



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
ปริญญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบและการพัฒนาระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายด้วยโพรโทคอลการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแบบประหยัดพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

Design and Development of a Wireless Sensor Network with Energy Efficient MAC
Protocol

นามผู้วิจัย นายสัจจา อธิกิจ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ฉัตรฐิติ ขวัญแก้ว, วศ.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรระ จงบุรี, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงษ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและการพัฒนาระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายด้วยโพรโทคอลการควบคุมการเข้าถึง
ตัวกลางแบบประหยัดพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

Design and Development of a Wireless Sensor Network with Energy Efficient MAC Protocol

โดย

นายสัจจา อธิกิจ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
พ.ศ. 2552

สัจจา อธิกิจ 2552: การออกแบบและการพัฒนาระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายด้วยโปรโตคอลการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแบบประหยัดพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ปรินญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ณัฐวุฒิ ขวัญแก้ว, วศ.ม. 138 หน้า

การประยุกต์การทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายเข้ากับระบบตรวจวัดสภาพแวดล้อม ภายในอาคาร เป็นตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งานของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายซึ่งถูก ศึกษาและพัฒนาด้วยนักวิจัยอย่างต่อเนื่องตลอดในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา โดยมีมุมมองการ ออกแบบและพัฒนาในส่วนต่างๆ ตั้งแต่ ฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์ต้นแบบ ภาษาที่ใช้เขียนและพัฒนา อุปกรณ์ต้นแบบ รวมไปถึง ซอฟต์แวร์การทำงานภายในซึ่งแบ่งเป็นองค์ประกอบต่างๆ ที่สามารถ วิจัยและพัฒนาได้เป็นลำดับ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบและพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์รับรู้ไร้สายและโปรโตคอลการหา เส้นทาง เป็นหลัก โดยออกแบบโครงสร้างเครือข่ายแบบร่างแหสำหรับการตรวจวัดตลอด 24 ชั่วโมงเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ปี และหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการส่งข้อมูลภายในเครือข่ายไป ยังเกตเวย์ ที่ทำหน้าที่ บริหารจัดการระบบเครือข่ายผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตรวมถึงการ ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมไร้สายที่อยู่ภายในเครือข่ายรับรู้ ไร้สาย อย่างไรก็ตาม การทำงานเป็นเครือข่ายเป็นส่วนของการใช้พลังงานที่มากที่สุดดังนั้นการ ประหยัดพลังงานขึ้นอยู่กับ การออกแบบหรือเลือกใช้ ของ โครงสร้างระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ ไร้สาย

Sajja Atikij 2009: Design and Development of a Wireless Sensor Network with Energy Efficient MAC Protocol. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Natavut Kwankeow, M.Eng. 138 pages.

Concept efficient design and implementation of wireless sensor network has become a hot area research in recent years, due to the vast potential of sensor networks enable application that connect the physical world to the virtual world. By environmental monitoring system have develop in hardware and software by advance technology allow cost of manufacturing sensor nodes continue to drop and increase feature of device.

The environmental monitoring system can automatically work in field without the need of an operator. After each measurement, the sensor node transmit all data to gateway through short-range network at least 1 year in 24 hour per day by design and implement wireless routing protocol with low power consumption. Users can retrieve outputs, by using a web browser with an almost real-time response. The system also stores measurement data in non-volatile memories to avoid the lost of data in case of unavailable network connection.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

/ /

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จเรียบร้อยได้ ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ญัฐวุฒิ ขวัญแก้ว
ประธานกรรมการที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์วชิระ จงบุรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธีรสิทธิ์ เกษตร
เกษม กรรมการร่วม ได้ให้คำปรึกษา คำชี้แนะ ความช่วยเหลือ และสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำ
วิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ข้าพเจ้าขอกราบขอพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่สนับสนุนให้กำลังใจในการเรียนและการทำ
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ขอกราบขอบคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาในการเรียน
การค้นคว้าวิจัยตลอดมาแก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณ พี่พัต พี่หม่าน พี่มุก พี่หวิว พี่โจ้ คุณเอ น้องดัม
น้องเรีค น้องโย ที่ช่วยแนะนำและแก้ไขปัญหาเสมอมา ตลอดจนเพื่อนพี่น้องที่ไม่ได้เอ่ยนาม หาก
วิทยานิพนธ์นี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับข้อเสนอแนะและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

สัจจา อธิกิจ

มีนาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	94
อุปกรณ์	94
วิธีการ	95
ผลและวิจารณ์	114
ผล	114
วิจารณ์	134
สรุปและข้อเสนอแนะ	135
สรุป	135
ข้อเสนอแนะ	136
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	137
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	138

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	Application ของ short range radio	5
2	โครงสร้างเครือข่าย Zigbee (Zigbee Network model)	47
3	เปรียบเทียบ Bluetooth กับ WLAN	50
4	เปรียบเทียบมาตรฐาน Zigbee กับ Bluetooth	51
5	เปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ชนิด Mica2, Mica2Dot, Tmote Sky, Imote	57
6	เปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์ภาคการสื่อสารไร้สายของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	59
7	เปรียบเทียบการกินพลังงานและอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า	60
7	(ต่อ)	61
8	ลักษณะของข้อมูลที่ส่งไปยังเกตเวย์	108
9	ลักษณะของข้อมูลของ MAC_CONTROL ภายใน package ของการส่ง	110
10	รูปแบบของข้อมูลของเกตเวย์ไปยังอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต	112

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของการสื่อสารแบบไร้สาย	6
2	สเปกตรัมของสัญญาณในทางความถี่	10
3	สัญญาณ AM	11
4	Spectrum ของสัญญาณ AM	11
5	Modulator แบบผลคูณ	12
6	วงจร Envelope	13
7	หลักการทำงานของ Coherent detector	14
8	สัญญาณ FM	14
9	วงจรวาเรคเตอร์	16
10	ส่วนประกอบวงจรที่ใช้สร้างสัญญาณ FM แบบทางอ้อม	16
11	Block diagram ของ Quadrature detection	17
12	ส่วนประกอบของวงจร Phase lock loop	18
13	สัญญาณ BPSK	20
14	การสร้างสัญญาณ PSK	20
15	การ Detect สัญญาณ PSK	21
16	สัญญาณ QPSK	22
17	การสร้างสัญญาณ QPSK	23
18	วงจรการ Detect สัญญาณ QPSK	24
19	สัญญาณ ASK	25
20	สัญญาณ FSK	26
21	การสร้างสัญญาณ FSK	26
22	การ Detect สัญญาณ FSK	26
23	Concept ของ DSSS	28
24	สัญญาณ DSSS	29
25	การสร้างสัญญาณ DSSS	30
26	การ Detect สัญญาณ DSSS	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
27 Dispreading	31
28 Concept การทำ FHSS	32
29 การเปลี่ยนความถี่ของ FHSS	33
30 การสร้างสัญญาณ FHSS	33
31 การ Detect สัญญาณ FHSS	34
32 Bluetooth Protocol Stack	36
33 Host controller interface	40
34 a). point to point piconet b).point to multipoint piconet c). scatter with three Piconet	41
35 Packet ของ Bluetooth	42
36 State ของ Bluetooth	43
37 Bluetooth headphone	44
38 โพรโทคอล Zigbee	46
39 โทโพโลยีของ Zigbee	47
40 โครงสร้างเครือข่าย Zigbee	49
41 (Crossbow Technology, Inc, 2003)อุปกรณ์รับรู้ไร้สาย (The MICA2 Mote)	53
42 ลักษณะของเครือข่าย Ad Hoc	54
43 ระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	54
44 ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์พื้นฐาน	55
45 แสดงลักษณะของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	58
46 แสดงสมบัติของอุปกรณ์การสื่อสารของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	60
47 ส่วนประกอบอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	62
48 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบต่างๆ	62
49 การเชื่อมต่ออุปกรณ์รับรู้ไร้สายภายในเครือข่ายแบบดวงดาว	63
50 การเชื่อมต่ออุปกรณ์รับรู้ไร้สายภายในเครือข่ายแบบร่างแห	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
51	ลักษณะของระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สายขนาดใหญ่
52	รูปแบบต่างๆของการส่งข้อมูลจาก Sensor ตัวหนึ่งไปยังตัวอื่นๆ
53	รูปแบบต่างๆของการส่งข้อมูลระหว่าง Sensor กับระบบ
54	รูปแบบต่างๆของการส่งข้อมูลจาก Source ไปยัง destination
55	การส่งข้อมูลที่ละ hop
56	แสดงการสลับเปิดปิดการทำงานของภาคสื่อสารของอุปกรณ์ไร้สาย ของ S-MAC
57	แสดงการส่งข้อมูลไปยังปลายทางของ S-MAC
58	แสดงการลดการเปิดช่องสัญญาณ เมื่อไม่มีข้อมูลรับส่งเมื่อถึงเวลากำหนด T วินาที
59	แสดงการเปิดช่องสัญญาณเพื่อรับสัญญาณในจังหวะและทางเดียวของ D-MAC
60	เปรียบเทียบการกินพลังงานในส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย
61	ขั้นตอนการส่งข้อมูลด้วยวิธีการค้นหาเส้นทาง Directed Diffusion
62	ขั้นตอนการทำงานของโปรโตคอล SPIN
63	การรวมเหตุการณ์ 2 เหตุการณ์เข้ารวมด้วยภายในข้อมูลในการส่ง
64	การลดจำนวน hops ลงจากการทำงานของโปรโตคอล
65	การวางโครงข่ายที่ใช้ Adaptive Protocols
66	เส้นทางการส่งข้อมูลด้วยวิธี GEAR
67	การเชื่อมต่อของระบบเซนเซอร์ และจำนวนข้อมูลที่สามารถส่งได้ระหว่างเซนเซอร์
68	การหาจำนวนก้าวกระโดดของระบบเซนเซอร์
69	การเลือกตั้งของเซนเซอร์เพื่อหาเซนเซอร์ที่จะทำหน้าที่รับข้อมูล (ก) เซนเซอร์ประกาศข้อความการเลือกตั้ง (ข) เซนเซอร์ตอบกลับข้อความการเลือกตั้ง (ค) เซนเซอร์ส่งข้อมูลให้กับเซนเซอร์ที่ได้รับการเลือกตั้ง
70	การส่งข้อมูลแบบ LEACH
71	ระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
72 แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	97
73 แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์ควบคุมไร้สาย	98
74 แสดงระยะเวลาในการส่งสัญญาณชีพจรของเกตเวย์	101
75 สี่บิตบนของไบต์ที่สองของข้อมูลสัญญาณชีพจร	102
76 สี่บิตล่างของไบต์ที่สองของข้อมูลสัญญาณชีพจร	103
77 สถานะของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	104
78 แผนภูมิสายงานการทำงานแรกเริ่มของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	105
79 ลักษณะของการปรับอ็อปเซตของนาฬิกาภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	106
80 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างเกตเวย์และอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	107
81 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างเกตเวย์และอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย 2 อุปกรณ์	107
82 แสดงองค์ประกอบเกตเวย์	111
83 อุปกรณ์รับรู้ไร้สายสำหรับเสา	114
84 โครงสร้างวงจรส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์	115
85 ลักษณะของไตรแอกซ์วงจรไฟฟ้าขนาดแรงดันสูง	115
86 อุปกรณ์รับรู้ไร้สายสำหรับควบคุม	116
87 การติดตั้งแผงวงจรภายในฝาครอบเสาไฟฟ้า	116
88 แสดงการทำงานค้นหาสัญญาณชีพจร	117
89 แสดงการทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	117
90 การปรับอ็อปเซตของนาฬิกาภายในของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายขณะเวลาทำงาน	118
91 ภาพการปรับเวลา RX เพื่อประหยัดพลังงาน	119
92 การส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์	120
93 เวลาการตอบสนองในการส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ 3.3 มิลลิวินาที	120
94 ส่วนประกอบของเกตเวย์	121
95 เกตเวย์	121

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
96 โมดูลเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ต	122
97 การเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าแรกของการใช้งาน	123
98 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าควบคุม เลือก NODE ID = 18	123
99 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าเฝ้าดูของ NODE ID = 18	124
100 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าควบคุม เลือก NODE ID = 23	124
101 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าเฝ้าดูของ NODE ID = 23	125
102 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าแรก เลือกหน้าควบคุม	125
103 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าควบคุม เลือก NODE ID = 18	126
104 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าควบคุม ของ NODE ID = 18	126
105 หน้าเว็บสำหรับการเฝ้าดูข้อมูลตรวจวัดจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	127
106 หน้าเว็บสำหรับการควบคุมช่องเชื่อมต่อทั้ง 8 ของอุปกรณ์ควบคุมไร้สาย	128
107 การเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาการทำงานกับระยะเวลาการกินพลังงาน	129
108 การกินพลังงาน Timing ของช่วงการทำงาน TX Sync	130
109 ขยายของการใช้พลังงานในช่วงการรับข้อมูลในช่วง RX Sync	130
110 การกินพลังงาน Timing ของช่วงการทำงาน RX Sync	131
111 การกินพลังงาน Timing ของช่วงการทำงาน Active (ไม่มีข้อมูลส่ง)	131
112 การกินพลังงาน Timing ของช่วงการทำงาน Active (ทำการข้อมูลส่ง)	132
113 การกินพลังงานของช่วงการทำงาน Active (ทำการข้อมูลส่ง)	132
114 การทำงานแบบรายคาบของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย	133

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ACL	=	Asynchronous connectionless
AEA	=	Adaptive Election Algorithm
AM	=	Amplitude Modulation
ASB	=	Active Slave Broadcast
ASK	=	Amplitude Shift Keying
BPSK	=	Binary Phase Shift Keying
CLH	=	Cluster head
CID	=	Cluster ID
CMAX	=	Capacity Maximization
DSSS	=	Direct Sequence Spread Spectrum
eSCO	=	Extended Synchronous Connection-Oriented
FFD	=	Full Function Device
FHSS	=	Frequency Hopping Spread spectrum
FM	=	frequency modulation
FSK	=	Frequency Shift Keying
GEAR	=	Geographical and Energy Aware Routing
GFSK	=	Gaussian Frequency Shift Keying
HCI	=	Host Controller Interface
IrDA	=	Infrared Direct Access
ISM	=	Industrial Sciences Medicine
L2CAP	=	Logical Link Control and Adaptation Protocol
LAN	=	Local Area Network
LEACH	=	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LMP	=	Link Manager Protocol
MAC	=	Media Access Control
MRPC	=	Maximum Residual Packet Capacity
NP	=	Neighbor Protocol
OML	=	Online Maximum Lifetime

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

PAN	=	Personal Area Network
PCM	=	Pulse Code Modulation
PHY	=	Physical
PN	=	Pseudo Noise
PSB	=	Parked Slave Broadcast
PSK	=	phase shift keying
PSTN	=	Public Switched Telephone Network
QoS	=	Quality of Service
QPSK	=	Quadrature Phase Shift Keying
RF	=	Radio Frequency
RFCOMM	=	Radio Frequency – oriented emulation of the serial COM ports on a PC
RFD	=	Reduced Function Device
RFID	=	Radio Frequency Identification
S-MAC	=	Sensor-MAC
SEP	=	Scheduler Exchange Protocol
SCO	=	synchronous Oriented
SDP	=	Service Discover Protocol
SNR	=	Signal to Noise Ratio
STEM	=	Sparse Topology and Energy Management
T-MAC	=	Timeout-MAC
TRAMA	=	Traffic-Adaptive Medium Access
UHF	=	Ultrahigh Frequency
VHF	=	Very High Frequency
VCO	=	Voltage Controlled Oscillator
WLAN	=	Wireless Local Area Network
WPAN	=	Wireless Personal Area Network

การออกแบบและการพัฒนาระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายด้วยโพรโทคอลการควบคุม การเข้าถึงตัวกลางแบบประหยัดพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

Design and Development of a Wireless Sensor Network with Energy Efficient MAC Protocol

คำนำ

ระบบเครือข่ายแบบไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของคนเรามากขึ้น เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายได้มีการพัฒนาขึ้นในหลายรูปแบบด้วยกัน เครือข่ายตรวจจับไร้สายก็เป็นตัวอย่างหนึ่ง ซึ่งใช้คลื่นวิทยุระยะสั้น (Short-Range Radio Frequency) ทำให้อุปกรณ์ของเครือข่ายต้องการกำลังไฟฟ้าเล็กน้อย สามารถใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็กเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า แม้ว่าระยะการเชื่อมต่อไร้สายลักษณะนี้จะมีระยะสั้น แต่ด้วยการเชื่อมต่อเป็นเครือข่าย ทำให้สามารถให้บริการในพื้นที่ซึ่งมีบริเวณกว้างได้ โดยอุปกรณ์รับรู้ไร้สายในเครือข่ายนอกจากจะสามารถตรวจจับแล้วยังสามารถที่จะส่งผ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ตัวอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียงได้ หากต้องการขยายพื้นที่ในการให้บริการให้กว้างขึ้น ก็ทำได้โดยการเพิ่มอุปกรณ์ตรวจจับเข้าไปในระบบ ซึ่งจะทำให้ระยะทางของการเชื่อมต่อแบบไร้สายเพิ่มขึ้น โครงสร้างของเครือข่ายตรวจจับไร้สายถูกออกแบบให้การเพิ่มหรือลดจำนวนอุปกรณ์ และการเพิ่มชนิดของการตรวจจับเข้าไปในระบบ กระทำได้โดยง่าย ปัจจุบันนี้มีการประยุกต์ใช้ระบบเครือข่ายตรวจจับอย่างแบบไร้สายอย่างกว้างขวาง

โดยในปัจจุบันระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่มีพลังงานจำกัดนั้นมักใช้การเชื่อมต่อเน็ตเวิร์กแบบดวงดาว (Star topology) ร่วมกับแบบชั้น (Hierarchy) ซึ่งมีข้อเสียที่สำคัญคือ อุปกรณ์รับรู้ชั้นกลางที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ชั้นบนและอุปกรณ์ชั้นล่าง เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นจะทำให้ระบบตั้งแต่ชั้นล่างลงไปไม่สามารถทำงานได้ร่วมกับอุปกรณ์ชั้นบน ซึ่งเป็นปัญหาหลักของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่มีพลังงานจำกัด ทั้งนี้การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะมีประโยชน์เป็นอย่างมาก หากนำไปเชื่อมต่อกับเครือข่ายระยะไกลเช่น เครือข่ายอินเทอร์เน็ต ดังนั้นอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจึงได้ออกแบบให้มีส่วนเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตโดยผ่านเกตเวย์ ซึ่งจะเชื่อมต่อเครือข่ายรับรู้ไร้สายที่มีความถี่ 2.4GHz เข้ากับเครือข่ายแลนไร้สาย (Wireless LAN) และทำการแสดงในรูปแบบของ Web Page ซึ่งจะแสดงให้เห็นค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ ในเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงออกแบบและพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

โปรโตคอลการหาเส้นทาง และซอฟต์แวร์จัดการภายใน เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในสถานะแวดล้อมการทำงานจริงกับระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สายต้นแบบ รวมไปถึงการคำนวณการใช้พลังงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายเพื่อการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการวัดเวลาการตอบสนองของการเพิ่มและลดตัวอุปกรณ์รับรู้ไร้สายในระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สาย

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นการต่อยอดของโครงการเรื่องอุปกรณ์ตรวจจับในระบบเครือข่ายตรวจจับแบบไร้สาย และแนวคิดที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น สามารถนำไปปฏิบัติเพื่อให้เซ็นเซอร์ที่ใช้เฉพาะด้านนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น ด้านการเกษตรกรรม สิ่งแวดล้อม และระบบเตือนภัย เป็นต้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างและสร้างต้นแบบระบบเครือข่ายอุปกรณ์ไร้สาย
2. เพื่อพัฒนาโปรโตคอลการหาเส้นทางบนระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย
3. เพื่อพัฒนาขั้นตอนการทำงานของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายเพื่อให้ประหยัด
4. วิเคราะห์การใช้พลังงานกับอุปกรณ์ต้นแบบและเวลาในการตอบสนองกับอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่เพิ่มและลดในระบบเครือข่ายไร้สาย

การตรวจเอกสาร

การสื่อสารแบบไร้สายระยะสั้น

การสื่อสารแบบไร้สาย คือการส่งสัญญาณไฟฟ้าแพร่กระจายไปในบรรยากาศแทนที่จะใช้สายทองแดงหรือสายตัวนำต่างๆ โดยเทคโนโลยีนี้ได้เริ่มต้นจากการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุไปในระยะทางใกล้ๆ ก่อนซึ่งได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันเช่น ระบบเปิด-ปิดประตูโดยใช้รีโมท ระบบสวิตช์ต่างๆ แต่ปัญหาที่พบในการใช้ เทคโนโลยี wireless นี้คือการเกิดสัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดสัญญาณอื่นๆ และเรื่องของการปรับความถี่ให้ตรงกันระหว่างภาครับและภาคส่ง ซึ่งทำให้ระบบ wireless ไม่สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและแน่นอน แม้ว่าจนกระทั่งในปัจจุบันนี้จะได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีทางการรับส่งข้อมูลให้ดีขึ้นเป็นอย่างมากแต่ก็ยังคงมีความเชื่อว่าการส่งข้อมูลแบบ wireless มีความน่าเชื่อถือน้อยกว่าการส่งข้อมูลแบบมีสายอยู่แต่ถึงอย่างไรก็ตามในปัจจุบันเทคโนโลยี wireless ได้เข้ามามีอิทธิพลกับชีวิตประจำวันของเรามากมาย เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ รถยนต์ และอื่นๆ อีกมากมาย แม้ว่าราคายังไม่ต่ำมากนัก และระบบจะยังมีความไม่แน่นอนแต่เนื่องจากความสะดวกสบายที่ระบบสื่อสารแบบมีสายไม่สามารถให้ได้ เทคโนโลยี wireless จึงเป็นที่ยอมรับได้อย่างรวดเร็ว

1. ลักษณะของการสื่อสารแบบไร้สายระยะสั้น

ลักษณะทั่วไปของ Short range มีดังนี้

- ใช้กำลังในการส่งไม่เกิน 100 milli-watt
- ส่งข้อมูลในระยะทางใกล้ไม่เกิน 200-300 เมตร
- ส่งสัญญาณในทุกทิศทางและมี สายอากาศรวมอยู่ภายในด้วย
- มีโครงสร้างง่าย ๆ และมีราคาต่ำ
- ใช้ความถี่ในช่วง UHF หรือความถี่ที่ไม่ต้องทำการขออนุญาต
- เครื่องรับและเครื่องส่งใช้พลังงานจาก battery
- Application ที่เป็น short range ส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติตามที่ทุกข้อแต่อาจจะมีบางส่วนที่ไม่ครบตามนี้

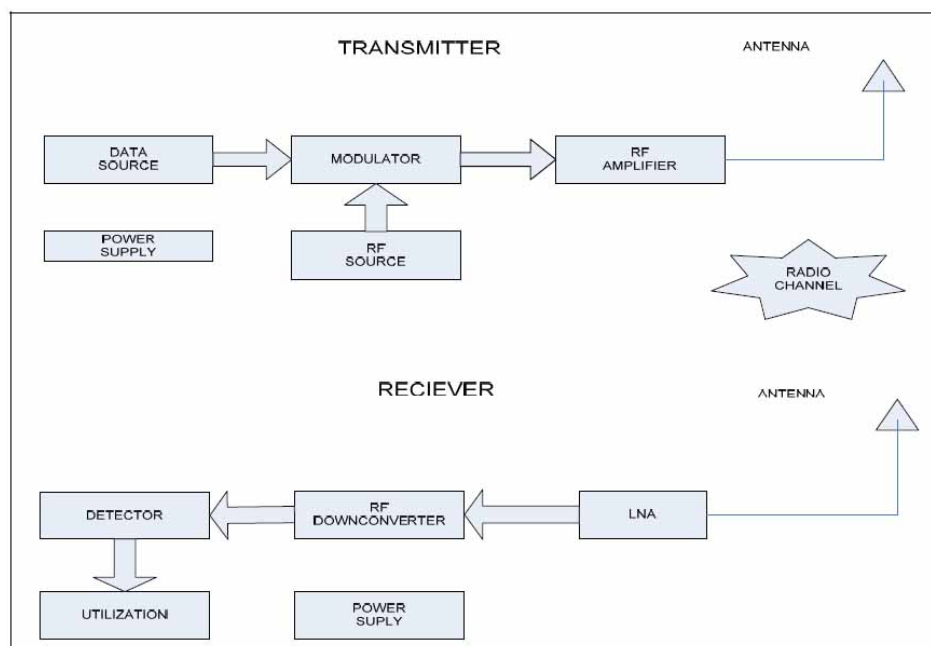
1.1 การประยุกต์ใช้งานผ่านการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแบบไร้สายระยะสั้น

