เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงสว่าง (VLC) และการประยุกต์ใช้งาน

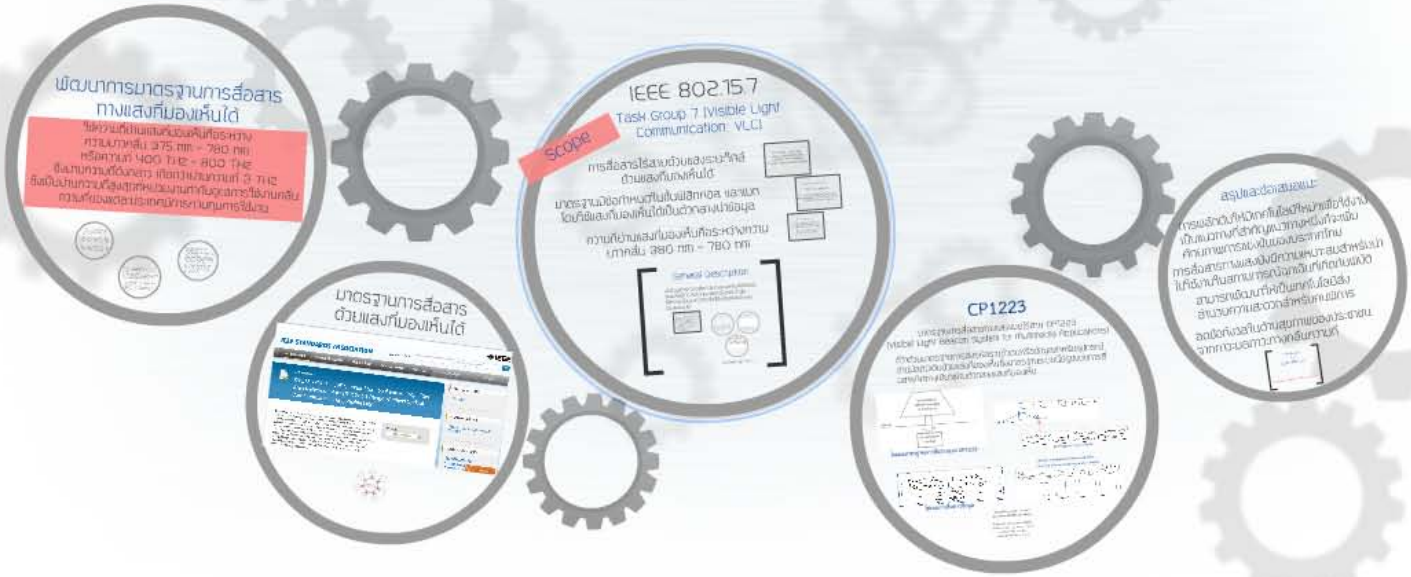
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

International Year of Light 2015

ภายใต้โครงการพัฒนาความพร้อมระดับประเทศของการสื่อสารด้วยแสงสว่าง : การถ่ายทอดเทคโนโลยี การพัฒนาบุคลากรด้านกิจการโทรคมนาคม การจัดทำร่างมาตรฐานและสื่อ

รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา กอเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม



มาตรฐานของการส่องสว่างข้อมูล

กสทช.

SPU SRIPATUM UNIVERSITY

IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY Thailand Chapter

ECTI Association INFORMATION

พัฒนาการมาตรฐานการสื่อสาร ทางแสงที่มองเห็นได้

ใช้ความถี่ย่านแสงที่มองเห็นคือระหว่าง
ความยาวคลื่น 375 nm – 780 nm
หรือความถี่ 400 THz – 800 THz
ซึ่งย่านความถี่ดังกล่าว เกิดกว่าย่านความถี่ 3 THz
ซึ่งเป็นย่านความถี่สูงสุดที่หน่วยงานกำกับดูแลการใช้งานคลื่น
ความถี่ของแต่ละประเทศมีการควบคุมการใช้งาน

ประเทศญี่ปุ่นมีการเตรียมพัฒนาเพื่อการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ Visible Light Communication Consortium หรือ VLCC เมื่อ พ.ศ. 2546

ยุโรป มีโครงการความร่วมมือชื่อโอเมกา (OMEGA) โดยได้รับการสนับสนุนจากสหภาพยุโรป (EU-FP7 program) พัฒนาการเชื่อมต่อการสื่อสารความเร็วสูงภายในอาคารของผู้ทำมาตรฐานการหลอมรวมเทคโนโลยีดิจิทัลสำหรับเครือข่ายระดับบ้านพักของ IEEE (P1905.1)

สถาบันวิจัยของเยอรมนี Fruenhofer Hehrich Hertz Institute ได้สร้างต้นแบบเพื่อการใช้งานเบนทรมพิเศษที่ความเร็ว 500 Mbps ในปี พ.ศ. 2556

สหรัฐอเมริกา กลุ่มวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยบอสตัน นำเสนอผลงานออกมาในรูปแบบแสงอลาด (Smart Lighting) เป็นการควบรวมกับการประยุกต์ในที่พักอาศัยคล้ายคลึงกับงานบ้านหรือสำนักงานสัจริย: (Smart home/office)

อินเทล (Intel) เป็นผู้สนับสนุนทุนวิจัยให้กับการรวมกลุ่มวิจัยเพื่อกิจกรรมด้านการจราจรสัจริยะด้วยแสงระหว่างยานยนต์กับไฟจราจร

ประเทศญี่ปุ่นมีการก่อตั้งกลุ่มเพื่อภารกิจการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (Visible Light Communication Consortiumหรือ VLCC) เมื่อ พ.ศ. 2545

สมาคมเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และสารสนเทศของญี่ปุ่น (Japan Electronics and Information Technologies Association) ก็ได้ออกมาตรฐานแรกมาตั้งแต่ พ.ศ.2550

บริษัทผู้ผลิตสินค้าคอนซูมเมอร์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น บริษัทคาสิโอ (Casio) ละบริษัทเกิดใหม่ LAMPServe มีการพัฒนาการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้

