

อุปกรณ์การรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้

Visible light data communication device

อภิขญา ทองรักษ์ สัญญา อุณขาว มนวรรษ ตันชนกุล และ นริชเบศ ปัตติ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร E-mail: aphichata@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออุปกรณ์การรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้ เพื่อทดลองการรับ-ส่งข้อมูลผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ในระยะต่าง ๆ ไม่เกิน 700 เซนติเมตร โดยชนิดข้อมูลที่ใช้ในการส่งข้อมูลได้แก่ ไฟล์ตัวอักษรและไฟล์ภาพ ในการทดลองประกอบไปด้วยโปรแกรมรับ-ส่งข้อมูลทางแสง ซึ่งทำออกแบบโปรแกรมด้วยซอฟต์แวร์ Visual Studio C# ภายในอุปกรณ์ประกอบไปด้วย ภาคลำแสงข้อมูลจะมีวงจรขับ LED และ LED แสงสีขาวขนาด 10 วัตต์ ในส่วนของภาครับประกอบไปด้วยโมดูล TEMT6000 เซ็นเซอร์แสง และวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าชนิด LM358 ทั้งภาครับและภาคลำแสงนั้นจะถูกควบคุมโดยบอร์ด Arduino Nano V3.0 โดยทำการทดลองและติดตั้งในพื้นที่กว้าง ไม่มีสิ่งกีดขวางในขณะที่รับ-ส่งข้อมูล จากผลการทดลองเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้ทำการทดลองรับ-ส่งข้อมูลไฟล์ตัวอักษรที่ระยะการส่ง 50 -700 ซม. โดยเพิ่มขึ้นทีละ 50 เซนติเมตร ทั้งนี้พบว่าที่ระยะ 250 ซม. ในสถานที่มืดและที่ 100 ซม. ในบริเวณที่มีแสงปกติ ข้อมูลที่รับได้เริ่มมีการผิดเพี้ยน ส่วนการรับ-ส่งไฟล์รูปภาพ สามารถรับ-ส่งได้ระยะไม่เกิน 150 ซม. ในที่มืด และ 100 ซม. ในที่แสงปกติ สรุปได้ว่าระยะการรับ-ส่งข้อมูลที่มากกว่า 250 เซนติเมตร จะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของข้อมูลมากขึ้น ในการเปลี่ยนสีกล่องของอุปกรณ์ให้เป็นสีดำนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลการทดลอง

คำสำคัญ: การสื่อสารข้อมูลทางแสง เครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้

Abstract

This paper presents the visible light data communication device at the range of 700 centimeters. Types of used files are text and image files. The experiments are included with light communication program with Visual Studio C# software. This box consists of transmitter and receiver. The transmitter consists of a LED-based driver circuit and light LED 10 watt. The receiver consists of a TEMT6000

ambient light sensor module and an LM358 power amplifier. Transmitter and receiver are controlled by Arduino Nano V3.0. Experimented and installed in a wide area without any obstructions during data transmission is used. From the results of the experimentally, the optical transmission of the visible light is done. Test-send data for text files at transmission distance of 50-700 cm, up to 50 cm in increments. At the distance of 250 cm in dark place and 100 cm in the normal place, the received data is distorted for the image file. It can be concluded that the received data will cause more distortion when the distance is more than 250 cm. In the case changing color of Box from white to black. It not change result of the experiments

Keywords: Visible Light Communication (VLC), Visible Light Data Communication Device

1. บทนำ

เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลมากมายที่สร้างความสะดวกสบายในระบบการสื่อสารข้อมูล โดยปกติในการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายนั้นจะใช้คลื่นวิทยุ (Radio Frequency :RF) เช่น การใช้สัญญาณ โทรศัพท์ ที่ Bluetooth คลื่น Wi-Fi เป็นต้น แต่คลื่นเหล่านี้ยังคงมีข้อจำกัดทางด้านช่องสัญญาณการใช้งาน จึงมีความสนใจที่จะแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ (Visible Light) มาใช้ในการสื่อสารข้อมูล กลายเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible Light Communication : VLC) บทความนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ สร้าง และทดลองเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้ โดยใช้บอร์ด Arduino Nano ในการรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้ โดยมีภาคลำแสงใช้ LED chip Epistar ขนาด 10 วัตต์ และวงจรขับ LED และภาครับใช้เซ็นเซอร์แสง โมดูล TEMT6000 ในการรับสัญญาณแสงและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ไอซีหมายเลข LM358 ในการสร้างวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับจาก TEMT 6000