ตารางที่ 1 จะแสดงการประยุกต์ใช้งานส่วนหนึ่ง ที่เป็นการประยุกต์ใช้งานการสื่อสารแบบไร้สายระยะสั้น ซึ่งมีลักษณะต่างๆตามที่ได้กล่าวถึงข้างบนนี้ ตารางที่ 1 จะแสดงการประยุกต์ใช้งานส่วนหนึ่ง ที่การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารแบบไร้สายระยะสั้นซึ่งมีลักษณะต่างๆตามที่ได้กล่าวถึงข้างบนนี้ สำหรับทิศทางของ การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารแบบไร้สายระยะสั้นในอนาคตจะอยู่ในรูปแบบของการสื่อสารด้วยความเร็วสูง เช่น Bluetooth , WI-FI หรือ WLAN

ตารางที่ 1 Application ของ short range radio

Application	ช่วงความถี่ที่ใช้ (MHz)	คุณสมบัติ
ระบบความปลอดภัย	300-500,800,900	ติดตั้งง่าย
Emergency medical alarm	300-500,800	มีความเชื่อถือได้ , ใช้งานได้ยาวนาน
อุปกรณ์พ่วงต่อคอมพิวเตอร์ เช่น mouse , keyboard	UHF	ส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงและส่งในระยะใกล้ๆ , ราคาต่ำ
RFID(Radio Frequency Identification)	100 KHz-2.4GHz	ส่งข้อมูลในระยะใกล้และส่งข้อมูลอัตโนมัติเมื่อได้รับข้อมูล
WLAN (Wireless Local Area Network)	900 MHz , 2.4 GHz	ส่งข้อมูลแบบต่อเนื่องด้วยความเร็วสูง modulate แบบ spread spectrum มีราคาสูง
Microphone และ Headphone แบบไร้สาย	VHF,UHF	Modulate แบบ analog โดยมีความถูกต้องในการส่งข้อมูลสูง,ราคาปานกลาง
Keyless Entry – Gate opener	UHF	มีขนาดเล็ก
Wireless bar code reader	900 MHz , 2.4 GHz	ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม , ใช้ spectrum กว้างมาก , ราคาสูง

2. ส่วนประกอบของระบบการสื่อสารแบบไร้สาย



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของการสื่อสารแบบไร้สาย

2.1 Data Source

Data source คือ ข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งไปจากภาคส่งไปยังภาครับซึ่งอาจจะมีทั้งข้อมูลจริงๆที่ต้องการจะสื่อสารและข้อมูลส่วนที่เพิ่มเติมลงไปเพื่อให้เกิดความถูกต้องในการสื่อสาร ซึ่งรวมกันอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า frame แต่ละ application จะมีรูปแบบ frame ที่แตกต่างกันออกไป อาจจะเป็นได้ทั้ง analog และ digital โดยรูปแบบที่ง่ายที่สุดของ frame อาจเป็นไปตามรูป 1 คือมี 3 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นส่วนของ ADDRESS ซึ่งคือข้อมูลของ address ปลายทางที่จะส่งไป ส่วนที่ 2 คือข้อมูลที่ต้องการจะสื่อสารไปให้ผู้รับจริงๆ และตามด้วยส่วนสุดท้ายเรียกว่า Parity มีไว้สำหรับคอยตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลที่ส่งมา

อุปกรณ์ประเภท Audio ต่างๆ อย่างเช่น wireless-microphone หรือ headset จะส่งข้อมูลที่เป็น analog ซึ่งต้องมีการผ่านเทคนิคพิเศษบางอย่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีที่สุดในการส่งเข้าไปในช่องสัญญาณแบบไร้สาย เช่น การนำไปผ่าน pre-emphasis filter เพื่อเพิ่มองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณก่อนที่จะส่งออกไป

2.2 Radio Frequency Generating

ในส่วนนี้สำหรับภาคส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ (RF source) เช่น Oscillator หรือ Synthesis และ Modulator ซึ่งมีหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่อยู่ความถี่ base band ให้ขึ้นไปอยู่ที่ความถี่วิทยุ และสุดท้าย amplifier จะมีหน้าที่ขยายสัญญาณให้แรงขึ้นก่อนจะส่งออกไปยังช่องสัญญาณต่างๆ

2.3 RF Conduction and Radiation

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของการกระจายสัญญาณซึ่งโดยทั่วไปแล้วในอุปกรณ์ที่เป็นแบบ Short range จะมีสายอากาศรวมอยู่ด้วยดังนั้น ระยะทางที่สามารถส่งได้จึงขึ้นแต่ในกรณีที่ใช้ความถี่สูงในการส่งระยะทางในการส่งจะสั้นลงดังนั้นจึงต้องออกแบบสายอากาศให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น เพื่อให้มีระยะการส่งข้อมูลที่ไกลเพียงพอให้เกิด ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่ดี ลักษณะของสายอากาศแบบอุปกรณ์ short range จะแตกต่างจากจากอุปกรณ์ทั่วไปคือ มีขนาดเล็กและแปรผันกับความยาวคลื่นที่ใช้ และส่งสัญญาณในทุกทิศทาง

2.4 Radio Channel

สำหรับการสื่อสารข้อมูลแบบ Wireless ตัวกลางในการสื่อสารคือ บรรยากาศ ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าจะถูกส่งไปทางช่องสัญญาณวิทยุซึ่งจะต้องมีช่วงความถี่ที่กว้างพอที่จะสามารถส่งสัญญาณไปได้อย่างถูกต้อง โดยช่วงความถี่ของช่องสัญญาณแบบ short range communication จะอยู่ในช่วงแคบๆและ เป็นช่วงความถี่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายจึงต้องมีการออกแบบการใช้ช่องสัญญาณที่ดีพอเพื่อให้การส่งข้อมูลเป็นไปได้อย่างถูกต้อง

2.5 Receiver

สำหรับในภาคการรับข้อมูลนั้นมีหน้าที่ในการแปลงข้อมูลที่ถูส่งมาในรูปแบบของสัญญาณวิทยุ ให้กลับมาเป็นข้อมูลในรูปแบบปกติซึ่งสามารถนำไปประมวลผลต่อได้ โดยที่กระบวนการต่างๆในภาครับจะคล้ายกับภาคส่งแต่ต่างกันที่จะทำงานตรงข้ามกันซึ่งกำลังที่ใช้ส่งข้อมูลแบบ Short-range นั้นถูกจำกัดโดยทางรัฐบาลจึงทำให้การส่งข้อมูลไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบสามารถทำได้โดยเพิ่ม sensitivity ของตัวรับและ

ลดการรบกวนจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ต้องการ ซึ่งการปรับปรุงพัฒนาระบบนี้จะอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของ ภายภาพ, ราคา, ขนาด และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ซึ่งปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งในการออกแบบระบบให้ใช้พลังงานต่ำก็คือเทคนิคการ modulate

2.6 Power Supply

เนื่องจากอุปกรณ์ที่เป็น short range wireless ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กดังนั้น battery ที่ใช้จึงต้องมีขนาดเล็กด้วยและเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยน battery บ่อยๆ จนน่ารำคาญ การใช้พลังงานต่ำจึงเป็นสิ่งจำเป็นมากในเทคโนโลยี wireless ซึ่งในทางภาครับจะทำได้ยากกว่าในภาคส่ง เนื่องจากทางภาคส่งสามารถจะตั้งค่าให้ใช้พลังงานต่ำได้เมื่อไม่ได้ทำอะไรจนกระทั่งเมื่อจะมีการส่งข้อมูลจึงค่อยใช้พลังงานที่มากขึ้นในการส่งข้อมูล แต่ทางภาครับจะต้องอยู่ในสภาวะการทำงานตลอดเวลาเนื่องจากต้องคอยตรวจสอบรับข้อมูลอยู่เสมอ จึงต้องใช้พลังงานสูงอยู่ตลอดเวลาซึ่งในการปรับปรุงระบบนี้จะต้องไม่ทำ sensitivity ในการรับข้อมูลต่ำลงจนทำให้การสื่อสารผิดพลาด

3. เทคนิคการ Modulation

3.1 Modulation

การมอดูเลตสัญญาณหมายถึง การนำสัญญาณไฟฟ้าผสมเข้าไปกับสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier wave) เพื่อฝากข้อมูลที่มีอยู่ในสัญญาณไฟฟ้าเข้าไปกับสัญญาณคลื่นพาห์ที่มีความถี่สูงกว่ามากๆ การมอดูเลตสัญญาณเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งถ้าต้องการส่งสัญญาณออกไปโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านทางบรรยากาศ ทั้งนี้เพราะเราไม่สามารถสร้างระบบสายอากาศให้ทำงานได้ดีที่ความถี่ต่ำๆ ได้ เช่น ในช่วงความถี่เสียงซึ่งมีสเปกตรัมอยู่ระหว่าง 300-3400 Hz จะไม่มีโอกาสที่จะสร้างสายอากาศให้ทำงานได้ดีตลอดช่วงความถี่นี้ได้ หรือในกรณีของสัญญาณภาพที่มีสเปกตรัมของสัญญาณตั้งแต่ 50Hz – 5 MHz ก็เช่นเดียวกัน

ประโยชน์ของการมอดูเลตนั้นมีหลายประการด้วยกัน ที่เด่นชัดมากๆ ก็คือ ทำให้เราส่งสัญญาณหลายๆสัญญาณพร้อมๆกันได้ โดยการมอดูเลตเข้าไปกับสัญญาณคลื่นพาห์ที่มีความถี่ต่าง ๆ กัน ซึ่งเราเรียกวิธีนี้ว่าการมัลติเพล็กซ์เชิงความถี่ (Frequency division multiplexing) การสื่อสารที่ใช้การมัลติเพล็กซ์เชิงความถี่ที่เห็นได้ชัดก็คือระบบวิทยุกระจายเสียง และวิทยุโทรทัศน์ที่เราใช้อยู่ในปัจจุบัน

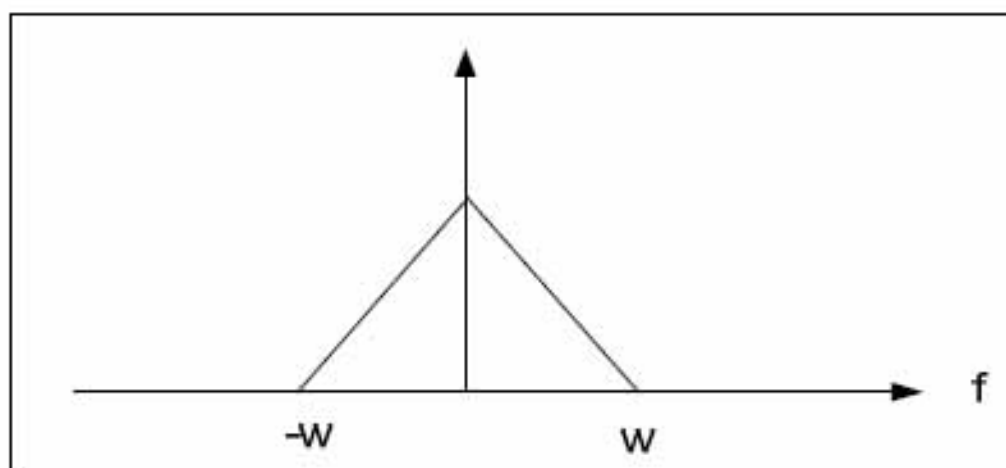
การส่งสัญญาณแบบที่ใช้การมอดูเลตนี้มักเรียกว่า ระบบส่งสัญญาณแบบแบนด์พาส (Bandpass transmission system) และระบบที่ใช้การมัลติเพลกซ์เชิงความถี่ด้วยนั้นมักจะเรียกว่าระบบส่งสัญญาณแบบ บรอดแบนด์ (broadband transmission system) สำหรับการส่งสัญญาณโดยส่งในรูปของสัญญาณเดมูนนั้นเราเรียกว่าระบบส่งสัญญาณแบบเบสแบนด์ (Baseband transmission system) ตัวอย่างของระบบส่งสัญญาณแบบเบสแบนด์ก็ได้แก่การส่งสัญญาณออดิโอ (audio signal) จากเครื่องขยายกำลังไปยังลำโพง และการส่งสัญญาณ PCM แบบเบสแบนด์

3.2 เทคนิคการ Modulate สัญญาณ Analog

ในปัจจุบันนี้การมอดูเลตสัญญาณอนาล็อกยังมิใช้กันอย่างกว้างขวางทั่วไป เช่น ระบบโทรทัศน์วิทยุ กระจายเสียง AM และระบบวิทยุกระจายเสียง FM เป็นต้น โดยในการพิจารณาคุณสมบัติของวิธีมอดูเลตแต่ละวิธีนั้นประเด็นที่มักใช้ในการพิจารณา ได้แก่แบนด์วิดท์ที่ต้องการ กำลังส่งที่ต้องการ SNR ของสัญญาณที่รับได้ ความยากง่ายของอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณโดยข้อนี้จะมีผลกระทบต่อต้นทุนของระบบมาก ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการมอดูเลตที่สำคัญ และใช้กันอย่างกว้างขวางคือ AM และ FM

3.3 การมอดูเลตแบบ AM (Amplitude modulation)

โดยทั่วไปสัญญาณอนาล็อกเบสแบนด์ที่ทำการส่งนั้นจะมีความถี่สูงสุดที่มีค่าจำกัด เช่นสัญญาณออดิโอที่หูคนเรารับฟังได้อาจจะสูงเพียง 15 KHz และถ้าเป็นสัญญาณเสียงที่คนเราพูดกันทั่วไปก็มักจะมีค่าไม่เกิน 4 KHz เป็นต้น ดังนั้นถ้าเราให้ความถี่สูงสุดของสัญญาณเบสแบนด์เป็น W Hz เมื่อเขียนสเปกตรัมของสัญญาณในทางความถี่จะได้ดังภาพที่ 1 กล่าวคือ



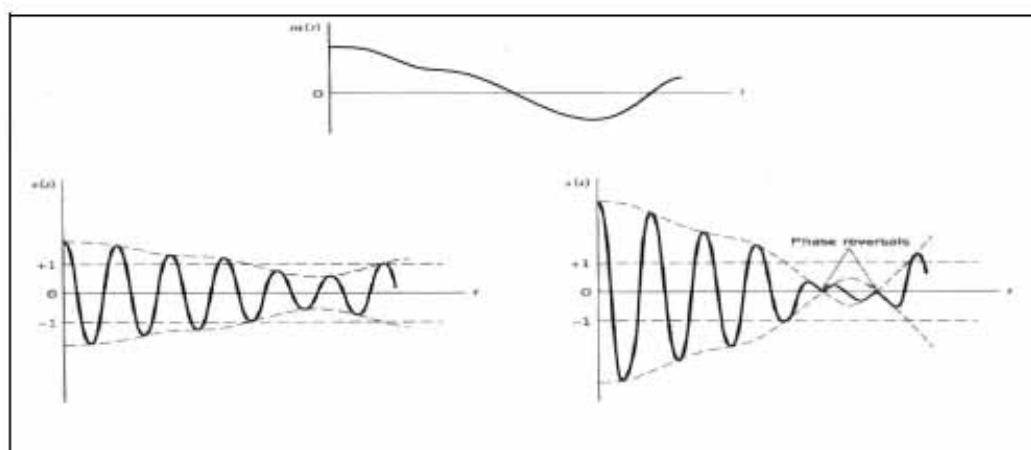
ภาพที่ 2 สเปกตรัมของสัญญาณในทางความถี่

การมอดูเลตแบบ AM โดยทั่วไปนั้นจะเป็นการสร้างสัญญาณที่มีลักษณะเหมือนกับภาพที่ 2 คือเหมือนกับนำสัญญาณเบสแบนด์ไปซ้อนบนสัญญาณคลื่นพาห์ทำให้ยอดคลื่นของคลื่นพาห์ หรือ เ็นเวลโลป(envelope) เปลี่ยนไปตามสัญญาณเบสแบนด์หรือแอมพลิจูดของคลื่นพาห์ จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณข้อมูล และเมื่อดูทางด้านความถี่จะได้ดังภาพที่ 4 คือ สเปกตรัมของสัญญาณเบสแบนด์จะถูกย้ายไปที่ความถี่สูงมากๆ โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ความถี่คลื่นพาห์ ซึ่งเมื่อพิจารณาในรูปของสมการทางเวลา สัญญาณ AM จะเป็นไปตามสมการนี้

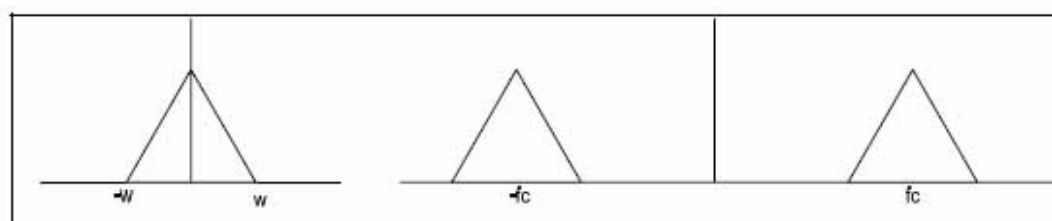
$$v_c = [A_c + m(t)] \cos \omega_c t \quad (1)$$

โดยที่ $m(t)$ คือ สัญญาณข้อมูลของเรา

$A_c \cos \omega_c t$ คือ สัญญาณคลื่นพาห์



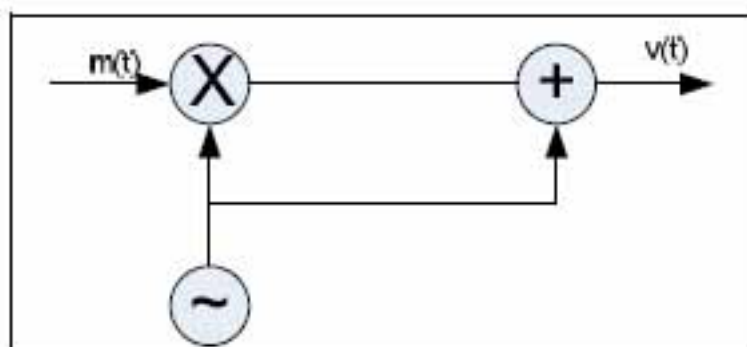
ภาพที่ 3 สัญญาณ AM



ภาพที่ 4 Spectrum ของสัญญาณ AM

3.4 การสร้างสัญญาณมอดูเลตแบบ AM

มอดูเลเตอร์แบบผลคูณ จะเป็นวงจรที่สร้างผลคูณของสัญญาณเบสแบนด์กับสัญญาณคลื่นพาห์ถ้าเขียนเป็นแผนภาพบล็อกก็จะเป็นดังภาพที่ 5 ซึ่งจะมีส่วนของวงจรคูณสัญญาณกับวงจรบวกซึ่งหลักการทำงานง่ายๆ คือ สร้างสัญญาณคลื่นพาห์มาคูณกับสัญญาณข้อมูลจากนั้น ก็บวกกับสัญญาณคลื่นพาห์อีกทีก็จะได้สัญญาณ AM ออกมาซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นไปตามสมการของสัญญาณ AM ที่ได้กล่าวไว้



ภาพที่ 5 Modulator แบบผลคูณ

3.5 การ Detect สัญญาณ AM

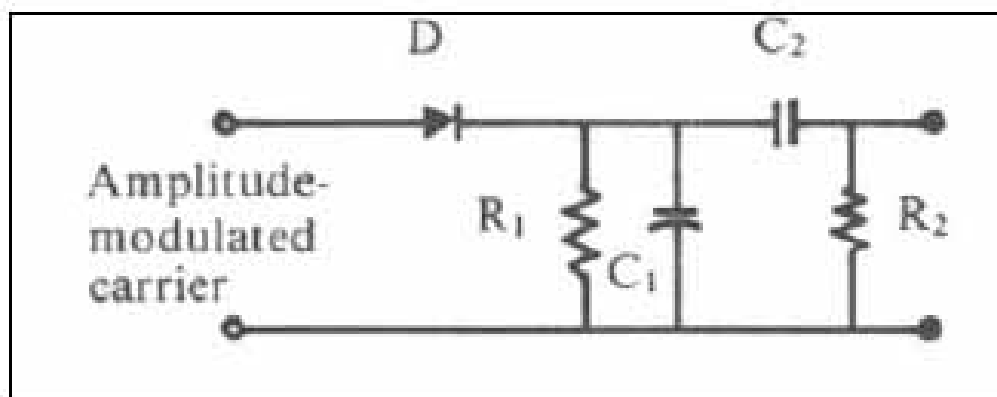
สัญญาณที่ได้รับการมอดูเลตแบบ AM จะกลายเป็นสัญญาณเบสแบนด์ ที่ถูกเลื่อนความถี่ให้สูงขึ้น ดังนั้นการ detect สัญญาณกลับมาจึงต้องใช้การ demodulate ซึ่งเป็นกระบวนการในการเลื่อนความถี่นั้นให้กลับมาอยู่ที่ความถี่เบสแบนด์อย่างเดิม ซึ่งอาจจะทำได้หลายวิธี เช่น Envelopedetection และ synchronous detection

3.6 Envelope Detection

Envelope detection หมายถึงการกรองเอา envelope ของสัญญาณ AM ออกมาเป็นวิธีการที่ง่ายและสะดวกในการสร้างวงจรมาก ตัวอย่างวงจรง่ายๆที่สามารถนำมาทำเป็นวงจรนี้ได้แสดงดังภาพที่ 5 โดยไดโอดในวงจรจะทำหน้าที่กรองสัญญาณด้านบวกให้ผ่านไปได้ ในขณะที่ RC จะทำหน้าที่เป็นฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำจะกรองเอาส่วนที่เป็น envelop ออกมา การที่วงจร RC จะทำงานได้ดีนั้น time constant ของวงจรหรือ RC นั้นจะต้องยาวกว่าคาบของสัญญาณคลื่นพาห์มากๆ ในขณะเดียวกันเมื่อเทียบกับสัญญาณเบสแบนด์ก็ต้องสั้นกว่าหรือมีการเปลี่ยนแปลงที่เร็วกว่า ถ้าเขียนในรูปความถี่ก็จะได้ออกมาดังนี้

$$W \ll \frac{1}{R_1 C_1} \ll f_c \quad (2)$$

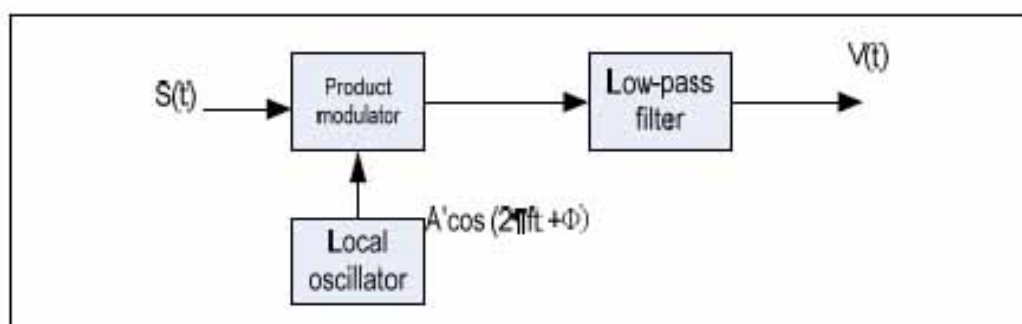
สำหรับ RC นั้นจะทำหน้าที่สกัดส่วนประกอบกระแสตรงออก และมักจะสกัดความถี่ต่ำๆออกด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ envelope detection ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่ส่วนประกอบความถี่ต่ำมีความหมายมาก



