปที่ 3 (ข) จุดที่ 1 2 และ 3 เป็นตำแหน่งสำหรับหาสัญญาณผลตอบสนองของช่องสัญญาณในขณะที่ยานยนต์กำลังเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3) และ (4) [14] [15]

$$P_r = P_t H_{LOS}(0) \tag{3}$$

เมื่อ P_t คือค่ากำลังงานแสงที่ตัวส่ง $H_{LOS}(0)$ คือค่าผลตอบสนองของช่องสัญญาณทางความถี่ฮาร์โมนิคที่ศูนย์ (Channel DC gain)

2.2 ช่องสัญญาณของระบบ OWVLC-I2V

โดยปกติรูปแบบการแพร่กระจายของแสงแบ่งเป็นสองรูปหลัก ๆ คือ การแพร่แบบทางตรง (Line of Sight: LOS) และการแพร่แบบสะท้อน (Diffuse or Non-Line of Sight: NLOS) รายละเอียดสามารถศึกษาเพิ่มเติมจาก [5] สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้การการแพร่ของแสงจากไฟถนน (ตัวส่ง) ไปยังยานยนต์ (ตัวรับ) มีรูปแบบการแพร่แบบ LOS แสดงได้ตามสมการที่ (4)

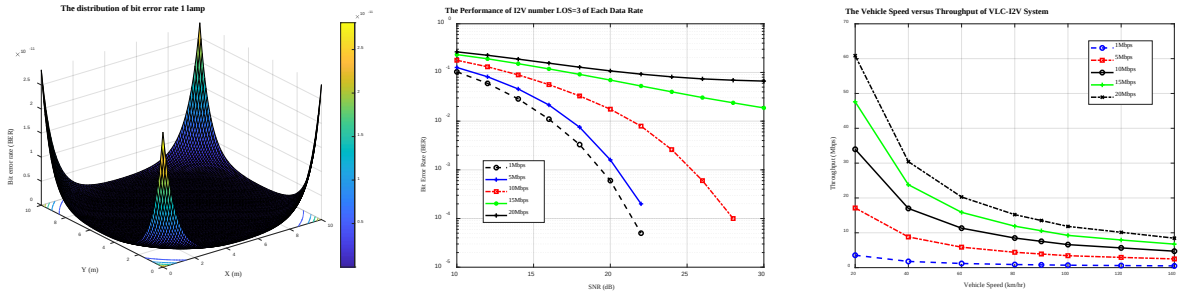
$$H_{LOS}(0) = \begin{cases} \dfrac{A_r(m+1)}{2\pi d^2}\cos^m(\phi)T_s(\psi)g(\psi)\cos(\psi), & 0 \le \psi \le \psi_c \\ 0, \quad eleswhere \end{cases} \tag{4}$$

เมื่อ A_r คือพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด d คือระยะทางจากตัวส่งไปยังตัวรับ m คือเลขแลมเบอร์เซียน ϕ คือมุมการแผ่กระจายแสงจากหลอดแอลอีดี ψ คือมุมที่แสงตกกระทบที่พื้นที่ของตัวรับ $\cos(\phi)$ คือฟังก์ชันโคไซน์ของมุมการแผ่กระจายแสงของหลอดแอลอีดี $T_s(\psi)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงที่มุมตกกระทบที่ตัวรับ $g(\psi)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงที่มุมตกกระทบที่ตัวรับ $\cos(\psi)$ คือฟังก์ชันโคไซน์มุมของแสงตกกระทบที่ตัวรับ สัญญาณที่ได้รับสามารถแสดงด้วยสมการที่ (5)

$$y(t) = Rx(t) \otimes h(t) + n(t) \tag{5}$$

เมื่อ R คือผลตอบสนองของตัวรับสัญญาณ $x(t)$ คือสัญญาณทางไฟฟ้าที่ถูกส่งมาจากตัวส่ง หลอดแอลอีดีซึ่งสัญญาณผลตอบสนองของหลอดแอลอีดีเป็น $h_{LED}(t) = e^{-\omega_c t}$ [15] $h(t)$ คือผลตอบสนองของช่องสัญญาณการสื่อสารทางแสง และ $n(t)$ คือสัญญาณรบกวนในระบบการสื่อสารแสดงด้วยสมการที่ (6) [5] ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้น $BER = Q\left(\sqrt{SNR}\right)$

$$SNR = \left(RP_r\right)^2 / \sigma_{total}^2 \tag{6}$$



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4 ผลการทดลองเชิงตัวเลขของระบบการสื่อสาร OWVLC-I2V (ก) การกระจายของบิตผิดพลาด (ข) บิตผิดพลาดของระบบในแต่ละอัตราการส่งข้อมูล (ค) ผลการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จของระบบที่สัมพันธ์กับความเร็วของยานยนต์

2.3 การทดลองระบบ OWVLC-I2V

จากแบบจำลองระบบ OWVLC-I2V ที่ได้ออกแบบทดลองการสื่อสารระบบด้วยโปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลข (Matlab) ให้ตัวส่งทำการส่งสัญญาณดิจิทัลเบสแบนด์แบบ (On-Off Keying: OOK) ด้วยความถี่ 1 Mb/s 5 Mb/s 10 Mb/s 15 Mb/s และ 20 Mb/s ตัวรับที่ถูกติดตั้งบนยานยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 90 กม./ชม. กำหนดให้จำนวนช่องสัญญาณแบบ LOS เป็น 3 ตำแหน่งในบริเวณที่ยานยนต์เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่การสื่อสาร เวลาที่ใช้รับ-ส่งข้อมูลภายในระยะทาง 10 เมตร เท่ากับ 0.4 วินาที