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 4
Proceedings of the 4th RMUTP Conference on Engineering and Technology

2. การออกแบบเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้

การออกแบบเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้สามารถที่จะทำการส่งและรับข้อมูลในช่วงที่ตามองเห็นได้นี้จะตอบสนองต่อการจำกัดของพื้นที่ที่มีการบดบังหรือมีการหักมุมในเมื่อเปรียบเทียบกับการส่งข้อมูลแบบแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว

2.1 คุณสมบัติการสื่อสารทางแสงแบบไร้สาย

การสื่อสารทางแสงแบบ ไร้สายเป็นเทคโนโลยีแบบใช้เส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Line-of-Sight) การเลือกสถานที่ติดตั้งจะต้องแน่ใจว่าไม่มีอะไรมาเกิดขวางการเชื่อมโยงของสัญญาณระยะการแยกห่างของการเชื่อมต่อ (Link) จะถูกกำหนดโดยมุม การบานออก (Divergence) รูปแบบการเชื่อมโยงของเครือข่ายระบบสื่อสารของสัญญาณของการสื่อสารทางแสงแบบไร้สายเป็นการเชื่อมโยงแบบจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง (Point-to-Point) การสื่อสารทางแสงแบบ ไร้สาย แตกต่างจากระบบสื่อสารทางเส้นใยแก้วนำแสงตรงที่ตัวกลางที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณ

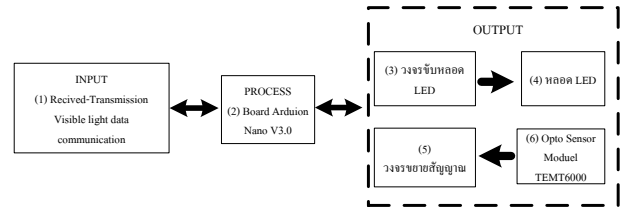
2.2 อุปกรณ์ที่ใช้

- 1) บอร์ด Arduino Nano V3.0 เป็นบอร์ดที่ใช้ประมวลผลและควบคุม การทำงาน มีขนาดเล็ก เหมาะสำหรับพื้นที่จำกัด
- 2) โมดูล TEMT6000 เป็นเซนเซอร์แสงสามารถตรวจจับได้ทั้งแสงในย่านที่มองเห็นและในย่านอินฟราเรด
- 3) หลอด LED Chip Epistar ขนาด 10 วัตต์ให้แสงสีขาว
- 4) IC เบอร์ TIP131 ใช้ในวงจรขับ LED
- 5) ไอซีออปแอมป์ LM358 ใช้เป็นตัวขยายสัญญาณ

2.3 การออกแบบวงจร

หลักการการทำงานของเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้ประกอบด้วย

- 1) โปรแกรมรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้ โดยสามารถส่งข้อมูลออกและบันทึกข้อมูลที่รับมาได้
- 2) บอร์ด Arduino Nano V3.0 ทำหน้าที่ในการควบคุมการส่งแบบดิจิทัลของ LED และแปลงสัญญาณที่ได้รับจากวงจรภาครับเพื่อให้สามารถแสดงผลในคอมพิวเตอร์ได้
- 3) วงจรขับ LED คือวงจรที่ใช้ในการขับกระแส LED ให้คงที่และเพิ่มประสิทธิภาพสัญญาณแสงของ LED
- 4) LED chip Epistar ขนาด 10 วัตต์ แรงดัน 12 โวลต์ โดยใช้ LED แสงสีขาว นำมาใช้ในการส่งข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล
- 5) วงจรขยายสัญญาณ รับจากโมดูล TEMT6000 โดยใช้คุณสมบัติของ IC เบอร์ LM358 เป็นตัวหลัก
- 6) โมดูล TEMT6000 เป็นโมดูลในการรับสัญญาณแสงของ LED โดยจะเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า