ภาพที่ 6 วงจร Envelope

3.7 Synchronous Detection

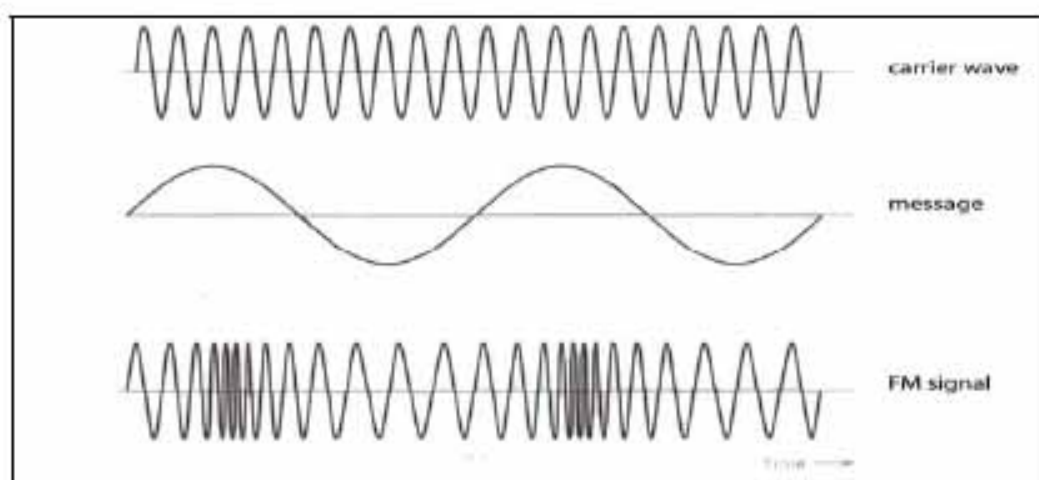
Synchronous detection หรือบางครั้งเรียกว่า coherent detection คือวิธีการ detect สัญญาณโดยใช้สัญญาณจากโวลต์อสซิลเลเตอร์ (local oscillator) คูณเข้ากับสัญญาณที่รับเข้ามา โดยที่สัญญาณจาก local oscillator จะซิงโครไนซ์กับสัญญาณคลื่นพาห้ทั้งความถี่และเฟส จากหลักการแปลงความถี่ของสัญญาณคือเมื่อนำ สัญญาณคลื่นพาห้ที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณ AM ที่ส่งมาคูณกับสัญญาณ AM ที่ส่งมาก็จะสามารถเลื่อนความถี่ของสัญญาณให้กลับไปที่มีความถี่เบสแบนด์ได้ ซึ่งจะมีส่วนของสัญญาณที่ถูกย้ายไปที่ความถี่สูงกว่าความถี่คลื่นพาห้หลายๆด้วย ดังนั้นจึงต้องนำสัญญาณที่ได้นี้ไปผ่าน low pass filter อีกทีเพื่อกรองส่วนของความถี่สูงออก เพื่อจะได้เหลือแต่ส่วนที่เป็นความถี่ Base-band ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณข้อมูลกลับมา



ภาพที่ 7 หลักการทำงานของ Coherent detector

3.8 การมอดูเลตแบบ FM (Frequency Modulation)

การมอดูเลตแบบ FM คือ การให้ความถี่ของคลื่นพาห์เปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณข้อมูลที่จะส่งดังภาพที่ 7 ซึ่งจากรูปเมื่อ Amplitude ของสัญญาณข้อมูลมีขนาดสูงคลื่นพาห์ก็จะถูกส่งด้วยความถี่สูง และเมื่อสัญญาณข้อมูลมีขนาดแอมพลิจูดต่ำคลื่นพาห์ก็จะส่งด้วยความถี่ต่ำ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า Amplitude ของคลื่นพาห์จะไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 8 สัญญาณ FM

เมื่อพิจารณาในทางความถี่จะพบว่า การมอดูเลตแบบ FM จะต้องใช้แบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลสูงกว่าแบบ AM ซึ่งสามารถคิดแบนด์วิดท์ที่จะใช้ได้จากสมการนี้ซึ่งเรียกว่ากฎของคาร์สัน

$$B = 2(\Delta f_p + 1)W \quad (3)$$

โดยที่ Δf_p = ค่าเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด

W = แบนด์วิธของสัญญาณข้อมูล

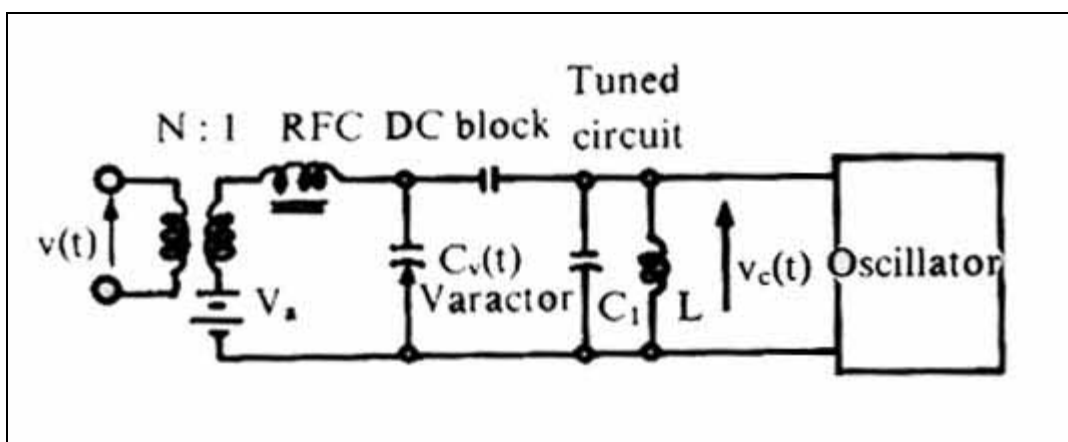
ซึ่งตามสมการจะเห็นว่าถ้าค่าการเบี่ยงเบนของความถี่สูงสุดมีค่ามากขึ้น แบนด์วิธที่ต้องใช้ในการส่งข้อมูลก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย

3.8 การสร้างสัญญาณ FM

การสร้างสัญญาณ FM นั้นสามารถแบ่งได้กว้างๆเป็น 2 แบบด้วยกันคือ แบบทางตรง กับแบบทางอ้อม แบบทางตรงนั้นจะหมายถึงการนำสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตไปเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห์โดยตรง สำหรับแบบทางอ้อมนั้นก็จะเป็วิธีการที่อาศัยวงจรหลายๆอย่างประกอบกัน

3.9 การสร้างสัญญาณ FM แบบทางตรง

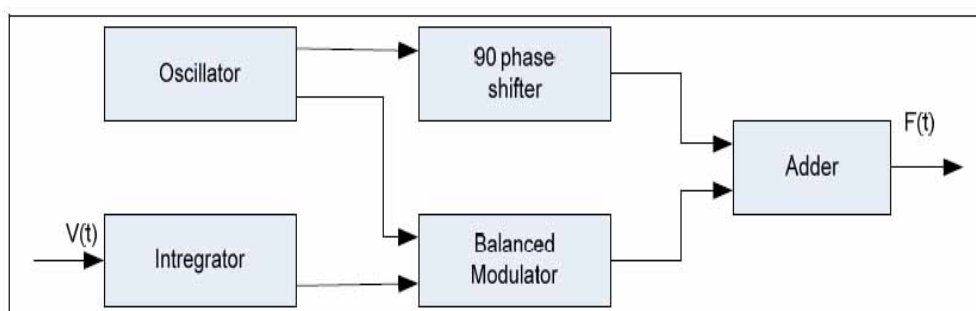
การสร้างสัญญาณ FM แบบทางตรงนั้นเป็นการนำเอาสัญญาณที่จะเข้ามามอดูเลตไปเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห์โดยตรง ซึ่งออสซิลเลเตอร์ที่ทำงานในลักษณะนี้ได้ก็มีรีเฟล็กซ์ไคลสตรอน (reflexklytron) และ กันน์ไดโอด (Gunn diode) ที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟเป็นต้น ออสซิลเลเตอร์ทั้งสองแบบนี้ ความถี่ที่ออสซิลเลตออกมาจะเปลี่ยนไปตามแรงดันไบอัสในรูปเชิงเส้น ดังนั้นเมื่อนำสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตไปเปลี่ยนแรงดันไบอัสก็จะทำให้ได้สัญญาณ FMออกมาโดยตรง สำหรับความถี่ที่ต่ำกว่าย่านไมโครเวฟเรามักจะใช้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่าวาเรคเตอร์ (varactor หรือ variable reactor) ชิ้นส่วนนี้จะมีคุณสมบัติเฉพาะคือค่า คาปาซิแตนซ์จะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของแรงดันที่คร่อมอยู่ ดังนั้นถ้าเราใช้วาเรคเตอร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของ วงจรเรโซแนนท์ที่ใช้ในวงจรออสซิลเลเตอร์เราก็จะสามารถสร้างสัญญาณ FM ได้โดยป้อนสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตไปเปลี่ยนค่าคาปาซิแตนซ์ของวาเรคเตอร์ โดยภาพที่ 9 แสดงวงจรที่ใช้วาเรคเตอร์



ภาพที่ 9 วงจรวาเรคเตอร์

3.9 การสร้างสัญญาณ FM แบบทางอ้อม

การสร้างสัญญาณ FM แบบทางอ้อมนั้นโดยทั่วไปจะใช้ส่วนประกอบของวงจรตามภาพที่ 9 กล่าวคือจะใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ในการอินทิเกรตสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต และส่วนที่เป็นบาลานซ์มอดูเลเตอร์ Phase shifter และ Adder จะทำหน้าที่ในการ modulate สัญญาณซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ผ่านวงจรส่วนนี้กลายเป็นสัญญาณ FM



ภาพที่ 10 ส่วนประกอบวงจรที่ใช้สร้างสัญญาณ FM แบบทางอ้อม

3.10 การ Detect สัญญาณ FM

การตรวจจับสัญญาณ FM หรือวิธีการในการ demodulate สัญญาณ FM นั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกันซึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมีอยู่ 3 แบบคือ แบบที่ใช้การแปลง

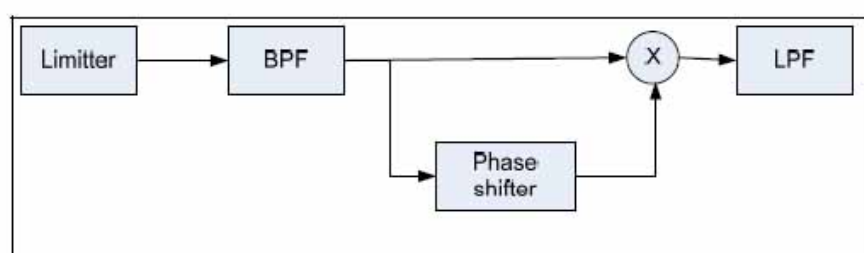
สัญญาณ FM เป็นสัญญาณ AM แบบ Quadrature detection และ แบบที่ใช้ phase locked loop

3.11 การ Demodulate สัญญาณ FM โดยการแปลงเป็นสัญญาณ AM

เป้าหมายของการแปลงสัญญาณ FM เป็นสัญญาณ AM นั้นก็เพื่อให้สามารถตรวจจับสัญญาณ เบสแบนด์กลับออกมาได้โดยวิธี Envelope-detection การแปลงสัญญาณ FM เป็นสัญญาณ AM จะทำได้โดยใช้วงจรที่สามารถแปลงการเบี่ยงเบนความถี่ชั่วขณะให้เป็นการเปลี่ยนแปลงของขนาด Amplitude ได้ ซึ่งวงจรที่ว่านี้ก็คือ วงจร differentiator เนื่องจากเมื่อเราดิฟเฟอเรนเชียลสัญญาณ FM สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงเหมือนกับสัญญาณ AM และเมื่อได้สัญญาณ AM ออกมาแล้วก็นำไปทำ envelope detection อีกทีเพื่อจะได้สัญญาณข้อมูลกลับออกมา

3.12 Quadrature Detection

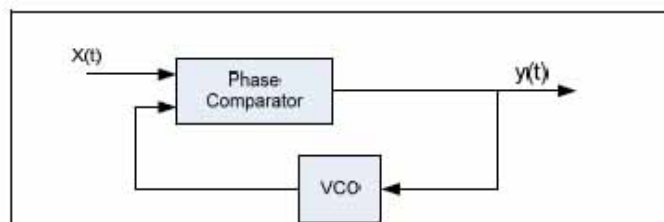
การ Demodulator สัญญาณ FM แบบ Quadrature detection นี้เป็นการใช้วงจรแยกแยะเฟส(phase discriminator) ในการดึงเอาสัญญาณเบสแบนด์ออกมาจากสัญญาณ FM ซึ่งบล็อกการทำงานแสดงตามภาพที่ 10 โดย Limiter และ Band pass filter มีหน้าที่จัดการกับระดับสัญญาณที่อาจจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาและให้ผ่านเฉพาะแถบความถี่ที่เกี่ยวข้อง Phase shifter เป็นวงจรหน่วงเวลาเมื่อสัญญาณที่ผ่านการหน่วงเวลาคู่กับสัญญาณ FM แล้วผ่าน low pass filter จะได้สัญญาณข้อมูลออกมา



ภาพที่ 11 Block diagram ของ Quadrature detection

3.13 Phase Lock Loop

การใช้ phase lock loop ในการ demodulate สัญญาณ FM จะอาศัยหลักการที่ วงจร phase lock loop พยายามที่จะ lock หรือ synchronize มุมชั่วขณะของสัญญาณจากวงจร VCO (voltage controlled oscillator) เข้ากับมุมชั่วขณะของสัญญาณที่เข้ามามีรายละเอียดที่จะกล่าวดังต่อไปนี้ การ lock มุมชั่วขณะนี้จะหมายถึงความถี่และเฟสของสัญญาณรวมกัน ส่วนประกอบพื้นฐานของวงจร phase lock loop จะเป็นดังภาพที่ 12 กล่าวคือ จะประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบเฟสซึ่งทำหน้าที่หาค่าความแตกต่างระหว่างเฟสของ VCO กับเฟสของสัญญาณ FM ที่เข้ามาซึ่งค่าที่ออกมาจะแปรผันตรงกับความถี่เบี่ยงเบนของสัญญาณขาเข้าและความถี่เบี่ยงเบนนี้จะแปรผันตรงกับขนาดของสัญญาณเบสแบนด์ ดังนั้นเราก็จะได้สัญญาณข้อมูลออกมา ส่วนวงจร VCO ซึ่งเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ความถี่ออสซิลเลเตอร์ถูกควบคุมด้วย voltage จากภายนอกซึ่งในที่นี้จะถูกควบคุมโดยสัญญาณที่ออกมาจาก phase comparator ซึ่งทำให้ VCO สามารถติดตามความถี่ที่เปลี่ยนไปของสัญญาณ FM ได้ ซึ่งวงจร VCO นี้จะต้องมีการตอบสนองที่รวดเร็วจึงจะสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณ FM ได้ทันทั่วทั้งที่



ภาพที่ 12 ส่วนประกอบของวงจร Phase lock loop

ส่วนวงจร Phase comparator นั้นจะสร้างขึ้นได้โดยใช้วงจรคูณหรือมิกเซอร์ร่วมกับ low pass filter

3.13 เทคนิคการ Modulate สัญญาณ Digital

สัญญาณ digital เป็นสัญญาณที่สามารถตรวจสอบความผิดพลาดได้ง่ายเนื่องจากมีระดับสัญญาณเพียงสองระดับ คือ 1 กับ 0 ที่มีความแตกต่างกันชัดเจน ซึ่งต่างกับสัญญาณ analog ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีหลายระดับต่อเนื่องกันไปซึ่งทำให้ตรวจสอบความผิดพลาดได้ยากกว่ามาก และ

สัญญาณ analog เมื่อเดินทางเป็นระยะทางไกลสัญญาณจะอ่อนกำลังลง ซึ่งทำให้ต้องมีการทวนสัญญาณเป็นระยะๆ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงขึ้น และด้วยพัฒนาการของเทคโนโลยีด้านระบบสื่อสารซึ่งสืบเนื่องมาจากความก้าวหน้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ดังนั้นระบบรับ-ส่งสัญญาณจึงทยอยเปลี่ยนมาใช้ระบบ digital กันมากขึ้นโดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคต่างๆ ในการ modulate สัญญาณ digital ซึ่งก็จะมีหลักการคล้ายๆ กับการ modulate แบบ analog ซึ่งหลักๆ มีอยู่ 3 แบบด้วยกันคือ PSK FSK และ ASK

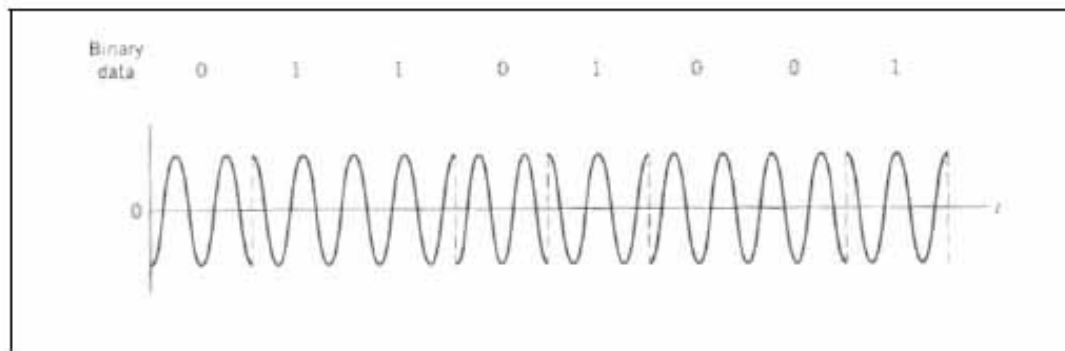
การ modulate สัญญาณ digital นั้นจะเป็นการนำสัญญาณ digital ที่ต้องการจะส่งไปเปลี่ยนแปลงขนาด เปลี่ยนความถี่ หรือเปลี่ยนเฟสของสัญญาณคลื่นพาห์ซึ่งคล้ายกับการ modulate แบบ analog แต่แตกต่างกันที่รูปแบบของข้อมูลตามที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ซึ่งการ modulate สัญญาณ digital เข้ากับคลื่นพาห์นี้เราสามารถใช้นสัญญาณ 1 สัญญาณ หรือ 1 สัญญาณแทนสัญญาณ digital 1 บิตหรือมากกว่า 1 บิตได้ ดังนั้นถ้าเป็นสัญญาณ binary ซึ่งเป็นสัญญาณ digital 1 บิต สัญญาณคลื่นพาห์ที่ถูก modulate ก็จะมีรูปร่าง 2 แบบเท่านั้น แต่ถ้าเป็นสัญญาณแบบ N บิต รูปร่างของสัญญาณคลื่นพาห์ที่ถูก modulate แล้วก็จะมียังน้อย 2N แบบด้วยกัน เมื่อกล่าวโดยสรุปก็คือเราสามารถ modulate สัญญาณ digital ทีละ 1 บิต หรือทีละหลายๆ บิตเข้าไปกับสัญญาณคลื่นพาห์ได้

3.14 การ Modulate สัญญาณแบบ PSK

การ modulate แบบเปลี่ยนเฟสของคลื่นพาห์หรือที่เรียกว่า PSK (phase shift keying) นั้นเป็นการนำเอาสัญญาณ digital มาเปลี่ยนเฟสของสัญญาณคลื่นพาห์ในกรณีของสัญญาณ digital แบบ M ระดับ เฟสของสัญญาณคลื่นพาห์ก็จะถูกแบ่งออกเป็น M ค่าเพื่อใช้แทนสัญญาณแต่ละระดับ เช่นในกรณีที่สัญญาณ 2 ระดับ คือ 0 กับ 1 สัญญาณคลื่นพาห์ที่ใช้อ้างอิง 0 กับ 1 จะมีเฟสต่างกัน ดังนั้นถ้าจะส่งข้อมูลเป็น 01101001 ก็จะได้ตามภาพที่ 13 ถ้าในกรณีของสัญญาณหลายๆ ระดับสัญญาณแต่ละค่าก็จะมีเฟสต่างกันอย่างลงซึ่งจะทำให้การแยกแยะแต่ละสัญญาณออกจากกันนั้นยากขึ้นทำให้เกิดความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลมากขึ้น แต่ทำให้สามารถส่งข้อมูลได้เร็วขึ้น ซึ่งเราสามารถเขียนสัญญาณ PSK ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M}(i-1)\right) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

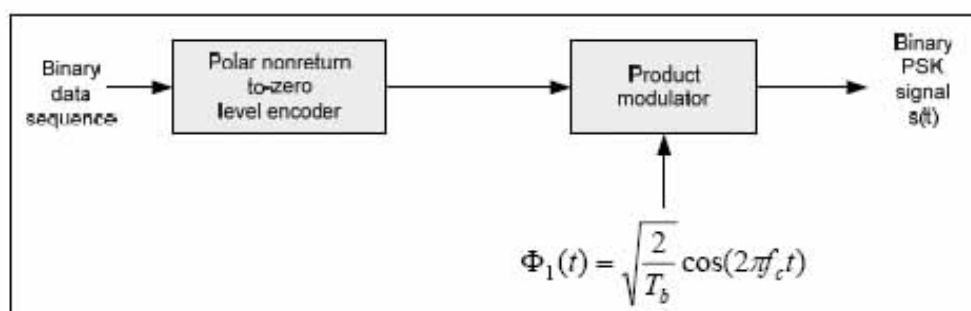
โดยที่ E คือ energy per symbol
 T คือ คาบของหนึ่งสัญญาณ
 M คือ จำนวนระดับสัญญาณ



ภาพที่ 13 สัญญาณ BPSK

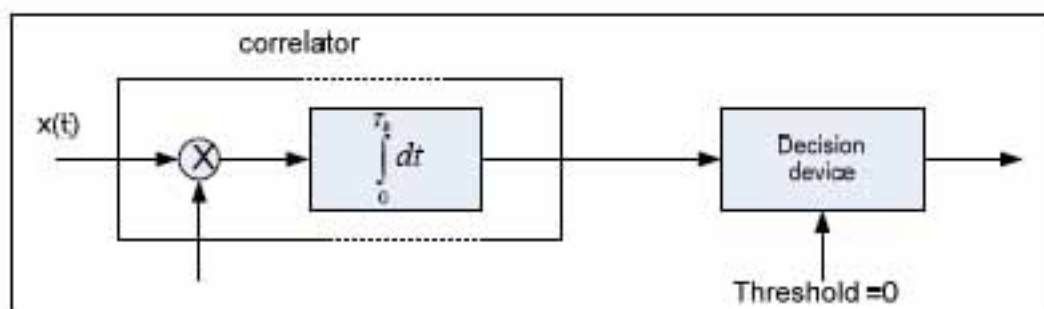
3.15 การสร้างสัญญาณและการ Detect สัญญาณ Binary PSK

จากสมการของ PSK จะเห็นว่าสัญญาณ binary PSK จะมีเฟสต่างกัน π หรือสัญญาณจะถูกกลับขั้วนั่นเอง ดังนั้นในการสร้างสัญญาณ binary PSK จึงมีหลักการทำงานตามภาพที่ 13 ดังนี้คือสัญญาณข้อมูลจะผ่านเข้าไปในวงจร Polar non-return to zero level encoder เพื่อแทนขั้วให้แต่ละสัญญาณ binary โดยใช้ค่าคงที่ของ amplitude ค่าหนึ่ง เช่น $+\sqrt{E_b}$ แทน 1 และ $-\sqrt{E_b}$ แทน 0 จากนั้นจึงผ่านวงจร Product modulator เพื่อทำการคูณกับสัญญาณคลื่นพาห้ซึ่งสัญญาณที่ออกมา ก็จะเป็นสัญญาณ binary PSK นั่นเอง



