

การพัฒนาระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้บนมาตรฐาน
IEEE 802.15.7

IMPLEMENTATION OF VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEM
BASED ON IEEE 802.15.7 STANDARD



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-230-108

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้บนมาตรฐาน
IEEE 802.15.7

IMPLEMENTATION OF VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEM
BASED ON IEEE 802.15.7 STANDARD



T148806



พรชนก นามอ่อนตา

PORNCHANOK NAMONTA

เลขหมู่ 148806
เลขทะเบียน 23 มี.ย. 2560
นับเดือนปี

b. 00267069
l.

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีที่มีการสืบสวนคดี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2017-EN-M-230-108

IMPLEMENTATION OF VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEM
BASED ON IEEE 802.15.7 STANDARD



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2017-EN-M-230-108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.7
Thesis Title Implementation of Visible Light Communication System Based on IEEE 802.15.7 Standard
นักศึกษา นางสาวพรชนก นามอ่อนตา
รหัสประจำตัว 58601212
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-230-108

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.โสเมสิริ	จันทร์สกุล	โสมสงัด จันทร์สกุล
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์	เหล่าสกุล	อรรถสิทธิ์ เหล่าสกุล
ผศ.ดร.สุธีรา	พันธ์ธีรานุรักษ์	สุธีรา นันธ์ธีรานุรักษ์
รศ.ดร.ปิติเขต	สุรักษา	ปิติเขต สุรักษา
ผศ.ดร.พนารัตน์	เชิญถนอมวงศ์	พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2560
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.7
นักศึกษา	นางสาวพรชนก นามอ่อนตา
รหัสประจำตัว	58601212
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษา ออกแบบและพัฒนาระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ซึ่งนิยามการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ในระยะสั้น บนระดับชั้นของการสื่อสาร PHY Layer และ MAC Layer โดยระบบได้นำการเข้ารหัสข้อมูล การถอดรหัสข้อมูล การเข้ารหัสข้อมูล รวมไปถึงลำดับการทำงานภายในเครือข่ายรูปแบบต่างๆ ตามมาตรฐานมาใช้ โดยจากการทดลองรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วการสื่อสารตามมาตรฐานในโหมด PHY I และเชื่อมต่อเครือข่ายด้วยรูปแบบการเชื่อมต่อทั้งสามรูปแบบตามมาตรฐาน พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุด 100 kbps ได้อย่างถูกต้องในทุกรูปแบบการเชื่อมต่อ ด้วยมีความประสงค์ให้ระบบนี้ใกล้เคียงกับมาตรฐานมากที่สุด เพื่อใช้ในการพัฒนาความรู้ความเข้าใจ และเกิดองค์ความรู้ใหม่ทางด้านระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ หรือนำไปพัฒนาความสามารถเพิ่มเติมสำหรับงานเฉพาะด้านที่มีความเกี่ยวข้องกับการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้



Thesis	Implementation of Visible Light Communication System Based on IEEE 802.15.7 Standard
Student	Ms.Pornchanok Namonta
Student ID.	58601212
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr.Panarat Cherntanomwong

ABSTRACT

This thesis proposes the study, design, and development of visible light communication system based on IEEE 802.15.7 standard which defines a PHY and a MAC layer for short-range optical wireless communication using visible light in optically transparent media. This system uses the encoding scheme, decoding scheme, packaging scheme and communication scheme for different topologies defined in the standard. Based on the experiments, the developed system can transmit and receive data in the highest data rate of 100 kbps and in any topology defined in the standard. The main propose of this system is to follow the standard model. Therefore, this system can be used to improve the knowledge in this field, or this system can be additionally developed for another specific visible light communication field.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนารัตน์ เขิญถนอมวงศ์ ที่คอยให้คำชี้แนะและช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ นายณัฐพล นาคราช และ นายกฤษณ์ ศรีวิลาศ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางให้แก่ข้าพเจ้า ทั้งเรื่องการเขียนผลงานตีพิมพ์ และองค์ความรู้ต่างๆ ในทุกๆ ด้านที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณ นายวรุฒม์ อร่ามกุล รวมทั้งรุ่นพี่ เพื่อนๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณน้องๆ ในห้องวิจัยทุกคนที่พร้อมให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

สุดท้ายต้องขอขอบคุณบิดา มารดา ของข้าพเจ้า ที่คอยสนับสนุน ผลักดัน และเป็นกำลังใจ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พรชนก นามอ่อนตา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการวิจัย.....	2
1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	2
1.5.1 ฮาร์ดแวร์.....	2
1.5.2 ซอฟต์แวร์.....	3
1.6 ประโยชน์ของการวิจัย	3
1.7 ส่วนประกอบของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้.....	4
2.3 โฟโตไดโอด (Photodiode).....	5
2.4 แอลอีดี	5
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller).....	6
2.6 ออปแอมป์ (Operational Amplifiers: Op-Amp).....	7
2.7 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Effect Transistor: FET).....	8
2.8 วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit).....	8
2.9 มาตรฐาน IEEE 802.15.7	9
2.9.1 โทโพโลยีเครือข่าย (Network Topology)	10
2.9.2 อุปกรณ์ภายในเครือข่าย	11
2.9.3 สถาปัตยกรรม.....	11
2.9.4 MAC Layer.....	12
2.9.5 PHY Layer.....	26
2.9.6 ลำดับการสื่อสารระหว่าง PHY และ MAC Layer	36
บทที่ 3 การออกแบบระบบ	44
3.1 บทนำ.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 โครงสร้างการทำงานของระบบในภาพรวม.....	44
3.3 ฮาร์ดแวร์.....	45
3.3.1 ภาคส่ง.....	45
3.3.2 ภาครับ.....	47
3.4 ซอฟต์แวร์.....	50
3.4.1 ซอฟต์แวร์หลัก.....	50
3.4.2 ซอฟต์แวร์รอง.....	56
3.4.3 ขั้นตอนการทำงานของคำสั่ง.....	57
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	66
4.1 บทนำ.....	66
4.2 ระยะทางสูงสุดที่สามารถรับส่งข้อมูลได้.....	66
4.3 ความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล.....	67
4.4 จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล.....	68
4.4.1 จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วการสื่อสาร 11.67 kbps.....	68
4.4.2 จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลด้วยความเร็วการสื่อสารตามมาตรฐาน.....	70
4.4.3 จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับข้อมูลด้วยความเร็วการสื่อสารตามมาตรฐาน.....	71
4.4.4 จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสตามมาตรฐาน.....	73
4.5 การกู้คืนข้อมูลที่เสียหาย.....	74
4.6 การสื่อสารภายในเครือข่าย.....	76
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 สรุปผลวิจัย.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
เอกสารอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.1	ระยะทางสูงสุดในการรับส่งข้อมูลขนาด 100 byte ที่ข้อมูลมีความถูกต้อง 100% ด้วยความเร็วในการสื่อสารที่ต่างกัน..... 66
ตารางที่ 4.2	จำนวนบิตข้อมูลที่ผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลขนาด 100 byte ที่มีระยะทางในการรับส่งอยู่ 80 cm ด้วยความเร็วในการสื่อสารที่ต่างกัน..... 68
ตารางที่ 4.3	จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยกำหนดระยะทางในการสื่อสารเท่ากับ 70 cm และรับส่งด้วยความเร็วของการสื่อสารเท่ากับ 11.67 kbps.... 69
ตารางที่ 4.4	จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลของภาคส่งที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.1 ในหน่วยมิลลิวินาที (ms) โดยเปรียบเทียบตามขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่งและความเร็วในการส่งข้อมูล การคำนวณนี้ได้หักข้อมูลที่ส่งออกจำนวน 64 byte เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการเก็บผลการทดลอง..... 70
ตารางที่ 4.5	จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลของภาคส่งที่ได้จากการทดลองในหน่วยมิลลิวินาที (ms) โดยเปรียบเทียบตามขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่งและความเร็วที่ใช้ในการส่งข้อมูล กำหนดให้ระยะทางการรับส่งเท่ากับ 70 cm 71
ตารางที่ 4.6	จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับข้อมูลของภาครับที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.1 ในหน่วยมิลลิวินาที (ms) โดยเปรียบเทียบตามขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่งและความเร็วในการส่งข้อมูล..... 71
ตารางที่ 4.7	จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับข้อมูลของภาครับที่ได้จากการทดลองในหน่วยมิลลิวินาที (ms) โดยเปรียบเทียบตามขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่งและความเร็วที่ใช้ในการส่งข้อมูล กำหนดให้ระยะทางการรับส่งเท่ากับ 70 cm 72
ตารางที่ 4.8	จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งและรับข้อมูล โดยมีข้อมูลก่อนการเข้ารหัสตามมาตรฐานทั้งหมด 500 bytes ซึ่งหลังจากผ่านการเข้ารหัสแล้วจะได้ข้อมูลที่มีความยาวต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วการสื่อสารที่ใช้ 73

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1	แผนภาพระบบการสื่อสารผ่านแสงไร้สายที่ตามองเห็นได้เบื้องต้น..... 4
รูปที่ 2.2	โฟโตไดโอด เบอร์ TSL12SM-LF และโฟโตไดโอด เบอร์ SFH203P..... 5
รูปที่ 2.3	หลอดแอลอีดีชนิด Ultra Bright..... 6
รูปที่ 2.4	บอร์ด Arduino Uno เชื่อมต่อกับ Arduino Shield รุ่น Arduino XBee..... 6
รูปที่ 2.5	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Mega 2560..... 7
รูปที่ 2.6	ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อออปแอมป์มีค่า Slew Rate ที่ไม่เหมาะสมกับความถี่ที่ได้รับ..... 7
รูปที่ 2.7	ลักษณะการทำงานของวงจรกรองความถี่แต่ละประเภท..... 8
รูปที่ 2.8	ตัวอย่างการนำเทคโนโลยี VLC ไปประยุกต์ใช้งาน..... 10
รูปที่ 2.9	การประยุกต์ใช้งานโทโพโลยีเครือข่ายทั้ง 3 แบบ..... 10
รูปที่ 2.10	โครงสร้างของสถาปัตยกรรมของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน..... 12
รูปที่ 2.11	โครงสร้างซูเปอร์เฟรม (Superframe)..... 13
รูปที่ 2.12	การเพิ่มช่องว่างระหว่างเฟรม..... 14
รูปที่ 2.13	รูปแบบการสื่อสารที่ไม่มีการส่งค้ำยันรับการได้รับเฟรม..... 18
รูปที่ 2.14	รูปแบบการสื่อสารที่มีการส่งค้ำยันรับการได้รับเฟรม..... 19
รูปที่ 2.15	กระบวนการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็วเริ่มต้นจากอุปกรณ์ลูกข่าย..... 20
รูปที่ 2.16	กระบวนการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็วเริ่มต้นจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์..... 21
รูปที่ 2.17	ตัวอย่างอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ที่รองรับการส่งผ่านหลายความยาวคลื่น..... 21
รูปที่ 2.18	ลักษณะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่าย..... 22
รูปที่ 2.19	การควบคุม PHY Switch ผ่านเอนทิตีควบคุมอุปกรณ์ DME..... 23
รูปที่ 2.20	การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่ายและการควบคุม..... 24
รูปที่ 2.21	การจัดโครงสร้างของซูเปอร์เฟรมเพื่อรองรับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่าย..... 24
รูปที่ 2.22	การเติมข้อมูลในรูปแบบพิเศษ FLP ในช่วงว่างระหว่างเฟรม..... 25
รูปที่ 2.23	สเปกตรัมในสถานะการมอดูเลตของ PHY Layer ทั้งสามแบบ..... 26
รูปที่ 2.24	มาตรฐานของรูปแบบ PHY I..... 26
รูปที่ 2.25	มาตรฐานของรูปแบบ PHY II..... 27
รูปที่ 2.26	มาตรฐานของรูปแบบ PHY III..... 27
รูปที่ 2.27	รหัสแถบความยาวคลื่นและความกว้างของสเปกตรัม..... 28
รูปที่ 2.28	โหมดการสื่อสารข้อมูลทั้ง 3 รูปแบบ..... 28
รูปที่ 2.29	การปรับค่าความสว่างสำหรับการมอดูเลตแบบ OOK..... 29
รูปที่ 2.30	การปรับค่าความสว่างเมื่อใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ VPPM..... 30
รูปที่ 2.31	โครงสร้าง PPDU..... 30
รูปที่ 2.32	การกำหนด TDP ของการเชื่อมต่อทั้ง 4 รูปแบบ..... 30
รูปที่ 2.33	โครงสร้าง SHR ของการส่งแบบ Single Mode..... 31
รูปที่ 2.34	โครงสร้างของส่วนหัวของ PHY..... 31
รูปที่ 2.35	ข้อกำหนดของฟิลด์ MCS ID..... 32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.36	โครงสร้าง PSDU ของรูปแบบ PHY I.....	32
รูปที่ 2.37	แผนภาพของขั้นตอนการเข้ารหัสของ PHY I.....	33
รูปที่ 2.38	พหุนามสำหรับการเข้ารหัส.....	33
รูปที่ 2.39	ขั้นตอนการทำ Interleaving.....	34
รูปที่ 2.40	Rate-1/3 Mother Convolutional Code ที่ Constraint Length เท่ากับ 7	34
รูปที่ 2.41	ขั้นตอนการสร้างผลลัพธ์ของ Rate-1/2 Code จากผลลัพธ์ของ Rate-1/3 Code.....	35
รูปที่ 2.42	ขั้นตอนการสร้างผลลัพธ์ของ Rate-1/4 Code จากผลลัพธ์ของ Rate-1/2 Code.....	35
รูปที่ 2.43	ขั้นตอนการสร้างผลลัพธ์ของ Rate-2/3 Code จากผลลัพธ์ของ Rate-1/3 Code.....	35
รูปที่ 2.44	การเข้ารหัสด้วยเทคนิค Manchester	36
รูปที่ 2.45	ขั้นตอนการทำแอดทีฟสแกน	37
รูปที่ 2.46	ขั้นตอนการทำพาสซีฟสแกน.....	38
รูปที่ 2.47	การสร้าง VPAN ของอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์.....	39
รูปที่ 2.48	ขั้นตอนร้องขอการเชื่อมโยงเครือข่ายของอุปกรณ์.....	40
รูปที่ 2.49	ขั้นตอนตอบรับการร้องขอการเชื่อมโยงเครือข่ายของอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์	41
รูปที่ 2.50	ขั้นตอนการส่งข้อมูลของภาคส่ง.....	42
รูปที่ 2.51	ขั้นตอนการรับข้อมูลของภาครับ.....	43
รูปที่ 3.1	โครงสร้างการทำงานของระบบในภาพรวม	44
รูปที่ 3.2	การเชื่อมต่อภายในของอุปกรณ์รับส่งข้อมูลผ่านแสง	45
รูปที่ 3.3	วงจรภาคส่ง.....	46
รูปที่ 3.4	หลอด LED และเลนส์นูน.....	46
รูปที่ 3.5	วงจรภาครับ.....	47
รูปที่ 3.6	แรงดันที่ตกคร่อม R1 และ R2 ในสถานะที่ได้รับแสงและไม่ได้รับแสง	47
รูปที่ 3.7	กราฟระหว่างความถี่ในหน่วยเฮิรตซ์ และอัตราการขยายในหน่วยเดซิเบล	49
รูปที่ 3.8	โครงสร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Star	51
รูปที่ 3.9	UI ของการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Star	51
รูปที่ 3.10	โครงสร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Broadcast	53
รูปที่ 3.11	UI ของการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Broadcast	53
รูปที่ 3.12	โครงสร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Peer-to-Peer	54
รูปที่ 3.13	UI ของการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Peer-to-Peer	54
รูปที่ 3.14	UI ของการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Peer-to-Peer หลังการตั้งค่าอุปกรณ์.....	55
รูปที่ 3.15	โครงสร้างเฟรมข้อมูลที่ซอฟต์แวร์หลักส่งให้กับซอฟต์แวร์รอง.....	56
รูปที่ 3.16	การทำงานของคำสั่ง HWON	57
รูปที่ 3.17	การทำงานของคำสั่ง HWCH.....	57
รูปที่ 3.18	การทำงานของคำสั่ง HWOFF.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.19	การทำงานของคำสั่ง ASCN และ BSCN 58
รูปที่ 3.20	การทำงานของคำสั่ง DSEN และ DACK 59
รูปที่ 3.21	การทำงานของคำสั่ง AFLR และ BFLR..... 60
รูปที่ 3.22	การทำงานของคำสั่ง DREQ..... 61
รูปที่ 3.23	การทำงานของคำสั่ง PSCN และ QSCN..... 61
รูปที่ 3.24	การทำงานของคำสั่ง QQAS RQAS SQAS และ TQAS 62
รูปที่ 3.25	การทำงานของคำสั่ง RQDA และ SQDA..... 63
รูปที่ 3.26	การทำงานของคำสั่ง BCST..... 64
รูปที่ 3.27	การทำงานของคำสั่ง RTAR UTAR STAR และ TTAR 64
รูปที่ 4.1	สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง..... 66
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการสื่อสารและระยะทางระหว่างอุปกรณ์... 67
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการสื่อสารและจำนวนบิตข้อมูลที่ผิดพลาด68
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของข้อมูลที่รับส่งและเวลาในการประมวลผล ของภาคส่ง 69
รูปที่ 4.5	คำสั่งการวัดจำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล 70
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของข้อมูลที่รับส่งและเวลาในการประมวลผล ของภาคส่ง 73
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของข้อมูลที่รับส่งและเวลาในการประมวลผล ของภาคส่งในการส่งข้อมูลผ่านการเข้ารหัสตามมาตรฐานความเร็วทั้ง 5 ความเร็ว..... 74
รูปที่ 4.8	การทดลองการรับส่งข้อมูลในโทโพโลยีแบบ Star 76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย ซึ่งเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ใช้คลื่นวิทยุเป็นคลื่นพาห์สำหรับการส่งข้อมูลซึ่งมีข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง หนึ่งในข้อจำกัดที่โดดเด่นคือเรื่องความจุของช่องสัญญาณซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดทำให้เกิดการแออัดของข้อมูลขึ้น โดยจำนวนของผู้ใช้งานเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณ (Signal Interference) และเป็นอุปสรรคในการพัฒนา [1] เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible Light Communication: VLC) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถจัดการกับปัญหาดังกล่าวของคลื่นวิทยุได้ นอกจากนั้นยังมีความปลอดภัยในการสื่อสารมากกว่า เนื่องจากผู้เจาะระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ (Hacker) ดักจับสัญญาณการสื่อสารในอากาศที่ไม่ได้รับแสงโดยตรงไม่ได้ เนื่องจากการสื่อสารทิศทางตรง (Line of Sight)

VLC เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ใช้ความยาวคลื่นแสงระหว่าง 380 นาโนเมตรไปจนถึง 780 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้เป็นคลื่นพาห์ [2] เมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นชนิดอื่นแล้ว แสงที่ตามองเห็นได้นั้นไม่มีอันตรายต่อมนุษย์และสามารถส่งด้วยกำลังงานที่สูงได้ อีกทั้งยังไม่มีข้อจำกัดทางกฎหมายสำหรับแหล่งกำเนิดแสงใดๆ นอกจากเรื่องความปลอดภัยแล้ว VLC ยังมีข้อดีในเรื่องการใช้งานในบริเวณที่คลื่นวิทยุไม่สามารถใช้ได้ เช่น ในโรงพยาบาล หรือบริเวณรอบๆ อุปกรณ์ที่ต้องการความแม่นยำสูง [3]

โทรศัพท์ไร้สายเครื่องแรกถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1880 โดยอเล็กซานเดอร์ เกรแฮม เบลล์ ชื่ออุปกรณ์ว่าโฟโตโฟน (Photophone) โดยได้ทดลองการส่งข้อความผ่านอุปกรณ์ไร้สายขึ้นนี้ด้วยคลื่นแสง ทว่าในยุคนั้นความก้าวหน้าทางเทคโนโลยียังไม่พัฒนามากนัก เครื่องโฟโตโฟนมีข้อจำกัดการใช้งานมากเกินไปจนไม่สามารถนำมาใช้ในชีวิตจริงได้ จึงทำให้แนวคิดดังกล่าวเป็นได้เพียงทฤษฎีเท่านั้น [4]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาหลอดไฟแบบเก่าเริ่มถูกทดแทนด้วยหลอดแอลอีดี (Light Emitting Diode: LED) ถึงแม้ว่าหลอดแอลอีดีจะมีราคาแพงกว่า แต่เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพในการทำงาน หลอดแอลอีดีมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าในการใช้งาน โดยการหันมาใช้หลอดแอลอีดีนี้เป็นการเปิดทางให้กับเทคโนโลยี VLC ให้สามารถนำมาปรับใช้ในชีวิตประจำวันได้ เนื่องจากตัวหลอดมีความสามารถในการติดดับด้วยความไวสูงถึงระดับเมกะเฮิรตซ์ ทำให้สามารถส่งข้อมูลด้วยความไวในระดับที่สายตามนุษย์ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของแสง และสามารถให้หลอดในการให้แสงสว่างไปพร้อมกับการส่งข้อมูลได้ในเวลาเดียวกัน [5]

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยี VLC ได้ถูกนำมาใช้งานและศึกษากันอย่างแพร่หลาย มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับ VLC ขึ้นหลายมาตรฐาน เช่น JEITA CP-1221 IEEE 802.15.7 และ 802.11 IP PHY [6] โดยแต่ละมาตรฐานมีข้อกำหนด และหลักการทำงานที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งถึงแม้จะมีการกำหนดมาตรฐานดังกล่าวขึ้นมา แต่การใช้งานในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นการพัฒนาระบบ VLC ขึ้นจากการออกแบบด้วยตนเอง ไม่อ้างอิงตามมาตรฐาน เนื่องจากยังขาดความรู้ความเข้าใจในมาตรฐาน และจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มาตรฐานดังกล่าวไม่ได้ถูกนำมาศึกษากันอย่างแพร่หลายนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ขึ้น เพื่อทดแทนการใช้คลื่นวิทยุสำหรับการสื่อสาร และนำเอามาตรฐาน IEEE 802.15.7 ซึ่งนิยามการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ในระยะสั้น บนระดับชั้นของการสื่อสาร PHY Layer และ MAC Layer มาศึกษาและพัฒนา โดยระบบที่พัฒนาขึ้นมีการเข้ารหัสข้อมูล การถอดรหัสข้อมูล การเข้ารหัสข้อมูล รวมไปถึงลำดับการทำงานภายในเครือข่ายรูปแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 เพื่อให้เข้าใจการทำงานของระบบ ทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ทางการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.7 อีกทั้งสามารถนำไปองค์ความรู้ที่ได้ไปพัฒนาความสามารถเพิ่มเติมสำหรับงานเฉพาะด้านที่มีความเกี่ยวข้องได้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 พัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ โดยอ้างอิงส่วนของชั้นการสื่อสาร PHY Layer และ MAC Layer จากมาตรฐาน IEEE 802.15.7
- 1.3.2 พัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ ทั้งแบบจำลอง (Simulation) และ อุปกรณ์ต้นแบบเพื่อให้ใช้งานได้จริงที่มีความถี่ในการสื่อสารสูงสุด 100 kbps
- 1.3.3 ทดลองระบบ วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง เพื่อให้เกิดความเข้าใจในระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นได้มากยิ่งขึ้น

1.4 วิธีการวิจัย

- 1.4.1 ค้นคว้า วิจัย และศึกษาการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นได้
- 1.4.2 ค้นคว้า วิจัย และศึกษามาตรฐาน IEEE 802.15.7
- 1.4.3 ศึกษา ค้นคว้า และทดลองพัฒนาโปรแกรม Simulation ของระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ บนมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ด้วยภาษา C#
- 1.4.4 ศึกษา ค้นคว้า และทดลองพัฒนาโปรแกรมบน Arduino IDE เพื่อควบคุมการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560
- 1.4.5 ออกแบบรูปแบบและวิธีการรับส่งข้อมูลระหว่างฮาร์ดแวร์กับซอฟต์แวร์ และระหว่างฮาร์ดแวร์กับฮาร์ดแวร์ โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEEE 802.15.7
- 1.4.6 ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEEE 802.15.7
- 1.4.7 ทดสอบ และปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพและมีความใกล้เคียงกับมาตรฐาน IEEE 802.15.7 มากที่สุด
- 1.4.8 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1.5.1 ฮาร์ดแวร์

- | | |
|--|-----------------|
| - คอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนาโปรแกรมและแสดงข้อมูล | จำนวน 2 เครื่อง |
|--|-----------------|

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ดิจิทัลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope)	จำนวน 1 เครื่อง
- มัลติมิเตอร์ (Multimeter)	จำนวน 2 เครื่อง
- บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560	จำนวน 5 ชุด
- หลอดไฟ LED CLEE Ultra Bright	จำนวน 12 ชุด
- โฟโตไดโอด เบอร์ SFH203P	จำนวน 12 ตัว
- ไอซี เบอร์ ULN2803A	จำนวน 5 ตัว
- ทรานซิสเตอร์ JFET N-Channel เบอร์ 2N5458	จำนวน 12 ตัว
- ออปแอมป์ เบอร์ TSV992AIDT	จำนวน 7 ตัว
- ตัวต้านทาน 15 Ω 1 W	จำนวน 12 ตัว
- ตัวต้านทาน 1 k Ω 1/4 W	จำนวน 12 ตัว
- ตัวต้านทาน 2 k Ω 1/4 W	จำนวน 24 ตัว
- ตัวต้านทาน 30 k Ω 1/4 W	จำนวน 12 ตัว
- ตัวต้านทาน 1 M Ω 1/4 W	จำนวน 12 ตัว
- ตัวเก็บประจุไฟฟ้า 0.1 μ F	จำนวน 12 ตัว

1.5.2 ซอฟต์แวร์

- โปรแกรม Microsoft Visual Studio Express 2013 for Windows Desktop สำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของระบบด้วยภาษา C# บนคอมพิวเตอร์
- โปรแกรม Arduino IDE 1.8.2 สำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของบอร์ด Arduino Mega 2560
- โปรแกรม Virtual Serial Ports Emulator (VSPE) สำหรับจำลองพอร์ตอนุกรม
- โปรแกรม Hercules 3.2.8 สำหรับทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างพอร์ตอนุกรม

1.6 ประโยชน์ของการวิจัย

สามารถนำระบบ Simulation และระบบจริงที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ในการเรียนการสอนในเรื่องของระบบการสื่อสารผ่านแสง รวมไปถึงวิชาที่เกี่ยวข้อง และเพื่อให้ผู้ที่มาศึกษาเกิดความรู้ความเข้าใจในระบบการสื่อสารผ่านแสงบนมาตรฐาน IEEE 802.15.7 และเห็นภาพได้ชัดเจนจากระบบที่พัฒนาขึ้น รวมถึงสามารถนำการวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อยอดให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาบุคลากร และความรู้ทางด้านระบบการสื่อสารผ่านแสงมากยิ่งขึ้น

1.7 ส่วนประกอบของการวิจัย

- เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย 5 บท ได้แก่
- บทที่ 1 บทนำ
 - บทที่ 2 ทฤษฎี และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง
 - บทที่ 3 การออกแบบระบบ
 - บทที่ 4 ผลการทดลอง
 - บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

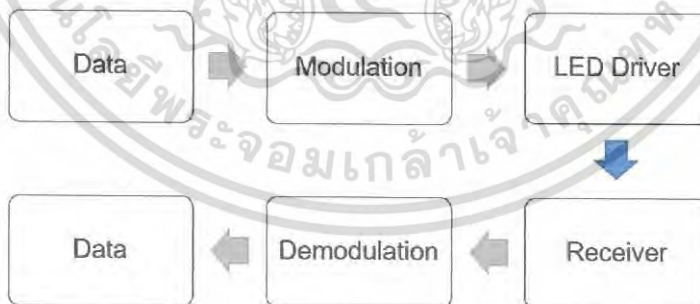
2.1 บทนำ

เพื่อสร้างระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นให้มีความใกล้เคียงกับมาตรฐาน IEEE 802.15.7 มากที่สุด จึงต้องศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องของการสื่อสารผ่านแสง และเข้าใจมาตรฐาน IEEE 802.15.7 รวมถึงต้องหาวิธีการที่จะสามารถพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อตอบสนองต่อหลักการที่ศึกษาได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งศึกษาหาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถนำมาประยุกต์สร้างระบบนี้ขึ้นได้

2.2 ระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้

การสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้หรือที่เรียกสั้นๆ ว่า VLC เป็นการสื่อสารข้อมูลโดยใช้แสงที่ตามองเห็นได้ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 380-780 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เป็นอันตรายต่อสายตาเป็นคลื่นพาห์ ปัจจุบันแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมนำมาใช้งานคือหลอดแอลอีดีที่มีความเร็วในติดตั้งสูงถึงระดับเมกะเฮิรตซ์ มากกว่าหลอดชนิดเก่า หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) ซึ่งมีความเร็วในการติดตั้งเพียงกิโลเฮิรตซ์ และใช้โฟโตไดโอดหรืออิมเมจเซ็นเซอร์ (Image Sensor) ในการรับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดแสง [5]

เทคโนโลยี VLC มีการนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย สามารถนำไปผลิตเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสื่อได้มากมาย เช่น หลอดไฟตามร้านค้า ทีวี สัญญาณไฟจราจร ป้ายโฆษณา ไฟหน้าไฟท้ายรถยนต์ ด้วยเหตุนี้ทำให้เทคโนโลยี VLC สามารถนำไปใช้งานได้ทุกที่ เพียงแค่มีแหล่งกำเนิดแสงตัวรับสัญญาณแสง และระบบประมวลผล



รูปที่ 2.1 แผนภาพระบบการสื่อสารผ่านแสงไร้สายที่ตามองเห็นได้เบื้องต้น

รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นได้เบื้องต้น ระบบเริ่มต้นด้วยการที่ภาคส่งได้รับข้อมูลจากผู้ใช้งานแล้วนำมาแปลงให้อยู่ในรูปของข้อมูลไบนารี (Binary) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลบิต 0 และบิต 1 จากนั้นข้อมูลไบนารีนี้จะถูกมอดูเลตด้วยเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK (On-Off Keying) และส่งออกเป็นข้อมูลแสงด้วยแหล่งกำเนิดแสง โดยการติดของแหล่งกำเนิดแสงหมายถึงข้อมูลบิต 1 การดับของแหล่งกำเนิดแสงหมายถึงข้อมูลบิต 0 สำหรับ

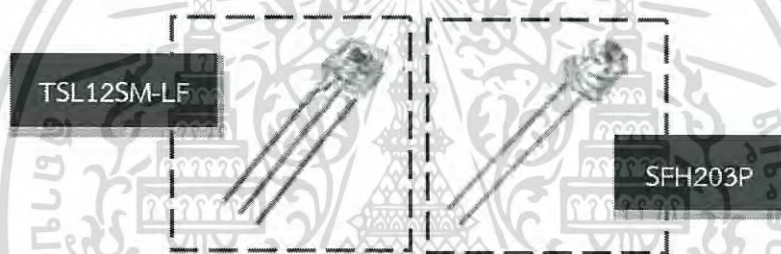
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางภาครับนั้น เมื่อตัวรับสัญญาณแสงได้รับแสงจากแหล่งกำเนิดทางภาคส่งจะนำข้อมูลสัญญาณแสงที่ได้ไปผ่านการตีมอดูเลตด้วยเทคนิคการตีมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK เพื่อให้ได้ข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของแบนารี และนำข้อมูลแบนารีนี้มาแปลงเพื่อให้อยู่ในรูปแบบสำหรับใช้งานได้แล้วส่งให้กับผู้ใช้งานภาครับเป็นลำดับต่อไป

2.3 โฟโตไดโอด (Photodiode)

โฟโตไดโอด คืออุปกรณ์เชิงแสงชนิดหนึ่งซึ่งสามารถแปลงความถี่หรือความยาวคลื่นแสงเป็นกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าได้ ขึ้นอยู่กับโหมดของการทำงาน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) ถูกใช้ในการกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P และสารกึ่งตัวนำชนิด N รอยต่อจะถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุที่แสงผ่านได้ เช่น กระจกใส

สำหรับการพัฒนาระบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้โฟโตไดโอด เบอร์ SFH203P แทนการใช้โฟโตไดโอด เบอร์ TSL12SM-LF ซึ่งถูกใช้ในงานวิจัยก่อนหน้าของผู้วิจัย [7] เนื่องจากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของการรับแสงที่ความถี่สูงขึ้น โดยเพิ่มจาก 50 kHz เป็น 200 kHz รูปที่ 2.2 แสดงโฟโตไดโอด เบอร์ SFH203P และโฟโตไดโอด เบอร์ TSL12SM-LF



รูปที่ 2.2 โฟโตไดโอด เบอร์ TSL12SM-LF และโฟโตไดโอด เบอร์ SFH203P [8,9]

2.4 แอลอีดี

ไดโอดเปล่งแสง หรือแอลอีดี คือไดโอดที่สามารถเปล่งแสงออกมาได้ โดยแสงที่เปล่งออกมาประกอบด้วยคลื่นความถี่เดียวและเฟสต่อเนื่องกัน ซึ่งต่างกับแสงธรรมดาที่ตาคนมองเห็น โดยหลอดแอลอีดีสามารถเปล่งแสงได้เมื่อจ่ายกระแสไฟเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และประสิทธิภาพในการให้แสงสว่างก็ยิ่งดีกว่าหลอดไฟขนาดเล็กทั่วไป แอลอีดีมีลักษณะเหมือนไดโอดทั่วไปที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N ประกบบกัน มีผิวข้างหนึ่งเรียบเป็นมันคล้ายกระจก เมื่อมีการให้ไบแอสตรงแก่ไดโอดจะทำให้อิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิด N มีพลังงานสูงซึ่งจนสามารถวิ่งข้ามรอยต่อรวมกับโฮล (Hole) ใน P ก่อให้เกิดพลังงานในรูปของประจุโฟตอน (Photon) ซึ่งจะเปล่งแสงออกมา การนำแอลอีดีไปประยุกต์ใช้งานส่วนมากใช้ในภาคแสดงผล (LED Display) แอลอีดีโดยทั่วไปมีสองชนิดใหญ่คือ แอลอีดีชนิดที่ตาคนมองเห็นได้ และชนิดที่ตาคนมองไม่เห็น ต้องใช้ทรานซิสเตอร์มาเป็นตัวรับแสงแทน [10]

จากความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) ทำให้เทคโนโลยีของแอลอีดีก้าวหน้าอย่างรวดเร็วตามไปด้วย ได้มีการนำแอลอีดีมาใช้ประโยชน์แพร่หลายมากขึ้น เช่น ในเครื่องคิดเลข สัญญาณจราจร ไฟท้ายรถยนต์ ป้ายสัญญาณต่างๆ ไฟฉาย ไฟให้สัญญาณของประกาศาร จอภาพยนตร์ขนาดใหญ่ ยิ่งไปกว่านั้น หน้าจอแอลซีดีของโทรศัพท์มือถือที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราใช้กันทั่วไป เกือบทั้งหมดจะให้แสงสว่างด้วยแอลอีดี หลอดแอลอีดีมีหลายชนิด เช่น High-Bright Super-Bright และ Ultra-Bright โดยการพัฒนาาระบบนี้ได้เลือกใช้หลอดไฟแอลอีดีชนิด Ultra-Bright ของค่าย CLEE เนื่องจากมีขนาดเล็ก อายุงานยาวนาน ใช้แรงดันไฟตรงที่ต่ำ และสามารถส่องสว่างแสงที่มีความเข้มสูง รูปที่ 2.3 แสดงหลอดแอลอีดี CLEE Ultra-Bright

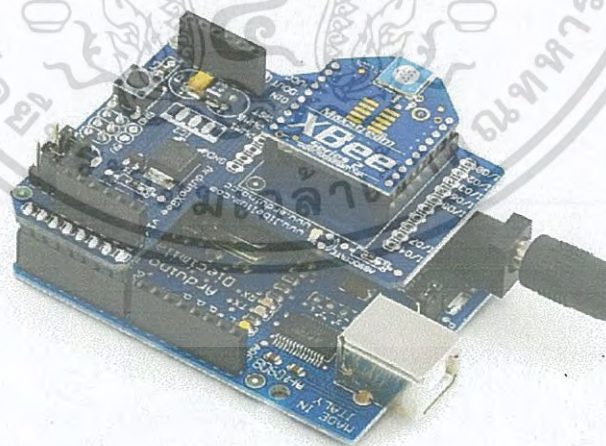


รูปที่ 2.3 หลอดแอลอีดีชนิด Ultra Bright [11]

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คืออุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน ได้แก่ ซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งทั้งหมดถูกบรรจุรวมเข้าไว้ภายใต้ตัวถังเดียวกัน

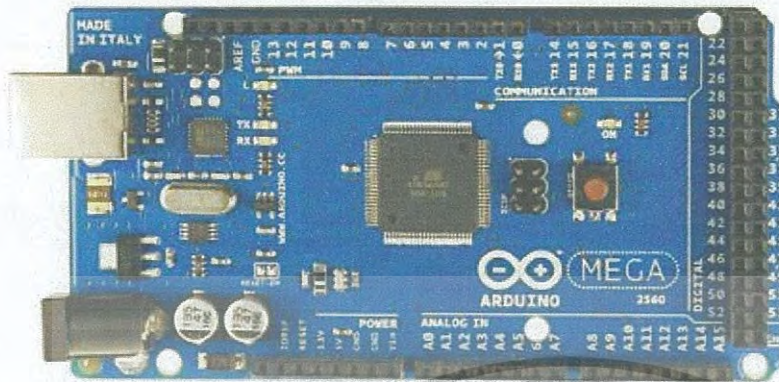
อาดูอินโน (Arduino) [12] เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้านฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ ตัวบอร์ดถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่ายโดยผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด หรือสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ เช่น Arduino XBee Shield และ Arduino GPRS Shield เป็นต้น บอร์ด Arduino มีอยู่หลายรุ่น ซึ่งเหมาะสำหรับการทำงานที่แตกต่างกันออกไป ยกตัวอย่างเช่น Arduino Uno Arduino Mega 2560 และ Arduino Mini รูปที่ 2.4 แสดงบอร์ด Arduino Uno เชื่อมต่อกับ Arduino Shield รุ่น Arduino XBee



รูปที่ 2.4 บอร์ด Arduino Uno เชื่อมต่อกับ Arduino Shield รุ่น Arduino XBee [13]

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Mega 2560 ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาระบบนี้ เนื่องจากสามารถรองรับการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรม ได้สูงถึง 4 พอร์ต ซึ่งมีระดับแรงดัน Logic “1” เท่ากับ 5 โวลต์ (TTL Serial Data) และมี Clock Speed ที่ 16 MHz โดยได้เชื่อมต่อพอร์ต UART เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอร์ตหนึ่งเข้ากับคอมพิวเตอร์ และใช้พอร์ตที่เหลือสำหรับการรับส่งข้อมูลด้วยแสง รูปที่ 2.5 แสดงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Mega 2560



Serial: 0 (RX) and 1 (TX);
Serial 1: 19 (RX) and 18 (TX);
Serial 2: 17 (RX) and 16 (TX);
Serial 3: 15 (RX) and 14 (TX).

รูปที่ 2.5 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Mega 2560 [14]

2.6 ออปแอมป์ (Operational Amplifiers: Op-Amp)

ออปแอมป์ คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรรขยายแรงดัน มีโครงสร้างภายในเป็นวงจรถับข้อต่อ ประกอบด้วย ตัวต้านทาน ทหรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุ และไดโอด จำนวนมาก โดยมีขั้วอินพุตจำนวน 2 ขั้ว คือ ขั้วอินพุตบวกเรียกว่า Non-Inverting Terminal และขั้วอินพุตลบเรียกว่า Inverting Terminal และส่วนของขั้วจำนวน 1 ขั้ว

ในการพัฒนาระบบนี้ใช้ออปแอมป์สำหรับการเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) และการขยายสัญญาณ (Voltage Amplifier) โดยเลือกใช้ออปแอมป์ เบอร์ TSV992AIDT แทนการใช้ออปแอมป์ เบอร์ MCP6402 ซึ่งถูกใช้ในงานวิจัยก่อนหน้าของผู้วิจัย [7] เนื่องจากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของการรับแสงที่ความถี่สูงขึ้น จึงจำเป็นต้องเพิ่มค่าสลูว์เรท (Slew Rate) ซึ่งเป็นค่าอัตราสูงสุดในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณในขณะขยายสัญญาณขาออกในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งถ้าหากมีค่า Slew Rate ที่ไม่มากพอ จะทำให้ได้รูปสัญญาณเอาต์พุตที่ผิดพลาดไปจากสัญญาณอินพุต รูปที่ 2.6 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อออปแอมป์มีค่า Slew Rate ที่ไม่เหมาะสมกับความถี่ที่ได้รับ เส้นทึบคือสัญญาณอินพุตสี่เหลี่ยมที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ที่ค่า Slew Rate จะสามารถรองรับได้ และเส้นประคือสัญญาณเอาต์พุต สัญญาณเอาต์พุตจะมีลักษณะเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมมากขึ้นเมื่อ Slew Rate มีค่าน้อยลงกว่าค่าที่รองรับสำหรับความถี่นั้น



รูปที่ 2.6 ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อออปแอมป์มีค่า Slew Rate ที่ไม่เหมาะสมกับความถี่ที่ได้รับ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถคำนวณค่า Slew Rate ที่เหมาะสมได้จากสมการที่ 2.1 เมื่อ V คือค่าแรงดันยอดมีหน่วยเป็นโวลต์ f คือค่าความถี่สูงสุดในการขยายสัญญาณมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ โดยจะได้ผลลัพธ์เป็นค่า Slew Rate ที่มีหน่วยเป็นไมโครโวลต์ต่อวินาที

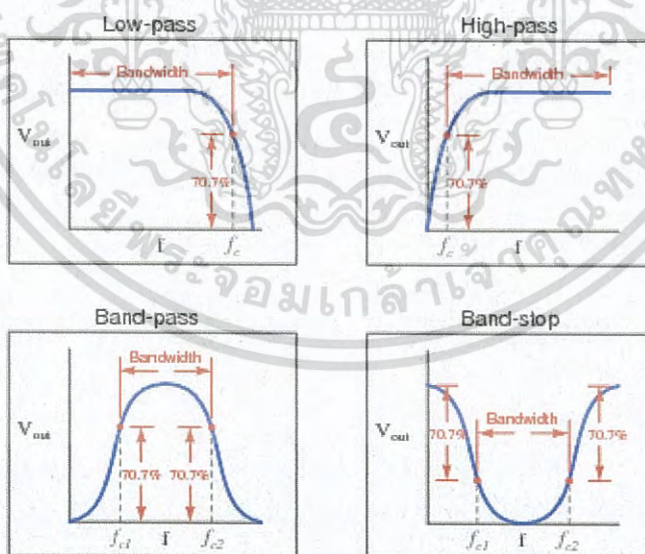
$$\text{Slew Rate} = 2\pi Vf \quad (2.1)$$

2.7 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Effect Transistor: FET)

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าหรือเฟต เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดพิเศษมีรอยต่อเดียว (Unipolar Devices) ทำงานแตกต่างจากทรานซิสเตอร์ชนิดสองรอยต่อ (BJTS) การควบคุมกระแสให้ไหลผ่านเฟตควบคุมโดยป้อนแรงดันที่เกตของเฟต แรงดันเกตนี้จะทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของสนามไฟฟ้าระหว่างรอยต่อให้เพิ่มขึ้นหรือลดลง เพื่อบังคับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อเฟต ข้อดีของเฟตที่เห็นได้ชัดเจนคือ ความต้านทานอินพุตมีค่าสูงมาก อยู่ระดับเมกะโอห์ม ทำให้สามารถใช้แรงดันเพียงเล็กน้อยควบคุมการทำงานของเฟตได้ เฟตแบ่งออกตามลักษณะโครงสร้างใหญ่ๆ ได้ 2 ชนิดคือ JFET (Junction FET) และ MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET) [16]

จังก์ชันฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์ (Junction Field Effect Transistor) หรือเรียกย่อๆ ว่า เจเฟต (JFET) แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดพีแชนแนล (P-Channel) และชนิดเอ็นแชนแนล (N-Channel) โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ เจเฟตชนิดเอ็นแชนแนล เบอร์ 2N5458 สำหรับทำหน้าที่ High Input Impedance Amplifier ซึ่งขยายสัญญาณขนาดเล็กที่ได้จากโฟโตไดโอด

2.8 วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการทำงานของวงจรกรองความถี่แต่ละประเภท [17]

วงจรกรองความถี่ คือวงจรไฟฟ้าที่จะยอมให้สัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งหรือช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้นผ่านไปได้ ส่วนความถี่อื่นหรือช่วงความถี่อื่นนอกเหนือจากที่กำหนดจะถูกลดทอนไป ซึ่งจะเป็นช่วงความถี่ใดนั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจร โดยสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter: LPF) วงจรกรองสัญญาณความถี่สูง (High Pass Filter: HPF) วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter: BPF) และวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter: BRF) รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการทำงานของวงจรกรองความถี่แต่ละประเภท

ในส่วนของฮาร์ดแวร์ของงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรกรองสัญญาณความถี่สูง ซึ่งเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้เฉพาะสัญญาณในช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่ตัดผ่าน (Cutoff Frequency: f_c) และลดทอนสัญญาณในช่วงที่มีความถี่ต่ำ โดยในช่วงความถี่สูงมีอัตราขยายคงที่ และสามารถคำนวณหาค่าความถี่ตัดผ่านของวงจรกรองความถี่สูงลำดับที่ 1 ได้จากสมการที่ 2.2 เมื่อ R คือค่าความต้านทานของตัวต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม C คือค่าความจุของตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็นฟารัด และ f_c คือค่าความถี่ตัดผ่านมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ [18]

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.2)$$

2.9 มาตรฐาน IEEE 802.15.7

IEEE คือ สถาบันวิชาชีพวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers) เป็นศูนย์กลางแลกเปลี่ยนความรู้วิชาการใหม่ ด้านอิเล็กทรอนิกส์ ก่อตั้งขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1963 ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยการรวมตัวของ 2 สถาบัน คือ AIEE และ TRE ซึ่งดำเนินกิจกรรมวิจัยและพัฒนาศาสตร์ด้านการโทรคมนาคม ระบบแสง ไฟฟ้ากำลัง มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1884