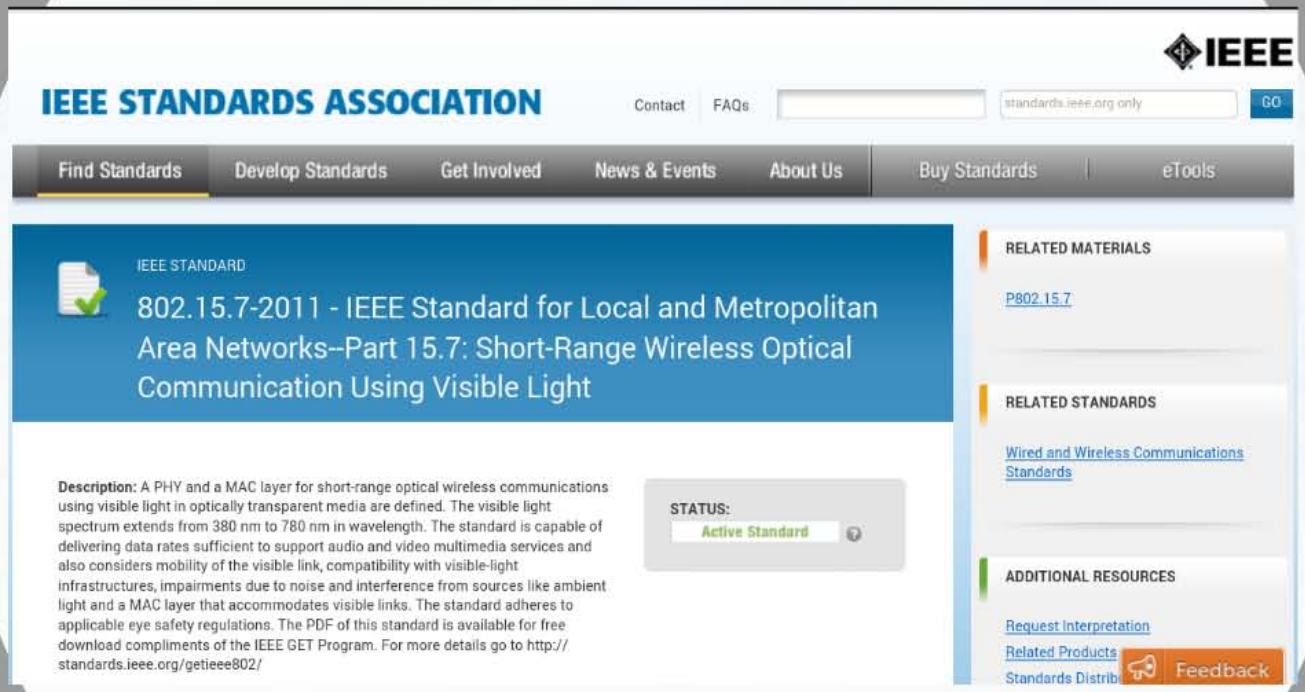
ยุโรป มีโครงการความร่วมมือชื่อโอเมกา (OMEGA) โดยได้รับการสนับสนุนจากสหภาพยุโรป (EU-FP7 program)
พัฒนาการเชื่อมต่อการสื่อสารความเร็วสูงภายในอาคาร อิงอยู่กับมาตรฐานการหลอมรวมเทคโนโลยีดิจิทัลสำหรับเครือข่ายระดับบ้านพักของIEEE (P1905.1)

สถาบันวิจัยของเยอรมนี Fruanhofer Heinrich Hertz Institute
ได้สร้างต้นแบบเพื่อการใช้งานแบบครบฟังก์ชันที่ความเร็ว 500 Mbps ในปี พ.ศ. 2556

สหรัฐอเมริกา กลุ่มวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยบอสตัน
นำเสนอผลงานออกมาในรูปแบบแสงฉลาด
(Smart Lighting)
เป็นการควบรวมกับการประยุกต์ในที่พัก
อาศัยคล้ายคลึงกับงานบ้านหรือสำนักงาน
อัฉริยะ (Smart home/office)

อินเทล (Intel) เป็นผู้สนับสนุนทุนวิจัย
ให้กับการรวมกลุ่มวิจัยเพื่อกิจกรรม
ด้านการจราจรอัฉริยะด้วยแสงระหว่าง
ยานยนต์กับไฟจราจร

มาตรฐานการสื่อสาร ด้วยแสงที่มองเห็นได้



IEEE 802.15
มาตรฐานของเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล
(Wireless Personal Area Networks: WPANs)
Task Group 1
(WPAN/Bluetooth)
Task Group 2
(Coexistence)
Task Group 3
(High Rate WPAN)
Task Group 4
(Low Rate WPAN)
Task Group 5
(Mesh Networking)
Task Group 6
(Body Area Network
: BAN)
Task Group 7
(Visible Light
Communication:VLC)

IEEE 802.15.7

Task Group 7 (Visible Light Communication: VLC)

Scope

การสื่อสารไร้สายด้วยแสงระยะใกล้
ด้วยแสงที่มองเห็นได้

มาตรฐานมีข้อกำหนดในชั้นฟิสิกคอล และแมก
โดยใช้แสงที่มองเห็นได้เป็นตัวกลางนำข้อมูล

ความถี่ย่านแสงที่มองเห็นคือระหว่างความ
ยาวคลื่น 380 nm – 780 nm

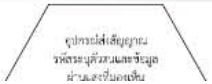
General Description

ส่งข้อมูลโดยการกล้ำความเข้มของแหล่งกำเนิดแสง
เช่นแอลอีดี (LEDs) และเลเซอร์ไดโอด (LDs)
ที่มีความเร็วมากกว่าการรับรู้ทึงการเปลี่ยนแปลง
ของตามนุษย์

คุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญ

มาตรฐานการสื่อ
(Visible Light Beacon

ที่ว่าด้วยมาตรฐานการส่
ด้านมัลติมีเดียด้วยแสงที่
อสารทิศทางเดียวผ่านตั

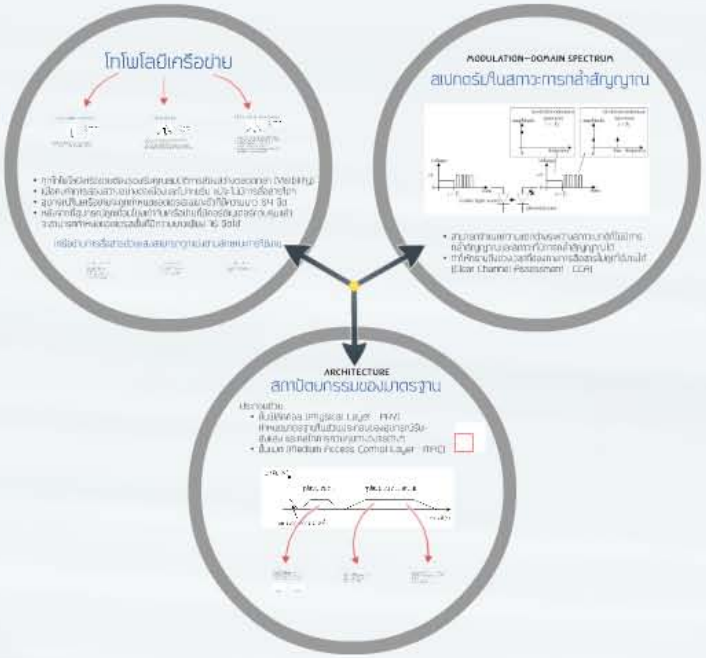


General Description

ส่งข้อมูลโดยการกล้ำความเข้มของแหล่งกำเนิดแสง เช่นแอลอีดี (LEDs) และเลเซอร์ไดโอด (LDs) ที่มีความเร็วมากกว่าการรับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงของตามนุษย์

ในมาตรฐานมีการกำหนดคุณลักษณะสำคัญดังนี้

ก) โทโพโลยีของเครือข่ายในรูปแบบการส่งผ่านข้อมูลด้วยโทโพโลยีสตาร์ เพียร์ทูเพียร์ หรือการกระจาย
ข) การกำหนดแอดเดรสสั้น 16 บิต หรือมาก 64 บิต
ค) การกำหนดการเข้าถึงตัวกลางในลักษณะการกำหนดเวลาเข้าถึง หรือการกำหนดให้เข้าถึงแบบสุ่มที่มีกลไกป้องกันการชน
ง) โพรโทคอลการตอบกลับเมื่อได้รับข้อมูล เพื่อเสถียรภาพน่าเชื่อถือ
จ) การกำหนดดัชนีชี้วัดคุณภาพ (Wavelength Quality indication : WQI)
ฉ) รองรับการปรับค่าความสว่าง (Dimming Support)
ช) รองรับการมองเห็นได้ของแสง
ซ) รองรับการปรับเปลี่ยนสี และ
ฌ) รองรับความมีเสถียรภาพของสี



คุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญ

ในมาตรฐานมีการกำหนดคุณลักษณะสำคัญดังนี้

ก) โทโพโลยีของเครือข่ายในรูปแบบการส่งผ่านข้อมูลด้วยโทโพโลยีสตาร์ เพียร์ทูเพียร์ หรือการกระจาย
ข) การกำหนดแอดเดรสสั้น 16 บิต หรือยาว 64 บิต
ค) การกำหนดการเข้าถึงตัวกลางในลักษณะการกำหนดเวลาเข้าถึง หรือการกำหนดให้เข้าถึงแบบสุ่มที่มีกลไกป้องกันการชน
ง) โพรโทคอลการตอบกลับเมื่อได้รับข้อมูล เพื่อเสถียรภาพน่าเชื่อถือ
จ) การกำหนดดัชนีชี้วัดคุณภาพ (Wavelength Quality Indication : WQI)
ฉ) รองรับการปรับค่าความสว่าง (Dimming Support)
ช) รองรับการมองเห็นได้ของแสง
ซ) รองรับการปรับเปลี่ยนสี และ
ฌ) รองรับความมีเสถียรภาพของสี

โทโพโลยีเครือข่าย

โทโพโลยีแบบพีียร์ทูพีียร์ (Peer-to-peer)

มีการสื่อสารเชื่อมระหว่างอุปกรณ์สองตัวการนี้น หนึ่งในนั้นอาจทำหน้าที่เป็นคอร์ดิเนเตอร์ด้วย

โทโพโลยีแบบสตาร์ (Star)

- อุปกรณ์ส่วนใหญ่มีความสามารถที่จะควบคุมหรือทำหน้าที่คอร์ดิเนเตอร์ (Coordinator)
- หนึ่งเครือข่ายแบบสตาร์สามารถมีคอมพิวเตอร์ได้
- คอมพิวเตอร์เป็นคอร์ดิเนเตอร์จะควบคุมหรือสื่อสารสตาร์เชื่อมกับอุปกรณ์อื่นๆ

โทโพโลยีการกระจาย (Broadcasting)

- ทำงานในลักษณะการกระจายข้อมูลทั้งทางเดียว
- อุปกรณ์ไม่จำเป็นจะต้องเป็นสวิตชิ่งเครือข่าย
- ไม่จำเป็นจะต้องเชื่อมเป็น (Ressource)
  ให้อุปกรณ์ตัวปั่นทุกรู้จักกันเครือข่าย
- อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กระจายข้อมูลที่ไม่จำเป็นจะต้องทำหน้าที่เชื่อมโยงกันอุปกรณ์ตัวอื่นด้วย

- ทุกโทโพโลยีเครือข่ายต้องรองรับคุณสมบัติการส่องสว่างตลอดเวลา (Visibility)
- เพื่อคงค่าการส่องสว่างอย่างต่อเนื่องและไม่กะพริบ แม้จะไม่มีการสื่อสารใดๆ
- อุปกรณ์ในเครือข่ายจะถูกกำหนดแอดเดรสเฉพาะตัวที่มีความยาว 64 บิต
- หลังจากที่อุปกรณ์ถูกเชื่อมโยงเข้ากับเครือข่ายที่มีคอร์ดิเนเตอร์ควบคุมแล้ว จะสามารถกำหนดแอดเดรสสั้นที่มีความยาวเพียง 16 บิตได้