ภาพที่ 14 การสร้างสัญญาณ PSK

สำหรับการ detect สัญญาณ binary PSK นั้น จะมีหลักการทำงานดังภาพที่ 14 คือ สัญญาณ binary PSK ที่ถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวนในช่องส่งสัญญาณจะผ่านเข้าไปใน วงจร correlator ซึ่งวงจรนี้จะประกอบด้วย local oscillator ไว้สร้างสัญญาณคลื่นพาห์ และ วงจรอินทิเกรต ซึ่งหลักการของวงจร correlator ก็คือถ้าสัญญาณ PSK ที่เข้ามามีลักษณะเหมือนกับ สัญญาณคลื่นพาห์มากค่าที่ได้ออกมาจากวงจร correlator ก็จะมีค่าบวกมากและถ้าสัญญาณ PSK ที่ เข้ามามีลักษณะตรงกันข้ามกับสัญญาณคลื่นพาห์ค่าที่ได้ออกมาจากวงจร correlator ก็จะมีค่าเป็นลบ มาก ซึ่งก็คือการตีค่าความเหมือนของสัญญาณ PSK ที่ถูกรบกวนกับสัญญาณคลื่นพาห์ออกมาเป็น ค่าตัวเลขนั่นเอง ซึ่งค่าที่ได้จากวงจร correlator จะผ่านเข้าวงจร Decision device ซึ่งจะทำหน้าที่ ตัดสินใจว่าข้อมูลที่ส่งมาเป็นอะไร โดยเทียบกับค่า threshold ค่าหนึ่งซึ่งในกรณีของ binary PSK ก็ คือ 0 นั่นเองซึ่งถ้าค่าที่ได้ออกมาจาก correlator มากกว่า 0 จะตัดสินว่า 1 ถูกส่งมาและ ถ้าค่าน้อย กว่า 0 ก็จะตัดสินว่า 0 ถูกส่งมา



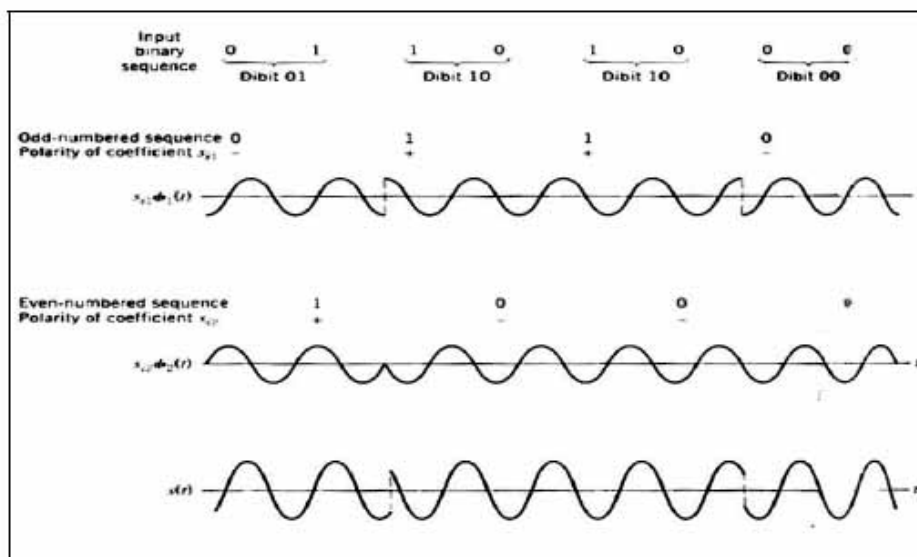
ภาพที่ 15 การ Detect สัญญาณ PSK

3.16 การ Modulate สัญญาณแบบ QPSK

QPSK เป็นรูปแบบหนึ่งของการ modulate สัญญาณแบบ PSK ซึ่ง QPSK จะเป็นการ modulate สัญญาณทีละ 2 bit ซึ่งทำให้ได้รูปแบบของสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 4 ค่า ซึ่งสามารถเขียน ในรูปสมการได้ดังนี้

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left[(2i-1)\frac{\pi}{4}\right] \cos 2\pi f_c t - \sqrt{\frac{2E}{T}} \sin\left[(2i-1)\frac{\pi}{4}\right] \quad \text{โดยที่ } i = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

จากสมการจะเห็นว่าในการ modulate แบบนี้จะใช้สัญญาณคลื่นพาห์ 2 ตัวคือ $\cos 2\pi f_c t$ และ $\sin 2\pi f_c t$ ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปที่ละ 2 bit ได้โดยจะแยกข้อมูล 2 bit นี้ออกเป็น odd number และ even number โดย odd number จะถูก modulate ไปกับสัญญาณคลื่นพาห์ $\cos 2\pi f_c t$ และ even number จะถูก modulate ไปกับสัญญาณ $\sin 2\pi f_c t$ โดยคลื่นพาห์ทั้งสองตัวจะถูกนำมารวมกันแล้วส่งออกไป คลื่นพาห์ทั้งสองตัวนี้จะต้องมีลักษณะที่เรียกว่า orthogonal หรือตั้งฉากกันทำให้การรวมกันของคลื่นพาห์ของทั้งสองตัวนี้ไม่รบกวนซึ่งกันและกัน เปรียบเสมือนกับการส่งข้อมูลในแกน 2 แกนคือ bit หนึ่งอยู่ที่แกน X และ bit หนึ่งอยู่ที่แกน Y เมื่อนำมารวมกันจะได้ coordinate จุดหนึ่งซึ่งเราก็สามารถจะรู้ได้ว่า coordinate จุดนี้มีค่าของ X เป็นเท่าใด และมีค่าของแกน Y เป็นเท่าใด ตัวอย่างของสัญญาณ QPSK แสดงดังภาพที่ 15 ในตัวอย่างนี้เป็นการส่งข้อมูล 001101000

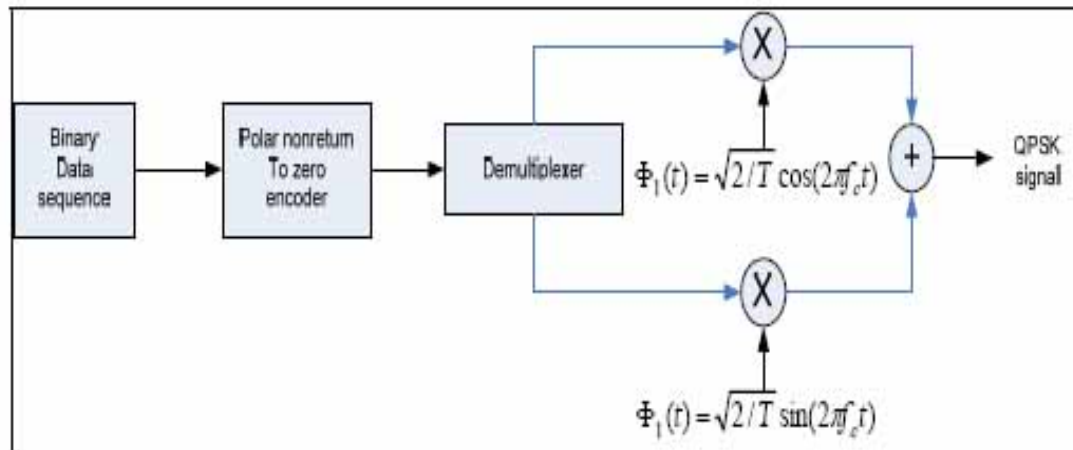


ภาพที่ 16 สัญญาณ QPSK

3.17 การสร้างสัญญาณและการ Detect สัญญาณ QPSK

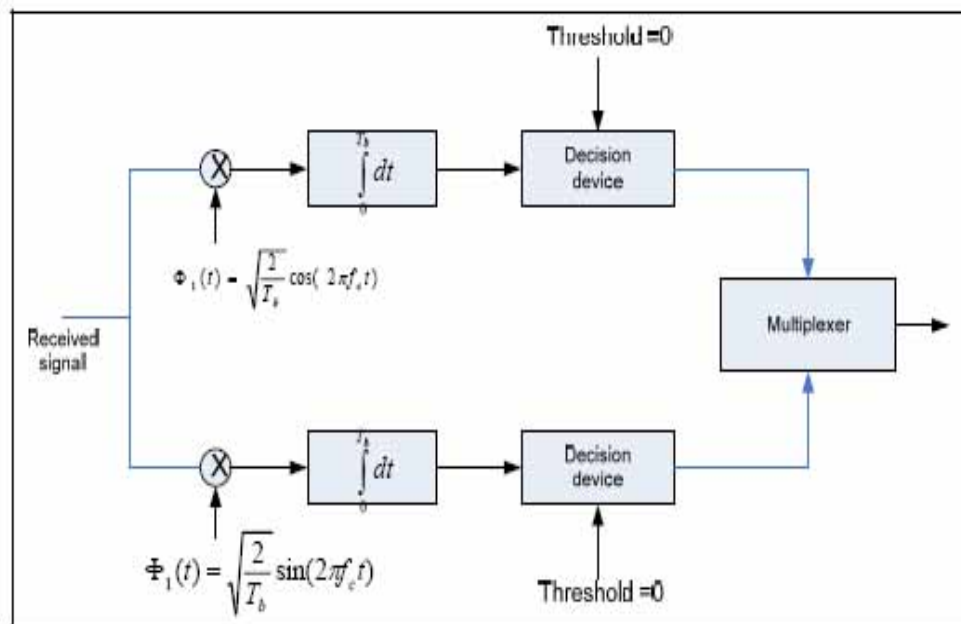
การสร้างสัญญาณ QPSK มีการทำงานตามภาพที่ 16 ดังนี้คือข้อมูล binary ที่จะส่งจะถูกทำให้เป็นขั้วบวกหรือขั้วลบโดยวงจรที่เรียกว่า Polar non-return to zero level encoder โดยถ้าข้อมูลเป็น 1 ค่าที่ออกจากวงจรนี้จะเป็นค่าคงที่บวก และถ้าข้อมูลเป็น 0 ค่าที่ออกจากวงจรนี้ก็จะ เป็นค่าคงที่ลบ จากนั้นค่าที่ได้ออกมาจะผ่านเข้าไปในวงจร Demultiplexer ซึ่งมีหน้าที่แยกข้อมูล ออกเป็น odd number กับ even number โดยที่ odd number จะถูกนำไปคูณกับสัญญาณ $\cos 2\pi f_c t$

และ even number จะถูกนำไปคูณกับสัญญาณ $\sin 2\pi f_c t$ จากนั้นจึงนำสัญญาณทั้งสองมาบวกกันแล้วส่งไป



ภาพที่ 17 การสร้างสัญญาณ QPSK

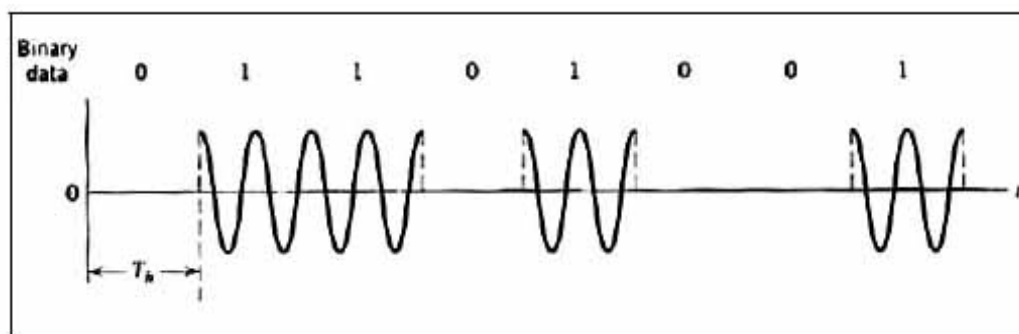
สำหรับการ Detect สัญญาณ QPSK นั้นจะมีความทำงานตามภาพที่ 18 คือ สัญญาณ QPSK จะผ่านเข้า correlator ซึ่งแยกออกเป็นแกนของสัญญาณ $\cos 2\pi f_c t$ และแกนของสัญญาณ $\sin(2\pi f_c t)$ จากนั้นจึงผ่านวงจร decision devise เพื่อทำการตัดสินใจว่าข้อมูลในแต่ละแกนนั้นเป็นอะไร จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ในแต่ละแกนมารวมกันก็จะได้ข้อมูลกลับออกมาดังเดิม จะเห็นได้ว่าวงจรในการ detect สัญญาณ QPSK นี้คือการเอาวงจร detect สัญญาณ PSK 2 วงจรมาต่อขนานกันโดยในแต่ละวงจร correlator จะใช้คลื่นพาห้คนละตัวกันนั่นเอง



ภาพที่ 18 วงจรการ Detect สัญญาณ QPSK

3.18 การ Modulate สัญญาณแบบ ASK

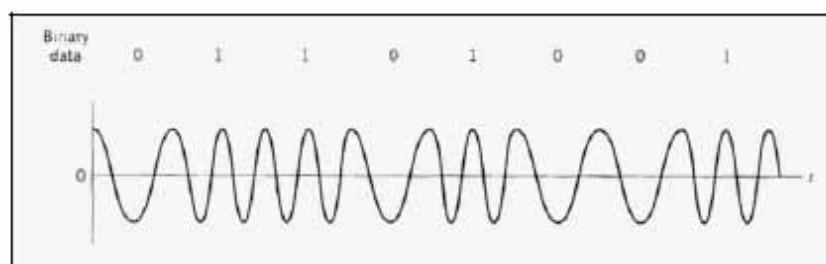
การ Modulate สัญญาณแบบ ASK (Amplitude Shift Keying) คือ การเปลี่ยนขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นพาห์ไปตามข้อมูลที่เข้ามาซึ่งในกรณีของการส่งข้อมูลที่ละบิตคือ 1 หรือ 0 สัญญาณ ASK ที่ได้ก็จะออกมาตามภาพที่ 18 ซึ่งสัญญาณแบบนี้ถูกเรียกทั่วไปว่า On-Off Keying (OOK) ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนการเปิด-ปิด สัญญาณ คือ เมื่อข้อมูลที่จะส่งคือ 1 ก็จะทำการส่งสัญญาณคลื่นพาห์ที่มีแอมพลิจูดค่าหนึ่งออกไป แต่ถ้าข้อมูลที่จะส่งเป็น 0 ก็จะไม่มีการส่งสัญญาณใดๆออกไปหรือจะคิดว่ามี การส่งสัญญาณคลื่นพาห์ที่มีแอมพลิจูด 0 ออกไปก็ได้ สำหรับสัญญาณแบบ OOK นี้ มีการใช้งานมายาวนานตั้งแต่สมัยเริ่มใช้คลื่นวิทยุในการสื่อสารใหม่ๆ จนปัจจุบันนี้ก็มีใช้บ้างในระบบไมโครเวฟ และที่เด่นชัดที่สุดก็คือใช้ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง



ภาพที่ 19 สัญญาณ ASK

3.19 การ Modulate สัญญาณแบบ FSK

การ Modulate สัญญาณแบบ Frequency Shift Keying (FSK) นั้น เป็นการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห์ตามข้อมูลที่เข้ามาเช่นเมื่อข้อมูลที่จะส่งเป็น 1 ก็จะส่งสัญญาณคลื่นพาห์ที่มีความถี่หนึ่งไปและเมื่อข้อมูลที่จะส่งเป็น 0 ก็จะส่งสัญญาณคลื่นพาห์ที่มีความถี่อีกความถี่หนึ่งซึ่งไม่เหมือนกันออกไป การ modulate แบบนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทนต่อสัญญาณรบกวนภายนอกและเป็นที่นิยมในการใช้ส่งข้อมูล ภาพที่ 19 แสดงตัวอย่างของสัญญาณที่ทำการ modulate แบบ FSK

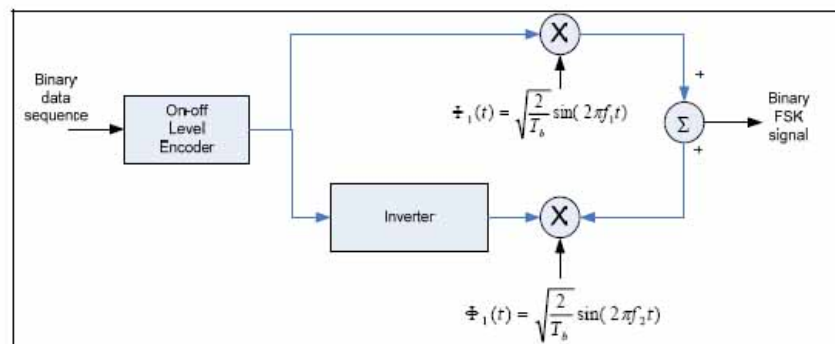


ภาพที่ 20 สัญญาณ FSK

3.20 การสร้างสัญญาณและการ Detect สัญญาณ FSK

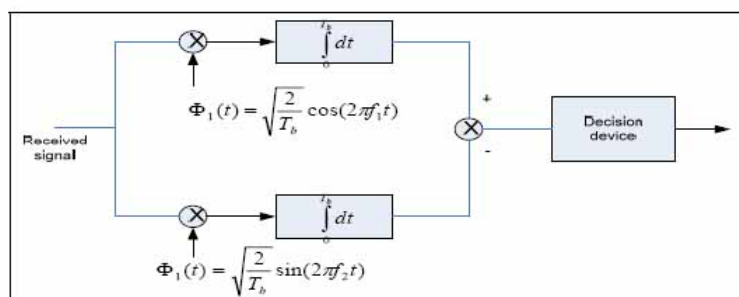
การสร้างสัญญาณ FSK จะเป็นไปตามภาพที่ 21 คือ สัญญาณ binary จะผ่านเข้าไปในวงจร On Off level encoder ซึ่งค่าที่ได้ออกมาจากวงจรนี้จะเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งเมื่อข้อมูลที่เข้ามาเป็น 1 และจะเป็น 0 เมื่อข้อมูลที่เข้ามาเป็น 0 Inverter มีหน้าที่กลับสัญญาณคือถ้าสัญญาณที่เข้ามามีค่าเป็น

ค่าคงที่ค่าหนึ่งค่าที่ออกไปจากวงจร Inverter จะมีค่าเป็น 0 และเป็นเช่นนี้ในทางกลับกัน เช่น เมื่อเราต้องการจะส่ง 1 ค่าที่ออกจาก on off level encoder จะเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งถูกส่งไปคูณกับสัญญาณคลื่นพาห้ที่มีความถี่ f_1 ส่วนค่าที่ออกจาก Inverter จะมีค่าเป็น 0 ซึ่งจะถูกส่งไปคูณกับสัญญาณคลื่นพาห้ที่มีความถี่ f_2 เช่นกันซึ่งจะทำให้ไม่มีส่วนของสัญญาณคลื่นพาห้ที่มีความถี่ f_2 ออกไป ซึ่งทำให้มีเพียงสัญญาณคลื่นพาห้ความถี่ f_1 ออกไปเท่านั้น และก็จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันเมื่อข้อมูลเป็น 0 ก็คือจะมีแต่สัญญาณคลื่นพาห้ที่มีความถี่ f_2 ออกไปเช่นกัน



ภาพที่ 21 การสร้างสัญญาณ FSK

สำหรับการ Detect สัญญาณ FSK จะเป็นไปตามภาพที่ 22 ซึ่งในวงจรจะประกอบด้วย correlator 2 ตัว ซึ่งใช้สัญญาณคลื่นพาห้ที่มีความถี่ต่างกันในการคูณ จากนั้นจะนำค่าที่ได้จาก correlator แต่ละตัวมาหักลบกันแล้วส่งเข้าวงจร decision device เพื่อตัดสินใจว่าส่งข้อมูลอะไรมาโดยที่ถ้าค่าที่ได้หลังจากการหักลบกันแล้วถ้าค่าที่ออกมามีค่ามากกว่า 0 แสดงว่าส่ง 1 มา แต่ถ้าค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่า 0 แสดงว่าส่ง 0 มา



ภาพที่ 22 การ Detect สัญญาณ FSK

3.21 Spread Spectrum Modulation

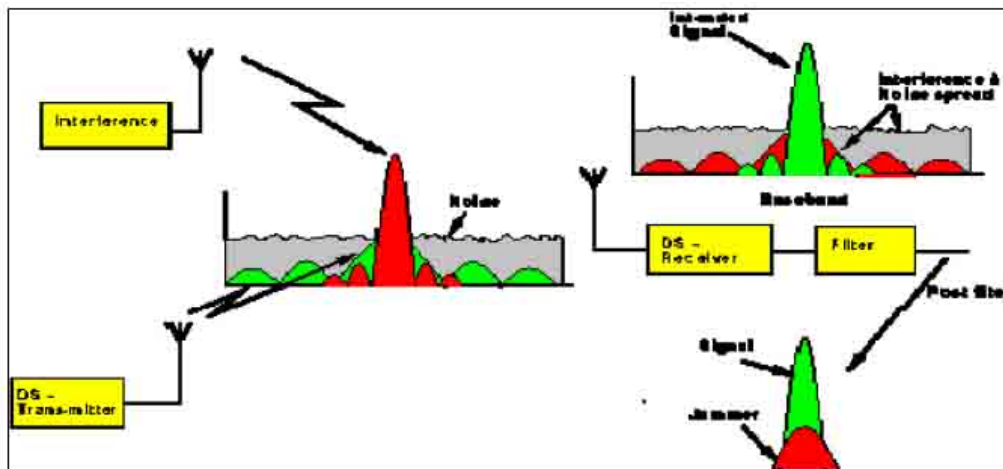
เทคนิคต่างๆของการ modulation ที่ได้กล่าวถึงข้างต้นนั้นจะคำนึงถึงแบนด์วิดท์ และพลังงานที่ใช้ในการส่งเป็นหลักแต่ในบางกรณีที่เราต้องการความปลอดภัยในการส่งข้อมูลมาก ๆ เช่น ในทางการทหารข้อมูลที่สื่อสารออกไปนั้นจะต้องมีความปลอดภัยสูงซึ่งศัตรูจะต้องไม่สามารถรับฟังข้อมูลนั้นหรือรบกวนสัญญาณข้อมูลนั้นจนทำให้ไม่สามารถสื่อสารกันได้ ดังนั้น เทคนิค spread spectrum จึงได้เกิดขึ้นซึ่งเทคนิคแบบนี้เป็นเทคนิคที่จะขยาย bandwidth ของข้อมูลให้กว้างขึ้นมากแต่จะทำให้สามารถป้องกันการรบกวนทั้งจากสัญญาณที่ไม่ตั้งใจส่งมารบกวนและสัญญาณที่ตั้งใจส่งมารบกวนได้ เช่น การรบกวนจากสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นดินหรือจากสิ่งก่อสร้างต่างๆ (multipath) ของสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่ตั้งใจให้เกิดขึ้นเราสามารถนิยามสัญญาณที่เป็น Spread spectrum ได้ 2 ข้อดังนี้

- spread spectrum เป็นการส่งสัญญาณโดยใช้แบนด์วิดท์มากกว่าแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้ในการส่งข้อมูลนั้น ๆ
- สัญญาณที่เป็น spread spectrum จะต้องมีการเข้ารหัส code ก่อนที่ข้อมูลจะถูกส่งไปโดยที่ฝั่งรับข้อมูลก็จะใช้ code ตัวเดียวกันในการถอดเอาข้อมูลออกมา

เทคนิคที่เป็น Spread-spectrum ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้มี 2 แบบคือ direct sequence และ frequency hopping