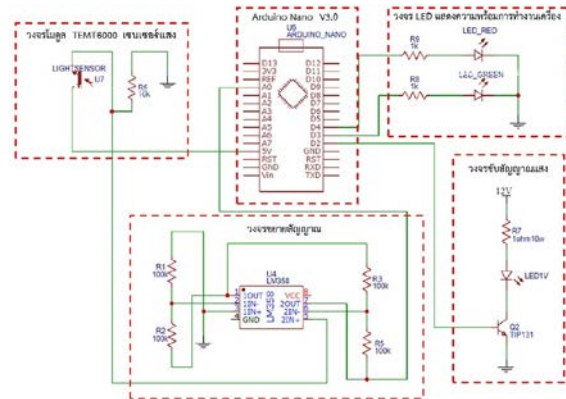
รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของการทำงานของเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้

2.4 ฝั่งงานของภาครับและส่งของเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้

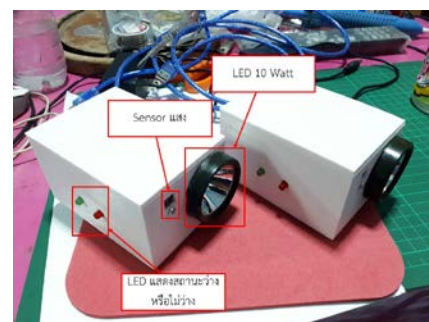
ฝั่งการทำงานเพื่อเขียนโปรแกรมสำหรับการออกแบบ Arduino Nano ในการควบคุมการรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้ โดยมีการออกแบบให้ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม สำหรับการรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้

2.5 วงจรชุดควบคุม

วงจรชุดควบคุมที่ออกแบบสำหรับเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็น ดังรูปที่ 2 ประกอบด้วย 1) ชุดวงจรโมดูลเซ็นเซอร์แสง TEMT 6000 2) ชุดบอร์ดพัฒนา Arduino Nano V3.0 3) ชุดวงจร LED เพื่อแสดง ความสถานะการทำงาน 4) ชุดวงจรขยายสัญญาณ และ 5) ชุดวงจรขับสัญญาณแสง



รูปที่ 2 วงจรควบคุมเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้



รูปที่ 3 กล่องเครื่องรับ-ส่งข้อมูลที่ตามองเห็น

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 4
 Proceedings of the 4th RMUTP Conference on Engineering and Technology

3 ผลการทำงาน

การทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลทางแสงทำการติดตั้งและทดลองการทำงานในที่มืด เพื่อให้มีแสงรบกวนจากภายนอกไม่มากเกินไปและไม่มีสิ่งกีดขวางทางแสงในระหว่างทางเดินของแสง ซึ่งตัวส่งข้อมูลจะวางให้ตรงกันกับตัวรับข้อมูล

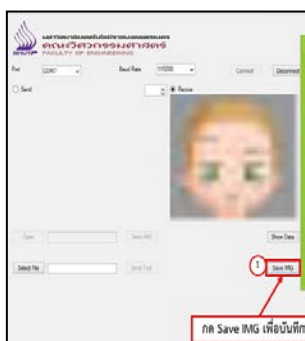
การทดลองจะทำการแบ่งระยะการรับ-ส่งข้อมูลออกเป็นระยะ 50 -700 ซม. ด้วยการเพิ่มระยะครั้งละ 50 ซม. โดยมีชนิดของข้อมูลการส่งเป็นแบบ Text ด้วยไฟล์ชนิด .txt และแบบภาพ (Image) ด้วยไฟล์ชนิด .jpg โดยมีตัวอย่างแนวการวางในรูปที่ 4 โดย แสดงตัวอย่างข้อมูลที่ทำ การส่งในระยะการส่ง 150 ซม. ชนิดตัวอักษร (Text) ขนาด และแสดง ตัวอย่างผลการรับข้อมูลชนิด Text จากระยะการส่ง 150 ซม รูปที่5(ก) ตัวอย่างข้อมูลที่ทำ การส่งในระยะการส่ง 100 ซม. ชนิดภาพ (Image) และ แสดงตัวอย่างผลการรับข้อมูลชนิดภาพที่ได้จากระยะการส่ง 100 ซม. ดัง แสดงในรูปที่ 5(ข) เป็นผลที่ได้จากการรับข้อมูลจากเครื่องรับ-ส่งข้อมูลที่ ตามมองเห็นได้ในระยะต่างๆ และ ไฟล์ชนิดต่างๆ ดังแสดงรายละเอียดใน ตารางที่ 1-3