เครือข่ายการสื่อสารด้วยแสงสามารถถูกแบ่งตามลักษณะการใช้งาน

โครงข่ายใยแก้ว (Infrastructure)

- อุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารใยแก้ว
  มีทั้งประเภทที่ใช้งานในเส้นใยแก้ว
- มีอุปกรณ์ที่ใช้งานในเส้นใยแก้ว
- โดยอุปกรณ์ที่ใช้งานในเส้นใยแก้วจะมีทั้งแบบ Active และ Passive
- ระบบที่ใช้งานเชื่อมต่อกับเครือข่าย Internet และ Web
- ระบบที่ใช้งานเชื่อมต่อกับเครือข่ายภายในอาคาร (LAN)

เครือข่ายที่ใช้ (Mobile)

- อุปกรณ์ที่ใช้งานในเครือข่ายใยแก้ว
- มีอุปกรณ์ที่ทำงานในเครือข่ายใยแก้ว (Optical Fiber)
- การเชื่อมต่อกับเครือข่ายใยแก้ว
- ระบบที่ใช้งานเชื่อมต่อกับเครือข่ายภายในอาคาร (LAN)
- การเชื่อมต่อกับเครือข่ายภายนอกอาคาร

เครือข่าย (Wireless)

- มีระบบการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ (Radio Frequency)
  ในช่วงคลื่นวิทยุ (Radio Frequency)
- ใช้ในการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ (Radio Frequency)

โทโพโลยีเครือข่าย

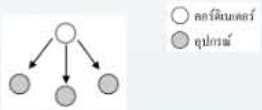
โทโพโลยีเพียร์ทูเพียร์ (Peer-to-peer)

มีการสื่อสารเพียงระหว่างอุปกรณ์สองตัวเท่านั้น
หนึ่งในนั้นจะทำหน้าที่เป็นคอร์ดิเนเตอร์ด้วย

โทโพโลยีสตาร์ (Star)

- อุปกรณ์ส่วนกลางมีความสามารถในการควบคุมหรือทำหน้าที่คอร์ดิเนเตอร์ (Coordinator)
- หนึ่งเครือข่ายแบบสตาร์สามารถมีหลายคอร์ดิเนเตอร์ได้
- แต่ละคอร์ดิเนเตอร์จะควบคุมเครือข่ายสตาร์แยกกันอย่างอิสระ

โทโพโลยีการกระจาย (Broadcasting)



- ทำงานในลักษณะการกระจายข้อมูลทิศทางเดียว
- อุปกรณ์ไม่จำเป็นจะต้องเป็นส่วนหนึ่งของเครือข่าย
- ไม่จำเป็นจะต้องเชื่อมโยง (Associate) ให้อุปกรณ์ตัวนั้นถูกรู้จักในเครือข่าย
- อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กระจายข้อมูลก็ไม่จำเป็นจะต้องทำหน้าที่เชื่อมโยงกับอุปกรณ์ตัวอื่นใด

มีการสื่อสารเพียงระหว่างอุปกรณ์สองตัวเท่านั้น
หนึ่งในนั้นจะทำหน้าที่เป็นคอร์ดิเนเตอร์ด้วย

- อุปกรณ์ส่วนกลางมีความสามารถในการควบคุมหรือทำหน้าที่คอร์ดิเนเตอร์ (Coordinator)
- หนึ่งเครือข่ายแบบสตาร์สามารถมีหลายคอร์ดิเนเตอร์ได้
- แต่ละคอร์ดิเนเตอร์จะควบคุมเครือข่ายสตาร์แยกกันอย่างอิสระ

- อุปกรณ์ไม่จำเป็นจะต้องเป็นส่วนหนึ่งของเครือข่าย
- ไม่จำเป็นจะต้องเชื่อมโยง (Associate) ให้อุปกรณ์ตัวนั้นถูกรู้จักในเครือข่าย
- อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กระจายข้อมูลก็ไม่จำเป็นจะต้องทำหน้าที่เชื่อมโยงกับอุปกรณ์ตัวอื่นใด

- ทุกโทโพโลยีเครือข่ายต้องรองรับคุณสมบัติการส่องสว่างตลอดเวลา (Visibility)
- เพื่อคงค่าการส่องสว่างอย่างต่อเนื่องและไม่กะพริบ แม้จะไม่มีการสื่อสารใดๆ
- อุปกรณ์ในเครือข่ายจะถูกกำหนดแอดเดรสเฉพาะตัวที่มีความยาว 64 บิต
- หลังจากที่อุปกรณ์ถูกเชื่อมโยงเข้ากับเครือข่ายที่มีคอร์ดิเนเตอร์ควบคุมแล้ว จะสามารถกำหนดแอดเดรสสั้นที่มีความยาวเพียง 16 บิตได้

เครือข่ายการสื่อสารด้วยแสงสามารถถูกแบ่งตามลักษณะการใช้งาน

โครงข่ายพื้นฐาน (Infrastructure)

- ทุกอันมีกันอยู่ในแหล่งเดียวกัน
  มีสถานะการสื่อสารกันในประเทศเดียว
- มีเครื่องแม่ข่ายอยู่ประจำ
- มีบัญชีกำกับและควบคุมหรือลูกข่าย
- หลุดการติดต่อสื่อสารกันที่ค่าความสว่างไม่ถึงกลายมาเป็นการสื่อสารได้ในระยะไกลและระยะใกล้
- ความเร็วในการสื่อสารสามารถรองรับได้ทั้งการสื่อสารความเร็วต่ำและการสื่อสารความเร็วสูง

เครือข่ายที่ได้ (Mobile)

- อุปกรณ์จะไม่ถูกติดตั้งอยู่ที่เดิม
- มีข้อจำกัดด้านพลังงานและขนาดของอุปกรณ์
- ลดลงที่ความสว่างที่ค่าความเข้มต่ำกว่า
- สัญญาณประเภทการสื่อสารที่ไม่ไกล
- ความเร็วในการส่งสารที่มีความเร็วต่ำ