3.22 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

DSSS เป็นเทคนิคหนึ่งในการทำ spread spectrum modulation ซึ่งจุดประสงค์หลักของ DSSS ก็คือการป้องกันการรบกวนจากสัญญาณอื่นๆ โดยภาพที่ 23 จะแสดง concept ในการลดสัญญาณรบกวนซึ่ง DSSS สามารถทำได้โดย เมื่อข้อมูลของเราถูกขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นทำให้มี spectrum แผ่ขยายออกไปในช่วงความถี่ที่กว้างมาก ซึ่งเมื่อมีสัญญาณเข้ามารบกวนสัญญาณนั้นจะเข้ามารบกวนในช่วงความถี่แค่บางช่วงใดช่วงหนึ่ง ซึ่งทำให้เมื่อเราทำการ de-spread สัญญาณกลับมาสัญญาณรบกวนจะถูกขยาย bandwidth มากขึ้นทำให้ความแรงลดลงอย่างมาก และสัญญาณข้อมูลของเราจะกลับมาอยู่ในช่วงความถี่แคบๆตามเดิมและเมื่อนำไปผ่าน filter ก็จะได้สัญญาณข้อมูลเดิมที่มีสัญญาณรบกวนเล็กๆแทรกเข้ามาด้วยทำให้ข้อมูลไม่เสียหายมากเท่าไรนัก



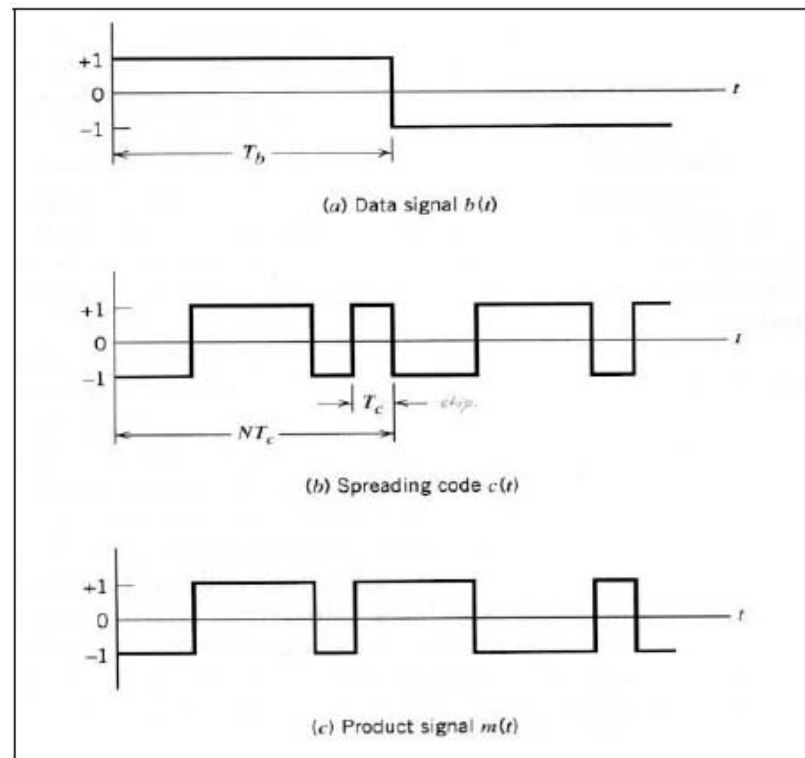
ภาพที่ 23 Concept ของ DSSS

สำหรับ DSSS มีขั้นตอนที่สำคัญอยู่ 2 คือขั้นตอนแรกเป็นการทำให้สัญญาณที่เข้ามาให้มีช่วงความถี่ที่กว้างมากขึ้นซึ่งทำได้โดยการนำสัญญาณข้อมูลที่เข้ามาไปคูณกับ wideband code ซึ่ง wideband code ที่นิยมใช้กันคือ Pseudo Noise sequence (PN) ซึ่งเป็น periodic binary sequence เมื่อได้ code ที่เป็น wideband แล้ว จากนั้นจึงนำ code ที่ได้ไปทำการ modulate แบบ phase shift keying แล้วส่งออกไป

3.23 Pseudo Noise Sequence

PN code เป็นหัวใจสำคัญของการทำ direct sequence spread spectrum ซึ่ง PN sequence คือลำดับของเลข binary ที่เรียงกันเป็น code โดยมีหน่วยที่เรียกว่า chip ซึ่งแต่ละ chip จะสามารถเป็นได้ 2 ค่าคือ -1/1 หรือ 1/0 โดยลำดับของเลข binary ที่ต่างกันหรือ code ที่ต่างกันจะใช้แทนค่าข้อมูลแต่ละค่า ซึ่งการเลือก code นั้นเป็นเรื่องสำคัญมากเพราะว่าจะมีผลกับ bandwidth ที่ใช้ในการส่ง ซึ่งคุณสมบัติของ PN code มีดังนี้ Balance คือใน code หนึ่งๆจะมีจำนวน 1 มากกว่าจำนวน 0 ไม่เกิน 1 ตัว เช่น $PN1 = +1 +1 +1 -1 +1 -1 -1$ เนื่องจากเมื่อ PN code มีจำนวน 1 และ 0 ในจำนวนที่เท่าๆกันแล้วจะทำให้ส่วนของ DC มีค่าต่ำ แต่ละ code ที่ใช้แทนแต่ละข้อมูลจะต้อง orthogonal กัน PN code จะต้องมียุคที่มีค่า autocorrelation สูงมากจุดหนึ่งเพื่อการ synchronize กันระหว่างฝั่งรับและฝั่งส่ง ตัวอย่างสัญญาณที่ถูกทำให้เป็น Wideband แสดงดังภาพที่ 24 โดย ข้อมูล 1 จะถูกคูณกับ code -1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 โดย $T_b = NT_c$ T_b คือ ระยะเวลาในการส่งข้อมูล 1 bit, T_c

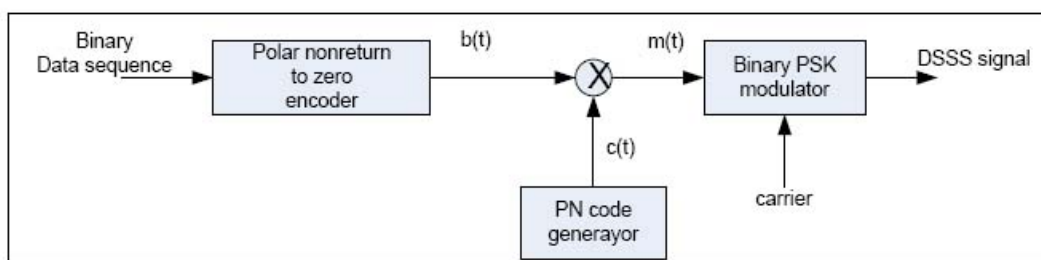
คือ ระยะเวลาของ chip 1 chip และข้อมูล 0 ซึ่งถูกแทนด้วยค่าขั้วลบ (-1) ก็จะถูกคูณกับ code เดียวกันทำให้ได้สัญญาณที่เป็น wide band ออกมา



ภาพที่ 24 สัญญาณ DSSS

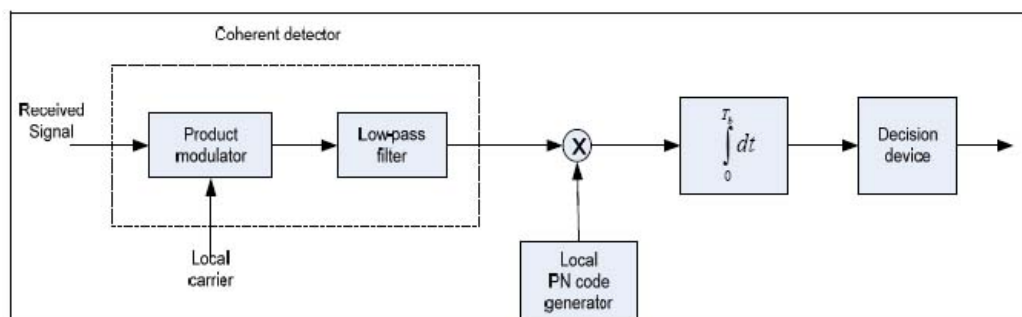
3.24 การสร้างสัญญาณและการ Detect สัญญาณ DSSS

ขั้นตอนทั้งหมดในการ สร้างสัญญาณ DSSS จะเป็นไปตามภาพที่ 24 โดยเริ่มจาก เปลี่ยนข้อมูล binary ที่เป็น 0 กับ 1 ให้กลายเป็น 1 กับ -1 แทนโดยใช้วงจร Polar non-return to zero level encoder จากนั้นจึงทำการคูณ PN-code กับสัญญาณข้อมูลเพื่อขยายสเปกตรัมของสัญญาณ แล้วจากนั้นจึงนำสัญญาณ wideband ที่ได้ไปทำการ modulate แบบ BPSK เพื่อส่งไปในของ สัญญาณต่อไป

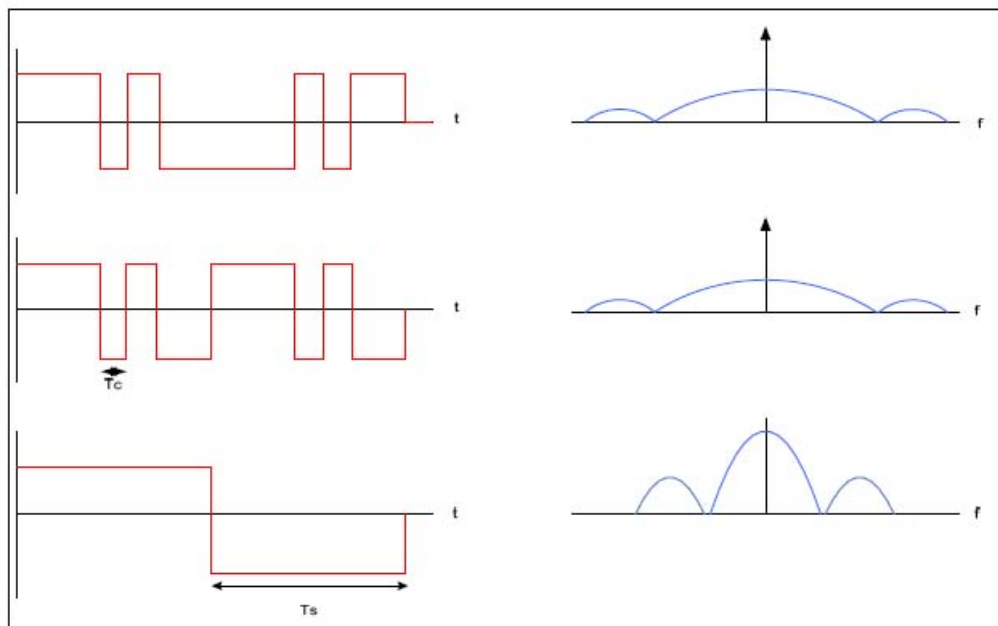


ภาพที่ 25 การสร้างสัญญาณ DSSS

สำหรับการ detect สัญญาณ DSSS จะมีการทำงานตามภาพที่ 26 คือเริ่มจากเมื่อรับสัญญาณ DSSS เข้ามาจะผ่านวงจร detect สัญญาณ BPSK เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นค่า digital ออกมา ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้เป็นข้อมูลที่เป็น wideband หรือข้อมูลที่ถูกรหัส code อยู่จากนั้นจึงทำการคูณกับ PN code เพื่อทำการ despreading โดยใช้หลักของถ้า PN code ที่สร้างออกมาจาก Local PN code generator เป็น code เดียวกันกับสัญญาณที่รับมาจะทำให้ข้อมูลที่เป็น wideband กลับมาเป็นข้อมูล ที่เป็น narrowband ดังเดิมได้โดยการ despreading นี้จะแสดงตามภาพที่ 26 โดยสมมุติว่าสัญญาณ DSSS นี้ ถูกส่งผ่าน ideal channel หรือช่องสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวนเลย จากนั้นข้อมูลที่ผ่านการ despreading แล้วจะผ่านวงจร integration และ วงจร decision device เพื่อตัดสินใจว่าส่งข้อมูลอะไรมา



ภาพที่ 26 การ Detect สัญญาณ DSSS

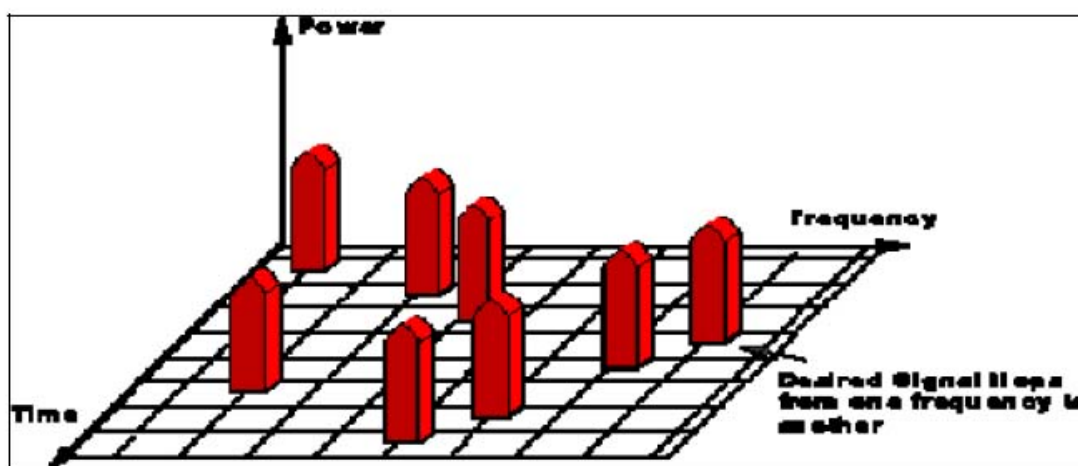


ภาพที่ 27 Dispersing

3.25 Frequency Hopping Spread spectrum (FHSS)

Frequency Hopping เป็นเทคนิคหนึ่งของการทำ spread spectrum โดยมีหลักการคือการเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ในการส่งข้อมูลตลอดเวลาโดยความถี่จะเปลี่ยนไปตามรูปแบบของ PN ซึ่งช่วงเวลาในการอยู่ที่ช่วงความถี่หนึ่งๆจะเท่ากับ $T_h = 1/R_h$ (dwell time) FHSS จะทำการแบ่งความถี่ที่มีทั้งหมดออกเป็นช่วงๆ แล้วทำการเปลี่ยนความถี่ไปเรื่อยๆตามรูปแบบของ PN code ซึ่ง FHSS จะแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

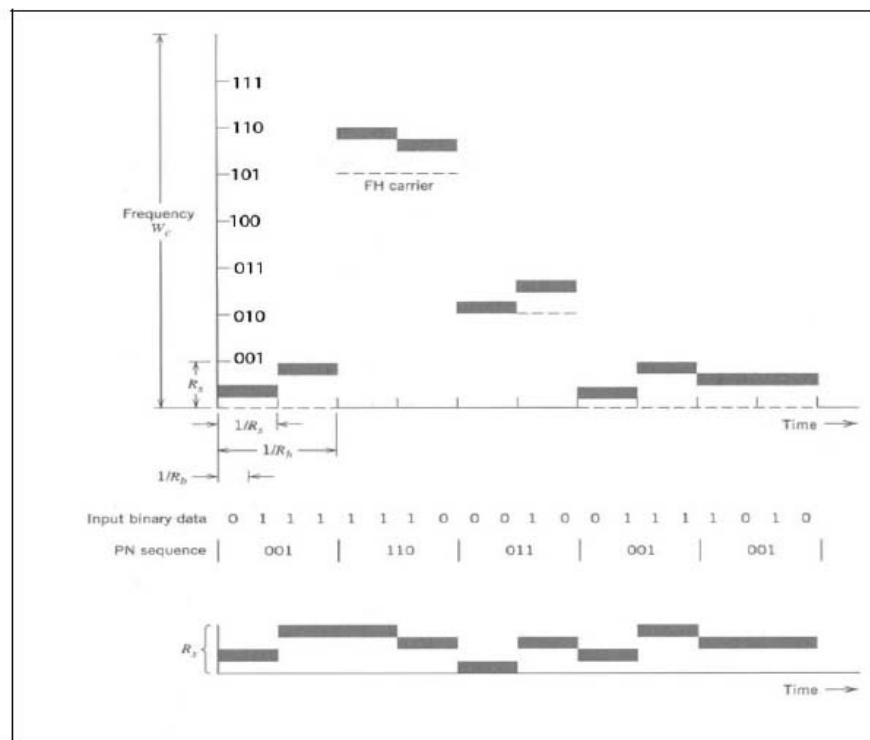
- slow frequency hopping เป็นการเปลี่ยนความถี่แบบช้าๆ โดยมี $T_h = T_s$ หรือความถี่ที่ใช้ในการส่งจะเปลี่ยนทุกครั้งเมื่อมีการส่งข้อมูล 1 symbol
- fast frequency hopping เป็นการเปลี่ยนความถี่อย่างรวดเร็ว โดยมี $T_s = N T_h$ หรือในการส่งข้อมูล 1 symbol จะมีการเปลี่ยนความถี่หลายครั้ง



ภาพที่ 28 Concept การทำ FHSS

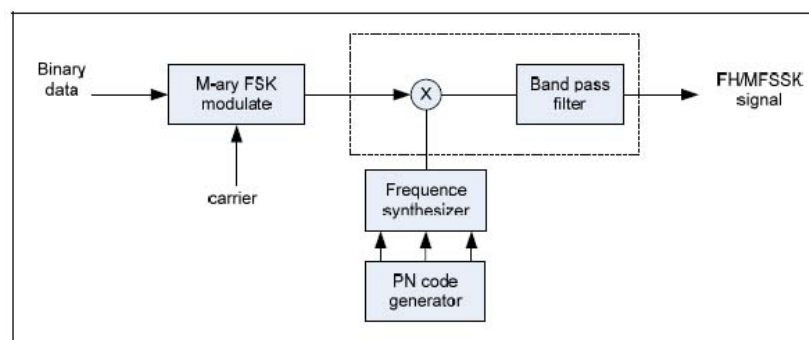
3.26 การสร้างสัญญาณและการ Detect สัญญาณ FHSS

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นนั้น FHSS จะแบ่ง spectrum ที่มีทั้งหมดออกเป็นช่องสัญญาณจำนวน N ช่อง โดย $N = 2^{\text{จำนวน chip ของ PN code}}$ แต่ละช่องของสัญญาณก็จะถูกแบ่งย่อยอีกตามจำนวนสัญญาณที่ต่างกันเช่นเมื่อส่งข้อมูลที่ละ 2 bit ในช่องสัญญาณหนึ่งๆก็จะถูกแบ่งย่อยออกเป็น 4 ช่อง ซึ่งช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูลจะถูกเปลี่ยนไปตาม PN code ที่เข้ามาซึ่งเราจะแทนแต่ละช่องสัญญาณนั้นด้วย PN code เช่นในช่วงเวลาแรกเราจะส่งข้อมูลในช่องสัญญาณ 001 ข้อมูลของเราจะถูกส่งโดยใช้ช่องสัญญาณนี้และในช่วงเวลาที่ 2 ก็จะย้ายไปใช้ช่องสัญญาณ 110 ซึ่งข้อมูลของเราจะถูกส่งโดยเปลี่ยนมาใช้ช่องสัญญาณนี้แทน ตามภาพที่ 29 ดังนั้นการสร้างสัญญาณ FHSS จึงเริ่มจาก นำสัญญาณข้อมูลมา modulate แบบ M-ary FSK จากนั้นจึงผ่านเข้าวงจร Mixer ซึ่งจะเป็นวงจรที่คอย shift ความถี่ที่ใช้ในการส่งข้อมูลให้เลื่อนไปเลื่อนมาตามรูปแบบของ PN code ภาพที่ 29 แสดงวงจรการสร้างสัญญาณ FHSS

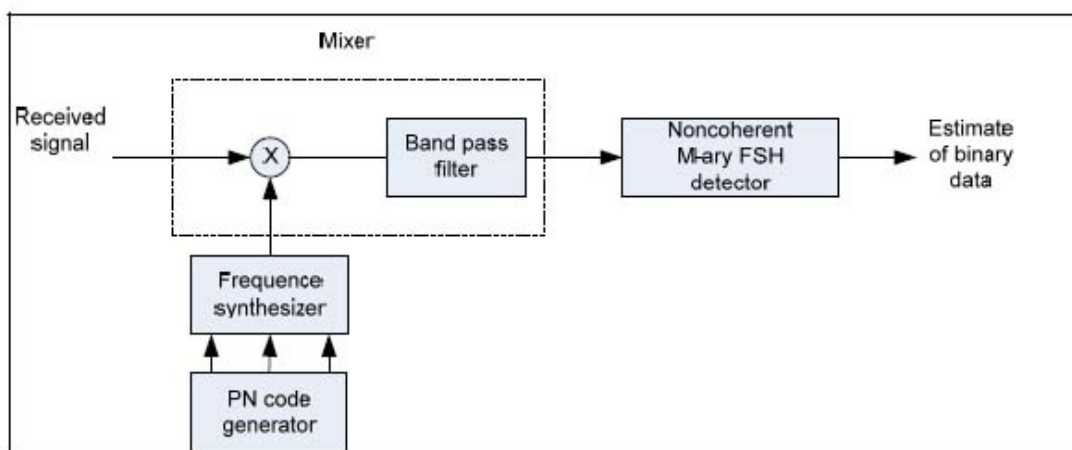


ภาพที่ 29 การเปลี่ยนความถี่ของ FHSS

สำหรับการ Detect สัญญาณ FHSS เริ่มจากรับสัญญาณ FHSS เข้ามาเพื่อทำการเปลี่ยนความถี่ที่ถูกเลื่อนไปตาม PN code ให้กลับมามีความถี่เดิมโดยผ่านวงจร mixer จากนั้นจึงนำไป detect โดยใช้วงจรการ detect สัญญาณ FSK แบบ noncoherent ก็จะได้ สัญญาณข้อมูลกลับมา ภาพที่ 31 แสดงวงจรการ detect สัญญาณ FHSS



ภาพที่ 30 การสร้างสัญญาณ FHSS



ภาพที่ 31 การ Detect สัญญาณ FHSS

4. เทคโนโลยี Bluetooth

Bluetooth เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายที่ออกมารองรับการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น headphone อุปกรณ์ภายนอกต่างๆของเครื่องคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ โดยการสื่อสารของ Bluetooth จะใช้ความถี่ในช่วง 2.4 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่เปิดให้ใช้กันทั่วไปโดยไม่ต้องขออนุญาตหรือเสียเงินซื้อ Bluetooth จะสามารถเชื่อมการติดต่อแบบจุดไปหลายๆจุดได้ไม่ว่าจะเป็นทางเสียง หรือทางการส่งข้อมูล โดยสามารถส่งข้อมูลได้ในระยะ 10 เซนติเมตรถึง 10 เมตร แต่เราสามารถขยายให้เป็นระยะ 100 เมตรได้ถ้าเราเพิ่มกำลังในการส่งให้มากขึ้น

4.1 จุดกำเนิด Bluetooth

เทคโนโลยี Bluetooth เริ่มก่อตัวขึ้นจากความคิดของกลุ่มวิศวกรของบริษัทอีริคสัน (Ericsson) ในปี ค.ศ. 1994 โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาวิธีการรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย โดยใช้คลื่นวิทยุที่มีราคาไม่แพงและมีพลังงานน้อย เพื่อทดแทนการใช้สายเชื่อมระหว่างโทรศัพท์มือถือกับอุปกรณ์เสริมต่างๆ ต่อมาในปี ค.ศ. 1998 ได้มีการจัดตั้งกลุ่ม Bluetooth SIG ขึ้นเพื่อวางแนวทางของมาตรฐานทั้งหมด โดยมีบริษัทยักษ์ใหญ่ 5 บริษัทเป็นสมาชิกยุคก่อตั้ง ได้แก่ อีริคสัน (Ericsson), อินเทล (Intel), ไอบีเอ็ม (IBM), โนเกีย (Nokia) และ โตชิบา (Toshiba) หลังจากนั้นก็มีการเปิดรับสมาชิกของกลุ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนปัจจุบันมีสมาชิกอยู่มากกว่า 1800 บริษัท

สำหรับที่มาของชื่อ Bluetooth กษัตริย์ของเดนมาร์ก ซึ่งในช่วงที่ครองราชย์อยู่นั้น สามารถรวมเดนมาร์กและนอร์เวย์เข้าด้วยกัน เปรียบเสมือนเทคโนโลยี Bluetooth ที่รวมอุตสาหกรรมด้านการสื่อสารและคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกัน จากชื่อ Harald Blatand เมื่อพิจารณาการออกเสียงจากภาษาดั้งเดิมโดยเพี้ยนน้อยที่สุดก็จะได้ชื่อ Bluetooth สาเหตุที่เลือกใช้ชื่อนี้เพราะว่าฮารัลด์ซึ่งเป็นผู้ริเริ่มเทคโนโลยีนี้มีบริษัทแม่อยู่ที่เดนมาร์กนั่นเอง

