

รายงาน

แนวทางมาตรฐานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (Visible Light Communication Standard)

โดย

รศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์

ผศ.ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์

รศ.ดร.อนันต์ สืบสำราญ

ดร.กมล เขมะรังษี

รศ.ดร.ปรีชา กอเจริญ

ภายใต้โครงการพัฒนาความพร้อมระดับประเทศของการสื่อสารด้วยแสงสว่าง: การถ่ายทอดเทคโนโลยี การพัฒนาบุคลากรด้านกิจการโทรคมนาคม การจัดทำร่างมาตรฐาน และสื่อสนับสนุนโดย กสทช. และ กทปส.

สิงหาคม 2559

คำนำ

การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (VLC: visible light communication) เป็นเทคโนโลยีใหม่ด้านการสื่อสารไร้สายโดยใช้แสงที่อยู่ในช่วงที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้เป็นตัวกลางนำพาสัญญาณ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ดังนั้นหลายๆ ประเทศในปัจจุบันนี้ให้ความสนใจในเทคโนโลยีนี้ และได้ออกเป็นมาตรฐาน VLC ของแต่ละองค์กร

รายงานมาตรฐานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ เป็นแนวทางให้ผู้สนใจที่ต้องการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้งานได้ทราบถึงข้อกำหนดและหลักเกณฑ์ต่างๆ ที่จำเป็นที่จะทำให้อุปกรณ์หรือระบบการสื่อสารที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้งานร่วมกันได้ แม้ว่าอุปกรณ์หรือระบบจะถูกสร้างขึ้นจากผู้ผลิตหรือผู้พัฒนาที่แตกต่างกัน โดยรายงานฉบับนี้จะเน้นไปที่มาตรฐาน CP-1223 ของประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากเป็นการสื่อสารแบบทิศทางเดียวและสามารถพัฒนาเป็นอุปกรณ์รับส่งได้ง่าย นอกจากนี้ยังกล่าวถึงมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งจะครอบคลุมการใช้งานในวงกว้าง สุดท้ายจะให้ข้อเสนอแนะในการตัดสินใจเลือกมาตรฐาน VLC ไปใช้งาน

คณะผู้วิจัย

สิงหาคม 2559

สารบัญ

1. บทนำ.....	1
2. มาตรฐาน CP-1223.....	3
3. มาตรฐาน IEEE 802.15.7.....	6
3.1 ทอพอโลยีเครือข่าย.....	7
3.2 สเปกตรัมในสถานะการกล้ำสัญญาณ.....	9
3.3 สถาปัตยกรรม.....	9
3.4 ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ (ชั้น MAC).....	11
3.4.1 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ.....	11
3.4.2 การเริ่มต้นเครือข่าย VLC.....	14
3.4.3 การเข้าร่วมและออกจากเครือข่าย.....	15
3.4.4 การเข้าจังหวะเวลา.....	16
3.4.5 การรองรับการทำรายการ.....	16
3.4.6 การส่งผ่าน การรับ และการตอบรับ.....	17
3.4.7 การจัดการและการจัดสรร GTS.....	20
3.4.8 การกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็ว.....	20
3.4.9 การกำหนดทรัพยากรหลายช่องสัญญาณ.....	21
3.4.10 การออกแบบเซลล์การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นและการรองรับการเคลื่อนที่.....	23
3.4.11 การรองรับฟังก์ชันการแสดงผลสี.....	25
3.4.12 การรองรับการมองเห็นและการปรับสี.....	26
3.5 ชั้นกายภาพ.....	27
3.5.1 รูปแบบชั้นกายภาพ.....	27
3.5.2 โหมดการส่งข้อมูล.....	30
3.5.3 การปรับแสงและการลดผลกระทบจากการกระพริบ.....	31
4. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบมาตรฐานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น.....	32
บรรณานุกรม.....	35
ภาคผนวก ก การพัฒนาชุดสาธิตการรับส่งข้อมูลผ่านแสงตามมาตรฐาน CP-1223.....	36
ภาคผนวก ข มาตรฐาน CP-1223 ของประเทศญี่ปุ่น.....	65

มาตรฐานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (VLC: visible light communication) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้อุปกรณ์หรือระบบสื่อสารที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถใช้งานร่วมกันได้ แม้ว่าอุปกรณ์หรือระบบจะถูกสร้างขึ้นจากผู้ผลิตหรือผู้พัฒนาที่แตกต่างกัน อันจะเป็นการพัฒนาและเสริมสร้างอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ VLC และหลอดไฟแอลอีดี (LED: light-emitting diode) ให้มีมูลค่าเพิ่มและจะเสริมความมั่นใจให้กับผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้านการสื่อสารต่างๆ ให้ผลิตอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในปริมาณมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ราคาต่อชิ้นถูกลง ผู้บริโภคจะสามารถตัดสินใจซื้ออุปกรณ์เกี่ยวกับ VLC รวมถึงหลอดแอลอีดีที่มีฟังก์ชันการสื่อสารได้ง่ายมากยิ่งขึ้น

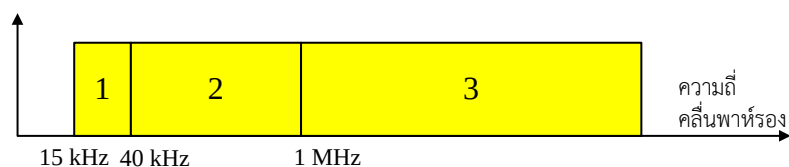
บทนี้จะเน้นไปที่มาตรฐาน JEITA (Japan Electronics and Information Technology Industries Association) ของประเทศญี่ปุ่น โดยเฉพาะ CP-1223 เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อยและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการสื่อสารแบบทิศทางเดียวได้หลากหลาย เช่น การส่งผ่านข้อมูลภาพหรือสิ่งของที่จัดแสดงในพิพิธภัณฑ์ การติดตั้งกับอุปกรณ์ส่องสว่างบนเพดานเพื่อส่งข้อมูลพิกัดหรือชื่อของสถานที่ภายในอาคาร และการนำรหัสสำหรับการเปิดปิดประตูรั้วบ้านติดตั้งในหลอดไฟหน้ารถยนต์เพื่อการสั่งการเปิดปิดด้วยการควบคุมจากภายในรถยนต์ นอกจากนี้ยังสรุปประเด็นสำคัญของมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ของประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำไปใช้งานในการสื่อสารแบบสองทิศทาง

1. บทนำ

JEITA ได้จัดทำมาตรฐานสามแบบคือ CP-1221, CP-1222 และ CP-1223 เพื่อสร้างความตระหนักให้คนทั่วไปทราบถึงประโยชน์ของเทคโนโลยี VLC ซึ่งสรุปได้ดังนี้ [1, 2]

มาตรฐาน CP-1221 ได้ถูกเผยแพร่ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2551 ซึ่งกล่าวถึงข้อกำหนดพื้นฐานต่างๆ ของระบบ VLC โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

- นิยามข้อกำหนดที่จำเป็นน้อยสุดในงานประยุกต์ของ VLC
- นำเสนอตัวชี้วัดน้อยสุดที่จะช่วยป้องกันการแทรกสอด (interference) ระหว่างอุปกรณ์การสื่อสารเชิงแสง
- กำหนดช่วงความยาวคลื่น (wavelength) ของแสงที่ใช้ใน VLC ให้มีค่าระหว่าง 380 – 780 นาโนเมตร (nm) และอนุญาตให้ช่วงความยาวคลื่นของแต่ละงานประยุกต์ให้มีความแม่นยำภายใน 1 nm เช่น งานประยุกต์บางงานจะใช้แสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 525 – 575 nm



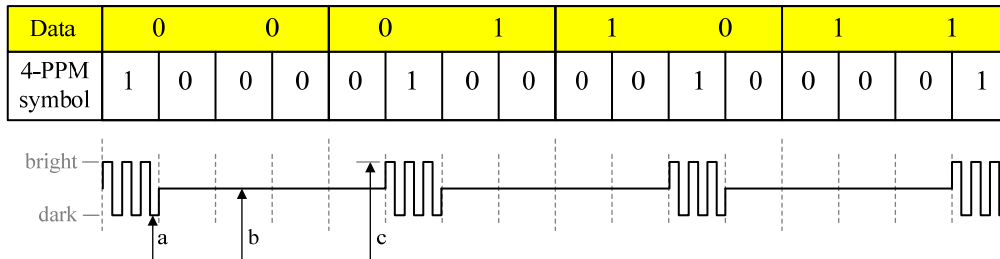
รูปที่ 1 การจัดสรรความถี่ของคลื่นพาห้ร่งที่ใช้ในมาตรฐาน CP-1221

- กำหนดให้ใช้เทคนิคคลื่นพาห้ร่ง (subcarrier) ในการกล้ำสัญญาณความเข้มแสงด้วยความถี่เฉพาะ ซึ่งการใช้คลื่นพาห้ร่งหลายๆ ความถี่สามารถช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณได้ รูปที่ 1 แสดงการจัดสรรความถี่ของคลื่นพาห้ร่งที่ใช้ในมาตรฐานนี้ โดย
 - o ช่วงความถี่ที่หนึ่ง จะอยู่ระหว่างความถี่ 15 – 40 kHz โดยจะใช้กับการสื่อสารของระบบระบุตัวตนด้วยแสงที่มองเห็น (visible light ID system) ของ JEITA
 - o ช่วงความถี่ที่สอง จะอยู่ระหว่างความถี่ 40 kHz – 1 MHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่หลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อทำงานเป็นตัวกำเนิดแสงจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนจำนวนมาก จึงไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้งานในระบบ VLC
 - o ช่วงความถี่ที่สาม จะมีความถี่มากกว่า 1 MHz ซึ่งเหมาะสำหรับงานประยุกต์ที่ต้องการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงมาก โดยจำเป็นต้องใช้หลอดแอลอีดีแบบพิเศษ

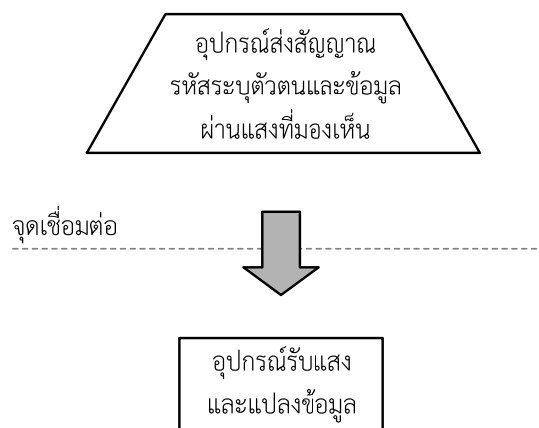
มาตรฐาน CP-1222 ได้ถูกเผยแพร่ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2551 ซึ่งใช้เป็นมาตรฐานสำหรับระบบระบุตัวตนด้วยแสงที่มองเห็น โดยมีข้อกำหนดที่สำคัญดังนี้

- ความถี่คลื่นพาห้ร่งที่ใช้คือ 28.8 kHz
- อัตราถ่ายโอนข้อมูลเท่ากับ 4.8 กิโลบิตต่อวินาที (kbps: kilo-bit per second)
- การกล้ำสัญญาณจะใช้คลื่นพาห้ร่งแบบการกล้ำสัญญาณสี่ตำแหน่งพัลส์ (4PPM: 4 pulse position modulation) ตามที่แสดงในรูปที่ 2 เพื่อป้องกันการกระพริบ (flickering) ของหลอดไฟ
- วิธีการควบคุมข้อผิดพลาดจะใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยส่วนซ้ำซ้อนแบบวน (CRC: cyclic redundancy check)
- ข้อมูลที่ถ่ายโอนจะเป็นข้อมูลระบุตัวตน (ID) แบบคงที่ (fixed data) และข้อมูลทั่วไป

มาตรฐาน CP-1223 ได้ถูกเผยแพร่ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2557 โดยเป็นมาตรฐานที่ว่าด้วยการส่งรหัสระบุตัวตนหรือข้อมูลสำหรับอุปกรณ์ด้านมัลติมีเดียด้วยแสงที่มองเห็น (visible light beacon system) ซึ่งมาตรฐานของระบบนี้จะมีรูปแบบการสื่อสารแบบทิศทางเดียวผ่านตัวกลาง



รูปที่ 2 ตัวอย่างการเข้ารหัสข้อมูลแบบ 4-PPM



รูปที่ 3 แบบจำลองของมาตรฐานการสื่อสารแสง CP-1223

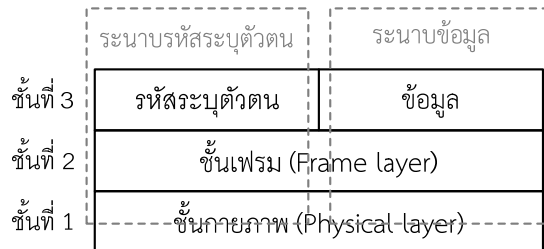
แสงที่มองเห็น [1] โดยหนังสือเล่มนี้จะเน้นไปที่มาตรฐานนี้ เพราะง่ายต่อการทำความเข้าใจและสามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์รับส่งข้อมูลแบบทิศทางเดียวในระบบ VLC ได้ง่าย

2. มาตรฐาน CP-1223

มาตรฐาน CP-1223 เป็นมาตรฐานการส่งข้อมูลในระบบ VLC แบบทิศทางเดียว ซึ่งมีโครงสร้างการทำงานตามรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย

- อุปกรณ์ส่งแสง ทำหน้าที่แปลงรหัสระบุตัวตนหรือข้อมูลไปพร้อมกันกับกระจายแสง
- อุปกรณ์รับแสง มีหน้าที่รับแสงและแปลงข้อมูลแสงกลับเป็นรหัสระบุตัวตนหรือข้อมูล

โดยการส่งรหัสหรือข้อมูลจะถูกส่งในรูปแบบเฟรมเบคอน (beacon frame) ที่อยู่ในชั้นล่างของแบบจำลองการสื่อสารข้อมูล ในขณะที่ชั้นบนจะไม่ได้ถูกกำกับด้วยมาตรฐานนี้ แต่จะขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานในระบบต่างๆ



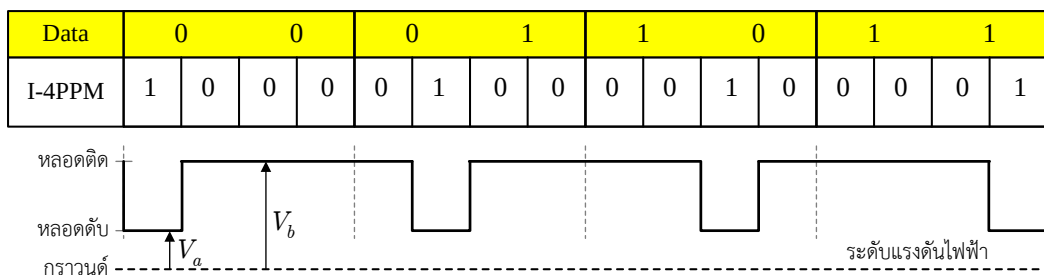
รูปที่ 4 แบบจำลองการสื่อสารข้อมูล

โครงสร้างโปรโตคอล (protocol) การสื่อสารข้อมูลในรูปแบบชั้นตามมาตรฐาน CP-1223 แสดงในรูปที่ 4 โดยแบ่งออกเป็นสองระนาบคือ ระนาบรหัสระบุตัวตน (ID plane) และระนาบข้อมูล (data plane) ซึ่งการทำงานในชั้นที่ 1 (ชั้นกายภาพ) และชั้นที่ 2 (ชั้นเฟรม) จะมีรูปแบบเหมือนกัน แต่จะแตกต่างกันในชั้นที่ 3 ที่แบ่งการทำงานออกเป็นสองรูปแบบคือ การส่งรหัสระบุตัวตนหรือตำแหน่ง และการส่งข้อมูล โดยรูปแบบการส่งข้อมูลทั้งสองสามารถส่งไปพร้อมกันในเฟรมข้อมูลเดียวกันในชั้นที่ 2 ได้

การนำโครงสร้างโปรโตคอลที่ส่งข้อมูลรหัสระบุตัวตนหรือข้อมูลไปใช้ สามารถส่งรหัสระบุตัวตนเพื่อนำไปเป็นรหัสสำหรับดึงรายละเอียดของข้อมูลที่อยู่ในฐานข้อมูลออกมาแสดง ซึ่งอาจเป็นข้อมูลตัวอักษร เสียงพูด หรือวิดีโอ หรืออาจส่งเป็นข้อมูลสั้นๆ ที่มีความยาวไม่มากโดยตรงเพื่อการแสดงผลอย่างย่อ ตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น การส่องสว่างข้อมูลที่ส่งรหัสจำเพาะผลิตภัณฑ์หรือรหัสบาร์โค้ด และการส่งชื่อผู้ผลิตหรือรุ่นผลิตของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถส่งข้อมูลตำแหน่ง โดยหากเป็นภายในอาคาร ข้อมูลที่ส่งอาจใช้แสดงข้อมูลห้องหรือสถานที่ในอาคาร และหากเป็นภายนอกอาคาร อาจเป็นการระบุตำแหน่งจากข้อมูลโคโมไฟนอน เป็นต้น

การกำหนดโปรโตคอลตามมาตรฐาน CP-1223 มีการกำหนดในสองชั้นคือ ชั้นกายภาพ และชั้นเฟรม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ชั้นกายภาพ มีการกำหนดความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในช่วง 380 – 780 nm ณ ความเร็วในการสื่อสารที่ 4.8 kbps โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ และใช้เทคนิคการกล้ำสัญญาณสี่ตำแหน่งพัลส์แบบผกผัน (I-4PPM) ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยเมื่อหลอดไฟติดจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ V_b และเมื่อหลอดไฟดับจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ V_d โดยค่าระดับสัญญาณและดัชนีการกล้ำสัญญาณหาได้จาก



รูปที่ 5 เทคนิคการกล่าสืตำแหน่งพัลส์แบบผกผัน (I-4PPM)

ส่วนเริ่มต้นเฟรม (SOF)		ส่วนเพย์โหลด (Payload)	ส่วนจบเฟรม (EOF)
PRE (6 bits)	FTYPE (8 bits)	ID/DATA (128 bits)	CRC-16 (16 bits)

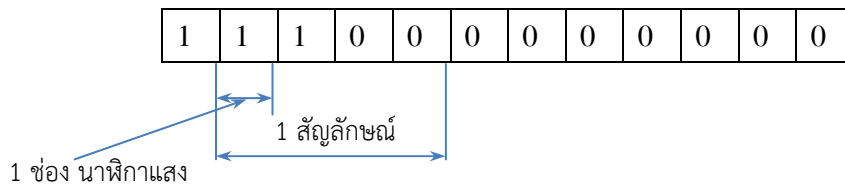
รูปที่ 6 เฟรมข้อมูลตามมาตรฐาน CP-1223

$$\text{ค่าระดับสัญญาณ} = V_b - V_a$$

และ

$$\text{ดัชนีการกล่าสัญญาณ} = (V_b - V_a) / V_b$$

- ชั้นเฟรม มีรูปแบบของเฟรมข้อมูลตามโครงสร้างในรูปที่ 6 ซึ่งประกอบด้วย
 - o ส่วนเริ่มต้นเฟรม (SOF: start of frame) มีข้อมูล 2 ส่วนคือ
 - ส่วนเริ่ม (PRE: preamble) จำนวน 6 บิต ซึ่งมีรูปแบบการเข้ารหัสที่แตกต่างจาก I-4PPM ที่ใช้ เพื่อให้สามารถจำแนกจุดเริ่มต้นของเฟรมได้ โดยถ้าสมมติว่าส่วนเริ่มมีจำนวน 6 บิต และถูกแบ่งออกเป็น 12 ช่องนาฬิกาแสง การเข้ารหัสส่วนเริ่มจะให้ค่า “1” จำนวน 3 ช่อง และตามด้วย “0” จำนวน 9 ช่อง ซึ่งเมื่อรวมทั้งหมดจะได้ส่วนเริ่มจำนวน 3 สัญลักษณ์ (หรือ 6 บิต) ตามที่แสดงในรูปที่ 7
 - ประเภทของเฟรม (FTYPE: frame type) จำนวน 8 บิต เพื่อระบุชนิดของข้อมูลในเพย์โหลด
 - o ส่วนเพย์โหลด (payload) จำนวน 128 บิต สามารถใช้บรรจุรหัสระบุตัวตนหรือข้อมูลตามชนิดที่ระบุไว้ในประเภทของเฟรม
 - o ส่วนจบเฟรม (EOF: end of frame) จำนวน 16 บิต ที่มีการส่งรหัสตรวจสอบบิตผิดพลาดโดยใช้อัลกอริทึม CRC-16 ซึ่งสร้างจากพหุนามตัวกำเนิด $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$ ในการคำนวณค่ารหัสตรวจสอบบิตผิดพลาดนี้ โดยเริ่มต้นจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 และทำการคำนวณเฉพาะประเภทของเฟรมและเพย์โหลด เท่านั้น



รูปที่ 7 ส่วนเริ่ม (PRE) จำนวน 6 สัญลักษณ์

สำหรับการเว้นช่วงการส่งระหว่างเฟรมข้อมูล หากมีระยะเวลาห่างกันมากก็จะทำให้เกิดการกระพริบของแสงจนตามนุษย์รู้สึกได้ ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดการกระพริบของแสงในช่วงเว้นระหว่างเฟรมสามารถป้องกันปัญหาได้สองวิธี คือ

- 1) ส่งข้อมูลด้วยกระบวนการปกติด้วยข้อมูล “1000”
- 2) ปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่ไม่มีการส่งเฟรมที่ค่า $V_b' = V_a + (3V_b / 4)$ โวลต์

3. มาตรฐาน IEEE 802.15.7

สถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (IEEE: The Institute of Electrical and Electronics Engineers) ได้จัดทำมาตรฐานเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPANs: wireless personal area networks) หรือเครือข่ายที่มีระยะทางสั้นๆ ที่เรียกว่ามาตรฐาน IEEE 802.15 ซึ่งเป็นกลุ่มหนึ่งในมาตรฐาน 802 สำหรับเครือข่ายภายใน (LAN: local area network) และเครือข่ายในนครหลวง (MAN: metropolitan area network) [3] โดยมาตรฐาน IEEE 802.15 จะให้ความสนใจไปที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานในระยะทางสั้น พลังงานต่ำ ต้นทุนน้อย และอุปกรณ์สำหรับเครือข่ายไร้สาย เช่น คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล อุปกรณ์สื่อสารพกพา และโทรศัพท์มือถือ ดังนั้นการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (VLC) จึงจัดอยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15 กลุ่มที่ 7 (IEEE 802.15.7) ซึ่งมีจุดมุ่งหมายหลักคือ การสร้างมาตรฐานสำหรับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ในชั้นกายภาพและชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ (MAC: media access control) ของแบบจำลองโอเอสไอ (OSI model)

มาตรฐาน VLC ที่กำหนดโดย IEEE จะมีข้อกำหนดในชั้นกายภาพและชั้น MAC โดยใช้แสงที่มองเห็นเป็นตัวกลางในการส่งข้อมูลบนความถี่แสงที่มองเห็น (ความยาวคลื่น 380 – 780 nm) และต้องมีขีดความสามารถในการส่งผ่านข้อมูลที่อัตราความเร็วสูงเพียงพอสำหรับการให้บริการด้านภาพ เสียง และวีดิทัศน์ อีกทั้งยังคำนึงถึงความสามารถของการเคลื่อนย้ายจุดเชื่อมต่อ ความเข้ากันได้ของโครงสร้างพื้นฐานของระบบ VLC ที่ใช้ในการส่งสว่างปกติ การรบกวนสัญญาณจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ และแหล่งกำเนิดแสงจาก

ธรรมชาติ (ambient light) นอกจากนี้ยังคำนึงถึงโพรโทคอลในชั้น MAC ที่จัดการในส่วนการเชื่อมต่อระหว่างจุดด้วย