ยานพาหนะ (Vehicle)

- มีข้อจำกัดบริเวณระหว่างสถานีติดตั้งแหล่งและอุปกรณ์ระหว่างที่ที่ได้ เช่นตึกหรือสิ่งกีดขวาง
- ใช้ในการสื่อสารระยะไกลที่ความเร็วในการสื่อสารไม่สูงมาก

โครงข่ายพื้นฐาน (Infrastructure)

- ถูกติดตั้งในตำแหน่งที่แน่นอน ไม่สามารถเคลื่อนที่ย้ายไปตำแหน่งอื่น
- มีพลังงานใช้อย่างไม่จำกัด
- ไม่ถูกจำกัดด้านขนาดหรือรูปทรง
- แหล่งกำเนิดแสงสามารถให้ค่าความสว่างได้มาก สามารถนำไปใช้ในการสื่อสารได้ทั้งระยะใกล้และระยะไกล
- ความเร็วในการสื่อสารสามารถรองรับได้ทั้งการสื่อสารความเร็วต่ำและการสื่อสารความเร็วสูง

เคลื่อนที่ได้ (Mobile)

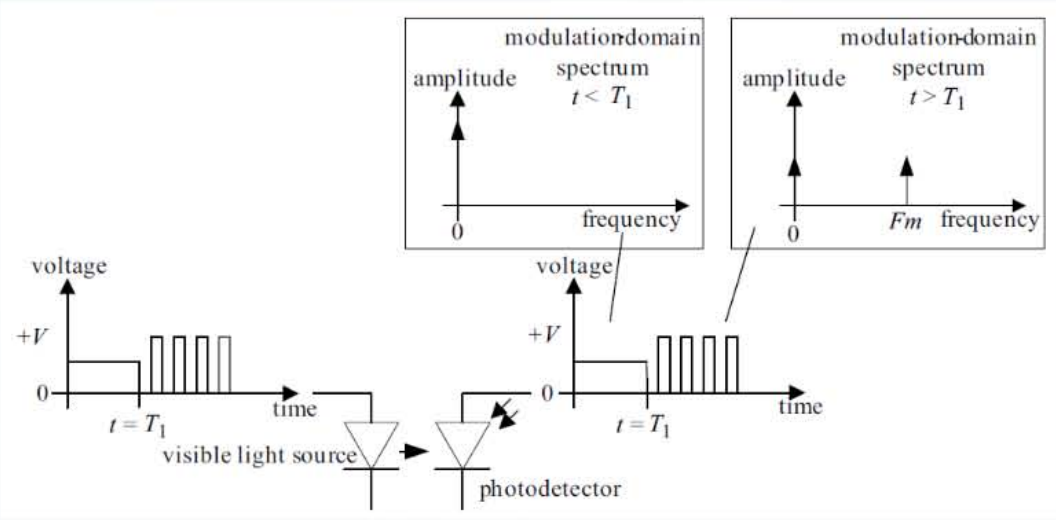
- อุปกรณ์จะไม่ถูกติดตั้งอยู่กับที่
- มีข้อจำกัดด้านพลังงานและขนาดของอุปกรณ์
- แหล่งกำเนิดแสงให้ความสว่างได้จำกัด
- ส่งผลต่อระยะทางการสื่อสารที่ไม่ไกล
- ความเร็วในการสื่อสารที่มีความเร็วต่ำ

ยานพาหนะ (Vehicle)

- มีข้อจำกัดอยู่ระหว่างกลางคือตำแหน่งของอุปกรณ์จะเคลื่อนที่ได้ แต่พลังงานยังคงจำกัดอยู่
- ใช้ในการสื่อสารระยะไกลที่ความเร็วในการสื่อสารไม่สูงนัก

MODULATION–DOMAIN SPECTRUM

สเปกตรัมในสภาวะการกล้ำสัญญาณ



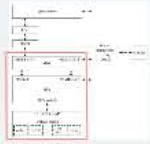
- สามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างสภาวะปกติที่ไม่มีการกล้ำสัญญาณและสภาวะที่มีการกล้ำสัญญาณได้
- ทำให้ทราบถึงช่วงเวลาที่ช่องทางการสื่อสารไม่ถูกใช้งานได้ (Clear Channel Assessment : CCA)