จุดมุ่งหมายของ Bluetooth มีรายละเอียดดังนี้

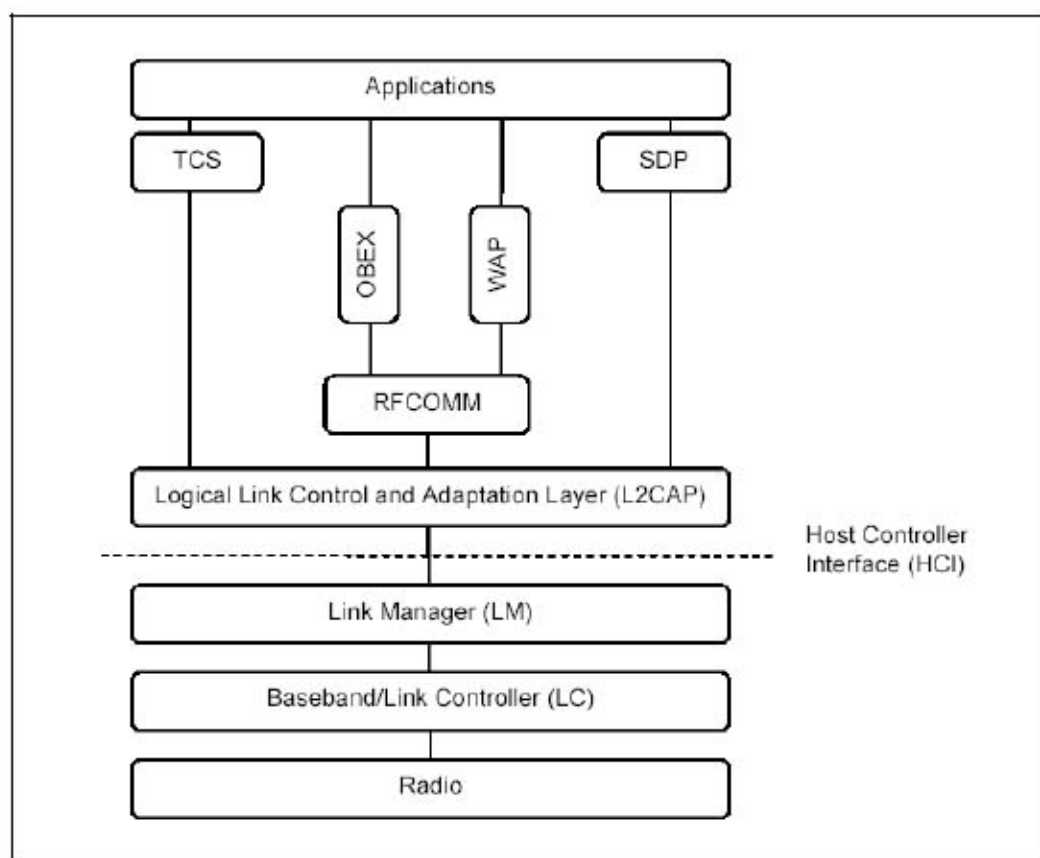
- พัฒนาให้มีราคาถูกสามารถให้คนทั่วไปได้ใช้งาน
- ทำให้มีขนาดเล็กที่สุด เพื่อให้ใช้งานได้สะดวก
- ใช้พลังงานในการทำงานน้อยที่สุดเพื่อให้สามารถติดต่อกันได้โดยไร้ข้อจำกัดต่างๆ
- พัฒนาให้ Bluetooth มีความทนทานในการใช้งานสามารถส่งทั้งข้อมูลและเสียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

มีประสิทธิภาพ

- เป็นมาตรฐานเปิด คือ ให้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปพัฒนาต่อได้ทำให้เทคโนโลยีพัฒนาได้อย่างรวดเร็ว

จุดประสงค์ของ Bluetooth ไม่ใช่แค่การแทนการใช้สายเคเบิล แต่เป็นสิ่งที่ Bluetooth technology จะจัดการให้เองโดยอัตโนมัติ ไม่มีข้อได้เปรียบใดๆสำหรับสายเคเบิล เมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นวิทยุ จริงอยู่ที่สายเคเบิลอาจป้องกันการรบกวนจากแหล่งสัญญาณอื่นได้ดีกว่า แต่ทั้งหมดของทั้งหมดแล้ว Bluetooth เป็นจุดมุ่งหมายสูงสุดในขณะนี้เพื่อจัดการความต้องการในการใช้สายเคเบิลออกไป

นอกจากนั้นแล้วอุปกรณ์ที่ใช้ Bluetooth ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับ load มากๆ จึงไม่เหมาะสมที่จะแทนที่ LANs-WAN และ backbone ซึ่งใช้สายเคเบิลอยู่แล้วแต่เทคโนโลยีนี้จะเหมาะสมในการใช้ในรูปแบบอื่นๆ เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ Bluetooth Protocol stack



ภาพที่ 32 Bluetooth Protocol Stack

Radio layer เป็นชั้นล่างสุดของ Bluetooth Protocol Stack ซึ่งเป็นส่วนที่รับส่งคลื่นวิทยุเป็นส่วนหนึ่งของ hardware ของการรับส่งคลื่นวิทยุที่ถูกควบคุมจากชั้น Baseband ไม่ว่าจะเป็นความถี่และระดับความแรงของสัญญาณที่ใช้ รวมถึง frame ข้อมูลที่จะส่ง โดยจะกระทำอยู่ในช่วงความถี่ ISM band ที่ความถี่ประมาณ 2.4 GHz และใช้การสื่อสารแบบ spread spectrum ซึ่งภายใน band นี้สามารถขยายได้จาก 2400 MHz ไปจนถึง 2483.5 MHz สำหรับการสื่อสารแบบ spread spectrum ที่ใช้ในชั้น Radio นี้คือ เทคนิคการกระโดดเปลี่ยนความถี่ (frequency hopping) โดยสามารถ hop ด้วยความเร็ว 79 hop ใน 1 MHz และในขณะที่มีการใช้ network ร่วมกันหลายคน อาจก่อให้เกิดการรบกวนกันของคลื่น (interference) ได้ อุปกรณ์ Bluetooth จะใช้การกระโดดเปลี่ยนความถี่ที่เร็วมากและขนาดของ packet ที่บรรจุข้อมูลเล็กมากเพื่อหลีกเลี่ยงคลื่นรบกวน และในกรณีที่มีอัตราความผิดพลาดสูงมากโดยเฉพาะ strong interference ที่เกิดจาก microwave ovens ซึ่งจะใช้คลื่นความถี่ในช่วงเดียวกันนี้ อุปกรณ์ Bluetooth สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ CVSD code ซึ่งจะช่วย

แก้ไขเสียงให้ดีขึ้น และสามารถทนต่ออัตราการผิดพลาดที่สูงมากได้ เพราะฉะนั้น packet header จะถูกป้องกันโดย highly redundant error correction เพื่อที่มันจะได้ทนทานต่อความผิดพลาดได้

Baseband และ Link Control Layer เป็นชั้น physical ของ Bluetooth ที่อยู่บนชั้นของ Radio โดยหน้าที่หลักของชั้นนี้ก็คือควบคุมการรับส่งข้อมูลในชั้น Radio และทำการ enable RF link ระหว่างอุปกรณ์ Bluetooth ที่อยู่ในระบบ Piconet เช่น ทำหน้าที่เกี่ยวกับการ paging และการ inquiry เพื่อที่จะ access กับอุปกรณ์ Bluetooth อื่นๆในบริเวณนั้นๆและยังจัดการเกี่ยวกับ physical channel และ link ต่างๆ เช่น การตรวจสอบและการแก้ไขความผิดพลาด , การเขียนข้อมูล , การเลือกจังหวะในการกระโดด และการรักษาความปลอดภัยของอุปกรณ์ Bluetooth โดยมันจะดูแลการเข้ารหัส นอกจากนั้นในชั้นนี้มันยังควบคุมการเข้าจังหวะ (synchronization) และการส่งลำดับของการกระโดดเปลี่ยนความถี่อีกด้วย โดยชนิดของ link ที่นิยามในอุปกรณ์ Bluetooth เราสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ synchronous Oriented (SCO) ซึ่งส่วนมากแล้ว SCO link จะเกี่ยวกับเรื่องเสียง เราสามารถใช้ร่วมกันหลายคนได้ใน RF link เดียวกันได้ และอีกประเภทหนึ่งคือ Asynchronous connectionless (ACL) โดยหน้าที่ของ ACL link จะเกี่ยวกับเรื่องข้อมูล อีกทั้งใน baseband protocol จะทำหน้าที่เหมือน Link Controller ซึ่งจะทำงานร่วมกับ Link manager ในการ carry out link level routines เหมือนกับ link connection power control นอกจากนั้นแล้วใน Baseband ยังให้ฟังก์ชันที่ต้องการเกี่ยวกับการ synchronize clock และทำการติดต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ โดยที่ตัวรับและตัวส่งของอุปกรณ์ Bluetooth จะใช้ time division duplex

4.2 Link Manager Protocol (LMP)

LMP จะทำหน้าที่รับผิดชอบในฟังก์ชันหลักๆดังต่อไปนี้

- การจัดการเกี่ยวกับ Piconet
- Link configuration
- การรักษาความปลอดภัย

นอกจากนั้นในโพรโทคอลชั้นนี้มันยังมีฟังก์ชันในการเพิ่มหรือลดอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสเลฟ (Slave) รวมทั้งสามารถเปลี่ยนบทบาทระหว่างอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นมาสเตอร์ กับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสเลฟ และยังมีส่วนในการติดตั้ง ACL หรือ SCO link อีกทั้งมันยังจัดการ

เกี่ยวกับโหมดการใช้พลังงานต่ำอีกด้วยอันได้แก่ sniff และ park mode เพื่อประหยัดพลังงาน ในขณะที่อุปกรณ์ไม่ได้ส่งข้อมูล สำหรับทางด้านการรักษาความปลอดภัยนั้นจะมีการรับรองอุปกรณ์ที่อยู่ใน link และการจัดการเกี่ยวกับ link key ด้วย

Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP) ชั้น L2CAP จะให้บริการทางด้าน Connection oriented และ Connectionless กับ layer ที่อยู่ชั้นบนๆ หน้าที่สำคัญของ L2CAP สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังนี้

- Multiplexing ในส่วนนี้จะต้องให้ผู้ใช้หลายๆคนหรืองานหลายๆงานสามารถใช้ร่วมกันได้ในเวลาเดียวกัน
- Segmentation and Reassembly ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการลดขนาดของแพ็กเก็ตเกิดลงเพื่อที่จะให้ใช้งานได้ในชั้นของ Baseband เนื่องจากว่าแพ็กเก็ตที่อยู่ในชั้นของ Baseband นั้นโดยปกติแล้ว L2CAP จะยอมรับขนาดของแพ็กเก็ตขนาดมากกว่า 64 กิโลบิต แต่ว่าที่ชั้นของ Baseband นั้น โดยปกติจะยอมรับขนาดของแพ็กเก็ตได้มากที่สุด 2.745 กิโลบิต ดังนั้นจึงต้องมีการลดขนาดของ packet เพื่อให้ใช้งานได้ นอกจากนั้นมันยังต้องสามารถที่จะรวมขนาดของ packet ให้ข้อมูลที่อยู่ใน packet เหมือนเดิม เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดระหว่างผู้รับและผู้ส่ง และในการ segmentation หรือ Reassembly เราจะใช้ข้อมูลใน logical channel ของ Baseband ในการตัดสินใจเริ่มต้นของ L2CAP packet
- Quantity of Service ในส่วนนี้จะอนุญาตให้ application นั้นขึ้นกับปริมาณของการให้บริการทางคุณภาพโดยที่ L2CAP จะให้ QoS กับ parameters ที่เกี่ยวกับ peak bandwidth, latency และ delay variation

RFCOMM (มาจาก Radio Frequency – oriented emulation of the serial COM ports on a PC) เป็นโพรโทคอลที่เสมือนทำให้ application ด้านบนมอง Bluetooth เป็นเหมือนพอร์ตอนุกรม (serial port)

Service Discover Protocol (SDP) เป็นโพรโทคอลที่ช่วยค้นหาบริการจากอุปกรณ์ Bluetooth ตัวอื่นที่อยู่ในขอบเขตพิโคเน็ตเดียวกัน นอกจากนั้นแล้ว SDP ยังสามารถที่จะตรวจสอบบริการที่ไม่มีการใช้อยู่ในระยะเวลาเดียวกันนานเกินไปอีกด้วย

SDP เป็นตัว enable การกู้ข้อมูลซึ่งใช้ config stack เพื่อการรองรับหลายๆ application SDP สามารถที่จะหาบริการของผู้ใช้ที่อยู่ข้างเคียงได้ และผู้ใช้สามารถเลือกใช้บริการเหล่านั้นได้

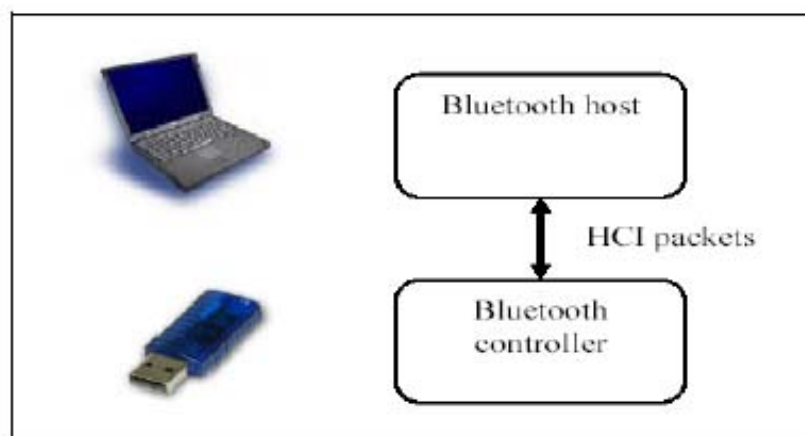
Application Layer เป็นชั้นที่อยู่บน Radio, Baseband, LPM, HCL, L2CAP และ RFCOMM ซึ่งในชั้นนี้จะเป็นชั้นของการประยุกต์ใช้งานต่างๆ โดยจุดประสงค์ของ Bluetooth มีดังนี้

- Three in one phone single handset สามารถทำงานเป็นได้ทั้ง intercom ใน office และจะเป็น PSTN phone เมื่อ access point เป็น PSTN และในทางกลับกันก็สามารถเป็น mobile ได้ถ้า access point เป็น mobile
- The Briefcase Trick: RF link ไม่จำเป็นต้องใช้ line of sight ดังนั้น mobile สามารถที่จะติดต่อกับ laptop ได้ขณะที่มันอยู่ภายในกระเป๋าเอกสารที่ปิดอยู่ ดังนั้นเมื่อต้องการติดต่อกับอุปกรณ์ก็สามารถทำได้ เช่นถ้ามี email เข้า เราก็สามารถ check ได้ในทันทีเนื่องจาก RF link จะทะลุผ่านกระเป๋าเอกสารได้แล้วส่งสัญญาณมายังเครื่อง laptop ของเรา
- The Automatic synchronizer: Seamless connectivity ระหว่างผู้ใช้ PDA, laptop และ mobile จะให้ application ในการ update อัตโนมัติและสามารถ synchronize schedules กับ data อื่นได้เมื่อเราได้ modify ที่อุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่ง Wireless headset: application นี้จะให้การ access กับผู้ใช้ mobile กับ audio services แม้ว่าอุปกรณ์จะอยู่ใน pocket ดังนั้นการทำงานของ headset free สามารถเป็นไปได้ Car Kits: ชุด car kits จะใช้อุปกรณ์ hands free ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้สามารถ access ผ่านโทรศัพท์

4.3 Host Controller Interface (HCI)

อุปกรณ์ Bluetooth จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ Host กับ controller ในส่วน Bluetooth Host คืออุปกรณ์ที่มีหน้าที่เกี่ยวกับการคำนวณต่างๆเช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ access point to PSTN network หรือระบบ LANs โดย host จะเป็นตัวจัดการ layer สูงๆของ Bluetooth protocol stack ส่วน Controller คืออุปกรณ์ที่เป็นระบบย่อยๆของ Bluetooth ซึ่งจะประกอบด้วย Bluetooth RF, baseband, resource controller, link manager, device manager และ Bluetooth HCI โดย controller จะเป็นตัว

จัดการ layer ต่างๆของ Bluetooth Protocol stack HCI คือ Protocol ที่มีไว้สำหรับเชื่อมต่อ host กับ controller โดยจะประกอบไปด้วยคำสั่งที่ติดต่อไปยัง Baseband controller และ link manager และการ access ไปยังสถานะของอุปกรณ์ Bluetooth นอกจากนั้นมันยังช่วยให้มีการติดต่อสื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์ที่มาจากบริษัทที่มีกรรมวิธีการผลิตที่แตกต่างกันด้วย



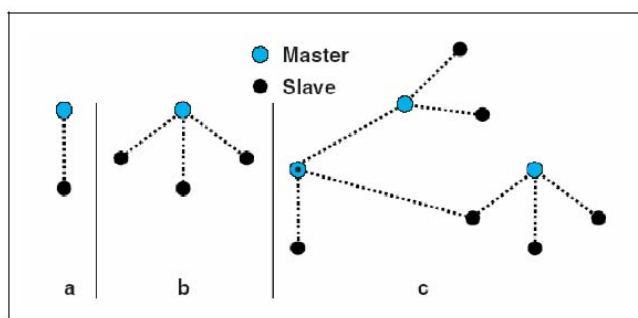
ภาพที่ 33 Host controller interface

4.4 การทำงานของ Bluetooth

Network topology การสื่อสารกันของอุปกรณ์ Bluetooth นั้นจะเป็นการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ที่เป็น Master กับ Slave ซึ่งส่วนมากอุปกรณ์ที่เป็นตัวเริ่มต้นการติดต่อจะเป็น master เครื่องข่าย Bluetooth สามารถสื่อสารกันทั้งในรูปแบบของ point to point และ point to multipoint หรือที่เรียกว่า piconet

ระบบ Piconet ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักตัวหนึ่งที่เรียกว่า Master ซึ่งจะทำหน้าที่ในการ synchronize clock ให้กับอุปกรณ์ที่มาต่อร่วมกัน โดยที่อุปกรณ์อื่นๆที่มาต่อกับ Master จะเรียกว่า Slave โดยในระบบ Piconet หนึ่งจะมี Master ได้เพียงตัวเดียวแต่ Slave จะมีได้มากที่สุด 7 ตัว โดย Slave แต่ละตัวที่อยู่ในสถานะ active จะมี address ของตัวเองซึ่งเรียกว่า logical transport address (LT_ADDR) มี 3 bit ซึ่ง LT_ADDR ที่มีค่าเป็น 000 จะใช้ในกรณีที่เป็น broadcast messages ดังนั้นใน 1 piconet จึงสามารถมี Slave ได้มากที่สุด 7 ตัว

ระบบ Scatternet เมื่อระบบมี Piconet ตั้งแต่ 2 Piconet ที่อิสระต่อกันและไม่ synchronize กับ Piconet อื่น มาต่อรวมกัน เราจะเรียกระบบนี้ว่า “Scatternet” โดยในระบบนี้ อุปกรณ์ที่เคยเป็น Master ของ Piconet หนึ่งสามารถเปลี่ยนหน้าที่มา เป็น Slave ของอีก Piconet หนึ่งได้ หรือ slave



ภาพที่ 34 a). point to point piconet b). point to multipoint piconet c). scatter with three Piconet

รูปแบบ Packet ที่ใช้ใน Bluetooth จะส่งข้อมูลเป็น timeslot โดยแต่ละ timeslot จะใช้ระยะเวลา 625 microsecond โดยแต่ละ time slot จะมีหมายเลขของตัวเอง ซึ่ง Master จะส่งข้อมูลใน time slot ที่เป็นเลขคู่ ส่วน Slave จะส่งข้อมูลใน time slot ที่เป็นเลขคี่

Packet ของ Bluetooth จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนดังนี้

- Access code มีขนาดเท่ากับ 72 บิต ประกอบด้วยข้อมูลเกี่ยวกับ signaling, การ synchronize, การ access piconet และกระบวนการ inquiry และ paging
- Packet header code มีขนาดเท่ากับ 54 บิต ซึ่งจะประกอบด้วยข้อมูลเกี่ยวกับ packet และ link เช่น ชนิดของข้อมูล, address ของ slave ตัวที่ active เป็นต้น
- Payload มีขนาดเท่ากับ 0 – 2745 บิต เป็นส่วนของข้อมูลในชั้น application ที่ต้องการส่ง และ header ของชั้นที่สูงกว่า baseband

LSB68/72	54	0-2745	MSB
Access code	Packet header code	payload	

ภาพที่ 35 Packet ของ Bluetooth

4.5 Link type ในการเชื่อมต่อกันระหว่าง Master และ Slave มีชนิดของ link ดังนี้

4.5.1 Synchronous transport

ก. Synchronous Connection-Oriented (SCO) logical transport การเชื่อมต่อแบบนี้เป็นการเชื่อมต่อแบบ Point to point ซึ่งสามารถรองรับการส่งข้อมูลแบบ real time เช่น ข้อมูลเสียง ดังนั้น SCO packet จึงไม่มีส่วนของ error control และไม่มีการส่ง acknowledge หรือการส่ง packet เข้า Master สามารถให้ SCO link จำนวนมากที่สุด 3 link กับ slave 1 ตัว หรือมากกว่าก็ได้ และ slave สามารถเชื่อมต่อกับ Master SCO link ได้มากที่สุด 3 link เมื่อมาจาก Master ตัวเดียวกันและ 2 SCO link เมื่อมาจาก Master คนละตัว

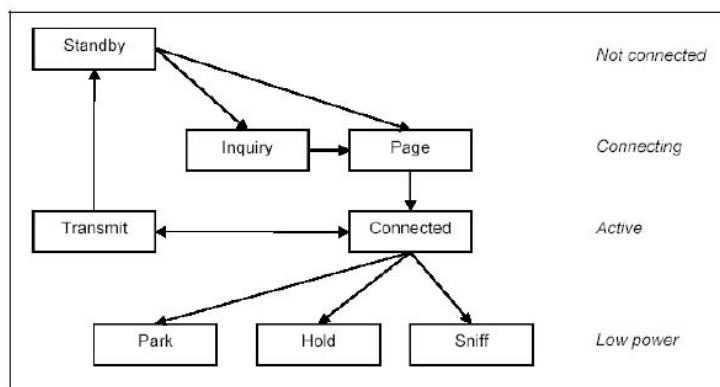
ข. Extended Synchronous Connection-Oriented (eSCO) logical transport SCO เป็น link ระหว่าง Master กับ specific slave ซึ่งอาจจะสมมาตรหรือไม่สมมาตรก็ได้ eSCO จะเก็บ slot ไว้และทำ circuit switch ระหว่าง Master และ specific slave ตัวนั้น

4.5.2 Asynchronous transport

ก. Asynchronous Connection-oriented (ACL) logic transport ACL เป็น packet switch link ซึ่งรองรับทั้งการส่งข้อมูลที่เป็น asynchronous และ isochronous ACL เป็น link ที่มีความเชื่อถือในการส่งข้อมูลเพราะมีการทำ error control และการส่งข้อมูลซ้ำเมื่อเกิดความผิดพลาด และมีการส่ง acknowledge เพื่อสำรวจความเรียบร้อยของข้อมูลที่ส่งหน้าที่ของ ACL link ส่วนใหญ่จึงเกี่ยวกับเรื่องข้อมูล

ข. Active Slave Broadcast (ASB) logic transport เป็น Link ที่ Master จะใช้ติดต่อกับ Slave ที่อยู่ในสถานะ active