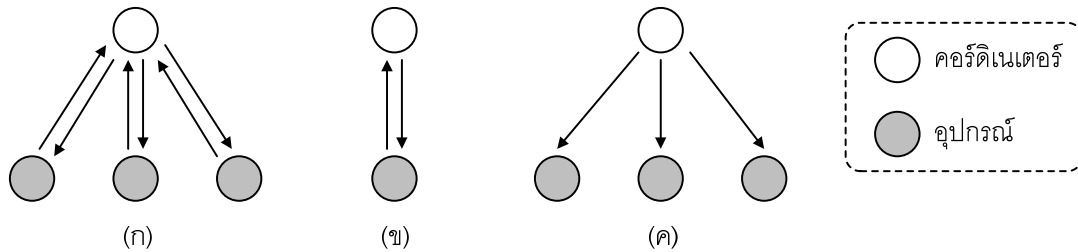
โดยทั่วไปการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นจะส่งข้อมูลด้วยวิธีการก่้าความเข้มของแสง (intensity modulation) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง เช่น แอลอีดี (LED) และเลเซอร์ไดโอด (LD: laser diode) ดังนั้นการรวมความสามารถด้านการส่องสว่างและด้านการส่งผ่านข้อมูลไว้ด้วยกัน ทำให้ VLC สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การส่องสว่างข้อมูลบนพื้นที่หรือบริเวณป้ายสัญลักษณ์หรือป้ายบอกทาง ป้ายโฆษณา ไฟส่องทาง/ถนน ไฟสัญญาณ ไฟส่องสว่างในยานพาหนะ และสัญญาณไฟจราจร เป็นต้น โดยมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นสำหรับเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล ซึ่งมีการกำหนดคุณลักษณะต่างๆ ของมาตรฐานดังนี้

- ทอพอโลยี (topology) ของเครือข่ายในรูปแบบการส่งผ่านข้อมูลด้วยทอพอโลยีแบบดาว (star), แบบเพียร์ทูเพียร์ (peer-to-peer), หรือแบบการกระจาย (broadcasting)
- แอดเดรส (address) ขนาดสั้น 16 บิต หรือยาว 64 บิต
- การเข้าถึงตัวกลางในลักษณะการกำหนดเวลา (scheduled) หรือแบบสล็อตที่มีกลไกการป้องกันการชนกันของข้อมูล (slotted random access with collision avoidance)
- โพรโทคอลการตอบกลับเมื่อได้รับข้อมูล เพื่อการส่งผ่านข้อมูลที่มีเสถียรภาพน่าเชื่อถือ
- การกำหนดดัชนีชี้วัดคุณภาพความยาวคลื่น (WQI: wavelength quality indication)
- การปรับค่าความสว่าง (dimming support)
- การมองเห็นได้ของแสง
- การปรับเปลี่ยนสี
- ความมีเสถียรภาพของสี

3.1 ทอพอโลยีเครือข่าย

มาตรฐาน IEEE 802.15.7 หรือ 802.15.7 วีแพน (VPAN: VLC personal area network) จำแนกการประยุกต์ใช้งานทอพอโลยีเครือข่ายเป็น 3 ทอพอโลยีตามรูปที่ 8 ดังนี้

- ทอพอโลยีแบบดาว การสื่อสารจะเกิดขึ้นระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ และอุปกรณ์ส่วนกลางที่มีความสามารถในการควบคุมที่เรียกว่า “อุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ (coordinator)” โดยเครือข่ายแบบดาวนี้สามารถมีอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ได้หลายตัว ซึ่งแต่ละอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์จะควบคุมเครือข่ายแบบดาวแยกกันโดยอิสระ



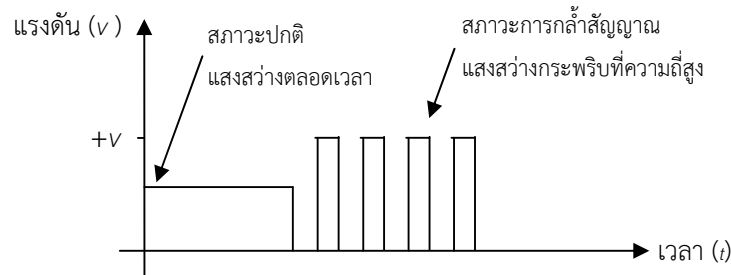
รูปที่ 8 ทอพอโลยีเครือข่าย (ก) แบบดาว, (ข) แบบเพียร์ทูเพียร์, และ (ค) แบบการกระจาย

- ทอพอโลยีแบบเพียร์ทูเพียร์ เป็นการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เพียงสองตัวเท่านั้นโดยหนึ่งนั้นจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์คอर्डิเนเตอร์ด้วย
- ทอพอโลยีแบบการกระจาย สามารถกำหนดให้อุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ทำงานในลักษณะการกระจายข้อมูลเพียงอย่างเดียว โดยไม่จำเป็นต้องเป็นส่วนหนึ่งของเครือข่ายก็ได้ นั่นคือไม่จำเป็นต้องเชื่อมโยงให้อุปกรณ์ตัวนั้นถูกรู้จักในเครือข่าย หรืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กระจายข้อมูลก็ไม่จำเป็นต้องทำหน้าที่เชื่อมโยกับอุปกรณ์ตัวอื่นใด

อย่างไรก็ตามทุกทอพอโลยีเครือข่ายจำเป็นต้องรองรับคุณสมบัติการส่องสว่างตลอดเวลา (visibility) ด้วย เพื่อคงค่าการส่องสว่างอย่างต่อเนื่องและไม่กระพริบ ถึงแม้ว่าจะไม่มีการสื่อสารใดๆ หรือขณะอยู่ในสถานะไม่ทำงาน (idle mode) หรือสถานะการรับสัญญาณ (receive mode) โดยทั่วไปอุปกรณ์ในเครือข่ายหรืออุปกรณ์คอर्डิเนเตอร์จะถูกกำหนดแอดเดรสเฉพาะที่มีความยาว 64 บิต แต่หลังจากที่อุปกรณ์ได้ถูกเชื่อมโยงเข้ากับเครือข่ายที่มีอุปกรณ์คอर्डิเนเตอร์ควบคุมแล้ว ก็สามารถกำหนดให้มีแอดเดรสที่มีความยาวเพียง 16 บิตได้

นอกจากการกำหนดทอพอโลยีเครือข่ายแล้ว อุปกรณ์ในเครือข่าย VLC ยังสามารถถูกแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ 3 แบบคือ

- แบบโครงข่ายพื้นฐาน (infrastructure) การใช้งานในแบบโครงข่ายพื้นฐานจะถูกติดตั้งในตำแหน่งที่แน่นอน ไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปตำแหน่งอื่น มีพลังงานใช้ไม่จำกัด ไม่ถูกจำกัดด้านขนาดหรือรูปทรง แหล่งกำเนิดแสงสามารถให้ค่าความสว่างได้มาก จึงสามารถนำไปใช้ในการสื่อสารได้ทั้งระยะใกล้และระยะไกล รวมถึงสามารถรองรับความเร็วในการสื่อสารได้ทั้งแบบความเร็วต่ำและแบบความเร็วสูง
- แบบเคลื่อนที่ได้ (mobile) การใช้งานในแบบนี้ อุปกรณ์จะไม่ถูกติดตั้งอยู่กับที่ จึงมีข้อจำกัดด้านพลังงานและขนาดของอุปกรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้แหล่งกำเนิดแสงให้ค่าความสว่างได้จำกัด ส่งผลต่อระยะทางการสื่อสารที่ไม่ไกล และรองรับได้เฉพาะการสื่อสารแบบความเร็วต่ำ



รูปที่ 9 สัญญาณในสภาวะปกติและสภาวะการกล้ำสัญญาณ [3]

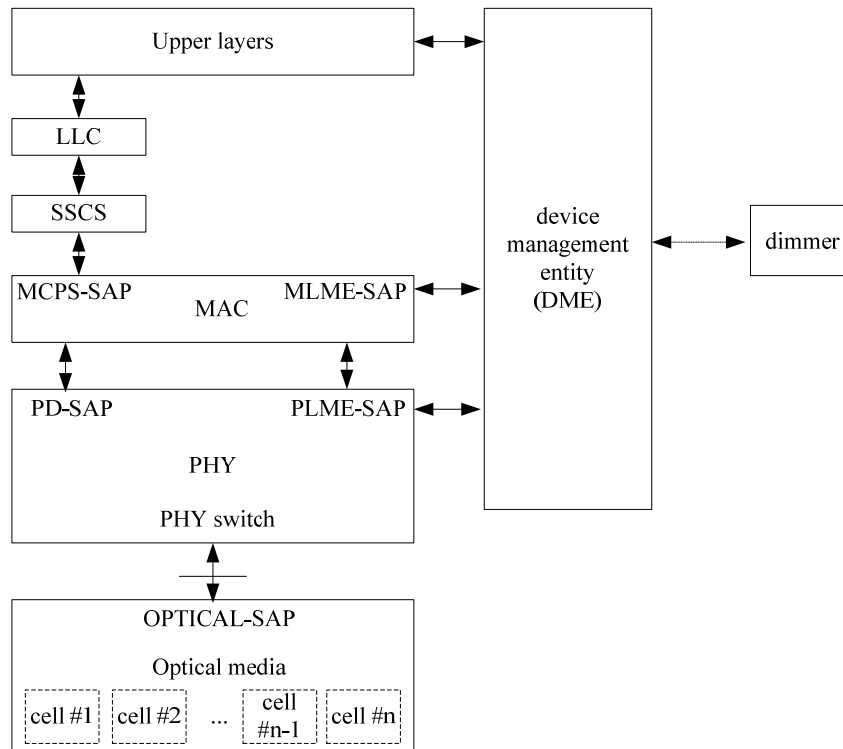
- แบบยานพาหนะ (vehicle) การใช้งานในแบบนี้จะมีข้อจำกัดที่ต้องคำนึงถึงคือ ตำแหน่งของอุปกรณ์จะเคลื่อนที่ได้แต่พลังงานยังคงจำกัดอยู่ และจะใช้ในการสื่อสารระยะไกลที่ต้องการความเร็วในการสื่อสารไม่สูงมาก

3.2 สเปกตรัมในสภาวะการกล้ำสัญญาณ

ในสภาวะปกติเมื่อยังไม่มีกรรกล้ำสัญญาณใดๆ แหล่งกำเนิดแสงจะได้รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แสงที่ถูกกำเนิดขึ้นจะสว่างตลอดเวลาตามการทำงานของไดโอดเปล่งแสง โดยวงจรภาครับจะรับสเปกตรัมสัญญาณที่มีความถี่ 0 Hz แต่เมื่อทำการกรรกล้ำสัญญาณ แหล่งกำเนิดแสงจะได้รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นการปิด/เปิดที่ความถี่สูง แสงที่ได้จากไดโอดเปล่งแสงจะมีการกระพริบที่ความถี่สูง และเมื่อวงจรภาครับนำแสงที่ได้มาประมวลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ก็จะได้สเปกตรัมสัญญาณที่มีค่าความถี่ตามรูปที่ 9 จากหลักการเบื้องต้นของการรับสเปกตรัมสัญญาณทำให้สามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างสภาวะปกติที่ไม่มีกรรกล้ำสัญญาณและสภาวะที่มีการกรรกล้ำสัญญาณได้ ซึ่งช่วยทำให้ทราบช่วงเวลาที่ยังช่องทางการสื่อสารไม่ถูกใช้งานได้ (CCA: clear channel assessment)

3.3 สถาปัตยกรรม

สถาปัตยกรรมตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ถูกกำหนดเป็นชั้น (layer) และชั้นย่อย (sublayer) โดยแต่ละชั้นมีหน้าที่ในแต่ละส่วนของมาตรฐาน และมีการเชื่อมโยงข้อมูลบริการระหว่างชั้นที่อยู่ติดกัน โครงสร้างสถาปัตยกรรมที่ IEEE 802.15.7 กำหนด ประกอบด้วยชั้นกายภาพ (PHY: physical layer) และชั้น MAC (medium access control layer) เท่านั้น โดยชั้นกายภาพจะกำหนดมาตรฐานในส่วนประกอบของอุปกรณ์รับ/ส่งแสง และกลไกการควบคุมทางวงจรต่างๆ ส่วนชั้น MAC จะจัดการการเข้าถึงช่องสัญญาณสำหรับการส่งผ่านข้อมูล รูปที่ 10 แสดงโครงสร้าง



รูปที่ 10 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 [3]

สถาปัตยกรรมของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 โดยจะมีส่วนของ LLC (logical link control) และ SSCS (service-specific convergence sublayer) เพื่อเชื่อมต่อข้อมูลไปยังชั้นที่อยู่เหนือกว่าคือ ชั้นเครือข่าย (network layer) และชั้นงานประยุกต์ (application layer) ที่เรียกรวมกันว่า ชั้นอัฟเพอร์ (upper layer)

นอกจากนี้ในชั้นกายภาพ สวิตช์กายภาพ (physical switch) จะทำหน้าที่เชื่อมต่อกับส่วน Optical-SAP โดยจะต่อเข้ากับอุปกรณ์ทางแสง เช่น แหล่งกำเนิดแสงหรืออุปกรณ์รับแสง โดยอาจใช้อุปกรณ์เพียงตัวเดียวหรือจำนวนหลายตัวต่อกันก็ได้ ทั้งนี้การต่ออุปกรณ์ทางแสงจำนวนหลายตัวจะต้องมีมาตรฐานรองรับคือ ชั้นกายภาพแบบที่สาม (PHY III) ที่รองรับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ VLC ระหว่างเซลล์ (VLC cell mobility) ด้วย การควบคุมการทำงานของ การเคลื่อนที่ระหว่างเซลล์จะทำโดยผ่านเอนทิตี PLME (physical layer management entity) และ ยังควบคุมการปรับหรือแสงสว่างของอุปกรณ์ด้วย โดยเอนทิตี PLME-SAP และ MLME-SAP (medium-access-control link management entity) จะถูกเชื่อมต่อกับเอนทิตี DME (device management entity) จากทั้งสองชั้น

3.4 ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ (ชั้น MAC)

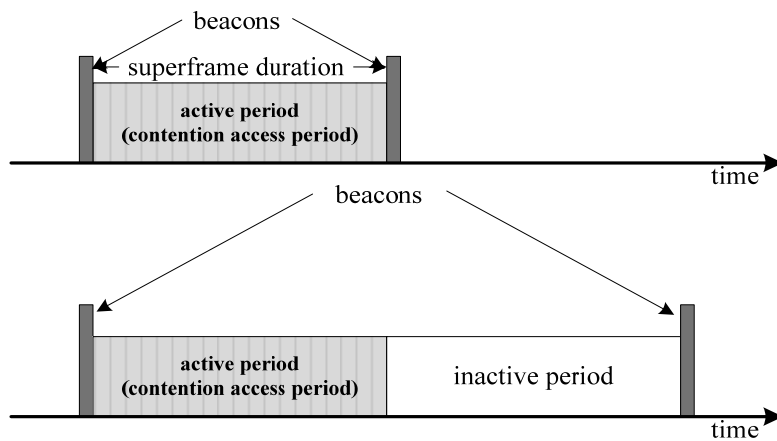
การทำงานของ VLC ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 วิแพน ในชั้น MAC จะควบคุมการเข้าถึงตัวกลางการสื่อสารผ่านชั้นกายภาพ โดยมีหน้าที่หลักคือการจัดการเบคอน (beacon management) สำหรับอุปกรณ์ที่เป็นคอร์ดิเนเตอร์, การเข้าจังหวะเวลากับเครือข่ายเบคอน, การเข้าถึงช่องสัญญาณ, การจัดการช่องเวลาที่รับประกัน (GTS: guaranteed time slot), การตรวจสอบเฟรม (frame validation), การตรวจสอบการได้รับเฟรม (acknowledgement), การเชื่อมโยงเครือข่าย และการถอนตัวจากเครือข่าย (association and disassociation), และการแสดงสถานะของอุปกรณ์และคุณภาพของช่องสัญญาณ นอกจากนี้ยังจัดการด้านความปลอดภัยของข้อมูล การควบคุมการแสดงสีของแสงและเสถียรภาพของสี กระบวนการลดการกระพริบ การปรับค่าความเข้มของการส่องสว่าง และรองรับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ โดยเฟรมข้อมูลจะถูกกำหนดให้อยู่ในโครงสร้างของซูเปอร์เฟรม (superframe structure) ซึ่งครอบคลุมรายละเอียดของรูปแบบการส่งผ่านข้อมูล

3.4.1 การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณ

การควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณตามมาตรฐานแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ

- 1) การเข้าถึงแบบการแข่งขัน (contention-based access) โดยจะให้อุปกรณ์สามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณได้ด้วยการสุ่มช่วงเวลาการเข้าถึง ทำให้การกระจายตัวของเวลาการเข้าใช้ช่องสัญญาณของอุปกรณ์แต่ละตัวมีความแตกต่างกัน หากมีการเข้าใช้ช่องสัญญาณในช่วงเวลาเดียวกันก็จะทำการถอยการส่งข้อมูล และกลับเข้าไปส่งใหม่ด้วยการสุ่มช่วงเวลาเพื่อเลี่ยงการชนกันของข้อมูลอีกครั้ง
- 2) การเข้าถึงแบบปลอดการแข่งขัน (contention-free access) จะควบคุมเวลาในการเข้าใช้ช่องสัญญาณด้วยอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ที่มีการแบ่งช่วงเวลาที่เหมาะสมให้แก่อุปกรณ์แต่ละตัว

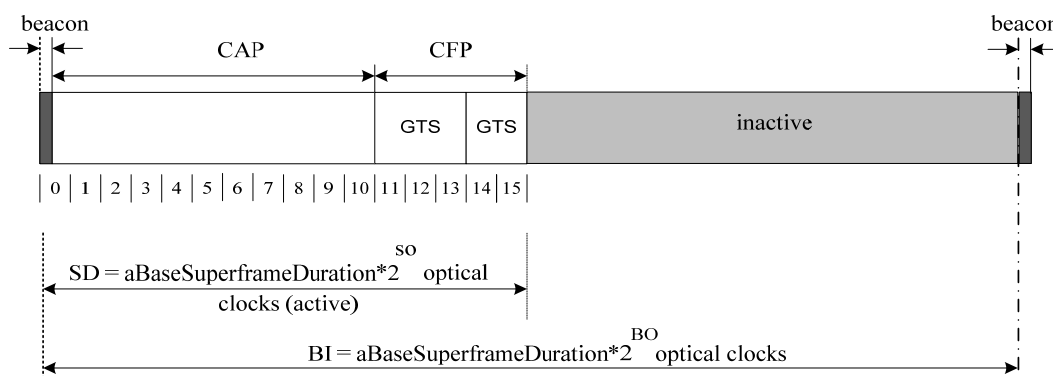
การควบคุมการใช้งานช่องสัญญาณจะกระทำผ่านกระบวนการของการส่งผ่านข้อมูลด้วยซูเปอร์เฟรมที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 11 ซึ่งถูกกำหนดโดยอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ โดยภายในซูเปอร์เฟรมจะแบ่งเป็นช่วงเวลา ช่วงละเท่ากัน โดยในช่วงเวลาดังกล่าวจะเป็นเวลาที่อุปกรณ์ในเครือข่ายสามารถแข่งขันกันเข้าไปใช้ช่องสัญญาณได้ นอกจากนี้ซูเปอร์เฟรมยังสามารถแบ่งช่วงเวลาเป็น 2 ลักษณะคือ ช่วงเวลาที่พร้อมทำงาน (active portion) และช่วงเวลาที่ไมพร้อมทำงาน (inactive portion) ได้อีกด้วย ตามที่แสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 โครงสร้างซูเปอร์เฟรม

การเริ่มใช้งานซูเปอร์เฟรม อุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ต้องส่งเบคอนก่อน แล้วตามด้วยการส่งซูเปอร์เฟรม โดยหากอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ไม่ต้องการสื่อสารด้วยรูปแบบโครงสร้างของซูเปอร์เฟรม ก็จะไม่ส่งเบคอน ซึ่งเบคอนนี้มีไว้เพื่อการเข้าจังหวะเวลาระหว่างอุปกรณ์ทุกตัวในเครือข่ายด้วย อุปกรณ์ตัวใดที่อยู่ในเครือข่ายที่ต้องการส่งข้อมูลในช่วงเวลาการเข้าถึงแบบการแข่งขัน (CAP: contention access period) ที่อยู่ระหว่างเบคอนสองเบคอน หากซูเปอร์เฟรมได้มีช่วงเวลาปลอดการแข่งขัน (CFP: contention-free period) ช่วงเวลา CAP นี้ก็จะถูกแบ่งบางส่วนให้กับ CFP นอกจากนี้การเข้าถึงช่องสัญญาณจะต้องทำการแข่งขันกับอุปกรณ์ตัวอื่นที่อยู่ในเครือข่ายเดียวกันโดยใช้เทคนิคการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบสุ่ม 4 แบบ ดังนี้

- 1) การเข้าถึงแบบสุ่มที่ไม่มีสล็อต (unslotted random access) อุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์จะไม่มี การส่งเบคอน เมื่ออุปกรณ์ในเครือข่ายต้องการใช้ช่องสัญญาณจะรอช่วงเวลาการถอยแบบสุ่ม และเมื่อถึงเวลาการถอยแบบสุ่มเกิดขึ้น อุปกรณ์ที่ต้องการใช้ช่องสัญญาณจะส่งเฟรมข้อมูล ออกไปในช่องสัญญาณ โดยไม่มีการคำนึงว่าจะส่งไปซ้ำซ้อนหรือชนกับอุปกรณ์ตัวอื่นหรือไม่
- 2) การเข้าถึงแบบสุ่มที่มีสล็อต (slotted random access) อุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์จะมีการส่ง สัญญาณเบคอน โดยอุปกรณ์ในเครือข่ายที่ต้องการส่งข้อมูลจะต้องจองช่วงเวลา CFP สำหรับการ ส่งข้อมูล โดยช่วงเวลาที่ใช้งานได้ในซูเปอร์เฟรมจะถูกแบ่งมาจากช่วงเวลา CAP โดย จะต้องได้รับการจัดสรรจากอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ ก่อนทำการส่งข้อมูล
- 3) การเข้าถึงแบบ CSMA/CA ที่ไม่มีสล็อต (unslotted CSMA/CA) มีลักษณะเช่นเดียวกัน กับการเข้าถึงแบบสุ่มที่ไม่มีสล็อต แต่แตกต่างกันเมื่อถึงเวลาการถอยแบบสุ่ม โดยจะทำการ



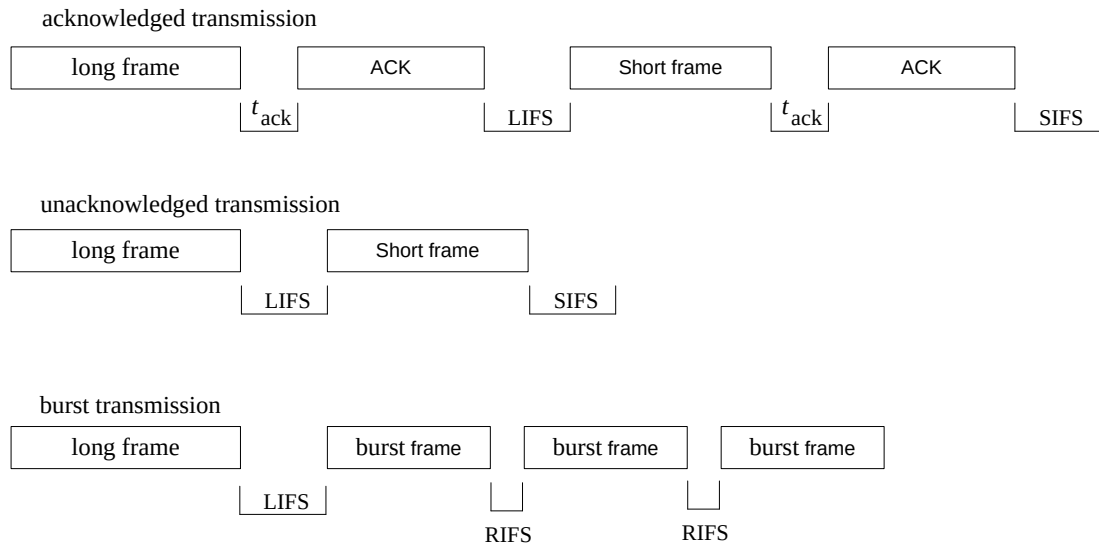
รูปที่ 12 โครงสร้างซูเปอร์เฟรมสำหรับการเข้าถึงแบบปลดการแข่งขัน

ตรวจสอบช่องสัญญาณก่อน หากช่องสัญญาณมีการใช้งานอยู่ อุปกรณ์จะรอช่วงเวลาอื่น ด้วยการสุ่มเวลาและตรวจสอบการใช้งานช่องสัญญาณอีกครั้งก่อนการส่งข้อมูล