รูปที่ 4 การติดตั้งเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่มองเห็นระยะ 150 ซม. ได้ สำหรับรับ-ส่งข้อมูลตัวอักษรด้วยไฟล์ชนิด .txt



(ก) ข้อมูลภาพที่ส่งออก



(ข) ข้อมูลภาพที่รับได้

รูปที่ 5 ข้อมูลภาพที่ใช้ในการส่งออกและรับได้ของเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่มองเห็นได้ระยะ 100 ซม.เมื่อส่งข้อมูลภาพด้วยไฟล์ชนิด .jpg

จากผลการทดลองเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามมองเห็นได้ทำการทดลองรับ-ส่งข้อมูล ไฟล์ตัวอักษรชนิด .txt ที่ระยะการส่ง 50,

100, 150, 200, 250, 300, 350 ซม. จากการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ระยะการรับ-ส่งข้อมูลทางแสงจากเครื่อง A ส่งไปยังเครื่อง B ที่มีแสงปกติที่ระยะ 50 ซม. และที่มีมืดที่ระยะ 50, 100, 150, 200 ซม. นั้นสามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ ดังตารางที่ 1 และพบว่าที่ระยะการรับ-ส่งข้อมูลที่ 250 ซม. ในที่มีมืดและระยะ 100 ซม. ในที่แสงปกติ เป็นต้นไปนั้นเริ่มมีการผิดพลาดของข้อมูลซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูล ดังนั้นสรุปได้ว่าจะมีการผิดพลาดของข้อมูลมากขึ้นจนอาจไม่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้เลย และระยะการรับ-ส่งข้อมูลทางแสงจากเครื่อง B ส่ง ไปยังเครื่อง A ที่มีแสงปกติที่ระยะ 50, 100, 150 ซม. และที่มีมืดที่ระยะ 50, 100, 150, 200, 250 ซม. นั้นสามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ ดังตารางที่ 2 และพบว่าที่ระยะการรับ-ส่งข้อมูลที่ 300 ซม. ในที่มีมืด และระยะ 200 ซม. ในที่แสงปกติ เป็นต้นไปนั้นเริ่มมีการผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูล

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบรับ-ส่งข้อมูลในที่มืดและที่มีแสงปกติ จากเครื่อง A ส่งไปยังเครื่อง B

ข้อมูล	ระยะการรับ-ส่งข้อมูลในที่มืด (ซม.)						ระยะการรับ-ส่งข้อมูลในที่แสงปกติ (ซม.)							
	50	100	150	200	250	300	350	50	100	150	200	250	300	350
อักษร Text	/	/	/	/	x	x	x	/	x	x	x	x	x	x
ภาพ 20x20 pixel	/	/	x	x	x	x	x	/	x	x	x	x	x	x
ภาพ 36x36 pixel	/	/	x	x	x	x	x	/	x	x	x	x	x	x
ภาพ 42x42 pixel	/	/	x	x	x	x	x	/	x	x	x	x	x	x
ภาพ 50x50 pixel	/	/	x	x	x	x	x	/	x	x	x	x	x	x

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบรับ-ส่งข้อมูลในที่มืดและที่มีแสงปกติ จากเครื่อง B ส่งไปยังเครื่อง A

ข้อมูล	ระยะการรับ-ส่งข้อมูลในที่มืด (ซม.)						ระยะการรับ-ส่งข้อมูลในที่แสงปกติ (ซม.)							
	50	100	150	200	250	300	350	50	100	150	200	250	300	350
อักษร Text	/	/	/	/	/	x	x	/	/	/	x	x	x	x
ภาพ 20x20 pixel	/	/	/	x	x	x	x	/	/	x	x	x	x	x
ภาพ 36x36 pixel	/	/	/	x	x	x	x	/	/	x	x	x	x	x
ภาพ 42x42 pixel	/	/	/	x	x	x	x	/	/	x	x	x	x	x
ภาพ 50x50 pixel	/	/	/	x	x	x	x	/	/	x	x	x	x	x