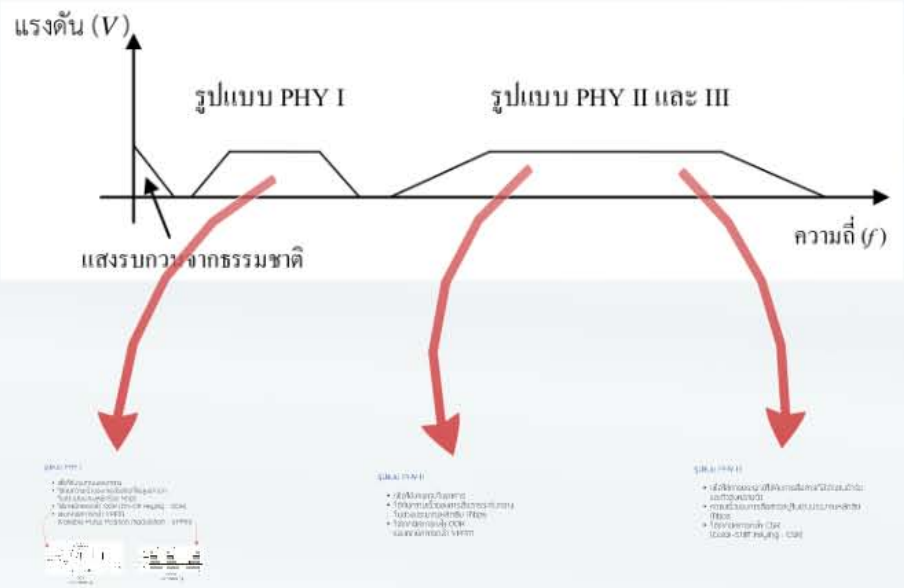
ARCHITECTURE

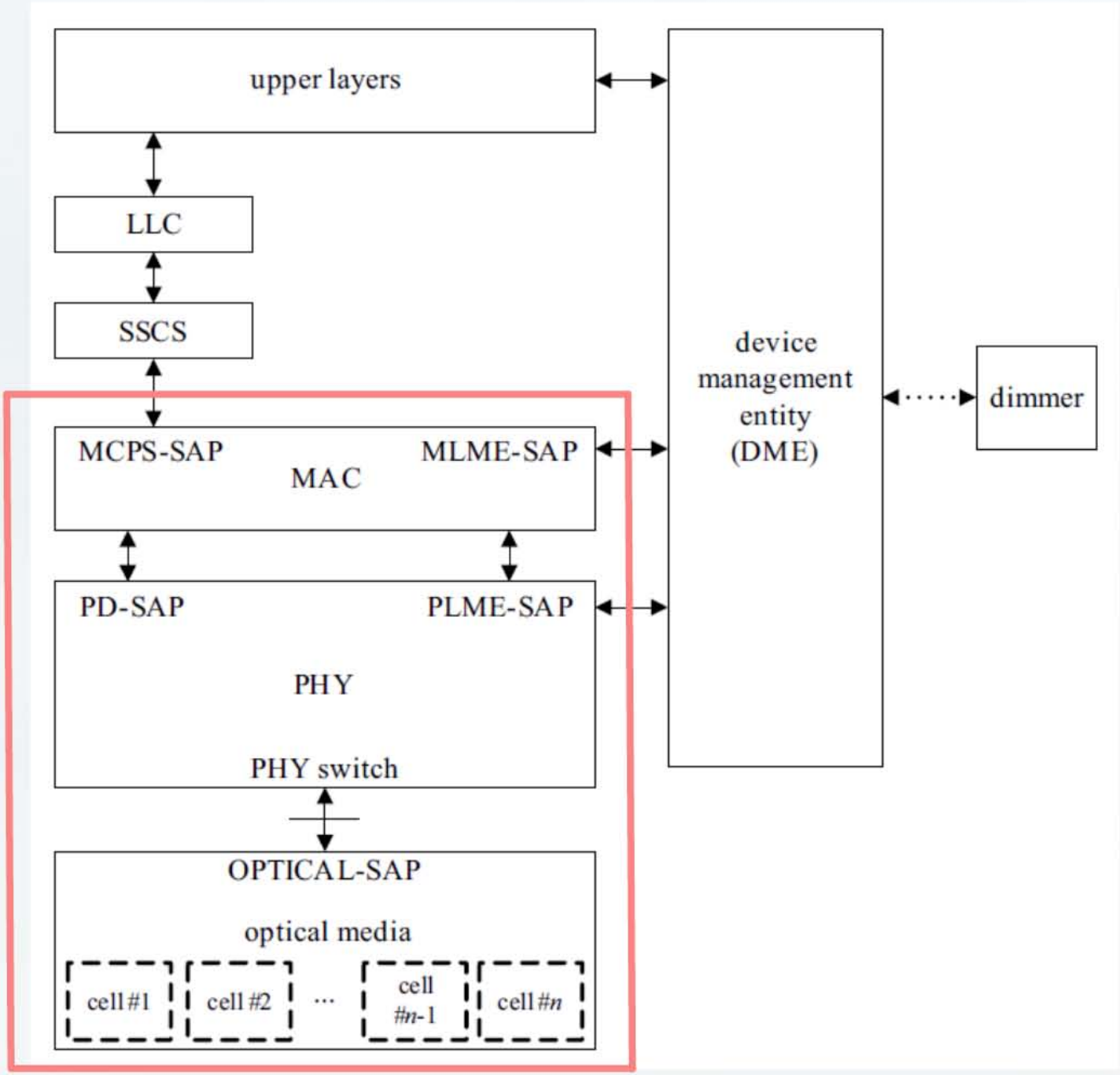
สถาปัตยกรรมของมาตรฐาน

ประกอบด้วย

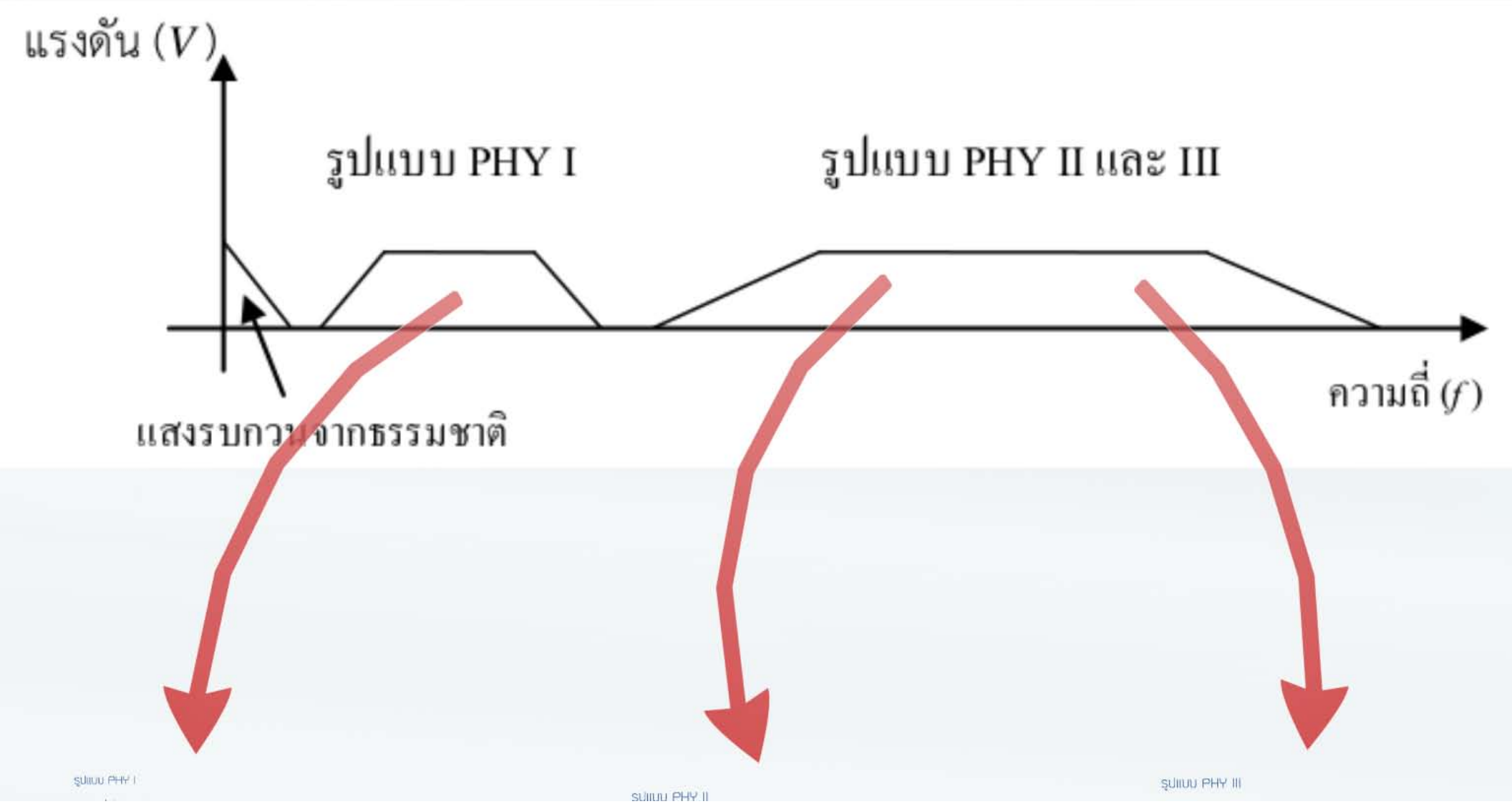
- ชั้นฟิสิกคอล (Physical Layer : PHY) กำหนดมาตรฐานในส่วนประกอบของอุปกรณ์รับ-ส่งแสง และกลไกการควบคุมทางวงจรต่างๆ
- ชั้นแมก (Medium Access Control Layer : MAC)