ก. Parked Slave Broadcast (PSB) logic transport เป็น Link ที่ Master จะใช้ติดต่อกับ Slave ที่อยู่ในสถานะ parked



ภาพที่ 36 State ของ Bluetooth

สถานะการทำงานของ Bluetooth อุปกรณ์ Bluetooth จะต้อง อยู่ใน state ใด state หนึ่ง ในรูป 129 โดย Standby state จะเป็นstate เริ่มต้นของอุปกรณ์ Bluetooth โดยใน state นี้จะฟังข้อมูลจากอุปกรณ์ตัวอื่น จากนั้นจึงเข้าสู่inquiry state เพื่อหาอุปกรณ์ใหม่ที่อยู่ในระบบ โดยที่ความถี่ของเครื่องส่งและเครื่องรับจะเป็นไปตาม inquiry sequence ,inquiry response hopping sequence และถูกตัดสินใจโดย inquiry access codeและ native clock ของอุปกรณ์ที่เราหาเจอ และเมื่ออุปกรณ์เริ่มสร้าง Bluetooth link ก็จะเข้าสู่ Pagestate ใน Mode ประหยัดพลังงานจะมี state ที่สำคัญ ๆ อยู่ 3 state คือ Sniff mode โหมดนี้จะเป็นโหมดพลังงานต่ำซึ่งจะคอยฟังแค่ activity ของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Slaveและในอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Master จะให้คำสั่งไปยังอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Slave เพื่อเข้าสู่Sniff mode และจะให้ Sniff interval Tsniff , offset DSniff และ จำนวนของ attempt NSniffในช่วงของ Sniff mode นั้นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Slave จะคอยฟังการส่งเพียงแค่ช่วงเวลาที่เรากำหนด Tsniff และที่ offset DSniff สำหรับ NSniff times โดยที่ในโหมดนี้อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นSlave จะลด duty cycle ในการรับฟังอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Master ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ Hold mode เราจะพบว่า Sniff mode นี้จะยืดหยุ่นมากกว่า เนื่องจาก Sniff mode นี้จะถูกยกเลิกได้ถ้าอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Slave ร้องขอให้มีการยกเลิก แต่ในโหมดนี้ไม่เหมาะกับการส่งข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ๆ เพราะว่าอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Slaveจะคอยฟังเป็นช่วงๆเท่านั้น 2. Hold modeในโหมดนี้ ACL link ที่ส่งไปยังอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Slave จะถูก hold ซึ่งหมายความว่าอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็น Slave จะคอยฟัง active member address ของตัวมันเองและจะไม่ support กับ ACL

packet ใน hold mode นี้ capability สามารถนำมาใช้ในการ scanning paging inquiry หรือการสนใจกับ Piconet อื่น ในโหมดนี้เหมาะกับอุปกรณ์ที่รู้ล่วงหน้าว่าจะมีข้อมูลส่งมาเมื่อไหร่ 3. Park mode ในโหมดนี้จะเป็นโหมดที่ประหยัดพลังงานมากๆ ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Slave จะมี activity น้อยมากเมื่ออยู่ในโหมดนี้ โดยที่ในโหมดนี้อุปกรณ์ต่างๆจะไม่สามารถรับส่งข้อมูลได้และไม่สามารถที่จะติดตั้ง SCO link และยังไม่สามารถที่จะมีส่วนร่วมใน Piconet ได้อีกด้วย แต่มันยังคงสามารถที่จะ synchronize กับช่องสัญญาณได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์มากกับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Master เพราะว่ามันสามารถที่จะ support กับอุปกรณ์อื่นได้มากกว่า 7 ตัวแต่ต้องมีอุปกรณ์ที่ active อยู่ไม่เกิน 7 ตัว ส่วนอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น Slave ที่อยู่ใน park mode นั้นจะต้องตื่นขึ้นมาเป็นระยะๆเพื่อทำการ resynchronize กับช่องสัญญาณ และคอยฟัง broadcast message ซึ่งมีตัวอย่างการใช้งานของระบบการสื่อสารไร้สาย bluetooth ดังนี้

- Bluetooth mouse สามารถใช้จากกระยะไกลๆได้จากจอและขยับไปทั่วห้องได้ด้วย
- Bluetooth keyboard สามารถใช้ไกลจากจอได้ซึ่งลดความเครียดจากการใช้สายตาและอันตรายจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากจอ
- Bluetooth headphone



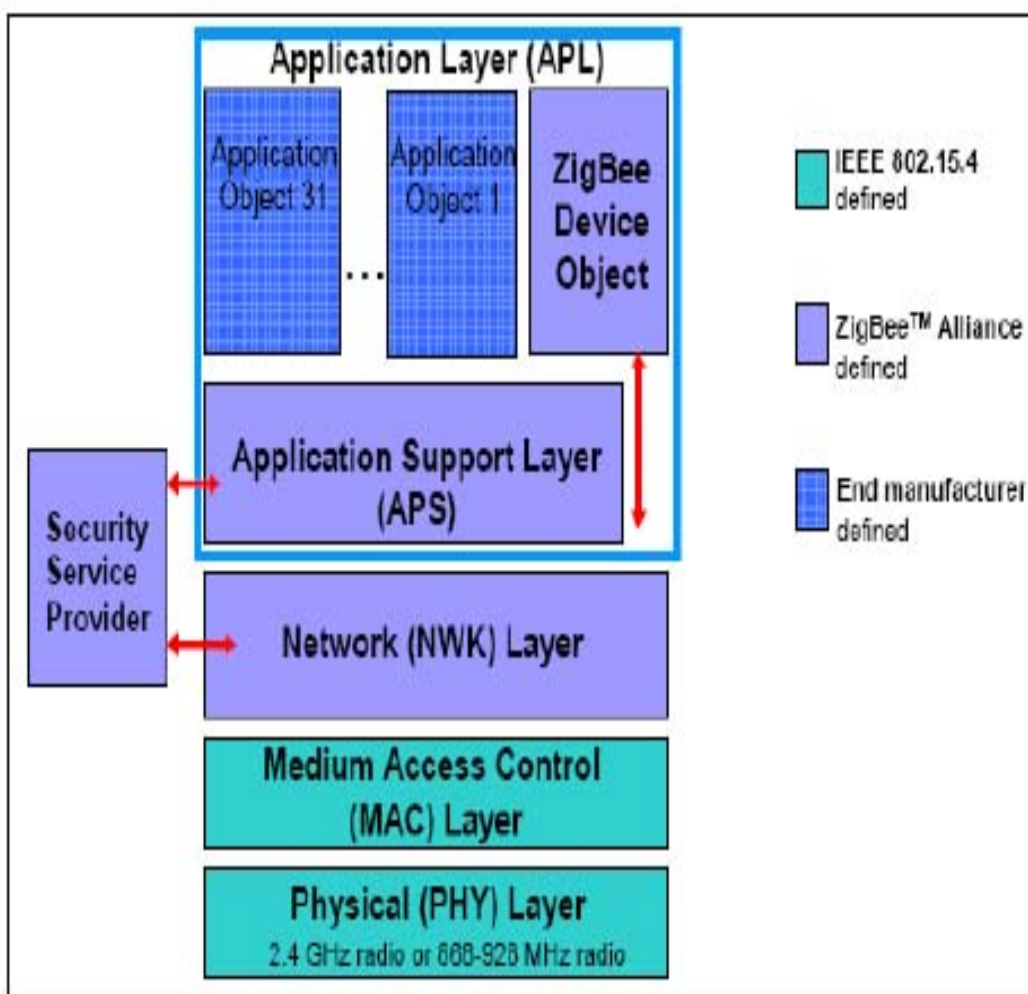
ภาพที่ 37 Bluetooth headphone

4.7 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 เป็น standard ของชั้น Physical (PHY) และ Media Access Control (MAC) สำหรับอุปกรณ์ที่เป็น low rate wireless communication วัตถุประสงค์ของ 802.15.4 คือเพื่อการใช้พลังงานน้อย และสำหรับอุปกรณ์ที่ราคาไม่แพง 802.15.4 เป็นการส่งข้อมูลที่เป็น reliable คือสามารถเชื่อถือได้มีความถูกต้องสูงและสามารถใช้ได้ทั้งใน star และ peer to peer network topology

4.8 Zigbee

Zigbee เป็นมาตรฐานสำหรับเครือข่ายไร้สายสำหรับพื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network: WPAN) ที่กลุ่ม Zigbee Alliance และ IEEE ออกร่วมกัน ซึ่งถูกออกแบบสำหรับอุปกรณ์ไร้สายที่การข้อมูลอัตราเร็วต่ำ ใช้พลังงานน้อย มีระยะเวลาการใช้งานที่นาน และราคาถูกเช่นในระบบอัตโนมัติ และอุปกรณ์ควบคุมระยะไกลต่าง ๆ ในสถาปัตยกรรมของ Zigbee ประกอบด้วย Physical Layer และ Medium Access Control (MAC) Layer ซึ่งอ้างอิงบนมาตรฐาน 802.15.4 PAN (Personal Area Network) ของ IEEE และส่วน Network Layer และ Application Support Layer จะถูกกำหนดโดย Zigbee Alliance ซึ่งผู้ผลิต อุปกรณ์แต่ละรายสามารถที่จะพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ของตนเองได้บนชุดพัฒนาของผู้พัฒนาโปรโตคอล



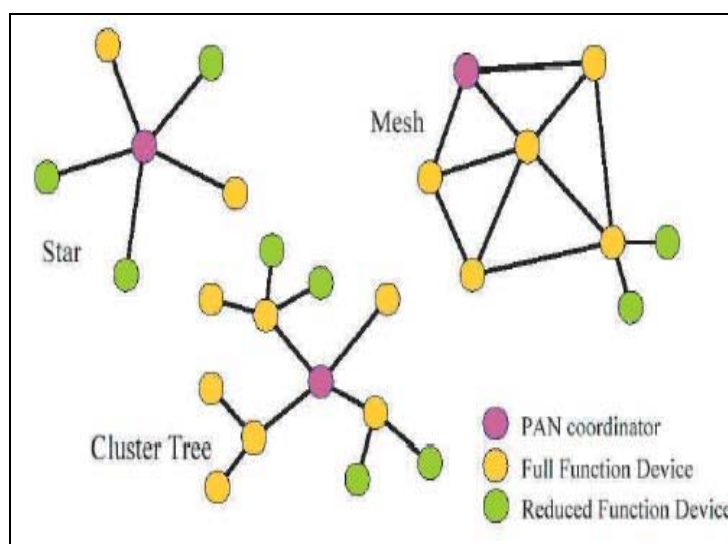
ภาพที่ 38 โพรโทคอล Zigbee

มาตรฐาน Zigbee กำหนดย่านความถี่ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ 2 ช่วงคือ ย่าน 2.4 GHz หรือ 868/915 MHz โดยในย่านความถี่ที่ 2.4 GHz จะมีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุด 250 kbps ส่วนย่านความถี่ 915 MHz จะมีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุด 40 kbps และที่ย่านความถี่ 868 MHz จะรับส่งข้อมูลได้สูงสุด 20 kbps ดังในตาราง 17 โดยที่ความถี่สูงจะสามารถส่งข้อมูลได้รวดเร็วกว่าแต่มีพื้นที่ครอบคลุมแคบกว่าการใช้ย่านความถี่ต่ำ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้อย่านความถี่ได้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่จะนำไปใช้งานจริง และสามารถเลือกใช้ได้เหมาะกับการจัดสรรคลื่นความถี่ของประเทสนั้น ๆ แสดงการใช้งานย่านความถี่ของ Zigbee

ตารางที่ 2 โครงสร้างเครือข่าย Zigbee (Zigbee Network model)

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameter		Data parameter		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Symbols
868/915	868 – 868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902 – 928	600	BPSK	40	40	Binary
2450	2400 – 2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

มาตรฐาน Zigbee แบ่งอุปกรณ์ตามฟังก์ชันการทำงานได้เป็น 2 ชนิดคือ อุปกรณ์ที่มีความสามารถสมบูรณ์ (Full Function Device: FFD) และอุปกรณ์ที่มีความสามารถไม่ครบ (Reduced Function Device: RFD) โดย FFD สามารถทำหน้าที่ภายในเครือข่ายได้ 3 แบบคือ Personal Area Network (PAN) coordinator เราเตอร์ (Router) และ อุปกรณ์ปลายทาง (End device) และ RFD ใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์ปลายทางเท่านั้น โดย RFD จะสามารถสื่อสารกับ FFD เพียงตัวเดียวเท่านั้นและไม่สามารถสื่อสารกับ RFD ด้วยกันได้ แต่ FFD สามารถสื่อสารได้กับทั้ง RFD และ FFD ด้วยกันเอง

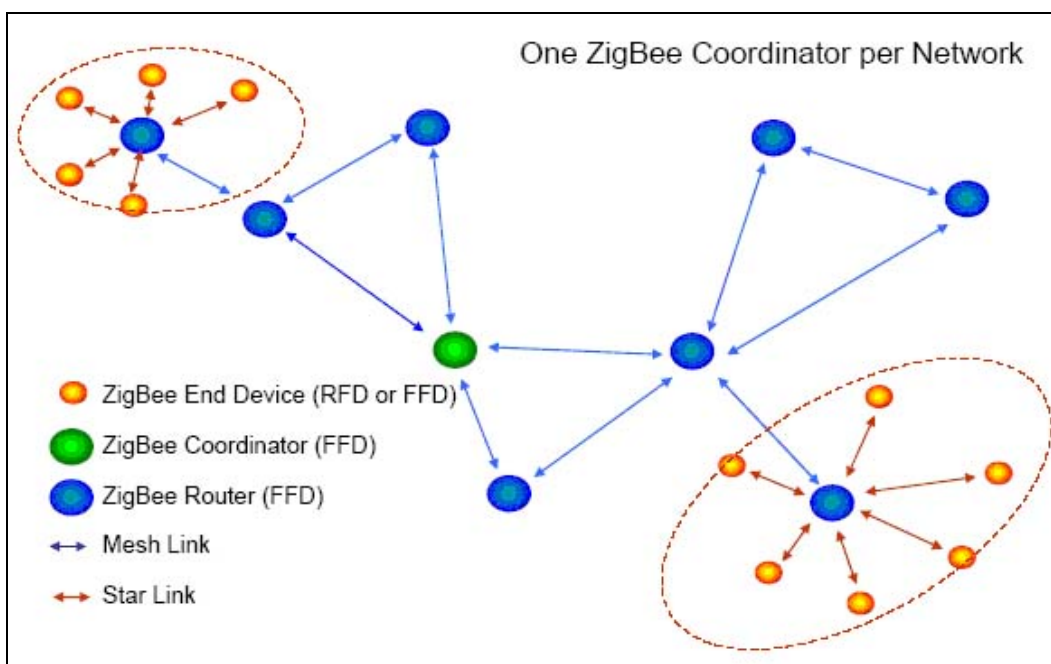


ภาพที่ 39 โทโพโลยีของ Zigbee

โทโพโลยีของ Zigbee มี 3 ชนิดดังรูป 39 คือ

- แบบดวงดาว (Star topology) เป็นโทโพโลยีเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์ปลายทาง และศูนย์กลางควบคุมเพียงตัวเดียวหรือ PAN Coordinator ซึ่งอาจจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ไฟเลี้ยงจากภายนอกในขณะที่อุปกรณ์ปลายทางใช้แหล่งจากไฟจากแบตเตอรี่ เมื่อ FFD ซึ่งทำหน้าที่เป็น PAN Coordinator เริ่มทำงานจะสร้าง PAN ID ซึ่งไม่ซ้ำกับ PAN อื่นซึ่งทำให้สามารถสถาปนาเครือข่ายโดยไม่ขึ้นกับเครือข่ายวงอื่น โทโพโลยีลักษณะนี้เหมาะจะนำไปใช้กับการเชื่อมโยงอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ของเล่น เกมส์ หรือ home automation เป็นต้น
- แบบจุดต่อจุด (peer-to-peer topology) เป็นโทโพโลยีที่มีศูนย์กลางหรือ PAN Coordinator เพียงตัวเดียวเช่นเดียวกับแบบดวงดาว แต่โทโพโลยีแบบจุดต่อจุดอุปกรณ์ปลายทางซึ่งเป็น FFD แต่ละตัวสามารถสื่อสารกันเองได้ด้วยทำให้สามารถสร้างรูปแบบเครือข่ายแบบ ad-hoc ได้และสามารถสร้างเส้นทางการส่งข้อมูลต่อกันไปจนถึงจุดหมายได้หลากหลายเส้นทางทำให้เครือข่ายมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยโทโพโลยีนี้เหมาะสมกับงานควบคุมอุตสาหกรรม การตรวจสอบ และ Wireless sensor network เป็นต้น
- แบบกิ่งก้านสาขา (Cluster tree) เป็นโทโพโลยีแบบจุดต่อจุดแบบพิเศษ โดยใช้ PAN Coordinator ตัวเดียวเช่นกัน และแต่ละเครือข่ายสื่อสารกันผ่าน PAN Coordinator โดยเมื่อเริ่มต้นทำงาน PAN Coordinator จะตั้งตัวเป็นหัวหน้าคลัสเตอร์ (Cluster head: CLH) และมีหลายเลขคลัสเตอร์ (Cluster ID: CID) และกำหนด PAN ID จากนั้นจึงกระจาย beacon frame ไปยังอุปกรณ์ข้างเคียง เมื่ออุปกรณ์ที่ต้องการร่วมเครือข่ายได้รับ beacon frame ก็จะส่งข้อมูลร้องขอเข้าร่วมเครือข่าย ซึ่งถ้าได้รับการอนุญาตจาก CLH ก็จะถูกเพิ่มรายชื่อลง neighbor list และอุปกรณ์ที่เข้าร่วมก็จะเพิ่มชื่อของ CLH ลงใน parent list และทำการกระจาย beacon frame ต่อไปอีกเพื่อหาอุปกรณ์ลูกข่ายต่อไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะครอบคลุมทั้งหมด ข้อดีของโทโพโลยีแบบนี้คือมีพื้นที่ครอบคลุมกว้างแต่ก็เสียเวลาในการส่งข้อมูลมากขึ้นด้วยเช่นกัน

เครือข่าย Zigbee สามารถปรับเปลี่ยนและผสมผสานโทโพโลยีหลาย ๆ แบบเพื่อให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งานของระบบต่าง ๆ ดังรูป 136 การเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์ปลายทางกับเราเตอร์จะใช้โทโพโลยีแบบดวงดาว ซึ่งเราเตอร์จะเป็นศูนย์กลางการควบคุมการรับส่งข้อมูล และเราเตอร์แต่ละตัวกับ Coordinator จะเชื่อมโยงกันแบบจุดต่อจุด ทำให้เครือข่าย Zigbee มีความยืดหยุ่นและสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการของผู้ใช้งานได้หลากหลายและมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 40 โครงสร้างเครือข่าย Zigbee

องค์ประกอบภายในเครือข่าย มีส่วนประกอบคือ Client transceiver module เป็นส่วนเชื่อมต่อกับมาตรวัดเพื่อสร้างเครือข่ายท้องถิ่นของคลื่นความถี่ ตัวรับส่งสัญญาณสามารถสื่อสารได้ทั้ง Client ด้วยกันและ Server โดยใช้โพรโทคอลสำหรับการสื่อสารท้องถิ่นแบบไร้สาย (WPAN : Wireless Personal Area Network) Server transceiver module เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูล โดยจะรับข้อมูลจาก Client Head end data processing system ควบคุมดูแลระบบทั้งหมด โดยจะเก็บข้อมูลจาก Server ทั้งหมดมาใช้ในการประมวลผลข้อมูล

End point หรือบางครั้งเรียกว่า node ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ

- Processing subsystem ทำหน้าที่ประมวลผลและควบคุมการทำงาน
- Application subsystem ทำหน้าที่ตามแต่ละจุดประสงค์ของการใช้งาน เช่น ตรวจสอบอุณหภูมิ ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กโลก เป็นต้น
- Radio subsystem ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลแบบไร้สาย เพื่อทำการส่งข้อมูลไปยังปลายทางที่ต้องการ

- Power subsystem ทำหน้าที่จ่ายพลังงาน

โดยบาง End point อาจมีความสามารถในการหาเส้นทางด้วยเกตเวย์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่าง End point ในระบบกับ End point ในระบบเครือข่ายอื่น ๆ ให้เป็นแบบเวลาจริง (Real-Time) ตัวอย่างของระบบเครือข่ายอื่น เช่น ในระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ไร้สาย เป็นต้น โดยเกตเวย์ทำหน้าที่เชื่อมต่อเครือข่าย แปลงรูปแบบข้อมูล บีบอัดข้อมูล รวมถึงจัดการเกี่ยวกับการเรียก (Call) ด้วย

5. การเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีต่างๆ

5.1 Wireless LANs กับ Bluetooth

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบ Bluetooth กับ WLAN

หัวข้อ	IEEE 802.11b&802.11a	Bluetooth
Time table	Stand in 1998 , product in 2000	Standard in 2000 , product in 2001
Frequency band and bandwidth	IEEE 802.11b -2.4 GHz IEEE 802.11a – 5 GHz IEEE 802.11g – 2.4 GHz	2.4 GHz
Speed	11 Mbps – 5.4 Mbps	1 – 2 Mbps
Modulation Technique	Spread spectrum OFDM	-
Distance Coverage	น้อยกว่า 300 ฟุต - 802.11b น้อยกว่า 60 ฟุต - 802.11a	น้อยกว่า 30 ฟุต
จำนวน access point	ทุกๆ 200 ฟุต - 802.11b ทุกๆ 50 ฟุต -802.11a	ทุกๆ 30 ฟุต
ความต้องการของตลาด	เป็นที่ต้องการของตลาดส่วนใหญ่	เพิ่งเริ่มต้นเมื่อปี 2002

5.2 Bluetooth กับ IrDA

จุดดีของ Bluetooth ที่ IrDA ไม่มีก็คือ ความสามารถที่จะส่งข้อมูลผ่านวัตถุที่ขวางได้เช่น กำแพงหรือกระเปาะเอกสาร เมื่อเปิด link การทำงานแล้ว อุปกรณ์ที่ใช้ Bluetooth ไม่จำเป็นต้องอยู่กับที่จึงจะใช้งานได้ ค่าใช้จ่ายในการนำ Bluetooth มาใช้งานก่อนข้างจะสูงกว่า IrDA ขณะนี้การนำ IrDA มาใช้นั้นอยู่ที่ประมาณ 2 ดอลลาร์ ในขณะที่ Bluetooth อยู่ที่ประมาณ 20 ดอลลาร์ แต่หลังจากเริ่มใช้จริงแล้ว ราคาของ Bluetooth น่าจะลดลงมาอยู่ที่ 5 ดอลลาร์ได้

IrDA กับ Bluetooth ใช้ได้กับอุปกรณ์กลุ่มเดียวกัน วิธีที่ Bluetooth จะประสบความสำเร็จได้ทั้งที่มีเทคโนโลยีอย่าง IrDA อยู่แล้วคือ ทั้งสองอุปกรณ์จะสามารถอยู่ร่วมกันได้ เนื่องจากมีจุดเสียในตัวของมันเองที่แตกต่างกันออกไป ในกรณีที่ต้องการรับส่งข้อมูลแบบชี้หาเครื่องเป้าหมาย และอยู่ในฝูงชนที่ผู้คนต่างๆ ที่กำลังทำกิจกรรมคล้ายๆกับที่เราทำ อุปกรณ์ IrDA จะเหมาะสมสถานการณ์อย่างนี้มากกว่า ถ้าในสถานการณ์แบบนี้อุปกรณ์ที่ใช้ Bluetooth ซึ่งจะส่งคลื่นวิทยุออกแบบรอบทิศทางจะมีปัญหาเกี่ยวกับการระบุอุปกรณ์ที่ต้องส่งข้อมูลไป