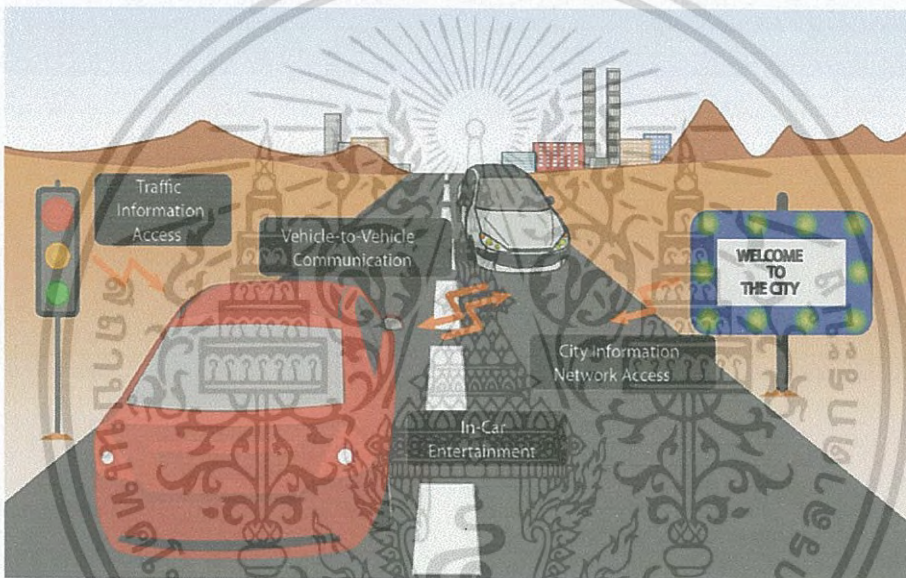
IEEE เป็นสถาบันที่กำกับดูแลมาตรฐานทางไฟฟ้า เป็นผู้นำในการวิจัยและพัฒนา เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ รวมทั้งเผยแพร่ความรู้ ผลงานวิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ เน้นไฟฟ้ากำลัง คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคม ระบบวัดคุม และอิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนเรื่อง Hi-Tech ทุกเรื่องที่เกี่ยวข้อง

IEEE มีสมาชิกเป็นวิศวกร นักวิจัย ที่มีความรู้ ความสามารถจากทั่วโลก โดยสมาชิกจะแบ่งกลุ่มศึกษาเรื่องตามความเชี่ยวชาญเฉพาะทางของแต่ละบุคคล IEEE จึงมีกลุ่มศึกษาเรื่องเฉพาะด้าน หลายสิบกลุ่ม ทุกกลุ่มมีบทบาทในการสร้างองค์ความรู้ใหม่ ทั้งจัดประชุมวิชาการประจำปี จัดประชุมวิชาการเฉพาะเรื่อง กำหนดมาตรฐานทางไฟฟ้า คิดค้นนวัตกรรมและเขียนรายการเผยแพร่ในรูปวารสารวิชาการ องค์ความรู้ทั้งหมดได้ถูกรวบรวมเพื่อจัดเก็บอย่างมีระบบ และสามารถค้นคืน เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างรวดเร็ว โดยมีหมายเลข IEEE ที่ได้รับการยอมรับจากองค์กรควบคุมมาตรฐาน เช่น IEEE 802.1 การบริหารจัดการระบบเครือข่าย IEEE 802.11 มาตรฐานเทคโนโลยีสำหรับ WLAN และ IEEE 802.15 มาตรฐานเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล [19]

เป้าหมายของมาตรฐาน IEEE 802.15 คือ ต้องการที่จะสร้างกรอบการทำงานของการพัฒนาอุปกรณ์ที่มีราคาถูกและใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ สำหรับเชื่อมต่อสื่อสารแบบไร้สายในระยะสั้น ที่น้อยกว่า 10 เมตร โดยมีจุดมุ่งหมายให้ WPAN เป็นเครือข่ายขนาดเล็กสำหรับใช้งานในบ้านหรือสำนักงาน และมีจำนวนโหนดไม่เกิน 8-16 โหนด มาตรฐาน WPAN นี้จะเป็นมาตรฐานเครือข่ายไร้สายของอุปกรณ์ประเภทที่เคลื่อนย้ายได้ (Portable) และอุปกรณ์ประเภทโมบายล์ (Mobile) โดยจะระบุข้อกำหนดที่ทำให้ผู้ขายอุปกรณ์ต่างๆ ผลิตอุปกรณ์ที่สามารถติดต่อสื่อสารและใช้งานร่วมกันได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

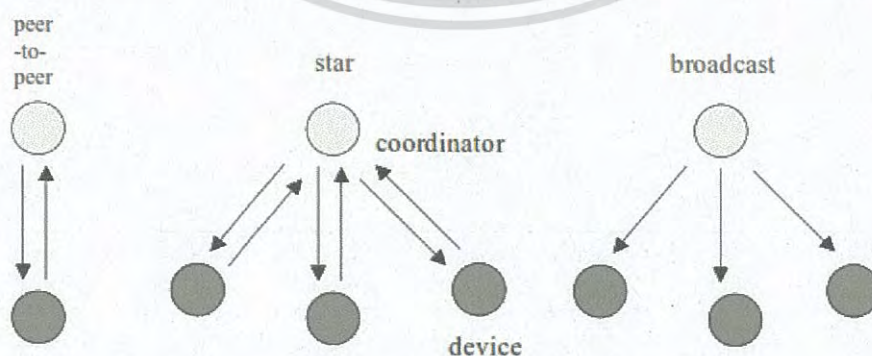
ออกมา กลุ่ม Working Group ของ IEEE 802.15 ได้ถูกจัดแบ่งออกเป็นหลาย Task Group ด้วยกัน ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ IEEE 802.15.7 [20]

มาตรฐาน IEEE 802.15.7 หรือ วีแพน (VLC Personal Area Network: VPAN) [2] กล่าวถึงข้อกำหนดในชั้นกายภาพ (PHY Layer) และชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ (MAC Layer) ของแบบจำลองโอเอสไอ (OSI Model) เพื่อให้อุปกรณ์ทำงานร่วมกันได้ โดยใช้แสงที่ตามองเห็นได้เป็นตัวกลางในการส่งข้อมูลบนความถี่ย่านแสงที่มองเห็น มีความยาวคลื่นระหว่าง 380-780 นาโนเมตร และคำนึงถึงความสามารถของการเคลื่อนย้ายจุดเชื่อมต่อ ความเข้ากันได้ของโครงสร้างพื้นฐานของระบบ VLC ที่ใช้ในการส่องสว่างปกติ การรบกวนสัญญาณจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ และแหล่งกำเนิดแสงจากธรรมชาติ (Ambient Light) โดยสามารถนำเทคโนโลยี VLC ไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างการนำเทคโนโลยี VLC ไปประยุกต์ใช้งานกับ บั๊ยไฟ ไฟส่องสว่างของยานพาหนะ และไฟจราจร



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการนำเทคโนโลยี VLC ไปประยุกต์ใช้งาน [21]

2.9.1 โทโพโลยีเครือข่าย (Network Topology)



รูปที่ 2.9 การประยุกต์ใช้งานโทโพโลยีเครือข่ายทั้ง 3 แบบ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน IEEE 802.15.7 ได้จำแนกการประยุกต์ใช้งานโทโพโลยีเครือข่ายเป็น 3 แบบด้วยกัน คือ โทโพโลยีแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer-to-Peer Topology) โทโพโลยีแบบดาว (Star Topology) และโทโพโลยีแบบการกระจาย (Broadcast Topology) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

ภายในโทโพโลยีหนึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ (Coordinator) อย่างน้อยหนึ่งตัว ซึ่งเป็นอุปกรณ์ส่วนกลางที่มีความสามารถในการควบคุม และสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครือข่าย โดยแต่ละโทโพโลยีมีลักษณะการทำงานดังนี้

1) โทโพโลยีแบบ Peer-to-Peer เป็นการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เพียงสองตัวเท่านั้น โดยหนึ่งในนั้นทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ ซึ่งโดยมาตรฐานแล้วอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นโคออดิเนเตอร์ คืออุปกรณ์ตัวแรกที่เริ่มต้นการสื่อสารภายในเครือข่าย

2) โทโพโลยีแบบ Star การสื่อสารจะเกิดขึ้นภายในเครือข่ายเดียวกันเท่านั้น ไม่มีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอื่นในเวลาเดียวกัน โดยเริ่มต้นเครือข่ายด้วยการที่โคออดิเนเตอร์เลือกหมายเลข VPAN แล้วอนุญาตให้อุปกรณ์อื่นๆ ทำการเชื่อมต่อเข้ามายังเครือข่าย

3) โทโพโลยีแบบ Broadcast เป็นการสื่อสารทางเดียวในลักษณะกระจายข้อมูล และไม่จำเป็นต้องมีการเชื่อมโยงอุปกรณ์เข้ากับเครือข่าย

2.9.2 อุปกรณ์ภายในเครือข่าย

อุปกรณ์ภายในเครือข่ายต้องรองรับคุณสมบัติการส่องสว่างตลอดเวลา (Visibility) เพื่อคงค่าการส่องสว่างอย่างต่อเนื่องและไม่กระพริบแม้ว่าจะอยู่ในสถานะไม่ทำงาน (Idle Mode) หรือสถานะการรับสัญญาณ (Receive Mode) ถูกแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ 3 แบบด้วยกัน คือ

1) แบบโครงข่ายพื้นฐาน (Infrastructure) การใช้งานในแบบโครงข่ายพื้นฐานจะถูกติดตั้งในตำแหน่งที่แน่นอน ไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปตำแหน่งอื่น มีพลังงานใช้อย่างไม่จำกัด ไม่ถูกจำกัดด้านขนาดและรูปทรง แหล่งกำเนิดแสงสามารถให้แสงสว่างได้มาก สามารถนำไปใช้ในการสื่อสารได้ทั้งระยะใกล้และระยะไกล และสามารถรองรับความเร็วในการสื่อสารได้ทั้งแบบความเร็วต่ำและความเร็วสูง

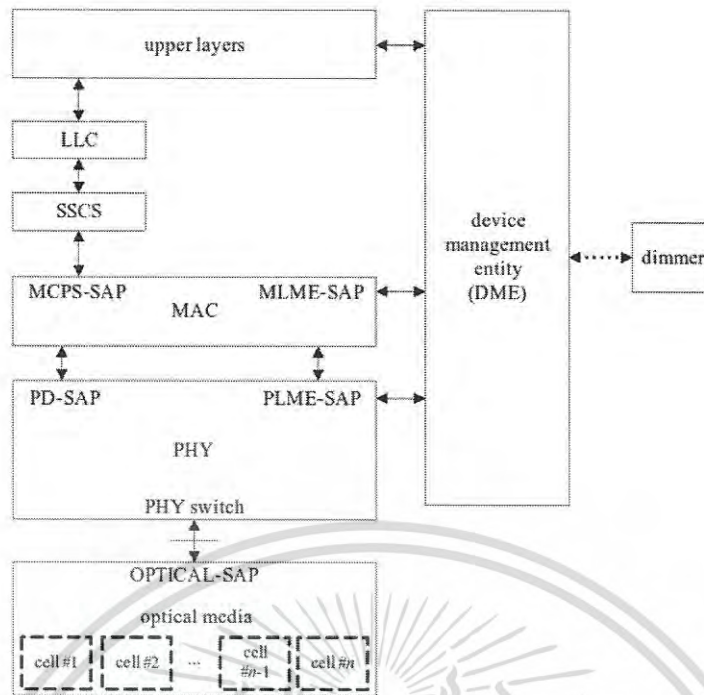
2) แบบเคลื่อนที่ได้ (Mobile) อุปกรณ์ที่ใช้งานในแบบเคลื่อนที่ได้จะไม่ถูกติดตั้งอยู่กับที่ จึงมีข้อจำกัดด้านพลังงานและขนาดของอุปกรณ์ ซึ่งจะทำให้แหล่งกำเนิดแสงให้แสงสว่างได้จำกัด ส่งผลต่อระยะทางการสื่อสารที่ไม่ไกล และรองรับได้เฉพาะการสื่อสารแบบความเร็วต่ำ

3) แบบยานพาหนะ (Vehicle) การใช้งานในแบบนี้มีข้อจำกัดที่ต้องคำนึงถึงคือ ตำแหน่งของอุปกรณ์จะเคลื่อนที่ได้แต่พลังงานยังคงจำกัดอยู่ และจะใช้ในการสื่อสารระยะไกลที่ต้องการความเร็วในการสื่อสารไม่สูงมาก

2.9.3 สถาปัตยกรรม

สถาปัตยกรรมตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ถูกกำหนดเป็นชั้น (Layer) และชั้นย่อย (Sublayer) โดยแต่ละชั้นมีหน้าที่ในแต่ละส่วนของมาตรฐาน และมีการเชื่อมโยงข้อมูลบริการระหว่างให้กับชั้นที่เหนือกว่า มาตรฐาน IEEE 802.15.7 ได้กำหนดมาตรฐานในส่วนประกอบของอุปกรณ์รับส่งแสง และกลไกการควบคุมทางวงจรต่างๆ ใน PHY Layer และกำหนดมาตรฐานในส่วนของการจัดการการเข้าถึงช่องสัญญาณสำหรับการส่งผ่านข้อมูลใน MAC Layer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของสถาปัตยกรรมของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 [2]

รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของสถาปัตยกรรมของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ในส่วนของ Upper Layer ซึ่งประกอบด้วย ชั้นเครือข่าย (Network Layer) และชั้นงานประยุกต์ (Application Layer) นั้นจะไม่ถูกกล่าวถึงในมาตรฐานนี้ โดยชั้น LLC (Logical Link Control) สามารถเข้าถึง MAC Sublayer ผ่าน SSCS (Service-Specific Convergence Sublayer)

ในส่วนของ PHY Layer ประกอบด้วย Physical Switch ซึ่งทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อกับส่วน Optical-SAP โดยจะต่อเข้ากับอุปกรณ์ทางแสง เช่น แหล่งกำเนิดแสงหรืออุปกรณ์รับแสง โดยอาจใช้อุปกรณ์เพียงตัวเดียวหรือจำนวนหลายตัวต่อกันก็ได้ ทั้งนี้การต่ออุปกรณ์ทางแสงจำนวนหลายตัวจะต้องมีมาตรฐานรองรับคือ PHY III ที่รองรับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ VLC ระหว่างเซลล์ (VLC Cell Mobility) การควบคุมการทำงานของเซลล์ที่ระหว่างเซลล์จะทำโดยผ่านเอนทิตี PLME (Physical Layer Management Entity) ส่วนการควบคุมการปรับหรือแสงสว่างของอุปกรณ์จะทำโดยผ่านเอนทิตี PLME และ MLME (MAC Link Management Entity) ที่เชื่อมต่อกับเอนทิตี DME (Device Management Entity) ซึ่งส่วนของเอนทิตี DME นี้ไม่ถูกกล่าวถึงในมาตรฐาน

2.9.4 MAC Layer

การทำงานของ VLC ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 VPAN ในระดับ MAC Layer จะควบคุมการเข้าถึงตัวกลางการสื่อสารผ่านชั้นกายภาพ โดยมีหน้าที่หลักคือการจัดการบีดอน (Beacon Management) สำหรับอุปกรณ์ที่เป็นโคออดิเนเตอร์ การเข้าจังหวะเวลากับเครือข่ายบีดอน การเข้าถึงช่องสัญญาณ การจัดการช่องเวลาที่รับประกัน (Guaranteed Time Slot: GTS) การตรวจสอบเฟรม (Frame Validation) การตรวจสอบการได้รับเฟรม (Acknowledgement) การเชื่อมโยงเครือข่ายและการถอนตัวจากเครือข่าย (Association and Disassociation) และการแสดงสถานะของอุปกรณ์และคุณภาพของช่องสัญญาณ นอกจากนี้ยังจัดการด้านความปลอดภัยของข้อมูล การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

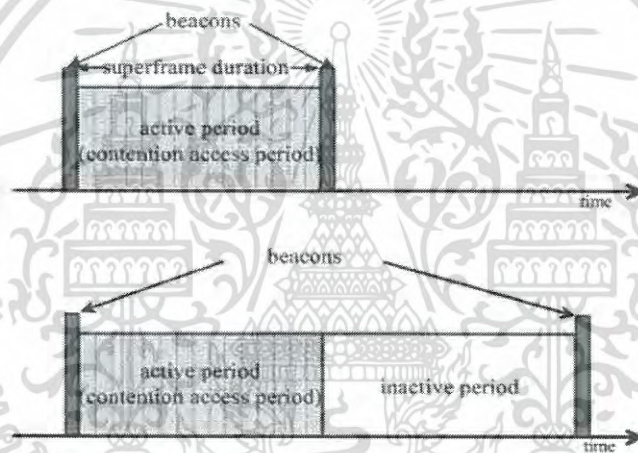
ควบคุมการแสดงสีของแสงและเสถียรภาพของสี กระบวนการลดการกระพริบ การปรับค่าความเข้มของการส่องสว่าง รวมไปถึงการรองรับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ โดยเฟรมข้อมูลจะถูกกำหนดให้อยู่ในโครงสร้างของซูเปอร์เฟรม (Superframe Structure) ซึ่งครอบคลุมรายละเอียดของรูปแบบการส่งผ่านข้อมูล

2.9.4.1 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามมาตรฐานแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ

1) Contention-Based Access (CAP) โดยจะให้อุปกรณ์สามารถเข้าใช้ช่อง สัญญาณได้ด้วยการสุ่มช่วงเวลาการเข้าถึงทำให้การกระจายตัวของเวลาการเข้าใช้ช่องสัญญาณของอุปกรณ์แต่ละตัวมีความแตกต่างกัน หากมีการเข้าใช้ช่องสัญญาณในช่วงเวลาเดียวกัน ก็จะทำการถอยการส่งข้อมูล และกลับเข้าไปส่งใหม่ด้วยการสุ่มช่วงเวลาเพื่อเลี่ยงการชนกัน ของข้อมูลอีกครั้ง

2) Contention-Free Access (CFP) จะควบคุมเวลาในการเข้าใช้ช่อง สัญญาณด้วยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ที่มีการแบ่งช่วงเวลาที่แน่นอนให้แก่อุปกรณ์แต่ละตัว



รูปที่ 2.11 โครงสร้างซูเปอร์เฟรม (Superframe) [2]

การควบคุมการเข้าใช้งานช่องสัญญาณจะกระทำผ่านกระบวนการของการส่งผ่านข้อมูลด้วยซูเปอร์เฟรมที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 2.11 ซึ่งถูกกำหนดโดยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์โดยภายในซูเปอร์เฟรมจะแบ่งเป็นช่วงเวลาช่วงละเท่ากัน โดยในช่วงเวลาดังกล่าวจะเป็นเวลาที่อุปกรณ์ในเครือข่ายสามารถแข่งขันกันเข้าไปใช้ช่องสัญญาณได้นอกจากนี้ซูเปอร์เฟรมยังสามารถแบ่ง ช่วงเวลาเป็น 2 ลักษณะคือ ช่วงเวลาที่พร้อมทำงาน (Active Portion) และช่วงเวลาที่ไม่พร้อมทำงาน (Inactive Portion) ได้อีกด้วย

การเริ่มใช้งานซูเปอร์เฟรม อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ต้องส่งบีคอนก่อน แล้วตามด้วยการส่งซูเปอร์เฟรม โดยหากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ไม่ต้องการสื่อสารด้วยรูปแบบโครงสร้างของซูเปอร์เฟรม ก็จะงดการส่งบีคอน ซึ่งบีคอนนี้มีไว้เพื่อการเข้าจังหวะเวลาระหว่างอุปกรณ์ทุกตัวในเครือข่ายด้วยอุปกรณ์ตัวใดที่อยู่ในเครือข่ายที่ต้องการส่งข้อมูลในช่วงเวลาการเข้าถึงแบบ CAP ที่อยู่ระหว่างบีคอนสองบีคอน หากซูเปอร์เฟรมใดมีช่วงเวลา CFP ช่วงเวลา CAP นี้ก็จะถูกแบ่งบางส่วนให้กับ CFP

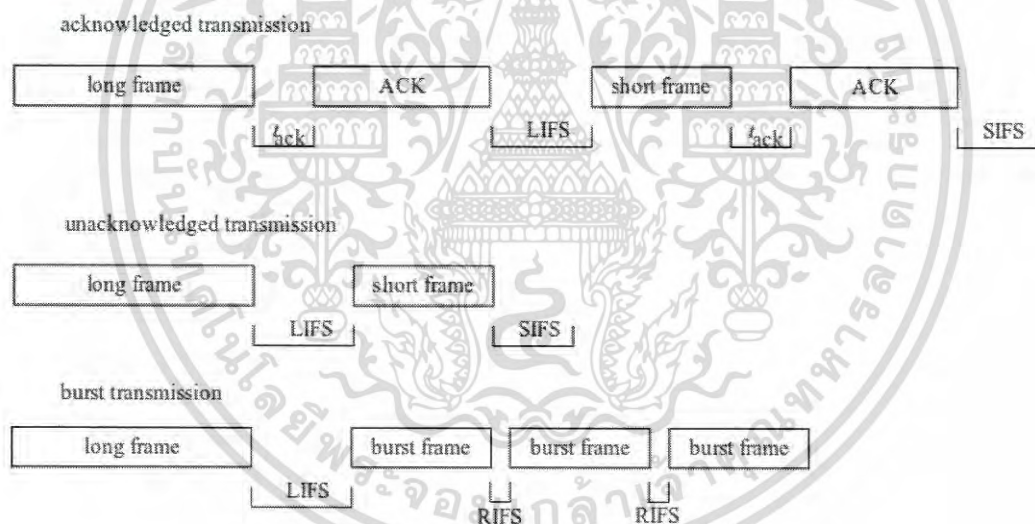
นอกจากนี้การเข้าถึงช่องสัญญาณจะต้องทำการแข่งขันกับอุปกรณ์ตัวอื่นที่อยู่ในเครือข่ายเดียวกันโดยใช้เทคนิคการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบสุ่ม 4 แบบ ดังนี้

1) การเข้าถึงแบบสุ่มที่ไม่มีสล롯 (Unslotted Random Access) อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะไม่มี การส่งบิตคอนเมื่ออุปกรณ์ในเครือข่ายต้องการใช้ช่องสัญญาณจะรอช่วงเวลาการถอยแบบสุ่ม และเมื่อถึงเวลาการถอยแบบสุ่มเกิดขึ้น อุปกรณ์ที่ต้องการใช้ช่องสัญญาณจะส่งเฟรมข้อมูลออกไปในช่องสัญญาณ โดยไม่มีการคำนึงว่าจะส่งไปซ้ำซ้อนหรือชนกับอุปกรณ์ตัวอื่นหรือไม่

2) การเข้าถึงแบบสุ่มที่มีสลอต (Slotted Random Access) อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ จะมีการส่งสัญญาณบิตคอน โดยอุปกรณ์ในเครือข่ายที่ต้องการส่งข้อมูลจะต้องจองช่วงเวลา CFP สำหรับการส่งข้อมูล โดยช่วงเวลาที่ใช้งานได้ในซูปเปอร์เฟรมจะถูกแบ่งมาจากช่วงเวลา CAP โดยจะต้องได้รับการจัดสรรจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ก่อนทำการส่งข้อมูล

3) การเข้าถึงแบบ CSMA/CA ที่ไม่มีสลอต (Unslotted CSMA/CA) นี้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับการเข้าถึงแบบสุ่มที่ไม่มีสลอต แต่แตกต่างกันเมื่อถึงเวลาการถอยแบบสุ่ม โดยจะทำการตรวจสอบช่องสัญญาณก่อน หากช่องสัญญาณมีการใช้งานอยู่ อุปกรณ์จะรอช่วงเวลาอื่นด้วยการสุ่มเวลาและตรวจสอบการใช้งานช่องสัญญาณอีกครั้งก่อนการส่งข้อมูล

4) การเข้าถึงแบบ CSMA/CA ที่มีสลอต (Slotted CSMA/CA) มีลักษณะเช่นเดียวกันกับการเข้าถึงแบบสุ่มที่มีสลอต โดยจะเพิ่มกลไกการตรวจสอบการใช้ช่องสัญญาณก่อนการส่งข้อมูล



รูปที่ 2.12 การเพิ่มช่องว่างระหว่างเฟรม [2]

ในระหว่างการส่งเฟรมข้อมูล หาก MAC Layer ได้รับข้อมูลมาจาก PHY Layer แล้วนั้น MAC Layer จำเป็นต้องใช้เวลาบางส่วนในการประมวลผล ซึ่งหากมีการส่งข้อมูลสองเฟรมติดกันก็อาจจะทำให้การประมวลผลเกิดปัญหาได้ โดยวิธีการที่ใช้แยกเฟรมข้อมูลที่ได้รับมาจากอุปกรณ์ที่อาจส่งข้อมูลมาสองเฟรมคือ การเพิ่มช่องว่างระหว่างเฟรม (Interframe Spacing: IFS) ตามรูปที่ 2.12 ซึ่งแบ่ง ออกได้เป็น 3 แบบ แบบสั้น (Short Interframe Spacing: SIFS) แบบยาว (Long Interframe Spacing: LIFS) และแบบลดทอนพิเศษที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูลต่อเนื่อง (Burst Interframe Spacing: BIFS) โดยการเลือกใช้การเพิ่มช่องว่างระหว่างเฟรมขึ้นอยู่กับชนิดของเฟรมข้อมูลที่ส่งมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากเป็นเฟรมข้อมูลขนาดยาวจะถูกตามด้วยการเพิ่มช่องว่างแบบ LIFS แต่ถ้าหากเฟรมสั้นหรือเฟรมต่อเนื่องจะใช้การเพิ่มช่องว่างแบบ SIFS หรือ RIFS ตามลำดับ

2.9.4.2 การเริ่มต้นเครือข่าย VLC

การเริ่มต้นใช้งานเครือข่าย VLC จะเริ่มต้นจากการสแกน (Scan) ทุกช่องสัญญาณที่มีอยู่โดยสามารถแบ่งการสแกนออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1) แอคทีฟสแกน (Active Scan) มีอยู่เฉพาะในอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์และใช้ในโทโพลีการสื่อสารแบบ Peer-to-Peer โดยการทำการสแกนจะสามารถระบุเฟรมบิตคอนที่ถูกส่งมาจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ใดๆ ที่อยู่ในรัศมีการสื่อสารได้ ซึ่งลักษณะพิเศษของการทำการสแกนคือ จะมีการส่งคำสั่งบิตคอนการร้องขอ (Beacon Request Command) เพื่อให้สามารถเก็บรายละเอียดของข้อมูลต่างๆ ของเครือข่ายที่ทำการสแกน เช่น แอดเดรสโหนดสั้นหรือยาว คาร์รหัสบ่งชี้เครือข่าย (VPAN Identifier) แอดเดรสของโคออดิเนเตอร์ของเครือข่าย รูปแบบของซูปเปอร์เฟรม และค่า WQI เป็นต้น การทำการสแกนจึงสามารถนำมาใช้ในการสร้าง กลุ่มเครือข่ายใหม่ได้โดยไม่รบกวนกับเครือข่ายเดิมที่มีอยู่

2) พาสซีฟสแกน (Passive Scan) อุปกรณ์ทุกตัวมีความสามารถนี้และใช้ในโทโพลีการสื่อสารแบบ Star หรือ Broadcast การทำการพาสซีฟสแกนจะสามารถระบุเฟรมบิตคอนที่ถูกส่งมาจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ใดๆ ที่อยู่ในรัศมีการสื่อสาร แต่จะไม่มีคำสั่งบิตคอนการร้องขอ การทำการพาสซีฟสแกนจึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการขอเข้าร่วมกับเครือข่ายที่มีอยู่ภายในรัศมีการสื่อสาร

การเริ่มต้นเครือข่าย VLC สำหรับแต่ละโทโพลีของการสื่อสาร มีข้อแตกต่างดังนี้

1) โทโพลีแบบ Broadcast ไม่มีข้อกำหนดใดๆ ในการเริ่มเครือข่าย
2) โทโพลีแบบ Star อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะเริ่มต้นการสร้างเครือข่ายด้วยการส่งเฟรมบิตคอน

3) โทโพลีแบบ Peer-to-Peer อุปกรณ์จะเริ่มต้นเครือข่ายด้วยการส่งคำสั่งการเชื่อมต่อหรือคำสั่งแอคทีฟสแกนไปยังอุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อด้วย นอกจากนี้หากอุปกรณ์ในเครือข่ายใช้ช่องทางการสื่อสารด้วยแสงเพียงสีเดียว (Single Color Channel) ก็จะไม่มีการเลือกใช้ช่องทางอื่นในการสื่อสาร แต่หากอุปกรณ์รองรับการส่งผ่านหลายสี (Multiple Transmit Color Channel) ก็จะมีการส่งผ่านค่า WQI เพื่อใช้ในการเลือกช่องสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

เมื่ออุปกรณ์โคออดิเนเตอร์เริ่มต้นเครือข่ายด้วยการส่งเฟรมบิตคอน ถือเป็นการเริ่มต้นให้อุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ในรัศมีการสื่อสารสามารถเริ่มกระบวนการค้นหาและเชื่อมต่อเครือข่ายได้โดย

1) อุปกรณ์ที่ใช้ในชั้นกายภาพแบบที่ 1 (PHY I) จะใช้สัญญาณนาฬิกาทางแสง (Optical Clock) ที่ความถี่ 200 kHz และรองรับความเร็วในการสื่อสารที่ 11.67 kbps

2) อุปกรณ์ที่ใช้ในชั้นกายภาพแบบที่ 2 (PHY II) จะใช้สัญญาณนาฬิกาทางแสงที่ความถี่ 3.75 MHz และรองรับความเร็วในการสื่อสารที่ 1.25 Mbps

3) อุปกรณ์ที่ใช้ในชั้นกายภาพแบบที่ 3 (PHY III) จะใช้กระบวนการค้นหาเช่นเดียวกับอุปกรณ์ ที่ใช้ในชั้นกายภาพแบบที่ 2 โดยกระบวนการค้นหานี้จะไม่รองรับโทโพลีแบบ Broadcast

โดยเมื่อเครือข่ายการสื่อสารกำลังทำงานอยู่อาจเกิดเหตุการณ์ที่เครือข่ายสองเครือข่ายมีคาร์รหัสบ่งชี้เครือข่ายเดียวกันในพื้นที่บริการเดียวกัน จะทำให้เกิดการขัดแย้งและส่งผลการสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะต้องดำเนินการแก้ไขปัญหานี้โดยการสร้างซูปเปอร์เฟรมและปรับค่าพารามิเตอร์ของช่องทางการสื่อสารที่จำเป็นใหม่เพื่อส่งให้กับอุปกรณ์ทุกตัวในเครือข่ายทำการปรับเปลี่ยนไปยังค่าที่ไม่เกิดความขัดแย้งระหว่างเครือข่ายทั้งสอง

2.9.4.3 การเข้าร่วมและออกจากเครือข่าย (Association and Disassociation)

เมื่ออุปกรณ์โคออดิเนเตอร์เริ่มการส่งเฟรมบิตคอน อุปกรณ์ที่ต้องการจะร่วมเครือข่ายจะต้องส่งค่า รีเซต MLME-RESET ใน MAC Layer ก่อน จากนั้นจึงจะเริ่มให้อุปกรณ์สแกนช่องทางการสื่อสาร โดยผลของการสแกนจะนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกเครือข่ายที่มีความเหมาะสมต่อไป โดยการเข้าร่วมเครือข่ายของอุปกรณ์จะต้องได้รับการอนุญาตจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ก่อน ซึ่งอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ที่อนุญาตให้อุปกรณ์ตัวอื่นสามารถเข้าร่วมเครือข่ายได้จะต้องกำหนดให้พารามิเตอร์การอนุญาตมีค่าเป็นจริง (True) แต่ถ้าพารามิเตอร์การอนุญาตมีค่าเป็นเท็จ (False) จะหมายถึงไม่อนุญาตให้มีอุปกรณ์อื่นใดเข้าร่วมเครือข่าย และเมื่อสแกนช่องสัญญาณเสร็จสิ้น อุปกรณ์ที่จะเข้าร่วมจะทำการส่งคำสั่งร้องขอการเข้าร่วมไปยังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ที่อยู่ในเครือข่ายที่มีอยู่เดิม หากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ได้รับการร้องขอ จะทำการส่งเฟรมตอบรับกลับมา ระหว่างนั้นอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ยังต้องทำการตรวจสอบความพร้อมของทรัพยากรภายในเครือข่าย และตรวจสอบว่าอุปกรณ์ที่ส่งคำร้องขอมามีอยู่ในเครือข่ายอยู่แล้วหรือไม่ หากมีอยู่แล้วก็จะทำการลบข้อมูลเดิมทิ้ง และหากมีทรัพยากรรองรับเพียงพอ ก็จะส่งคำตอบรับพร้อมกับแอดเดรสให้กับอุปกรณ์ที่ร้องขอ แต่หากทรัพยากรมีไม่เพียงพอ อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ก็จะส่งคำสั่งปฏิเสธคำร้องขอการเข้าร่วมเครือข่ายกลับไป

เมื่ออุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ต้องการให้อุปกรณ์การสื่อสารบางตัวออกจากเครือข่าย ก็จะส่งคำสั่งแจ้งเตือนการให้ออกจากเครือข่ายไปยังอุปกรณ์นั้น โดยมีการร้องขอให้ส่งเฟรมตอบรับกลับมาด้วย โดยอุปกรณ์ที่ถูกให้ออกจากเครือข่ายเมื่อได้รับคำสั่งการให้ออกจากเครือข่ายแล้ว ก็จะทำการยืนยันการรับคำสั่งด้วยการส่งเฟรมตอบรับกลับมา สำหรับกรณีที่อุปกรณ์ที่อยู่ในเครือข่ายและต้องการออกจากเครือข่าย ก็จะส่งคำร้องข้อออกจากเครือข่ายไปยังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์เพื่อให้อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์รับทราบและลบข้อมูลในรายการที่บันทึกไว้ และส่งเฟรมตอบรับกลับไปยังอุปกรณ์ที่ส่งคำร้องขอมา หากเฟรมตอบรับส่งไปไม่ถึงเมื่อครบเวลาที่กำหนดไว้ อุปกรณ์ที่ส่งคำร้องขอการออกจากเครือข่ายก็จะตัดสินใจดำเนินการออกจากเครือข่ายโดยอัตโนมัติ

2.9.4.4 การเข้าจังหวะเวลา (Synchronization)

การเข้าจังหวะเวลาในเครือข่ายแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ

1) การเข้าจังหวะเวลาที่ใช้เฟรมบิตคอน อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะสร้างเฟรมบิตคอนและส่งออกไปในเครือข่าย โดยอุปกรณ์ที่อยู่ในเครือข่ายจะรับเฟรมบิตคอนและทำการถอดรหัสเพื่อการเข้าจังหวะเวลา

2) การเข้าจังหวะเวลาที่ไม่ใช้เฟรมบิตคอน อุปกรณ์ที่อยู่ในเครือข่ายที่ไม่รองรับการใช้เฟรมบิตคอนจะส่งคำสั่งการสอบถามมายังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์เพื่อดำเนินการการเข้าจังหวะเวลา

2.9.4.5 การรองรับการทำรายการ (Transaction handling)

อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะส่งแฟล็ก (Flag) ในเฟรมบิตคอนเพื่อให้อุปกรณ์ในเครือข่ายทราบว่ามีข้อมูลค้างอยู่หรืออุปกรณ์ในเครือข่ายสามารถทำการกระตุ้นไปยังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์เพื่อร้องขอหากมีรายการที่ค้างอยู่ กระบวนการส่งข้อมูลลักษณะนี้เรียกว่าการส่งผ่านข้อมูลทางอ้อม (Indirect Transmission) โดยข้อมูลที่บรรจุอยู่ในการส่งผ่านข้อมูลทางอ้อมนั้นจะจัดอยู่ในรูปแบบของการทำรายการ (Transaction) อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะต้องมีความสามารถในการจัดเก็บได้อย่างน้อยหนึ่งรายการ และหากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ได้รับการร้องขอให้ส่งผ่านข้อมูลทางอ้อม แต่มีหน่วยความจำในการจัดเก็บรายการไม่เพียงพอ ก็จะส่งสถานะข้อมูลมากเกินเก็บ (Overflow) ออกมา แต่ถ้าอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์มีหน่วยความจำในการจัดเก็บมากกว่าหนึ่งรายการ การส่งผ่านรายการไปยังอุปกรณ์เดียวกันก็จะต้องถูกส่งตามลำดับก่อนหลังด้วย สำหรับรายการที่ถูกเก็บไว้ที่อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์นานเกินกว่าค่าเวลาการคงอยู่ (Persistence Time) และไม่มีอุปกรณ์ตัวใดในเครือข่ายดำเนินการร้องขอรายการนั้น ข้อมูลรายการนั้นจะถูกลบทิ้งไป

2.9.4.6 การส่งผ่าน การรับ และการตอบรับ

การส่งผ่าน ในการส่งผ่านข้อมูลแอดเดรส (Address) เป็นส่วนสำคัญในการระบุถึงผู้ส่งและผู้รับฟิลด์แอดเดรส (Address Field) ของผู้ส่งเป็นส่วนระบุแอดเดรสของอุปกรณ์ที่จะทำการส่งเฟรมข้อมูล โดยหากอุปกรณ์นั้นยังไม่ได้ทำการเข้าร่วมเครือข่าย การระบุแอดเดรสจะต้องใช้แอดเดรสที่มีความยาว 64 บิต แต่ถ้าอุปกรณ์ดังกล่าวได้ทำการเข้าร่วมเครือข่ายแล้ว จะได้รับอนุญาตให้ใช้แอดเดรสที่มีขนาดสั้น 16 บิต ที่ใช้ได้เฉพาะภายในเครือข่ายที่ได้ทำการเข้าร่วม

- กรณีที่ฟิลด์แอดเดรสของผู้ส่งไม่ได้ระบุข้อมูลไว้จะหมายถึงเฟรมข้อมูลนั้นถูกส่งมาจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ และฟิลด์แอดเดรสของผู้รับจะหมายถึงที่อยู่ของอุปกรณ์ผู้รับที่เฟรมข้อมูลนั้นต้องถูกนำส่ง ซึ่งอาจใช้ได้ทั้งแอดเดรสแบบ 16 บิต หรือ 64 บิต

- กรณีที่ฟิลด์แอดเดรสของผู้รับไม่ได้ถูกระบุไว้จะหมายถึงเฟรมข้อมูลนั้นถูกส่งไปยังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์และฟิลด์แอดเดรสของผู้ส่งจะหมายถึงแอดเดรสของอุปกรณ์ต้นทางที่ส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์

- กรณีที่ฟิลด์แอดเดรสทั้งของผู้รับและผู้ส่งปรากฏในเฟรม MAC Layer ต้องทำการเปรียบเทียบค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายของทั้งผู้รับและผู้ส่งว่าตรงกันหรือไม่ หากค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายตรงกันจะมีการระบุแฟล็กในส่วนฟิลด์ควบคุมเฟรมเป็นค่า 1 และค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายก็ไม่จำเป็นสำหรับการส่งรวมไปในเฟรมข้อมูล แต่ถ้าค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายไม่ตรงกัน ก็จำเป็นต้องส่งค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายของทั้งผู้รับและผู้ส่งไปในเฟรมข้อมูลด้วย กรณีที่มีแอดเดรสเพียงค่าเดียวไม่ว่าจะเป็นแอดเดรสของผู้รับหรือแอดเดรสของผู้ส่ง จะมีการระบุแฟล็กในส่วนฟิลด์ควบคุมเฟรมเป็นค่า 0 และค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายของแอดเดรสนั้นจะถูกส่งรวมไปในเฟรมข้อมูล

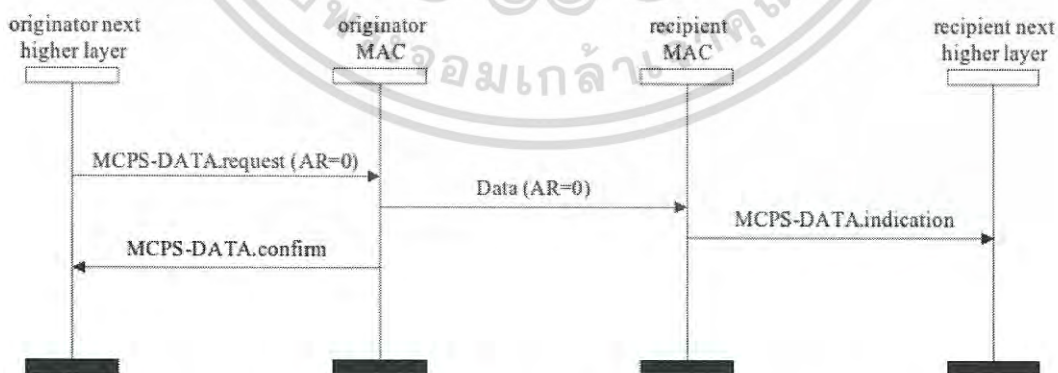
การส่งผ่านเฟรมข้อมูลสำหรับเครือข่ายที่ไม่ใช่เฟรมบิตคอน อุปกรณ์ที่ส่งจะใช้อัลกอริทึม (Algorithm) การส่งแบบสุ่มที่ไม่มีสล็อต แต่การส่งผ่านเฟรมข้อมูลสำหรับเครือข่ายที่ใช้เฟรมบิตคอน อุปกรณ์ที่ส่งจะต้องค้นหาบิตคอนก่อนทำการส่งข้อมูล โดยหากไม่สามารถหาบิตคอนได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง การส่งจะใช้อัลกอริทึมการส่งแบบสุ่มที่ไม่มีสล็อต แต่ถ้าภายหลังสามารถหาบิตคอนพบ เฟรมข้อมูลจะถูกส่งในรูปแบบซูปเปอร์เฟรมที่เหมาะสมในลักษณะการเข้าถึงแบบสุ่มที่มีสล็อต นอกจากนี้ การส่งเฟรมข้อมูลจะมีการบันทึกเลขลำดับข้อมูล (Data-Sequence Number: DSN) ลงในส่วนหัว

ของเฟรมข้อมูลเพื่อใช้ในการจัดลำดับข้อมูล และใช้ในการตรวจสอบการได้รับเฟรม ข้อมูลจากการส่ง ค่ายืนยันการได้รับเฟรมข้อมูลจากอุปกรณ์ตัวรับ

การตอบรับและการปฏิเสธ ในช่วงเวลายังไม่ทำงาน (Idle Period) อุปกรณ์ตัวรับ สัญญาณสามารถเลือกได้ว่าจะให้มีการรับสัญญาณหรือไม่ โดยในระดับ MAC Layer จะมีการติดต่อกับชั้นการสื่อสารด้านบนเพื่อรอรับคำร้องขอต่างๆ เช่น หากมีการร้องขอให้ตอบกลับเมื่อมีข้อมูลส่งมา และอุปกรณ์ตัวรับอยู่ในสภาวะพร้อมรับสัญญาณ อุปกรณ์ตัวรับจะรับและถอดรหัสสัญญาณตามมาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับอุปกรณ์ทุกตัวที่ส่งสัญญาณมาในช่องสัญญาณเดียวกันกับอุปกรณ์ตัวรับ จากนั้นใน MAC Layer จะมีการทำการกรองเฟรมข้อมูลที่ได้รับมาได้ เฟรมข้อมูลที่มีค่าในฟิลด์รหัส ตรวจสอบความผิดพลาด (FCS) ไม่ถูกต้องจะถูกทิ้ง และเลือกเพียงเฟรมข้อมูลที่ต้องการ เพื่อส่งผ่านไปยังชั้นการสื่อสารที่อยู่ด้านบน โดยมีข้อกำหนดสำหรับเฟรมต่างๆ ที่ได้รับ คือ

- หากได้รับเฟรมข้อมูลแบบ Broadcast MAC Layer จะไม่ส่งค่ายืนยันการได้รับเฟรม
- หากได้รับเฟรมข้อมูลชนิดอื่นที่ไม่ใช่แบบ Broadcast MAC Layer จะส่งต่อเฟรมนั้น ไปยังชั้นการสื่อสารถัดไป
- หากได้รับเฟรมข้อมูลคำสั่ง หรือมีการร้องขอการยืนยันการได้รับเฟรม MAC Layer จะต้องส่งค่ายืนยันการได้รับเฟรมกลับไปยังอุปกรณ์ตัวส่ง โดยค่ายืนยันการได้รับเฟรมจะมีการบรรจุ เลขลำดับข้อมูล (DSN) ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ตัวส่งทราบได้ว่าเฟรมข้อมูลใดที่อุปกรณ์ตัวรับได้รับแล้ว
- หากได้รับเฟรมคำสั่ง หรือเฟรมบีคอน MAC Layer จะทำการประมวลผลเฟรมนั้น และอาจส่งการแสดงผลไปยังชั้นการสื่อสารถัดไป

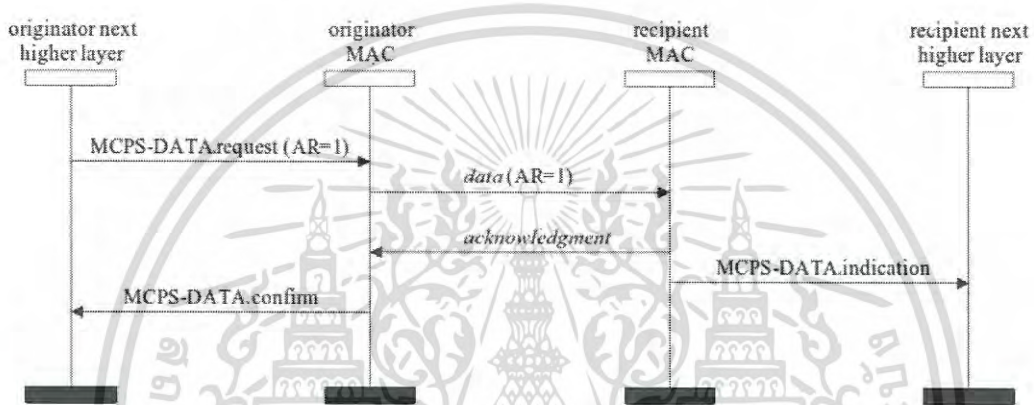
การใช้ค่ายืนยันการได้รับเฟรมและการส่งซ้ำ เฟรมข้อมูลหรือเฟรมคำสั่งในระดับ MAC Layer จะถูกส่งไปพร้อมกับการร้องขอค่ายืนยันการได้รับเฟรม โดยทำการระบุไว้ในส่วนของฟิลด์ควบคุมเฟรม แต่เฟรมบีคอนหรือเฟรมยืนยันการได้รับเฟรมจะถูกส่งไปโดยทำการระบุการร้องขอ ค่ายืนยันการได้รับเฟรมในส่วนของฟิลด์ควบคุมเฟรมเป็นค่า 0 (MCPS-DATA.request (AR=0)) ใน ทำนองเดียวกันสำหรับเฟรมใดๆ ที่ถูกส่งในรูปแบบ Broadcast จะถูกส่งไปโดยทำการระบุการร้องขอ ค่ายืนยันการได้รับเฟรมในส่วนของฟิลด์ควบคุมเฟรมเป็นค่า 0 รูปที่ 2.13 แสดงรูปแบบการสื่อสารที่ ไม่มีการส่งค่ายืนยันการได้รับเฟรม