ดังนั้นสรุปได้ว่าจะมีการผิดพลาดของข้อมูลมากขึ้นจนอาจไม่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้เลย และการรับ-ส่งข้อมูลไฟล์รูปภาพจากเครื่อง A ส่งไปยังเครื่อง B นั้น สามารถรับ-ส่งได้ในระยะการรับ-ส่งข้อมูลที่แสงปกติได้ไม่เกิน 50 ซม. และในที่มืดได้ไม่เกิน 100 ซม. ดังแสดงในตารางที่ 1 และการรับ-ส่งจากเครื่อง B ส่ง ไปยังเครื่อง A นั้น สามารถรับ-ส่งได้ในระยะการรับ-ส่งข้อมูลที่แสงปกติได้ไม่เกิน 100 ซม. และในที่มืดได้ไม่เกิน 150 ซม. ดังตารางที่ 1 และผลการทดลองรับ-ส่งมุลเสียง ดังตารางที่ 3

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 4

Proceedings of the 4th RMUTP Conference on Engineering and Technology

ตารางที่ 3 ผลการทดลองรับ-ส่งข้อมูลโดยวางตัวเครื่องไม่ตรงกันของเครื่อง A-B และ B-A

ระยะ (ซ.ม.)	ระยะวางตำแหน่งเครื่องทางซ้าย (ซ.ม.)			ระยะวางตำแหน่งเครื่องทางขวา (ซ.ม.)		
	10	20	30	10	20	30
50	/	/	x	/	/	x
100	/	/	x	/	/	x
150	/	/	x	/	/	x
200	/	/	x	/	/	x
250	/	/	x	/	/	x

3. สรุปและวิจารณ์

การออกแบบเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้ เพื่อผลการส่งข้อมูลผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ระยะต่าง ๆ ไม่เกิน 7 เมตร โดยชนิดไฟล์ที่ใช้ในการส่งเป็นไฟล์ตัวอักษรชนิด .txt โดยมีขนาด 49 bytes และไฟล์ภาพ .jpg คือ ขนาด 10x10 pixel, 624 bytes, ขนาด 16x16 pixel 962 bytes และขนาด 20x20 pixel 1.75 kbytes โดยการทดลองประกอบด้วยโปรแกรมรับ-ส่งข้อมูลทางแสงโดยซอฟต์แวร์ Visual Studio C# โดยมีโครงสร้างของกล่องใส่อุปกรณ์ขนาดกว้าง 7.5 ซม. ยาว 10.5 ซม. สูง 6 ซม. และภายในกล่องประกอบด้วยชุดควบคุมการรับ-ส่งข้อมูลทางแสงโดยใช้บอร์ดพัฒนา Arduino Nano V3.0 เป็นตัวควบคุมการรับ-ส่งข้อมูล ส่วนภาคส่งประกอบด้วยวงจรขับ LED และภาครับประกอบด้วยโมดูลเซ็นเซอร์แสง TEMA6000 และวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ IC หมายเลข LM358 โดยทำการทดลองและติดตั้งในพื้นที่กว้างไม่มีสิ่งกีดขวาง และไม่มีแสงรบกวนจากภายนอกมากเกินไป การทดลองรับ-ส่งข้อมูลอักษรในสถานที่ที่มีแสงน้อย จากเครื่อง A ไป B สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ที่ระยะ 50 เซนติเมตร แต่ที่ระยะที่ 100 เซนติเมตร เป็นต้นไปไม่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ และการทดลองรับ-ส่งข้อมูลอักษร จากเครื่อง B ไป A ที่ระยะ 50, 100 และ 150 เซนติเมตร สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ แต่ที่ระยะ 200 เซนติเมตร เป็นต้นไปไม่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ การทดลองรับ-ส่งข้อมูลภาพในสถานที่ที่มีแสงน้อย จากเครื่อง A ไป B สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ที่ระยะ 50 เซนติเมตร แต่ที่ระยะที่ 100 เซนติเมตร เป็นต้นไปไม่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ และการทดลองรับ-ส่งข้อมูลภาพ จากเครื่อง B ไป A ที่ระยะ 50 และ 100 เซนติเมตร สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ แต่ที่ระยะ 150 เซนติเมตร เป็นต้นไปไม่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ การรับ-ส่งข้อมูลในสถานที่มืดในการรับ-ส่งข้อมูลอักษร จากเครื่อง A ไป B สามารถส่งได้ในระยะ 200 เซนติเมตร และการส่งข้อมูลภาพสามารถรับ-ส่งได้ในระยะ 100 เซนติเมตร หากเกินกว่านั้นจะไม่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ การรับ-ส่งข้อมูลในสถานที่มืดในการรับ-ส่งข้อมูลอักษร จากเครื่อง B ไป A สามารถส่งได้ในระยะ 250 เซนติเมตร และการส่งข้อมูลภาพสามารถรับ-ส่งได้ในระยะ 150 เซนติเมตร หากเกิน