2.4 ผลการทดลอง

สมรรถนะของแบบจำลองการสื่อสาร OWVLC-I2V จากรูปที่ 4 (ก) เป็นการกระจายของบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่ทำการวิเคราะห์ 10 ตารางเมตร โดยสัมพันธ์กับการกระจายค่ากำลังงานแสงที่ได้รับของระบบตามสมการที่ (6) และในรูปที่ 4 (ข) หา *BER* ของระบบเมื่ออัตราการส่งข้อมูล จาก 1 Mb/s ถึง 20 Mb/s สุดท้ายผลการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) ด้วยระบบบ OWVLC-I2V มีความสัมพันธ์กับความเร็วของยานยนต์ที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ของการสื่อสาร ดังแสดงในรูปที่ 4 (ค) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของยานยนต์กับอัตราการส่งข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4 (ค) พบว่าปริมาณข้อมูลที่ได้รับลดลงเมื่อยานยนต์มีความเร็วเพิ่มขึ้น

3. อภิปราย

ผลการทดลองแบบจำลองการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นเพื่อประยุกต์ใช้งานไฟส่องสว่างบนถนนกับยานยนต์ จากการจำลองระบบอย่างง่าย แสดงให้เห็นความสามารถประยุกต์ใช้ระบบ VLC กับการสื่อสารในระบบ ITS เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาต่อเนื่องด้วยความต้องการข้อมูลการสื่อสารในยุค 5G และ 6G ที่ต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นต่อเนื่องในระดับ Gb/s และ Tb/s ทำให้ระบบ VLC มีส่วนเข้ามารองรับการสื่อสารข้อมูลในระดับที่สูงด้วยความสามารถและข้อดีของระบบ VLC

4. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้คือการนำเสนอแบบจำลองการสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็นเพื่อการประยุกต์ใช้งานระหว่างโครงสร้างพื้นฐานกับยานยนต์ (OWVLC-I2V) เป็นการปรยุกต์ใช้งานระบบ VLC กับการสื่อสารข้อมูลในระบบขนส่งอัจฉริยะ (ITS) จำลองระบบการสื่อสารผ่านรูปแบบการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงการแพร่กระจายความเข้มแสง แสดงผลตอบสนองช่องสัญญาณการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น การส่งสัญญาณเบสแบนด์แบบ OOK และได้แสดงสมรรถนะของระบบด้วยอัตราบิตผิดพลาดข้อมูล (Bit Error Rate: BER) และสมรรถนะการส่งผ่านข้อมูลที่สัมพันธ์กับความเร็วยานยนต์

เอกสารอ้างอิง

[1] "Global status report on road safety 2018." [Online]. Available: https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2018/en/.

[2] Qualcomm Technologies Inc., [Online]. Available https:// www.qualcomm.com/documents/nr-c-v2x-webinar-march-2020-presentation.

[3] T. Taguchi, "Technological innovation of high-brightness light emitting diodes (LEDs) and a view of white LED lighting system," OPTRONICS, vol. 19, no.228, pp.113-119, 2000.

[4] M. Ishida, "InGaN based LEDs and their application," OPTRONICS, vol.19, no.228, pp. 120-125, 2000.454446.

[5] T. Komine, "Visible Light Wireless Communications and Its Fundamental Study," in Thesis, 2005.

[6] L. Zeng, et al., "High Data Rate Multiple Input Multiple Output (MIMO) Optical Wireless Communications Using White LED Lighting," IEEE Journal on selected areas in communications , vol. 27, no. 9, December 2009, pp. 1654-1662.

[7] Kim, D. R., et al., (2012, August). Outdoor visible light communication for inter-vehicle communication using controller area network. In 2012 Fourth International Conference on Communications and Electronics (ICCE) (pp. 31-34). IEEE.

[8] A.-M. Cailean et al., "Novel receiver sensor for visible light communications in automotive applications," IEEE Sensors J., vol. 15, no. 8, pp. 4632–4639, Aug. 2015.

[9] C. Liu, B. Sadeghi, E.W. knightly, "Enabling vehicular visible light communication (V2LC) networks", Vanet'11, Las vegas, USA, 2011.

[10] M. Akanegawa, Y. Tanaka, M. Nakagawa, "Basic study on traffic information system using LED traffic lights," Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on , vol.2, no.4, pp.197,203, Dec 2001.

[11] M.Y. Abualhoul, M. Marouf, O. Shagdar, F. Nashashibi, "Platooning control using visible light communications: A feasibility study," Intelligent Transportation Systems - (ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on , vol., no., pp.1535,1540, 6-9 Oct. 2013.

[12] N. Kumar, N. Lourenço, D. Terra, L.N. Alves, R.L. Aguiar, Visible Light Communications in Intelligent Transportation Systems, IEEE Intelligent Vehicules Symposium 2012, 748-753.

[13] N. Kumar, "Smart and intelligent energy efficient public illumination system with ubiquitous communication for smart city," Smart Structures and Systems (ICSSS), 2013 IEEE International Conference on , vol., no., pp.152,157, 28-29 March 2013.

[14] S. Kitano, S. Haruyama, M Nakagawa, "LED road illumination communications system," Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th , vol.5, no., pp.3346,3350 Vol.5, 6-9 Oct. 2003.

[15] Nguyen H. Q., et al., A Matlab-Based Simulation Program for Indoor Visible Light Communication System. CSNDSP2010 OWC-5. (2010); 537-541.

PH-6