รูปที่ 2.13 รูปแบบการสื่อสารที่ไม่มีการส่งค่ายืนยันการได้รับเฟรม [2]

สำหรับกรณีเฟรมข้อมูลหรือเฟรมคำสั่งในระดับ MAC Layer จะมีการระบุการร้องขอ ค่ายืนยันการได้รับเฟรมในส่วนของฟิลด์ควบคุมเฟรมให้มีค่าเป็น 1 (MCPS-DATA.request เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(AR=1) อุปกรณ์ที่ส่งเฟรมนั้นจะต้องรอการตอบยืนยันการได้รับเฟรมภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ใน macAckWaitDuration ซึ่งหากมีการได้รับคำยืนยันการได้รับเฟรมในช่วงเวลาที่กำหนด และมีค่าเลขลำดับข้อมูล DNS ที่ถูกต้อง จะถือว่าการส่งเฟรมถูกต้องสมบูรณ์ และจะไม่มีมีการดำเนินการใดๆ ต่อ อย่างไรก็ตามถ้าไม่ได้รับคำยืนยันการได้รับเฟรมในช่วงเวลาที่กำหนด หรือคำยืนยันที่ได้รับมีค่าเลขลำดับข้อมูล DNS ไม่ถูกต้อง อุปกรณ์ที่ส่งเฟรมจะพิจารณาว่าการส่งข้อมูลสื่อสารครั้งนี้ล้มเหลว และจะทำการส่งเฟรมซ้ำอีกครั้ง ซึ่งจะต้องทำการส่งในช่วงเวลา CAP หรือช่วงเวลาที่เหมาะสมที่แบ่งให้แก่ อุปกรณ์ที่ข้อมูลต้นฉบับเคยถูกส่งไปเท่านั้น และหากไม่ได้รับคำยืนยันการได้รับเฟรม หลังจากการส่งซ้ำเท่ากับจำนวนการส่งซ้ำสูงสุดที่ระบุไว้ MAC Layer จะพิจารณาว่าการสื่อสารเฟรมไม่ประสบความสำเร็จ และจะแจ้งผลการสื่อสารล้มเหลวนี้ไปยังชั้นการสื่อสารชั้นบนต่อไป รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบการสื่อสารที่มีการส่งคำยืนยันการได้รับเฟรม



รูปที่ 2.14 รูปแบบการสื่อสารที่มีการส่งคำยืนยันการได้รับเฟรม [2]

2.9.4.7 การจัดการและการจัดสรร GTS

ช่องเวลาที่แน่นอนที่แบ่งให้แก่ อุปกรณ์ (GTS) เป็นส่วนหนึ่งของช่วงเวลาของซูปเปอร์เฟรมที่มีการจัดสรรไว้เป็นพิเศษ อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะเป็นผู้จัดสรรเพื่อใช้สำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ และอุปกรณ์ลูกข่ายที่ทำการเชื่อมโยงกับเครือข่ายเท่านั้น ในการจัดสรรช่วงเวลา GTS อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์สามารถจัดสรรช่วงเวลา GTS ได้มากกว่าหนึ่งซูปเปอร์เฟรม หากข้อมูลที่ต้องทำการสื่อสารมีมากกว่าจำนวนช่วงเวลา GTS ที่จัดสรรไว้ช่องเวลาที่แน่นอนที่แบ่งให้แก่ อุปกรณ์นี้จำเป็นจะต้องจัดสรรไว้ล่วงหน้าก่อนที่จะใช้งาน โดยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะพิจารณาจากคำร้องขอของอุปกรณ์ลูกข่าย จากนั้นจึงจัดสรรช่วงเวลาที่มีอยู่ในปัจจุบันที่สามารถใช้งานได้ ในซูปเปอร์เฟรม หากมีการร้องขอจากอุปกรณ์ลูกข่ายหลายตัว ก็จัดสรรช่วงเวลา GTS ให้กับอุปกรณ์ลูกข่ายที่มีการร้องขอก่อน (First-Come First-Serve) นอกจากนี้ช่องเวลาที่แน่นอนที่แบ่งให้แก่ อุปกรณ์นี้ไม่ได้ถูกจัดสรรในซูปเปอร์เฟรมไว้ตลอดเวลา หากไม่มีการร้องขอ อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ก็จะไม่จัดสรรไว้ ในส่วนของแอตเดรสที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ลูกข่าย และอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์สำหรับการสื่อสารในช่วงเวลา GTS นั้นจะใช้แอตเดรสแบบสั้นเท่านั้น

การจัดการช่องเวลาที่แน่นอนที่แบ่งให้แก่ อุปกรณ์จะจัดการโดยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์เท่านั้น โดยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะต้องมีทรัพยากรระบบที่เพียงพอสำหรับการจัดการช่วงเวลา GTS โดยแต่ละช่วงเวลา GTS จะต้องจัดทรัพยากรระบบสำหรับลำดับช่องเริ่มต้น ความยาวช่อง เวลา

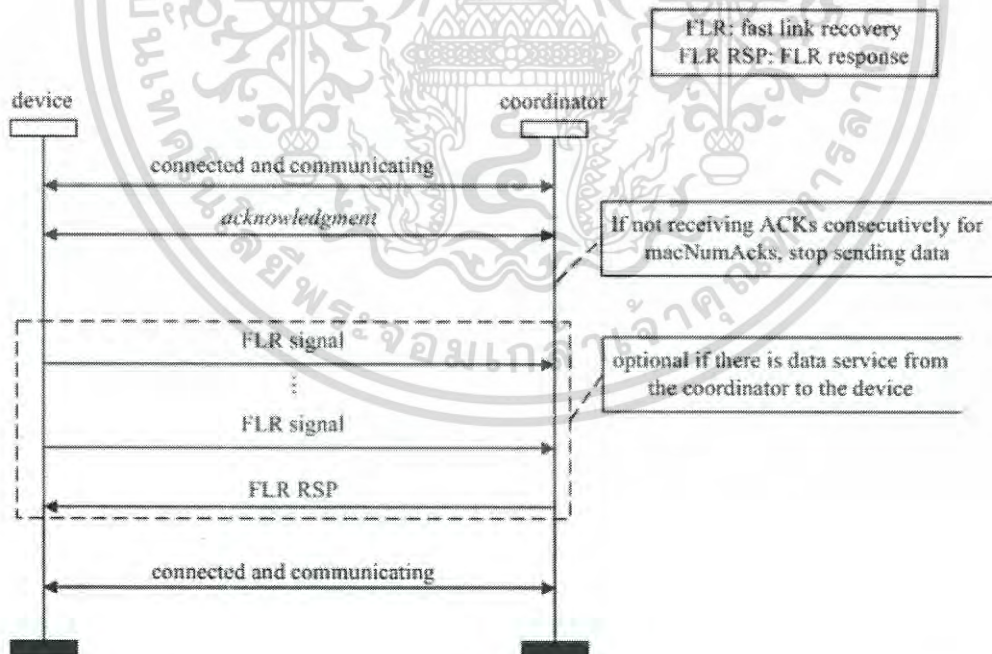
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางการสื่อสารจากอุปกรณ์ลูกข่ายมายังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ หรือจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ไปยังอุปกรณ์ลูกข่าย และแอตเตรสของอุปกรณ์ลูกข่ายที่ทำการสื่อสารในช่วงเวลานั้น

2.9.4.8 การกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็ว

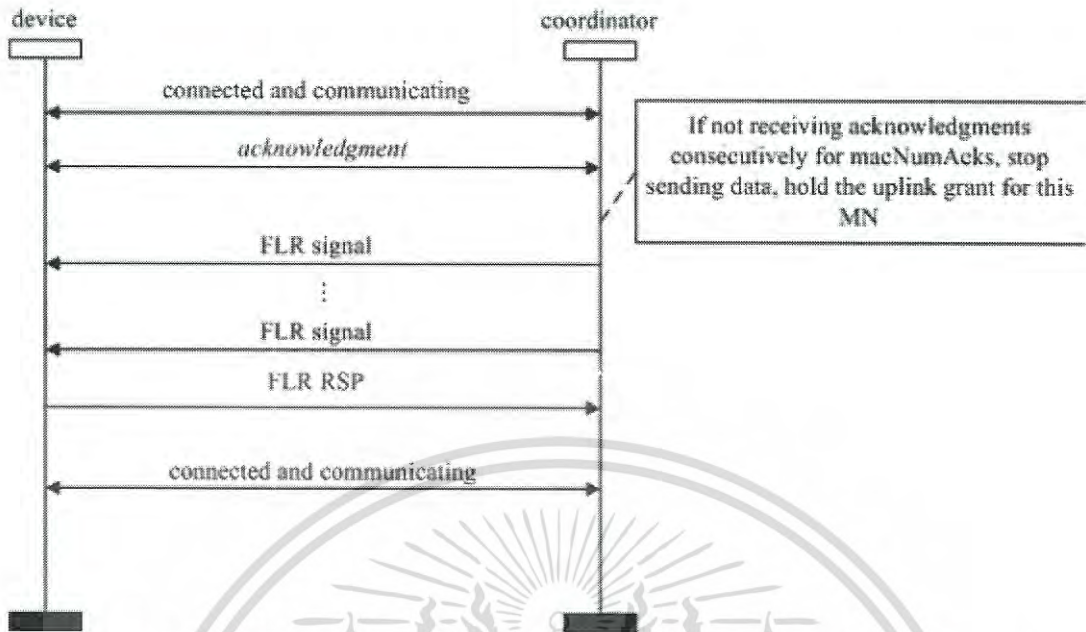
ในการสื่อสารด้วยโทโพลยีแบบ Star หากการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ลูกข่ายและอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ดำเนินไปโดยอุปกรณ์ลูกข่ายไม่ได้รับคำยืนยันการได้รับเฟรมจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์เกินจำนวนครั้งที่กำหนดไว้ใน MAC PIB Attribute ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 3 ($macNumAcks = 3$) อุปกรณ์ลูกข่ายจะเริ่มกระบวนการการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็ว (Fast Link Recovery: FLR) ซึ่งเริ่มด้วยการส่งสัญญาณ FLR ไปยังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ซ้ำๆ โดยเมื่ออุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ได้รับสัญญาณ FLR จากอุปกรณ์ลูกข่าย อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ก็จะส่งสัญญาณตอบรับกลับไปยังอุปกรณ์ผู้ส่ง และการสื่อสารจะถูกเชื่อมโยงกลับคืนมา โดยในขณะที่กระบวนการ FLR ดำเนินการอยู่ อุปกรณ์ลูกข่ายอาจหยุดส่งเฟรมข้อมูลไปยังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ หากอุปกรณ์ลูกข่ายไม่ได้รับสัญญาณตอบสนองจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ในเวลาที่กำหนดไว้ใน MAC PIB attribute โดยมีค่าเริ่มต้นตามมาตรฐานเท่ากับ 63 ($macLinkTimeOut = 63$) ซึ่งอยู่ระหว่างการไม่ได้รับซูปเปอร์เฟรม อุปกรณ์ลูกข่ายจะพิจารณาว่าการเชื่อมต่อนั้นขาดลง และไม่สามารถกู้คืนกลับมาได้ รูปที่ 2.15 แสดงกระบวนการ FLR โดยเฟรมที่ใช้ใน FLR จะใช้เฟรมคำสั่งที่กำหนดให้ทำการส่งด้วยอัตราความเร็วการสื่อสารน้อยสุดที่สามารถใช้งานได้ในระบบ

นอกจากนี้หากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ไม่ได้รับคำยืนยันการได้รับเฟรมจากอุปกรณ์ลูกข่าย การเริ่มกระบวนการ FLR อาจทำจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ได้เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 กระบวนการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็วเริ่มต้นจากอุปกรณ์ลูกข่าย [2]

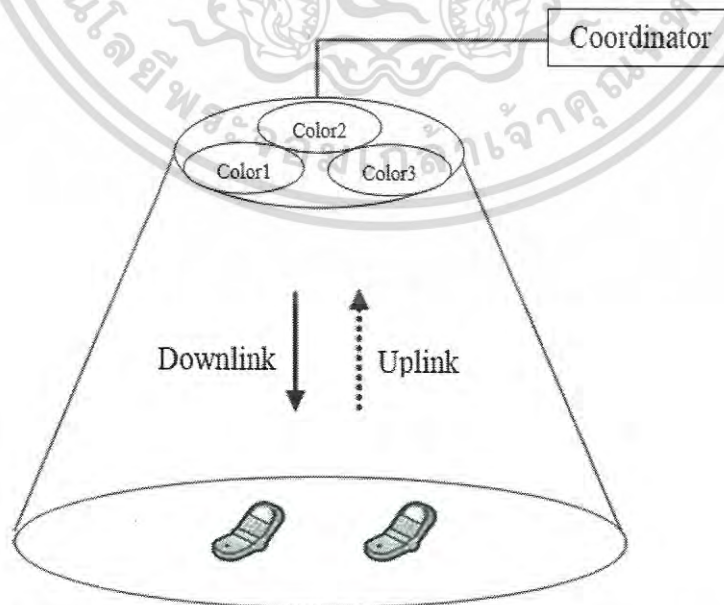
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 กระบวนการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็วเริ่มต้นจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ [2]

และหากการเชื่อมต่ออยู่ในรูปแบบการสื่อสารแบบหลายความยาวคลื่น การส่งสัญญาณ FLR สามารถส่งเฟรมคำสั่งดังกล่าวในแถบความยาวคลื่นอื่นๆ ที่สามารถทำได้โดยหากมีการตอบสนองจากความยาวคลื่นใด อุปกรณ์ที่เริ่มต้นกระบวนการจะทำการเชื่อมโยงการสื่อสารกลับคืนมาในแถบความยาวคลื่นที่มีการตอบสนองนั้น

2.9.4.9 การกำหนดทรัพยากรหลายช่องสัญญาณ



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ที่รองรับการส่งผ่านหลายความยาวคลื่น [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

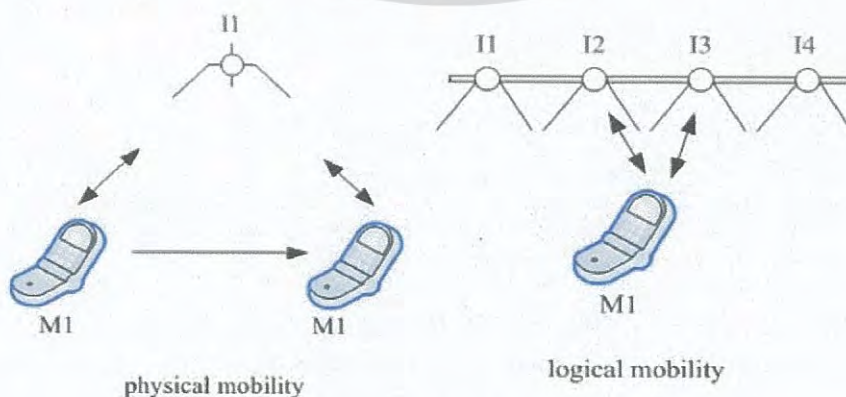
ในกรณีที่อุปกรณ์ในเครือข่ายสามารถรองรับการส่งข้อมูลแบบหลายแถบความยาวคลื่นหรือแบบหลายสี และอุปกรณ์โคอดิเนเตอร์มีทรัพยากรไม่เพียงพอสำหรับการให้บริการต่ออุปกรณ์ลูกข่ายใหม่ที่เข้ามาร่วมในเครือข่าย อุปกรณ์โคอดิเนเตอร์อาจเลือกใช้วิธีการเพิ่มช่องทางการส่งข้อมูลจากแถบความยาวคลื่นเดิมที่ใช้อยู่ไปยังแถบความยาวคลื่นใหม่ได้ตามที่แสดงในรูปที่ 2.17 ในทางปฏิบัติแถบความยาวคลื่นที่รองรับตามมาตรฐานมีจำนวน 7 แถบความยาวคลื่น ซึ่งจะถูกระบุความสามารถในการรองรับการใช้งานของอุปกรณ์ในข้อมูลบิตของคำสั่ง Src_multi_info และ Des_multi_info สำหรับอุปกรณ์โคอดิเนเตอร์และอุปกรณ์ลูกข่ายตามลำดับ โดยในตำแหน่ง บิต 'b0 ... b6' ถ้าระบุค่า '0000000' จะหมายถึงไม่รองรับการส่งผ่านหลายสีหรือหลายแถบความยาวคลื่น แต่ถ้าระบุค่าหนึ่งในบิตใดจะหมายถึงรองรับการส่งผ่านในแถบความยาวคลื่นนั้นๆ เช่น หากระบุค่า '0100001' จะหมายถึงการรองรับแถบความยาวคลื่นที่ 2 และ 7 เป็นต้น

ในทางปฏิบัติ ระบบที่รองรับการส่งผ่านหลายแถบความยาวคลื่นจะสามารถหลีกเลี่ยงการแทรกสอดระหว่างอุปกรณ์ได้ โดยใช้เทคนิคการฮอปแถบความถี่ (Band Hopping) กล่าวคือ ถ้าอุปกรณ์โคอดิเนเตอร์ตรวจพบการแทรกสอดระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้แถบความถี่เดียวกัน ก็สามารถใช้เทคนิคการฮอปแถบความถี่เพื่อลดผลกระทบได้ ซึ่งจะต้องกำหนดรูปแบบ การฮอปแถบความถี่ไว้ล่วงหน้า และส่งข้อมูลรูปแบบการฮอปจากอุปกรณ์โคอดิเนเตอร์ไปยังอุปกรณ์ลูกข่ายผ่านเฟรมคำสั่ง MAC (ระบบที่ไม่รองรับการส่งผ่านหลายแถบความยาวคลื่นจะใช้งานเทคนิคการฮอปแถบความถี่ไม่ได้) นอกจากนี้รูปแบบการฮอปที่ใช้ต้องไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของแสงจนสังเกตเห็นได้ เช่น การฮอประหว่างแสงสีขาวยที่สร้างจากแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน จะต้องเลือกสัดส่วน เวลา และสีของการฮอปที่เหมาะสม เพื่อให้แสงที่ถูกสร้างขึ้นยังคงเป็นสีขาว

2.9.4.10 การออกแบบเซลล์การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นและการรองรับการ

เคลื่อนที่

อุปกรณ์โคอดิเนเตอร์หนึ่งตัวสามารถรองรับอุปกรณ์การกระจายแสงได้หลายตัว โดยเรียกอุปกรณ์การกระจายแสงแต่ละตัวว่าเซลล์ (Cell) ซึ่งจะใช้การส่งผ่านข้อมูลการสื่อสารในแต่ละเซลล์เพื่อให้บริการที่ใช้การอ้างอิงตำแหน่งของอุปกรณ์ลูกข่าย เช่น การระบุตำแหน่ง หรือใช้แก้ปัญหาจากการแทรกสอดระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้แสงในแถบความถี่เดียวกันได้ ในการออกแบบเซลล์ VLC จำเป็นต้องออกแบบให้รองรับการสลับการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างเซลล์ที่อาจเกิดจากการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่ายดังแสดงในรูปที่ 2.18



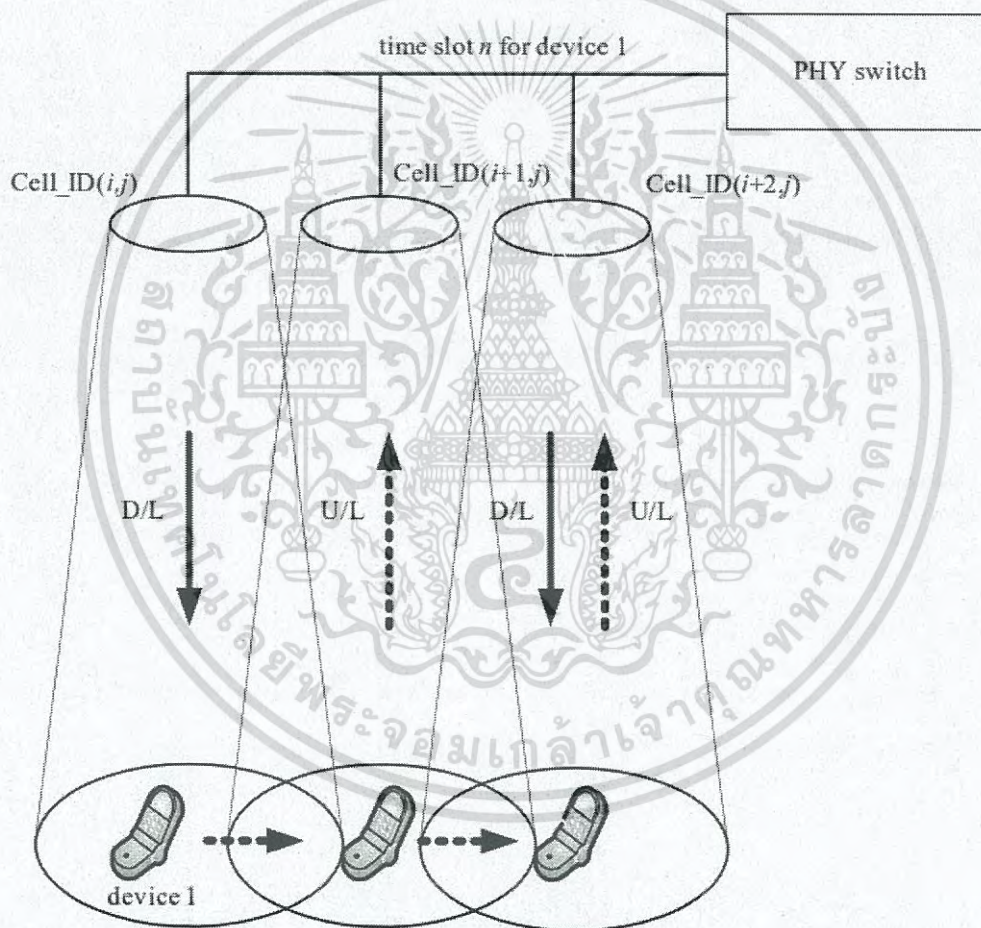
รูปที่ 2.18 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่าย [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่ายสามารถแยกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

- 1) การเคลื่อนที่แบบกายภาพ (Physical Mobility) อุปกรณ์ลูกข่ายมีการเปลี่ยนตำแหน่งหรือมีการเคลื่อนที่แต่อยู่ภายในรัศมีการสื่อสารของเซลล์ในอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ตัวเดิม
- 2) การเคลื่อนที่แบบลอจิคัล (Logical Mobility) อุปกรณ์ลูกข่ายไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง แต่มีการเปลี่ยนการสื่อสารจากเซลล์ในอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์หนึ่งไปยังเซลล์อื่น

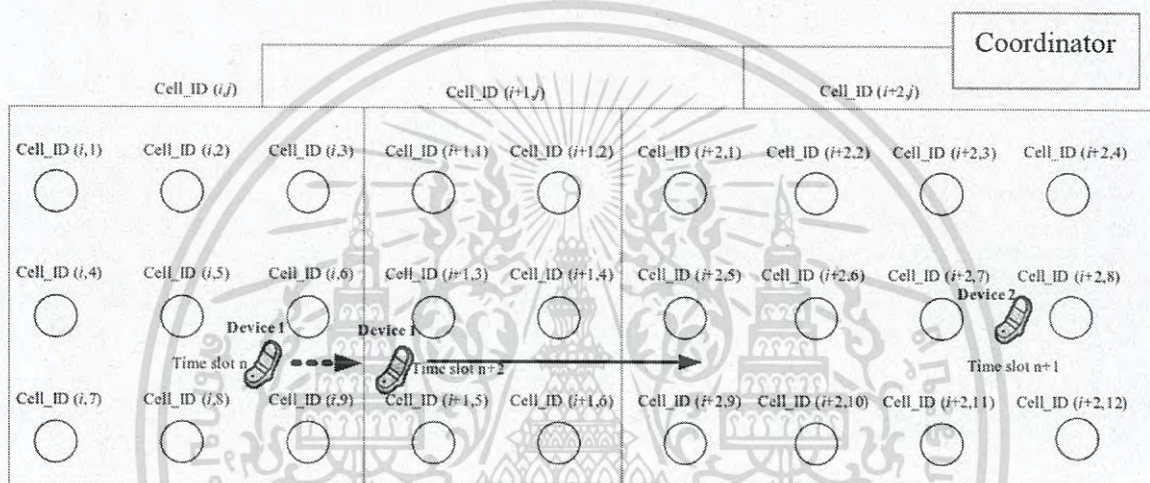
ในการจัดการเซลล์ของอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะดำเนินการควบคุม PHY Switch ผ่านเอนทิตีควบคุมอุปกรณ์ DME ดังรูปที่ 2.19 โดยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะระบุอุปกรณ์กำเนิดแสงแต่ละเซลล์ด้วยค่า Cell_ID(i, j) โดย j หมายถึงลำดับของอุปกรณ์กำเนิดแสงในเซลล์ i ซึ่งถ้าอุปกรณ์ลูกข่ายมีการเคลื่อนที่จาก cell_ID(i, j) มายัง cell_ID($i+1, j$) อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะสามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่ายได้จากสัญญาณที่ส่งจากอุปกรณ์ลูกข่ายมายัง เซลล์ที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น เฟรมยืนยันการตอบรับ เป็นต้น



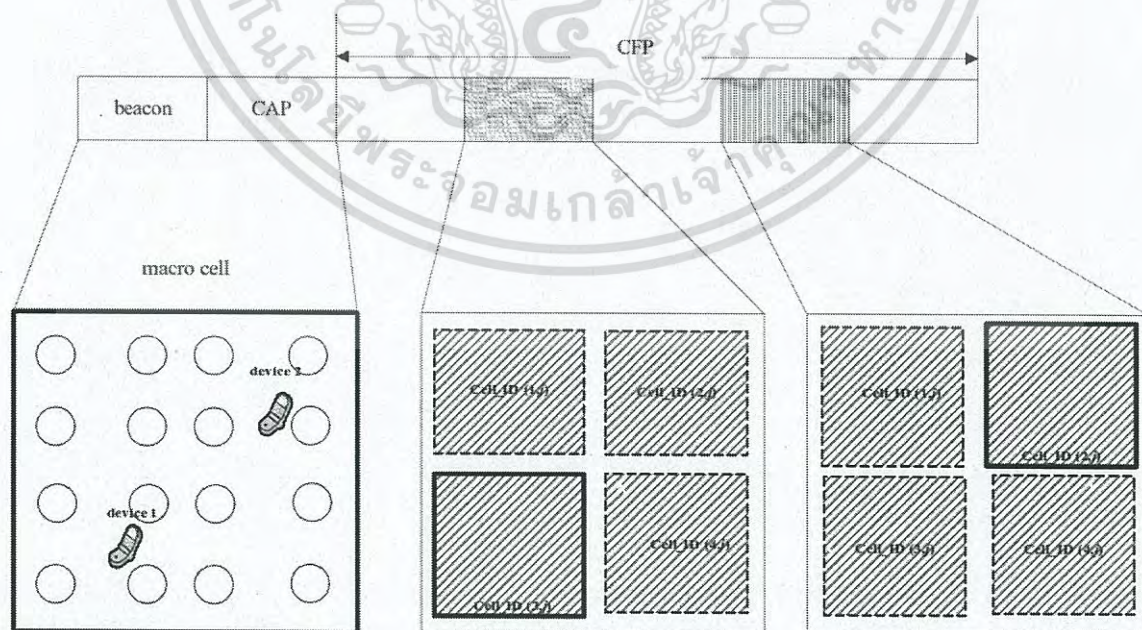
รูปที่ 2.19 การควบคุม PHY Switch ผ่านเอนทิตีควบคุมอุปกรณ์ DME [2]

ในส่วนของผู้ประกอบการสื่อสารของอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์นั้นจะต้องรองรับการสลับระหว่างเซลล์ โดยต้องจัดสรรช่องเวลาสำหรับอุปกรณ์แต่ละตัวด้วย เช่น รูปที่ 2.20 แสดงอุปกรณ์ลูกข่ายตัวหนึ่งที่มีการเคลื่อนตำแหน่งจากที่เคยสื่อสารอยู่ใน cell_ID(i, j) มายัง cell_ID($i+1, j$) และอาจเคลื่อนที่ไปยังเซลล์อื่น ก่อนทำการส่งเฟรมข้อมูลสื่อสารกลับไปยังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ ดังนั้นอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์อาจไม่ได้รับเฟรมยืนยันการได้รับข้อมูลจากลูกข่ายที่เซลล์ cell_ID(i, j) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญ เตไหนาเปไซประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะดำเนินการค้นหาลูกข่ายที่ขาดการติดต่อในเซลล์ข้างเคียง เช่น cell_ID(i-1, j) และ cell_ID(i+1, j) โดยใช้ช่วงเวลาเดิมที่กำหนดไว้สำหรับอุปกรณ์ลูกข่ายตัวดังกล่าวในซูปเปอร์เฟรม ส่วนอุปกรณ์ลูกข่ายตัวอื่นที่อยู่ใน cell_ID(i, j) ยังคงทำการสื่อสารกับอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ผ่านช่องเวลาที่ได้ถูกจัดสรรไว้เดิมในซูปเปอร์เฟรมจากผลการค้นหาของอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ หากพบอุปกรณ์ลูกข่ายที่ขาดการติดต่อใน cell_ID(i+1, j) อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะกู้คืนการสื่อสารกับอุปกรณ์ลูกข่ายและทำการจัดสรรช่วงเวลาในซูปเปอร์เฟรมสำหรับ cell_ID(i+1, j) พร้อมทั้งเอนทิตีควบคุมอุปกรณ์ DME จะทำการเลือก PHY Switch มายัง cell_ID(i+1, j) สำหรับอุปกรณ์ลูกข่ายที่เคลื่อนที่มาจากที่เซลล์นี้จากนั้นจะทำการสวิตช์กลับไปยัง cell_ID(i, j) เพื่อให้บริการแก่อุปกรณ์ลูกข่ายที่ยังทำงานอยู่ในเซลล์ cell_ID(i, j) ในช่วงเวลาอื่นๆ ในซูปเปอร์เฟรม แต่หากการค้นหาไม่พบอุปกรณ์ลูกข่ายในเวลาที่กำหนด อุปกรณ์ลูกข่ายนั้นจะถูกลบเลิกการเชื่อมต่อจากเครือข่ายนั้น



รูปที่ 2.20 การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่ายและการควบคุม [2]



รูปที่ 2.21 การจัดโครงสร้างของซูปเปอร์เฟรมเพื่อรองรับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่าย [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบให้อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์สามารถรองรับอุปกรณ์ลูกข่ายที่อาจต้องการเข้าร่วมกับเครือข่ายในช่วงเวลาการส่งบีคอน และช่วงเวลา CAP จะต้องกำหนดให้อุปกรณ์กระจายแสงทุกตัวในทุกเซลล์ทำการส่งสัญญาณเดียวกันทั้งหมด เมื่ออุปกรณ์ลูกข่ายทั้งหมดถูกนำเข้าร่วมเครือข่ายและระบุตำแหน่งในแต่ละเซลล์แล้ว โครงสร้างของ CFP ในซูเปอร์เฟรมจะถูกจัดสรรสำหรับอุปกรณ์ลูกข่ายแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.21

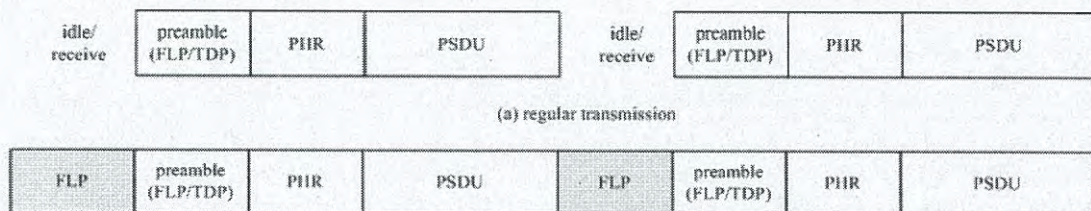
2.9.4.11 การรองรับฟังก์ชันการแสดงผลสี

นอกจากการส่งเฟรมเพื่อสื่อสารข้อมูลและคำสั่งการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นยังมีการรองรับฟังก์ชันการแสดงผลสีตามสถานะของอุปกรณ์ด้วย เช่น อุปกรณ์กำเนิดแสงจะแสดงสีที่แตกต่างกันระหว่างกระบวนการสแกนหาเครือข่าย การขอเข้าร่วมเครือข่าย การออกจากเครือข่าย ในขณะที่ส่งหรือรับข้อมูล หรือแสดงคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับโดยมีความเข้มของสีที่ต่างกัน เป็นต้น นอกจากนี้สำหรับการกำเนิดแสงจากแหล่งกำเนิดหลายสี อุปกรณ์ในเครือข่ายสามารถส่งข้อมูลสีที่ได้รับกลับไปยังอุปกรณ์กำเนิดแสงเพื่อปรับให้เกิดเสถียรภาพในการสร้างสีได้เช่นกัน

2.9.4.12 การรองรับการมองเห็นและการปรับทรี

มาตรฐาน VLC รองรับการมองเห็นและการปรับทรี (Visibility and Dimming Support) เพื่อหลายวัตถุประสงค์ เช่น การค้นหาอุปกรณ์ในเครือข่าย และการสร้างการเชื่อมต่อ การส่องสว่างพื้นที่ใช้งาน และการกระพริบเพื่อให้ทราบสถานะของการออกจากเครือข่าย เป็นต้น รูปแบบของความเข้มแสงที่มองเห็นจะถูกกำหนดจากค่า PHY PIB Attributes phyDim โดยจะส่งเป็นค่าตัวเลขจำนวนเต็มระหว่าง 0 – 1000 เมื่อค่า 0 หมายถึงไม่มีการส่องสว่างหรือไม่มีค่าความเข้มแสง และค่า 1000 หมายถึงค่าความเข้มแสงสูงสุดของอุปกรณ์กำเนิดแสง

โดยปกติการส่งเฟรมข้อมูลจะมีทั้งการส่ง หยุดส่ง หรืออยู่ในสถานะผู้รับ ค่าความเข้มแสงที่อุปกรณ์กำเนิดแสงสร้างขึ้นอาจมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นการเติมข้อมูลในรูปแบบพิเศษที่เรียกว่า FLP (Fast Locking Pattern) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ Preamble มีรูปแบบข้อมูลคือ (1010...) ในช่วงว่างระหว่างเฟรมตามรูปที่ 2.22 ซึ่งจะสามารถควบคุมค่าความเข้มแสงได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ การส่งข้อมูล FLP ในช่วงว่างระหว่างเฟรมของการสื่อสารด้วยโทโพโลยีแบบ Star จะทำให้อุปกรณ์ลูกข่ายสามารถทราบได้ว่าอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์มีช่องว่างเวลาใดบ้างจากการตรวจจับรูปแบบของสัญญาณที่ส่งมาจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์โดยหากตรวจพบรูปแบบที่แสดงว่าเป็นช่วงเวลาที่ว่าง อุปกรณ์ลูกข่ายจึงจะสามารถส่งข้อมูลไปยังช่วงเวลาดังกล่าวได้



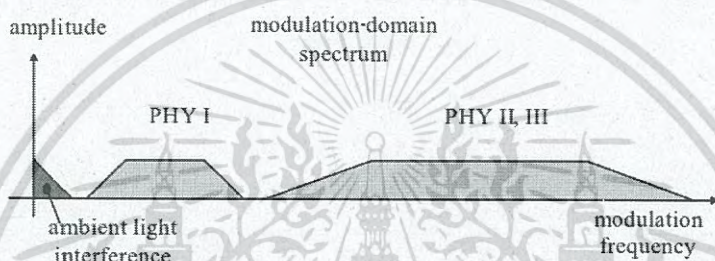
รูปที่ 2.22 การเติมข้อมูลในรูปแบบพิเศษ FLP ในช่วงว่างระหว่างเฟรม [2]

นอกเหนือจากการปรับหรือความเข้มแสงของอุปกรณ์กำเนิดแสงจากการกำหนดจากค่า PHY PIB Attributes phyDim แล้ว หากการสื่อสารมีความจำเป็นต้องปรับค่าความเข้มแสงให้มีค่าสูงสุด สามารถทำการเปลี่ยนสิทธิ์การควบคุมการปรับหรือได้ โดยสามารถที่จะกำหนดจากค่า PHY PIB Attributes macDimOverrideRequest เพื่อสั่งให้อุปกรณ์กำเนิดแสงสร้างค่าความเข้มแสงสูงสุด โดยเมื่อดำเนินการเสร็จสิ้นแล้ว ก็จะทำการเปลี่ยนสิทธิ์การควบคุมกลับคืน โดยการปรับหรือ จะสามารถทำได้จาก phyDim เช่นเดิม

2.9.5 PHY Layer

2.9.5.1 รูปแบบชั้นกายภาพ

การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 มีการกำหนด PHY Layer ออกเป็น 3 รูปแบบ และมีสเปกตรัมในสภาวะการมอดูเลตของทั้งสามแบบตามรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 สเปกตรัมในสภาวะการมอดูเลตของ PHY Layer ทั้งสามแบบ [2]

ทั้งนี้รูปแบบกายภาพทั้งสามไม่สามารถที่จะทำงานร่วมกันได้ การเลือกใช้งานจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม เนื่องจากมีการใช้แถบสเปกตรัมที่ต่างกัน และมีการกำหนดอัตราความเร็วในการสื่อสารและอัตราความเร็วของสัญญาณนาฬิกาทางแสง (Optical Clock Rate) ที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) รูปแบบ PHY I ใช้กับงานประยุกต์ภายนอกอาคารที่ต้องการความเร็วในการสื่อสารไม่สูงนัก โดยมีความเร็วตั้งแต่ 11.67 kbps จนถึง 100 kbps รูปแบบนี้จะใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK และเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ VPPM (Variable Pulse Position Modulation) โดยมีการกำหนดมาตรฐานตามที่แสดงรูปที่ 2.24

Modulation	RLL code	Optical clock rate	FEC		Data rate
			Outer code (RS)	Inner code (CC)	
OOK	Manchester	200 kHz	(15,7)	1/4	11.67 kb/s
			(15,11)	1/3	24.44 kb/s
			(15,11)	2/3	48.89 kb/s
			(15,11)	none	73.3 kb/s
			none	none	100 kb/s
VPPM	4B6B	400 kHz	(15,2)	none	35.56 kb/s
			(15,4)	none	71.11 kb/s
			(15,7)	none	124.4 kb/s
			none	none	266.6 kb/s

รูปที่ 2.24 มาตรฐานของรูปแบบ PHY I [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) รูปแบบ PHY II ใช้กับงานประยุกต์ภายนอกอาคารที่ต้องการความเร็วในการสื่อสารระดับกลาง โดยมีความเร็วตั้งแต่ 1.25 Mbps จนถึง 96 Mbps รูปแบบนี้จะใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK และเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ VPPM เช่นกัน โดยมีการกำหนดมาตรฐานตามรูปที่ 2.25

Modulation	RLL code	Optical clock rate	FEC	Data rate
VPPM	4B6B	3.75 MHz	RS(64,32)	1.25 Mb/s
			RS(160,128)	2 Mb/s
		7.5 MHz	RS(64,32)	2.5 Mb/s
			RS(160,128)	4 Mb/s
			none	5 Mb/s
OOK	8B10B	15 MHz	RS(64,32)	6 Mb/s
			RS(160,128)	9.6 Mb/s
		30 MHz	RS(64,32)	12 Mb/s
			RS(160,128)	19.2 Mb/s
		60 MHz	RS(64,32)	24 Mb/s
			RS(160,128)	38.4 Mb/s
		120 MHz	RS(64,32)	48 Mb/s
			RS(160,128)	76.8 Mb/s
		none	96 Mb/s	

รูปที่ 2.25 มาตรฐานของรูปแบบ PHY II [2]

2) รูปแบบ PHY III ใช้กับงานประยุกต์ที่มีจำนวนตัวรับและตัวส่งหลายตัว และความเร็วของการสื่อสารอยู่ในช่วง 12 Mbps จนถึง 96 Mbps รูปแบบนี้จะใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ CSK (Color-Shift Keying) โดยมีการกำหนดมาตรฐานตามรูปที่ 2.26

Modulation	Optical clock rate	FEC	Data rate
4-CSK	12 MHz	RS(64,32)	12 Mb/s
8-CSK		RS(64,32)	18 Mb/s
4-CSK	24 MHz	RS(64,32)	24 Mb/s
8-CSK		RS(64,32)	36 Mb/s
16-CSK		RS(64,32)	48 Mb/s
8-CSK		none	72 Mb/s
16-CSK		none	96 Mb/s

รูปที่ 2.26 มาตรฐานของรูปแบบ PHY III [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

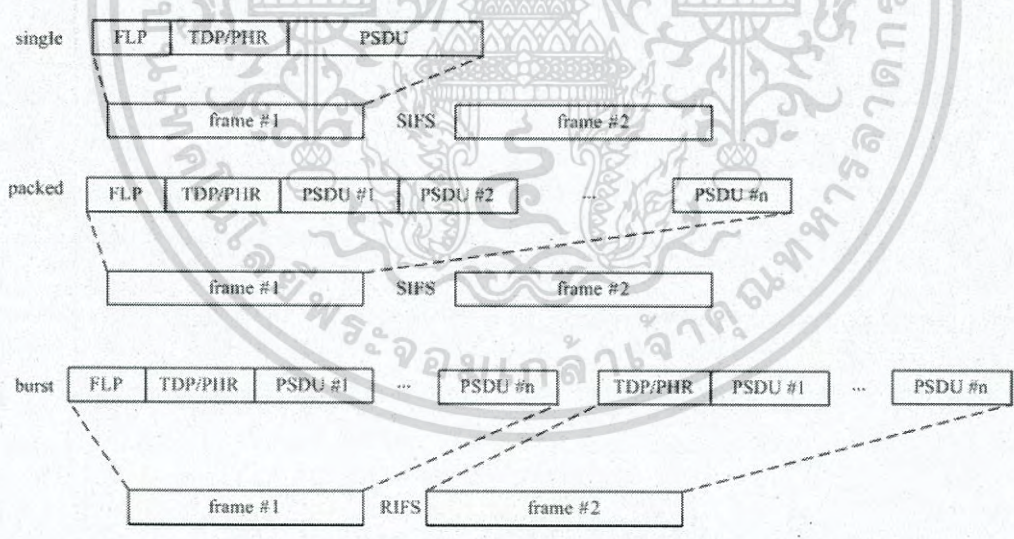
การใช้แถบความยาวคลื่นสำหรับ VLC อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 380 – 780 นาโนเมตร และมีการกำหนดรหัสแถบความยาวคลื่นและความกว้างของสเปกตรัมไว้จำนวน 7 แถบตามรูปที่ 2.27 ซึ่งรหัสแถบความยาวคลื่นจะถูกระบุไว้ที่ส่วนหัวของเฟรมเพื่อระบุคุณสมบัติของช่องทางการสื่อสารด้วย

Wavelength (nm)		Spectral width (nm)	Code
380	478	98	000
478	540	62	001
540	588	48	010
588	633	45	011
633	679	46	100
679	726	47	101
726	780	54	110
Reserved			111

รูปที่ 2.27 รหัสแถบความยาวคลื่นและความกว้างของสเปกตรัม [2]

2.9.5.2 โหมดการส่งข้อมูล

PHY Layer รองรับการส่งผ่านข้อมูล 3 รูปแบบตามรูปที่ 2.28



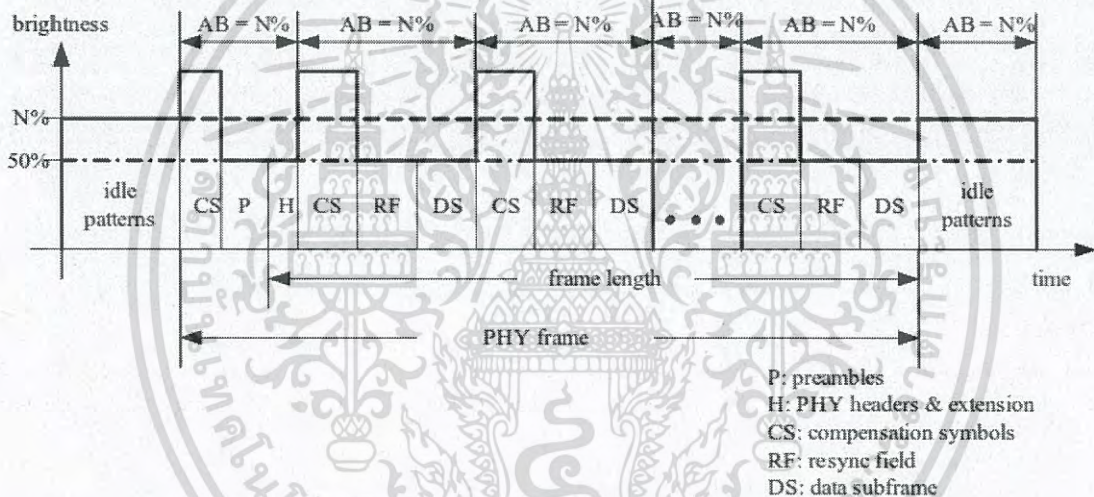
รูปที่ 2.28 โหมดการสื่อสารข้อมูลทั้ง 3 รูปแบบ [2]

- 1) ซิงเกิลโหมด (Single Mode) จะส่งข้อมูลเพียงหน่วยเดียวต่อเฟรมข้อมูล
- 2) แพ็กโหมด (Packed Mode) จะส่งข้อมูลหลายหน่วยภายในเฟรมข้อมูลเดียว โดยการส่งรูปแบบนี้จะได้ค่าปริมาณงาน (Throughput) มากกว่าการส่งแบบซิงเกิลโหมด
- 3) เบิร์สต์โหมด (Burst Mode) จะส่งข้อมูลหลายหน่วยภายในเฟรมข้อมูลเดียว และส่งหลายเฟรมติดต่อกัน โดยจะลดระยะเวลาเว้นระหว่างเฟรมให้ลดลงกว่าการส่งแบบแพ็กโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.5.3 การหรี่แสงและการลดผลกระทบจากการกระพริบ