- 4) การเข้าถึงแบบ CSMA/CA ที่มีสล็อต (slotted CSMA/CA) มีลักษณะเช่นเดียวกันกับการเข้าถึงแบบสุ่มที่มีสล็อต โดยจะเพิ่มกลไกการตรวจสอบการใช้ช่องสัญญาณก่อนการส่งข้อมูล

สำหรับงานประยุกต์ที่ต้องการให้มีการหน่วงเวลาในการสื่อสารน้อย (low latency) หรือ งานประยุกต์ที่ต้องการกำหนดแบนด์วิดท์เฉพาะสำหรับข้อมูล อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมเครือข่ายจะแบ่งส่วนหนึ่งของซูเปอร์เฟรมในช่วงเวลาที่พร้อมทำงานให้กับอุปกรณ์ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งจะเรียกช่วงเวลานี้ว่าช่วงเวลา CFP โดยช่วงเวลาที่แบ่งในซูเปอร์เฟรมจะถูกจัดไว้ในช่วงท้ายของช่วงเวลาที่พร้อมทำงานดังแสดงในรูปที่ 12 โดยความยาวของซูเปอร์เฟรม (BI: beacon interval) มีความยาวเป็นสองเท่าของเฟรมช่วงเวลาที่พร้อมทำงาน (SD: superframe active duration) และเฟรมแบบปลดการแข่งขันจะแบ่งออกเป็นสองช่วง โดยแต่ละช่วงจะมีการจัดสรรเวลาที่ไม่เท่ากัน

ในระหว่างการส่งเฟรมข้อมูล หากชั้น MAC ได้รับข้อมูลมาจากชั้นกายภาพ ชั้น MAC จำเป็นต้องใช้เวลาบางส่วนในการประมวลผล ซึ่งหากมีการส่งข้อมูลสองเฟรมติดกันก็อาจจะทำให้การประมวลผลเกิดปัญหาได้ วิธีการที่ใช้แยกเฟรมข้อมูลที่ได้รับมาจากอุปกรณ์ที่อาจส่งข้อมูลมาสองเฟรมคือ การเพิ่มช่องว่างระหว่างเฟรม (IFS: interframe spacing) ตามรูปที่ 13 ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ แบบสั้น (SIFS: short interframe spacing), แบบยาว (LIFS: long interframe spacing), และแบบลดทอนพิเศษที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูลต่อเนื่อง (BIFS: burst interframe spacing) โดยการเลือกใช้การเพิ่มช่องว่างระหว่างเฟรมขึ้นอยู่กับชนิดของเฟรมข้อมูล



รูปที่ 13 การเพิ่มช่องว่างระหว่างเฟรม

ที่ส่งมา หากเป็นเฟรมข้อมูลขนาดยาวจะถูกตามด้วยการเพิ่มช่องว่างแบบ LIFS หากเฟรมสั้นหรือเฟรมต่อเนื่องจะใช้การเพิ่มช่องว่างแบบ SIFS หรือ RIFS ตามลำดับ

3.4.2 การเริ่มต้นเครือข่าย VLC

การเริ่มต้นใช้งานเครือข่าย VLC จะเริ่มต้นจากการสแกน (scan) ทุกช่องสัญญาณที่มีอยู่ โดยสามารถแบ่งการสแกนออกเป็น 2 ลักษณะคือ

- แอคทีฟสแกน (active scan) มีอยู่เฉพาะในอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ และใช้ในทอพอโลยีการสื่อสารแบบเพียร์ทูเพียร์ โดยการทำแอคทีฟสแกนจะสามารถระบุเฟรมเบคอนที่ถูกส่งมาจากอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ใดๆ ที่อยู่ในรัศมีการสื่อสารได้ ซึ่งลักษณะพิเศษของการทำแอคทีฟสแกนคือ จะมีการส่งคำสั่งเบคอนการร้องขอ (beacon request command) เพื่อให้สามารถเก็บรายละเอียดของข้อมูลต่างๆ ของเครือข่ายที่ทำการสแกน เช่น แอดเดรสโหนดสั้นหรือยาว คำรหัสบ่งชี้เครือข่าย (VPAN Identifier) แอดเดรสของคอร์ดิเนเตอร์ของเครือข่าย รูปแบบของซูเปอร์เฟรม และค่า WQI เป็นต้น การทำแอคทีฟสแกนจึงสามารถนำมาใช้ในการสร้างกลุ่มเครือข่ายใหม่ได้โดยไม่รบกวนกับเครือข่ายเดิมที่มีอยู่
- พาสซีฟสแกน (passive scan) อุปกรณ์ทุกตัวมีความสามารถนี้และใช้ในทอพอโลยีการสื่อสารแบบดาวหรือแบบการกระจาย การทำพาสซีฟสแกนจะสามารถระบุเฟรมเบคอนที่ถูกส่งมาจากอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ใดๆ ที่อยู่ในรัศมีการสื่อสาร แต่จะไม่มีคำสั่งเบคอนการร้องขอ

การทำพาสซีฟสแกน จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการขอเข้าร่วมกับเครือข่ายที่มีอยู่ภายในรัศมีการสื่อสาร

การเริ่มต้นเครือข่าย VLC สำหรับแต่ละทอพอโลยีของการสื่อสาร มีข้อแตกต่างดังนี้

- ทอพอโลยีแบบการกระจาย ไม่มีข้อกำหนดใดๆ ในการเริ่มเครือข่าย
- ทอพอโลยีแบบดาว อุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์จะเริ่มต้นการสร้างเครือข่ายด้วยการส่งเฟรมเบคอน
- ทอพอโลยีแบบเพียร์ทูเพียร์ อุปกรณ์จะเริ่มต้นเครือข่ายด้วยการส่งคำสั่งการเชื่อมต่อหรือคำสั่งแอคทีฟสแกนไปยังอุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อด้วย นอกจากนี้หากอุปกรณ์ในเครือข่ายใช้ช่องทางการสื่อสารด้วยแสงเพียงสีเดียว (single color channel) ก็จะไม่มีการเลือกใช้ช่องทางอื่นในการสื่อสาร แต่หากอุปกรณ์รองรับการส่งผ่านหลายสี (multiple transmit color channel) ก็จะมีการส่งผ่านค่า WQI เพื่อใช้ในการเลือกช่องสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

เมื่ออุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์เริ่มต้นเครือข่ายด้วยการส่งเฟรมเบคอน ถือเป็นการเริ่มต้นให้อุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ภายในรัศมีการสื่อสารสามารถเริ่มกระบวนการค้นหาและเชื่อมต่อเครือข่ายได้โดย

- อุปกรณ์ที่ใช้ในชั้นกายภาพแบบที่ 1 (PHY I) จะใช้สัญญาณนาฬิกาทางแสง (optical clock) ที่ความถี่ 200 kHz และรองรับความเร็วในการสื่อสารที่ 11.67 kbps
- อุปกรณ์ที่ใช้ในชั้นกายภาพแบบที่ 2 (PHY II) จะใช้สัญญาณนาฬิกาทางแสงที่ความถี่ 3.75 MHz และรองรับความเร็วในการสื่อสารที่ 1.25 Mbps
- อุปกรณ์ที่ใช้ในชั้นกายภาพแบบที่ 3 (PHY III) จะใช้กระบวนการค้นหาเช่นเดียวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในชั้นกายภาพแบบที่ 2 โดยกระบวนการค้นหานี้จะไม่รองรับทอพอโลยีแบบการกระจาย

โดยเมื่อเครือข่ายการสื่อสารกำลังทำงานอยู่อาจมีเหตุการณ์ที่เครือข่ายสองเครือข่ายมีคาร์รหัสบ่งชี้เครือข่ายเดียวกันในพื้นที่บริการเดียวกัน ก็จะทำให้เกิดการขัดแย้งและส่งผลต่อการสื่อสาร ดังนั้นอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์จะต้องดำเนินการแก้ไขปัญหานี้โดยการสร้างซูเปอร์เฟรมและปรับค่าพารามิเตอร์ของช่องทางการสื่อสารที่จำเป็นใหม่ เพื่อส่งให้กับอุปกรณ์ทุกตัวในเครือข่ายทำการปรับเปลี่ยนไปยังค่าที่ไม่เกิดความขัดแย้งระหว่างเครือข่ายทั้งสอง

3.4.3 การเข้าร่วมและออกจากเครือข่าย

เมื่ออุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์เริ่มการส่งเฟรมเบคอน อุปกรณ์ที่ต้องการจะร่วมเครือข่ายจะต้องส่งค่ารีเซต MLME-RESET ในชั้น MAC ก่อน จากนั้นจึงจะเริ่มให้อุปกรณ์สแกนช่องทางการสื่อสาร โดยผลของการสแกนจะนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกเครือข่ายที่มีความเหมาะสมต่อไป โดยการเข้าร่วมเครือข่ายของอุปกรณ์จะต้องได้รับการอนุญาตจากอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ก่อน ซึ่งอุปกรณ์

คอร์ดิเนเตอร์ที่อนุญาตให้อุปกรณ์ตัวอื่นสามารถเข้าร่วมเครือข่ายได้จะต้องกำหนดให้พารามิเตอร์การอนุญาตมีค่าเป็นจริง (True) แต่ถ้าพารามิเตอร์การอนุญาตมีค่าเป็นเท็จ (False) จะหมายถึงไม่อนุญาตให้มีอุปกรณ์อื่นใดเข้าร่วมเครือข่าย และเมื่อสแกนช่องสัญญาณเสร็จสิ้นอุปกรณ์ที่จะเข้าร่วมจะทำการส่งคำสั่งร้องขอการเข้าร่วมไปยังอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ที่อยู่ในเครือข่ายที่มีอยู่เดิม หากอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ได้รับการร้องขอ จะทำการส่งเฟรมตอบรับกลับมา ระหว่างนั้นอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ยังต้องทำการตรวจสอบความพร้อมของทรัพยากรภายในเครือข่ายและตรวจสอบว่าอุปกรณ์ที่ส่งคำร้องขอมา มีอยู่ในเครือข่ายอยู่แล้วหรือไม่ หากมีอยู่แล้วก็จะทำการลบข้อมูลเดิมทิ้ง และหากมีทรัพยากรรองรับเพียงพอ ก็จะส่งคำตอบรับพร้อมกับแอดเดรสให้กับอุปกรณ์ที่ร้องขอ แต่หากทรัพยากรมีไม่เพียงพอ อุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ก็จะส่งคำสั่งปฏิเสธคำร้องขอการเข้าร่วมเครือข่ายกลับไป

เมื่ออุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ต้องการให้อุปกรณ์การสื่อสารบางตัวออกจากเครือข่าย ก็จะส่งคำสั่งแจ้งเตือนการให้ออกจากเครือข่ายไปยังอุปกรณ์นั้น โดยมีการร้องขอให้ส่งเฟรมตอบรับกลับมาด้วย โดยอุปกรณ์ที่ถูกให้ออกจากเครือข่ายเมื่อได้รับคำสั่งการให้ออกจากเครือข่ายแล้ว ก็จะมีการยืนยันการรับคำสั่งด้วยการส่งเฟรมตอบรับกลับมา สำหรับกรณีที่อุปกรณ์ที่อยู่ในเครือข่ายต้องการออกจากเครือข่าย ก็จะส่งคำร้องขອออกจากเครือข่ายไปยังอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ เพื่อให้อุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์รับทราบและลบข้อมูลในรายการที่บันทึกไว้ และส่งเฟรมตอบรับกลับไปยังอุปกรณ์ที่ส่งคำร้องขอมา หากเฟรมตอบรับส่งไปไม่ถึงเมื่อครบเวลาที่กำหนดไว้ อุปกรณ์ที่ส่งคำร้องขอการออกจากเครือข่าย ก็จะตัดสินใจดำเนินการออกจากเครือข่ายโดยอัตโนมัติ

3.4.4 การเข้าจังหวะเวลา

การเข้าจังหวะเวลา (synchronization) ในเครือข่ายแบ่งเป็นสองลักษณะคือ

- การเข้าจังหวะเวลาที่ใช้เฟรมเบคอน อุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์จะสร้างเฟรมเบคอนและส่งออกไปในเครือข่าย โดยอุปกรณ์ที่อยู่ในเครือข่ายจะรับเฟรมเบคอนและทำการถอดรหัสเพื่อการเข้าจังหวะเวลา
- การเข้าจังหวะเวลาที่ไม่ใช้เฟรมเบคอน อุปกรณ์ที่อยู่ในเครือข่ายที่ไม่รองรับการใช้เฟรมเบคอนจะส่งคำสั่งการสอบถามมายังอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์เพื่อดำเนินการการเข้าจังหวะเวลา

3.4.5 การรองรับการทำรายการ

อุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์จะส่งแฟล็ก (Flag) ในเฟรมเบคอนเพื่อให้อุปกรณ์ในเครือข่ายทราบว่าข้อมูลคงค้างอยู่ หรืออุปกรณ์ในเครือข่ายสามารถทำการกระตุ้นไปยังอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์เพื่อ

ร้องขอหากมีรายการที่ค้างอยู่ กระบวนการส่งข้อมูลลักษณะนี้เรียกว่าการส่งผ่านข้อมูลทางอ้อม (indirect transmission) โดยข้อมูลที่บรรจุอยู่ในการส่งผ่านข้อมูลทางอ้อมนั้นจะจัดอยู่ในรูปแบบของการทำรายการ (transaction) อุปกรณ์คอมพิวเตอร์จะต้องมีความสามารถในการจัดเก็บได้อย่างน้อยหนึ่งรายการ และหากอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ได้รับการร้องขอให้ส่งผ่านข้อมูลทางอ้อมแต่มีหน่วยความจำในการจัดเก็บรายการไม่เพียงพอ ก็จะส่งสถานะข้อมูลมากเกินไป (overflow) ออกมา แต่ถ้าอุปกรณ์คอมพิวเตอร์มีหน่วยความจำในการจัดเก็บมากกว่าหนึ่งรายการ การส่งผ่านรายการไปยังอุปกรณ์เดียวกันก็ต้องถูกส่งตามลำดับก่อนหลังด้วย สำหรับรายการที่ถูกเก็บไว้ที่อุปกรณ์คอมพิวเตอร์นานเกินกว่าค่าเวลาการคงอยู่ (persistence time) และไม่มีอุปกรณ์ตัวใดในเครือข่ายดำเนินการร้องขอรายการนั้น ข้อมูลรายการนั้นจะถูกลบทิ้งไป

3.4.6 การส่งผ่าน การรับ และการตอบรับ

การส่งผ่าน ในการส่งผ่านข้อมูลแอดเดรส (address) เป็นส่วนสำคัญในการระบุถึงผู้ส่งและผู้รับฟิลด์แอดเดรส (address field) ของผู้ส่งเป็นส่วนระบุแอดเดรสของอุปกรณ์ที่จะทำการส่งเฟรมข้อมูล โดยหากอุปกรณ์นั้นยังไม่ได้ทำการเข้าร่วมเครือข่าย การระบุแอดเดรสจะต้องใช้แอดเดรสที่มีความยาว 64 บิต แต่ถ้าอุปกรณ์ดังกล่าวได้ทำการเข้าร่วมเครือข่ายแล้ว จะได้รับอนุญาตให้ใช้แอดเดรสที่มีขนาดสั้น 16 บิต ที่ใช้ได้เฉพาะภายในเครือข่ายที่ได้ทำการเข้าร่วม

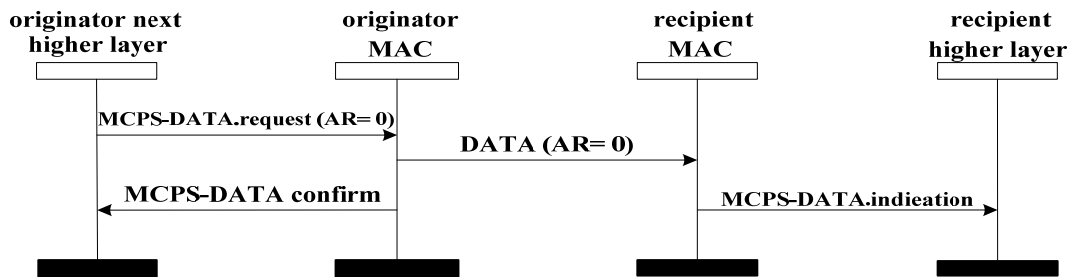
- กรณีที่ฟิลด์แอดเดรสของผู้ส่งไม่ได้ระบุข้อมูลไว้จะหมายถึงเฟรมข้อมูลนั้นถูกส่งมาจากอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และฟิลด์แอดเดรสของผู้รับจะหมายถึงที่อยู่ของอุปกรณ์ผู้รับที่เฟรมข้อมูลนั้นต้องถูกนำส่ง ซึ่งอาจใช้ได้ทั้งแอดเดรสแบบ 16 บิตหรือ 64 บิต
- กรณีที่ฟิลด์แอดเดรสของผู้รับไม่ได้ถูกระบุไว้จะหมายถึงเฟรมข้อมูลนั้นถูกส่งไปยังอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และฟิลด์แอดเดรสของผู้ส่งจะหมายถึงแอดเดรสของอุปกรณ์ต้นทางที่ส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์คอมพิวเตอร์
- กรณีที่ฟิลด์แอดเดรสทั้งของผู้รับและผู้ส่งปรากฏในเฟรมชั้น MAC ต้องทำการเปรียบเทียบค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายของทั้งผู้รับและผู้ส่งว่าตรงกันหรือไม่ หากค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายตรงกันจะมีการระบุแฟล็กในส่วนฟิลด์ควบคุมเฟรมเป็นค่า 1 และค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายก็ไม่จำเป็นสำหรับการส่งรวมไปในเฟรมข้อมูล แต่ถ้าค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายไม่ตรงกัน ก็จำเป็นต้องส่งค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายของทั้งผู้รับและผู้ส่งไปในเฟรมข้อมูลด้วย กรณีที่มีแอดเดรสเพียงค่าเดียวไม่ว่าจะเป็นแอดเดรสของผู้รับหรือแอดเดรสของผู้ส่งจะมีการระบุแฟล็กในส่วนฟิลด์ควบคุมเฟรมเป็นค่า 0 และค่ารหัสบ่งชี้เครือข่ายของแอดเดรสนั้นจะถูกส่งรวมไปในเฟรมข้อมูล

การส่งผ่านเฟรมข้อมูลสำหรับเครือข่ายที่ไม่ใช้เฟรมเบคอน อุปกรณ์ที่ส่งจะใช้อัลกอริทึมการส่งแบบสุ่มที่ไม่มีสล็อต แต่การส่งผ่านเฟรมข้อมูลสำหรับเครือข่ายที่ใช้เฟรมเบคอน อุปกรณ์ที่ส่งจะต้องค้นหาเบคอนก่อนทำการส่งข้อมูล โดยหากไม่สามารถหาเบคอนได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และการส่งจะใช้อัลกอริทึมการส่งแบบสุ่มที่ไม่มีสล็อต แต่ถ้าภายหลังสามารถหาเบคอนพบ เฟรมข้อมูลจะถูกส่งในรูปแบบซูเปอร์เฟรมที่เหมาะสมในลักษณะการเข้าถึงแบบสุ่มที่มีสล็อต นอกจากนี้การส่งเฟรมข้อมูลจะมีการบันทึกเลขลำดับข้อมูล (DSN: data-sequence number) ลงในส่วนหัวของเฟรมข้อมูลเพื่อใช้ในการจัดลำดับข้อมูล และใช้ในการตรวจสอบการได้รับเฟรมข้อมูลจากการส่งคำยืนยันการได้รับเฟรมข้อมูลจากอุปกรณ์ตัวรับ

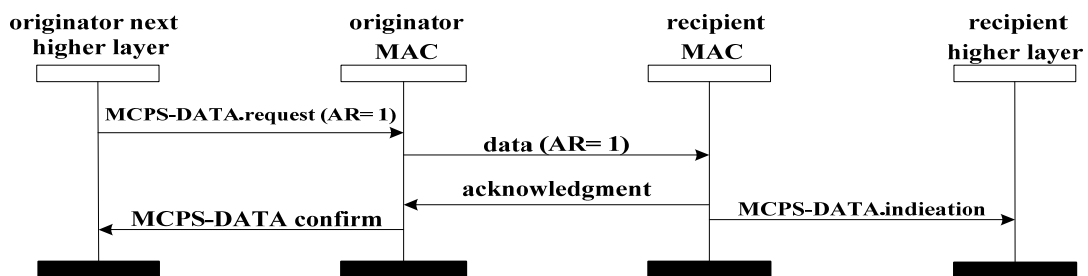
การตอบรับและการปฏิเสธ ในช่วงเวลายังไม่ทำงาน (idle period) อุปกรณ์ตัวรับสัญญาณสามารถเลือกได้ในชั้น MAC ว่าจะให้มีการรับสัญญาณหรือไม่ โดยในชั้น MAC จะมีการติดต่อกับชั้นที่อยู่ด้านบนเพื่อรอรับคำร้องขอต่างๆ เช่น หากมีการร้องขอให้ตอบกลับหากมีข้อมูลส่งมา และอุปกรณ์ตัวรับอยู่ในสภาวะพร้อมรับสัญญาณ อุปกรณ์ตัวรับจะรับและถอดรหัสสัญญาณตามมาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับอุปกรณ์ทุกตัวที่ส่งสัญญาณมาในช่องสัญญาณเดียวกันกับอุปกรณ์ตัวรับ จากนั้นในชั้น MAC จะทำการกรองเฟรมข้อมูลที่ได้รับมาได้ เฟรมข้อมูลที่มีค่าในฟิลด์รหัสตรวจสอบความผิดพลาด (FCS) ไม่ถูกต้องจะถูกทิ้ง และเลือกเพียงเฟรมข้อมูลที่ต้องการเพื่อส่งผ่านไปยังชั้นที่อยู่ด้านบนสำหรับเฟรมข้อมูลที่ได้รับได้แล้วนั้น โดยเฟรมที่ได้รับเป็น

- เฟรมข้อมูลแบบการกระจาย ชั้น MAC จะไม่ส่งคำยืนยันการได้รับเฟรม
- เฟรมข้อมูล ชั้น MAC จะส่งต่อเฟรมนั้นไปยังชั้นการสื่อสารถัดไป
- เฟรมข้อมูลคำสั่งหรือมีการร้องขอการยืนยันการได้รับเฟรม ชั้น MAC จะต้องส่งคำยืนยันการได้รับเฟรมกลับไปยังอุปกรณ์ตัวส่ง โดยคำยืนยันการได้รับเฟรมจะมีการบรรจุเลขลำดับข้อมูล (DSN) ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ตัวส่งทราบได้ว่าเฟรมข้อมูลใดที่อุปกรณ์ตัวรับได้รับแล้ว
- เฟรมคำสั่งหรือเฟรมเบคอน ชั้น MAC จะทำการประมวลผลเฟรมนั้น และอาจส่งการแสดงผลไปยังชั้นการสื่อสารถัดไป

การใช้คำยืนยันการได้รับเฟรมและการส่งซ้ำ เฟรมข้อมูลหรือเฟรมคำสั่งในชั้น MAC จะถูกส่งไปพร้อมกับการร้องขอคำยืนยันการได้รับเฟรม โดยทำการระบุไว้ในส่วนของฟิลด์ควบคุมเฟรม แต่เฟรมเบคอนหรือเฟรมยืนยันการได้รับเฟรมจะถูกส่งไปโดยทำการระบุการร้องขอคำยืนยันการได้รับเฟรมในส่วนของฟิลด์ควบคุมเฟรมเป็นค่า 0 (MCPS-DATA.request (AR=0)) ในทำนองเดียวกันสำหรับเฟรมใดๆ ที่ถูกส่งในรูปแบบการกระจายจะถูกส่งไป โดยทำการระบุการร้องขอ



(ก) รูปแบบการสื่อสารที่ไม่มีการส่งคำยืนยันการได้รับเฟรม



(ข) รูปแบบการสื่อสารที่มีการส่งคำยืนยันการได้รับเฟรม

รูปที่ 14 รูปแบบการสื่อสารที่เฟรมถูกส่งสำเร็จ [3]

คำยืนยันการได้รับเฟรมในส่วนของฟิลด์ควบคุมเฟรมเป็นค่า 0 รูปที่ 14 แสดงรูปแบบการสื่อสารที่มีการส่ง/ไม่ส่งคำยืนยันการได้รับเฟรม