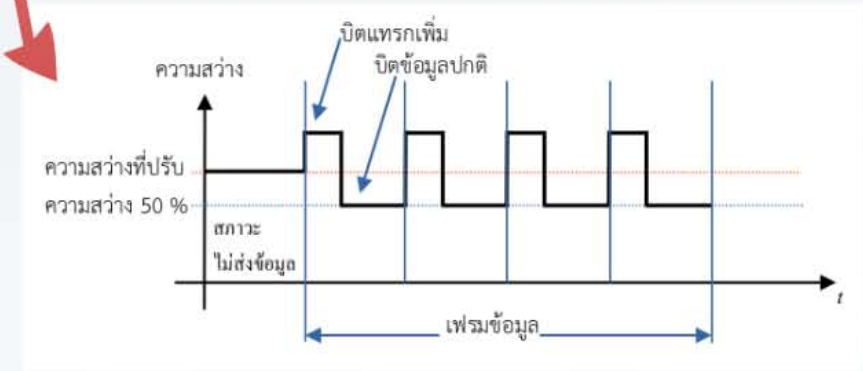

upper layers
LLC
SSCS
MCPS-SAP
MAC
MLME-SAP
PD-SAP
PLME-SAP
PHY
PHY switch
OPTICAL-SAP
optical media
cell #1
cell #2
...
cell #n-1
cell #n
device management entity (DME)
dimmer

กำหนดมาตรฐานในส่วนประกอบของอุปกรณ์รับ-
ส่งแสง และกลไกการควบคุมทางวงจรต่างๆ
ชั้นแมก (Medium Access Control Layer : MAC)

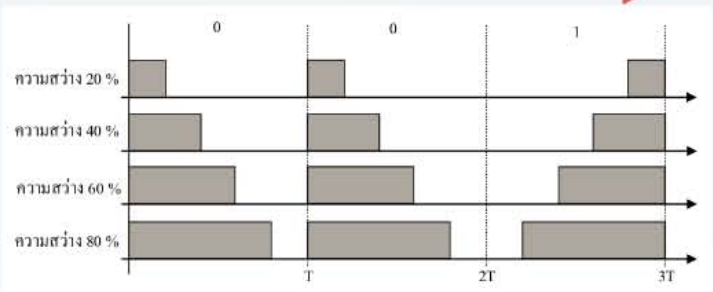


รูปแบบ PHY I

- เพื่อใช้งานภายนอกอาคาร
- ใช้กับความเร็วของการสื่อสารที่ไม่สูงมากนัก ในช่วงประมาณหลักร้อย kbps
- ใช้เทคนิคการกล้ำ OOK (On-Off Keying : OOK)
- และเทคนิคการกล้ำ VPPM (Variable Pulse Position Modulation : VPPM)



OOK
(with dimming)



VPPM
(with dimming)

รูปแบบ PHY II

- เพื่อใช้งานภายในอาคาร
- ใช้กับความเร็วของการสื่อสารระดับกลาง ในช่วงประมาณหลักสิบ Mbps
- ใช้เทคนิคการกล้ำ OOK และเทคนิคการกล้ำ VPPM

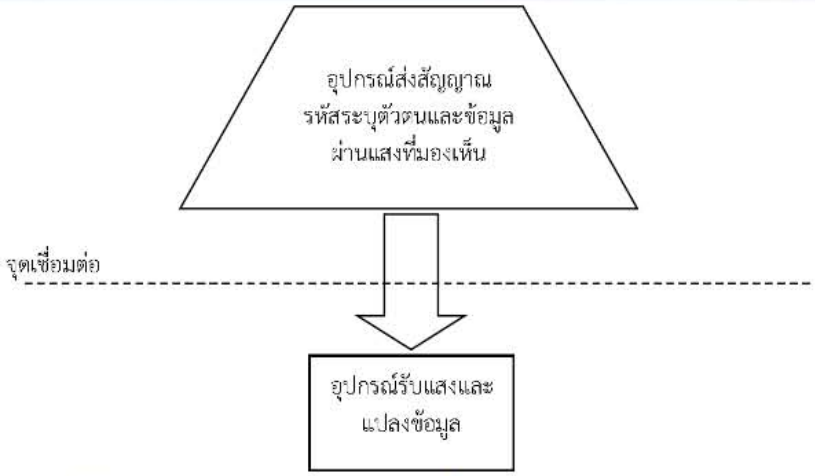
รูปแบบ PHY III

- เพื่อใช้การประยุกต์ใช้กับการสื่อสารที่มีจำนวนตัวรับและตัวส่งหลายตัว
- ความเร็วของการสื่อสารอยู่ในช่วงประมาณหลักสิบ Mbps
- ใช้เทคนิคการกล้ำ CSK (Color-Shift Keying : CSK)