ในทางปฏิบัติถ้าใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบเดียวกันทั้งในสภาวะทำงานและสภาวะไม่ทำงาน จะส่งผลทำให้เกิดการกระพริบของแหล่งกำเนิดแสงได้ เนื่องจากพลังงานที่ป้อนให้แก่แหล่งกำเนิดแสงจะมีค่าผันผวนมาก ดังนั้นเพื่อลดการกระพริบและสามารถปรับค่าความสว่างได้จึงจำเป็นต้องมีการส่งเฟรมรูปแบบเฉพาะสำหรับสภาวะไม่ทำงาน (Idle Pattern) ให้ในช่วงที่อยู่ในสภาวะการรับสัญญาณหรือสภาวะไม่ทำงานสำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ส่องสว่างภายในอาคาร โดยเมื่อข้อมูลถูกส่ง คลื่นแสงจะถูกมอดูเลตและส่งเป็นคลื่นสัญญาณพัลส์แต่ในช่วงสภาวะไม่ทำงาน คลื่นแสงจะไม่ถูกมอดูเลตด้วยข้อมูลข่าวสาร ดังนั้นช่วงสภาวะไม่ทำงานนี้จะถูกแทนที่ด้วยเฟรมรูปแบบเฉพาะสำหรับสภาวะไม่ทำงานเพื่อให้คลื่นแสงมีรูปแบบต่อเนื่องเสมือนถูกมอดูเลตเป็นคลื่นสัญญาณพัลส์ หรืออาจแทนที่ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจะทำให้มีการกระพริบน้อย และเมื่อต้องการลดความสว่างลงก็ทำได้โดยการลดค่าดิวตีไซเคิล (Duty Cycle) หรือความกว้างของพัลส์ลงทั้งในส่วนข้อมูลและในเฟรมรูปแบบเฉพาะสำหรับสภาวะไม่ทำงานเพื่อให้มีการกระพริบน้อยสุด

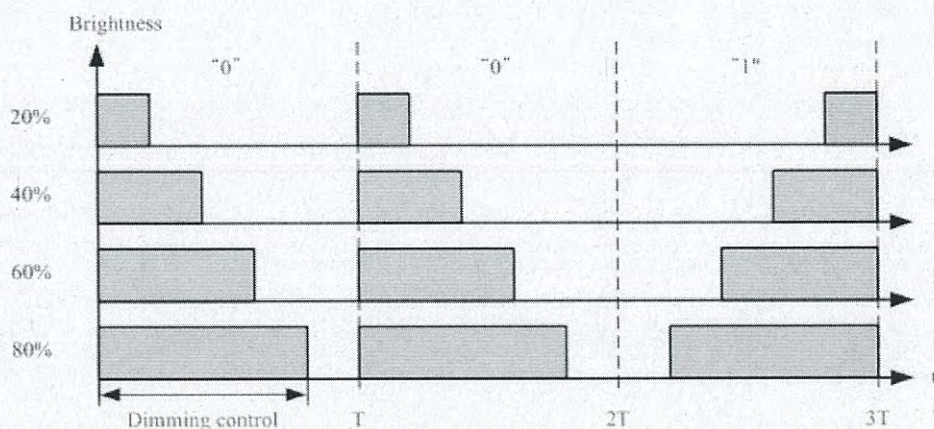


รูปที่ 2.29 การปรับค่าความสว่างสำหรับการมอดูเลตแบบ OOK [2]

ในกรณีที่เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าดิวตีไซเคิลได้ เนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK จะส่งรหัสพัลส์แบบแมนเชสเตอร์ (Manchester Coding) ที่มีค่าดิวตีไซเคิลของสัญลักษณ์แบบสมมาตร ดังนั้นการปรับค่าความสว่างจึงต้องใช้เทคนิคการแทรกบิตชดเชย (Compensation Symbols: CS) เพิ่มลงในแต่ละช่วงเฟรมข้อมูล โดยหากต้องการเพิ่มความสว่างก็ทำได้โดยการเพิ่มขนาดของบิตชดเชยที่เพิ่มเติมเข้ามานั้นให้มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 2.29

สำหรับการปรับค่าความสว่างโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ VPPM สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากสีที่อาจเปลี่ยนไปของแหล่งกำเนิดแสงได้ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดของสัญญาณ เทคนิค VPPM จะไม่เปลี่ยนค่าขนาดของรูปคลื่น แต่จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของพัลส์ และปรับค่าความสว่างด้วยการเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ เช่น การมอดูเลต VPPM ชนิด 2-PPM จะแสดงค่าของบิต 0 และบิต 1 ด้วยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งพัลส์ โดยยังคงมีค่าความกว้างของพัลส์เท่ากัน และเมื่อต้องการปรับเปลี่ยนค่าความสว่างให้มากขึ้น ก็ทำได้โดยการเปลี่ยนค่าความกว้างของพัลส์ให้มีความกว้างมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.30

ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 การปรับค่าความสว่างเมื่อใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ VPPM [2]

2.9.5.4 PPDU (Physical-Layer Data Unit)

เฟรมข้อมูลในระดับ PHY Layer ถูกเรียกสั้นๆ ว่า PPDU (PHY Layer Data Unit) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆ อยู่ 3 ส่วน คือ SHR (Synchronization Header) PHY Header (PHR) และ PSDU (PHY Payload) ดังแสดงในรูปที่ 2.31 โดย PHY Layer จะต้องทำข้อมูลให้อยู่ในรูปของ PPDU ก่อนทำการส่งข้อมูล

Preamble (see 8.6.1)	PHY header (see 8.6.2)	HCS (see 8.6.3)	Optional fields (see 8.6.4)	PSDU (see 8.6.5)
SHR	PHR			PHY payload

รูปที่ 2.31 โครงสร้าง PPDU [2]

1) Synchronization Header (SHR) เป็นฟิลด์นำหน้า (Preamble Field) โดยมีหน้าที่ในการประสานเวลา ภายในประกอบด้วย 1 FLP (Fast Locking Pattern) และ 4 TDP (Topology Dependent Pattern)

ส่วน FLP เป็นแพทเทิร์นของ "10" ตามด้วย "10" ซึ่งความยาวของ FLP ที่สั้นที่สุดประกอบด้วยบิต 0 และบิต 1 จำนวน 64 บิต และยาวที่สุดจำนวน 16,834 บิต

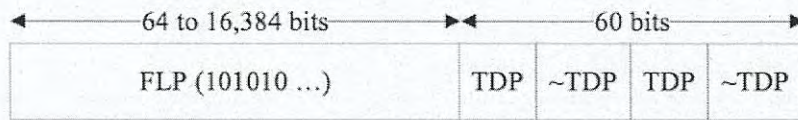
ส่วน TDP ขึ้นอยู่กับชนิดของโทโพโลยีที่ใช้ ไม่ว่าจะเป็ Star Peer-to-Peer หรือ Broadcast และสามารถกำหนดเป็น Independent ได้ ในรูปที่ 2.32 แสดงการกำหนด TDP ของการเชื่อมต่อทั้ง 4 รูปแบบ

TDP	Topology
P1	Topology independent (visibility)
P2	Peer-to-peer
P3	Star
P4	Broadcast

P1: 1111010111001000
P2: 001011101111110
P3: 100110000010011
P4: 010000110100101

รูปที่ 2.32 การกำหนด TDP ของการเชื่อมต่อทั้ง 4 รูปแบบ [2]

ในรูปที่ 2.33 แสดง SHR ของการส่งแบบ Single Mode ส่วนการส่งแบบ Burst Mode จะมีเพียงเฟรมแรกที่มี FLP



รูปที่ 2.33 โครงสร้าง SHR ของการส่งแบบ Single Mode [2]

2) PHY Header (PHR) ประกอบด้วย ส่วนหัวของ PHY (PHY Header) ส่วนของซีควเอนตรวจสอบส่วนหัว (Header Checks Sequence: HCS) และฟิลด์ตัวเลือก (Optional Field) โดยความเร็วของการส่ง PHR นั้นต้องเป็นความเร็วต่ำสุดของรูปแบบ PHY ที่เลือกใช้

ส่วน PHY Header บรรจุข้อมูลที่สำคัญสำหรับ PHY Payload ดังแสดงในรูปที่ 2.34 เช่น ฟิลด์ของ MCS ID ซึ่งมีไว้บอกความเร็วของการสื่อสารที่ใช้ โดยมีข้อกำหนดตามรูปที่ 2.35 และฟิลด์ PSDU Length ซึ่งมีไว้บอกความยาวของฟิลด์ PSDU

PHY header fields	Bit-width	Explanation on usage
Burst mode	1	Reduce preamble and IFS
Channel number	3	Band plan ID
MCS ID	6	Provide information about PHY type and data rate
PSDU length	16	Length up to $aMaxPHYFrameSize$
Dimmed OOK extension	1	Information on compensation time, resync, and length of sub-frame
Reserved fields	5	Future use

รูปที่ 2.34 โครงสร้างของส่วนหัวของ PHY [2]

ส่วน HCS คือ CRC-16 ของ PHR ซึ่งมีจำนวนบิต 16 บิต โดยสามารถคำนวณหา CRC (Cyclic Redundancy Check) ได้จากสมการที่ 2.3 โดยมีค่ารีจิสเตอร์เริ่มต้นเป็น 1 ทั้งหมด

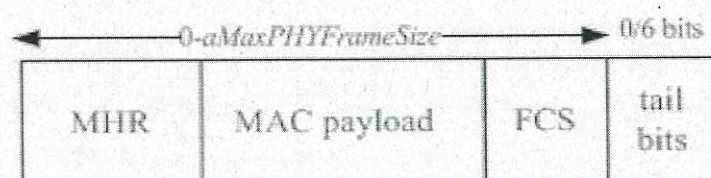
$$G_{16}x = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (2.3)$$

ส่วน Optional Field มีความแตกต่างไปตามรูปแบบของ PHY ที่เลือกใช้ เช่น ฟิลด์ตัวเลือกจะถูกกำหนดให้บรรจุบิต 0 จำนวน 6 บิตเมื่อเป็นโครงสร้างในรูปแบบ PHY I

3) PSDU บรรจุเฟรมข้อมูล PHY (PHY Payload) โดยมีฟิลด์ FCS ต่อท้ายเมื่อปรากฏข้อมูลในฟิลด์ MAC Payload และมีบิต 0 ต่อท้ายอีกจำนวน 6 บิต โครงสร้าง PSDU ของรูปแบบ PHY I แสดงในรูปที่ 2.36 ซึ่งขนาดของ $aMaxPHYFrameSize$ มีค่าที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละรูปแบบของ PHY โดยมีค่าเท่ากับ 1,023 สำหรับ PHY I และ 65,535 สำหรับ PHY II และ PHY III การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	MCS Indication	PHY	Data rate	Unit
0	000000	I	11.67	kb/s
1	000001		24.44	
2	000010		48.89	
3	000011		73.3	
4	000100		100	
5	000101		35.56	
6	000110		71.11	
7	000111		124.4	
8	001000		266.6	
16	010000	II	1.25	Mb/s
17	010001		2	
18	010010		2.5	
19	010011		4	
20	010100		5	
21	010101		6	
22	010110		9.6	
23	010111		12	
24	011000		19.2	
25	011001		24	
26	011010		38.4	
27	011011		48	
28	011100		76.8	
29	011101	96		
32	100000	III	12	Mb/s
33	100001		18	
34	100010		24	
35	100011		36	
36	100100		48	
37	100101		72	
38	100110		96	
others		reserved		

รูปที่ 2.35 ข้อกำหนดของฟิลด์ MCS ID [2]

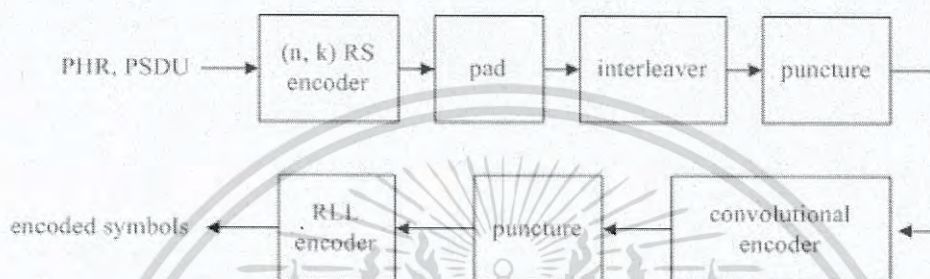


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.36 โครงสร้าง PSDU ของรูปแบบ PHY I [2]

2.9.5.5 การเข้ารหัสและถอดรหัส (Encoding and Decoding)

ฟิลด์ PHR และ PSDU ถูกกำหนดให้มีการผ่านการเข้ารหัสก่อน จึงสามารถทำการส่งได้ และทำการถอดรหัสเมื่อได้รับเฟรมข้อมูล สำหรับการเข้ารหัสของ PHY I การแก้ไขความผิดพลาดแบบล่วงหน้า (Forward Error Correction: FEC) เป็นกันรวมกันของ Reed-Solomon Code (RS) และ Convolutional Code (CC) มีขั้นตอนการเพิ่มบิต 0 ต่อท้าย และขั้นตอนในการตัดบิต 0 ออก สำหรับทั้งในการเข้ารหัสและถอดรหัส รูปที่ 2.37 แสดงแผนภาพของขั้นตอนการเข้ารหัส ข้อมูลสำหรับการเข้ารหัสจะถูกส่งผ่านการเข้ารหัสด้วยเทคนิค RLL เป็นลำดับสุดท้าย



รูปที่ 2.37 แผนภาพของขั้นตอนการเข้ารหัสของ PHY I [2]

1) RS Encoder สามารถเข้ารหัส RS(n,k) ได้จากพหุนามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.38 โดย α คือองค์ประกอบปฐมฐาน (Primitive Element) ใน GF(16) ที่ถูกสร้างขึ้นจากพหุนาม $x^4 + x + 1$

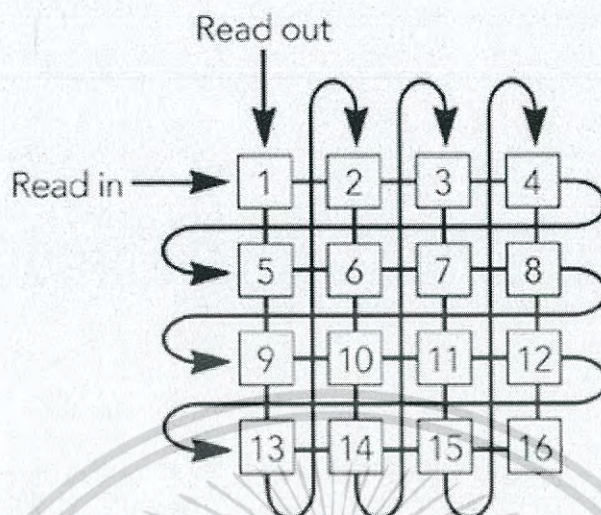
โดยกำหนดให้ n เป็นจำนวนบิตที่ใช้สำหรับการเข้ารหัส และ k เป็นจำนวนบิต 0 ที่เพิ่มเข้ามานอกเหนือจากบิตข้อมูล เพื่อให้ครบจำนวนบิตที่กำหนดสำหรับการเข้ารหัส ในบล็อกสุดท้ายของการเข้ารหัส บิตข้อมูลอาจมีความยาวที่ไม่พอดีกับขนาดบิตข้อมูลที่ต้องใช้จริง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใส่บิตข้อมูลที่เหลืออยู่ทั้งหมดแล้วต่อท้ายด้วย 0 เพื่อให้ครบจำนวนบิตข้อมูลที่กำหนด จากนั้นเข้ารหัสด้วย RS(n,k) เมื่อได้ผลลัพธ์จากการเข้ารหัสแล้วให้นำไปตัด 0 ที่เพิ่มเข้าไปก่อนการเข้ารหัสนี้ทิ้งแล้วจึงทำการส่งได้ และในภาครับต้องทำการเพิ่มบิต 0 ให้ครบจำนวนก่อนแล้วจึงทำการถอดรหัส

(n,k)	$g(x)$
(15,11)	$x^4 + \alpha^{13}x^3 + \alpha^6x^2 + \alpha^3x + \alpha^{10}$
(15,7)	$x^8 + \alpha^{14}x^7 + \alpha^2x^6 + \alpha^4x^5 + \alpha^2x^4 + \alpha^{13}x^3 + \alpha^5x^2 + \alpha^{11}x + \alpha^6$
(15,4)	$x^{11} + \alpha^9x^{10} + \alpha^8x^9 + \alpha^4x^8 + \alpha^9x^7 + \alpha^{13}x^6 + \alpha^4x^5 + \alpha^{12}x^4 + \alpha^4x^3 + \alpha^5x^2 + \alpha^3x + \alpha^6$
(15,2)	$x^{13} + \alpha^3x^{12} + \alpha^8x^{11} + \alpha^9x^{10} + \alpha^2x^9 + \alpha^4x^8 + \alpha^{14}x^7 + \alpha^6x^6 + \alpha^{10}x^5 + \alpha^7x^4 + \alpha^{13}x^3 + \alpha^{11}x^2 + \alpha^5x + \alpha$

รูปที่ 2.38 พหุนามสำหรับการเข้ารหัส [2]

2) Interleaving เป็นการป้องกันความผิดพลาดของข้อมูลที่ส่งไปบนช่องสัญญาณด้วยกระบวนการสลับบิตข้อมูลในภาคส่ง หากมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นบนช่องสัญญาณเป็นผลให้ข้อมูลเอ็กสาร์นบนเอ็กสาร์ทลงวินเวลาได้รับการเชิงานเพื่อารกษกชเ้าอนน เมื่อนุญเตใตเ้าเป็เซบระเซอชนชกนการค้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

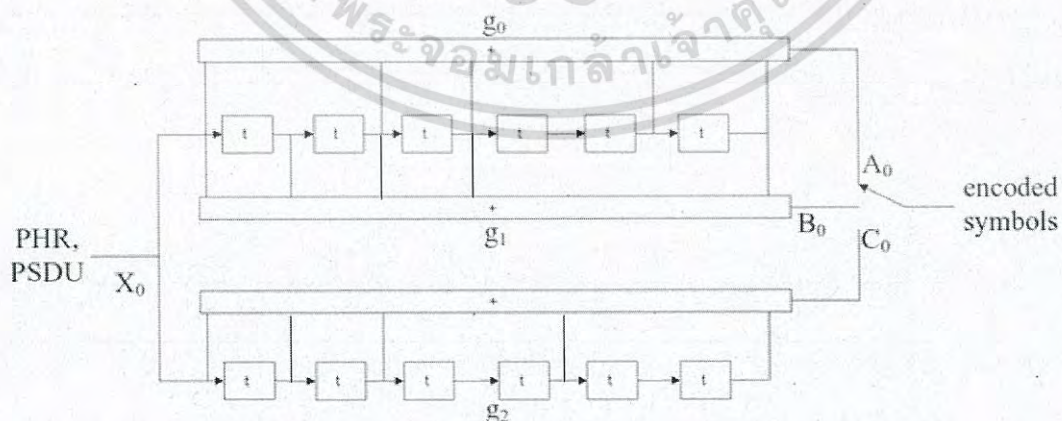
เดิมนั้นเสียหาย เมื่อทำการกระบวนการ De-Interleaving จะทำให้ภาครับสามารถคาดเดา (Prediction) ข้อมูลที่ถูกต้องได้



รูปที่ 2.39 ขั้นตอนการทำ Interleaving [2]

รูปที่ 2.39 แสดงขั้นตอนการ Interleaving โดยนำบิตข้อมูลมาเรียงต่อกันในลักษณะเป็นแถว และดึงข้อมูลไปใช้โดยดึงบิตในลักษณะคอลัมน์ และสำหรับการ De-Interleaving นั้นทำได้ด้วยการเรียงบิตข้อมูลกลับในลักษณะคอลัมน์แล้วดึงออกมาใช้งานโดยดึงบิตออกเรียงกันเป็นแถว ในมาตรฐานได้กำหนดความสูงของการ Interleaving ไว้เท่ากับ n ซึ่งเท่ากับความยาวของรหัส RS ส่วนอีกด้านนั้นไม่ได้ถูกจำกัดไว้ โดยให้ขึ้นอยู่กับขนาดของเฟรมข้อมูล

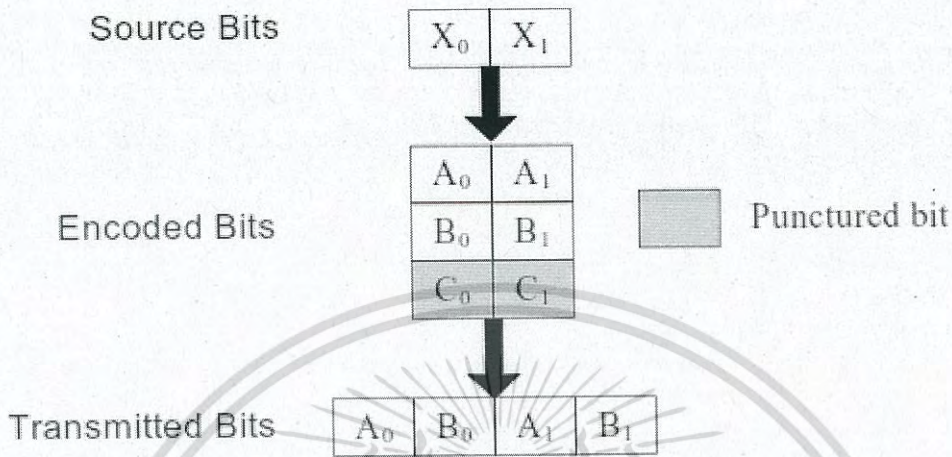
3) Convolution Code ในมาตรฐานนี้ใช้ Rate-1/3 Mother Convolutional Code เป็นหลักโดยมี Constraint Length เท่ากับ 7 ($K=7$) และมีพหุนามสำหรับการเข้ารหัสถอดรหัสอยู่ทั้งหมด 3 พหุนามคือ $G_0 = 133$ $G_1 = 171$ และ $G_2 = 165$ ดังแสดงในรูปที่ 2.40 โดยกำหนดให้ใส่บิต 0 ทั้งหมด 6 ตัวต่อท้ายบิตข้อมูลที่ต้องการเข้ารหัสเพื่อเป็นการจบขั้นตอนการเข้ารหัส



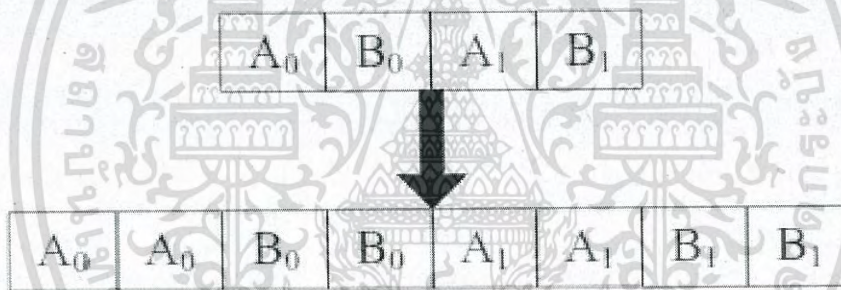
รูปที่ 2.40 Rate-1/3 Mother Convolutional Code ที่ Constraint Length เท่ากับ 7 [2]

ในมาตรฐานได้มีการนำ CC เข้ามาใช้หลาย Rate ด้วยกัน ซึ่งขั้นตอนในการเข้ารหัสและถอดรหัสมีความแตกต่างกันออกไปการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rate-1/4 Code ได้มาจากการตัดบิตผลลัพธ์ของ Rate-1/3 Code บางส่วนทิ้งไปให้
ได้เป็นผลลัพธ์ของ Rate-1/2 Code ดังแสดงในรูปที่ 2.41 จากนั้นนำมาเรียงต่อกันใหม่เพื่อให้ได้ผล
ลัพธ์ของ Rate-1/4 Code ดังรูปที่ 2.42

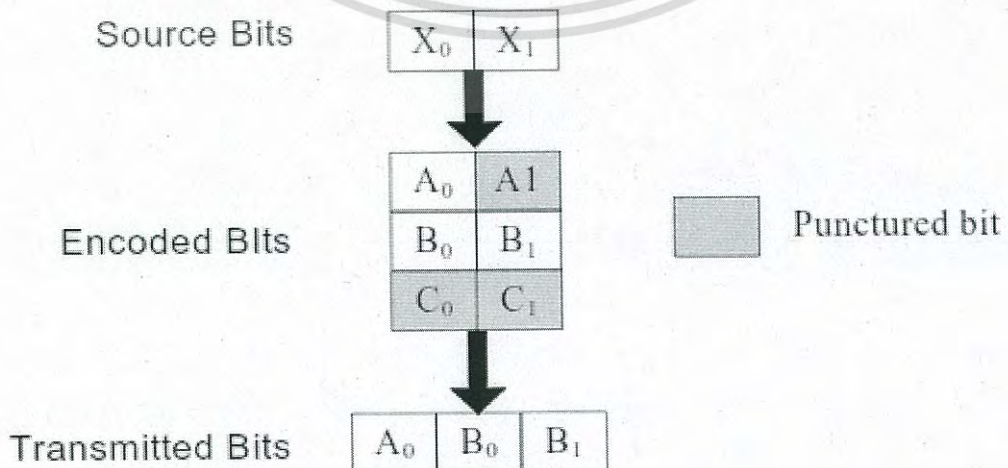


รูปที่ 2.41 ขั้นตอนการสร้างผลลัพธ์ของ Rate-1/2 Code จากผลลัพธ์ของ Rate-1/3 Code [2]



รูปที่ 2.42 ขั้นตอนการสร้างผลลัพธ์ของ Rate-1/4 Code จากผลลัพธ์ของ Rate-1/2 Code [2]

Rate-2/3 Code ได้มาจากการตัดบิตผลลัพธ์ของ Rate-1/3 Code บางส่วนทิ้งไปดัง
รูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 ขั้นตอนการสร้างผลลัพธ์ของ Rate-2/3 Code จากผลลัพธ์ของ Rate-1/3 Code [2]

4) RLL Encoder เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการเข้ารหัสในมาตรฐานนี้ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกันขึ้นอยู่กับเทคนิคการมอดูเลตที่เลือกใช้ เช่น จะเป็นการทำ Manchester Encoding สำหรับการมอดูเลตแบบ OOK เพื่อความสมดุลของไฟกระแสดตรง โดยการทำ Manchester Encoding นี้เป็นการขยายบิต 1 บิตให้เป็น 2 บิต ดังรูปที่ 2.44

bit	Manchester symbol
0	01
1	10

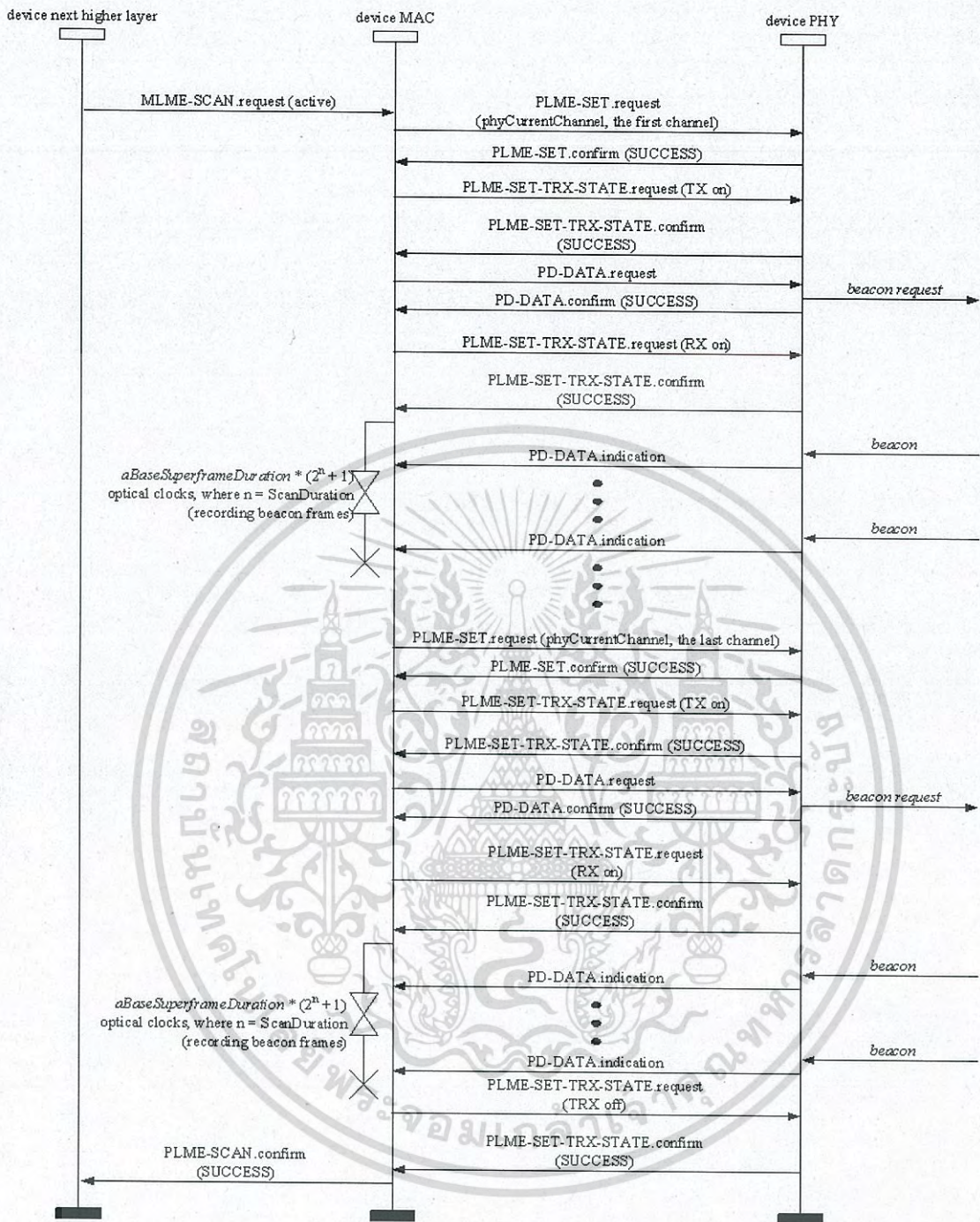
รูปที่ 2.44 การเข้ารหัสด้วยเทคนิค Manchester [2]

2.9.6 ลำดับการสื่อสารระหว่าง PHY และ MAC Layer

บทย่อนี้แสดงลำดับการทำงานหลักระหว่าง PHY และ MAC Layer ที่ไม่เกี่ยวข้องกับข้อกำหนดเวลาในการสื่อสาร โดยขั้นตอนการทำแอดที่ฟสแกนและพาสซีฟสแกนที่ใช้สำหรับการหาอุปกรณ์ในบริเวณที่สัญญาณรับส่งถึงแสดงในรูปที่ 2.45 และรูปที่ 2.46 ตามลำดับ

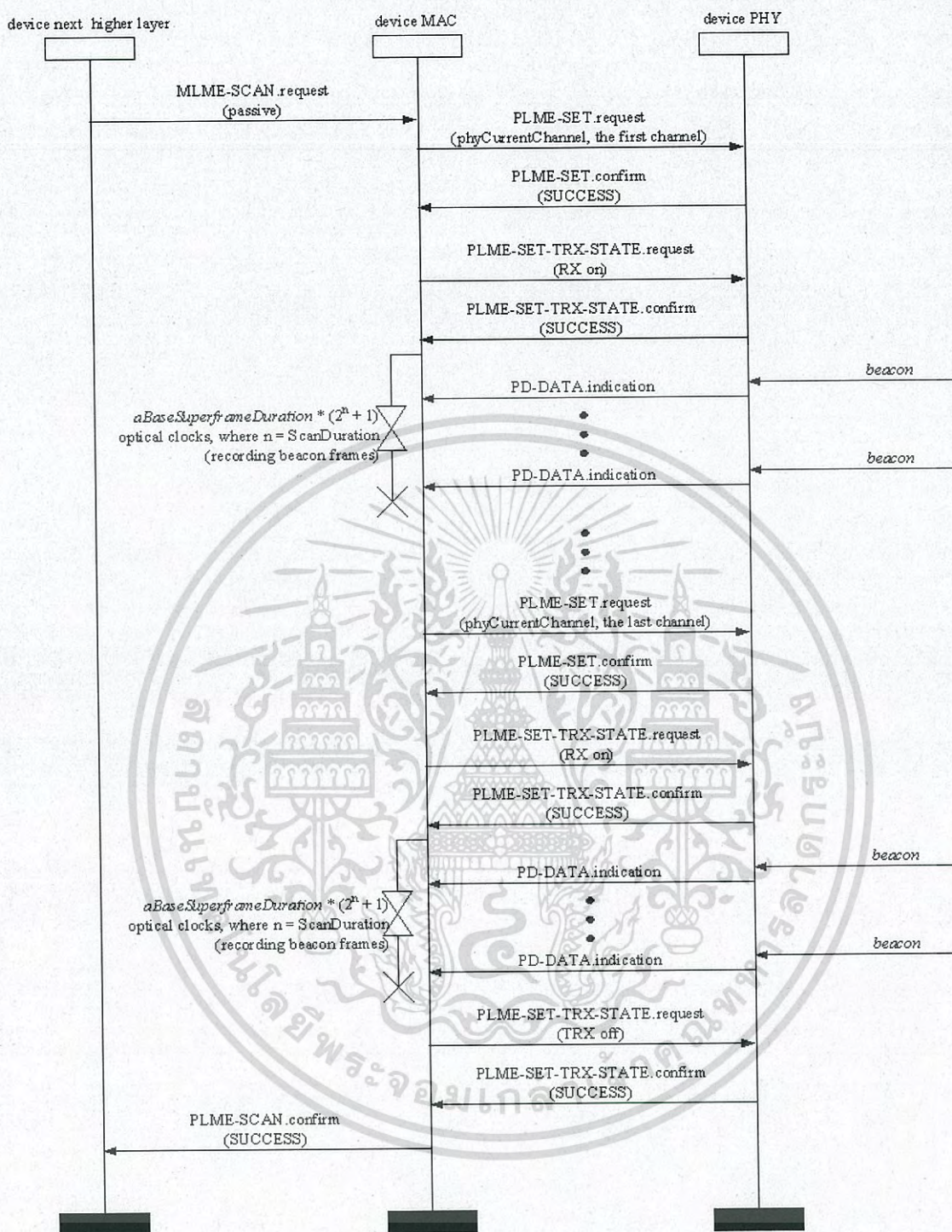
ขั้นตอนสำหรับอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ในการสร้าง VPAN แสดงในรูปที่ 2.47 ภายหลังจากการสร้าง VPAN แล้ว โคออดิเนเตอร์จะอนุญาตให้มีการเชื่อมต่อของอุปกรณ์เข้ามาภายในเครือข่าย ขั้นตอนร้องขอการเชื่อมโยงเครือข่ายของอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 2.48 และขั้นตอนตอบรับการร้องขอการเชื่อมโยงเครือข่ายของอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์แสดงอยู่ในรูปที่ 2.49

สุดท้าย สำหรับขั้นตอนของการส่งและรับข้อมูลระหว่างภาคส่งและภาครับ ขั้นตอนการส่งข้อมูลของภาคส่งแสดงในรูปที่ 2.50 และขั้นตอนการรับข้อมูลของภาครับแสดงในรูปที่ 2.51



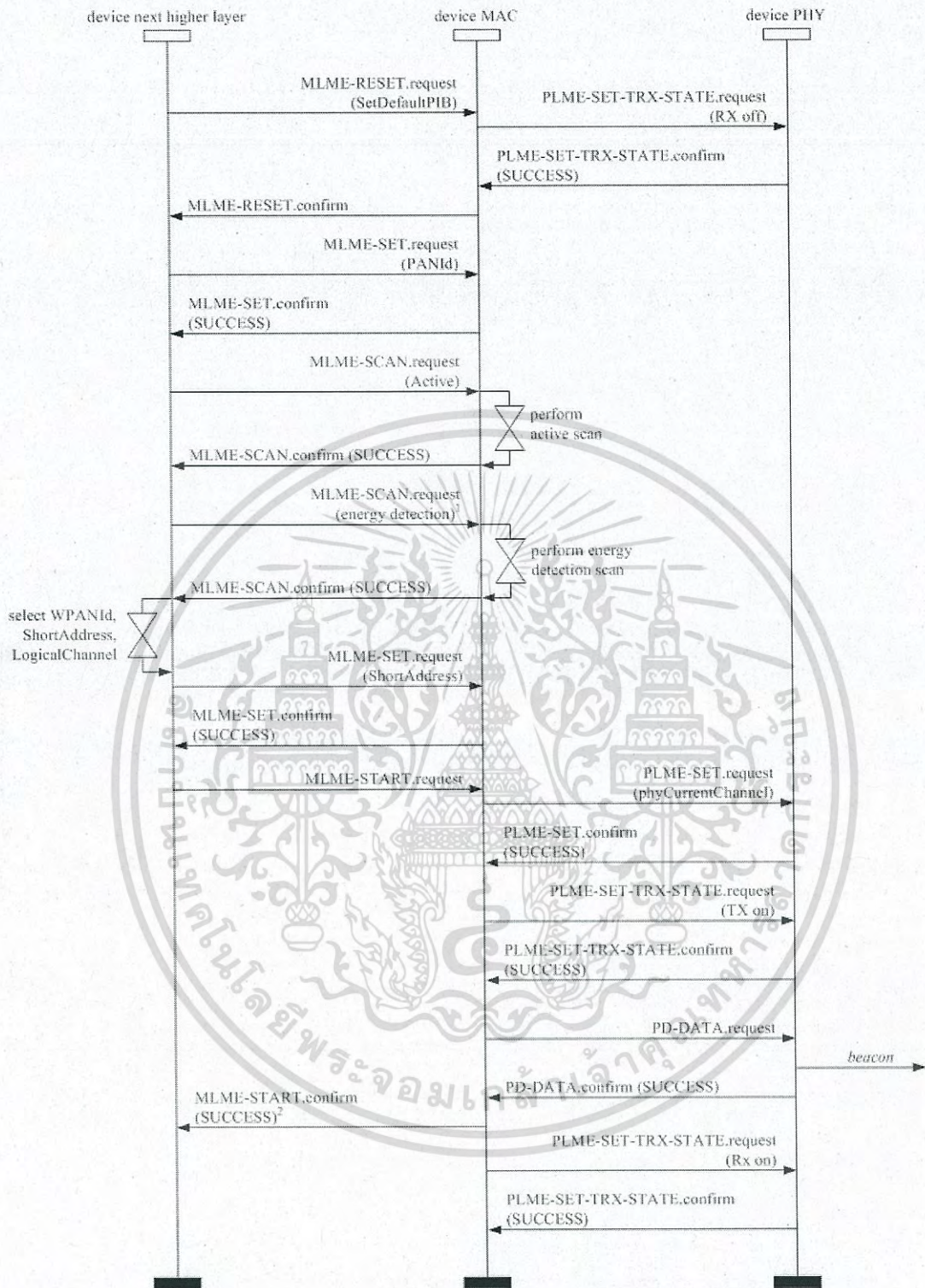
รูปที่ 2.45 ขั้นตอนการทำแอดทีฟสแกน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



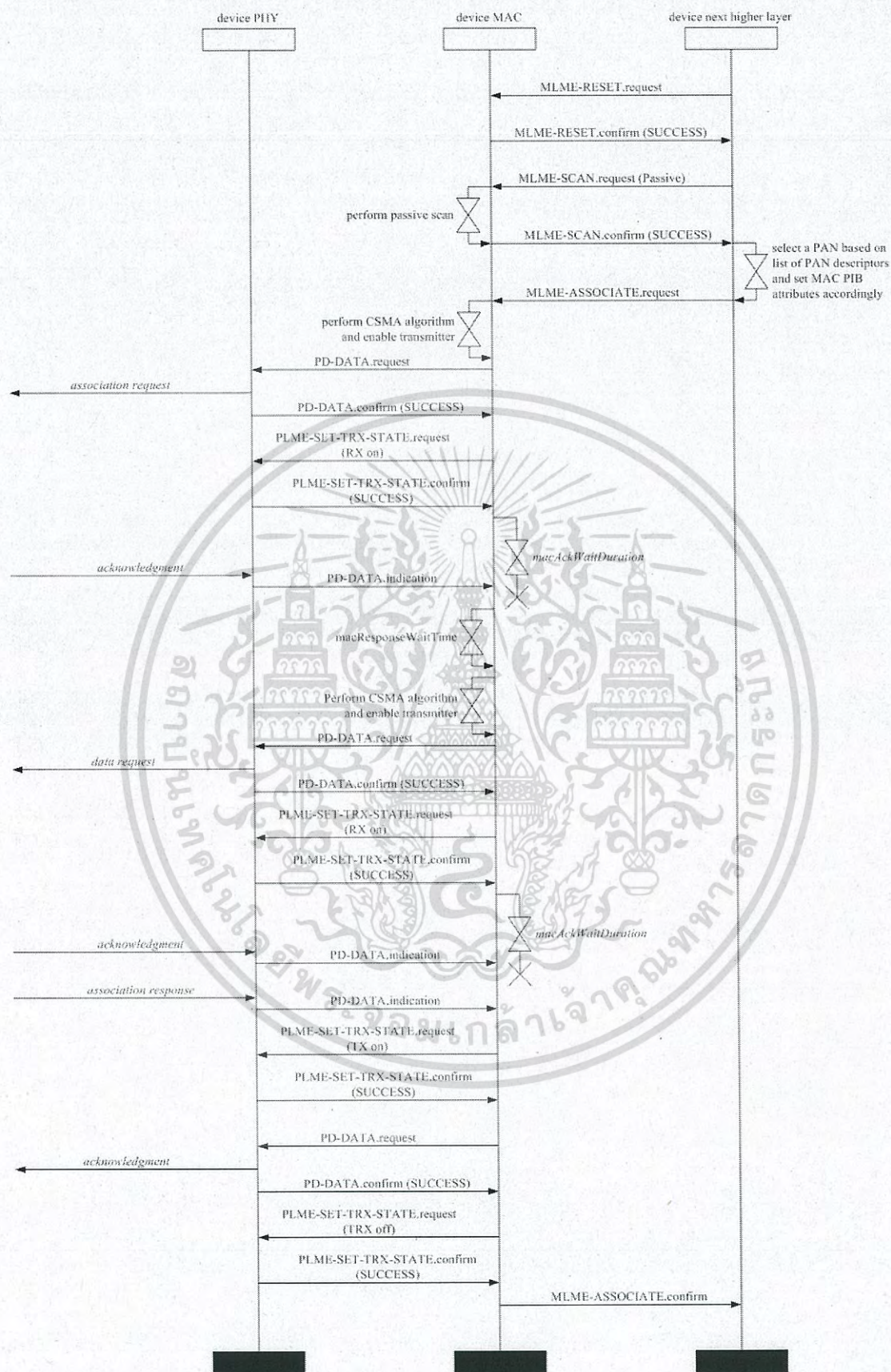
รูปที่ 2.46 ขั้นตอนการทำพาสซีฟสแกน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



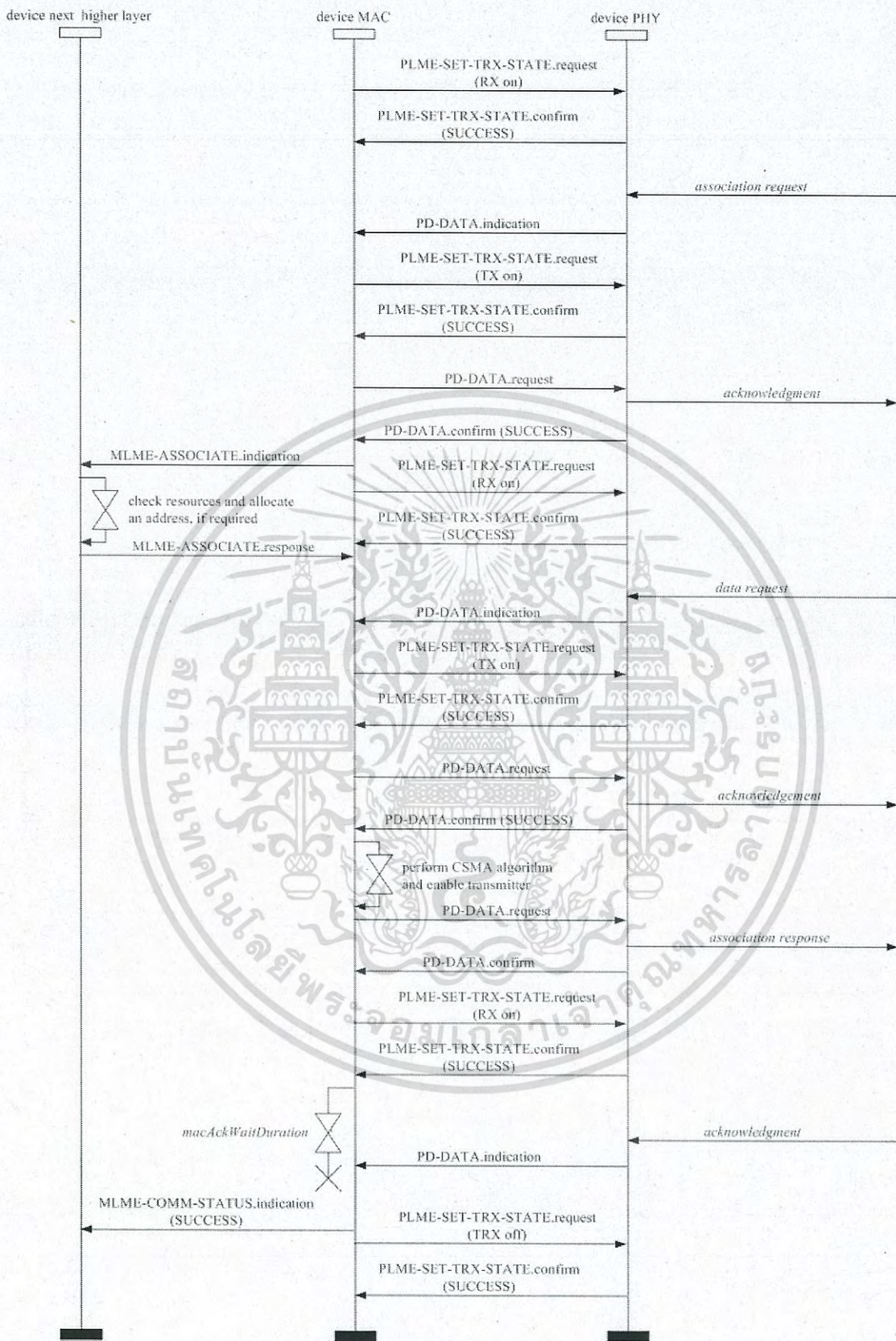
รูปที่ 2.47 การสร้าง WPAN ของอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