สำหรับกรณีเฟรมข้อมูลหรือเฟรมคำสั่งในชั้น MAC จะมีการระบุการร้องขอคำยืนยันการได้รับเฟรมในส่วนของฟิลด์ควบคุมเฟรมให้มีความเป็น 1 (MCPS-DATA.request (AR=1)) อุปกรณ์ที่ส่งเฟรมนั้นจะต้องรอการตอบยืนยันการได้รับเฟรมภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ใน macAckWaitDuration ซึ่งหากมีการได้รับคำยืนยันการได้รับเฟรมในช่วงเวลาที่กำหนด และมีความล่าช้าข้อมูล DNS ที่ถูกต้อง จะถือว่าการส่งเฟรมถูกต้องสมบูรณ์และจะไม่มีดำเนินการใดๆ ต่อ อย่างไรก็ตามถ้าไม่ได้รับคำยืนยันการได้รับเฟรมในช่วงเวลาที่กำหนดหรือคำยืนยันที่ได้รับมีค่าเลขลำดับข้อมูล DNS ไม่ถูกต้อง อุปกรณ์ที่ส่งเฟรมจะพิจารณาว่าการส่งข้อมูลสื่อสารครั้งนี้ล้มเหลว และจะทำการส่งเฟรมซ้ำอีกครั้ง ซึ่งจะต้องทำการส่งในช่วงเวลาการเข้าถึงแบบการแข่งขัน (CAP) หรือช่องเวลาที่แน่นอนที่แบ่งให้แก่อุปกรณ์ ที่ข้อมูลต้นฉบับเคยถูกส่งไปเท่านั้น และหากไม่ได้รับคำยืนยันการได้รับเฟรม หลังจากการส่งซ้ำเท่ากับจำนวนการส่งซ้ำสูงสุดที่ระบุไว้ ชั้น MAC จะพิจารณาว่าการสื่อสารเฟรมไม่ประสบความสำเร็จและจะแจ้งผลการสื่อสารล้มเหลวนี้ไปยังชั้นการสื่อสารชั้นบนต่อไป

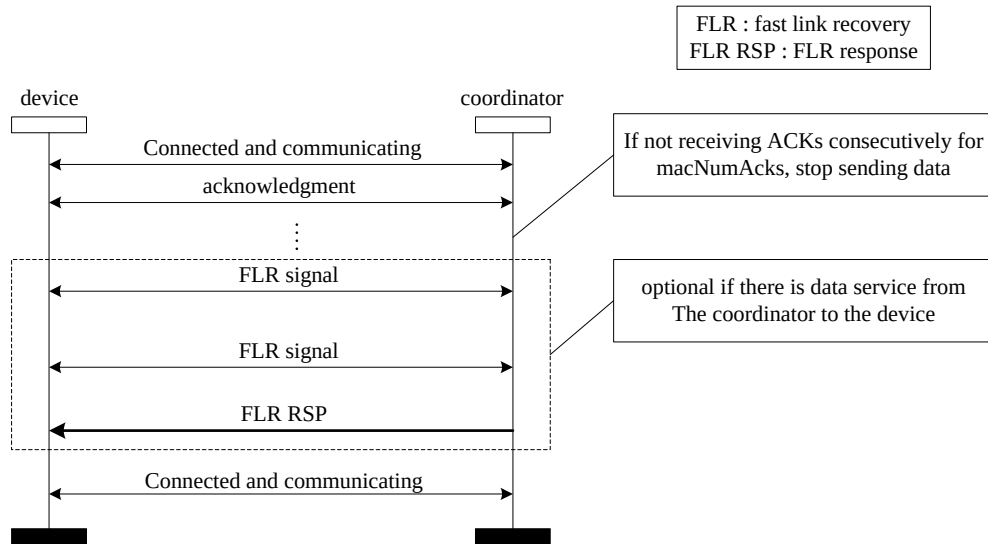
3.4.7 การจัดการและการจัดสรร GTS

ช่องเวลาที่แน่นอนที่แบ่งให้แก่อุปกรณ์ (GTS) เป็นส่วนหนึ่งของช่วงเวลาของซูเปอร์เฟรมที่มีการจัดสรรไว้เป็นพิเศษ อุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์จะเป็นผู้จัดสรรเพื่อใช้สำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์และอุปกรณ์ลูกข่ายที่ทำการเชื่อมโยงกับเครือข่ายเท่านั้น ในการจัดสรรช่วงเวลา GTS อุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์สามารถจัดสรรช่วงเวลา GTS ได้มากกว่าหนึ่งซูเปอร์เฟรม หากข้อมูลที่ต้องทำการสื่อสารมีมากกว่าจำนวนช่วงเวลา GTS ที่จัดสรรไว้ ช่องเวลาที่แน่นอนที่แบ่งให้อุปกรณ์นี้จำเป็นต้องจัดสรรไว้ล่วงหน้าก่อนที่จะใช้งาน โดยอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์จะพิจารณาจากคำร้องขอของอุปกรณ์ลูกข่าย จากนั้นจึงจัดสรรช่องเวลาที่มียูในปัจจุบันที่สามารถใช้งานได้ ในซูเปอร์เฟรม หากมีการร้องขอจากอุปกรณ์ลูกข่ายหลายตัว ก็จะจัดสรรช่วงเวลา GTS ให้กับอุปกรณ์ลูกข่ายที่มีการร้องขอก่อน (first-come first-serve) นอกจากนี้ช่องเวลาที่แน่นอนที่แบ่งให้แก่อุปกรณ์นี้ ไม่ได้ถูกจัดสรรในซูเปอร์เฟรมไว้ตลอดเวลา หากไม่มีการร้องขออุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์ก็จะไม่จัดสรรไว้ในส่วนของแอดเดรสที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ลูกข่ายและอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์สำหรับการสื่อสารในช่วงเวลา GTS นั้นจะใช้แอดเดรสแบบสั้นเท่านั้น

การจัดการช่องเวลาที่แน่นอนที่แบ่งให้แก่อุปกรณ์จะจัดการโดยอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์เท่านั้น โดยอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์จะต้องมีทรัพยากรระบบที่เพียงพอสำหรับการจัดการช่วงเวลา GTS โดยแต่ละช่วงเวลา GTS จะต้องจัดทรัพยากรระบบสำหรับลำดับช่องเริ่มต้น ความยาวช่วงเวลา ทิศทางการสื่อสารจากอุปกรณ์ลูกข่ายมายังอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์ หรือจากอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์ไปยังอุปกรณ์ลูกข่าย และแอดเดรสของอุปกรณ์ลูกข่ายที่ทำการสื่อสารในช่องเวลานั้น

3.4.8 การกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็ว

ในการสื่อสารด้วยทอพอโลยีแบบดาว หากการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ลูกข่ายและอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์ดำเนินไป โดยอุปกรณ์ลูกข่ายไม่ได้รับคำยืนยันการได้รับเฟรมจากอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์เกินจำนวนครั้งที่กำหนดไว้ใน MAC PIB attribute ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 3 (macNumAcks = 3) อุปกรณ์ลูกข่ายจะเริ่มกระบวนการการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็ว (FLR: fast link recovery) ซึ่งจะเริ่มด้วยการส่งสัญญาณ FLR ไปยังอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์ซ้ำๆ โดยเมื่ออุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์ได้รับสัญญาณ FLR จากอุปกรณ์ลูกข่าย อุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์ก็จะส่งสัญญาณตอบรับกลับไปยังอุปกรณ์ผู้ส่งและการสื่อสารจะถูกเชื่อมโยงกลับคืนมา โดยในขณะที่ยังคงกระบวนการ FLR ดำเนินการอยู่ อุปกรณ์ลูกข่ายอาจหยุดส่งเฟรมข้อมูลไปยังอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์ และหากอุปกรณ์ลูกข่ายไม่ได้รับสัญญาณตอบสนองจากอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์ในเวลาที่กำหนดไว้ใน MAC PIB attribute โดยมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 63 (macLinkTimeout = 63) ซึ่งอยู่ระหว่างการไม่ได้รับ



รูปที่ 15 กระบวนการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็วเริ่มต้นจากอุปกรณ์ลูกข่าย [3]

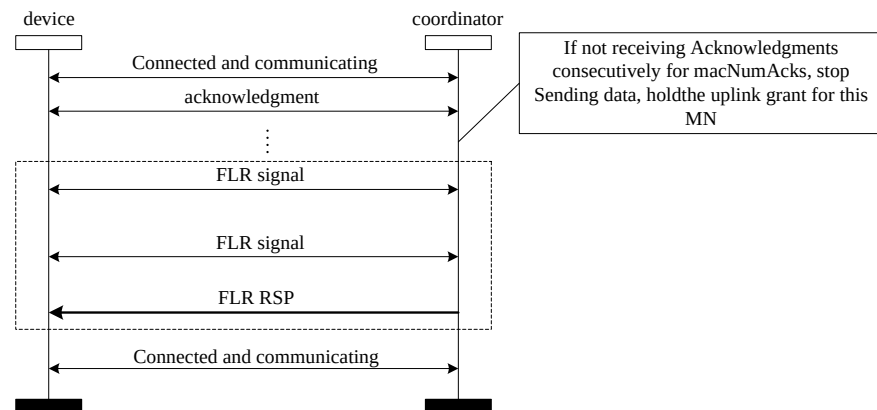
ซูเปอร์เฟรม อุปกรณ์ลูกข่ายจะพิจารณาว่าการเชื่อมต่อนั้นขาดลงและไม่สามารถกู้คืนกลับมาได้ รูปที่ 15 แสดงกระบวนการ FLR และเฟรมที่ใช้ใน FLR จะใช้เฟรมคำสั่งที่กำหนดให้ทำการส่ง ด้วยอัตราความเร็วการสื่อสารน้อยสุดที่สามารถใช้งานได้ในระบบ

นอกจากนี้หากอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ไม่ได้รับคำยืนยันการได้รับเฟรมจากอุปกรณ์ลูกข่าย การเริ่มกระบวนการ FLR อาจทำจากอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์ได้เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 16 และ หากการเชื่อมต่ออยู่ในรูปแบบการสื่อสารแบบหลายความยาวคลื่น การส่งสัญญาณ FLR สามารถส่งเฟรมคำสั่งดังกล่าวในแถบความยาวคลื่นอื่นๆ ที่สามารถทำได้ โดยหากมีการตอบสนองจากความยาวคลื่นใด อุปกรณ์ที่เริ่มต้นกระบวนการจะทำการเชื่อมโยงการสื่อสารกลับคืนมาในแถบความยาวคลื่นที่มีการตอบสนองนั้น

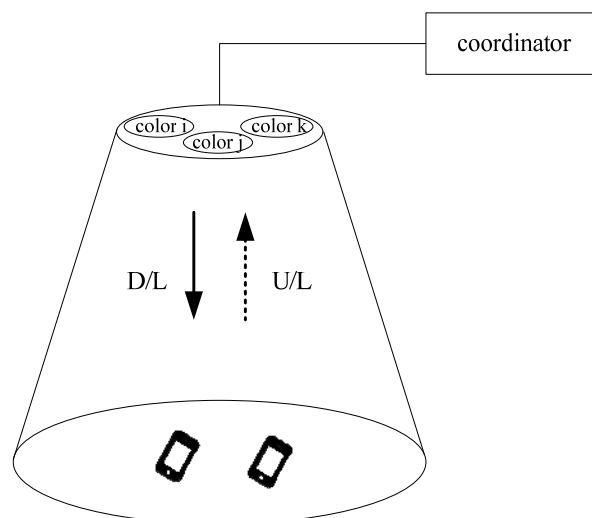
3.4.9 การกำหนดทรัพยากรหลายช่องสัญญาณ

ในกรณีที่อุปกรณ์ในเครือข่ายสามารถรองรับการส่งข้อมูลแบบหลายแถบความยาวคลื่น (หรือแบบหลายสี) และอุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์มีทรัพยากรไม่เพียงพอสำหรับการให้บริการต่ออุปกรณ์ลูกข่ายใหม่ที่เข้ามาร่วมในเครือข่าย อุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์อาจเลือกใช้วิธีการเพิ่มช่องทางการส่งข้อมูลจากแถบความยาวคลื่นเดิมที่ใช้อยู่ไปยังแถบความยาวคลื่นใหม่ได้ตามที่แสดงในรูปที่ 17 ในทางปฏิบัติแถบความยาวคลื่นที่รองรับตามมาตรฐานมีจำนวน 7 แถบความยาวคลื่น ซึ่งจะถูกระบุความสามารถในการรองรับการใช้งานของอุปกรณ์ในข้อมูลบิตของคำสั่ง Src_multi_info

FLR : fast link recovery
FLR RSP : FLR response



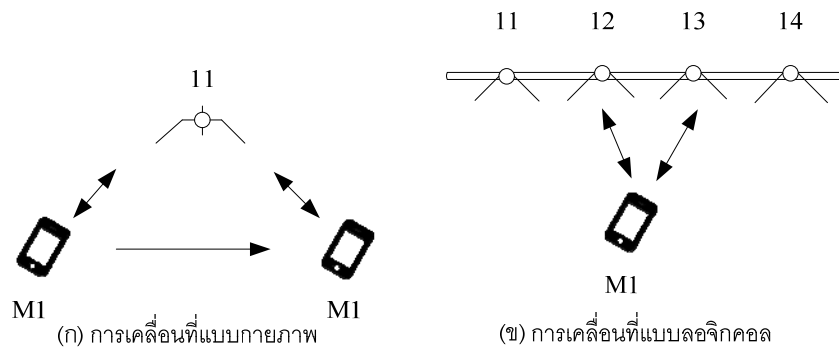
รูปที่ 16 กระบวนการกู้คืนการเชื่อมต่ออย่างรวดเร็วเริ่มต้นจากอุปกรณ์โคออร์ดิเนเตอร์ [3]



รูปที่ 17 ตัวอย่างอุปกรณ์โคออร์ดิเนเตอร์ที่รองรับการส่งผ่านหลายความยาวคลื่น

และ Des_multi_info สำหรับอุปกรณ์โคออร์ดิเนเตอร์และอุปกรณ์ลูกข่ายตามลำดับ โดยในตำแหน่งบิต 'b0 ... b6' ถ้าระบุค่า '0000000' จะหมายถึงไม่รองรับการส่งผ่านหลายสีหรือหลายแถบความยาวคลื่น แต่ถ้าระบุค่าหนึ่งในบิตใดจะหมายถึงรองรับการส่งผ่านในแถบความยาวคลื่นนั้นๆ เช่น หากระบุค่า '0100001' จะหมายถึงการรองรับแถบความยาวคลื่นที่ 2 และ 7 เป็นต้น

ในทางปฏิบัติระบบที่รองรับการส่งผ่านหลายแถบความยาวคลื่นจะสามารถหลีกเลี่ยงการแทรกสอดระหว่างอุปกรณ์ได้โดยใช้เทคนิคการฮอปแถบความถี่ (band hopping) กล่าวคือถ้า



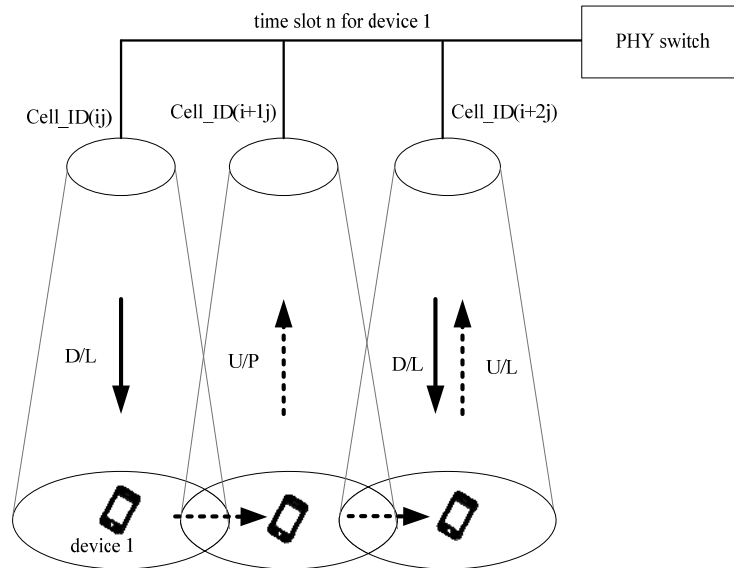
รูปที่ 18 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่าย

อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ตรวจพบการแทรกสอดระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้แถบความถี่เดียวกัน ก็สามารถใช้เทคนิคการฮอปแถบความถี่เพื่อลดผลกระทบได้ ซึ่งจะต้องกำหนดรูปแบบการฮอปแถบความถี่ไว้ล่วงหน้า และส่งข้อมูลรูปแบบการฮอปจากอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ไปยังอุปกรณ์ลูกข่ายผ่านเฟรมคำสั่ง MAC (ระบบที่ไม่รองรับการส่งผ่านหลายแถบความถี่จะใช้งานเทคนิคการฮอปแถบความถี่ไม่ได้) นอกจากนี้รูปแบบการฮอปที่ใช้ต้องไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของแสงจนสังเกตเห็นได้ เช่น การฮอประหว่างแสงสีขาวที่สร้างจากแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน จะต้องเลือกสัดส่วน เวลา และสี ของการฮอปที่เหมาะสม เพื่อให้แสงที่ถูกสร้างขึ้นยังคงเป็นสีขาว

3.4.10 การออกแบบเซลล์การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นและการรองรับการเคลื่อนที่

อุปกรณ์คอมพิวเตอร์หนึ่งตัวสามารถรองรับอุปกรณ์การกระจายแสงได้หลายตัว โดยจะเรียกอุปกรณ์การกระจายแสงแต่ละตัวว่า “เซลล์ (cell)” ซึ่งจะใช้การส่งผ่านข้อมูลการสื่อสารในแต่ละเซลล์เพื่อให้บริการที่ใช้การอ้างอิงตำแหน่งของอุปกรณ์ลูกข่าย เช่น การระบุตำแหน่ง หรือใช้แก้ปัญหาจากการแทรกสอดระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้แสงในแถบความถี่เดียวกันได้ ในการออกแบบเซลล์ VLC จำเป็นต้องออกแบบให้รองรับการสลับการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างเซลล์ที่อาจเกิดจากการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่าย โดยการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่ายสามารถแยกได้เป็น 2 ลักษณะคือ (ตามรูปที่ 18)

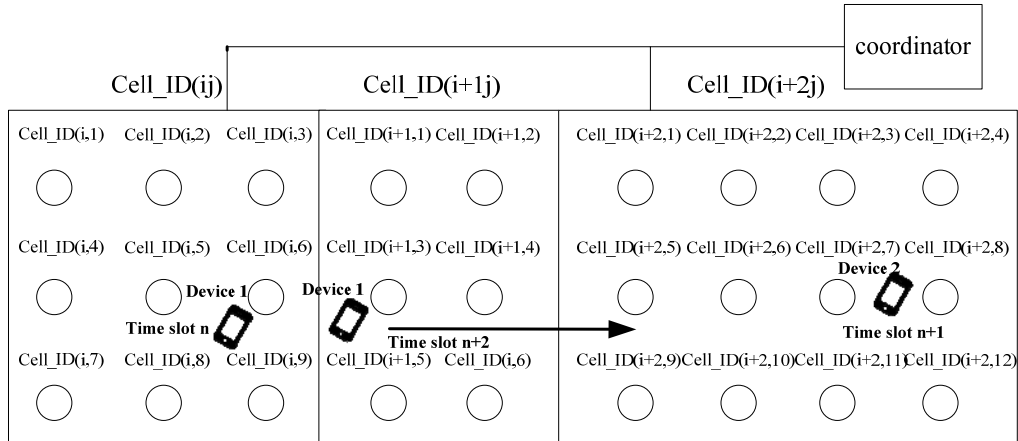
- การเคลื่อนที่แบบกายภาพ (physical mobility) อุปกรณ์ลูกข่ายมีการเปลี่ยนตำแหน่งหรือมีการเคลื่อนที่ แต่อยู่ภายในรัศมีการสื่อสารของเซลล์ในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ตัวเดิม
- การเคลื่อนที่แบบลอจิกคอล (logical mobility) อุปกรณ์ลูกข่ายไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง แต่มีการเปลี่ยนการสื่อสารจากเซลล์ในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์หนึ่งไปยังเซลล์อื่น



รูปที่ 19 การควบคุมสวิตช์กายภาพผ่านเอนทีทีควบคุมอุปกรณ์ DME

ในการจัดการเซลล์ของอุปกรณ์เคลื่อนที่เนเตอร์จะดำเนินการควบคุมสวิตช์กายภาพ (PHY switch) ผ่านเอนทีทีควบคุมอุปกรณ์ DME ตามรูปที่ 19 โดยอุปกรณ์เคลื่อนที่เนเตอร์จะระบุอุปกรณ์กำเนิดแสงแต่ละเซลล์ด้วยค่า $cell_ID(i, j)$ โดย j หมายถึงลำดับของอุปกรณ์กำเนิดแสงในเซลล์ i ซึ่งถ้าอุปกรณ์ลูกข่ายมีการเคลื่อนที่จาก $cell_ID(i, j)$ มายัง $cell_ID(i+1, j)$ อุปกรณ์เคลื่อนที่เนเตอร์จะสามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่ายได้จากสัญญาณที่ส่งจากอุปกรณ์ลูกข่ายมายังเซลล์ที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น เฟรมยืนยันการตอบรับ เป็นต้น

ในส่วนของซูเปอร์เฟรม การสื่อสารของอุปกรณ์เคลื่อนที่เนเตอร์จะต้องรองรับการสลับระหว่างเซลล์ โดยต้องจัดสรรช่องเวลาสำหรับอุปกรณ์แต่ละตัวด้วย เช่น รูปที่ 20 แสดงอุปกรณ์ลูกข่ายตัวหนึ่งมีการเคลื่อนตำแหน่งจากที่เคยสื่อสารใน $cell_ID(i, j)$ มายัง $cell_ID(i+1, j)$ และอาจเคลื่อนที่ไปยังเซลล์อื่น ก่อนทำการส่งเฟรมข้อมูลสื่อสารกลับไปยังอุปกรณ์เคลื่อนที่เนเตอร์ เพราะฉะนั้นอุปกรณ์เคลื่อนที่เนเตอร์อาจไม่ได้รับเฟรมยืนยันการได้รับข้อมูลจากลูกข่ายที่เซลล์ $cell_ID(i, j)$ อุปกรณ์เคลื่อนที่เนเตอร์จะดำเนินการค้นหาลูกข่ายที่ขาดการติดต่อในเซลล์ข้างเคียง เช่น $cell_ID(i-1, j)$ และ $cell_ID(i+1, j)$ โดยใช้ช่องเวลาเดิมที่กำหนดไว้สำหรับอุปกรณ์ลูกข่ายตัวดังกล่าวในซูเปอร์เฟรม ส่วนอุปกรณ์ลูกข่ายตัวอื่นที่อยู่ใน $cell_ID(i, j)$ ยังคงทำการสื่อสารกับอุปกรณ์เคลื่อนที่เนเตอร์ผ่านช่องเวลาที่ได้ถูกจัดสรรไว้เดิมในซูเปอร์เฟรม จากผลการค้นหา



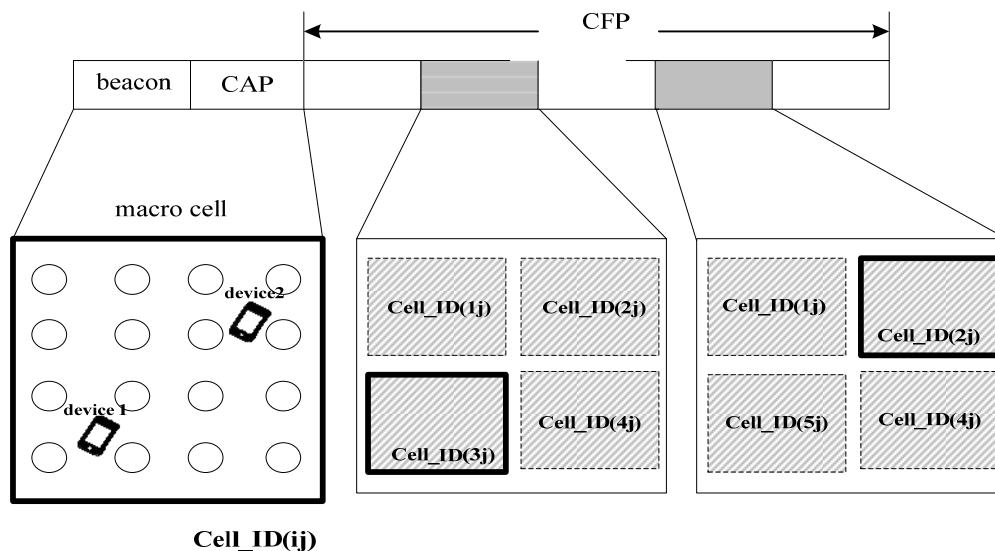
รูปที่ 20 การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่ายและการควบคุม