กว่านั้นจะไม่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ และการรับ-ส่งข้อมูลเสียง 8 บิต ขนาด 2.39 กิโลไบต์ ไม่สามารถส่งได้เนื่องจากภาครับไม่สามารถแปลงสัญญาณที่ส่งมาจากภาคส่งข้อมูลของเครื่องรับ-ส่งข้อมูลทางแสงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งผลการวัดค่า

สัญญาณไฟฟ้าของตัวรับ ในกราฟของสัญญาณไฟฟ้าที่ไม่ผ่านตัวขยายสัญญาณ IC เบอร์ LM358 มีค่าสัญญาณไฟฟ้าของตัวรับในกราฟของสัญญาณไฟฟ้าที่ไม่ผ่านตัวขยายสัญญาณ IC เบอร์ LM358 มีค่า Peak - Peak 5.20 โวลต์ และกราฟของสัญญาณไฟฟ้าที่ผ่านตัวขยายสัญญาณ IC เบอร์ LM358 นั้นมีค่า Peak - Peak 4.40 โวลต์ ค่าแรงดันที่ผ่านตัวขยายนั้นมีค่าน้อยกว่าตัวที่ไม่ผ่าน วงจรขยายสัญญาณ เนื่องจากในตัวโมดูล TEMA6000 นั้นมีตัวขยายสัญญาณในตัวอยู่แล้วทำให้แรงดันสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 5.0 โวลต์ ซึ่งวงจรขยายที่ใช้มีขีดจำกัดสูงสุดประมาณ 4.00 โวลต์ เมื่อใส่วงจรขยายเข้าไปจึงทำให้แรงดันที่ผ่านตัวขยายนั้นลดลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shlomi Arnon, "Introduction," in Visible Light Communication, S. Arnon, Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015, pp. 1-9.
- [2] D. Karunatilaka, et al., "LED based Indoor Visible Light Communications: State of the Art", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, issue. 3, 2015.
- [3] ปรีชา กอเจริญ และคณะ, "การสื่อสารไร้สายระยะใกล้ด้วยแสงที่มองเห็นได้: เทคโนโลยี การพัฒนาและการขับเคลื่อน", วารสาร กสทช.ประจำปี 2559, หน้า 529-549.
- [4] เกียรติศักดิ์ ศรีพิมานวัฒน์, "การส่องสว่างข้อมูล 1 (Visible Communication)", สมาคมวิชาการไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคมและสารสนเทศ (ECTI Association), หน้า 98
- [5] Nan Chi, "LEC-based Visible Light Communications", Springer, pp. 245, 2018.
- [6] รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โควินท์วิวัฒน์. "โครงการพัฒนาความพร้อมระดับประเทศของการสื่อสารด้วยแสงสว่าง". (July 6 2015).
- [7] Honglei Li, Xiongbin Chen, Beiju Huang, Member. IEEE Danyin Tang, and Honda Chen. Member. IEEE. "High Bandwidth Visible Light Communications Base on a Post-Equalization Circuit" pp.1