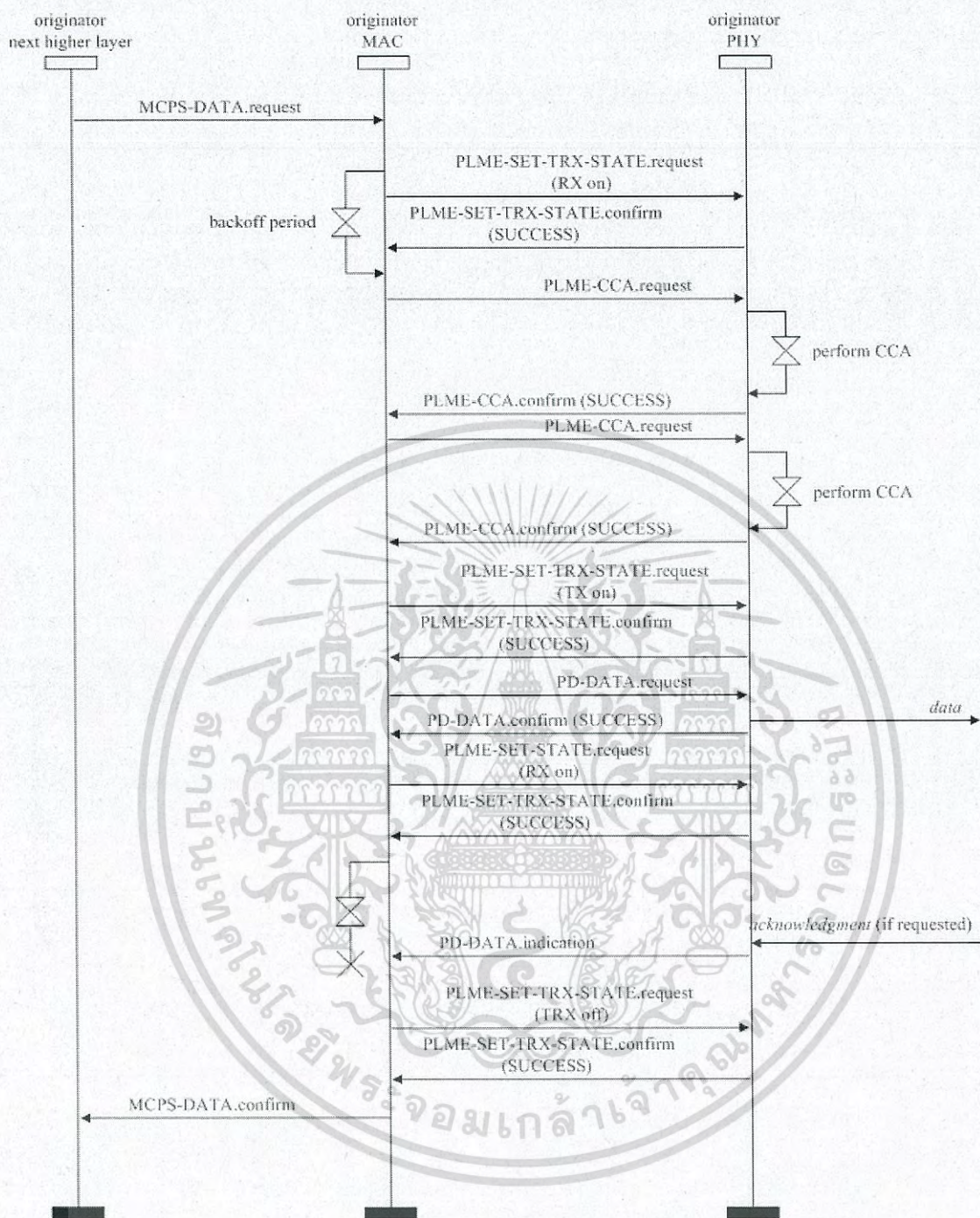
รูปที่ 2.48 ขั้นตอนร้องขอการเชื่อมโยงเครือข่ายของอุปกรณ์ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



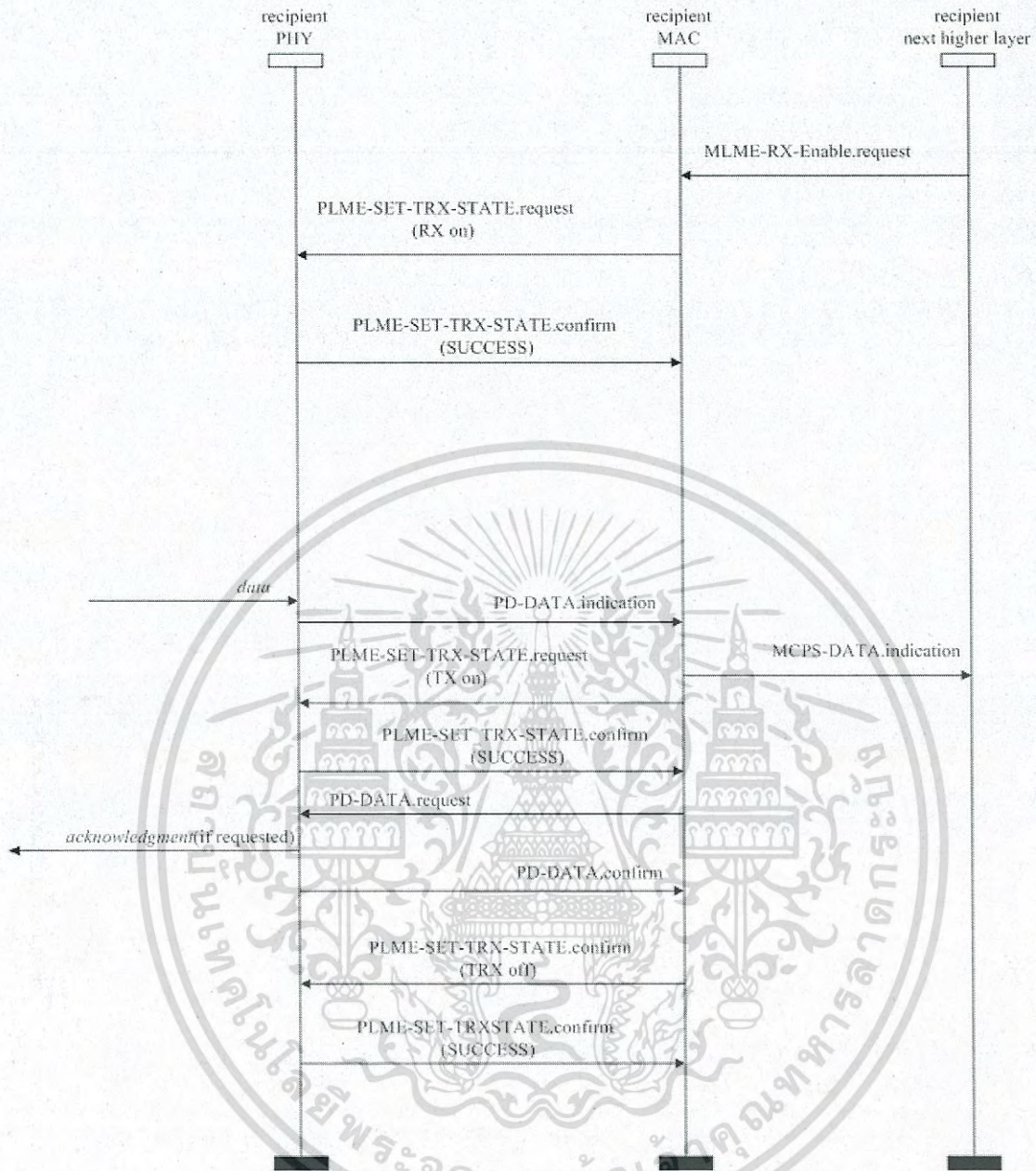
รูปที่ 2.49 ขั้นตอนตอบรับการร้องขอการเชื่อมโยงเครือข่ายของอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.50 ขั้นตอนการส่งข้อมูลของภาคส่ง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.51 ขั้นตอนการรับข้อมูลของภาครับ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

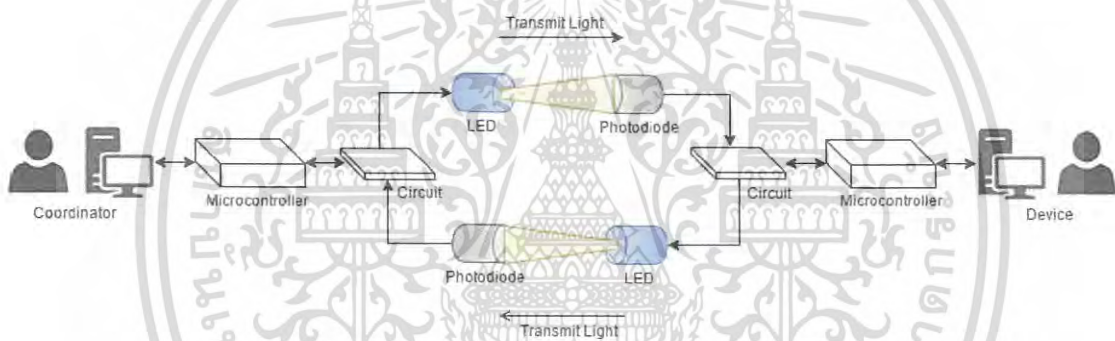
บทที่ 3

การออกแบบระบบ

3.1 บทนำ

ในหัวข้อการออกแบบระบบนี้ได้กล่าวถึงโครงสร้างการทำงานของระบบในภาพรวม รวมทั้งรายละเอียดแต่ละส่วนของระบบที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลักคือส่วนของฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ ในส่วนของฮาร์ดแวร์ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรของทั้งภาคส่งและภาครับ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตการออกแบบและพัฒนาระบบเพื่อให้สามารถรองรับกับมาตรฐาน IEEE 802.15.7 PHY I ที่ครอบคลุมความเร็วในการสื่อสารตั้งแต่ 11.67 kbps จนถึง 100 kbps

3.2 โครงสร้างการทำงานของระบบในภาพรวม



รูปที่ 3.1 โครงสร้างการทำงานของระบบในภาพรวม

รูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมของระบบที่มีการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Peer-to-Peer ซึ่งเป็นการคุยกันระหว่างอุปกรณ์สองตัว ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่ามีอุปกรณ์ตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นโคออดิเนเตอร์ เนื่องจากมาตรฐานกำหนดให้ในเครือข่าย ไม่ว่าจะเป็นแบบ Peer-to-Peer Star หรือ Broadcast จะต้องมึอุปกรณ์หนึ่งตัวทำหน้าที่เป็นโคออดิเนเตอร์ โดยอุปกรณ์ตัวแรกที่เริ่มต้นการสร้างเครือข่ายจะถือว่าเป็นอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ และจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์หลักของเครือข่าย สามารถเชื่อมโยงกับอุปกรณ์ลูกข่ายได้ตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป ภายในระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.7 มีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

ส่วนของซอฟต์แวร์หลัก ซึ่งจะทำงานอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล และติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานและฮาร์ดแวร์ โดยซอฟต์แวร์หลักนี้จะส่งคำสั่งควบคุมอุปกรณ์ผ่านทางพอร์ตอนุกรมมายังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และหลังจากนั้นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการประมวลผลและควบคุมอุปกรณ์การรับส่งแสงตามคำสั่งที่ได้รับ

ส่วนของภาคส่ง หากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับคำสั่งให้ทำการส่งข้อมูล ข้อมูลที่ได้รับมาจะถูกมอดูเลตด้วยเทคนิคการมอดูเลตแบบ OOK และจะถูกส่งผ่านวงจรไปยังหลอด LED เพื่อทำการส่งข้อมูลผ่านแสง

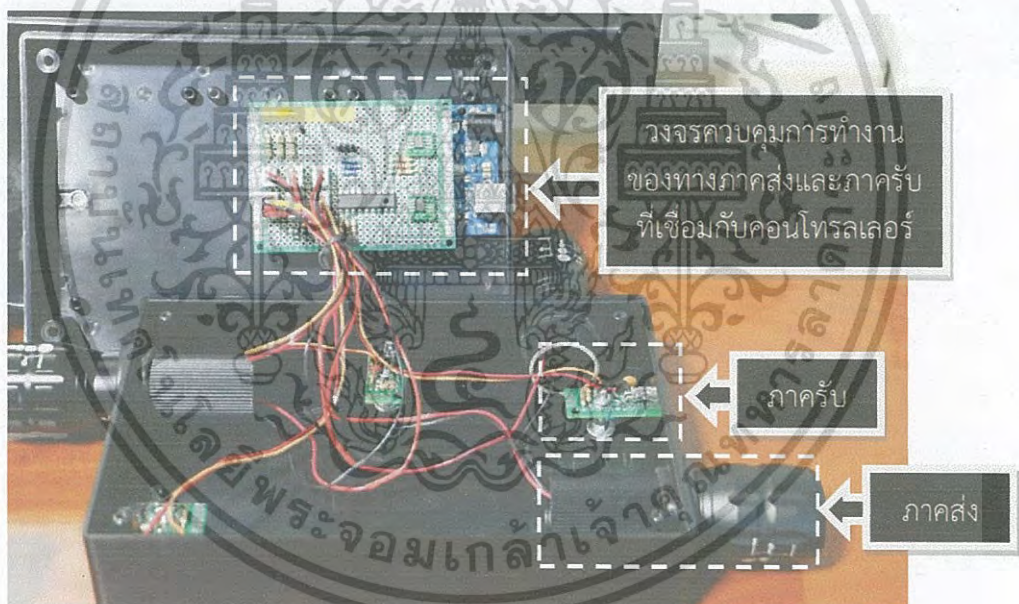
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของภาครับ เมื่อโฟโตไดโอดได้รับสัญญาณแสง สัญญาณแสงที่ได้รับจะถูกส่งผ่านวงจร เพื่อให้ได้สัญญาณแสงที่ถูกต้องที่สุด โดยมีปลายทางอยู่ที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะทำหน้าที่ในการตีความและสัญญาณแสงที่ได้รับให้อยู่ในรูปของบิตข้อมูล บิตข้อมูลนี้จะถูกส่งให้ซอฟต์แวร์หลักเพื่อทำการประมวลผล และแสดงผลให้กับผู้ใช้งาน

3.3 ฮาร์ดแวร์

ส่วนฮาร์ดแวร์ของงานวิจัยนี้ได้พัฒนามาจากงาน [7] ซึ่งมีความเร็วในการสื่อสารจำกัด และไม่สามารถรับแสงในทิศทางตรงที่แหล่งกำเนิดแสงทำมุม 90 องศากับตัวรับแสงได้ เพื่อให้อุปกรณ์ของทั้งภาคส่งและภาครับมีความสามารถรองรับกับมาตรฐานในรูปแบบ PHY I ได้ อุปกรณ์จำเป็นจะต้องมีความสามารถในการส่งและรับข้อมูลแสงที่มีความไวสูงสุดถึง 100 kbps โดยการออกแบบฮาร์ดแวร์ได้กำหนดขอบเขตของการออกแบบให้สามารถส่งและรับข้อมูลแสงที่มีความไวสูงสุดเท่ากับ 200 kbps

รูปที่ 3.2 แสดงการเชื่อมต่อภายในของอุปกรณ์รับส่งข้อมูลผ่านแสง (VLC Transceiver) โดยประกอบด้วยส่วนของวงจรภาคส่ง และวงจรภาครับที่เชื่อมต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมการทำงานของฮาร์ดแวร์ทั้งหมด



รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อภายในของอุปกรณ์รับส่งข้อมูลผ่านแสง

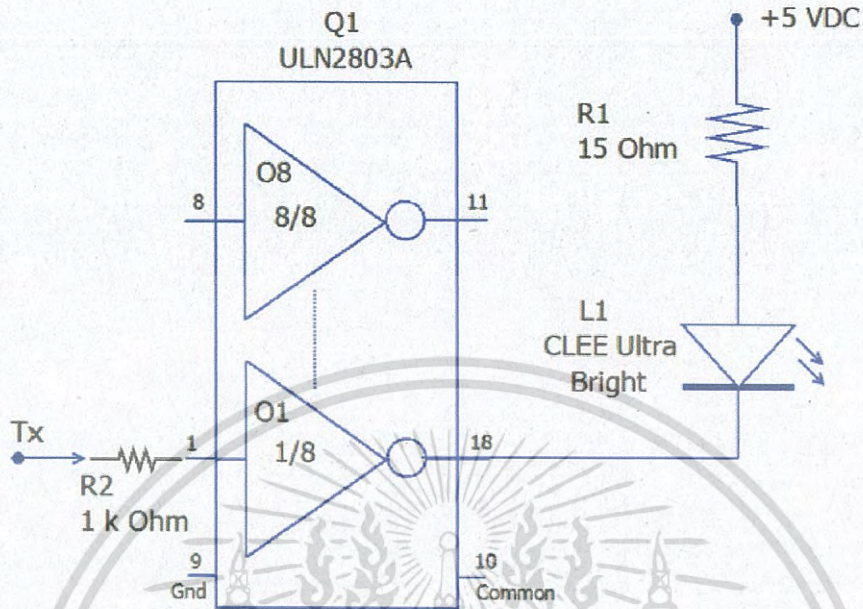
3.3.1 ภาคส่ง

รูปที่ 3.3 แสดงวงจรภาคส่ง โดยมีส่วนประกอบสำคัญคือ หลอด LED CLEE Ultra Bright และไอซี เบอร์ ULN2803A

เนื่องจากอุปกรณ์หลักสำหรับการส่งข้อมูลด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ต้องรองรับการส่งข้อมูลได้เร็วถึง 100 kHz จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีคุณสมบัติในการติดดับได้ไม่น้อยกว่าหนึ่งแสนครั้งต่อวินาที ดังนั้นจึงเลือกใช้หลอด LED CLEE Ultra Bright ซึ่งมีความสามารถดังกล่าวและให้แสงสว่างที่สูงกว่าหลอดปกติทั่วไป ควบคู่กับการใช้เลนส์นูนซึ่งทำหน้าที่ในการรวมแสง เพื่อให้แสงมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข็มพอยเพียงสำหรับภาครับแสง ทำให้ระยะทางการรับส่งแสงเพิ่มขึ้น รูปที่ 3.4 แสดงหลอด LED และเลนส์นูน



รูปที่ 3.3 วงจรภาคส่ง



รูปที่ 3.4 หลอด LED และเลนส์นูน [22]

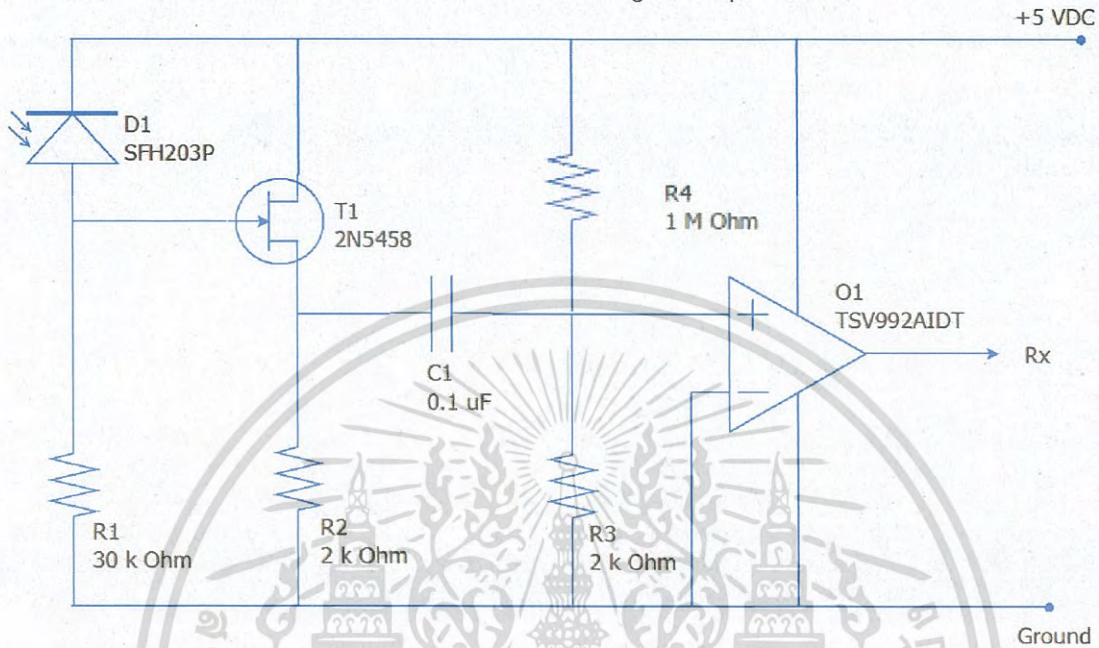
ไอซี เบอร์ ULN2803A ทำหน้าที่ในการขับกระแส เพื่อให้ได้กระแสขนาด 133 มิลลิแอมป์ จ่ายให้กับหลอด LED โดยจากการคำนวณตามสมการที่ 3.1 หลอด LED ใช้กำลังไฟ 400 มิลลิวัตต์ สำหรับส่งข้อมูลลอจิก 1

$$P = \frac{V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{3}{133 \times 10^{-3}} = 400 \text{ mW} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

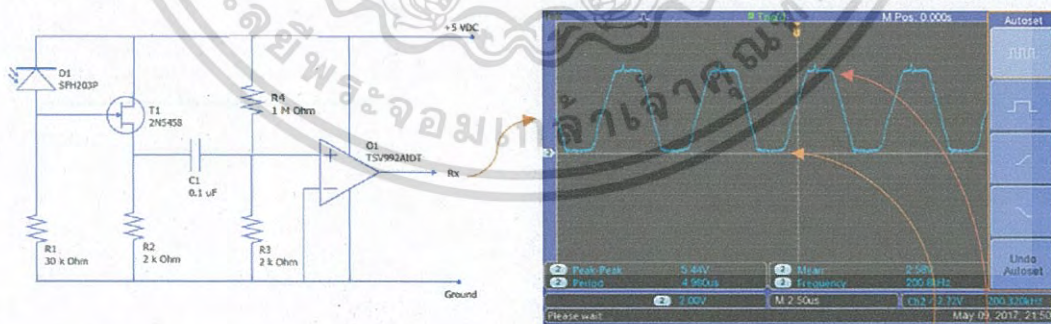
3.3.2 ภาครับ

รูปที่ 3.5 แสดงวงจรภาครับ ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน คือ ตัวรับแสง ชุดขยายสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Amplifier) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) และ ออปแอมป์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator)



รูปที่ 3.5 วงจรภาครับ

ในสภาวะที่ได้รับแสงและไม่ได้รับแสง วงจรจะมีการทำงานที่แตกต่างกัน รูปที่ 3.6 แสดงแรงดันที่ตกคร่อม R1 และ R2 ที่วัดได้ในสภาวะที่ได้รับแสงและไม่ได้รับแสง เมื่อตัวรับแสงได้รับสัญญาณแสงที่มีความถี่เท่ากับ 200 kHz



สภาวะการรับแสง	แรงดันคร่อม R1	แรงดันคร่อม R2	Logic
ไม่ได้รับแสง	2.0 mV	1.202 V	Logic "0"
ได้รับแสง	6.64 mV	1.256 V	Logic "1"

รูปที่ 3.6 แรงดันที่ตกคร่อม R1 และ R2 ในสภาวะที่ได้รับแสงและไม่ได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวรับแสง เลือกใช้โฟโตไดโอด เบอร์ SFH203P ซึ่งตอบสนองแสงย่าน 400 nm – 1100 nm และมีคุณสมบัติเป็น Short Switching Time Photodiode รองรับการติดตั้งของแสงได้สูงถึง 18 ล้านครั้งต่อวินาที เนื่องจากมีคุณสมบัติของเวลาเคลื่อนขึ้น (tr) และ เวลาเคลื่อนลง (tf) เท่ากับ 55 ns ที่แรงดัน 20 โวลต์ และสามารถรับแสงในทิศทางตรงที่ทำมุม 90 องศา กับตัวโฟโตไดโอดได้ โดยเป็นการแก้ไขข้อจำกัดของโฟโตไดโอด เบอร์ TSL12SM-LF ที่ใช้ในระบบก่อนหน้า [7] ซึ่งไม่สามารถทำได้ กระแสที่ไหลผ่านโฟโตไดโอดซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่าน R1 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 ซึ่งคำนวณได้ค่าของกระแสไฟที่ไหลผ่านโฟโตไดโอดเท่ากับ 2.21×10^{-6} แอมป์ โดยในวงจรมีแรงดันตกคร่อม R1 เท่ากับ 2 มิลลิโวลต์ ในสภาวะที่ไม่ได้รับแสง และเท่ากับ 66.4 มิลลิโวลต์ ในสภาวะที่ได้รับแสง

$$I_{R1} = \frac{V_{R1}}{R1} = \frac{66.4 \times 10^{-3}}{30 \times 10^3} = 2.21 \times 10^{-6} \text{ A} \quad (3.2)$$

ชุดขยายสัญญาณขนาดเล็ก ใช้ Junction gate Field Effect Transistor (JFET) N-Channel Transistor เบอร์ 2N5458 ทำหน้าที่ High Input Impedance Amplifier ขยายสัญญาณขนาดเล็กที่ได้จากโฟโตไดโอด เหตุผลที่จำเป็นต้องเพิ่ม JFET เนื่องจากกระแสที่ได้จากโฟโตไดโอดมีปริมาณน้อยมาก ไม่สามารถจ่ายให้กับออปแอมป์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบแรงดันได้ หลังจากเพิ่ม JFET นี้เข้าไปพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณกระแสที่ R2 มีปริมาณมากกว่ากระแสที่ R1 อยู่ 284 เท่า จึงเพียงพอสำหรับป้อนให้เป็นอินพุตของออปแอมป์ โดยคำนวณจากแรงดันที่ตกคร่อม R2 ซึ่งเท่ากับ 1.202 โวลต์ ในสภาวะที่ไม่ได้รับแสง และเท่ากับ 1.256 โวลต์ ในสภาวะที่ได้รับแสง ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านจึงเท่ากับ 0.628×10^{-3} แอมป์ ดังแสดงในสมการที่ 3.3

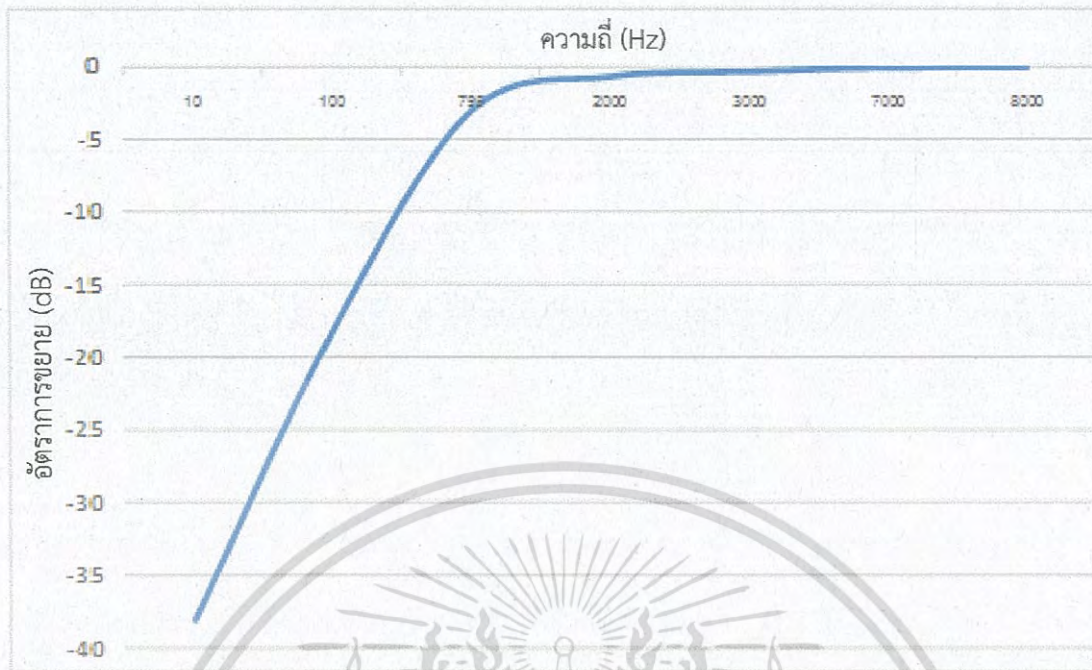
$$I_{R2} = \frac{V_{R2}}{R2} = \frac{1.256}{2 \times 10^3} = 0.628 \times 10^{-3} \text{ A} \quad (3.3)$$

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน ประกอบด้วย C1(0.1μF) และ R3(2kΩ) ต่อกันแบบ First Order วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 1 นี้มีความถี่ตัดผ่านเท่ากับ 795 Hz สมการที่ 3.4 แสดงการคำนวณหาค่าความถี่ตัดผ่านของวงจร และสมการที่ 3.5 แสดงการคำนวณหาค่าความเคลื่อนเฟส (Phase Shift) ของวงจรโดยใช้อุปกรณ์ตามวงจร C1 = 0.1μF, R3 = 2kΩ ที่ความถี่ 200 kHz

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times 2 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 795 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{1}{2\pi \times 200 \times 10^3 \times 2 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 0.23^\circ \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กราฟระหว่างความถี่ในหน่วยเฮิรตซ์ และอัตราการขยายในหน่วยเดซิเบล

รูปที่ 3.7 แสดงกราฟระหว่างความถี่ในหน่วยเฮิรตซ์ และอัตราการขยายในหน่วยเดซิเบล ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าความถี่ตัดผ่าน ที่อัตราการขยายเท่ากับ -3 dB นั้นจะอยู่ที่ประมาณ 795 Hz

ออปแอมป์สำหรับเปรียบเทียบแรงดัน ใช้ออปแอมป์ เบอร์ TSV992AIDT แทนการใช้ออปแอมป์ เบอร์ MCP6402 ซึ่งมีค่า Slew Rate เท่ากับ $0.5 \mu\text{V}/\text{ps}$ สามารถขยายสัญญาณที่ความถี่สูงสุดได้เพียง 15.92 kbps ส่วนออปแอมป์ เบอร์ TSV992AIDT นั้นมีค่า Slew Rate เท่ากับ $10 \mu\text{V}/\text{ps}$ จึงสามารถขยายสัญญาณที่ความถี่สูงสุดได้ถึง 318.47 kbps โดย TSV992AIDT มีคุณสมบัติในการตอบสนองความถี่ได้สูงถึง 20MHz ต่อใช้งานแบบไม่ใช้ฟีดแบ็ค (Feedback) ถ้าแรงดันขาอินพุตบวก (V_{in}) มากกว่าแรงดันขาอินพุตลบ (V_{ref}) แรงดันด้านเอาต์พุต (V_{out}) จะเท่ากับ 5 โวลต์ และเพื่อให้ V_{out} เป็น 5 โวลต์ เพื่อแสดงสถานะลอจิกเป็น 1 ที่ขณะ Idle State จึงจำเป็นต้องต่อตัวต้านทาน $R4$ ($1\text{M}\Omega$) ทำหน้าที่แบ่งแรงดันให้ขาอินพุตบวก สมการที่ 3.6 แสดงการหาค่าแรงดันขาอินพุตบวก ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อม $R3$ โดยได้ผลลัพธ์เท่ากับ 10 มิลลิโวลต์

$$V_{in} = \frac{5 \times 2 \times 10^3}{1 \times 10^6 + 2 \times 10^3} \approx 10 \text{ mV} \quad (3.6)$$

เมื่อวงจรได้รับแสง ค่าแรงดัน V_{in} ลบค่าแรงดัน V_{ref} จะมีค่าเป็นบวก จึงทำให้ได้ V_{out} เท่ากับ 5 โวลต์ซึ่งมีสถานะลอจิกเป็น 1 และเมื่อวงจรไม่ได้รับแสง ค่าแรงดัน V_{in} ลบค่าแรงดัน V_{ref} จะมีค่าติดลบ ตามคุณสมบัติ RC Differentiator Circuit จึงทำให้ได้ V_{out} เป็น 0 โวลต์ ซึ่งมีสถานะลอจิกเป็น 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ซอฟต์แวร์

ภายในระบบประกอบด้วยส่วนของซอฟต์แวร์หลักและซอฟต์แวร์รอง โดยซอฟต์แวร์หลักถูกประมวลผลอยู่ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งติดต่อกับผู้ใช้งานโดยตรง และส่วนของซอฟต์แวร์รองจะถูกประมวลผลอยู่ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำหน้าที่ในการควบคุมฮาร์ดแวร์เป็นหลัก

3.4.1 ซอฟต์แวร์หลัก

ซอฟต์แวร์หลักจะมีหน้าต่างสำหรับติดต่อกับผู้ใช้งาน (UI) เพื่อให้ผู้ใช้งานควบคุมระบบการสื่อสาร และติดตามการทำงานของระบบ โดยสามารถแบ่งการแสดงผลออกเป็น 3 รูปแบบด้วยกัน ซึ่งแต่ละการแสดงผลของหน้าต่างเหมาะสมสำหรับรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่ายที่ต่างกัน โดยทุกหน้าต่างของ UI จะประกอบด้วยส่วนของการควบคุม Coordinator ทางด้านซ้าย และส่วนของการควบคุม Device ทางด้านขวา และมีสถานะของการทำงานแสดงผลอยู่ในกล่องข้อความด้านล่าง (Process Log)

หมายเลขเครือข่าย (VPAN ID) และหมายเลขเครื่อง (Short Address) ถูกกำหนดให้มีความยาวสูงสุด 4 ตัวอักษร โดยแต่ละตัวอักษรเป็นเลขตั้งแต่ 0 ถึง 9 ซึ่งจะถูกสร้างขึ้นโดยการสุ่มและไม่ให้ซ้ำกับที่มีอยู่เดิม สถานะของการทำงานในการส่งและการรับถูกแสดงด้วย Tx State และ Rx State ตามลำดับ โดยจะแสดงผลเป็น ON เมื่ออยู่ในขณะทำงาน และแสดงผลเป็น OFF เมื่ออยู่ในสภาวะไม่ทำงาน

ผู้ใช้งานสามารถเลือกไฟล์สำหรับการส่งได้ด้วยการกดปุ่ม Open และบันทึกข้อมูลที่ได้รับโดยกดปุ่ม Save โดยโปรแกรมได้กำหนดขนาดสูงสุดของข้อมูลที่สามารถส่งได้ไว้เท่ากับ 5 kb เนื่องจากเป็นการส่งข้อมูลในรูปแบบ Single Mode และทำการส่งบนข้อจำกัดของความจำของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

สำหรับการเริ่มต้นการใช้งานของโปรแกรม ผู้ใช้งานจะต้องเลือกพอร์ตที่ต้องการเชื่อมต่อความเร็วในการสื่อสาร รูปแบบของการเครือข่าย และรูปแบบของอุปกรณ์ภายในเครือข่ายที่ต้องการก่อนทำการเชื่อมต่อเข้ากับพอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งหากการเชื่อมต่อเสร็จสมบูรณ์ UI จะเปลี่ยนไปยังหน้าต่างของเครือข่ายที่ทำการเชื่อมต่อโดยอัตโนมัติ และจะสามารถควบคุมได้เฉพาะรูปแบบของอุปกรณ์ชนิดที่เลือกเท่านั้น

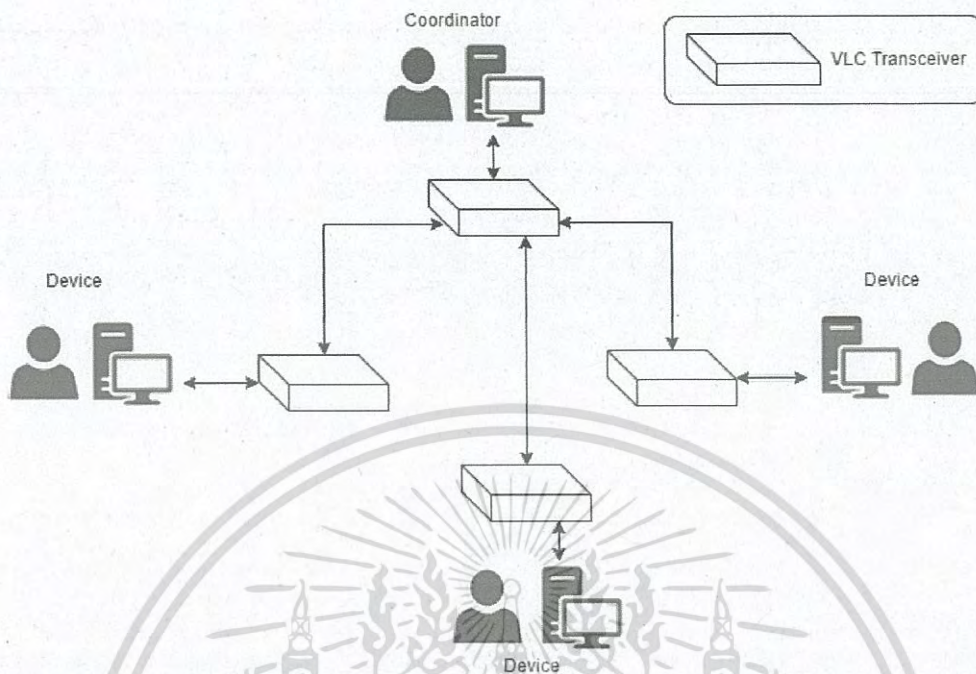
3.4.1.1 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Star

โครงสร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Star แสดงอยู่ในรูปที่ 3.8 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นโคออดิเนเตอร์ 1 ตัว และอีก 3 ตัวเป็นอุปกรณ์ลูกข่าย โดยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางการเชื่อมต่อ และเป็นผู้สร้างเครือข่าย VPAN

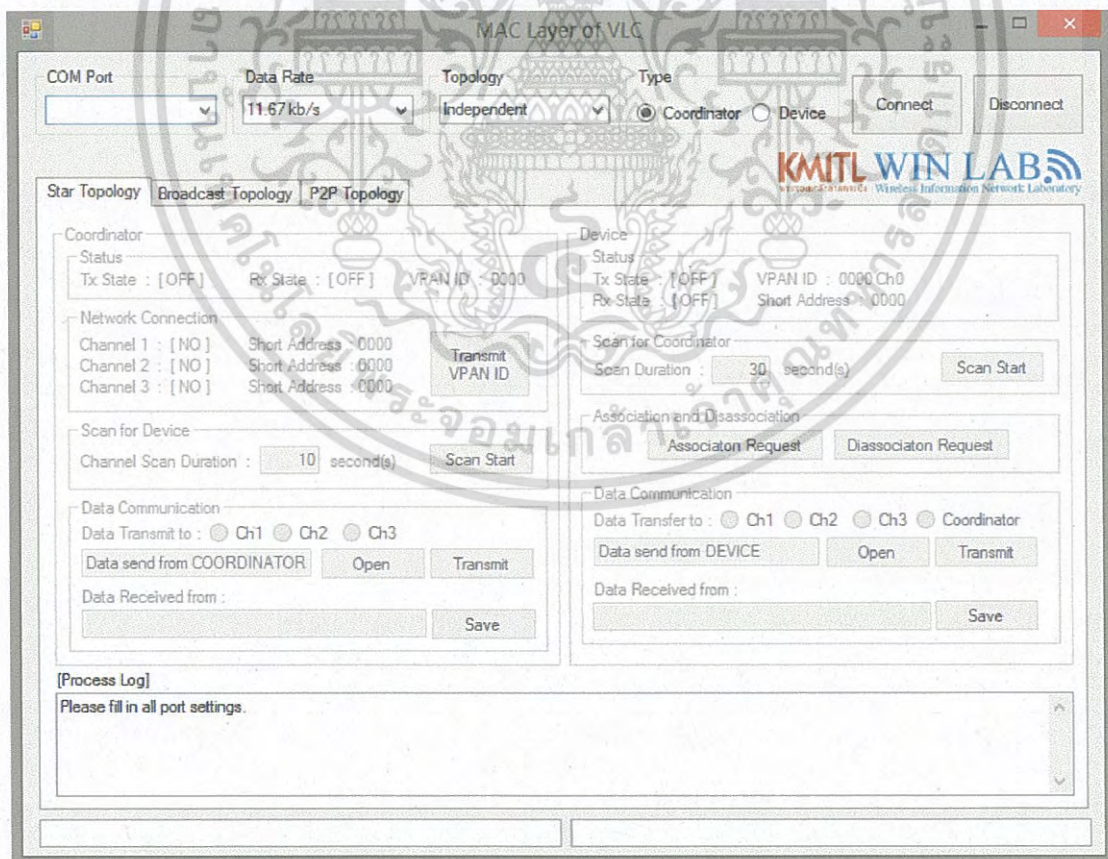
รูปที่ 3.9 แสดง UI ของการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Star ซึ่งเป็นแท็บ (Tab) หน้าต่างแรกๆ ที่แสดงเมื่อเปิดโปรแกรม และคงสถานะไม่เชื่อมต่อเข้ากับพอร์ตของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

Coordinator ประกอบด้วยส่วนของการแสดงสถานะของตัวอุปกรณ์ สถานะในการเชื่อมต่อของเครือข่าย การสแกนหาอุปกรณ์ในบริเวณที่สามารถทำการส่งรับข้อมูลแสงได้ และส่วนของการควบคุมการรับส่งข้อมูล จะเห็นได้ว่าส่วนของการแสดงสถานะในการเชื่อมต่อของเครือข่ายแสดงช่องทางการสื่อสารทั้งหมด 3 ช่องทางด้วยกัน โดยเหตุผลที่กำหนดให้มีช่องทางเพียง 3 ช่องทางเนื่องจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้มีพอร์ตสำหรับการเชื่อมต่อภายนอก 3 พอร์ตเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ส่วนบุคคล ห้ามการเผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์เผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่แจ้งการยินยอมจากผู้ต้นทาง ผู้เผยแพร่เนื้อหาเว็บไซต์และผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตจะรับผิดชอบต่อการใช้งานเอกสารนี้โดยไม่แจ้งการยินยอมจากผู้ต้นทาง



รูปที่ 3.8 โครงสร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Star



รูปที่ 3.9 UI ของการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Star

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเริ่มการเชื่อมต่อ โปรแกรมจะกำหนดค่า VPAN ID ของเครือข่ายขึ้นมา หากมีการกดปุ่ม Transmit VPAN ID โปรแกรมจะสแกนหาอุปกรณ์บริเวณใกล้เคียงที่ละช่องทางการสื่อสาร เริ่มตั้งแต่ช่องทางการสื่อสารที่ 1 ไปจนถึง 3 โดยใช้เวลาในการสแกนแต่ละช่องทางเป็นไปตามที่กำหนดในกล่องข้อความในหน่วยวินาที และหากพบอุปกรณ์ในบริเวณใกล้เคียง โปรแกรมจะกำหนด Short Address ให้กับอุปกรณ์ที่พบ และส่ง Address ที่ใช้ในเครือข่ายให้กับอุปกรณ์ ถือเป็นการจบการสร้าง VPAN

การสแกนหาอุปกรณ์ในบริเวณที่สามารถทำการส่งรับข้อมูลแสงได้นั้นมีขึ้นสำหรับส่งข้อมูลสำหรับการสแกนซ้ำๆ เพื่อให้อุปกรณ์บริเวณใกล้เคียงที่กำลังทำพาสซีฟสแกนได้รับ

สำหรับการสื่อสารรับส่งข้อมูล ผู้ใช้งานสามารถเลือกส่งข้อมูลไปยังพอร์ตที่มีสถานะการเชื่อมต่อเป็น YES ได้ โดยสามารถส่งได้ที่ละช่องทางการสื่อสาร และหากได้รับข้อมูล ชื่อช่องทางที่ได้รับ และข้อมูลจะถูกนำมาแสดงผล

Device ประกอบด้วยส่วนของการแสดงสถานะของตัวอุปกรณ์ สถานะในการเชื่อมต่อกับเครือข่าย การสแกนหาอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ในบริเวณที่สามารถทำการส่งรับข้อมูลแสงได้ ส่วนของการร้องขอการเชื่อมต่อและยกเลิกการเชื่อมต่อ และส่วนของการควบคุมการรับส่งข้อมูล

การสแกนหาอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ในบริเวณที่ใกล้เคียงนั้นเป็นการสแกนในลักษณะพาสซีฟสแกน หากพบเครือข่ายในบริเวณที่สามารถสื่อสารได้ โปรแกรมจะเก็บค่า VPAN ID ที่พบไว้สำหรับการร้องขอการเชื่อมต่อ

การร้องขอการเชื่อมต่อทำได้โดยส่งการร้องขอไปยังเครือข่ายตามเลข VPAN ID ที่มีอยู่ หากโคออดิเนเตอร์อนุญาตให้มีการเชื่อมต่อ จะมีการตอบรับและส่ง Short Address กลับมา โปรแกรมจะส่งการตกลงการเชื่อมต่อไปยังโคออดิเนเตอร์ ถือเป็นการเสร็จสิ้นการเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับเครือข่าย ส่วนการขอยกออกจากเครือข่ายนั้น โปรแกรมจะส่งคำร้องขอการออกจากเครือข่ายไปยังโคออดิเนเตอร์ และรอการตอบรับจากโคออดิเนเตอร์ เมื่อได้รับการตอบรับแล้วจะลบค่าการเชื่อมต่อและ Short Address ที่