ของอุปกรณ์โคординเตอร์ หากพบอุปกรณ์ลูกข่ายที่ขาดการติดต่อใน $\text{cell_ID}(i+1, j)$ อุปกรณ์โคординเตอร์จะกระตุ้นการสื่อสารกับอุปกรณ์ลูกข่ายและทำการจัดสรรช่องเวลาในซูปเปอร์เฟรมสำหรับ $\text{cell_ID}(i+1, j)$ พร้อมทั้งเอนทิตีที่ควบคุมอุปกรณ์ DME จะทำการเลือกสวิตช์กายภาพมายัง $\text{cell_ID}(i+1, j)$ สำหรับอุปกรณ์ลูกข่ายที่เคลื่อนที่มาที่เซลล์นี้ จากนั้นจะทำการสวิตช์กลับไปยัง $\text{cell_ID}(i, j)$ เพื่อให้บริการแก่อุปกรณ์ลูกข่ายที่ยังทำงานอยู่ในเซลล์ $\text{cell_ID}(i, j)$ ในช่องเวลาอื่นๆ ในซูปเปอร์เฟรม แต่หากการค้นหาไม่พบอุปกรณ์ลูกข่ายในเวลาที่กำหนด อุปกรณ์ลูกข่ายนั้นจะถูกยกเลิกการเชื่อมต่อจากเครือข่ายนั้น

ในการออกแบบให้อุปกรณ์โคординเตอร์สามารถรองรับอุปกรณ์ลูกข่ายที่อาจต้องการเข้าร่วมกับเครือข่ายในช่วงเวลาการส่งเบคอนและช่วงเวลาการเข้าถึงแบบการแข่งขัน (CAP) จะต้องกำหนดให้อุปกรณ์กระจายแสงทุกตัวในทุกเซลล์ทำการส่งสัญญาณเดียวกันทั้งหมด เมื่ออุปกรณ์ลูกข่ายทั้งหมดถูกนำเข้าร่วมเครือข่ายและระบุตำแหน่งในแต่ละเซลล์แล้ว โครงสร้างของช่วงเวลาปลดการแข่งขัน (CFP) ในซูปเปอร์เฟรมจะถูกจัดสรรสำหรับอุปกรณ์ลูกข่ายแต่ละตัวดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 21

3.4.11 การรองรับฟังก์ชันการแสดงผลสี

นอกจากการส่งเฟรมเพื่อสื่อสารข้อมูลและคำสั่ง การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นยังมีการรองรับฟังก์ชันการแสดงผลสีตามสถานะของอุปกรณ์ด้วย เช่น อุปกรณ์กำเนิดแสงจะแสดงสีที่แตกต่างกันระหว่างกระบวนการสแกนหาเครือข่าย การขอเข้าร่วมเครือข่าย การออกจากเครือข่าย ในขณะที่ส่งหรือรับข้อมูล หรือแสดงคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับโดยมีความเข้มของสีที่ต่างกัน เป็นต้น



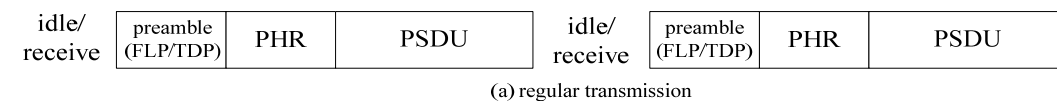
รูปที่ 21 การจัดโครงสร้างของซูเปอร์เฟรมเพื่อรองรับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลูกข่าย

นอกจากนี้สำหรับการกำเนิดแสงจากแหล่งกำเนิดหลายสี อุปกรณ์ในเครือข่ายสามารถส่งข้อมูลที่ได้รับการส่งไปยังอุปกรณ์กำเนิดแสงเพื่อปรับให้เกิดเสถียรภาพในการสร้างสีได้เช่นกัน

3.4.12 การรองรับการมองเห็นและการปรับหรี่

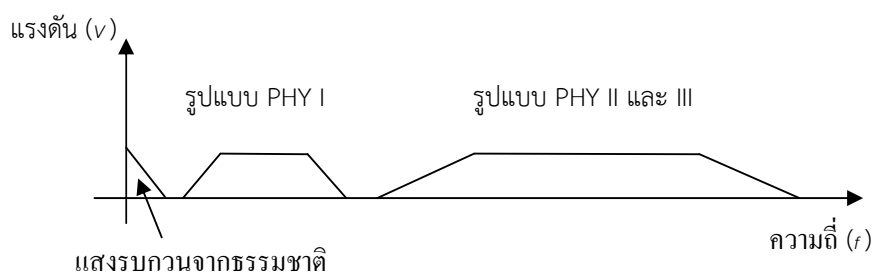
มาตรฐาน VLC รองรับการทำงานมองเห็นและการปรับหรี่ (visibility and dimming support) เพื่อหลายวัตถุประสงค์ เช่น การค้นหาอุปกรณ์ในเครือข่ายและการสร้างการเชื่อมต่อ การส่องสว่างพื้นที่ใช้งาน และการกระพริบเพื่อให้ทราบสถานะของการออกจากเครือข่าย เป็นต้น รูปแบบของความเข้มแสงที่มองเห็นจะถูกกำหนดจากค่า PHY PIB attributes *phyDim* โดยจะส่งเป็นค่าตัวเลขจำนวนเต็มระหว่าง 0 – 1000 เมื่อค่า 0 หมายถึงไม่มีการส่องสว่างหรือไม่มีค่าความเข้มแสง และค่า 1000 หมายถึงค่าความเข้มแสงสูงสุดของอุปกรณ์กำเนิดแสง

โดยปกติการส่งเฟรมข้อมูลจะมีทั้งการส่ง หยุดส่ง หรืออยู่ในสถานะผู้รับ ค่าความเข้มแสงที่อุปกรณ์กำเนิดแสงสร้างขึ้นอาจมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นการเติมข้อมูลในรูปแบบพิเศษที่เรียกว่า FLP (fast locking pattern) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ Preamble (ซึ่งมีรูปแบบข้อมูลคือ 1010...) ในช่วงว่างระหว่างเฟรมตามรูปที่ 22 ซึ่งจะสามารถควบคุมค่าความเข้มแสงได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้การส่งข้อมูล FLP ในช่วงว่างระหว่างเฟรมของการสื่อสารด้วยทอพอโลยีแบบดาวจะทำให้อุปกรณ์ลูกข่ายสามารถทราบได้ว่า อุปกรณ์คอร์ดิเนเตอร์มีช่องว่างเวลาใดบ้างจากการตรวจจบบรูปแบบของ



(b) transmit FLT as extended preamble during idle time for visibility and/or for better synchronization

รูปที่ 22 การเติมข้อมูลในรูปแบบพิเศษ FLP ในช่วงว่างระหว่างเฟรม



รูปที่ 23 สเปกตรัมในสถานะการกล้ำสัญญาณของชั้นกายภาพสามรูปแบบ [3]

สัญญาณที่ส่งมาจากอุปกรณ์คอร์ติเนเตอร์ โดยหากตรวจพบรูปแบบที่แสดงว่าเป็นช่วงเวลาว่าง อุปกรณ์ลูกข่ายจึงจะสามารถส่งข้อมูลไปยังช่วงเวลาดังกล่าวได้

นอกเหนือจากการปรับหรือความเข้มแสงของอุปกรณ์กำเนิดแสงจากการกำหนดจากค่า PHY PIB attributes *phyDim* แล้ว หากการสื่อสารมีความจำเป็นต้องปรับค่าความเข้มแสงให้มีค่าสูงสุด ก็สามารถทำการเปลี่ยนสิทธิ์การควบคุมการปรับได้โดยกำหนดจากค่า PHY PIB attributes *macDimOverrideRequest* เพื่อสั่งให้อุปกรณ์กำเนิดแสงสร้างค่าความเข้มแสงสูงสุดโดยเมื่อดำเนินการเสร็จสิ้นแล้ว ก็จะมีการเปลี่ยนสิทธิ์การควบคุมกลับคืน (นั่นคือ การปรับหรือจะสามารถทำได้จาก *phyDim* เช่นเดิม)

3.5 ชั้นกายภาพ

3.5.1 รูปแบบชั้นกายภาพ

การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 มีการกำหนดชั้นกายภาพเป็น 3 รูปแบบ และมีสเปกตรัมในสถานะการกล้ำสัญญาณตามรูปที่ 23 ทั้งนี้รูปแบบกายภาพทั้งสามไม่สามารถที่จะทำงานร่วมกันได้ การเลือกใช้งานจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม เนื่องจากการใช้แถบ

ตารางที่ 1 มาตรฐานชั้นกายภาพในรูปแบบที่ 1 (PHY I)

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

สเปกตรัมที่ต่างกัน และมีการกำหนดอัตราความเร็วในการสื่อสารและอัตราความเร็วของสัญญาณนาฬิกาทางแสง (optical clock rate) ที่แตกต่างกัน ดังนี้

- รูปแบบ PHY I ใช้กับงานประยุกต์ภายนอกอาคารที่ต้องการความเร็วในการสื่อสารไม่สูงนัก (ประมาณหลักร้อย kbps) รูปแบบนี้จะใช้เทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ OOK (on-off keying) และเทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ VPPM (variable pulse position modulation) โดยมีการกำหนดมาตรฐานตามที่แสดงในตารางที่ 1
- รูปแบบ PHY II ใช้กับงานประยุกต์ภายนอกอาคารที่ต้องการความเร็วในการสื่อสารระดับกลาง (ประมาณหลักสิบ Mbps) รูปแบบนี้จะใช้เทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ OOK และเทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ VPPM เช่นกัน โดยมีการกำหนดมาตรฐานตามตารางที่ 2
- รูปแบบ PHY III ใช้กับงานประยุกต์ที่มีจำนวนตัวรับและตัวส่งหลายตัว และความเร็วของการสื่อสารอยู่ในช่วงประมาณหลักสิบ Mbps รูปแบบนี้จะใช้เทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ CSK (color-shift keying) โดยมีการกำหนดมาตรฐานตามตารางที่ 3

การใช้แถบความยาวคลื่นสำหรับ VLC อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 380 – 780 nm และมีการกำหนดรหัสแถบความยาวคลื่นและความกว้างของสเปกตรัมไว้จำนวน 7 แถบตามตารางที่ 4 ซึ่งรหัสแถบความยาวคลื่นจะถูกระบุไว้ที่ส่วนหัวของเฟรม เพื่อระบุคุณสมบัติของช่องทางการสื่อสารด้วย

ตารางที่ 2 มาตรฐานชั้นกายภาพในรูปแบบที่ 2 (PHY II)

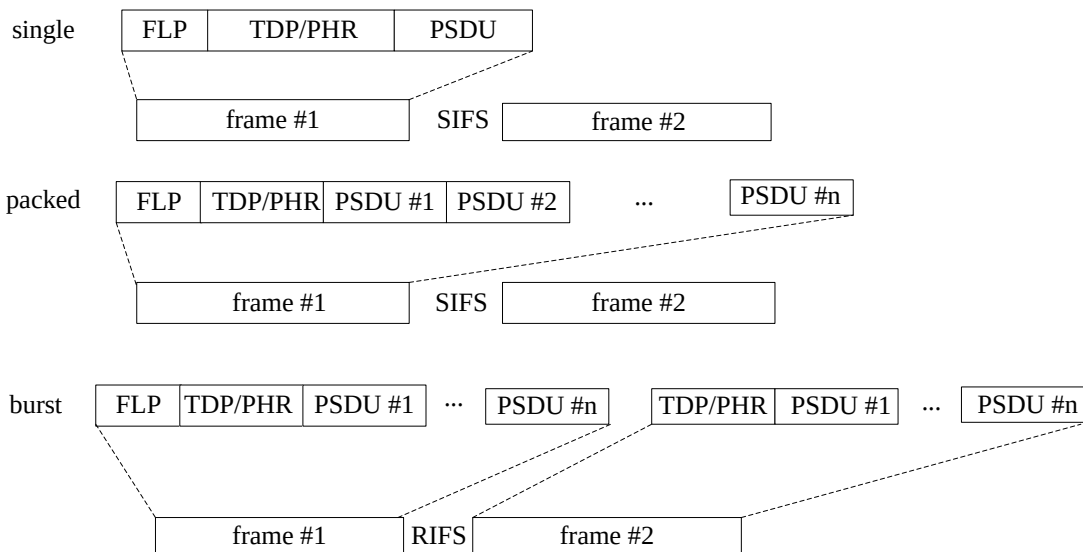
Modulation	RLL code	Optical clock rate	FEC	Data rate
VPPM	4B6B	3.75 MHz	RS(64,32)	1.25 Mb/s
			RS(160,128)	2 Mb/s
		7.5 MHz	RS(64,32)	2.5 Mb/s
			RS(160,128)	4 Mb/s
			none	5 Mb/s
OOK	8B10B	15 MHz	RS(64,32)	6 Mb/s
			RS(160,128)	9.6 Mb/s
		30 MHz	RS(64,32)	12 Mb/s
			RS(160,128)	19.2 Mb/s
		60 MHz	RS(64,32)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

ตารางที่ 3 มาตรฐานชั้นกายภาพในรูปแบบที่ 3 (PHY III)

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

ตารางที่ 4 รหัสแถบความยาวคลื่นและความกว้างของสเปกตรัม

Wavelength (nm)		Spectral width (nm)	Code
380	478	98	0
478	540	62	1
540	588	48	10
588	633	45	11
633	679	46	100
679	726	47	101
726	780	54	110
Reserved			110

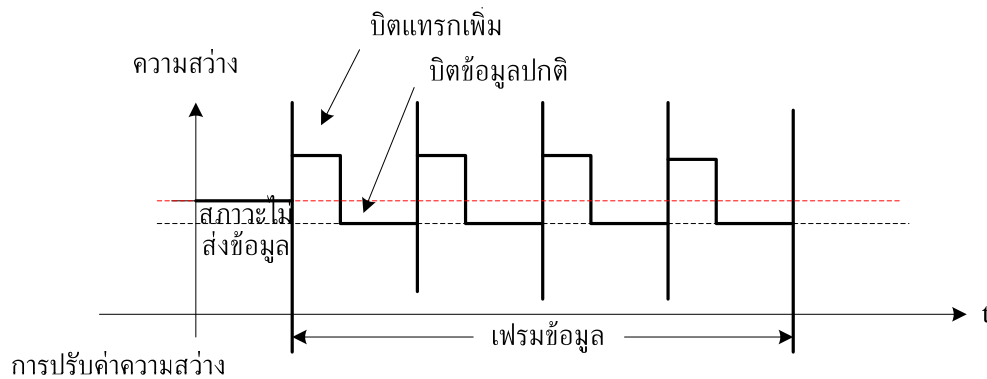


รูปที่ 24 โหมดการสื่อสารข้อมูลแบบ (ก) ซิงเกิล, (ข) แพ็กเกต, และ (ง) เบิร์สต์

3.5.2 โหมดการส่งข้อมูล

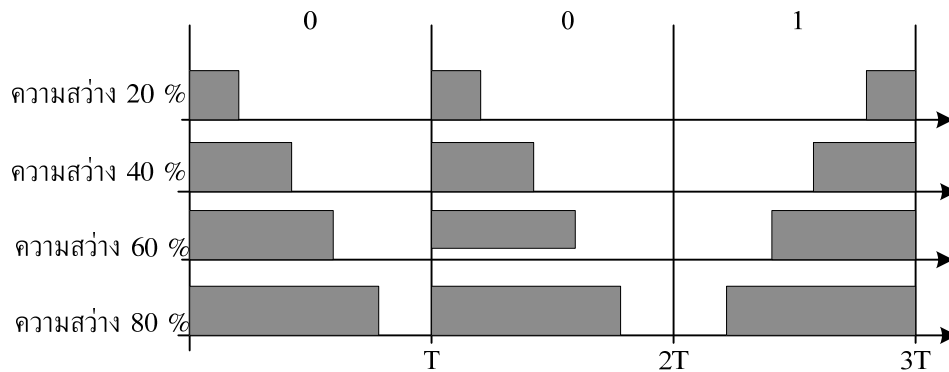
ชั้นกายภาพสามารถรองรับการส่งผ่านข้อมูล 3 รูปแบบตามรูปที่ 24 นั่นคือ

- 1) ซิงเกิลโหมด (single mode) จะส่งข้อมูลเพียงหน่วยเดียวต่อเฟรมข้อมูล
- 2) แพ็กเกตโหมด (packet mode) จะส่งข้อมูลหลายหน่วยภายในเฟรมข้อมูลเดียว โดยการส่งรูปแบบนี้จะได้อัตราปริมาณงาน (throughput) มากกว่าการส่งแบบซิงเกิลโหมด



3) เบิร์สต์โหมด (burst mode) จะส่งข้อมูลหลายหน่วยภายในเฟรมข้อมูลเดียวและส่งหลายเฟรมติดต่อกัน โดยจะลดระยะเวลาการเว้นระหว่างเฟรมให้ลดลงกว่าการส่งแบบแพ็กเก็ตโหมด

ในทางปฏิบัติถ้าใช้การกล้ำสัญญาณแบบเดียวกันทั้งในสภาวะทำงานและสภาวะไม่ทำงาน ก็จะส่งผลทำให้เกิดการกระพริบของแหล่งกำเนิดแสงได้ เนื่องจากพลังงานที่ป้อนให้แก่แหล่งกำเนิดแสงจะมีค่าผันผวนมาก ดังนั้นเพื่อลดการกระพริบและสามารถปรับค่าความสว่างได้จึงจำเป็นต้องมีการส่งเฟรมรูปแบบเฉพาะสำหรับสภาวะไม่ทำงาน (idle pattern) ให้ในช่วงที่อยู่ในสภาวะการรับสัญญาณหรือสภาวะไม่ทำงานสำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ส่องสว่างภายในอาคาร โดยเมื่อข้อมูลถูกส่ง คลื่นแสงจะถูกกล้ำและส่งเป็นคลื่นสัญญาณพัลส์ แต่ในช่วงสภาวะไม่ทำงานคลื่นแสงจะไม่ถูกกล้ำด้วยข้อมูลข่าวสาร ดังนั้นช่วงสภาวะไม่ทำงานนี้จะถูกแทนที่ด้วยเฟรมรูปแบบเฉพาะสำหรับสภาวะไม่ทำงานเพื่อให้คลื่นแสงมีรูปแบบต่อเนื่อง เสมือนถูกกล้ำเป็นคลื่นสัญญาณพัลส์ หรืออาจแทนที่ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจะทำให้มีการกระพริบน้อย และเมื่อต้องการลดความสว่างลงก็ทำได้โดยการลดค่าดิวตีไซเคิล (duty cycle) หรือความกว้างของพัลส์ลงทั้งในส่วนข้อมูลและในเฟรมรูปแบบเฉพาะสำหรับสภาวะไม่ทำงานเพื่อให้มีการกระพริบน้อยสุด



รูปที่ 26 การปรับค่าความสว่างเมื่อใช้เทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ VPPM

สำหรับการปรับค่าความสว่างโดยใช้เทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ VPPM สามารถแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้นจากสีที่อาจเปลี่ยนไปของแหล่งกำเนิดแสงได้ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดของ สัญญาณ เทคนิค VPPM จะไม่เปลี่ยนค่าขนาดของรูปคลื่น แต่จะการใช้การเปลี่ยนตำแหน่งของพัลส์ และปรับค่าความสว่างด้วยการเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ เช่น การกล้ำ VPPM ชนิด 2-PPM จะแสดงค่าของบิต 0 และบิต 1 ด้วยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งพัลส์ โดยยังคงมีค่าความกว้างของ พัลส์เท่ากัน และเมื่อต้องการปรับเปลี่ยนค่าความสว่างให้มากขึ้น ก็ทำได้โดยการเปลี่ยนค่าความ กว้างของพัลส์ให้มีความกว้างมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 26

4. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบมาตรฐานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น

ในทางปฏิบัติมาตรฐาน VLC มีหลายมาตรฐาน เช่น IEEE 802.15.7 [3], ISO/IEC 17417 [6], และ CP-1223 [1] โดยแต่ละมาตรฐานมีข้อแตกต่างกัน เช่น

- มาตรฐาน CP-1223 จะมุ่งเน้นการสื่อสารที่ใช้ความเร็วต่ำ มีความซับซ้อนน้อย โดยกำหนด ความเร็วสัญญาณพาหะที่ 9.6 kHz เพื่อส่งผ่านข้อมูลที่ความเร็ว 4.8 kbps ด้วยการเข้ารหัสแบบการกล้ำสัญญาณที่ตำแหน่งพัลส์แบบผกผัน (I-4PPM: inverted 4 pulse position modulation) ก่อนทำการกล้ำสัญญาณแบบ OOK
- มาตรฐาน IEEE 802.15.7 ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้สามารถส่งผ่านข้อมูลที่มีความเร็วสูงเพียงพอ สำหรับการให้บริการด้านภาพ เสียง และมัลติมีเดียวิทัศน์ โดยมีการกำหนดให้สามารถรองรับ ได้มากกว่าหนึ่งความยาวคลื่น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายทอพอโลยีเครือข่าย รวมถึงมีการกำหนดความสามารถให้รองรับการเคลื่อนย้ายจุดเชื่อมต่อ และมีความเข้ากันได้

กับโครงสร้างของระบบพื้นฐานการส่องสว่างปกติ คือสามารถปรับลดค่าความสว่างได้โดยไม่เกิดการกระพริบ และมีเสถียรภาพของสีที่ถูกสร้างขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีหลายความยาวคลื่น มีโหมดการเข้ารหัสสามโหมดคือ แมนเชสเตอร์ 4B6B และ 8B10B รวมถึงรองรับการกล้ำสัญญาณหลายแบบ เช่น OOK, VPPM และ CSK

- มาตรฐาน ISO/IEC 17417 ถูกกำหนดขึ้นให้มีความสามารถในการส่งผ่านข้อมูลความเร็วสูง เช่นเดียวกับมาตรฐาน IEEE แต่มีระยะทางการสื่อสารในระยะไม่เกิน 10 เซนติเมตรเท่านั้น โดยมีโหมดการเข้ารหัสเพียงสองโหมดคือ
 - o โหมด 8B/10B จะกำหนดให้มีค่าบิด歪ไซเคิลที่ 50% ซึ่งจะทำให้การส่องสว่างไม่สามารถปรับค่าความเข้มได้ แต่จะมีความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูงกว่า
 - o โหมด 2B/4B จะสามารถปรับค่าความเข้มแสงได้สามระดับคือ 25%, 50% และ 75% แต่ใช้การกล้ำสัญญาณแบบ OOK เท่านั้น โดยสามารถรองรับความเร็วสัญญาณนาฬิกาแสงที่ 120 MHz และรองรับทอพอโลยีเครือข่ายแบบเพียร์ทูเพียร์

ในส่วนต่อไปนี้จะเสนอแนะในการเลือกมาตรฐานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นไปใช้งาน โดยจะพิจารณาจากความซับซ้อนและประสิทธิภาพของการส่งผ่านข้อมูลดังนี้

- มาตรฐาน CP-1223 เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับการสื่อสารทิศทางเดียว มีความซับซ้อนต่ำ เช่น การติดตั้งกับอุปกรณ์ส่องสว่างบนเพดานเพื่อส่งข้อมูลพิกัดหรือชื่อของสถานที่ภายในอาคาร การส่งผ่านข้อมูลภาพหรือสิ่งของที่จัดแสดงในพิพิธภัณฑ์ หรือการนำรหัสสำหรับการเปิดปิดประตูบ้านติดตั้งในหลอดไฟหน้ารถยนต์เพื่อการสั่งการเปิดปิดด้วยการควบคุมจากภายในรถยนต์ เป็นต้น
- มาตรฐาน IEEE 802.15.7 มีความซับซ้อนสูงมากกว่ามาตรฐาน CP-1223 และ ISO/IEC 17417 แต่มีความยืดหยุ่นมากกว่า โดยสามารถส่งผ่านข้อมูลแบบกระจายไปยังหลายตัวรับจากแหล่งกำเนิดแสงเดียวได้ โดยที่อุปกรณ์ตัวรับไม่จำเป็นต้องเข้าร่วมเครือข่ายกับอุปกรณ์ตัวส่ง หรือหากอุปกรณ์เข้าร่วมเครือข่ายแล้วสามารถส่งผ่านข้อมูลได้ทั้งในรูปแบบเพียร์ทูเพียร์และแบบดาว นอกจากนี้ยังรองรับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ จึงสามารถนำไปใช้ในการเสริมเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลที่มีอยู่ เพื่อให้มีความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลมากยิ่งขึ้นได้ โดยทำการติดตั้งในแหล่งกำเนิดแสงบนเพดาน (โดยยังคงใช้ส่องสว่างได้เช่นเดิม)
- มาตรฐาน ISO/IEC 17417 เหมาะสำหรับการสื่อสารที่มีความเร็วสูง สำหรับการส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ เช่น การส่งผ่านข้อมูลระหว่างโทรศัพท์มือถือที่ติดตั้งอุปกรณ์ VLC กับ

เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยทำการวางอุปกรณ์ที่ต้องการส่งผ่านข้อมูลไว้ใกล้กัน หรือการส่งผ่านข้อมูลในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีมลภาวะทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูง หรือในเครื่องจักรที่มีการหมุนเคลื่อนไหวดตลอดเวลาที่ไม่เหมาะสำหรับการใช้สายนำสัญญาณ เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] JEITA, JEITA visible light communication standards [Retrieved on June 26, 2015 at http://www.jeita.or.jp/cgi-bin/standard_e/list.cgi?ateid=1&subcateid=50].
- [2] S. Haruyama, Japan's visible light communications consortium and its standardization activities [Retrieved on June 26, 2015 at <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/08/15-08-0061-00-0vlc-japan-s-visible-light-communications-consortium-and-its.pdf>].
- [3] IEEE Computer Society, IEEE standard for Local and metropolitan area networks — Part 15.7: short-range wireless optical communication using visible light (IEEE Std 802.15.7TM-2011). New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
- [4] J. P. Holdren and E. Lander, Report to the president realizing the full potential of government-held spectrum to spur economic growth [Retrieved on July 12, 2014 at http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast_spectrum_report_final_july_20_2012.pdf].
- [5] PracTel, Progress in optical wireless communications – VLC and FSO technologies, applications and markets [Retrieved on July 5, 2014 at <http://www.researchandmarkets.com/reports/2813840/progress-in-optical-wireless-communications-vlc>].
- [6] ISO/IEC 2011, International Standard ISO/IEC 17417:2011(E). Information technology — Telecommunications and information exchange between systems — short distance visible light communication, Geneva: Switzerland.