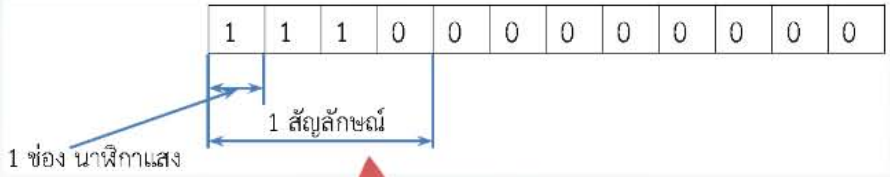
CP1223

มาตรฐานการสื่อสารทางแสงแบบไร้สาย CP1223
(Visible Light Beacon System for Multimedia Applications)

ที่ว่าด้วยมาตรฐานการส่งรหัสระบุตัวตนหรือข้อมูลสำหรับอุปกรณ์ด้านมัลติมีเดียด้วยแสงที่มองเห็นซึ่งมาตรฐานระบบนี้มีรูปแบบการสื่อสารทิศทางเดียวผ่านตัวกลางแสงที่มองเห็น



โมเดลมาตรฐานการสื่อสารแสง CP1223



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

เฟรมข้อมูลตามมาตรฐาน CP1223

มเดลมาตรฐานการสื่อสารแสง CP1223

ระนาบรหัสระบุตัวตน	ระนาบข้อมูล
ชั้นที่3 : รหัสระบุตัวตน	ชั้นที่3 : ข้อมูล
ชั้นที่2 : ชั้นเฟรม	
ชั้นที่1 : ชั้นฟิสิกคอล	

โมเดลการสื่อสารข้อมูล

การกำหนดโปรโต

มีการกำหนดสอง

การกำหนดโปรโตคอลตามมาตรฐาน CP1223
มีการกำหนดสองชั้นคือชั้นฟิสิกคอลและชั้นเฟรม

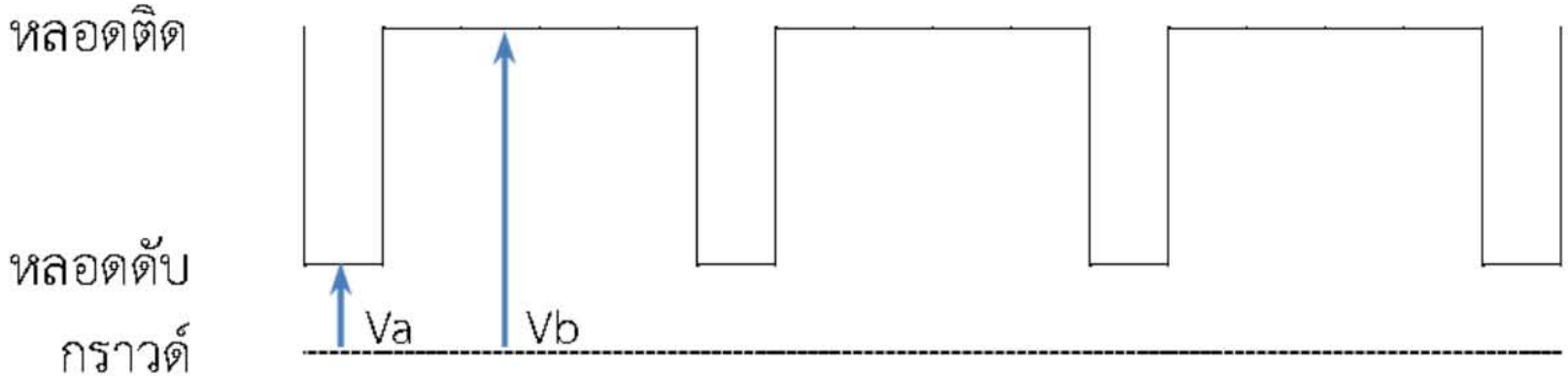
ชั้นฟิสิกคอลมีการกำหนดความยาวคลื่นแสงที่ใช้
ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 380 nm – 780 nm
ความเร็วในการสื่อสาร 4.8 kbps
ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5 เปอร์เซนต์

เฟรมข้อมูลตามมาตรฐาน CP1223

ใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบอินเวิร์ต 4 ตำแหน่งพัลส์

(Inverted 4 Pulse Position Modulation, I-4PPM)

ข้อมูล	0		0		0		1		1		0		1		1	
สัญญาณอินเวิร์ต 4 ตำแหน่งพัลส์	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1



ฐาน CP1223
อลและชั้นเฟรม

าวคลื่นแสงที่ใช้

สรุปและข้อเสนอแนะ

การผลักดันให้มีเทคโนโลยีใหม่ๆเพื่อใช้งาน
เป็นแนวทางที่สำคัญแนวทางหนึ่งที่จะเพิ่ม
ศักยภาพการแข่งขันของประเทศไทย

การสื่อสารทางแสงยังมีความเหมาะสมสำหรับนำ
ไปใช้งานในสถานการณ์ฉุกเฉินที่เกิดภัยพิบัติ

สามารถพัฒนาให้เป็นเทคโนโลยีสิ่ง
อำนวยความสะดวกสำหรับคนพิการ

ลดข้อกังวลในด้านสุขภาพของประชาชน
จากภาวะมลภาวะทางคลื่นความถี่

Thank you
for
your attention

https://www.facebook.com/VisibleLightThailand