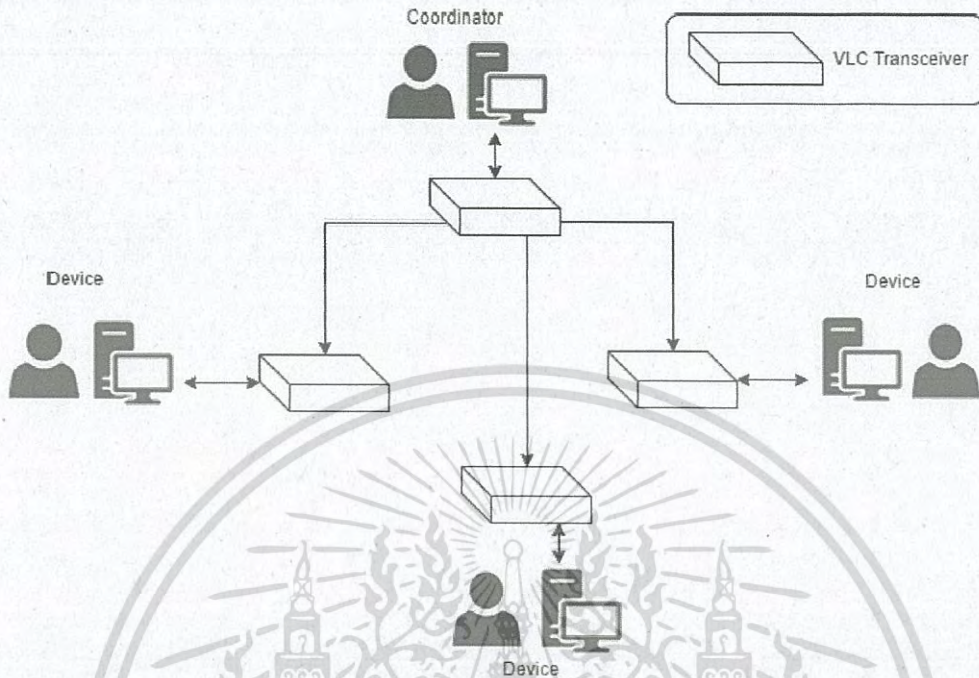
3.4.1.2 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Broadcast

โครงสร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Broadcast แสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Star โดยมีข้อแตกต่างในเรื่องของการสื่อสาร เนื่องจากการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Broadcast เป็นการสื่อสารทางเดียวของอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ โดยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะทำการส่งข้อมูลให้กับอุปกรณ์อื่นที่อยู่บริเวณใกล้เคียง และไม่มีการส่งการยืนยันการรับข้อมูลกลับจากอุปกรณ์บริเวณใกล้เคียงที่ได้รับข้อมูลจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ โดยตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 แล้วนั้น การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีการเชื่อมกันของอุปกรณ์ภายในเครือข่าย

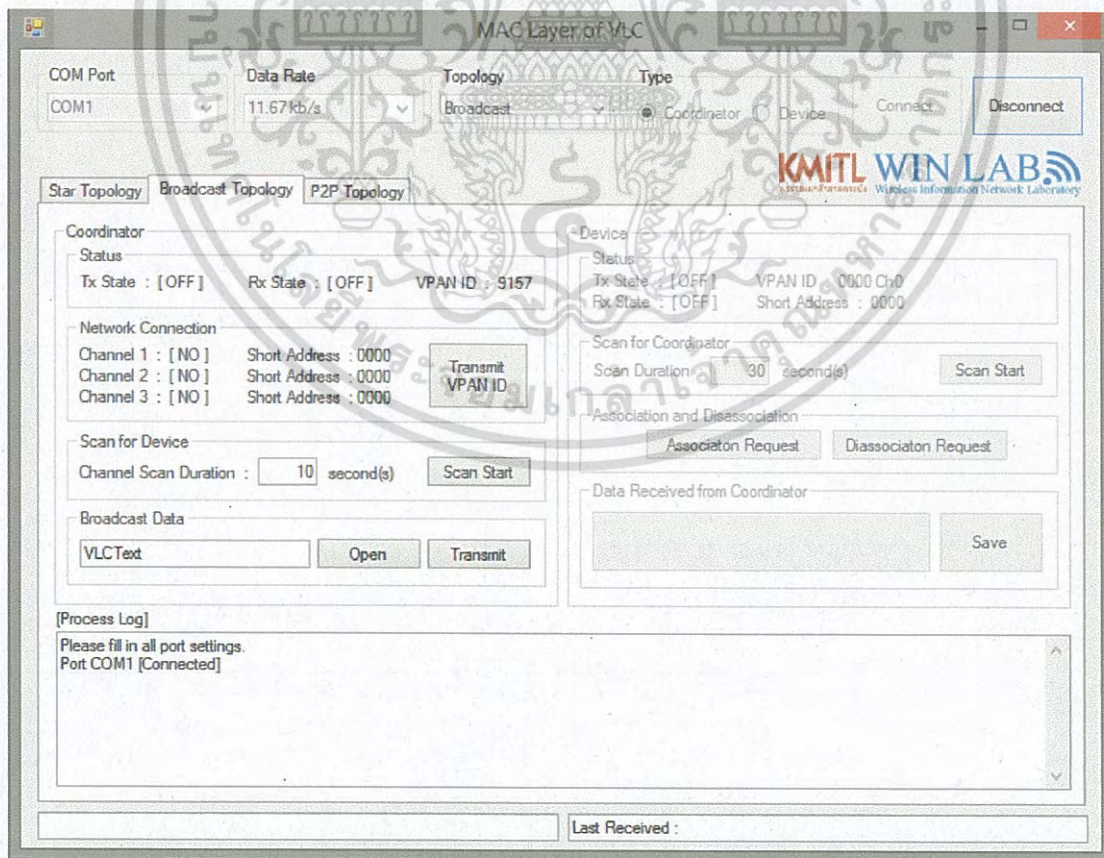
รูปที่ 3.11 แสดง UI ของการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Broadcast ซึ่งอยู่ในสถานะที่เชื่อมต่อกับพอร์ต COM1 กำหนดให้ความเร็วในการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 11.67 kbps และเป็นโคออดิเนเตอร์

จะสังเกตได้ว่าในส่วนของการรับส่งข้อมูลของอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์นั้นไม่ได้มีการเลือกช่องทางการส่ง และไม่มีส่วนสำหรับการรับข้อมูลเหมือนกับแบบ Star และในส่วนของอุปกรณ์ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมต่อแบบ Broadcast ก็สามารถทำการรับข้อมูลได้เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ได้



รูปที่ 3.10 โครงสร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Broadcast

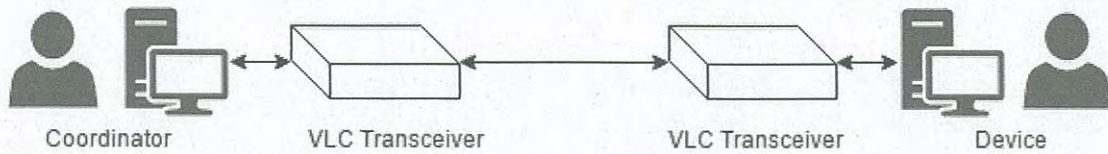


รูปที่ 3.11 UI ของการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Broadcast

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

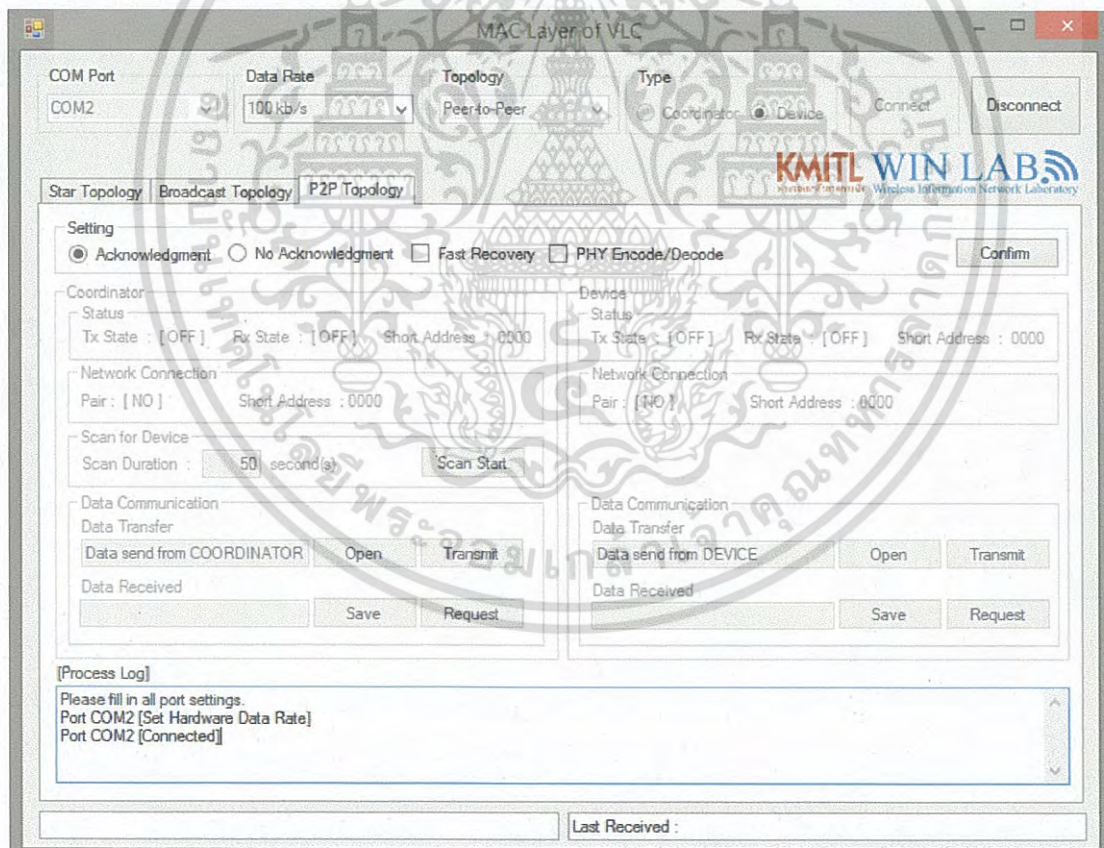
3.4.1.3 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Peer-to-Peer

โครงสร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Peer-to-Peer แสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์สองตัว โดยกำหนดให้อุปกรณ์ที่เริ่มการเชื่อมต่อก่อนเป็นอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์



รูปที่ 3.12 โครงสร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Peer-to-Peer

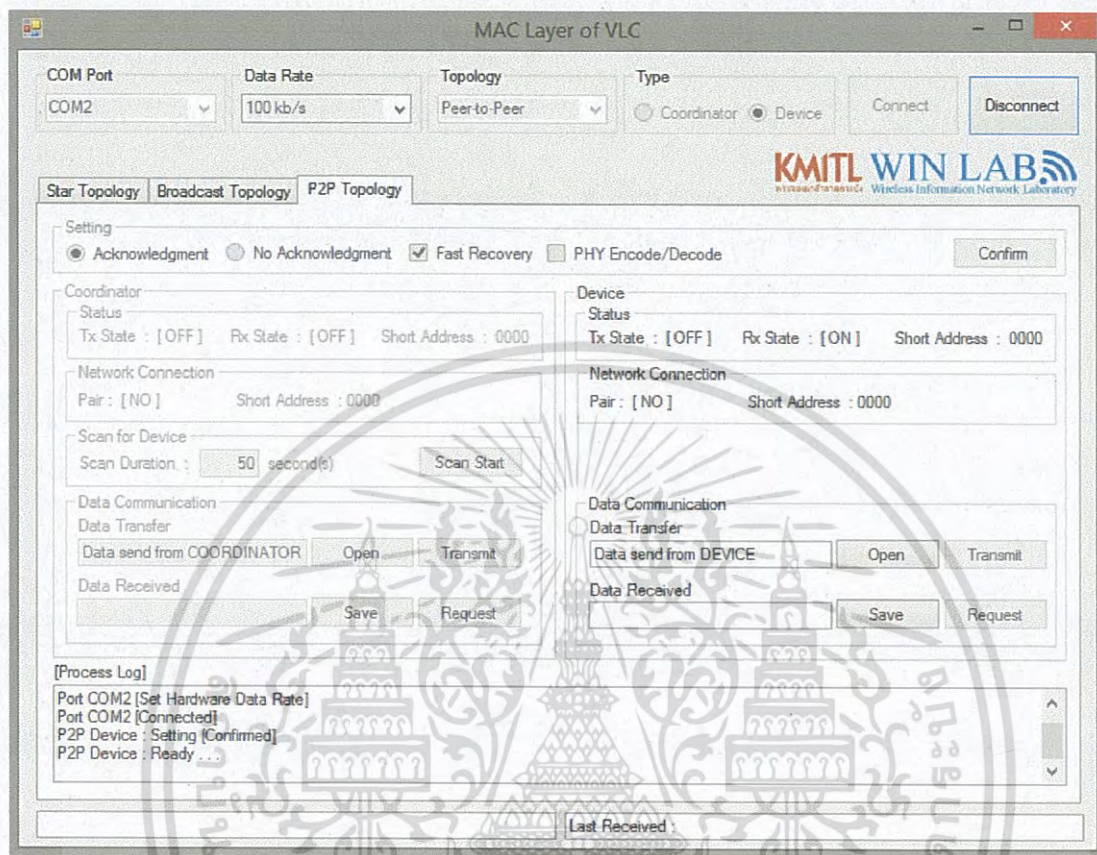
รูปที่ 3.13 แสดง UI ของการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Peer-to-Peer ซึ่งอยู่ในสถานะที่เชื่อมต่อกับพอร์ต COM1 กำหนดให้ความเร็วในการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 100 kbps และทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ธรรมดา



รูปที่ 3.13 UI ของการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Peer-to-Peer

ขั้นตอนแรกๆที่ผู้ใช้งานต้องทำเพื่อเริ่มการทำงานของหน้าต่าง Peer-to-Peer (P2P) คือ การตั้งค่าให้ตัวอุปกรณ์ โดยกำหนดให้อุปกรณ์มีการยืนยันการรับส่งข้อมูลหรือไม่ มีการกักตุนการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมต่ออย่างรวดเร็วหรือไม่ และมีเข้ารหัสลดทอนที่ส่งก่อนการรับส่งหรือไม่ โดยจะอนุญาตให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ได้ก็ต่อเมื่อตั้งค่าของอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 UI ของการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Peer-to-Peer หลังการตั้งค่าอุปกรณ์

หากกำหนดให้อุปกรณ์มีการยืนยันการรับส่งของข้อมูล เมื่ออุปกรณ์ทำการส่งข้อมูล จะมีการรอรับเฟรมของการยืนยันในเวลาที่กำหนดไว้ในกล่องข้อความในหน่วยวินาที หากได้รับเฟรมยืนยันก่อนสิ้นสุดเวลาที่กำหนดไว้ สถานะของการส่งที่สมบูรณ์จะถูกแสดงในกล่อง Process Log และหากไม่ได้รับเฟรมยืนยันภายในเวลาที่กำหนด สถานะของการส่งที่ไม่สมบูรณ์จะถูกแสดงในกล่อง Process Log

หากกำหนดให้อุปกรณ์มีการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็ว เมื่ออุปกรณ์ไม่ได้รับเฟรมยืนยันภายในเวลาที่กำหนด อุปกรณ์จะส่งเฟรมของการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็วออกไปเพื่อยืนยันว่า ยังมีอุปกรณ์ปลายทางอยู่ในบริเวณใกล้เคียงหรือไม่ และหากพบว่าอุปกรณ์ปลายทางยังอยู่ในบริเวณใกล้เคียงจะทำการส่งเฟรมข้อมูลให้ใหม่อีกครั้งหนึ่ง แต่ถ้าหากไม่พบอุปกรณ์ปลายทาง สถานะของการเชื่อมต่อถือเป็นอันสิ้นสุด

ในส่วนของการรับส่งข้อมูล อุปกรณ์ภายในเครือข่ายสามารถร้องขอข้อมูลจากอุปกรณ์ภายในเครือข่ายอีกตัวได้ โดยการส่ง Request ไปยังอุปกรณ์ปลายทาง เมื่ออุปกรณ์ปลายทางได้รับแล้วจะทำการตรวจสอบข้อมูลที่มีอยู่ และจะส่งข้อมูลที่มีอยู่กลับไป

Coordinator ประกอบด้วยส่วนของการแสดงสถานะของตัวอุปกรณ์ สถานะในการเชื่อมต่อของเครือข่าย การสแกนหาอุปกรณ์ในบริเวณที่สามารถทำการส่งรับข้อมูลแสงได้ และส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการควบคุมการรับส่งข้อมูล จะเห็นได้ว่าส่วนของการแสดงสถานะในการเชื่อมต่อของเครือข่าย แสดงช่องทางการสื่อสารเพียง 1 ช่องทาง เนื่องจากเป็นการรับส่งแบบ Peer-to-Peer ที่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์ได้เพียง 1 อุปกรณ์เท่านั้น

ในส่วนของการสแกนหาอุปกรณ์ในบริเวณใกล้เคียงของเครือข่ายนี้ ใช้การสแกนแบบ แอคทีฟสแกน โดยจะส่งเฟรมข้อมูลของการสแกนออกไป หากมีอุปกรณ์อื่นอยู่ในบริเวณใกล้เคียง จะมีการตอบกลับจากอุปกรณ์นั้นๆ เมื่ออุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ได้รับการตอบกลับจะมีการอัปเดตข้อมูล ในส่วนของการแสดงสถานะในการเชื่อมต่อของเครือข่าย ซึ่งถือเป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนการสแกนหาอุปกรณ์ใน บริเวณใกล้เคียง

Device ประกอบด้วยส่วนของการแสดงสถานะของตัวอุปกรณ์ สถานะในการเชื่อมต่อกับเครือข่าย และส่วนของการควบคุมการรับส่งข้อมูล หากอุปกรณ์ได้รับเฟรมข้อมูลของการสแกน จากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ โปรแกรมจะเก็บค่า Short Address ของอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์และตัว อุปกรณ์ไว้สำหรับการแสดงผลและการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ แล้วจะส่งเฟรมตอบกลับการสแกนไปยังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์เพื่อเป็นการยืนยันการเชื่อมต่อ

3.4.2 ซอฟต์แวร์รอง

ซอฟต์แวร์รองประมวลผลอยู่ภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถแบ่งการทำงาน ออกเป็น 2 แบบด้วยกัน คือการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากซอฟต์แวร์หลักเพื่อควบคุมอุปกรณ์การ รับส่งแสง และประมวลผลสัญญาณที่ได้รับจากอุปกรณ์การรับแสงเพื่อส่งให้กับซอฟต์แวร์หลัก รูปที่ 3.15 แสดงโครงสร้างเฟรมข้อมูลที่รับส่งกันระหว่างซอฟต์แวร์หลักและซอฟต์แวร์รอง ประกอบด้วย ส่วนของคำสั่งที่อยู่ในรูปของตัวอักษรภาษาอังกฤษเรียงกัน 4 ตัว และส่วนของข้อมูลภายในซึ่งบรรจุ ข้อมูลสำหรับคำสั่งโดยมีข้อมูลที่บรรจุแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับคำสั่งที่ใช้ โดยได้กำหนดให้เฟรม ข้อมูลมีเครื่องหมาย '<' ที่ส่วนหัวของข้อมูล และเครื่องหมาย '>' ที่ส่วนท้ายของข้อมูล เพื่อเป็นการ กำหนดไบต์เริ่มต้นและปิดท้ายให้กับการสื่อสาร



รูปที่ 3.15 โครงสร้างเฟรมข้อมูลที่ซอฟต์แวร์หลักส่งให้กับซอฟต์แวร์รอง

สำหรับการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากซอฟต์แวร์หลัก ซอฟต์แวร์หลักจะส่งข้อมูลให้กับ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้ซอฟต์แวร์ภายในบอร์ดทำหน้าที่ในการประมวลผลตามคำสั่งภายใน เฟรม และควบคุมการทำงานของอุปกรณ์การรับส่งแสง ในการส่งข้อมูลออกไปทางแสงใช้เทคนิคการ มอดูเลตข้อมูลแบบ OOK คือ การกำหนดให้บิต 1 เป็นการติดของหลอด LED และกำหนดให้บิต 0 เป็นการดับของหลอด LED ซึ่งมีความเร็วในการติดดับนี้เป็นไปตามความเร็วของการสื่อสารที่ผู้ใช้งาน กำหนดไว้

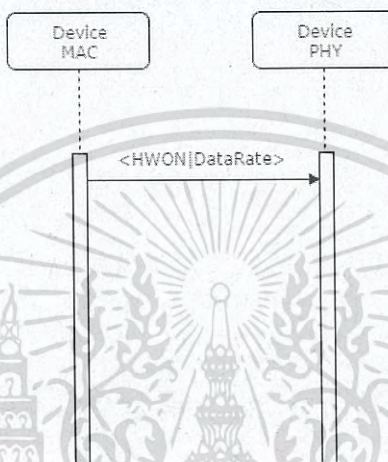
ในการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากอุปกรณ์รับแสง เมื่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับ สัญญาณจากวงจรของตัวรับแสง บอร์ดจะทำาการประมวลผลข้อมูลที่ได้ แล้วส่งไปให้กับซอฟต์แวร์ หลัก การนำสัญญาณแสงที่ได้รับมาแปลงให้อยู่ในรูปของบิตข้อมูลทำได้โดยการใช้เทคนิคการมอดู เลตแบบ OOK โดยแปลงลอจิก 1 ซึ่งเป็นสภาวะได้รับแสงให้เป็นบิต 1 และแปลงลอจิก 0 ซึ่งเป็น ไม่สว่างกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะที่ไม่ได้รับแสงให้เป็นบิต 0 ซึ่งมีความเร็วในการรับแสงเท่ากับความเร็วของการสื่อสารที่ผู้ใช้งานกำหนดไว้

3.4.3 ขั้นตอนการทำงานของคำสั่ง

เฟรมข้อมูลที่รับส่งกันระหว่างซอฟต์แวร์หลักและซอฟต์แวร์รองมีด้วยกันอยู่หลายคำสั่ง โดยจะนำมาอธิบายในบทย่อต่อไปนี้ทั้งหมด 23 คำสั่ง สามารถแบ่งออกตามการทำงานได้ดังนี้

3.4.3.1 HWON (Serial On)

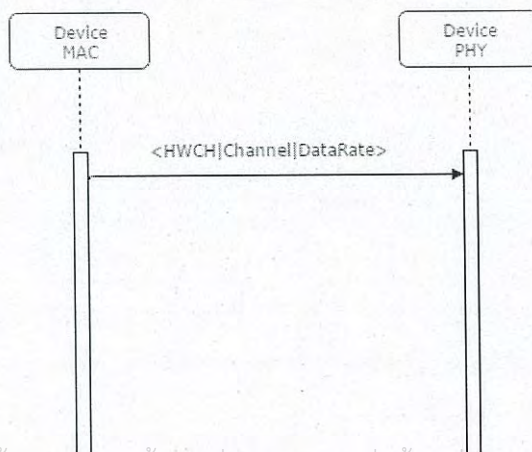


รูปที่ 3.16 การทำงานของคำสั่ง HWON

คำสั่ง HWON มีความเร็วของการสื่อสาร (DataRate) เป็นข้อมูลภายใน ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.16 ใช้สำหรับสั่งให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เปิดใช้งานพอร์ตช่องทางการสื่อสารทั้ง 3 พอร์ต ที่มีความเร็วในการสื่อสารเท่ากับ DataRate

3.4.3.2 HWCH (Serial Channel On)

คำสั่ง HWCH มีช่องทางการสื่อสาร (Channel) และความเร็วของการสื่อสารเป็นข้อมูลภายใน ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.17 ใช้สำหรับสั่งให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เปิดใช้งานพอร์ต Channel ที่มีความเร็วในการสื่อสารเท่ากับ DataRate

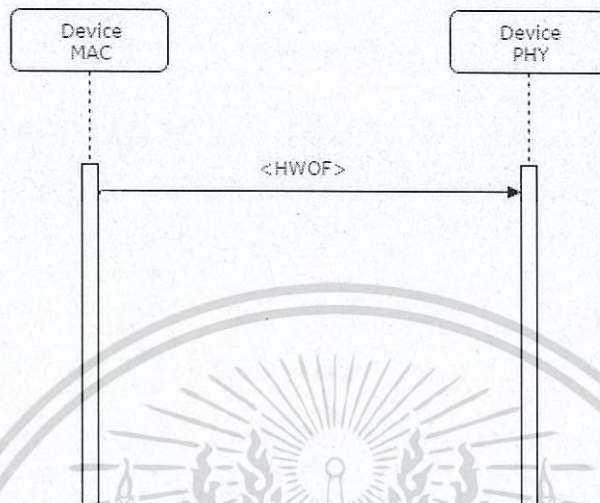


รูปที่ 3.17 การทำงานของคำสั่ง HWCH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

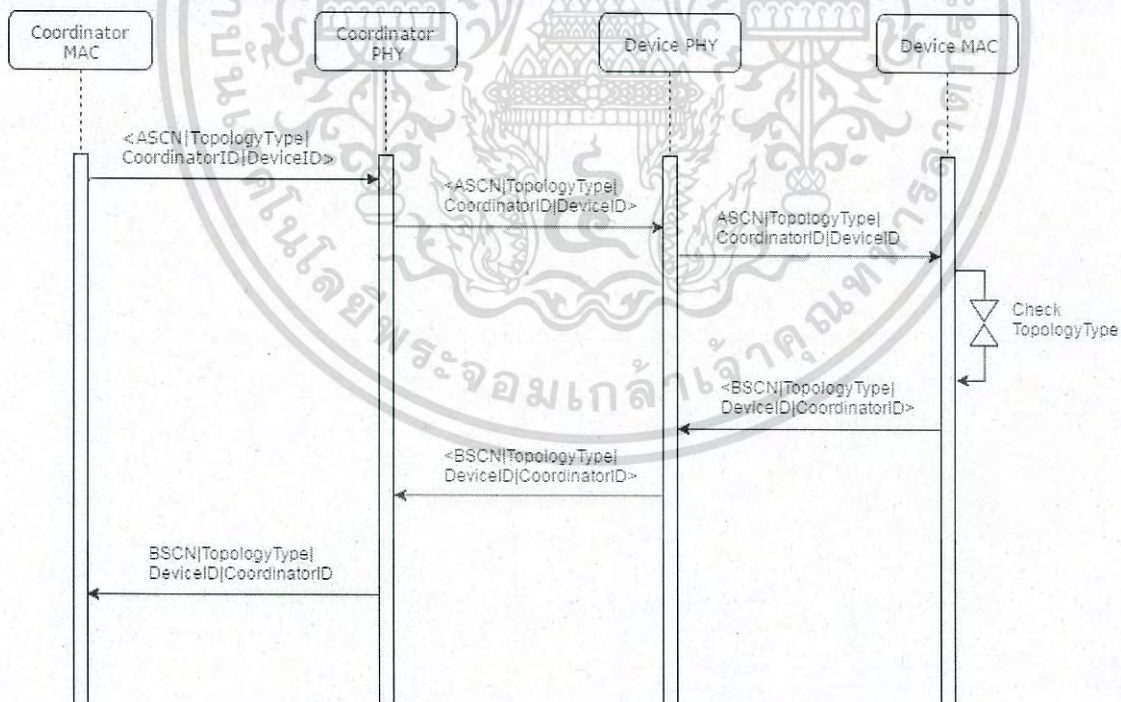
3.4.3.3 HWOFF (Serial Off)

คำสั่ง HWOFF ไม่มีการบรรจุข้อมูลภายใน ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.18 ใช้สำหรับสั่งให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ปิดพอร์ตการเชื่อมต่อทั้ง 3 พอร์ต



รูปที่ 3.18 การทำงานของคำสั่ง HWOFF

3.4.3.4 ASCN (Active Scan) และ BSCN (ACK Active Scan)



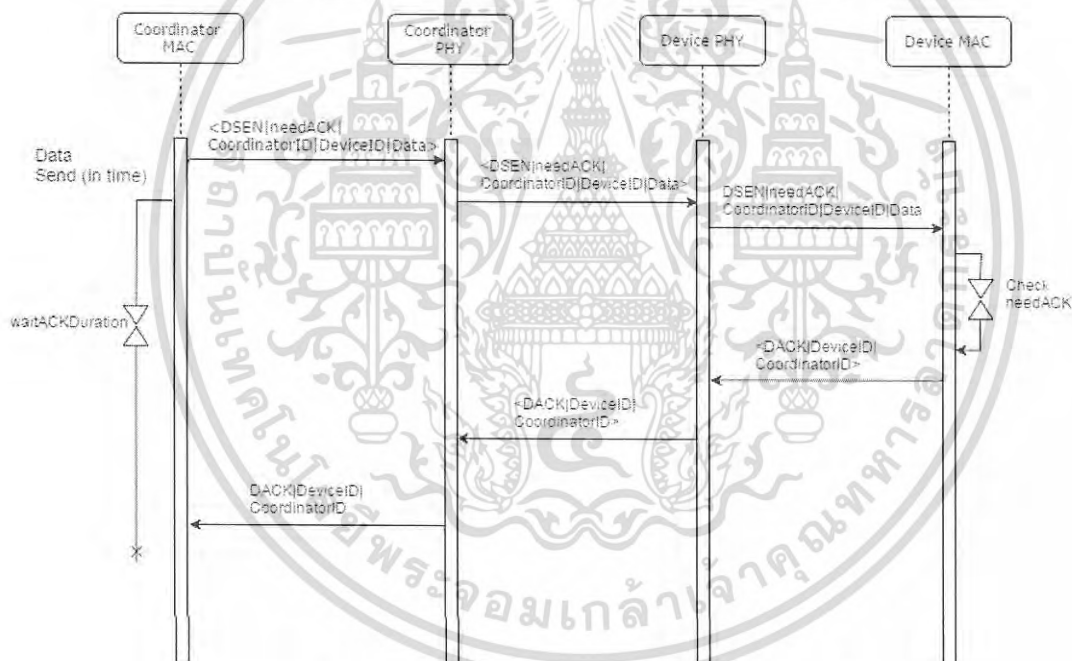
รูปที่ 3.19 การทำงานของคำสั่ง ASCN และ BSCN

คำสั่ง ASCN และ BSCN ใช้ในการสแกนแบบแอคทีฟ และตอบกลับการสแกนแบบแอคทีฟ ข้อมูลภายในประกอบด้วยรูปแบบเครือข่ายการสื่อสาร (TopologyType) หมายเลขอุปกรณ์ได้อินเตอร์เนตในเครือข่าย (CoordinatorID) และหมายเลขอุปกรณ์ในเครือข่ายที่สร้างขึ้นโดยอุปกรณ์ใดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออติเนเตอร์ (DeviceID) ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.19 อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะส่งคำสั่ง ASCN เมื่อต้องการสแกนแบบแอคทีฟสแกน และหากอุปกรณ์ที่ได้รับคำสั่งนี้มีการกำหนดรูปแบบเครือข่ายการสื่อสารเดียวกันกับ TopologyType อุปกรณ์จะส่งคำสั่ง BSCN กลับไปเพื่อยืนยันการเชื่อมต่อกับเครือข่าย

3.4.3.5 DSEN (Transmit Data) และ DACK (ACK Transmit Data)

คำสั่ง DSEN และ DACK ใช้ในการส่งข้อมูล และตอบกลับการส่งข้อมูลสำหรับเครือข่ายการเชื่อมต่อแบบ Peer-to-Peer โดยข้อมูลภายในประกอบด้วยตัวกำหนดการตอบรับ (needACK) หมายเลขอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ในเครือข่าย หมายเลขอุปกรณ์ปลายทางและข้อมูลที่ต้องการส่ง ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.20 อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะส่งคำสั่ง DSEN เมื่อต้องการส่งข้อมูล หาก needACK มีค่าเป็น 1 อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะรอรับคำสั่ง DACK ที่ส่งมาจากอุปกรณ์ปลายทางเพื่อยืนยันการรับข้อมูลตามเวลาที่กำหนดไว้ และหาก needACK มีค่าเป็น 0 อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะรอรับคำสั่ง DACK และไม่มีการส่งคำสั่ง DACK กลับเมื่ออุปกรณ์ปลายทางได้รับข้อมูล



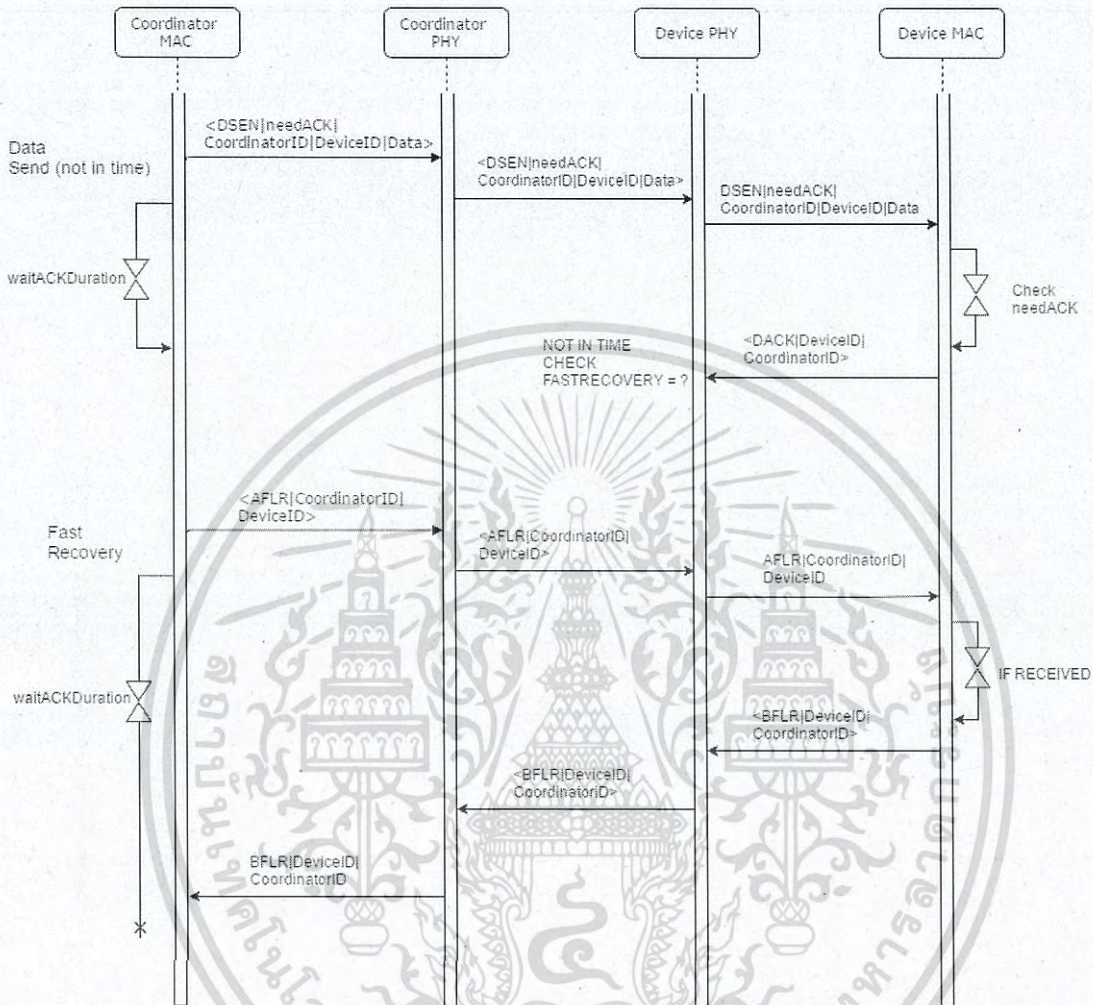
รูปที่ 3.20 การทำงานของคำสั่ง DSEN และ DACK

3.4.3.6 AFLR (Fast Recovery) และ BFLR (ACK Fast Recovery)

คำสั่ง AFLR และ BFLR ใช้ในการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็ว และตอบกลับการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็ว โดยข้อมูลภายในประกอบด้วยหมายเลขอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ในเครือข่าย และหมายเลขอุปกรณ์ปลายทาง ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.21 ในกรณีที่อุปกรณ์ไม่ได้รับคำสั่ง DACK ในเวลาที่กำหนด หากตั้งค่าอุปกรณ์ให้มีการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็ว อุปกรณ์จะส่งคำสั่ง AFLR ไปยังอุปกรณ์ปลายทางเพื่อกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็ว และรอรับคำสั่ง BFLR ที่ตอบกลับมาจากอุปกรณ์ปลายทาง หากได้รับคำสั่ง BFLR ในเวลาที่กำหนด อุปกรณ์จะทำการส่งข้อมูลไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

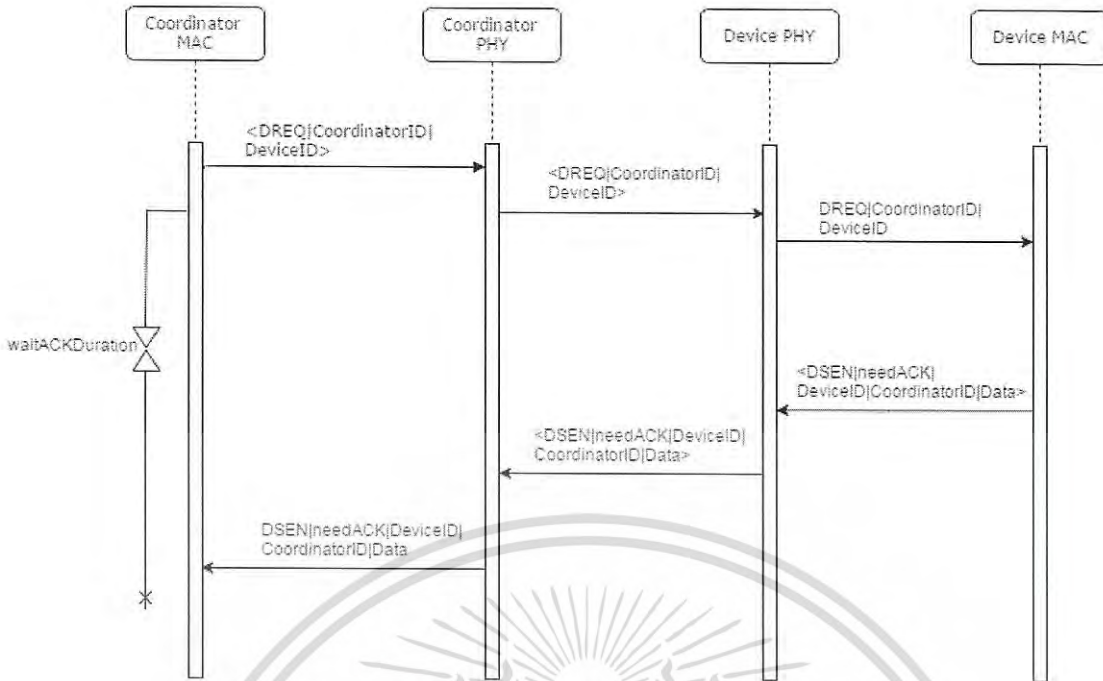
ยังปลายทางซ้ำอีกครั้งหนึ่งโดยใช้คำสั่ง DSEN แต่หากอุปกรณ์ไม่ได้รับคำสั่ง BFLR ในเวลาที่กำหนด อุปกรณ์จะถือว่าการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ปลายทางสิ้นสุดลง



รูปที่ 3.21 การทำงานของคำสั่ง AFLR และ BFLR

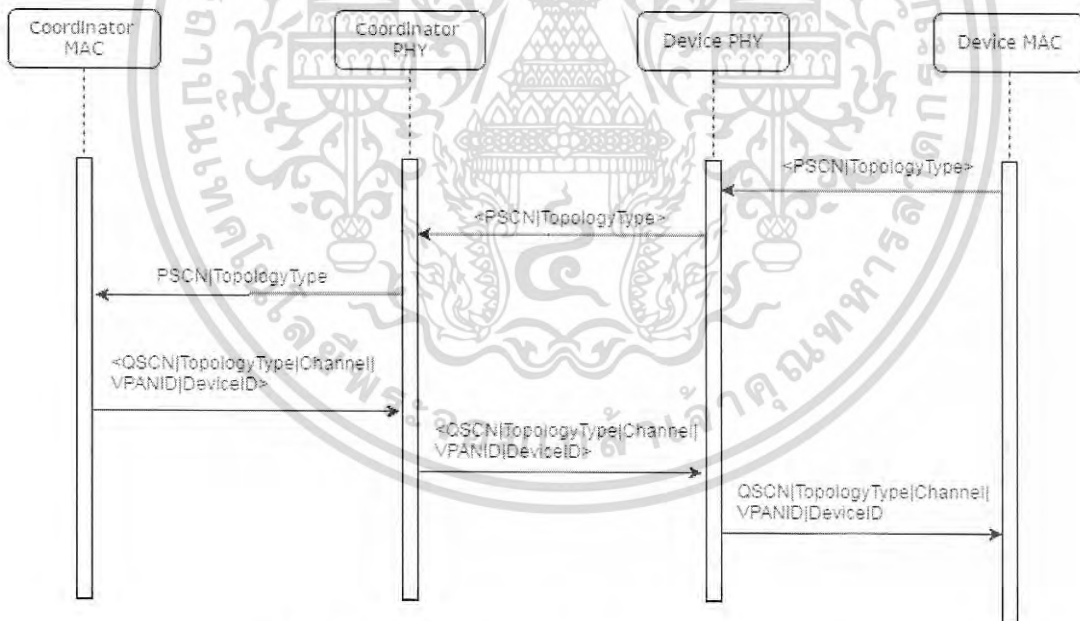
3.4.3.7 DREQ (Data Request)

คำสั่ง DREQ ใช้ในการร้องขอข้อมูลจากอุปกรณ์ปลายทาง โดยมีหมายเลขอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ และหมายเลขของอุปกรณ์ปลายทางเป็นข้อมูลภายใน ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.22 ในกรณีที่อุปกรณ์ต้องการข้อมูลจากอุปกรณ์ปลายทาง จะทำการส่งคำสั่ง DREQ ออกไปเพื่อทำการร้องขอข้อมูล เมื่ออุปกรณ์ปลายทางได้รับคำสั่ง DREQ จะทำการประมวลผลและส่งข้อมูลที่มีอยู่กลับมาด้วยคำสั่ง DSEN



รูปที่ 3.22 การทำงานของคำสั่ง DREQ

3.4.3.8 PSCN (Passive Scan) และ QSCN (ACK Passive Scan)

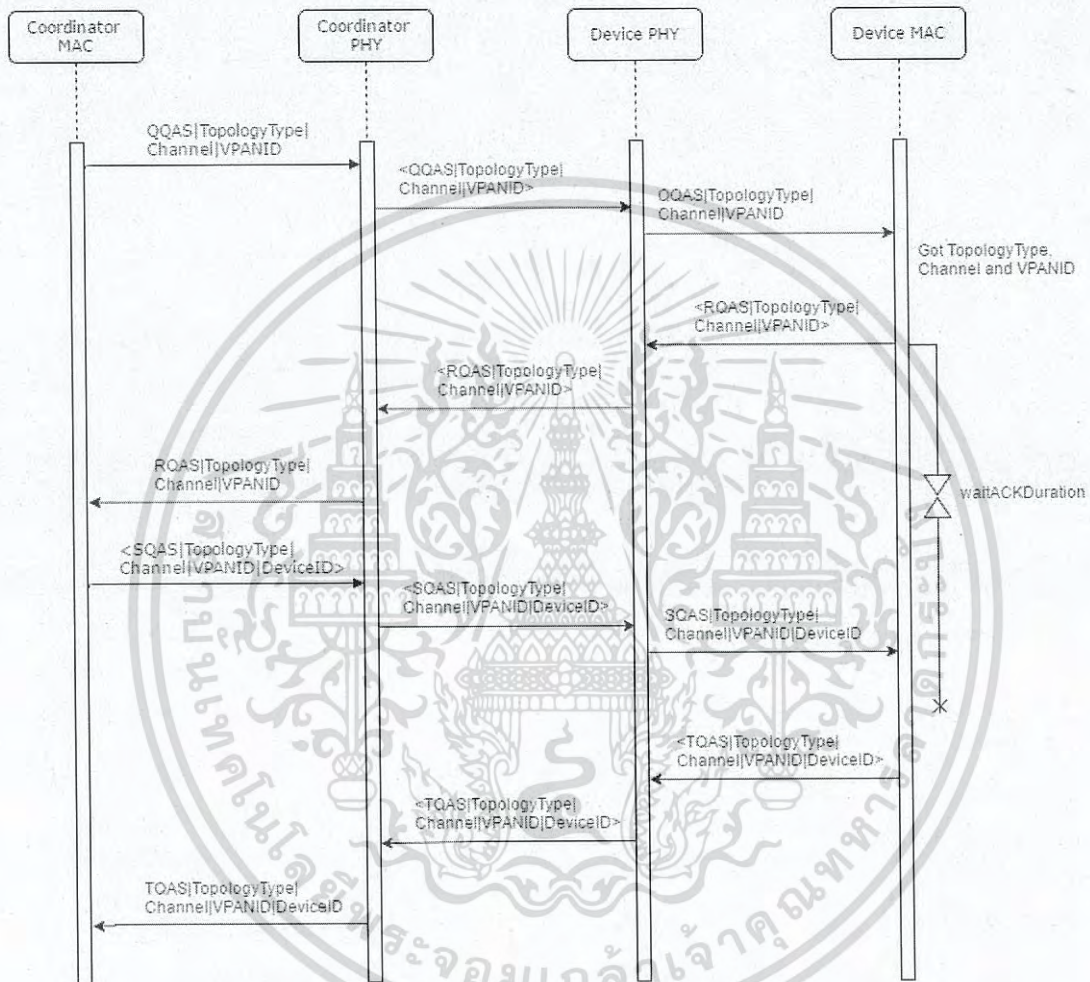


รูปที่ 3.23 การทำงานของคำสั่ง PSCN และ QSCN

คำสั่ง PSCN ใช้ในการสแกนแบบพาสซีฟ ข้อมูลภายในประกอบด้วยรูปแบบเครือข่าย การสื่อสาร ส่วนคำสั่ง QSCN ใช้ในการตอบรับการสแกนแบบพาสซีฟ ข้อมูลภายในประกอบด้วยรูปแบบเครือข่ายการสื่อสาร ข้อมูลภายในประกอบด้วยรูปแบบเครือข่ายการสื่อสาร ช่องทางการสื่อสาร หมายเลขเครือข่าย (VPANID) และหมายเลขอุปกรณ์ปลายทางที่สร้างขึ้นโดยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.23 อุปกรณ์จะส่งคำสั่ง PSCN เมื่อต้องการสแกนแบบพาสซีฟ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดใดๆ ไปยังประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีพแแกน เมื่ออุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ได้รับคำสั่งนี้จะทำการสร้างหมายเลขภายในเครือข่ายสำหรับอุปกรณ์ปลายทางขึ้น และส่งคำสั่ง QQAS กลับเพื่อยืนยันการอนุญาตให้อุปกรณ์เข้ามาเชื่อมต่อในเครือข่ายและให้ข้อมูลของการเชื่อมต่อนี้