ภาคผนวก ก

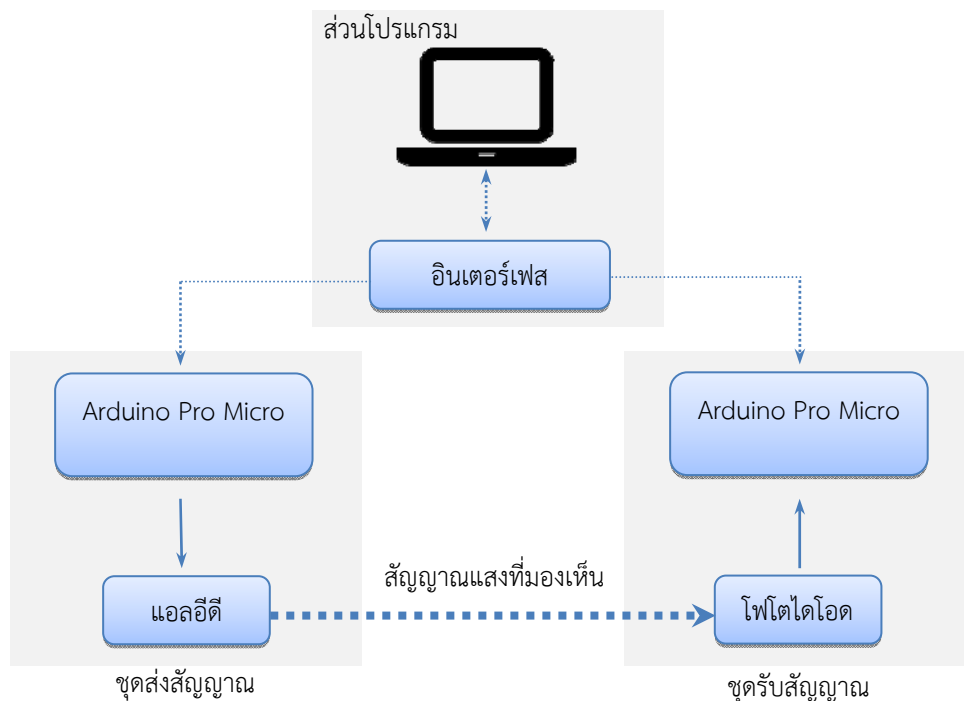
การพัฒนาชุดสาธิตการรับส่งข้อมูลผ่านแสงตามมาตรฐาน CP-1223

ภาคผนวกนี้จะอธิบายการพัฒนาชุดสาธิตการรับส่งข้อมูลผ่านแสงตามมาตรฐาน CP-1223 เพื่อแสดงให้เห็นความสามารถของเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (VLC: visible light communication) โดยใช้บอร์ดพัฒนาที่คณะผู้วิจัยสร้างขึ้นเป็นส่วนควบคุมกระบวนการสื่อสารซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือ อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ และโปรแกรมควบคุม โดยในการออกแบบชุดพัฒนามีการคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งานและต้นทุนในการสร้าง ซึ่งสรุปได้ดังนี้

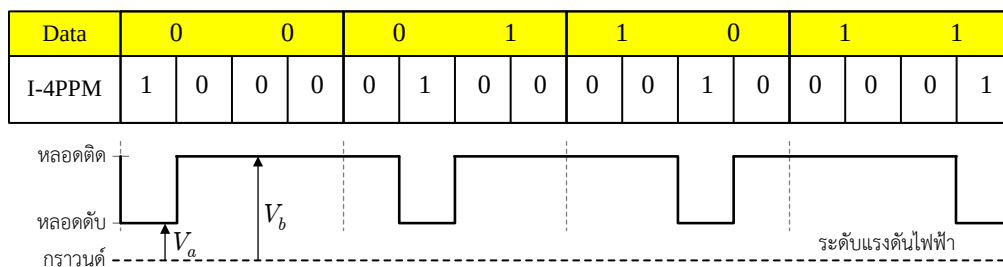
- ด้านความง่ายของการใช้งาน ได้ทำการเลือกมาตรฐานที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดคือ มาตรฐาน CP-1223 ที่มีรูปแบบการส่งผ่านข้อมูลทิศทางเดียวและมีความซับซ้อนต่ำเพื่อเป็นการเริ่มต้นการพัฒนาชิ้นงานการสื่อสารทางแสงได้ง่ายและรวดเร็ว
- ด้านฮาร์ดแวร์ ได้เลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นที่นิยมในกลุ่มนักพัฒนาคือ Arduino ในรุ่นที่มีขนาดเล็กและราคาไม่แพง ซึ่งก็คือรุ่น Arduino Pro micro (mini Leonardo) เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ควบคุมการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- ด้านโปรแกรมควบคุม ได้ทำการเขียนโปรแกรมต้นแบบเพื่อให้สามารถเรียกใช้หรือแก้ไขได้ง่าย และมีโครงสร้างของโปรแกรมชัดเจน นอกจากนี้ยังเตรียมตัวอย่างโปรแกรมเพื่อเป็นแนวทางประยุกต์ใช้งานไว้เป็นจำนวนมากด้วย

ก.1 แนะนำชุดพัฒนาการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น

ชุดพัฒนาระบบ VLC ประกอบด้วย อุปกรณ์ชุดส่งสัญญาณ และอุปกรณ์ชุดรับสัญญาณ โดยอุปกรณ์ทั้งสองชุดนี้มีโครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่เหมือนกันในส่วนของอุปกรณ์ประมวลผลและควบคุมการทำงานที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro micro (mini Leonardo) ในส่วนที่แตกต่างจะเป็นส่วนชั้นกายภาพซึ่งชุดส่งสัญญาณจะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์กำเนิดแสงแอลอีดีที่ให้แสงสีขาวในการส่องสว่างและส่งข้อมูล ส่วนชุดรับจะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับแสงโฟโตไดโอดที่มีวงจรมีขยายภายใน การควบคุมการทำงานของชุดพัฒนาระบบการสื่อสารทางแสงแบบไร้สายทำได้จากการป้อนโปรแกรมควบคุมผ่านอินเตอร์เฟซบอร์ดที่ต่อผ่านพอร์ตยูเอสบีซีของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยการโปรแกรมสามารถทำได้โดยการโปรแกรมผ่าน Arduino bootloader รูปที่ ก.1 แสดงภาพรวมของชุดพัฒนาระบบการสื่อสารทางแสงแบบไร้สาย



รูปที่ ก.1 ภาพรวมของชุดพัฒนาระบบการสื่อสารทางแสงแบบไร้สาย

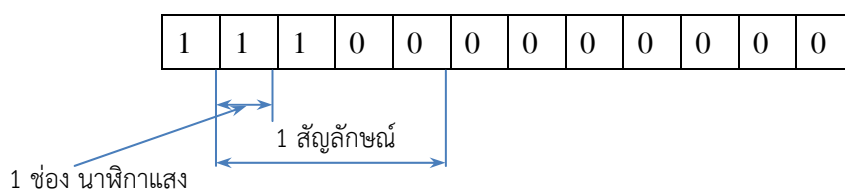


รูปที่ ก.2 เทคนิคการกล้ำสัญญาณสี่ตำแหน่งพัลส์แบบผกผัน

ชุดพัฒนาการสื่อสารทางแสงแบบไร้สายที่สร้างขึ้นนี้เป็นไปตามโพรโตคอลของมาตรฐาน CP-1223 ที่ว่าด้วยมาตรฐานการส่งรหัสระบุตัวตนหรือข้อมูลสำหรับอุปกรณ์ด้านมัลติมีเดียด้วยแสงที่มองเห็น ซึ่งมาตรฐานนี้มีรูปแบบการสื่อสารทิศทางเดียวผ่านตัวกลางแสงที่มองเห็น โดยการกำหนดโพรโตคอลตามมาตรฐาน CP-1223 มีการกำหนดสองชั้นคือ ชั้นกายภาพ (physical layer) และชั้นเฟรม (frame Layer) ณ ความเร็วในการสื่อสาร 4.8 kbps และใช้เทคนิคการกล้ำสัญญาณสี่ตำแหน่งพัลส์แบบผกผัน (I-4PPM: inverted - 4 pulse position modulation) ดังแสดงในรูปที่ ก.2

ส่วนเริ่มต้นเฟรม (SOF)		ส่วนเพย์โหลด (Payload)	ส่วนจบเฟรม (EOF)
PRE (6 bits)	FTYPE (8 bits)	ID/DATA (128 bits)	CRC-16 (16 bits)

รูปที่ ก.3 เฟรมข้อมูลตามมาตรฐาน CP-1223

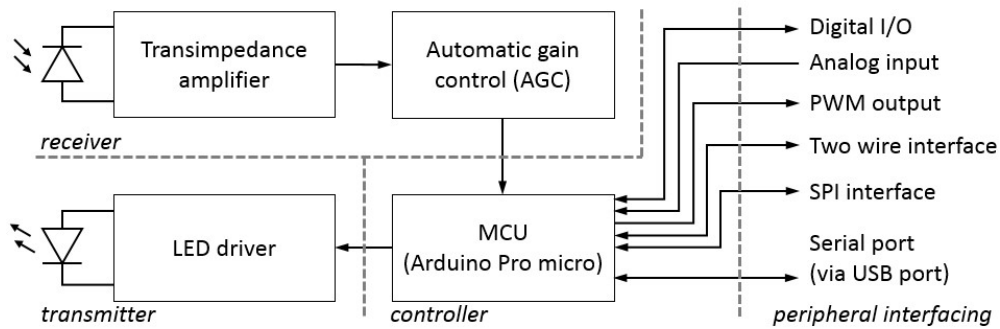


รูปที่ ก.4 ส่วนเริ่ม (PRE) จำนวน 6 สัญลักษณ์

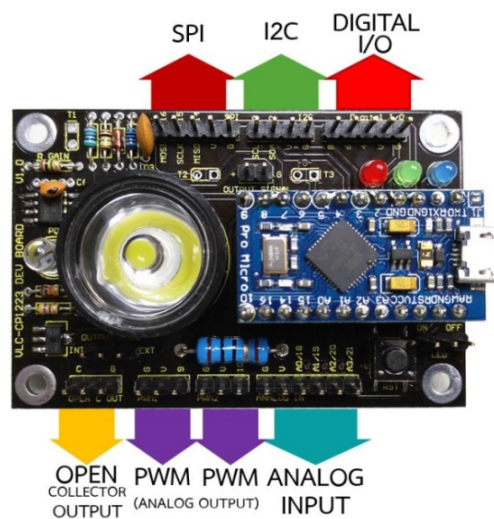
สำหรับในชั้นเฟรม รูปแบบเฟรมข้อมูลแสดงในรูปที่ ก.3 ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วย

- ส่วนเริ่มต้นเฟรมที่มีข้อมูลสองส่วนคือ
 - ส่วนเริ่ม (preamble, PRE) จำนวน 6 บิตในรูปแบบการเข้ารหัสที่แตกต่างจากการกล้ำสัญญาณสี่ตำแหน่งพัลส์แบบผกผันที่มีอยู่ เพื่อให้สามารถจำแนกการเริ่มต้นเฟรมได้ โดยหากส่วนเริ่มที่มีจำนวน 6 บิตจะถูกแบ่งออกเป็น 12 ช่องนาฬิกาแสง การเข้ารหัสส่วนเริ่มจะให้ค่า “1” จำนวน 3 ช่อง และตามด้วย “0” จำนวน 9 ช่อง เมื่อรวมกันก็จะได้ส่วนเริ่มจำนวน 3 สัญลักษณ์ หรือ 6 บิต ดังแสดงในรูปที่ ก.4
 - ประเภทของเฟรม (frame type, FTYPE) จำนวน 8 บิต เพื่อระบุชนิดของข้อมูลในเพย์โหลด ซึ่งในตัวอย่างโปรแกรมจะกำหนดให้ FTYPE มีค่าเท่ากับ 0x00 ซึ่งหมายถึงเป็นเพย์โหลดสำหรับการทดสอบและพัฒนา
- ส่วนเพย์โหลด จำนวน 128 บิต สามารถบรรจุรหัสระบุตัวตนหรือข้อมูลตามชนิดที่ระบุไว้ในประเภทของเฟรม
- ส่วนจบเฟรม จำนวน 16 บิต ที่มีการส่งรหัสตรวจสอบบิตผิดพลาด โดยใช้ฮาร์ดแวร์ CRC-16 ซึ่งสร้างจากพหุนามตัวกำเนิด (polynomial generator) $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$ สำหรับรีจิสเตอร์ในการคำนวณค่ารหัสตรวจสอบบิตผิดพลาดนี้ เริ่มต้นกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 และจะทำการคำนวณเฉพาะประเภทของเฟรมและเพย์โหลดเท่านั้น

บอร์ดพัฒนาประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro micro (mini Leonardo) และส่วนต่อขยายที่มีส่วนการรองรับอินพุตและเอาต์พุต ในส่วนของการส่งสัญญาณแสง บอร์ดพัฒนาจะเชื่อมกับวงจรควบคุมหลอดแอลอีดี เพื่อส่งสัญญาณควบคุม



รูปที่ ก.5 ไตอะแกรมของบอร์ดพัฒนา



รูปที่ ก.6 บอร์ดพัฒนาจริงที่ได้สร้างขึ้น

การส่องสว่าง ส่วนการรับสัญญาณจากแสงที่มองเห็น บอร์ดพัฒนาจะรับสัญญาณจากวงจรรับที่รับค่าแสงผ่านอุปกรณ์โฟโตไดโอด และส่งสัญญาณเข้าสู่บอร์ดพัฒนาเพื่อทำการประมวลผล รูปที่ ก.5 แสดงไตอะแกรมของบอร์ดพัฒนา และรูปที่ ก.6 แสดงบอร์ดพัฒนาจริงที่ได้สร้างขึ้น

ก.2 โครงสร้างและการทำงานของชุดสาธิต

ความเข้าใจเพื่อให้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนานวัตกรรมใหม่ๆ ด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น สามารถทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นและลดขั้นตอนการพัฒนาด้วยการเริ่มต้นศึกษาจากชุดสาธิตการทำงานที่ใช้บอร์ดพัฒนาการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นที่ทางคณะผู้วิจัยได้



รูปที่ ก.7 ชุดสาธิตไฟถนน

พัฒนาขึ้น โดยทางคณะผู้วิจัยได้พัฒนาชุดสาธิตทั้งหมดสามชุดคือ ชุดสาธิตไฟถนน ชุดสาธิตไฟรถยนต์เปิดไม่กั้นทาง และชุดสาธิตฟิสิกส์ทัศนศาสตร์อัจฉริยะ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก.2.1 ชุดสาธิตไฟถนน

การทำงานของชุดสาธิตไฟถนนมีลักษณะเรียบง่าย หลักการคือไฟถนนหรือไฟส่องทางมีการใช้งานเพื่อให้แสงสว่างยามค่ำคืนอยู่แล้ว และการติดตั้งไฟส่องทางหรือไฟถนน จะเป็นการติดตั้งในลักษณะถาวร มีตำแหน่งที่แน่นอน ดังนั้นสามารถทำการนำข้อมูลของสถานที่หรือข้อมูลจำเพาะของบริเวณนั้นๆ แฝงเข้ากับแสงสว่างที่เกิดจากโคมไฟถนนนั้นได้

ในการพัฒนาเลือกใช้โคมไฟแอลอีดีทั่วไปที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับโคมไฟส่องทาง จากนั้นจึงนำมาปรับปรุงวงจรขั้วกระแส เพื่อป้อนสัญญาณการควบคุมจังหวะการเปิดปิดของแอลอีดีตามจังหวะข้อมูลข่าวสาร อีกส่วนของชุดสาธิตที่ต้องทำการพัฒนาคือ ส่วนของวงจรรับสัญญาณและแสดงผล ในการพัฒนาจะเลือกใช้รถยนต์จำลองเสมือนกับการขับรถยนต์และสามารถรับข้อมูลที่ส่งมาจากโคมไฟถนนได้ โดยติดตั้งวงจรรับสัญญาณและหน้าจอแสดงผลบนรถยนต์จำลองเพื่อแสดงข้อมูลที่รับได้ โครงสร้างชุดสาธิตไฟถนนแสดงในรูปที่ ก.7 และรูปที่ ก.8

ก.2.2 ชุดสาธิตไฟรถยนต์เปิดไม่กั้นทาง

การทำงานของชุดสาธิตไฟรถยนต์เปิดไม่กั้นทางจะรับสัญญาณจากไฟหน้ารถยนต์ โดยได้เลือกรถยนต์จำลองขนาดเล็กมาทำการติดตั้งหลอดแอลอีดีที่ด้านหน้ารถคล้ายกับไฟส่องทางหน้ารถยนต์ ควบคุมการส่งสัญญาณที่แฝงไว้ผ่านการส่องสว่างที่เป็นการระบุค่ารหัส และกำหนดค่ารหัสของ



รูปที่ ก.8 วงจรรับสัญญาณและหน้าจอแสดงผลบนรถยนต์จำลอง



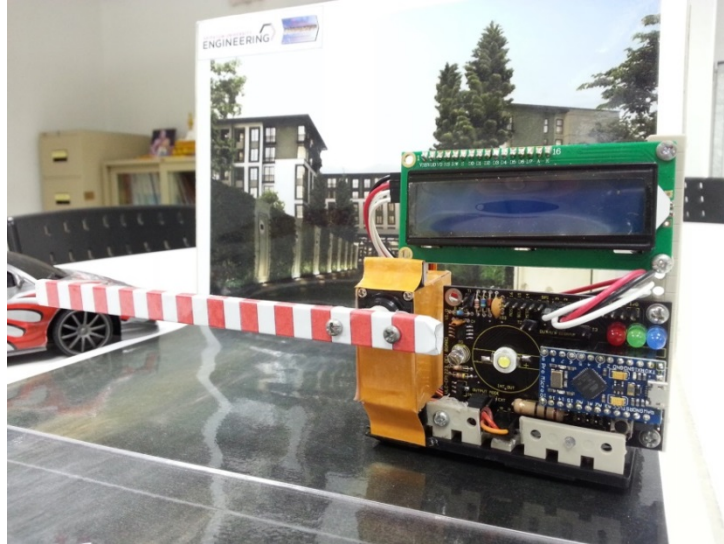
รูปที่ ก.9 ชุดสาธิตไฟรถยนต์เปิดไม่กั้น

รถยนต์แต่ละคันที่แตกต่างกัน ในส่วนอุปกรณ์กันทางก็ทำการติดตั้งวงจรการรับสัญญาณและเซอร์โวมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนไม้กันทาง ดังนั้นเมื่อรถยนต์แล่นเข้าใกล้ไม้กันทาง รถยนต์ก็จะส่งสัญญาณค่ารหัสผ่านหลอดไฟแอลอีดีหน้ารถยนต์เพื่อเปิดไม้กันทาง หากค่ารหัสที่ส่งออกไปจากรถยนต์ตรงกันกับรหัสในฐานข้อมูลของอุปกรณ์กันทาง ไม้กันทางก็จะถูกยกขึ้นเพื่อเปิดทางให้รถยนต์วิ่งผ่านได้ โครงสร้างชุดสาธิตไฟรถยนต์เปิดไม้กันทางในส่วนไฟแอลอีดีหน้ารถยนต์ และอุปกรณ์ควบคุมการเปิดไม้กันทาง แสดงดังรูปที่ ก.9 และ รูปที่ ก.10 ตามลำดับ

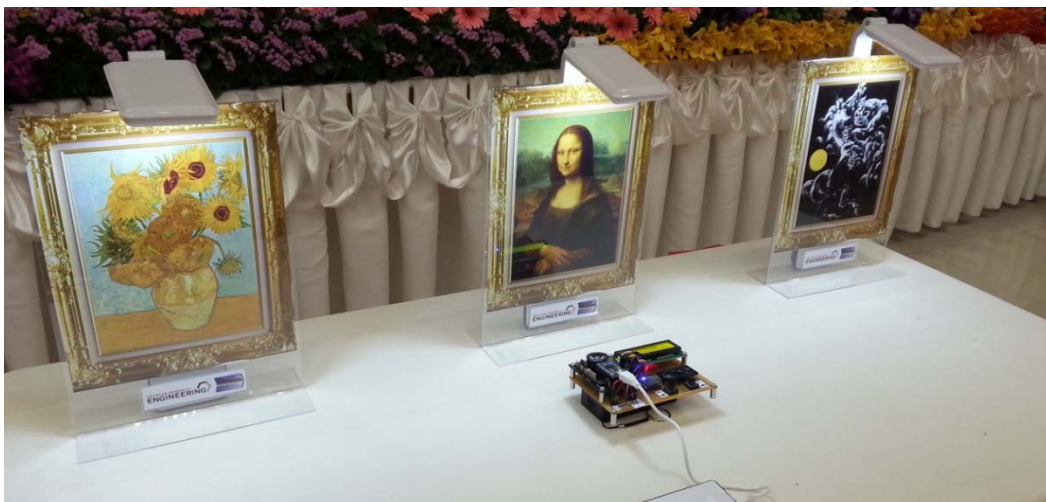
ก.2.3 ชุดสาธิตพิพิกัดที่อัจฉริยะ

โครงสร้างของชุดสาธิตพิพิกัดที่อัจฉริยะประกอบด้วยสามส่วนหลักคือ

- 1) โคมส่องชิ้นงานที่แผ่รหัสข้อมูลไว้กับแสงที่มองเห็นจำนวนสามโคม
- 2) วงจรรับแสงและประมวลสัญญาณเพื่อกู้คืนรหัสที่ส่งแผ่มา