3.4.3.9 QQAS (Transmit TopologyType) RQAS (Association Request) SQAS (Provide Data) และ TQAS (ACK Association Request)



รูปที่ 3.24 การทำงานของคำสั่ง QQAS RQAS SQAS และ TQAS

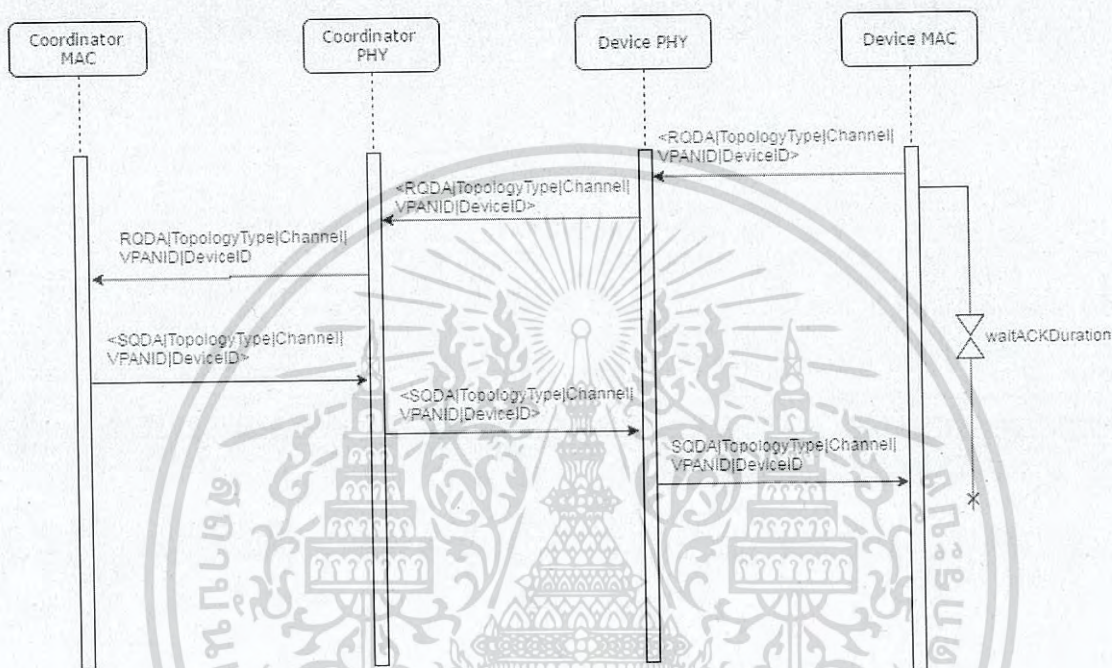
คำสั่ง QQAS ใช้ในการบอกการมีอยู่ของเครือข่ายให้อุปกรณ์รอบข้างทราบ ข้อมูลภายในประกอบด้วยรูปแบบเครือข่ายการสื่อสาร ช่องทางการสื่อสาร และหมายเลขเครือข่าย คำสั่ง RQAS ใช้ในการร้องขอการเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายที่ได้รับข้อมูลมาก่อนหน้านี้ โดยระบุข้อมูลที่รับก่อนหน้าเป็นข้อมูลภายใน คำสั่ง SQAS ใช้ในการให้ข้อมูลการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ร้องขอการเชื่อมต่อ โดยเพิ่มหมายเลขอุปกรณ์ปลายทางที่สร้างขึ้นโดยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ลงในข้อมูลภายใน และคำสั่ง TQAS ใช้ในการตอบรับการเชื่อมต่อเข้าสู่เครือข่าย โดยมีข้อมูลภายในเหมือนกับคำสั่ง TQAS ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.24 อุปกรณ์โคออดิเนเตอร์จะส่งคำสั่ง QQAS เพื่อให้

อุปกรณ์ใกล้เคียงทราบถึงการมีอยู่ของเครือข่าย หากอุปกรณ์เหล่านั้นต้องการเชื่อมต่อเข้าสู่เครือข่าย จะต้องส่งคำสั่ง RQAS มาให้กับอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ เมื่ออุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ได้รับคำสั่งนี้จะทำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างหมายเลขอุปกรณ์ปลายทางขึ้นใหม่แล้วส่งให้กับอุปกรณ์ที่ร้องขอด้วยคำสั่ง SQAS ในขั้นตอนสุดท้ายของการร้องขอการเชื่อมต่อนี้ อุปกรณ์ที่ร้องขอจะรอรับคำสั่ง SQAS ที่จะส่งมาจากโคออดิเนเตอร์และจะส่งคำสั่ง TQAS กลับเพื่อยืนยันการเชื่อมต่อหากได้รับคำสั่ง SQAS ภายในเวลาที่กำหนด

3.4.3.10 RQDA (Disassociation Request) และ SQDA (ACK Disassociation Request)

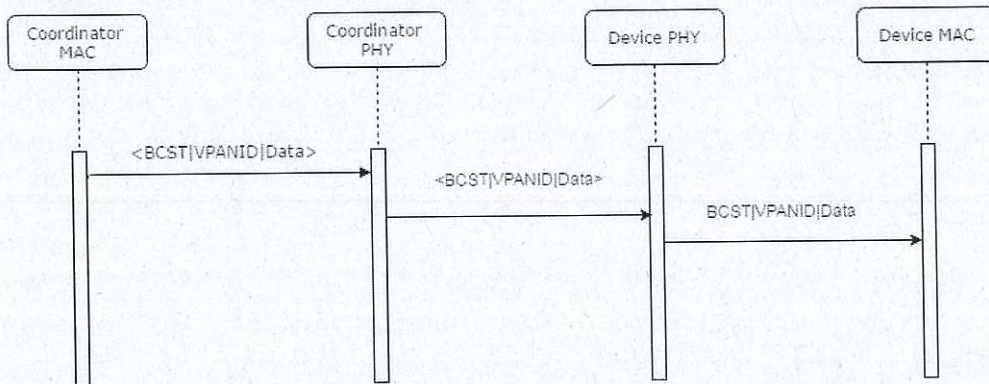


รูปที่ 3.25 การทำงานของคำสั่ง RQDA และ SQDA

คำสั่ง RQDA และ SQDA ใช้ในการร้องขอเพื่อยกเลิกการเชื่อมต่อจากเครือข่าย และตอบกลับการร้องขอนี้ ข้อมูลภายในประกอบด้วยรูปแบบเครือข่ายการสื่อสาร ข้อมูลภายในประกอบด้วยรูปแบบเครือข่ายการสื่อสาร ช่องทางการสื่อสาร หมายเลขเครือข่าย และหมายเลขอุปกรณ์ที่ต้องการยกเลิกการเชื่อมต่อ ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.25 อุปกรณ์ที่ต้องการยกเลิกการเชื่อมต่อจะส่งคำสั่ง RQDA ไปยังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ เมื่อโคออดิเนเตอร์ได้รับคำสั่ง จะทำการลบข้อมูลการเชื่อมต่อของอุปกรณ์หมายเลข DeviceID และส่งคำสั่ง SQDA กลับเพื่อยืนยันการยกเลิกการเชื่อมต่อ ในขั้นตอนสุดท้าย หากอุปกรณ์ได้รับคำสั่ง SQDA ภายในเวลาที่กำหนดจะทำการลบข้อมูลการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ทิ้ง

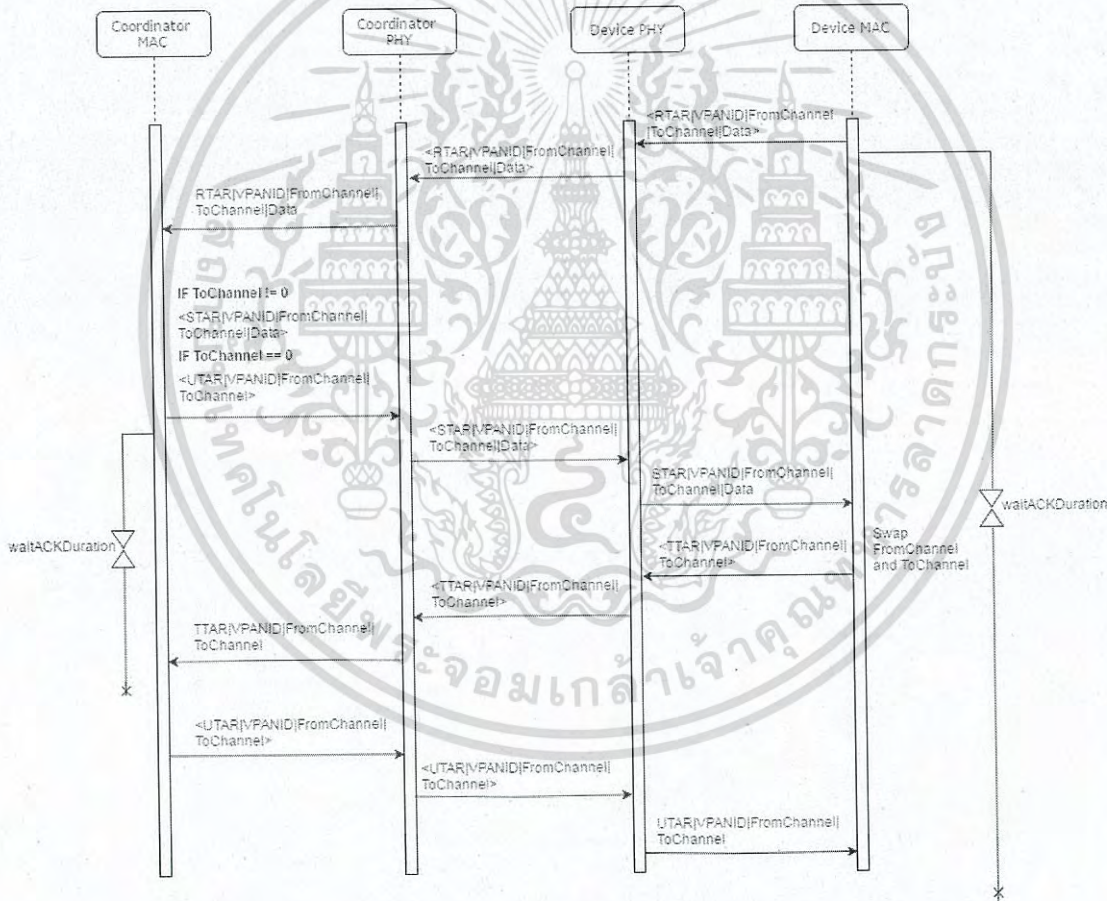
3.4.3.11 BCST (Broadcast Data)

คำสั่ง BCST ใช้ในการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ไปยังอุปกรณ์อื่นๆ ในรูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Broadcast ข้อมูลภายในประกอบด้วยหมายเลขเครือข่าย และข้อมูลที่ต้องการส่ง (Data) ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การทำงานของคำสั่ง BCST

3.4.3.12 RTAR (Transmit Data) UTAR (ACK Transmit Data) STAR (Forward Data) และ TTAR (ACK Forward Data)



รูปที่ 3.27 การทำงานของคำสั่ง RTAR UTAR STAR และ TTAR

ในรูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Star มีคำสั่ง RTAR ใช้สำหรับการส่งข้อมูล โดยสามารถส่งไปยังอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์และส่งไปยังอุปกรณ์อื่นในเครือข่ายได้ คำสั่ง UTAR ใช้สำหรับการยืนยันการได้รับข้อมูลของอุปกรณ์ที่เป็นอุปกรณ์ปลายทาง คำสั่ง STAR ออกโดยอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ใช้สำหรับการส่งข้อมูลต่อไปยังอุปกรณ์ปลายทาง และคำสั่ง TTAR ใช้สำหรับการยืนยันการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับข้อมูลของอุปกรณ์ที่เป็นอุปกรณ์ปลายทาง โดยข้อมูลที่ได้รับนี้เป็นข้อมูลที่ถูกส่งผ่านอุปกรณ์โค
ออดิเนเตอร์ ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงผลการทดลอง และผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ซึ่งเป็นการทดลองภายในอาคาร ในห้องที่มีการส่องสว่างปกติ รูปที่ 4.1 แสดงสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยอุปกรณ์การรับส่งข้อมูลผ่านแสง (Transceiver) และคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลการทดลอง โดยสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 5 การทดลอง



รูปที่ 4.1 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง

4.2 ระยะทางสูงสุดที่สามารถรับส่งข้อมูลได้

ตารางที่ 4.1 ระยะทางสูงสุดในการรับส่งข้อมูลขนาด 100 byte ที่ข้อมูลมีความถูกต้อง 100% ด้วยความเร็วในการสื่อสารที่ต่างกัน

ความเร็วในการสื่อสาร (bps)	ระยะทาง (cm)
11670	72
24440	103
48890	98
73300	98
100000	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการทดลองหาระยะทางสูงสุดระหว่างอุปกรณ์ Transceiver A และอุปกรณ์ Transceiver B ที่สามารถรับส่งข้อมูลขนาด 100 byte ให้มีความถูกต้องของข้อมูลทางภาครับเท่ากับ 100% ด้วยความเร็วที่แตกต่างกันตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 รูปแบบ PHY I ซึ่งประกอบด้วยความเร็ว 5 ความเร็วด้วยกัน คือ 11.67 kbps 24.44 kbps 48.89 kbps 73.30 kbps และ 100 kbps แสดงอยู่ในตารางที่ 4.1

จากผลการทดลอง พบว่าความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่อุปกรณ์ Transceiver สามารถส่งและรับข้อมูลได้ระยะทางไกลที่สุดจากทั้งหมด 5 ความเร็วในมาตรฐาน IEEE 802.15.7 รูปแบบ PHY I คือ 24.44 kbps ด้วยความสามารถของอุปกรณ์โดยทั่วไปแล้วความเร็วในการสื่อสารที่ต่ำควรมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลได้ถูกต้องและแม่นยำกว่าความเร็วที่สูงกว่า และควรมีสามารถส่งได้ในระยะทางที่มากกว่า ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าการรับส่งข้อมูลที่มีความเร็ว 11.67 kbps มีระยะทางในการส่งสั้นกว่าการรับส่งข้อมูลที่มีความเร็ว 24.44 kbps เนื่องจากผลกระทบของวงจรกรองความถี่สูงผ่านของอุปกรณ์ Transceiver รูปที่ 4.2 แสดงผลลัพธ์ของการทดลองในรูปแบบกราฟ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการสื่อสารและระยะทางระหว่างอุปกรณ์

4.3 ความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล

การทดลองนี้เป็นการศึกษาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของข้อมูลในระดับบิต ซึ่งกำหนดระยะทางสำหรับการสื่อสารเท่ากับ 80 cm และรับส่งข้อมูลขนาด 100 byte จำนวนข้อมูลบิตที่ผิดได้จากการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลที่ส่งออกและข้อมูลที่ได้รับในระดับบิต ผลการทดลองแสดงอยู่ในตารางที่ 4.2

จากผลการทดลอง พบว่าที่ระยะการสื่อสารเท่ากับ 80 cm นั้น อุปกรณ์ Transceiver สามารถทำการรับส่งได้ดีเยี่ยมโดยไม่มีบิตที่ผิดพลาดในข้อมูลที่ได้รับ ที่ความเร็วของการสื่อสารตามมาตรฐานในช่วง 24.44 kbps ถึง 100 kbps ยกเว้นที่ความเร็ว 11.67 kbps ซึ่งมีบิตที่ผิดพลาดอยู่จำนวน 10 บิตด้วยกัน ซึ่งเมื่อเทียบกับผลของการทดลองในตารางที่ 4.1 และ 4.2 แล้ว ผลลัพธ์ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 มีความสอดคล้องกัน รูปที่ 4.3 แสดงผลลัพธ์ของการทดลองในรูปแบบกราฟ

ตารางที่ 4.2 จำนวนบิตข้อมูลที่ผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลขนาด 100 byte ที่มีระยะทางในการรับส่งอยู่ 80cm ด้วยความเร็วในการสื่อสารที่ต่างกัน

ความเร็วในการสื่อสาร (bps)	จำนวนข้อมูลที่ผิดพลาด (bit)
11670	10
24440	0
48890	0
73300	0
100000	0



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการสื่อสารและจำนวนบิตข้อมูลที่ผิดพลาด

4.4 จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล

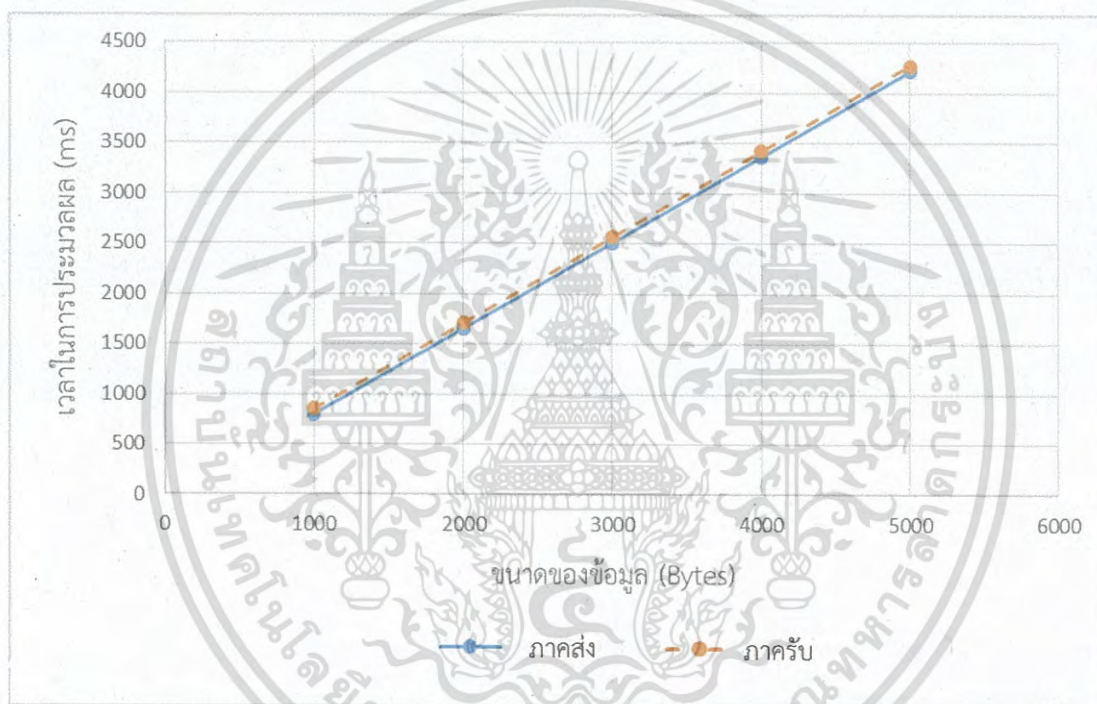
4.4.1 จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลที่ความเร็วการสื่อสาร 11.67 kbps

การทดลองนี้เป็นการหาจำนวนเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลขนาดแตกต่างกัน ที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ Transceiver A และอุปกรณ์ Transceiver B เท่ากับ 70 cm ด้วยความเร็วการสื่อสาร 11.67 kbps โดยได้ทำการทดลองโดยใช้ขนาดข้อมูลเริ่มต้นที่ 1000 byte และขนาดสูงสุดที่ใช้สำหรับการทดลองเท่ากับ 5000 byte ซึ่งเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลนี้ประกอบด้วยเวลาของการประมวลผลและเวลาที่แสงถูกส่งผ่านในอากาศ จากการทดลองเวลาที่แสงถูกส่งผ่านอากาศมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาวิเคราะห์ในการทดลองนี้ ผลของการทดลองแสดงอยู่ในตารางที่ 4.3 และแสดงผลอยู่ในรูปกราฟดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยกำหนดระยะทางในการสื่อสารเท่ากับ 70 cm และรับส่งด้วยความเร็วของการสื่อสารเท่ากับ 11.67 kbps

ขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่ง (byte)	เวลาในการประมวลผลของภาคส่ง (ms)	เวลาในการประมวลผลของภาครับ (ms)
1000	800.42	855.36
2000	1655.62	1710.42
3000	2510.48	2565.14
4000	3365.22	3420.20
5000	4220.74	4275.46



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของข้อมูลที่รับส่งและเวลาในการประมวลผลของภาคส่งและภาครับ ในการส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 11.67 kbps

เวลาที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับการรับข้อมูลของทางภาครับมีค่ามากกว่าเวลาที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับการส่งข้อมูลของทางภาคส่งจำนวน 55 ms ในการส่งของข้อมูลทั้ง 5 ขนาด เนื่องจากขั้นตอนการนับเวลาในภาคส่งวัดได้จากการบันทึกข้อมูลเวลาในการเริ่มเขียนข้อมูลลงในบัฟเฟอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีขนาด 64 byte และนับเวลาสิ้นสุดหลังจากเขียนข้อมูลลงบัฟเฟอร์เรียบร้อยแล้วด้วยคำสั่งดังแสดงในรูปที่ 4.5

โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้เวลาในการเขียนข้อมูลลงบัฟเฟอร์ภายในขนาด 64 byte น้อยมาก อยู่ในระดับไมโครวินาที เมื่อนำเวลาที่ใช้ในการเขียนข้อมูลลงบัฟเฟอร์ไปเทียบกับเวลาที่ส่งข้อมูลตามความเร็วของการรับส่งแล้ว จึงกำหนดให้เวลาในการเขียนข้อมูลลงบัฟเฟอร์เท่ากับ 0 ms

ทำให้เวลาที่ใช้ในภาคส่งต่ำกว่าเวลาที่ใช้ในภาครับ ดังนั้นจำนวนเวลาที่ภาครับใช้จึงเป็นเวลาจริงในการรับส่งข้อมูล

```

ulStartTime = millis();           //Get starting time
for (int i=0; i<iLoop; i++) {
    Serial2.write(&sd[0]);         //Send data
}
Serial2.write("\n");              //Send terminated byte
ulStopTime = millis();            //Get stop time
ulTakeTime = ulGetUsedTime(ulStartTime, ulStopTime); // Calculate used time

```

รูปที่ 4.5 คำสั่งการวัดจำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล

จากการทดลองทำให้ได้สมการที่ 4.1 โดยสามารถใช้คำนวณหาจำนวนเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลได้จากความเร็วในการสื่อสารที่ใช้ และขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่ง ซึ่งเลข 10 ที่นำไปคูณกับขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่งนั้นคือจำนวนบิตที่ส่งต่อข้อมูลหนึ่งไบต์ ประกอบด้วยบิตข้อมูลจำนวน 8 บิต บิตตรวจสอบ (Parity Bit) 1 บิต และบิตสิ้นสุด (Stop Bit) 1 บิต โดยสมการที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการคำนวณหาจำนวนเวลาที่แตกต่างในการส่งข้อมูลของทางภาคส่งและการรับข้อมูลของทางภาครับของการส่งข้อมูลด้วยความเร็วการสื่อสาร 11.67 kbps และมีขนาดบัพเฟอร์บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เท่ากับ 64 byte

$$UseTime = \frac{DataSize \times 10}{DataRate} \quad (4.1)$$

$$UseTime = \frac{64 \times 10}{11670} \times 1000 \approx 55 \text{ ms} \quad (4.2)$$

4.4.2 จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลด้วยความเร็วการสื่อสารตามมาตรฐาน

การทดลองเพื่อหาจำนวนเวลาที่แตกต่างของจำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลของภาคส่งที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.1 และจำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลของภาคส่งที่ได้จากการทดลอง ในการส่งข้อมูลด้วยความเร็วการสื่อสารตามมาตรฐานทั้ง 5 ความเร็ว และมีระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ 70 cm

เมื่อนำผลการคำนวณที่ได้ในตารางที่ 4.4 เทียบกับผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.5 แล้วพบว่าผลลัพธ์ที่ได้ในทั้งสองตารางนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก ผลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามสมการที่ 4.1 โดยในการคำนวณหาจำนวนเวลาทั้งหมดที่ภาคส่งใช้ได้ทำการหักข้อมูลในการส่งออก 64 byte เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการเก็บผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลของภาคส่งที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.1 ในหน่วยมิลลิวินาที (ms) โดยเปรียบเทียบตามขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่งและความเร็วในการส่งข้อมูล การคำนวณนี้ได้หักข้อมูลที่ส่งออกจำนวน 64 byte เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการเก็บผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่ง (byte)	จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล (ms)				
	ความเร็วในการสื่อสาร (bps)				
	11670	24440	44890	73300	100000
1000	802.06	382.98	208.51	127.69	93.60
2000	1658.95	792.14	431.28	264.12	193.60
3000	2515.85	1201.31	654.04	400.55	293.60
4000	3372.75	1610.47	876.81	536.97	393.60
5000	4229.65	2019.64	1099.58	673.40	493.60

ตารางที่ 4.5 จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลของภาคส่งที่ได้จากการทดลองในหน่วยมิลลิวินาที (ms) โดยเปรียบเทียบตามขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่งและความเร็วที่ใช้ในการส่งข้อมูล กำหนดให้ระยะทางการรับส่งเท่ากับ 70 cm

ขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่ง (byte)	จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล (ms)				
	ความเร็วในการสื่อสาร (bps)				
	11670	24440	44890	73300	100000
1000	800.42	383.20	192.12	126.70	94.14
2000	1655.62	793.10	397.42	261.92	194.56
3000	2510.48	1204.94	601.30	396.66	294.76
4000	3365.22	1614.62	807.42	531.48	394.84
5000	4220.74	2024.14	1011.86	665.32	494.20

4.4.3 จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับข้อมูลด้วยความเร็วการสื่อสารตามมาตรฐาน

การทดลองเพื่อหาจำนวนเวลาที่แตกต่างของจำนวนเวลาที่ใช้ในการรับข้อมูลของภาครับที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.1 และจำนวนเวลาที่ใช้ในการรับข้อมูลของภาครับที่ได้จากการทดลอง ในการส่งข้อมูลด้วยความเร็วการสื่อสารตามมาตรฐานทั้ง 5 ความเร็ว และมีระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ 70 cm

เมื่อนำผลการคำนวณที่ได้ในตารางที่ 4.6 เทียบกับผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.7 แล้วพบว่าผลลัพธ์ที่ได้ในทั้งสองตารางนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก ผลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามสมการที่ 4.1 และเมื่อนำตารางที่ 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7 มาแสดงให้อยู่ในรูปกราฟจะได้รูปกราฟดังรูปที่ 4.6

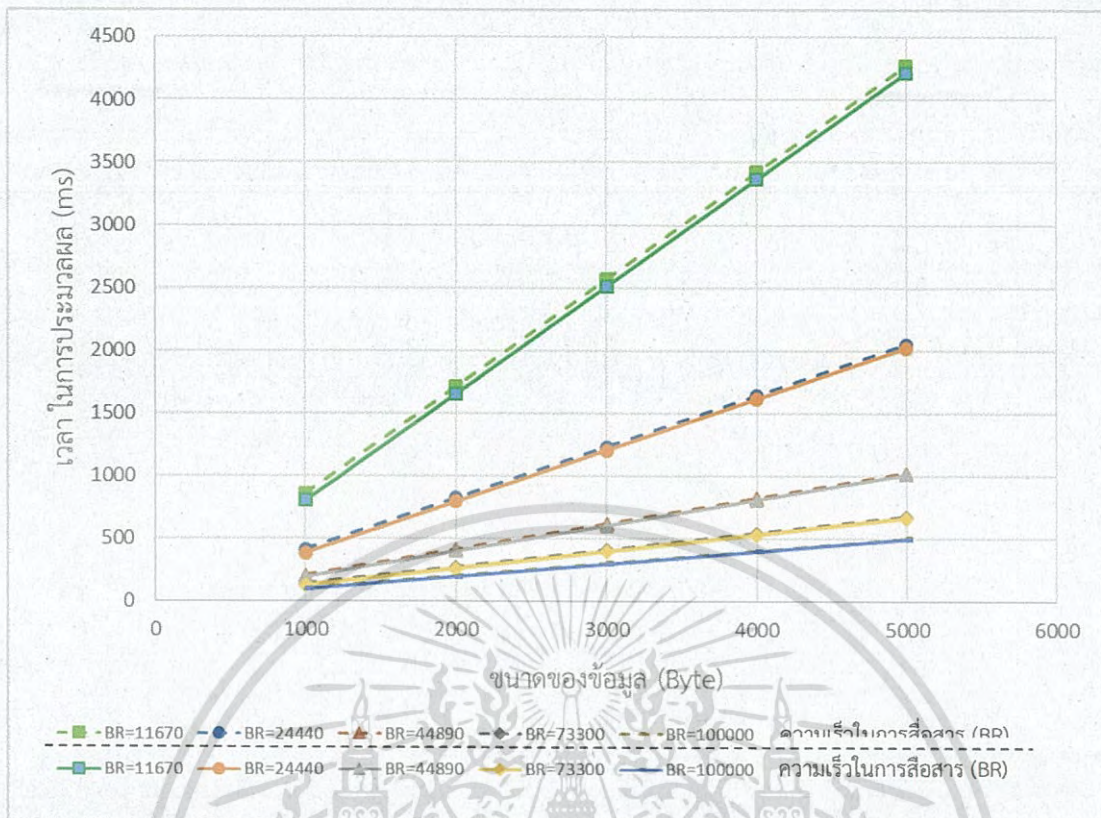
ตารางที่ 4.6 จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับข้อมูลของภาครับที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.1 ในหน่วยมิลลิวินาที (ms) โดยเปรียบเทียบตามขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่งและความเร็วในการส่งข้อมูล

ขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่ง (byte)	จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล (ms)				
	ความเร็วในการสื่อสาร (bps)				
	11670	24440	44890	73300	100000
1000	856.90	409.17	222.77	136.43	100.00
2000	1713.80	818.33	445.53	272.85	200.00
3000	2570.69	1227.50	668.30	409.28	300.00
4000	3427.59	1636.66	891.07	545.70	400.00
5000	4284.49	2045.83	1113.83	682.13	500.00

ตารางที่ 4.7 จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับข้อมูลของภาครับที่ได้จากการทดลองในหน่วยมิลลิวินาที (ms) โดยเปรียบเทียบตามขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่งและความเร็วที่ใช้ในการส่งข้อมูล กำหนดให้ระยะทางการรับส่งเท่ากับ 70 cm

ขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่ง (byte)	จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล (ms)				
	ความเร็วในการสื่อสาร (bps)				
	11670	24440	44890	73300	100000
1000	855.36	411.24	205.62	135.02	100.90
2000	1710.42	820.40	410.74	269.70	200.12
3000	2565.14	1230.56	615.78	405.32	300.36
4000	3420.20	1640.74	820.44	541.16	400.72
5000	4275.46	2050.62	1025.36	675.84	500.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของข้อมูลที่ได้รับส่งและเวลาในการประมวลผลของภาคส่งและภาครับ ในการส่งข้อมูลด้วยความเร็วทั้ง 5 ความเร็วที่ถูกกำหนดโดยมาตรฐาน

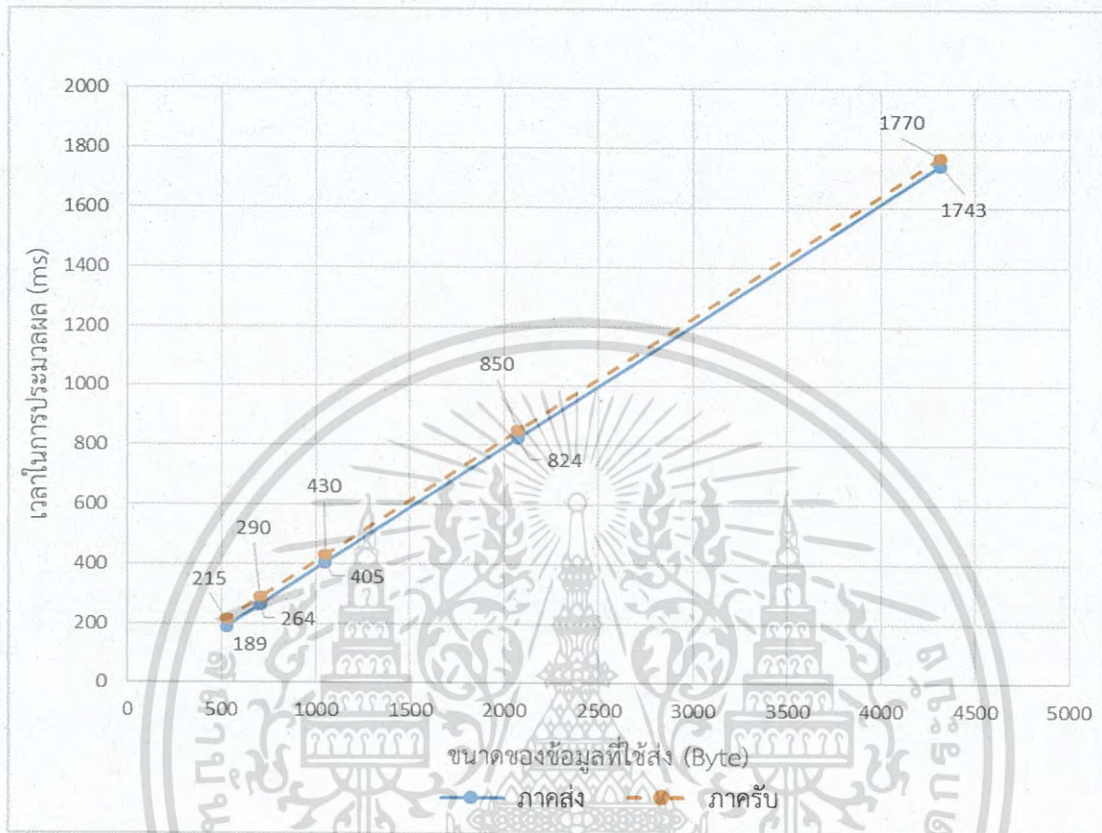
4.4.4 จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านการเข้ารหัสตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4.8 จำนวนเวลาที่ใช้ในการส่งและรับข้อมูล โดยมีข้อมูลก่อนการเข้ารหัสตามมาตรฐานทั้งหมด 500 bytes ซึ่งหลังจากผ่านการเข้ารหัสแล้วจะได้ข้อมูลที่มีความยาวต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วการสื่อสารที่ใช้

Data rate (bps)	ขนาดของข้อมูลที่ได้หลังการเข้ารหัส (byte)	เวลาในการประมวลผลของภาคส่ง (ms)	เวลาในการประมวลผลของภาครับ (ms)
11670	4316	1743.02	1770.24
24440	2074	824.34	850.06
48890	1050	405.72	430.68
73300	707	264.26	290.74
100000	525	189.48	215.92

การทดลองนี้เป็นการหาจำนวนเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลหลังการเข้ารหัสของข้อมูลขนาด 500 byte โดยข้อมูล 500 byte นี้ที่ต้องผ่านการเข้ารหัสข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 รูปแบบ PHY I ก่อนทำการส่ง โดยทำการทดลองที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ Transceiver A และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ Transceiver B เท่ากับ 70 cm ด้วยความเร็วการสื่อสารตามมาตรฐานทั้ง 5 ความเร็ว ข้อมูลที่ได้หลังจากการเข้ารหัสแล้วจะมีขนาดของข้อมูลที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้เวลาที่ใช้สำหรับการรับส่ง ข้อมูลมากขึ้น ผลของการทดลองแสดงอยู่ในตารางที่ 4.8 และแสดงผลอยู่ในรูปกราฟดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่งและเวลาในการประมวลผลของ ภาคส่ง ในการส่งข้อมูลผ่านการเข้ารหัสตามมาตรฐานความเร็วทั้ง 5 ความเร็ว

จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าข้อมูลที่ได้รับหลังจากการเข้ารหัสตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 รูปแบบ PHY I นี้มีขนาดที่เพิ่มขึ้นมากสำหรับการส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 11.67 kbps และลดขนาดที่เพิ่มขึ้นลงเมื่อมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงขึ้น โดยในการทดลองนี้มีขนาดของข้อมูลที่ได้รับ หลังจากเข้ารหัสแล้วของความเร็วการรับส่งข้อมูล 11.67 kbps มากกว่าขนาดของข้อมูลที่ได้รับ หลังจากเข้ารหัสแล้วของความเร็วการรับส่งข้อมูล 100 kbps อยู่ประมาณ 8 เท่า ซึ่งส่งผลให้ จำนวนเวลาที่ใช้ในการรับส่งมากตามไปด้วย โดยจำนวนเวลาที่ใช้สำหรับการรับข้อมูลผ่านแสงของ ทางภาครับที่ความเร็ว 11.67 kbps มีค่ามากกว่าจำนวนเวลาที่ใช้สำหรับการรับข้อมูลผ่านแสงของ ทางภาครับที่ความเร็ว 100 kbps อยู่ประมาณ 8 เท่าเช่นกัน

4.5 การกู้คืนข้อมูลที่เสียหาย

จากการทดลองพบว่า โอกาสที่ข้อมูลจะผิดพลาดเพียงแค่บางส่วนมีโอกาสน้อยมาก โดย ส่วนมากแล้วหากเกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่ภาครับได้รับขึ้น ข้อมูลที่ได้รับจะผิดพลาดเยอะมาก จนไม่สามารถกู้คืนด้วยการถอดรหัสได้ หรือไม่เช่นนั้นก็จะเกิดการผิดพลาดกับทุกบิตข้อมูลที่ได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้มองเห็นจุดผิดพลาดอย่างชัดเจน ตัวอย่างที่จะแสดงในลำดับถัดไปนี้จะแสดงข้อมูลในรูปแบบแอสกี (ASCII) แทนการแสดงในรูปแบบของไบนารี

ตัวอย่างข้อมูลที่เกิดความผิดพลาดเยอะมากจนไม่สามารถกู้คืนด้วยการถอดรหัสได้ โดยเกิดขึ้นเมื่อทำการส่งข้อมูลขนาด 100 byte ที่ความเร็ว 24.44 kbps ที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ Transceiver A และ Transceiver B อยู่ 105 cm โดยพบความผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดขึ้นดังนี้

ข้อมูลที่ส่ง :

1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234
567890123456789012345678901234567890

ข้อมูลที่รับได้ :

123456789012&□□□□§□□□□□□□□□□§□□□□□□□□□□§□□□□
□□□□§□K□□□□□□□□□□§□ض□□□□□□□□□□§□□□□□□□□□□§□□
□□□□□□□□□□§R

ตัวอย่างข้อมูลที่เกิดพลาตน้อยและสามารถกู้คืนด้วยการถอดรหัสได้นั้น ถูกนำมาจากตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงจำนวนบิตข้อมูลที่ผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลขนาด 100 byte ที่มีระยะทางในการรับส่งอยู่ 80 cm ด้วยความเร็วในการสื่อสารที่ต่างกัน ซอฟต์แวร์หลักในส่วนของถอดรหัสสามารถกู้คืนข้อมูลที่เสียหายของการรับส่งที่ความเร็ว 11.67 kbps ซึ่งเกิดบิตผิดพลาดจำนวน 10 บิต จากการส่งข้อมูลขนาด 100 byte ได้ โดยมี

ข้อมูลที่ส่ง :

1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234
567890123456789012345678901234567890

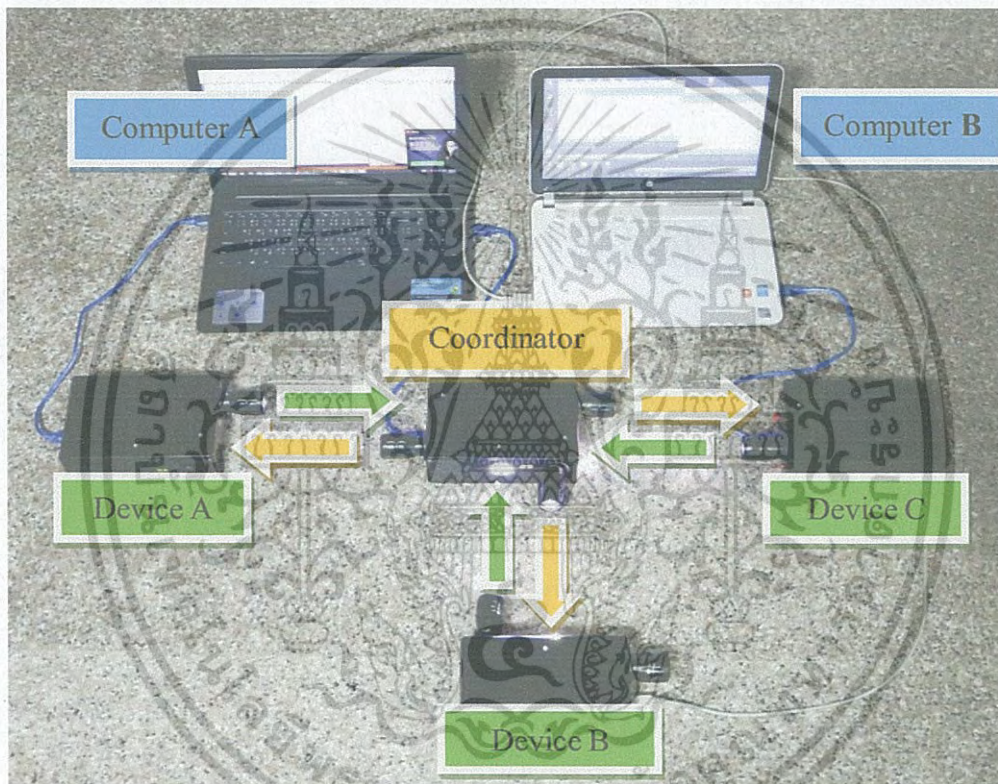
ข้อมูลที่รับได้ :

1234567898123456789812345678981234567898123456789812345678981234
567898123456789812345678981234567898

โดยข้อมูลผิดพลาดที่ทางภาครับได้รับนี้มีการผิดพลาดอย่างต่อเนื่องในจุดเดิมของข้อมูล จากผลการทดลองที่ได้ พบจุดผิดพลาดในบริเวณ ASCII 0 ซึ่งได้รับเป็น ASCII 8 แทน หากมองข้อมูลในระดับบิต ASCII 0 คือ 00110000 และ ASCII 8 คือ 00111000 บิตที่ผิดพลาดเกิดขึ้นในตำแหน่งที่ 4 นับจากทางขวามือ และจากการทดลองพบว่าการถอดรหัสข้อมูลที่ทางภาครับได้รับด้วยซอฟต์แวร์หลักสามารถถอดรหัสและได้ผลลัพธ์เป็นข้อมูลที่ถูกต้องตรงกับข้อมูลที่ส่งมาจริง 100% หากข้อมูลที่ภาครับได้รับมีความผิดพลาดไม่เกิน 10-15%

4.6 การสื่อสารภายในเครือข่าย

จากการทดลองพบว่าระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้บนมาตรฐานนี้สามารถรับส่งข้อมูลในรูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายโทโพโลยีทั้ง 3 โทโพโลยี ซึ่งประกอบด้วยโทโพโลยีแบบ Star โทโพโลยีแบบ Peer-to-Peer และโทโพโลยีแบบ Broadcast ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการเชื่อมต่อเข้ากันเป็นเครือข่ายนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับส่งข้อมูลของต้นแบบในเรื่องของระยะทางและเวลาที่ใช้ในการรับส่ง รูปที่ 4.8 แสดงการทดลองการรับส่งข้อมูลในโทโพโลยีแบบ Star โดยมีอุปกรณ์โคออดิเนเตอร์ 1 ตัว และอุปกรณ์ลูกข่าย 3 ตัว ที่มีระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ 20 cm และส่งที่ความเร็ว 100 kbps เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง



รูปที่ 4.8 การทดลองการรับส่งข้อมูลในโทโพโลยีแบบ Star

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นได้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.7 โดยเริ่มจากการศึกษาระบบการสื่อสารผ่านแสงศึกษาตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 จากนั้นทำการออกแบบระบบในส่วนต่างๆ เพื่อสร้างระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ให้ใกล้เคียงกับมาตรฐาน IEEE 802.15.7 มากที่สุด โดยมีการออกแบบทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมการรับส่งข้อมูลผ่านแสง และซอฟต์แวร์ซึ่งประกอบด้วยซอฟต์แวร์หลักบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ในการประมวลผลหลักและรองรับการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งาน และซอฟต์แวร์รองซึ่งทำงานบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีหน้าที่ในการประมวลผลคำสั่งที่ได้รับจากซอฟต์แวร์หลักและประมวลผลสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับจากฮาร์ดแวร์ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ที่นำมาศึกษานี้เป็นหนึ่งในมาตรฐานที่กำหนดขึ้นสำหรับการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ ภายในมาตรฐานกล่าวถึงหลักการทำงานในระดับ PHY Layer และ MAC Layer ของระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ โดยการออกแบบนี้ได้ยึดข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 802.15.7 รูปแบบ PHY I จากรูปแบบ PHY Layer ทั้งหมด 3 รูปแบบ และนำหลักการต่างๆ ในมาตรฐานมาใช้ เช่น การเข้ารหัสข้อมูล การถอดรหัสข้อมูล การเข้ารหัสข้อมูล รวมไปถึงลำดับการทำงานภายในโพรโทคอลรูปแบบต่างๆ ทั้งสามโพรโทคอลตามมาตรฐาน คือ โพรโทคอลแบบ Broadcast โพรโทคอลแบบ Star และโพรโทคอลแบบ Peer-to-Peer โดยอุปกรณ์สำหรับรับส่งข้อมูลผ่านแสงนี้ได้พัฒนาขึ้นด้วยเทคนิคทางฮาร์ดแวร์ที่หลากหลาย เพื่อให้อุปกรณ์สามารถรับส่งข้อมูลแสงในความเร็วสูงสุด 100 kbps ตามที่มาตรฐานรูปแบบ PHY I กำหนดได้ดี ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ ส่วนของแหล่งกำเนิดแสง ตัวรับแสง และวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์

จากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์การรับส่งข้อมูลผ่านแสงที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีช่วงความเร็วของการสื่อสารที่สามารถรับส่งได้ดีอยู่ในช่วงความเร็วตั้งแต่ 11500 bps ถึง 140000 bps ซึ่งเหมาะสำหรับการสื่อสารที่ความเร็ว 24440 bps หากอ้างอิงตามความเร็วการสื่อสารที่กำหนดโดยมาตรฐานโดยกำหนดไว้ 5 ความเร็วด้วยกันคือ 11670 24440 48890 73300 และ 100000 bps ระยะทางสูงสุดจากอุปกรณ์ภาคส่งไปยังภาครับที่อุปกรณ์การรับส่งข้อมูลผ่านแสงสามารถทำได้ดี โดยข้อมูลที่ได้รับทางภาครับมีความถูกต้อง 100 % นั้นมีระยะ 103 cm และเป็นการรับส่งด้วยความเร็วการสื่อสารที่ 24400 bps ซึ่งที่เป็นความเร็วที่ดีที่สุดในการสื่อสารของอุปกรณ์การรับส่งข้อมูลผ่านแสงนี้เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการส่งของภาคส่งและเวลาที่ใช้ในการรับของภาครับ รวมถึงเวลาในการประมวลผลของอุปกรณ์ของการรับส่งข้อมูลขนาดไม่เกิน 5000 byte พบว่าเวลาภาคส่งใช้เวลาเยอะกว่าทางภาครับ แต่ก็มากกว่าเล็กน้อยในระดับมิลลิวินาที (ms) เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการส่งของภาคส่งและเวลาที่ใช้ในการรับของภาครับ รวมไปถึงเวลาในการประมวลผลของอุปกรณ์ในการรับส่งข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสตามความเร็วการสื่อสารที่ใช้ของข้อมูลขนาด 500 byte ซึ่งมีขนาดของข้อมูลที่ได้รับหลังจากเข้ารหัสแล้วของความเร็วการรับส่งข้อมูล 11670 bps มากกว่าขนาดของข้อมูลที่ได้รับหลังจากเข้ารหัสแล้วของความเร็วการรับส่งข้อมูล 100000 bps อยู่ประมาณ 8 เท่า พบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนเวลาที่ใช้สำหรับการรับข้อมูลผ่านแสงของทางภาครับที่ความเร็ว 11670 bps มีค่ามากกว่าจำนวนเวลาที่ใช้สำหรับการรับข้อมูลผ่านแสงของทางภาครับที่ความเร็ว 100000 bps อยู่ประมาณ 8 เท่าเช่นกัน สำหรับโอกาสที่ข้อมูลทางภาครับได้รับจะผิดพลาดเพียงแค่บางส่วนนั้นมีน้อยมาก โดยส่วนมากแล้วหากเกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่ภาครับได้รับขึ้น ข้อมูลที่ได้รับจะมีความผิดพลาดสูงจนไม่สามารถกู้คืนด้วยการถอดรหัสได้ หรือไม่เช่นนั้นก็จะเกิดการผิดพลาดกับทุกบิตข้อมูลที่ได้รับจากการทดลองการถอดรหัสข้อมูลที่ได้รับด้วยซอฟต์แวร์หลัก พบว่าสามารถถอดรหัสและได้ผลลัพธ์เป็นข้อมูลที่ถูกต้องตรงกับข้อมูลที่ส่งมาจริง 100% ก็ต่อเมื่อข้อมูลที่ภาครับได้รับมีความผิดพลาดไม่เกิน 10-15% และจากการนำอุปกรณ์การรับส่งมาเชื่อมต่อกันในรูปแบบเครือข่ายโทโพโลยีทั้ง 3 แบบตามที่มาตรฐานกำหนดแล้วทำการทดลองรับส่งข้อมูลภายในเครือข่าย พบว่าสามารถรับส่งข้อมูลผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการพัฒนาระบบการสื่อสารผ่านแสงที่ตามองเห็นได้ในวิทยานิพนธ์นี้ ถึงแม้ว่าจะมุ่งออกแบบให้ระบบมีความใกล้เคียงกับมาตรฐานมากที่สุด แต่ยังคงมีหลักการทำงานอื่นๆ อีกมากที่ไม่ถูกนำมาพัฒนาในครั้งนี้ เช่น การเข้าจังหวะเวลา เนื่องจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถประมวลผลและรับส่งข้อมูลผ่านแสงที่ความเร็วนาฬิกา 200 kHz ได้ทัน ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จึงไม่ได้นำการเข้าจังหวะเวลาสำหรับการรับส่งข้อมูลผ่านแสงมาใช้ โดยใช้วิธีการรับส่งโดยตรวจสอบบิตเริ่มต้นและบิตปิดท้ายแทน ซึ่งจากผลกระทบของการไม่เข้าจังหวะเวลานี้ทำให้เสียประโยชน์ของข้อกำหนดโครงสร้างของการรับส่งข้อมูลบางส่วนไป เช่น ส่วนของ SHR ซึ่งเป็นฟิลด์นำหน้าของแพคเกจที่ใช้สำหรับการรับส่ง โดยมีแพทเทิร์นของ "10" ตามด้วย "10" อย่างน้อยจำนวน 64 บิต และยาวที่สุดจำนวนสำหรับทำหน้าที่ในการประสานเวลา ดังนั้นควรจะมีการพัฒนาต่อยอดเพิ่มเพื่อให้ระบบมีความใกล้เคียงกับมาตรฐานมากกว่านี้ ซึ่งจะช่วยให้ได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับมาตรฐานมากขึ้น เพื่อให้การศึกษามาตรฐาน IEEE 802.15.7 มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ขจิตพรธม กฤตพลวิมาน และคณะ. การจัดการและการออกแบบระบบโทรคมนาคม.
นนทบุรี : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช. 2556
- [2] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 15.7:
short-range wireless optical communication using visible light. New York :
2011.
- [3] Srikanth M K. “Data and voice communication at very high speed using Li-Fi”
International Journal for Scientific Research & Development (IJSRD). vol.3,
2015.
- [4] กัณฑ์ธรรม หงษ์คุสิต, ลักษิกา พุทธธรรม อดีตฯ สังข์เพชร และอาณกร เปรมศิริ. “พัฒนาการ
ของอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย จากสายไฟพระรุ่งพระรังสู่ Wireless connection!!.” [ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก : <https://sites.google.com/site/mobiletechnology101/>. 2559.
- [5] E. Sarbazi and M. Uysal. “PHY layer performance evaluation of the IEEE 802.15.7
visible light communication standard” 2nd International Workshop on Optical
Wireless Communication (IWOW). October, 2013. pp. 35-39.
- [6] F. Che, B. Hussain, L. Wu and C. P. Yue. “Design and implementation of IEEE
802.15.7 VLC PHY-I transceiver” 12th IEEE International Conference on Solid-
State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). 2014.
- [7] P. Namonta and P. Cherntanomwong. “The Improvement of Repeater System
for Visible Light Communication” 2016 13th International Conference on
Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and
Information Technology (ECTI-CON). 2016. pp. 1-6.
- [8] Hengdayi. “TSL12SM-LF” [Online]. Available : www.hengdayi.com. 2017.
- [9] Kessler Electronic. “SFH203P” [Online]. Available : www.kessler-electronic.de.
2017.
- [10] Siam Lighting. “ไดโอดเปล่งแสง (light-emitting diode)” [ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก : www.siamlighting.com. 2557.
- [11] Clee LED. “Cree XLamp XM-L Cool White LEDs U3 Bin 1A Tint” [Online].
Available : www.lck-led.com. 2557.
- [12] ThaiEasyElec. “บทความ Arduino คืออะไร? ตอนที่1 แนะนำเพื่อนใหม่ที่ชื่อ Arduino”
[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : www.thaieasyelec.com. 2557
- [13] SparkFun Electronics. “Arduino XBee Shield” [Online]. Available :
www.sparkfun.com. 2017.
- [14] P. MARIAN. “Arduino Mega 2560 Pinout” [Online]. Available :
www.electroschematics.com. 2017.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] Ian Poole. “Op Amp Slew Rate: Tutorial; Formula; Calculator” [Online]. Available : www.radio-electronics.com. 2017.
- [16] Apisith Krasang. “ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (FET)” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://sisketelectronics.blogspot.com>. 2560.
- [17] All About Circuit. “Filter Circuits” [Online]. Available : www.allaboutcircuits.com. 2017.
- [18] ElectronicsTutorials. “High Pass Filter” [Online]. Available : www.electronics-tutorials.ws. 2016.
- [19] วิจิตพล. “มาตรฐาน IEEE” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://blogger-wichipon.blogspot.com>. 2555.
- [20] พงษ์ศักดิ์ สุธัมพันธ์ไพบูลย์. “WPAN (Wireless Personal Area Network)” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.technologymedia.co.th>. 2560.
- [21] Gordonpovey. “Top 10 Visible Light Communications Applications” [Online]. Available : <http://visiblelightcomm.com>. 2011.
- [22] DHGate. “Led Optical Convex Lens” [Online]. Available : www.dhgate.com. 2017.
- [23] P. Namonta and P. Cherntanomwong. “Real Time Vital Sign Transmission Using IEEE 802.15. VLC PHY-I Transceiver” 5th International Electrical Engineering Congress (IEECON). 8-10 March, 2017. pp. 453-456.
- [24] J. Gancarz, H. Elgala and T.D.C. Little. “Impact of lighting requirements on VLC systems” Communications Magazine, IEEE. vol. 51, December, 2013. pp. 34-41.
- [25] S. Haruyama. “Advances in visible light communication technologies” Optical Communications (ECOC), 2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communication. Amsterdam. September, 2012. pp.1-3.
- [26] S. Haruyama. “Visible light communication using sustainable LED lights” ITU Kaleidoscope: Building Sustainable Communities (K2013). April, 2013. pp.1-6.
- [27] F. Che, L. Wu and X. Li. “A fully integrated IEEE 802.15.7 visible light communication transmitter with on-chip 8-W 85% efficiency boost LED driver” Journal of Lightwave Technology. vol. 34, no. 10, May, 15, 2016.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] P. Namonta and P. Cherntanomwong. "The Improvement of Repeater System for Visible Light Communication" 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Chiang Mai, Thailand. pp. 1-6.
- [2] P. Namonta and P. Cherntanomwong. "Real Time Vital Sign Transmission Using IEEE 802.15.7 VLC PHY-I Transceiver" 5th International Electrical Engineering Congress (iEECON). Pattaya, Thailand. 8-10 March 2017. pp. 453-456.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Final Program

ECTI-CON 2016

ChiangMai Thailand, June 28 - 1 July , 2016

13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics
Computer, Telecommunications and Information Technology



Illustrated by Assoc.Prof. Wichit Chomtaveewiroot

Rajamangala University of Technology Lanna
ChiangMai, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Improvement of Repeater System for Visible Light Communication

Pornchanok Namonta
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
smmeaz@hotmail.com

Panarat Chertanomwong
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
panarat.ch@kmitl.ac.th

Abstract—Visible Light Communication (VLC) Technology is the short range optical wireless communication technology using LEDs for communication and illumination. In this paper, we propose the improvement of the repeater system for visible light communication. Not just to extend the coverage, but also to transfer file and to increase the communication speed. Our proposed repeater system is composed of hardware and software components. The transmitter opens, splits, and sends a file with RS-232 serial communication interface. The byte data type is converted into light signal data type by using the on-off keying modulation (OOK) technique and is transmitted via LED. The repeater receives light signal data by photodiode then transmits it out again. With this method, light signal is amplified at each repeater. The receiver converts light signal data back into byte data and combines each set of bytes together, then the file can be saved by the user. This multi-hop communication gives more flexibility in communication because it helps to increase the distance between transmitter terminal and receiver terminal. Moreover, it also helps to avoid obstacle objects, such as walls, because VLC is a Line-of-Sight (LOS) technology. This system is improved from our previous system in terms of the number of sending character and the communication speed.

Keywords—Visible Light Communication (VLC); optical wireless communication; LED; repeater system; multi-hop communication

I. INTRODUCTION

Nowadays, well-known wireless communication technologies using radio wave as a carrier for transferring data have some limits. One of them is the capacity of the channel that brings to data congestion and obstacle to development. Number of users is also a cause of signal interference [1]. There is a technology that deals with the data congestion problem of radio wave and also has more security in communication because the hacker cannot receive the signal instead of Line-of-Sight (LOS). This technology is called Visible Light Communication (VLC) [2].

VLC is a wireless communication technology that uses light wave length between 375nm – 780nm which is visible to humans as a carrier [3]. Compare to other wave types, visible light is not harmful to human body and it is able to transmit with high power. There are no legal limitations for any existing light sources. It can use at the place where radio wave cannot be used, for example, hospital and area around the precision

machine [4]. One of the limits is that the distance between transmitter side and receiver side is not much.

In this paper, moreover than to increase the distance between transmitter side and receiver side by implementing the repeater for VLC [5], is to bring more applications to the repeater system and increase its communication speed by changing some parts of hardware and creating new software program. With this improvement, the user can transfer the file via Light Emitting Diode (LED) in a long range, also can avoid the obstacle by setting the direction of the repeater.

II. METHODS

A. System Overview

Our prototype system composes of two transceivers and one repeater as shown in Fig. 1. One transceiver includes transmitter and receiver circuit, LED, lens, photodiode, and microcontroller. Software at the transmitter side opens, splits, and sends the file to the microcontroller. The microcontroller of the left transceiver receives data from user's computer through the USB port and sends data out using RS-232 serial communication interface. The byte data type is converted into light signal data type by using the on-off keying modulation (OOK) technique and is transmitted via LED. The repeater includes one microcontroller and two of transmitter and receiver circuit, photodiode, LED, and lens. This photodiode receives light from the LED of the transceiver and sends it in the form of electrical signal to the microcontroller. The microcontroller will process and forward electrical signal to another transceiver in the form of light through air using the LED. Photodiode at the right transceiver receives light from the repeater and send light signal to the microcontroller. The microcontroller then converts this signal into byte data and sends it to user's computer through USB port. Software at the receiver side receives byte data and combines each set of bytes together, then the file can be saved by the user. Moreover, the right transceiver have to send data back to the left transceiver passing through the repeater to cancel or to accept the file transfer request and to remind the user that data sending is completed.

The microcontroller boards in system are all changed from Arduino Uno Revision 3 board to Arduino Mega2560 Revision 3 board because one more serial port is needed. One of the

serial port is used for communication between user's computer and microcontroller board and another one is used for communication between each microcontroller board.

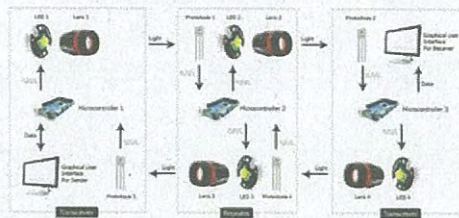


Fig. 1. The system overview.

B. System Details

For the transceiver, transmitter circuit and receiver circuit are connected together to the same microcontroller. This microcontroller works in both functions, receiving and sending. And for the repeater, two sets of transceiver circuit are combined by using only one microcontroller and only one IC MCP6402.

In transmitter circuit, the relay driver IC ULN2803 is used to light up the LED. This IC ULN2803 is an Integrated Circuit (IC) chip with a High Voltage/High Current Darlington Transistor Array which allows to interface TTL signals with higher voltage/current loads. The modulated signal sends through serial port from microcontroller passes through pull-up resistor connected to pin 1 of the IC. Negative pin of the LED is connected to pin 18, the output pin of IC ULN2803. Ground and 5 volts DC are supplied from Arduino Mega2560 Revision 3 board. The transmitter circuit is shown in Fig. 2.

In receiver circuit, photodiode contained in TSL12S-LF is used to receive light. This TSL12S-LF contains photodiode, resistor, capacitor and op-amp inside. IC MCP6402 which contains two op-amps inside is used as a voltage comparator. Output signal will be sent to Arduino Mega2560 Revision 3 board and gotten through process before sending to user's computer. The receiver circuit is shown in Fig. 3.

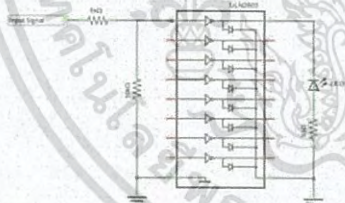


Fig. 2. The transmitter circuit.

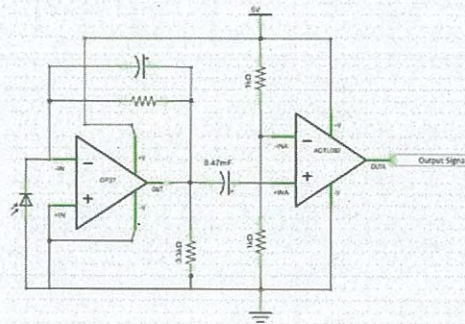


Fig. 3. The receiver circuit.

LED and lens are attached to the flashlight's cylinder of the transmitter. In this case, the condenser lens is used for making the beam sufficiently thin. This flashlight's cylinder can be bent upward, downward, left or right which allows the user to set the path direction. Fig. 4 shows the transceiver module, the box contains microcontroller and the circuit for transceiver inside.

Fig. 5 shows the example of sending in straight direction and the distance per hop is set at 550 cm. In this case, one repeaters are used. This example take place under average intensity of light equal to 150 lux. The transmission range is extended to 1650 cm, adding one repeater equals to extending the distance for 550 cm.

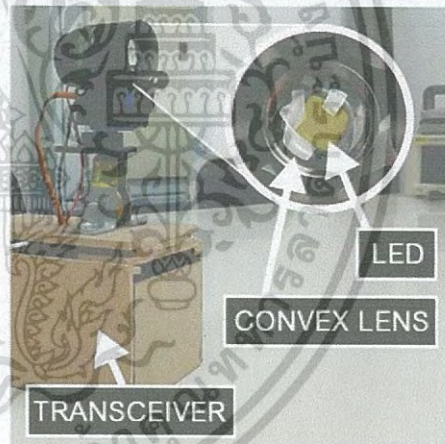


Fig. 4. The transceiver module.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

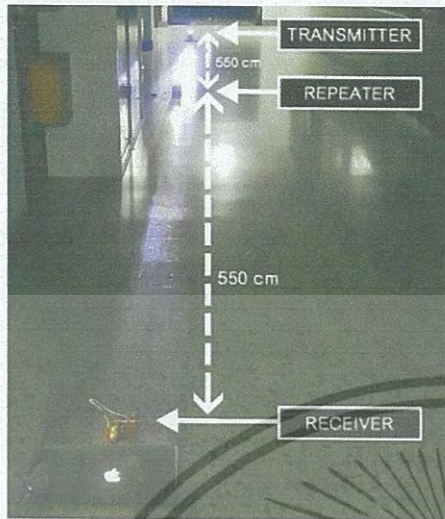


Fig. 5. Example of repeater system sending in straight direction.

Fig. 6 shows the example of the repeater system using to avoid the obstacle object. The terminal node is the transceiver module and the node in between two terminal nodes is the repeater module. The red dash line indicated the path which is unable to use for communication because of the obstacle object make Non-Line-of-Sight (NLOS) communication condition. The white dash line indicated the path which can be used for communication because of LOS communication condition.

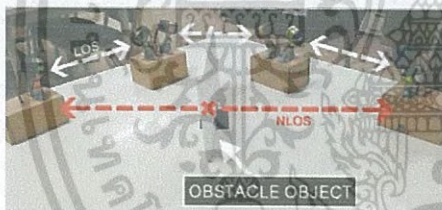


Fig. 6. Example of repeater system using to avoid the obstacle object.

Instead of using the microcontroller to convert byte data type into binary data type for writing a 1 or a 0 value to a digital pin by using Shift Bit Process and another digital pin of Arduino Uno Revision 3 board for interrupt as before [5], the improvement of the repeater system for VLC uses RS-232 serial communication interface to communicate with the circuit

by using TX and RX pin of Arduino Mega2560 Revision 3 board.

C. User Interface

There are two programs in this system, one is for the transmitter and another is for receiver. Before using the system, for both programs, the user must select port from drop down box which will be connected to the microcontroller. Refresh button is for clearing the port name in drop down box and then finding port again. There is a status bar at the bottom of the window to show program status such as serial port connected, serial port disconnected, and file transfer progress.

The transmitter program is shown in Fig. 7. Text box shows path directory of the selected file. When Send button is pressed, transmitter program will send the request to the receiver program. This file transfer request shows filename, size, and computer name of the transmitter at the receiver program as shown in Fig. 8. If the request is cancelled, transmitter program will not send anything back to the receiver program. By the way, if the request is accepted, transmitter program will start the process for sending file to the receiver program.

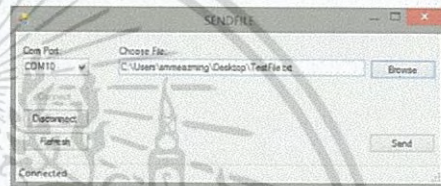


Fig. 7. User interface of transmitter program.

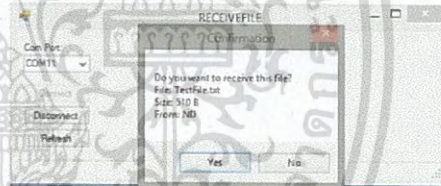


Fig. 8. Pop-up window of file transfer request at receiver program.

The process of file sending is to save the whole file into buffer and divide it into a set of 60 bytes and send each set at a time to the receiver program, one after another respectively until the last byte.

The pop-up window for showing the file transfer status will be shown at the transmitter program as shown in Fig. 9 if the receiver program received all bytes and sent the confirmation back.

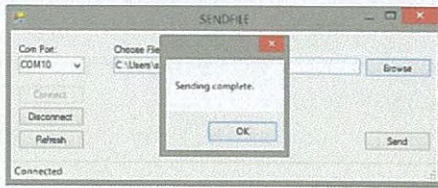


Fig. 9. Pop-up window of file transfer status shows "Sending complete" at transmitter program.

If the transmitter does not receive acknowledge in time which is calculated from the file size, then it will assume that the connection path is broken and pop-up window will appear to notify that runtime error is occurred as shown in Fig. 10.

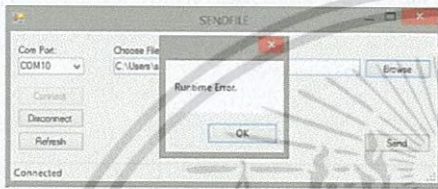


Fig. 10. Pop-up window of file transfer status shows "Runtime Error" at transmitter program.

There is a SLog.txt file which contains file name, path directory, request status, date and time of sending, as well as the confirmation of file transfer time if completed in sending. The example is shown in Fig. 11. The top one shows that file transfer request got cancel but in another one, sending is completed.

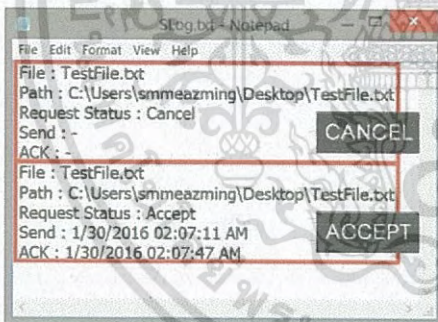


Fig. 11. Slog.txt file.

The receiver program is shown in Fig. 12. When receiving, the progress bar will increase up according to received bytes. If all bytes received, Next button will be enable.

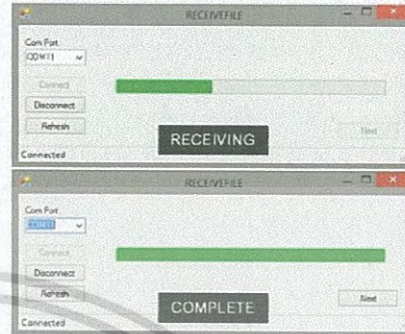


Fig. 12. Progress bar of receiver program.

After clicking the Next button, next page will appear as shown in Fig. 13. The Browse button is for the user to choose place to save file and also choose file name or the user can use a default file name. After name and path selection, click the Finish button to save file.



Fig. 13. User interface of receiver program after the Next button is clicked.

There is also a log file for the receiver program named RLog.txt which contains file name and received time. The example is shown in Fig. 14.

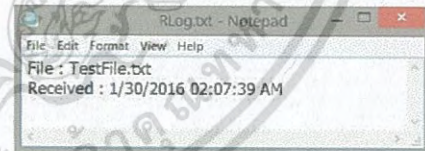


Fig. 14. User interface of receiver program after the Next button is clicked.

III. RESULTS

A. Sending and Receiving Using RX and TX Pin

The result from sending text data using RX and TX pin of Arduino Mega2560 Revision 3 board is shown in Fig. 15. The fastest baud rate that the receiver can receive data correctly is 74880 bits per second.

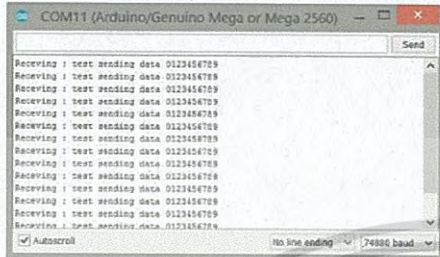


Fig. 15. Received data on receiver side.

B. Sending and Receiving Text File Using RX and TX Pin with Transmitter Program

The result from sending text file using RX and TX pin of Arduino Mega2560 Revision 3 board with transmitter program is shown in Fig. 16. The fastest baud rate that the receiver can receive data correctly is 57600 bits per second. Inside the red square is a file transfer request sending from transmitter program to receiver program in a set of bytes, text after the red square are received TestFile.txt.

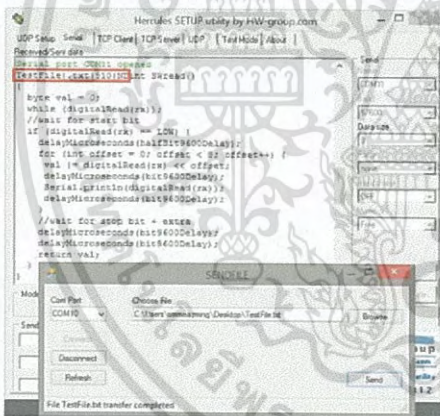


Fig. 16. Received data on receiver side.

C. Sending and Receiving MP4 File Using RX and TX Pin with Transmitter Program

From sending MP4 file using RX and TX pin of Arduino Mega2560 Revision 3 board with transmitter program, the fastest baud rate that the receiver can receive data correctly is 57600 bits per sec, still the same as sending text file. Checking byte data type by using debugging in Microsoft Visual Studio Express 2013 as shown in Fig. 17.

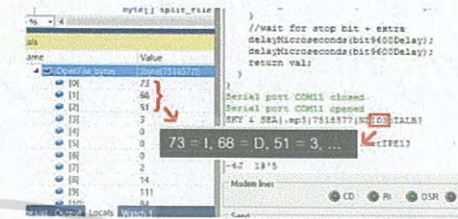


Fig. 17. Example of checking byte data type.

D. Sending and Receiving File Using RX and TX Pin with Transmitter and Receiver Program

Text, MP4, Zip file have been tested, the fastest baud rate that the receiver can receive data correctly is still 57600 bits per second. That means the files can be transmitted without error.

E. Maximum Distance between 2 Nodes

The experiment, as shown in Fig. 18, takes place in the environment with average intensity of light equal to 160 lux. The distance between lens and LED is set to default at 5 mm. The longest distance between LED and photodiode that the receiver can receive data correctly is 590 cm.



Fig. 18. Received data on receiver side.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV. CONCLUSION

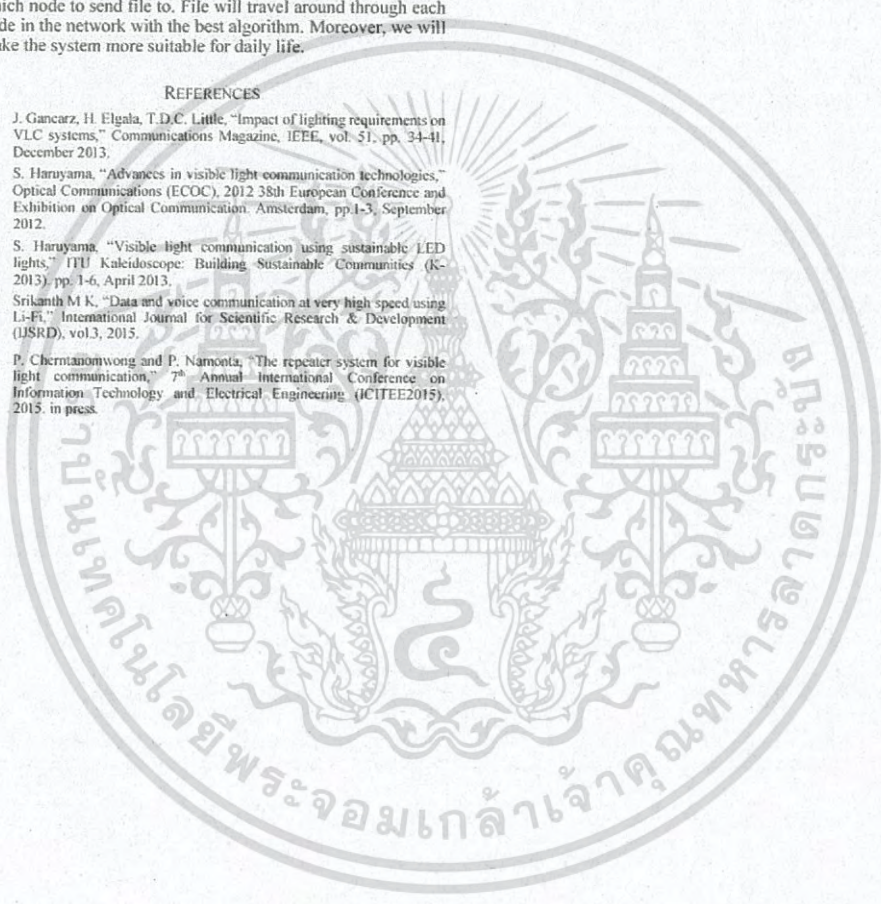
In this work, the improvement of the repeater system for visible light communication is implemented to solve the limitation of the number of input characters by using RS-232 serial communication interface to communicate with the circuit by using TX and RX pin of Arduino Mega2560 Revision 3 board instead of using microcontroller to convert byte data type into binary data type for writing a 1 or a 0 value to a digital pin by using Shift Bit Process and using another digital pin of Arduino Uno Revision 3 board for interrupt as before which can send text only 62 bytes.

The improved system can send and receive any file type with any data size. With RS-232 serial communication interface, the communication speed also increase up from 30 bits per second to 57600 bits per second.

For the future works, we plan to connect every node together with the best topology of connection. User can select which node to send file to. File will travel around through each node in the network with the best algorithm. Moreover, we will make the system more suitable for daily life.

REFERENCES

- [1] J. Gancarz, H. Elgala, T.D.C. Little, "Impact of lighting requirements on VLC systems," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 51, pp. 34-41, December 2013.
- [2] S. Haruyama, "Advances in visible light communication technologies," *Optical Communications (ECOC), 2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Amsterdam, pp.1-3, September 2012.
- [3] S. Haruyama, "Visible light communication using sustainable LED lights," *ITU Kaleidoscope: Building Sustainable Communities (K-2013)*, pp. 1-6, April 2013.
- [4] Srikanth M.K., "Data and voice communication at very high speed using Li-Fi," *International Journal for Scientific Research & Development (IJSRD)*, vol.3, 2015.
- [5] P. Chertanomwong and P. Namonta, "The repeater system for visible light communication," *7th Annual International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE2015)*, 2015, in press.



iEECON 2017

The 2017 International Electrical Engineering Congress

8-10 MARCH 2017, PATTAYA THAILAND



Proceedings

VOLUME II

COMMUNICATIONS

ELECTRONICS & CONTROL

DIGITAL SIGNAL PROCESSING

COMPUTER & IT

Organized by



Technical Co-sponsored by



Sponsored by



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Real Time Vital Sign Transmission Using IEEE 802.15.7 VLC PHY-I Transceiver

Pornchanok Namonta
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
smmeaz@hotmail.com

Panarat Chertanomwong
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
panarat.ch@kmitl.ac.th

Abstract—Visible Light Communication (VLC) Technology is the short range optical wireless communication technology using the light source such as LEDs for data transmission. The major advantage of VLC is that it causes no interference to RF-based devices. This makes wireless communication possible in RF hazardous areas such as in a hospital. In addition, simple installation procedures and band licensing-free characteristic also help to increase VLC's potential to be developed as an alternative, or even a new standard to the wireless communication scheme. For IEEE 802.15.7 VLC standard, it consists of PHY I, II and III operating modes. In this paper, we first focus on analyzing PHY I with OOK modulation, which is targeted towards applications requiring data rate range from 11.67 kb/s to 100 kb/s with 200 kHz optical clock rate. Moreover, we propose the improvement of the real time vital sign transmission based on IEEE 802.15.7 VLC standard using PHY I operating modes for sending the vital signs data, which are temperature and heart rate. This system is improved from our previous system in many terms. The obvious improvement is the communication speed. Moreover, the transmission range is able to be increased by adding the VLC repeater.

Keywords—Visible Light Communication (VLC); optical wireless communication; LED; IEEE 802.15.7 PHY-I

I. INTRODUCTION (HEADING 1)

In recent years, a visible light communication (VLC) is being regarded as a compelling technology in wireless communication field. Low-cost LEDs are also expected to replace the existing fluorescent and incandescent lights and dominate the general illumination market in the near future [1]. This expected wide-scale availability of LEDs opens the door for VLC.

VLC is a wireless communication technology that uses light wave length between 375 nm – 780 nm which is visible to humans as a carrier [3]. VLC provides the simultaneous use of LEDs for both lighting and communication purposes. With a white LED, it can be pulsed at hundreds of megahertz. This qualification makes it possible to transmit data at high speeds, which human eye cannot perceive the light changes [4].

Compared with conventional radio frequency (RF) wireless communications, VLC offers several unique advantages. It has no RF radiation and electromagnetic interference. VLC is a line-of-sight communication which provides high security in communication. Moreover, it uses unlicensed visible light

spectrum with hundreds-of-THz bandwidth and compatibility with illumination infrastructure [5].

There are a few standards for VLC in these days, including 802.11 IP PHY, IEEE 802.15.7 and JETTA CP-1221 [6]. PHY and a MAC layers for short-range optical wireless communications using visible light in optically transparent media are defined in IEEE 802.15.7. The standard is capable of delivering data rates sufficient to support audio and video multimedia services and also considers mobility of the visible link, compatibility with visible-light infrastructures, impairments due to noise and interference from sources like ambient light and a MAC layer that accommodates visible links [7].

The IEEE 802.15.7 standard offers three physical (PHY) types for VLC. PHY I operates from 11.67 kb/s to 266.6 kb/s, PHY II operates from 1.25 Mb/s to 96 Mb/s and PHY III operates between 12 Mb/s and 96 Mb/s. PHY I and PHY II are defined for a single light source, and support on-off keying (OOK) and variable pulse-position modulation (VPPM). PHY III uses multiple optical sources with different frequencies (colors) and uses a particular modulation format called color shift keying (CSK).

In this paper, we will firstly focus on the OOK modulation of PHY I. Even though the data rate is low, it is able to be used with various applications such as a localization using VLC, a commercialization using VLC and a simple wireless communication using VLC in the hospital. After merging the standard with our previous work, a real time vital sign transmission using VLC [8], the data rate is improved by 1000 times. Furthermore, to extend the distance between the transmitter and the receiver, the VLC repeater which was implemented in our previous work [9] is able to be used here for increasing the transmission distance and for avoiding obstacles.

The paper is organized as follows. Section II briefly introduces the PHY I operating modes of the IEEE 802.15.7 standard and discusses on physical-layer data unit (PPDU) and the encoding and modulation. The design and the circuit implementation, as well as the experiment results are presented in Section III. Section IV describes the improvement of the real time vital sign transmission based on IEEE 802.15.7 VLC PHY-I. Section V shows the experiment of vital sign

transmission with a 4-Direction repeater. Finally, this paper is summarized in section VI.

II. PHY-I OPERATION MODES

The specification of PHY I operating modes is shown in Fig. 1. For the OOK modulation, the data rates range from 11.67 kb/s to 100 kb/s, while for VPPM (variable pulse position modulation), the data rates are range from 35.56 kb/s to 266.6 kb/s.

TABLE I
PHY I OPERATING MODES

Modulation	RLC code	Optical clock rate	FEC		Data rate
			Outer code (RS)	Inner code (CC)	
OOK	Manchester	200 kHz	(15,7)	1/4	11.67 kb/s
			(15,11)	1/3	24.44 kb/s
			(15,11)	2/3	48.89 kb/s
			(15,11)	None	73.3 kb/s
			none	None	100 kb/s
VPPM	4B6B	400 kHz	(15,2)	None	35.56 kb/s
			(15,4)	None	71.11 kb/s
			(15,7)	None	124.4 kb/s
			none	None	266.6 kb/s
			none	None	266.6 kb/s

Fig. 1. Format of the PHY-I operating modes.

A. Physical-layer Data Unit (PPDU)

Following to the physical-layer of the standard, before each data transmission, data must get packed into a physical-layer data unit (PPDU). Each PPDU consists of a synchronization header (SHR), a physical-layer header (PHR), and a PHY service data unit (PSDU). The PPDU format is shown in Fig. 2.

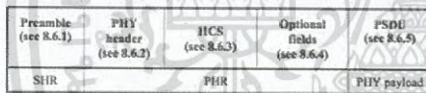


Fig. 2. Format of the PPDU.

The SHR is the preamble field which is used by the transceiver to obtain the optical clock the synchronization with an incoming message. The standard defines one fast locking pattern (FLP) followed by choice of four topology dependent patterns (TDPs) for the purposes of distinguishing different PHY topologies. The FLP is fixed to start as a "1010..." pattern i.e., it ends with a '0'.

The preamble field for single data mode shall be formatted as illustrated in Fig. 3. For the burst mode transmission, the FLP shall be included only for the first frame.

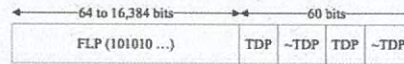


Fig. 3. Format of the preamble field.

The PHR consists of a PHY header, a header checks sequence (HCS) and the optional fields.

The PHY header contains many important information for PHY payload, such as the length of PSDU field. This PHY header shall be sent at the lowest data rate for the chosen optical clock rate. Therefore, in this paper, the data rate for PHY header is 11.67 kb/s.

The HCS is a 2 octet CRC-16 of the PHY header. The CRC shall be calculated using the following standard generator polynomial of degree 16 (1). The registers shall be initialized to all ones.

$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (1)$$

The optional field for PHY I with an optical clock rate of 200 kHz is six tail bits of zeroes.

The PSDU field carries the data of the PHY frame or called PHY payload. Six tail bits of zeroes are also attached here, at the end of the PSDU.

B. Encoding and Modulation

For PHY I, concatenated coding is used with a combination of Convolutional Code (CC) and a Reed-Solomon Code (RS). The RS encoder output is padded with zeroes to form an interleaver boundary. The padded zeroes are then punctured and the result is sent to the inner convolutional encoder. In the last step of the scheme, the result from the CC encoder will be sent to the Run Length Limit (RLC) encoder. The PHR and PSDU parts of the PPDU are subject to the FEC for error protection. A reference implementation of the modulator is shown in Fig. 4.

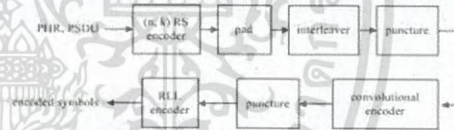


Fig. 4. Reference modulator diagram for PHY I.

III. EXPERIMENT AND RESULT

According to the reviewed papers, e.g. [6], many comparisons of each rule in IEEE 802.15.7 VLC standard are described. Here is one new comparison, which is the comparison of the distance between the transmitter and the receiver of each rule in PHY-I 200 kHz optical rate.

Fig. 5 shows the transmitter circuit which is the same as the transmitter circuit using in our previous work [9].

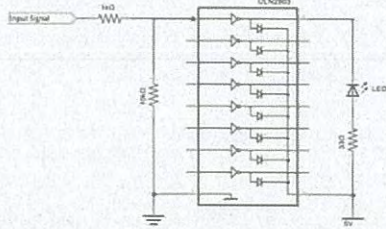


Fig. 5. Schematic of the Transmitter Circuit.

Fig. 6 shows the receiver circuit. This circuit is different from our previous work [9]. SFH203P is using here as the photodiode instead of TSL12S-LF to receive the light more perfectly in straight direction. Nevertheless, using of SFH203P makes the distance between the transmitter and the receiver decreases. To achieve 200 kHz clock rate corresponding to the standard, the dual op-amp is changed from MCP6402 to TSV992AIDT due to the low slew rate of the old one.

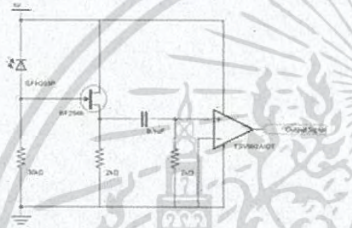


Fig. 6. Schematic of the Receiver Circuit.

The experimental result of the comparison between the maximum distances of each data rate is shown in Fig. 7. The distance displayed in the graph is the maximum distance between the transmitter and the receiver which makes the system able to transmit and receive data correctly without any average error in 5 sets of data, with 500 random data in each set. The x-axis is the data rate in kb/s, while the y-axis is the distance in centimeter.

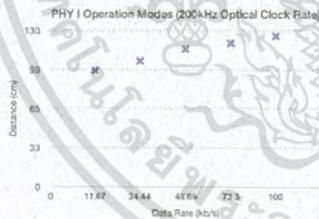


Fig. 7. Comparison between the maximum distance of each data rate.

IV. REAL TIME VITAL SIGN TRANSMISSION

Here, we use the IEEE 802.15.7 VLC standard PHY-1 with the previous real time vital sign transmission system [8] to improve the data rate from 1 kb/s to 100 kb/s.

At the transmitter side, the temperature sensor and the heart rate sensor are using here to gather user information. This data will pass through the encoding and modulation schemes for transmitting as a light signal. At the receiver side, the receiver circuit will help to convert the light signal received from the photodiode into data. Next, this data will pass through decoding and demodulation schemes and will display in the receiver side program.

Fig. 8 shows the experiment of the real time vital sign transmission, working perfectly with the data rate of 100 kb/s.



Fig. 8. Experiment of the real time vital sign transmission.

The VLC transceiver program is using in both sides of the system, transmitter side and receiver side. To use this program, the user must first select the COM port, the data type and the data rate. There are two types of data, primary data and secondary data. Choosing of primary data, program will get the real time vital sign data from the sensors. Otherwise, choosing of secondary data, program will get the previously stored data directly from the textbox displayed in the program.

Fig. 9 shows the example of using the program at the transmitter side. The primary data sending here are temperature and heart rate, 37.01 °C and 87 bpm respectively.

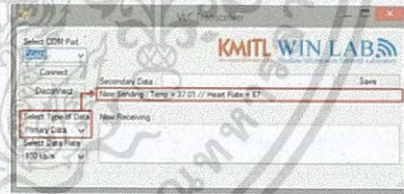


Fig. 9. Program at the transmitter side.

Fig. 10 shows the example of using the program at the receiver side, receiving the data and displaying line by line.

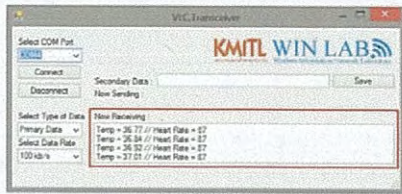


Fig. 10. Program at the receiver side.

V. VITAL SIGN TRANSMISSION WITH A REPEATER

Not only to study on the standard and to increase the data rate of the real time vital sign transmission system, we also try to add the implemented VLC repeater [9] in this improved system to increase the distance between the transmitter and the receiver and to avoid the obstacle in communication. The result of the experiment shows that the addition of the VLC repeater is able to extend the distance perfectly. One of VLC repeater can help increasing the distance of 590 cm.

Fig. 11 shows the example of the experiment using a 4-directional VLC repeater as the repeater in the system.

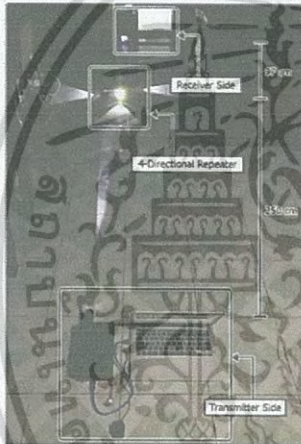


Fig. 11. Experiment of vital sign transmission with a 4-direction repeater.

The temperature and heart rate data is transmitted and received in 100 kb/s using secondary data saved at the transmitter side. With the limit space of the experiment room, the repeater here helps extending the distance of 250 cm instead of maximum length of 590 cm.

VI. CONCLUSION

In this work, real time vital sign transmission using IEEE 802.15.7 VLC PHY-1 transceiver is implemented to study the physical layer of the IEEE 802.15.7 VLC standard and to increase the data rate from 1 kb/s of our previous system. Changed of the receiver circuit and the software, the system is able to transmit and receive the real time temperature and heart rate smoothly in 100 kb/s. The comparison between each rule of PHY-1 200 kHz clock rate in term of the distance between the transmitter and receiver shows that the different of distance of each rule is not much, by changing the distance of 1 cm can make big damage to the received data.

In addition, we also added the implemented VLC repeater in this improved real time vital sign transmission system. The result of the experiment shows that the addition of one VLC repeater is able to extend the distance perfectly, maximum of 590 cm.

For the future work, we plan to study more on the IEEE 802.15.7 VLC standard. The next and next layer will be included in the system, the MAC sublayer and the MAC layer.

ACKNOWLEDGMENT

This research work is financial supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

REFERENCES

- [1] J. Concarz, H. Elgala and T.D.C. Little, "Impact of lighting requirements on VLC systems," *Communications Magazine*, IEEE, vol. 51, pp. 34-41, December 2013.
- [2] S. Haruyama, "Advances in visible light communication technologies," *Optical Communications (ECOC)*, 2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communication, Amsterdam, pp.1-3, September 2012.
- [3] S. Haruyama, "Visible light communication using sustainable LED lights," *ITU Kaleidoscope: Building Sustainable Communities (K-2013)*, pp.1-6, April 2013.
- [4] E. Sarbazi and M. Uysal, "PHY layer performance evaluation of the IEEE 802.15.7 visible light communication standard," *2nd International Workshop on Optical Wireless Communication (IWOW)*, pp. 35-39, October 2013.
- [5] F. Che, L. Wu and X. Li, "A fully integrated IEEE 802.15.7 visible light communication transmitter with on-chip 8-W 85% efficiency boost LED driver," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 10, May 15, 2016.
- [6] F. Che, B. Hussain, L. Wu and C. P. Yue, "Design and implementation of IEEE 802.15.7 VLC PHY-1 transceiver," *12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, 2014.
- [7] "IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 15.7: short-range wireless optical communication using visible light," *IEEE Std 802.15.7-2011*, 2011.
- [8] Y. F. Luekyarno, "Real time vital sign transmission using VLC," *Regional Conference on Computer and Information Engineering (RCCIE 2016)*, Yangon, Myanmar, 2016, in press.
- [9] P. Namonta and P. Chertanontwong, "The improvement of repeater system for visible light communication," *13th International Conference on Electrical-Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2016.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวพรชนก นามอ่อนตา
วัน เดือน ปีเกิด	13 กันยายน 2536 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	1667 ซ.ลาดกระบัง 11/11 ถ.ลาดกระบัง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
ประวัติการศึกษา	2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ (เกียรตินิยมอันดับ1) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) 2.) พัฒนาโปรแกรมภาษา C# 3.) กราฟิกดีไซน์ (Graphic Design)
ประสบการณ์การทำงาน พ.ศ.2559-ปัจจุบัน	วิศวกรจรรยาจรทางอากาศ บริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้