รูปที่ ก.10 อุปกรณ์ควบคุมการเปิดไม้กั้นทาง



รูปที่ ก.11 ไฟแอลอีดีส่องชิ้นงาน

- 3) วงจรเล่นไฟล์เสียงเอ็มพีสาม (MP3) เพื่อใช้เป็นส่วนแสดงผลด้วยเสียงพูดที่ถูกบันทึกไว้ คอมพิวเตอร์ชิ้นงานแต่ละคอมพิวเตอร์จะมีการส่งสัญญาณรหัสที่แตกต่างกัน เมื่อวงจรรับสัญญาณจากคอมพิวเตอร์แต่ละคอมพิวเตอร์ก็จะเล่นไฟล์เสียงที่แตกต่างกันออกมา โครงสร้างชุดสาธิตพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติในสวนไฟแอลอีดีส่องชิ้นงาน และอุปกรณ์ควบคุมการเล่นไฟล์เอ็มพีสามพร้อมวงจรรับสัญญาณแสดงดังรูปที่ ก.11 และ รูปที่ ก.12 ตามลำดับ



รูปที่ ก.12 อุปกรณ์ควบคุมการเล่นไฟล์เอ็มพีสามพร้อมวงจรรับสัญญาณ

ก.3 ตัวอย่างการพัฒนาชุดสาธิตการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น

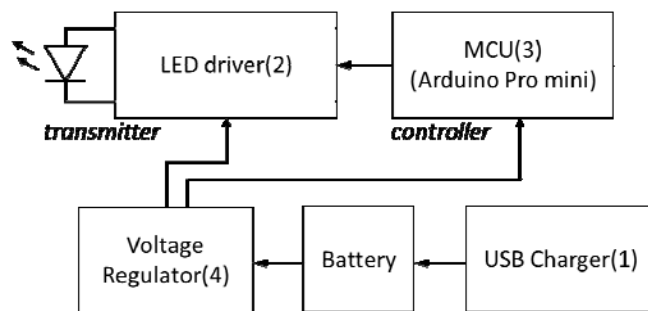
การพัฒนาชุดสาธิตการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นแบ่งการดำเนินการออกเป็นสองส่วนคือ การพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์และการพัฒนาโปรแกรมควบคุม ในการพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์จะใช้อุปกรณ์ทั่วไปที่หาได้ง่าย เพื่อให้ผู้สนใจสามารถจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ และทำตามได้ไม่ยาก

ก.3.1 ชุดสาธิตไฟถนน

ในการสร้างชุดสาธิตไฟถนนเพื่อส่งข้อมูล เลือกใช้คอมไพเลอร์ที่อ่านหนังสือที่มีวางขายทั่วไปมาดัดแปลง ดังแสดงในรูปที่ ก.13 ซึ่งเดิมทีเป็นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดขนาด 4 โวลต์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานและมีวงจรประจุกระแสติดตั้งอยู่ภายในด้วย เมื่อทำการดัดแปลงจึงตัดวงจรเหล่านั้นออก และแทนที่ด้วยแบตเตอรี่ประจุพลังงานไฟฟ้าชนิดลิเทียมเพื่อป้อนพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในและหลอดแอลอีดี อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งเพิ่มเติมเข้าไปมีส่วนคือ



รูปที่ ก.13 อุปกรณ์ภายในที่ทำการดัดแปลงชุดสาธิตไฟถนน

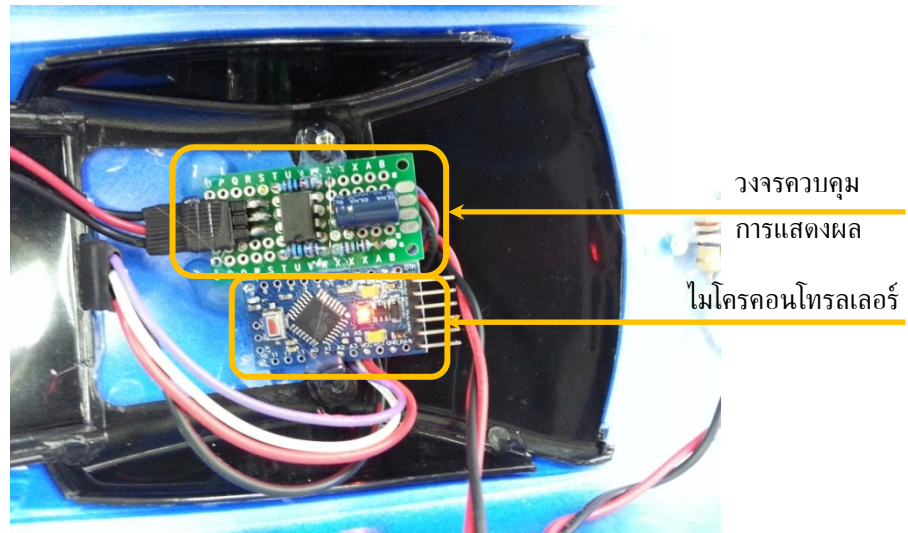


รูปที่ ก.14 การดัดแปลงชุดสาธิตไฟถนนโดยต่อทรานซิสเตอร์ควบคุมการเปิดปิดหลอดแอลอีดี

- 1) วงจรประจุพลังงานไฟฟ้า
- 2) ทรานซิสเตอร์เบอร์ 4401 เพื่อทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิดและปิดหลอดแอลอีดีตามจังหวะของสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่ง
- 3) ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสร้างรูปแบบของสัญญาณตามมาตรฐาน CP-1223
- 4) วงจรยกระดับแรงดัน เพื่อยกระดับแรงดัน 4.2 โวลต์จากแบตเตอรี่ป้อนสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยการต่อทรานซิสเตอร์เพื่อควบคุมการเปิดและปิดของหลอดแอลอีดี และทำการต่ออนุกรมกับหลอดแอลอีดีดังแสดงในรูปที่ ก.14

สำหรับในส่วนของวงจรรับที่ติดตั้งอยู่บนรถยนต์จำลองดังแสดงในรูปที่ ก.15 และรูปที่ ก.16 มีอุปกรณ์ทั้งหมดสี่ส่วนคือ

- 1) โฟโตไดโอด

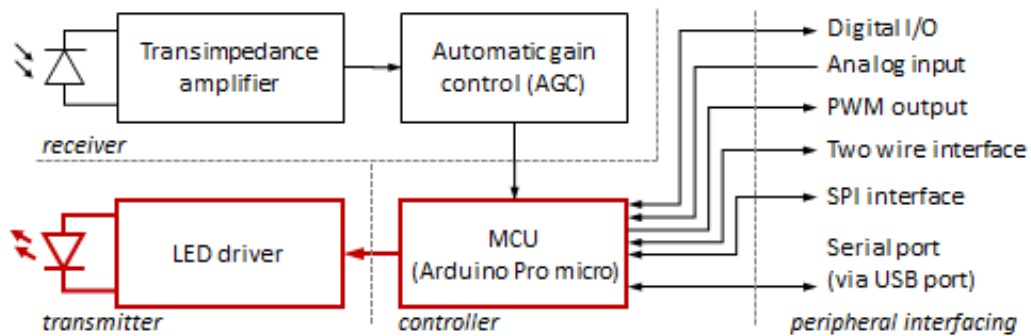


รูปที่ ก.15 อุปกรณ์ติดตั้งอยู่บนรถยนต์จำลอง

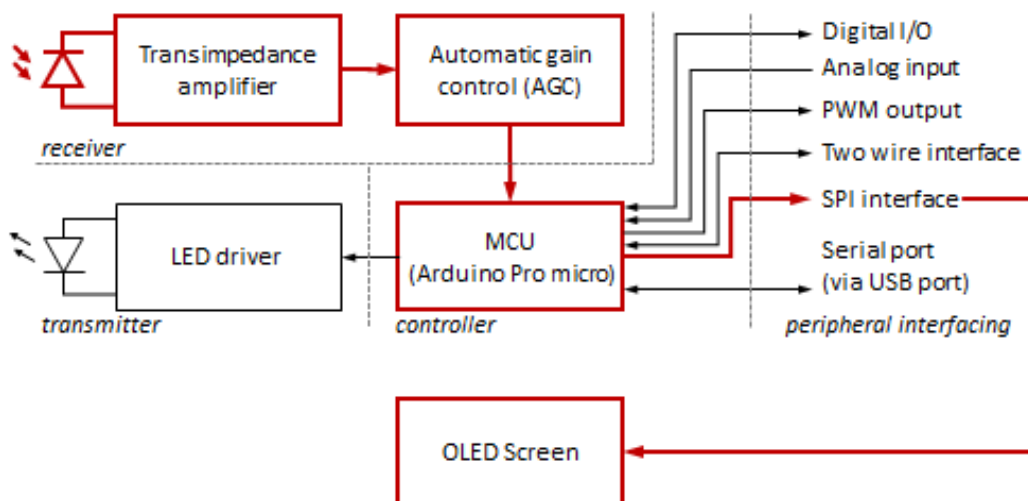


รูปที่ ก.16 อุปกรณ์แสดงผลติดตั้งอยู่บนรถยนต์จำลอง

- 2) หน้าจอแสดงผล
- 3) วงจรควบคุมการแสดงผล
- 4) ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ ก.17 ไดอะแกรมการใช้งานอุปกรณ์บนบอร์ดพัฒนาการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นด้านฝั่งส่ง



รูปที่ ก.18 ไดอะแกรมการใช้งานอุปกรณ์บนบอร์ดพัฒนาการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นด้านฝั่งรับ

ไดอะแกรมการทำงานของวงจรชุดสาธิตในส่วนของบอร์ดพัฒนาของภาคส่งสัญญาณและภาครับสัญญาณแสดงดังรูปที่ ก.17 และรูปที่ ก.18 โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในบอร์ดพัฒนาถูกเรียกใช้งานเฉพาะบางส่วนตามที่แสดงในรูปด้วยกรอบสี่เหลี่ยม

สำหรับโปรแกรมควบคุมที่ป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์แบ่งเป็นส่วนที่โปรแกรมให้กับคอมไพเลอร์ และรถยนต์จำลอง แสดงข้อมูลโปรแกรมด้านล่างนี้

โปรแกรมคอมพิวเตอร์

```
/* Example Street light : Transmit kilometer post number via street light
created 21 JUN 2016          modified 21 JUN 2016          By. Petch Nantivatana
Credit:
This work used the VLC-CP-1223 driver-code VLC_CP-1223_QSC.h
"VLC-CP-1223 QUICK STARTER CODE", Kata Jaruwongrunsee, CC-BY
Which is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
To view a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
*/

#include"VLC_CP-1223_QSC.h"          //Add this file & include it first

void setup()
{
    //SET VLC_out PIN (default = 5) PWM PIN IS NEEDED (3,5,6,9,10 for Leonardo)
    startVLC_OUT(5);
}

void loop()
{
    //SET MESSAGE TO SEND
    //--->> FUNCTION: setupMessage( FTYPE(1 byte) , STRING DATA(max 16 byte) )
    //Ex. setupMessage('1',"VLC-CP-1223 DEMO ");
    //PRINT SENDING MESSAGE AT DEFAULT SERIAL PORT (Serial.begin(XX); is needed)
    //--->> FUNCTION: printPAYLOAD();
    //Ex. printPAYLOAD();

    setupMessage('0',"ROAD No.1 KM-720");

    while(true)
    {
        //--->> TRANSMIT DATA - FUNCTION: transmitALL();
        transmitALL();
    }
}
```

โปรแกรมรถยนต์จำลองเพื่อแสดงผลข้อมูลจากคอมไฟถนน

```
/*  
Example Receive data from street-light  
Show VLC DATA on OLED DISPLAY  
created 21 JUNE 2016      modified 21 JUNE 2016      By. Petch Nantivatana  
Credit:  
This work used the VLC-CP-1223 driver-code VLC_CP-1223_QSC.h  
"VLC-CP-1223 QUICK STARTER CODE", Kata Jaruwongrungrunsee, CC-BY  
Which is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.  
To view a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/  
*/  
  
#include "VLC_CP-1223_QSC.h" //Add this file & include it first  
#include <Wire.h>  
#include <OLED_SSD1306.h>  
  
OLED_SSD1306 OLED;  
  
void setup()  
{  
  startVLC_IN(7);    //SET VLC_IN PIN (default 7);  
  OLED.begin(0x3C);  
  OLED.clearscreen();  
  OLED.Char_F8x16(0,0,"SPU - VLC ");  
  OLED.Char_F8x16(0,25,"CAR POSITIONING");  
  OLED.Char_F8x16(0,50,"beta version");  
  delay(3000);  
  OLED.clearscreen();  
}  
  
void loop()  
{  
  unsigned int errcount = 0; //NO-DATA TIMEOUT  
  
  //Main Function is "VLCread()"
```

```

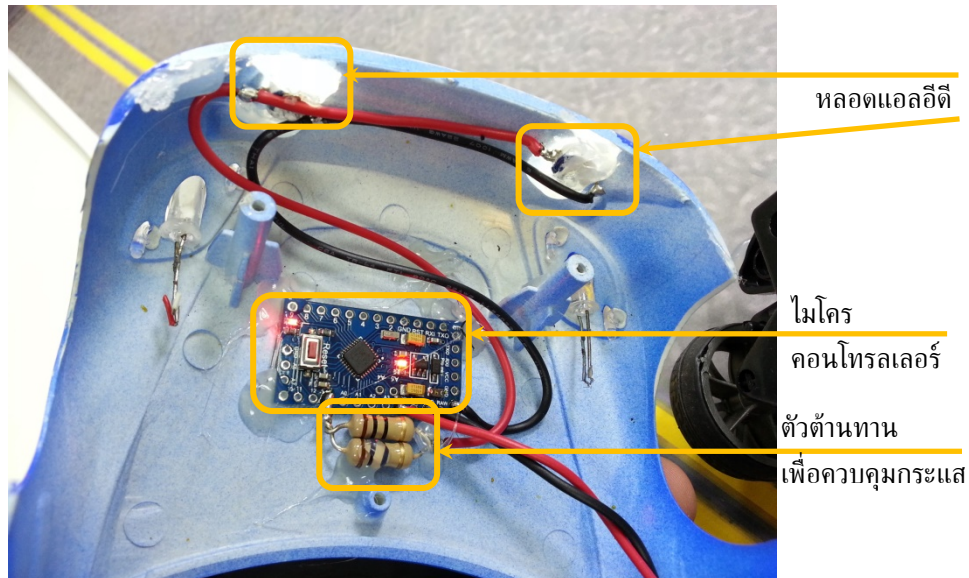
//which return 1(integer) when data is correct and return 0(integer) when no data detected
//IF DATA IS DETECTED PAYLOAD_IN[0-17] (byte) will be updated
//PAYLOAD_IN[0] = FTYPE, ID
//PAYLOAD_IN[1-17] = MESSAGE

while(true)
{
    if(VLCread()==1){ //<<----- VLC Signal Detecting
        errcount = 0;
        if(FTYPE_IN=='0'&&PAYLOAD_IN[9]=='1'){
            OLED.Char_F8x16(0,0,"PAHONYOTHIN RD.");
            OLED.Char_F8x16(0,25,"at");
            OLED.Char_F8x16(0,50,"KM 721");
        }else if(FTYPE_IN=='0'&&PAYLOAD_IN[9]=='2'){
            OLED.Char_F8x16(0,0,"PAHONYOTHIN RD.");
            OLED.Char_F8x16(0,25,"at");
            OLED.Char_F8x16(0,50,"KM 722");
        }else if(FTYPE_IN=='0'&&PAYLOAD_IN[9]=='3'){
            OLED.Char_F8x16(0,0,"PAHONYOTHIN RD.");
            OLED.Char_F8x16(0,25,"at");
            OLED.Char_F8x16(0,50,"KM 723");

        }else{delay(3000);
            OLED.clearscreen();
        }
    }

    errcount++; //NO-DATA TIMEOUT
    if(errcount > 20){
        errcount = 0;
        delay(3000);
        OLED.clearscreen();
    }
}
}

```



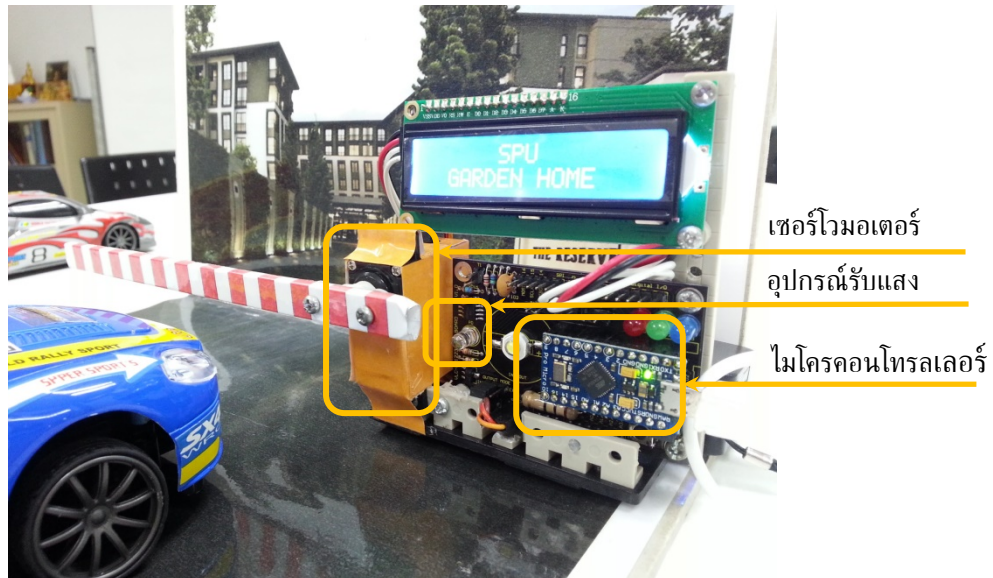
รูปที่ ก.19 อุปกรณ์ควบคุมไฟหน้ารถยนต์จำลอง

ก.3.2 ชุดสาธิตไฟรถยนต์เปิดไม่กั้นทาง

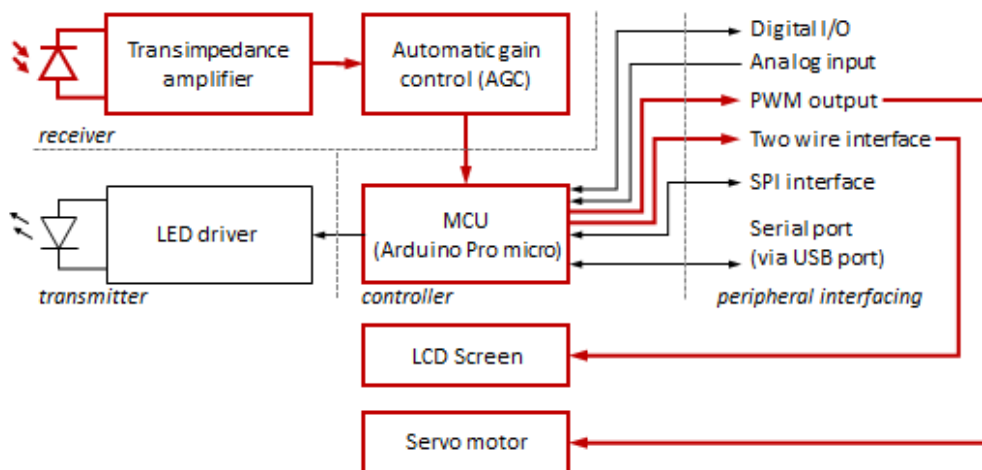
รถยนต์จำลองเพื่อสาธิตการเปิดไม่กั้นทางต้องทำการติดตั้งหลอดแอลอีดีที่บริเวณหน้ารถ โดยตำแหน่งที่เลือกคือบริเวณที่เป็นไฟหน้ารถยนต์ และติดตั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็ก Arduino Pro mini เพื่อสร้างสัญญาณรหัสในรูปแบบโปรโตคอลตามมาตรฐาน CP-1223 และควบคุมกระแสเพื่อจ่ายให้แก่หลอดแอลอีดีด้วยตัวต้านทาน 100 โอห์ม การดัดแปลงรถยนต์จำลองในส่วนรถยนต์จำลองแสดงดังรูปที่ ก.19 สำหรับรูปที่ ก.20 แสดงอุปกรณ์ควบคุมส่วนต่างๆ ที่ใช้สาธิตการเปิดปิดไม่กั้นทาง ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์เซอร์โวมอเตอร์ และบอร์ดพัฒนาการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นรุ่นที่ 1 ที่ทำการโปรแกรมให้ทำงานในลักษณะการรับสัญญาณแสงตามมาตรฐาน CP-1223 และแปลงเป็นข้อมูล โดยจะทำการตรวจสอบรหัสที่ได้รับก่อนสั่งการให้เซอร์โวมอเตอร์ทำงาน หากได้รับรหัสที่กำหนดอนุญาตให้ผ่านทางได้ที่ถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูล

ไดอะแกรมการทำงานของวงจรชุดสาธิตในส่วนของบอร์ดพัฒนาของภาครับสัญญาณตามรูปที่ ก.21 โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในบอร์ดพัฒนาถูกเรียกใช้งานเฉพาะบางส่วนตามที่แสดงในรูปด้วยกรอบเส้นสีเหลี่ยม

สำหรับโปรแกรมควบคุมที่ป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์แบ่งเป็นส่วนที่โปรแกรมให้กับโคมไฟหน้าของรถยนต์จำลองและชุดควบคุมการเปิดปิดประตู แสดงข้อมูลโปรแกรมด้านล่างนี้



รูปที่ ก.20 อุปกรณ์ควบคุมการเปิดปิดไม้กั้นทาง



รูปที่ ก.21 ไดอะแกรมการใช้งานอุปกรณ์บนบอร์ดพัฒนาการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นด้านฝั่งรับ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์หน้าของรถยนต์จำลอง

```
/* Example Car light : Transmit license plate number via car light
created 21 JUN 2016   modified 21 JUN 2016
By. Petch Nantivatana
Credit:
This work used the VLC-CP-1223 driver-code VLC_CP-1223_QSC.h
"VLC-CP-1223 QUICK STARTER CODE", Kata Jaruwongrunsee, CC-BY
Which is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
To view a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
*/

#include"VLC_CP-1223_QSC.h"           //Add this file & include it first

void setup()
{
    //SET VLC_out PIN (default = 5) PWM PIN IS NEEDED (3,5,6,9,10 for Leonardo)
    startVLC_OUT(5);
}

void loop()
{
    //SET MESSAGE TO SEND
    //--->> FUNCTION: setupMessage( FTYPE(1 byte) , STRING DATA(max 16 byte) )
    //Ex. setupMessage('1',"VLC-CP-1223 DEMO ");
    //PRINT SENDING MESSAGE AT DEFAULT SERIAL PORT (Serial.begin(XX); is needed)
    //--->> FUNCTION: printPAYLOAD();
    //Ex. printPAYLOAD();

    setupMessage('0',"08 - No.869-3  ");

    while(true)
    {
        //--->> TRANSMIT DATA - FUNCTION: transmitALL();
        transmitALL();
    }
}
```

โปรแกรมชุดควบคุมการเปิดปิดประตู

/*

Example Receive data from car-light

Show VLC DATA on LCD DISPLAY

created 21 JUNE 2016

modified 21 JUNE 2016

By. Petch Nantivatana

Credit:

This work used the VLC-CP-1223 driver-code VLC_CP-1223_QSC.h

"VLC-CP-1223 QUICK STARTER CODE", Kata Jaruwongrunsee, CC-BY

Which is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

*/

#include "VLC_CP-1223_QSC.h" //Add this file & include it first

#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal.h>

#include <Servo.h>

LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);

Servo Barrier;

#define BackLightPIN 10

#define ServoPIN 11

#define OPEN_ang 0

#define CLOSE_ang 82

void setup()

{

startVLC_IN(7); //SET VLC_IN PIN (default 7);

pinMode(BackLightPIN, INPUT);

lcd.begin(16, 2);

```

Barrier.attach(11);

lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("VLC    by SPU");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("DATA RECEIVER  ");

delay(2000);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("NO MESSAGE  ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("    WAITING...");

}

void loop()
{
  unsigned int errcount = 0; //NO-DATA TIMEOUT
  unsigned int pass;
  //Main Function is "VLCread()"
  //which return 1(integer) when data is correct
  //and return 0(integer) when no data detected
  //IF DATA IS DETECTED PAYLOAD_IN[0-17] (byte) will be updated
  //PAYLOAD_IN[0] = FTYPE, ID
  //PAYLOAD_IN[1-17] = MESSAGE

  while(true)
  {
    if(VLCread()==1){ //<----- VLC Signal Detecting
      errcount = 0;
      pass = 0;
      if (PAYLOAD[9]=='8'){
        if (PAYLOAD[10]=='6'){
          if (PAYLOAD[11]=='9'){
            if (PAYLOAD[12]=='-'){

```

```

if (PAYLOAD[13]=='3'){
    pass =1;
}

if (pass==1){
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("NO.869-3 MEMBER!"); //lcd.print((char)FTYPE);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("> > WELCOME! < <");
    Barrier.write(OPEN_ang);

    for(int i=0; i<4; i++){
        digitalWrite(BackLightPIN,0);
        pinMode(BackLightPIN, INPUT);
        delay(1000);
        for(int j=0; j<320; j++){
            delay(1);
            pinMode(BackLightPIN, OUTPUT);
            delay(2);
            pinMode(BackLightPIN, INPUT);
        }
    }
    pinMode(BackLightPIN, INPUT);
    Barrier.write(CLOSE_ang);

}

else{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("NO.");
    lcd.print((char)PAYLOAD[9]);
    lcd.print((char)PAYLOAD[10]);
    lcd.print((char)PAYLOAD[11]);
    lcd.print((char)PAYLOAD[12]);
    lcd.print((char)PAYLOAD[13]);
    lcd.print(" WAIT!");
}

```

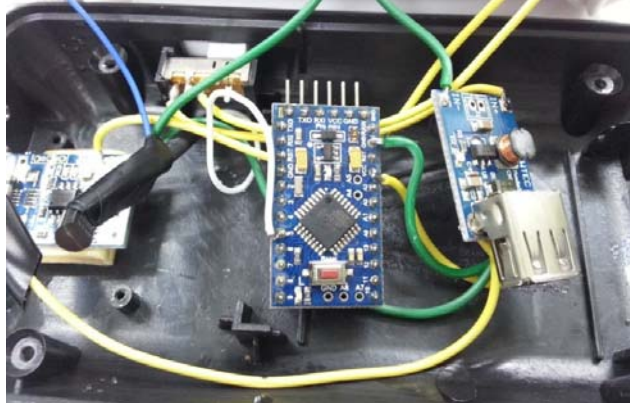
```

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("<< NOT MEMBER >>");

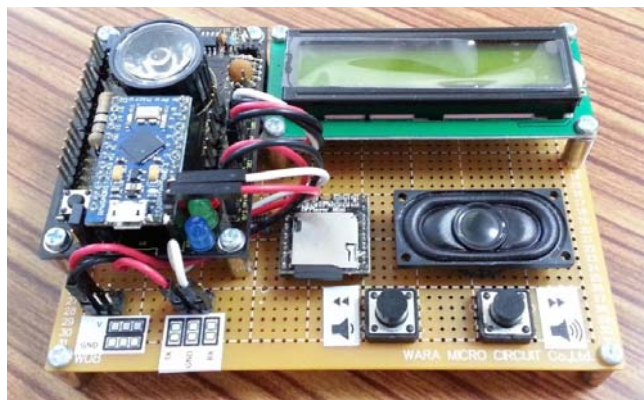
    Barrier.write(CLOSE_ang);
    for(int i=0; i<4; i++){
        digitalWrite(BackLightPIN,0);
        for(int j=0; j<150; j++){
            delay(1);
            pinMode(BackLightPIN, OUTPUT);
            delay(2);
            pinMode(BackLightPIN, INPUT);
        }
        delay(250);
        pinMode(BackLightPIN, INPUT);
        delay(250);
    }
}

errcount++;    //NO-DATA TIMEOUT
if(errcount > 10){
    errcount = 0;
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("   SPU   ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" GARDEN HOME ");
    Barrier.write(CLOSE_ang);
}
}
}

```



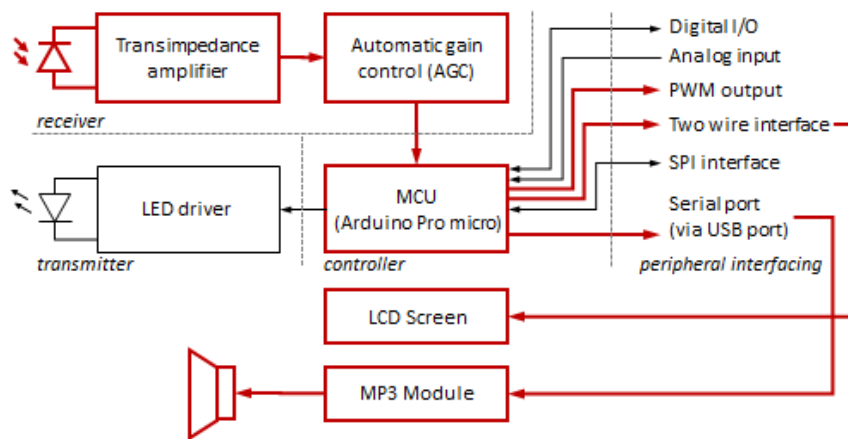
รูปที่ ก.22 อุปกรณ์ภายในฝั่งส่งของชุดสาธิตพิพิธภัณฑ์อัจฉริยะ



รูปที่ ก.23 อุปกรณ์ฝั่งรับของชุดสาธิตพิพิธภัณฑ์อัจฉริยะ

2.3.3 ชุดสาธิตพิพิธภัณฑ์อัจฉริยะ

ชุดสาธิตพิพิธภัณฑ์อัจฉริยะมีส่วนประกอบสองส่วนเช่นเดียวกันกับชุดสาธิตที่กล่าวมาทั้งสองคือ ฝั่งส่งข้อมูลและฝั่งรับข้อมูล ในส่วนฝั่งส่งข้อมูลจะเลือกใช้ไมโครไฟแอลอีดีในลักษณะเดียวกันกับชุดสาธิตไฟถนน ซึ่งถูกดัดแปลงวงจรภายในและนำไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro mini ฝังไว้ภายในไมโครเพื่อควบคุมการส่งข้อมูลรูปที่แสดงในพิพิธภัณฑ์ โดยข้อมูลที่ส่งออกมาอยู่ในรูปแบบตามมาตรฐาน CP-1223 และควบคุมการกระพริบของหลอดแอลอีดีด้วยทรานซิสเตอร์เบอร์ 4401 ดังแสดงในรูปที่ ก.22 ด้านฝั่งรับใช้บอร์ดพัฒนาการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นรุ่นที่ 1 เพื่อเป็นวงจรรับและควบคุม แสดงผลการรับด้วยหน้าจอแอลซีดีชนิดสองบรรทัดลิบหกตัวอักษร และมีส่วนควบคุมการเล่นเสียงจากไฟล์เอ็มพีสามด้วยดังแสดงในรูปที่ ก.23



รูปที่ ก.24 ไดอะแกรมการดำเนินงานรับของชุดสถิติฟิสิกส์ที่อัจฉริยะ

ไดอะแกรมการทำงานของวงจรชุดสถิติในส่วนของบอร์ดพัฒนาของภาครับสัญญาณตามรูปที่ ก.24 โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในบอร์ดพัฒนาถูกเรียกใช้งานเฉพาะบางส่วนตามที่แสดงในรูปด้วยกรอบสี่เหลี่ยม

สำหรับโปรแกรมควบคุมที่ป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์แบ่งเป็นส่วนที่โปรแกรมให้กับคอมพิวเตอร์วัตถุและชุดควบคุมการเล่นไฟล์เอ็มพีสาม แสดงข้อมูลโปรแกรมด้านล่างนี้

โปรแกรมคอมพิวเตอร์วัตถุ

/* Example Gallery light : Transmit data via gallery light

created 21 JUN 2016

modified 21 JUN 2016

By. Petch Nantivatana

Credit:

This work used the VLC-CP-1223 driver-code VLC_CP-1223_QSC.h

"VLC-CP-1223 QUICK STARTER CODE", Kata Jaruwongrungrunsee, CC-BY

Which is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

*/

#include "VLC_CP-1223_QSC.h"

//Add this file & include it first

void setup()

{ //SET VLC_out PIN (default = 5) PWM PIN IS NEEDED (3,5,6,9,10 for Leonardo)


```

startVLC_OUT(5);
}

void loop()
{
    //SET MESSAGE TO SEND
    //--->> FUNCTION: setupMessage( FTYPE(1 byte) , STRING DATA(max 16 byte) )
    //Ex. setupMessage('1',"VLC-CP-1223 DEMO ");
    //PRINT SENDING MESSAGE AT DEFAULT SERIAL PORT (Serial.begin(XX); is needed)
    //--->> FUNCTION: printPAYLOAD();
    //Ex. printPAYLOAD();

    setupMessage('0',"1Sunflowers  ");
    //setupMessage('0',"2Mona Lisa  ");
    //setupMessage('0',"3Thawan-Duchanee");

    while(true)
    {
        //--->> TRANSMIT DATA - FUNCTION: transmitALL();
        transmitALL();
    }
}

```

โปรแกรมชุดควบคุมการเล่นไฟล์เอ็มพีสาม

```

/*
Example Receive ID from gallery-light
Show VLC DATA on I2C-LCD DISPLAY and MP3
created 21 JUNE 2016      modified 21 JUNE 2016      By. Petch Nantivatana
Credit:
This work used the VLC-CP-1223 driver-code VLC_CP-1223_QSC.h
"VLC-CP-1223 QUICK STARTER CODE", Kata Jaruwongrungrsee, CC-BY
Which is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
To view a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
*/

#include"VLC_CP-1223_QSC.h" //Add this file & include it first

```

```

#include <SoftwareSerial.h>
#include <DFPlayer_Mini_Mp3.h>
//DFPlayer_Mini_Mp3, This library provides a quite complete function for
//DFPlayer mini mp3 module.
//www.github.com/dfrobot/DFPlayer_Mini_Mp3 (github as default source provider)

#include <Wire.h>           //I2C Lib
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
//I2C-LCD Lib, Replace the old LiquidCrystal library with
//https://bitbucket.org/fmalpartida/new-liquidcrystal/downloads
//By. F Malpartida

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Set the LCD address to 0x27 for a 16 chars and 2 line display

#define LED1 4
#define LED2 6
#define LED3 8

void setup()
{
  startVLC_IN(7);    //SET VLC_IN PIN (default 7);
  pinMode(LED1, OUTPUT); digitalWrite(LED1,0);
  pinMode(LED2, OUTPUT); digitalWrite(LED2,0);
  pinMode(LED3, OUTPUT); digitalWrite(LED3,0);
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin();
  for(int i = 0; i< 5; i++)
  {
    lcd.backlight();   delay(50);
    lcd.noBacklight(); delay(50);
  }
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(" SPU Gallery ");

```

```

lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("No Data Received");

Serial1.begin (9600);
mp3_set_serial (Serial1); //set Serial for DFPlayer-mini mp3 module
delay(1);           //wait 1ms for mp3 module to set volume
mp3_set_volume (12);
}

void loop()
{
  unsigned int errcount = 0; //NO-DATA TIMEOUT
  unsigned char mp3_no;

  //Main Function is "VLCread()"
  //which return 1(integer) when data is correct
  //and return 0(integer) when no data detected
  //IF DATA IS DETECTED PAYLOAD_IN[0-17] (byte) will be updated
  //PAYLOAD_IN[0] = FTYPE, ID
  //PAYLOAD_IN[1-17] = MESSAGE

  while(true)
  {
    if(VLCread()==1){ //<----- VLC Signal Detecting
      errcount = 0;
      if(FTYPE_IN=='0'&&PAYLOAD_IN[1]=='1'){
digitalWrite(LED1,1);digitalWrite(LED2,0);digitalWrite(LED3,0);mp3_no=1;

        mp3_play (mp3_no);

        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print(" Data From ID: 1");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("          ");
        for(int i = 0; i< 2; i++)

```

```

    {
        lcd.backlight();  delay(500);
        lcd.noBacklight();  delay(500);
    }

    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Sunflowers   ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Vincent van Gogh");

    delay (6000);

}

else
if(FTYPE_IN=='0'&&PAYLOAD_IN[1]=='2'){digitalWrite(LED1,0);digitalWrite(LED2,1);digitalWrite(LED3,0);mp3_no=2;

    mp3_play (mp3_no);

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" Data From ID: 2");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("           ");
    for(int i = 0; i < 2; i++)
    {
        lcd.backlight();  delay(500);
        lcd.noBacklight();  delay(500);
    }

    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Mona Lisa   ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Leonardo daVinci");

    delay (6000);

```

```

    }else
if(FTYPE_IN=='0'&&PAYLOAD_IN[1]=='3'){digitalWrite(LED1,0);digitalWrite(LED2,0);digitalWrite(LED3,1);mp3_no=3;

    mp3_play (mp3_no);

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" Data From ID: 3");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" ");
    for(int i = 0; i< 2; i++)
    {
        lcd.backlight(); delay(500);
        lcd.noBacklight(); delay(500);
    }
    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Thawan-Duchanee ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("National Artist ");

    delay (6000);

}

}

}

errcount++; //NO-DATA TIMEOUT
if(errcount > 20){
    errcount = 0;
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" SPU Gallery ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("No Data Received");
}
}
}
}

```

ก.4 ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ชุดสาธิตการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นที่ได้สร้างขึ้นจำนวนสามชุดคือ ชุดสาธิตไฟถนน ชุดสาธิตไฟรถยนต์เปิดไม่กั้นทาง และชุดสาธิตพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบทุกประการ โดยมีข้อจำกัดในการสาธิตคือ ควรทำการสาธิตภายในบริเวณในอาคารที่ไม่มีแสงจากภายนอกรบกวนมากเกินไป เนื่องจากแสงจากภายนอกจะเป็นสัญญาณรบกวนทางแสงของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น และอุปกรณ์พัฒนาต้นแบบนี้มุ่งเน้นที่ความเรียบง่ายของวงจร จึงไม่มีวงจรเสริมในส่วนการลดทอนปัญหาจากสัญญาณรบกวนภายนอก อีกประการหนึ่งคือแสงที่กำเนิดจากหลอดไฟแอลอีดีของชุดสาธิตแต่ละชุด ก็สามารถทำการรบกวนกันเองได้ด้วย ในการสาธิตจึงควรจัดวางตำแหน่งของชุดสาธิตแต่ละชุดให้มีระยะห่างจากกันพอสมควรในระยะที่ไม่มีแสงไปรบกวนซึ่งกันและกัน

ภาคผนวก ข

มาตรฐาน CP-1223 ของประเทศญี่ปุ่น

JEITA

電子情報技術産業協会規格

Standard of Japan Electronics and Information Technology Industries Association

JEITA CP-1223

可視光ビーコンシステム

Visible Light Beacon System

2013 年 5 月制定

作 成

AV&IT 標準化委員会

AV & IT Standardization Committee

発 行

一般社団法人 電子情報技術産業協会

Japan Electronics and Information Technology Industries Association

目 次

まえがき	1
1 適用範囲	1
2 引用規格及び文書	1
3 用語及び定義	2
4 システム概要	3
4.1 インタフェース点とプロトコル規定	3
4.2 機能	4
5 物理層	5
5.1 搬送波	5
5.2 データ速度	5
5.3 伝送方式	5
5.4 スプリアス	6
5.5 伝送距離	6
5.6 サービスエリア	6
6 フレーム層	6
7 測定方法	8
解説	
1 制定の趣旨	9
2 応用例	9
3 安全性	10
4 フレーム・タイプ、ID、メッセージ・コードの管理	10
5 工業所有権	10
6 審議委員	10

電子情報技術産業協会規格

可視光ビーコンシステム

Visible Light Beacon System

まえがき

この規格は、一般社団法人 電子情報技術産業協会規格 JEITA CP-1221 で規定されている通信方式に基づく、単方向の可視光ビーコンシステムの通信方式について規定するもので一般社団法人 電子情報技術産業協会 AV&IT 標準化委員会の中にある可視光通信対応プロジェクトグループが作成したものである。

可視光ビーコンシステムは身の回りにコドキタスに存在する可視光類から簡単な情報やその可視光類に固有な ID 情報を放射送信させることで、物の識別、位置情報の提供、各種案内システムの構築など、様々な応用を図るものである。本規格はこれらの応用に共通な低位通信レイヤに関する統一規格を制定、共通に利用することを目的とし、個々の応用に依存する上位通信レイヤに関しては取り上げない。

1 適用範囲

本規格は、可視光を媒体とした単方向の通信システム（以下、可視光ビーコンシステムと称ふ。）について規定するものである。特に図 1 における、可視光ビーコンシステムの中の IF-a（インタフェース点 a）の部分に関する規格を定める。

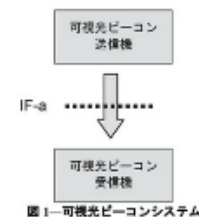


図 1—可視光ビーコンシステム

2 引用規格及び文書

次に挙げる規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格のうちで、発行年〔日本工業規格（以下、JIS という。）の場合は、発効年〕を付記してあるものは、記載の年の版だけがこの規格の規定を構成するものであって、その後の改正版、Amendment 又は追補には適用しない。発行年（又は発効年）を付記していない引用規格は、その最新版（Amendment・追補を含む）を適用する。

a) JEITA 規格

CP-1221：可視光通信システム

CP-1222：可視光 ID システム

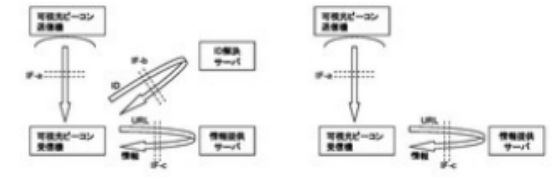


図2(a) 可視光ビーコンシステム構成とインタフェース点

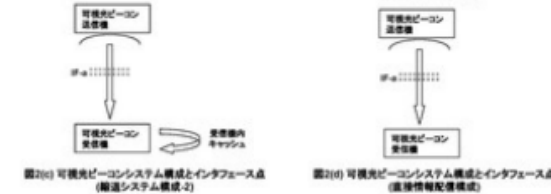
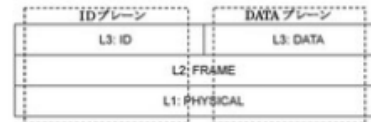
図2(b) 可視光ビーコンシステム構成とインタフェース点
(簡易システム構成-1)図2(c) 可視光ビーコンシステム構成とインタフェース点
(簡易システム構成-2)図2(d) 可視光ビーコンシステム構成とインタフェース点
(直接情報配信構成)

図3—インタフェース点 a (IF-a) のプロトコル構成

図3は本規格で規定する上記インタフェース点 a のプロトコル構成である。プロトコル構成は、ID を配信する ID プレーンと、ID によらず直接情報を配信する DATA プレーンの 2 つのプレーンからなる。

このうち、第 1 層の物理層 (L1: PHYSICAL)、第 2 層のフレーム層 (L2: FRAME) は ID プレーンと DATA プレーンの両者に共通のレイヤである。第 3 層は、ID プレーンの場合と直接情報配信を行う場合とで異なる。なお、ID と DATA は同一フレーム内で併送することもできる。

4.2 機能

4.2.1 ID 送信機能

可視光ビーコン送信機は、ID を送出することができる。使用する ID のコード体系は選択可能であり、ID 解決 (ID からその ID に関連付けられた情報を引き出す) により、様々なサービスを提供あるいは享受することができる。例として以下のような使い方が想定される。

(1) 機器識別

可視光ビーコン送信機は ID として、当該機器の商品コード (シリアル番号等も包含可能) を送信する。受信機は ID 解決により機器を識別し、その機器に関する情報の入手が可能となる。情報としては、メーカー名、製品名、機器の仕様書やマニュアル、消耗品情報、使用履歴等がある。

(2) 位置情報

可視光ビーコン送信機は ID として、当該機器が設置された場所におけるコード化された地理情報 (位置情報 ID) を送信する。受信機は ID の解決により、自分の位置を知ることができる。GPS の利用が困難な建物内や地下街で、現在位置を元にした周辺サービス検索、緊急通報時の発信位置通報機能等を実現できる。また、ロボットが自分の位置を検出する手段としても利用できる。

5 物理層

5.1 搬送波

本システムの搬送波は、JEITA CP-1221 (可視光通信システム規格) に基づき原則としてピーク波長 380 ~ 780 [nm] の可視光線とする。

5.2 データ速度

データ速度は、4.8 [kb/s] とする。

データ速度の公算は 0.5% 以下とする。

5.3 伝送方式

搬送波である可視光線を強度変調する符号化方式としては、論理反転した 4PPM (4 値 Pulse Position Modulation) を使用する。このような変調方式を I-4PPM (Inverted 4PPM) と呼ぶ。図 4 に I-4PPM 光信号波形を示す (注: 図では信号波形を矩形波で記述しているが実際には個々の電子機器としてスプリアス規定等を遵守するため波形成形が必要、図 5、7 も同様)。図 4 に示すように、波形の強度各値 a 、 b を定義して、

$$\text{信号振幅} = b - a$$

$$\text{変調度} = (b - a) / b$$

とする。

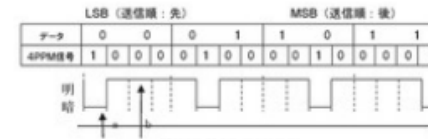


図4—I-4PPM 光信号波形

4PPM 符号方式について、以下のとおり規定する。

(1) 符号化規則

4PPM 符号方式は、シンボル時間 (D1) として定義される一定の時間を 4 つのスロット (C1) に等分し、1 シンボル時間に 1 つのスロット幅のパルスを送信し、そのパルスの存在スロット時間位置に

CRC フィールド長は 16 ビットとする。受信側でフレーム・データが正しく受け取れたかを判断する。可視光 ID システムは単方向通信であり、再送要求等は行えないため、エラーを検出すると受信データを破棄する。CRC フィールドには、CRC の演算結果を格納する。CRC-16 は次の生成多項式で与えられる。

$$X^{16}+X^{15}+X^2+1$$

CRC の演算範囲はフレーム・タイプとペイロードである。CRC 演算器のレジスタは、送信データ列の CRC 演算前にあらかじめすべて「1」に設定する。

6.1.5 データ送信手順

送信はフレーム単位でフレーム内では時間的に途切れることなく送信する。フレームの送信順はプリアンプル (PRE)、フレーム・タイプ (F-TYPE)、ペイロード (ID/DATA)、CRC の順で送信する。

データ送信順及び CRC 計算順を図 8 に示す。CRC 演算器には、フレーム・タイプ (F-TYPE) 及びペイロードそれぞれのフィールドの最下位バイトの最下位ビット (LSB) から入力する。図 8 ではそのデータを左から入力する。また、CRC 演算結果はフレーム・タイプとペイロードの出力完了後、16 ビットシフトレジスタにコピーし、出力を 16 ビットシフトレジスタ・シリアル出力に切り替えて出力する。この 16 ビットシフトレジスタは、図 8 において左から出力する。

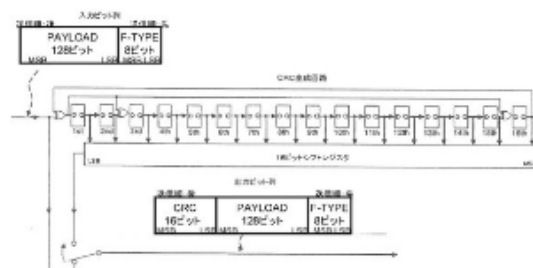


図 8—データ送信順及び CRC 演算順

フレーム間の休止時間は自由である。ただし、端末を人が見捨てる場合は情報取得時間を短くすることが好ましく、1つのフレームを繰り返した場合、フレームあたり約 0.03 秒で受信することができる。また、フレーム間に休止を設けて断続的な送信を行う場合は、光線のちらつきを防止するためにフレーム送信休止時間においては 1/4PPM 形式で “1000” データを挿入するか、信号レベルをフレーム送信時間の信号レベルの平均値

$$b' = a + 3b/4$$

とすることを推奨する (信号波形の a, b レベルについては 5.3 を参照)。

7 測定方法

可視光通信において、発光素子及び受光素子の特性値を求めるため、あるいは所定の要件を満たしているかどうかを確認するために、あらかじめ決められた測定条件の下で測定を行うことが必要である。具体的な測定条件は、各応用規格にて定める。

一般社団法人 電子情報技術産業協会が発行している規格類は、工業所有権 (特許、実用新案など) に関する抵触の有無に関係なく制定されています。

一般社団法人 電子情報技術産業協会は、この規格類の内容に関する工業所有権に係る確認について、責任はもちません。

JEITA CP-1223

2013 年 6 月発行

発行 一般社団法人 電子情報技術産業協会
コンシューマ・プロダクツ部
〒100-0004 東京都千代田区大手町 1-1-3
TEL 03 6218 1058 FAX 03 6218 1077

印刷 株式会社 オガタ印刷
〒102-0072 東京都千代田区飯田橋 1-5-6
TEL 03-3284-3456

禁 無 断 転 載

(この規格類の全部又は一部を転載しようとする場合は、発行者の許可を得てください。)