5.3 Zigbee กับ Bluetooth

Zigbee จะมีลักษณะความคล้ายคลึงกับ Bluetooth เนื่องจากถูกออกแบบมาเพื่อในเครือข่าย PAN เช่นเดียวกัน แต่ Zigbee จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าเนื่องจาก Bluetooth ถูกออกแบบสำหรับอุปกรณ์สื่อสารและ PDA ทำให้สามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลายรูปแบบเช่น การรับส่งข้อมูลเสียง รูปภาพ หรือไฟล์ เป็นต้น Zigbee จะแตกต่างจาก Bluetooth ทั้งความเร็วในการรับส่งข้อมูล ระยะในการส่งข้อมูล การใช้พลังงาน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบมาตรฐาน Zigbee กับ Bluetooth

Zigbee	Bluetooth
• 802.15.4 standard	• 802.15.1 standard
• 250 kbps	• 1 Mbps
• TX: 35 mA	• TX: 40 mA
• Standby: 3 uA	• Standby: 200 uA
• 32-60 KB memory	• 100+ KB memory

Wireless Sensor Network

การประยุกต์ใช้งานของระบบสื่อสารอย่างกว้างขวางของเทคโนโลยีระบบเครือข่ายไร้สายในปัจจุบันมีจำนวนมากและหลากหลาย หนึ่งในหลายการประยุกต์คือระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่รวมความสามารถของการสื่อสารไร้สายและหน่วยควบคุมขนาดเล็กเข้าไว้ด้วยกันในอุปกรณ์ตรวจจับและสามารถไปประยุกต์ใช้งานกับทุกอย่างที่สามารถตรวจจับได้ โดยเชื่อมต่อด้วยคลื่นวิทยุระยะสั้นขนาดเล็ก โดยข้อมูลสามารถไปยังปลายทางซึ่งอาจจะเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหรืออุปกรณ์รับรู้ไร้สายขนาดเล็กก็ได้ (BEUTEL, JAN. 2005)

ระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นแต่ละยุคสมัยจะมีความแตกต่างกันออกไป เช่นเดียวกับสมัยการพัฒนาเมนเฟรมคอมพิวเตอร์ไปยังคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยปัจจุบันอุปกรณ์รับรู้ไร้สายมีส่วนจำเป็นในการประยุกต์ใช้งาน 3 ประการคือ

- การใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับหลายๆอุปกรณ์ ที่ทำงานรวมกันในสถานะที่มีทรัพยากรต่างๆในระบบเพียงเล็กน้อย
- การเชื่อมต่อภายในโครงสร้างของอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ โปรแกรมประยุกต์ อุปกรณ์ และสภาพแวดล้อม
- โครงร่างของการประยุกต์ใช้งานที่กว้างพอ สำหรับผู้ใช้งานที่ชำนาญ จนกระทั่งที่ผู้ใช้งานที่ไม่มีความชำนาญ

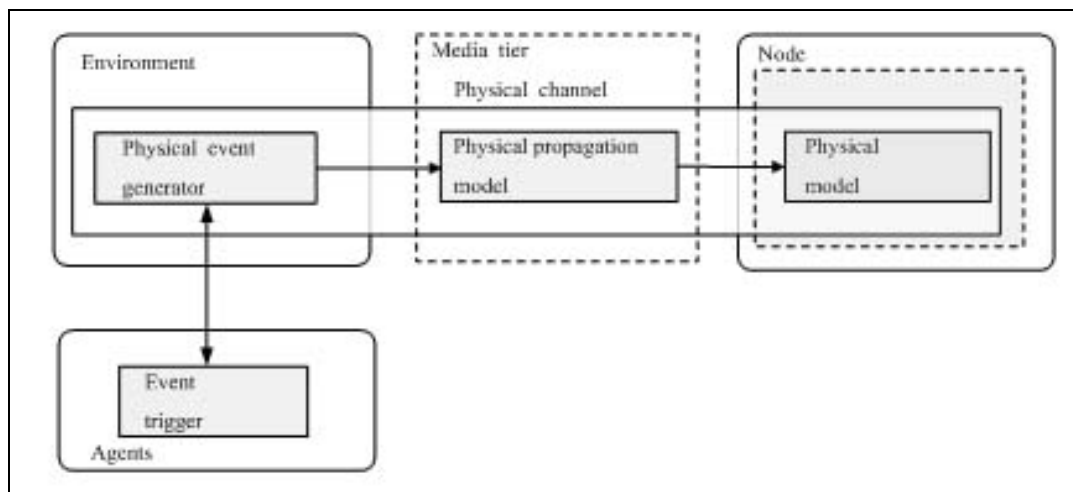
สำหรับการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์รับรู้ไร้สายเบื้องต้น จะนิยามระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย คือ อุปกรณ์รับรู้ไร้สายหลายๆ ตัว ที่ประกอบไปด้วยความสามารถต่างๆ เช่น ความสามารถในการรับรู้ คำนวน และการสื่อสารแบบไร้สาย มาเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายแบบไร้สาย ทำหน้าที่ตรวจวัดหรือรับสัมผัสจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพภายนอกและรวบรวมข้อมูลไปยังอุปกรณ์ปลายทางเพื่อเก็บข้อมูลหรือวิเคราะห์ข้อมูล รวมไปถึงการจัดการข้อมูล หรือ ทำการตัดสินใจและตอบสนองไปยังอุปกรณ์ควบคุมปลายทางประเภทอื่นหรือเกตเวย์ โดยขึ้นกับการประยุกต์ใช้งานของผู้ใช้งานและระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย



ภาพที่ 41 (Crossbow Technology, Inc, 2003)อุปกรณ์รับรู้ไร้สาย (The MICA2 Mote)

จากขั้นตอนการพัฒนาและทดสอบระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้น ส่วนมากขนาดของระบบเครือข่ายจะไม่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการพัฒนาจากระบบจำลองไปยังระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายในการประยุกต์ใช้งานภาคสนาม มีขั้นตอนต่างๆ เช่น การเพิ่มความสามารถในการใช้งาน การใช้งานเครือข่าย การเพิ่มขนาดของเครือข่าย การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ทั้งชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิดอุปกรณ์กัน รวมไปถึงโปรแกรมประยุกต์ที่มีความสามารถมากๆ เช่น ความสามารถในการทำนายหรือพยากรณ์ ความสามารถในการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทอื่นๆ เป็นต้น ดังนั้นการปล่อยอุปกรณ์รับรู้ไร้สายออกสู่ภาคสนาม หรือภาคการค้านั้นเป็นสิ่งที่ยาก เนื่องจากการรวมสภาวะที่ดีที่สุดของหลายๆ ระดับชั้น เช่น พลังงานไฟฟ้า เวลาในการตอบสนอง ประสิทธิภาพ อายุการใช้งาน ลักษณะทางกายภาพ ราคา และ ความสามารถในการใช้งานที่หลากหลาย เป็นต้น ซึ่งสภาวะที่ดีที่สุดของหลายๆ ระดับอาจจะส่งผลต่อการทำงานระดับใดระดับหนึ่งให้น้อยลงได้

การลดช่องว่างระหว่างระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายต้นแบบ (proof-of-concept) และระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่ใช้ในภาคสนามจริง (real-world system) จึงต้องทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการร่วมกันออกแบบจากหลายๆ ส่วน วิศวกรระบบ นักเขียนโปรแกรมประยุกต์ ช่างเทคนิคที่ทำงานติดตั้งและผู้ใช้ระบบ เพื่อลดความเสี่ยงต่อการพัฒนาระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายและจากการทดสอบระบบด้วยวิธีคำนวณ ทดลอง จนกระทั่งทดสอบระบบด้วยการใช้งานภาคสนามทั้งในประเทศและต่างประเทศ และจากการทดสอบนี้ได้สรุปได้ว่า การออกแบบ พัฒนาการติดตั้งใช้งาน ทดสอบระบบ และการทำผลิตภัณฑ์สำหรับใช้งานที่สมบูรณ์ จะยากขึ้นมากเมื่อมีจำนวนอุปกรณ์มากขึ้นและฉลาดขึ้น โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่เป็นสภาวะแวดล้อมการใช้งานจริง ซึ่งทั้งหมดนี้การออกแบบระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สายจึงเป็นภาคส่วนสำคัญในการทำพัฒนาระบบ โดยการออกแบบระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สายนั้น ความเข้าใจองค์ประกอบภายในระบบเป็นสิ่งสำคัญ



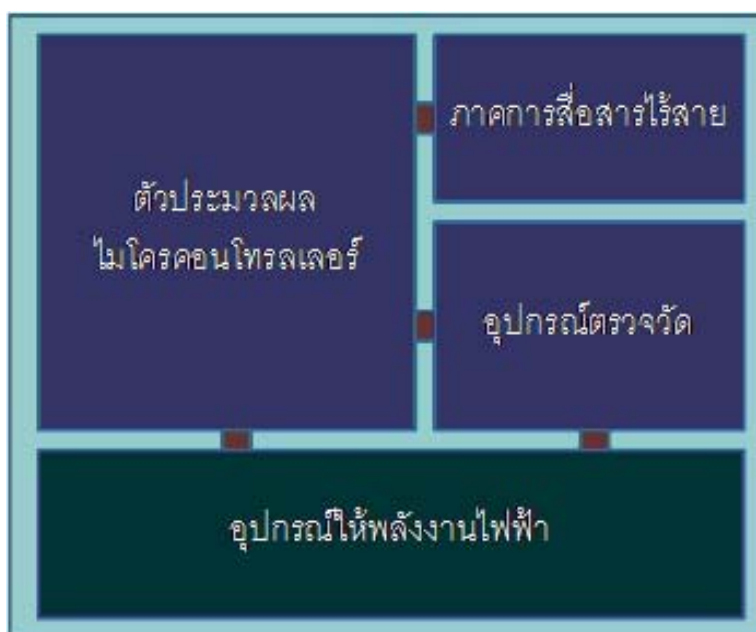
ภาพที่ 42 ลักษณะของเครือข่าย Ad Hoc



ภาพที่ 43 ระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

องค์ประกอบอุปกรณ์เครือข่ายรับรู้ไร้สายพื้นฐานมีส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ ได้แก่

- อุปกรณ์ประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ ภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นมีหลายระดับตั้งแต่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ระดับการคำนวณ 8 บิต ไปถึง ไมโครคอนโทรลเลอร์ระดับการคำนวณ 32 บิต เพื่อใช้สำหรับการประมวลผลและควบคุมการทำงานทั้งหมดของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย
- อุปกรณ์การสื่อสารไร้สาย ใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารด้วยไร้สายด้วยคลื่นวิทยุระหว่างอุปกรณ์รับรู้ไร้สายด้วยกันเองหรืออุปกรณ์รับรู้ไร้สายไปยังเกตเวย์
- อุปกรณ์ตรวจจับสำหรับตรวจวัดค่าต่างๆ ทั้งการตรวจจับสถานะหรือสภาพแวดล้อมทางกายภาพภายนอก เช่น อุปกรณ์ตัววัดอุณหภูมิอากาศ อุปกรณ์ตัววัดความชื้น เป็นต้น
- อุปกรณ์ให้พลังงานไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย เช่น พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ พลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้าจากลม เป็นต้น



ภาพที่ 44 ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์พื้นฐาน

การประยุกต์ใช้งานของระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สายมีมากมาย เช่น การประยุกต์ใช้งานกับระบบวิดิโอวงจรปิด ระบบเฝ้าดูการจราจร ระบบควบคุมการจราจรทางอากาศ ระบบสำรวจชีวิตสัตว์ป่า ระบบอุตสาหกรรมอัตโนมัติ การใช้งานทางทหาร เป็นต้น ด้วยระบบที่หลากหลายหลายในการ

ประยุกต์ใช้งาน ดังนั้น การออกแบบระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สายนั้นไม่มีมาตรฐานใดกำหนด ซึ่งวิศวกรออกแบบสามารถใช้มุมมองในการออกแบบที่คล้ายกันหรือตรงกันข้ามกันได้

มุมมองการออกแบบระบบเครือข่ายสามารถแบ่งออกได้เป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

- การติดตั้งของอุปกรณ์ เช่น ติดตั้งครั้งเดียว ติดตั้งเพิ่มขึ้นได้ หรือ ติดตั้งแบบไม่แน่นอน
- ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ เช่น เคลื่อนที่บางครั้ง หรือ เคลื่อนที่

แบบต่อเนื่องทุกๆ อุปกรณ์ หรือบางอุปกรณ์

- ราคา ขนาด ทรัพยากรภายในและพลังงาน เช่น มีจำนวนจำกัดมากถึงมีไม่จำกัดจำนวน
- ความแตกต่างของอุปกรณ์ เช่น มีอุปกรณ์ประเภทเดียวทั้งระบบ หรือหลายประเภท
- แบบโครงสร้างของการสื่อสาร เช่น คลื่นวิทยุ คลื่นเสียง แสง หรือ การเหนี่ยวนำ
- โครงสร้างเครือข่าย เช่น ตามโปรแกรมประยุกต์กำหนด อนุญาตหรือห้ามการใช้

โครงสร้างเครือข่ายแบบถาวร

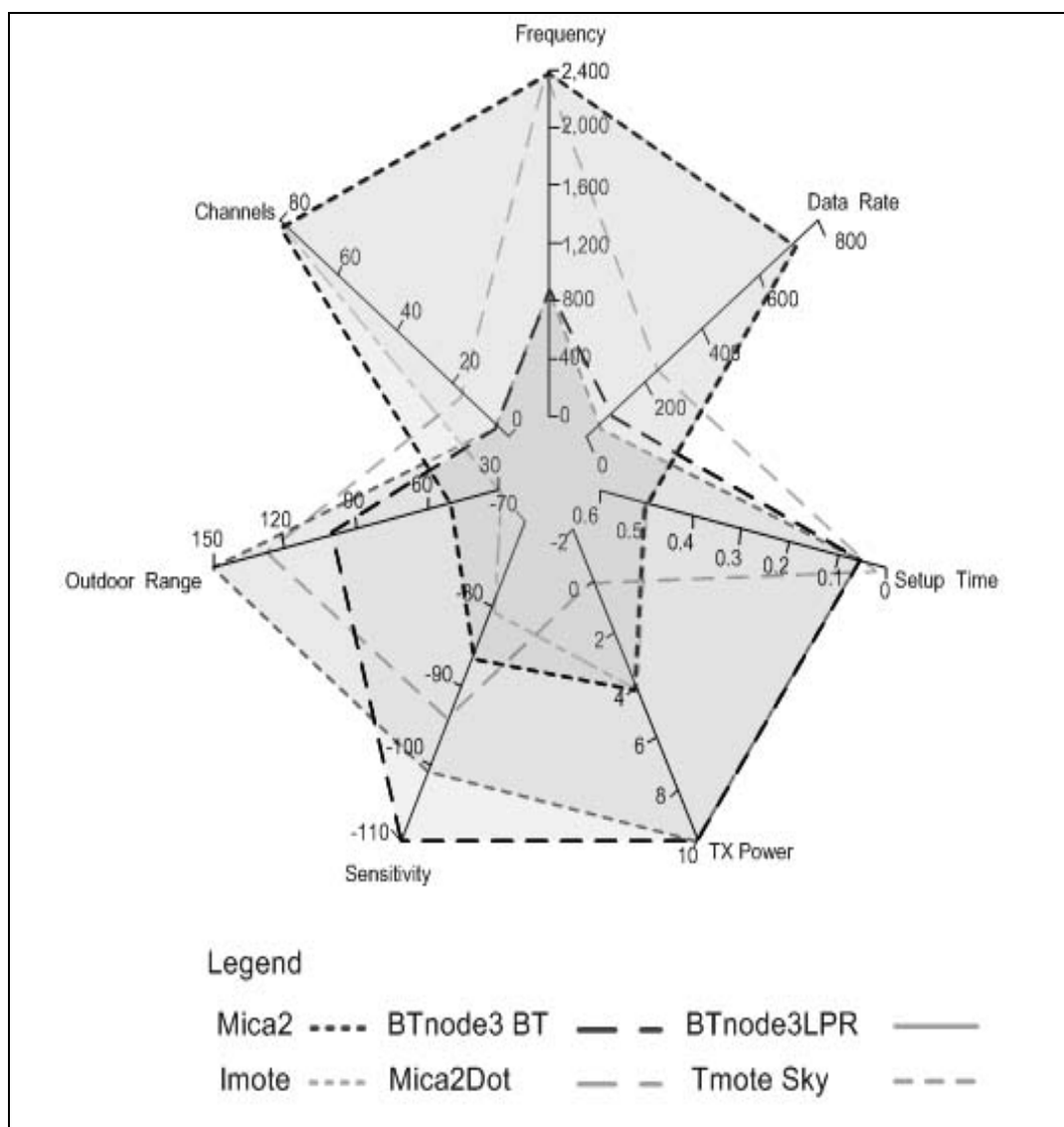
- ทอพอโลยีเครือข่าย เช่น ดวงดาว รังแห
- ความหนาแน่นของอุปกรณ์ เช่น เบาบาง พอสมควร หรือ หนาแน่นมาก
- ความถี่ในการเชื่อมต่อ เช่น เชื่อมต่อตลอดเวลา เชื่อมต่อเป็นบางครั้ง
- ขนาดของเครือข่าย เช่น ช่วงตั้งแต่ 4 อุปกรณ์ไปถึง 1,000 อุปกรณ์
- อายุการใช้งาน เช่น 2-3 ชั่วโมง 3 เดือน หรือ หลายปี
- คุณภาพการให้บริการอื่นๆ เช่น การทำงานแบบเวลาจริง การพลางอุปกรณ์ หรือการเข้ารหัส

อย่างไรก็ตามในการออกแบบระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานนั้นจะมีลักษณะเฉพาะอื่นๆ อีกนอกเหนือจากมุมมองการออกแบบข้างต้น ในการพัฒนาอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นจะไม่สามารถออกแบบให้มีอุปกรณ์ที่มีฮาร์ดแวร์หรือซอฟต์แวร์ที่เพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย แต่ในหลายๆ กรณี การประยุกต์ใช้งานได้ทำงานตามที่คาดหวังหรือออกแบบไว้เพียงบางส่วนของอายุการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์อาจเปลี่ยนแปลงได้เสมอขณะใช้งาน และด้วยเหตุผลทางราคาของอุปกรณ์ส่วนใหญ่มักจะออกแบบอุปกรณ์รับรู้ไร้สายสำหรับงานหลายๆ ประเภทด้วยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ชุดเดียวกัน ดังนั้นการออกแบบระบบอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะมีแนวทางดังนี้ คือ ออกแบบระบบเครือข่าย กำหนดรูปแบบของต้นแบบ เขียนโปรแกรมประยุกต์ หากจุดบกพร่องของโปรแกรม ติดตั้งระบบเครือข่ายและทดสอบระบบ

จากการเปรียบเทียบอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย 4 อุปกรณ์ ได้แก่ Mica2 Mica2Dot TmoteSky Imote จะเห็นว่าการออกแบบอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นจะมีส่วนการแลกเปลี่ยนระหว่าง ความเร็วในการประมวลผล กับ ความจุของหน่วยความจำภายนอก เพราะปัจจัยทางด้านราคา

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ชนิด Mica2, Mica2Dot, Tmote Sky, Imote

รายละเอียด	Mica2 ^a	Mica2Dot ^a	Tmote Sky ^a	Imote ^b
Microcontroller	ATmega1281	ATmega1281	MSP430F	ARM7
Architecture	8-Bit	8-Bit	16-Bit ^c	32-Bit
Speed	7.3728 MHz	4 MHz	8 MHz	12 MHz
Program Memory	128 kB	128 kB	48 kB	512 kB
Data Memory	4 kB	4 kB	10 kB	11 kB ^d
Configuration Mem.	4 kB	4 kB	-	-
Storage Memory	512 kB	512 kB	1024 kB	-
ADC Resolution	10-Bit	10-Bit	12-Bit	-
External IO	51	18	16	30
On-Board Sensor	2 ^e	2 ^e	5 ^e	-
UI Components	3 LEDs	1 LED	3 LEDs 1 Button	1 LED
Programming Modes	ISP, JTAG, Boot loader	ISP, JTAG, Boot loader	USB, JTAG	JTAG
Re-Prog. Cycle	≤ 10,000	≤ 10,000	10,000+	≤ 500
Size	1856 mm ²	492 mm ²	2621 mm ²	900 mm ²

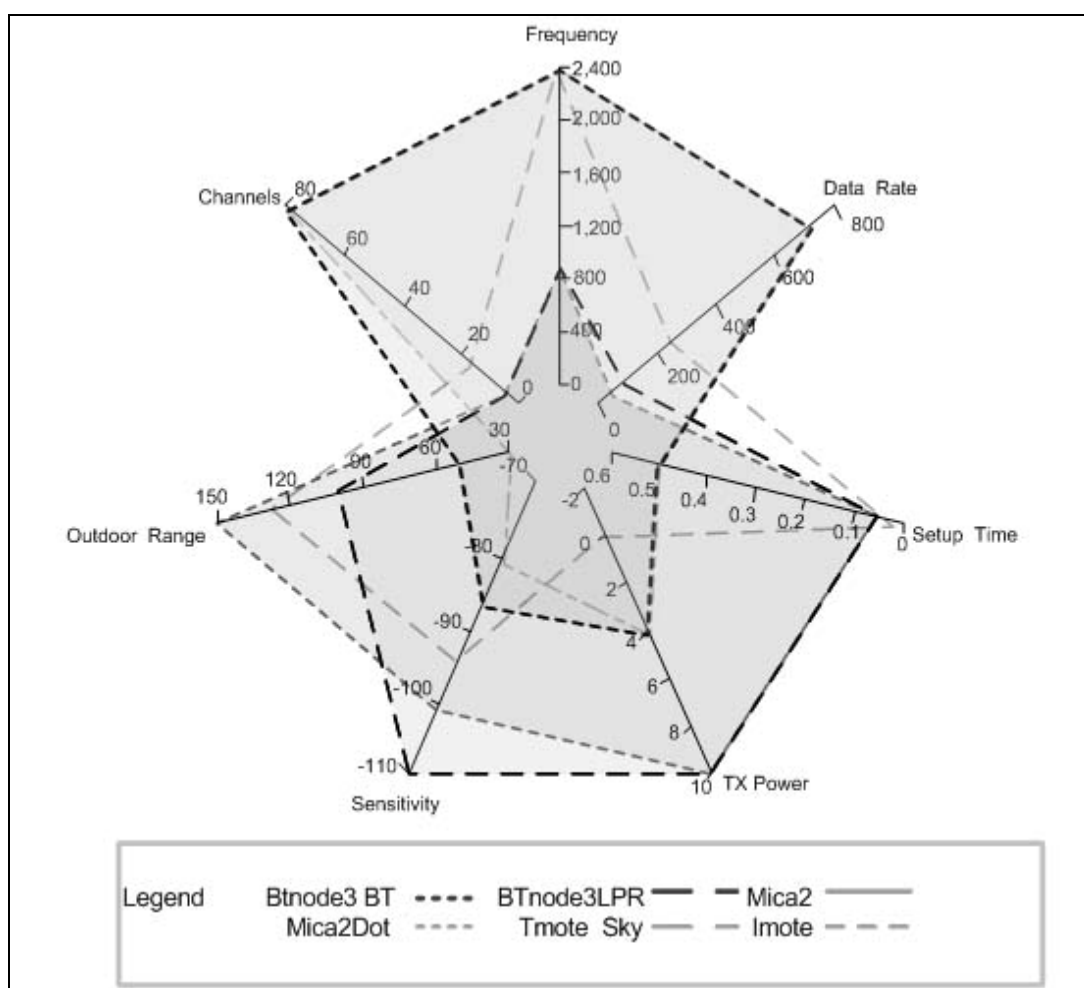


ภาพที่ 45 แสดงลักษณะของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

การเลือกอุปกรณ์ภาคสื่อสารมีความสำคัญมากในการทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย เช่น จำนวนช่องสัญญาณ การใช้พลังงาน ความเร็วในการส่ง โดยเฉพาะเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อก่อนใช้งานอุปกรณ์ภาคสื่อสาร (Setup Time)

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์ภาคการสื่อสารไร้สายของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

	Mica2^a	Mica2Dot^a	Tmote Sky^a	Imote^b
Radio	Chipcon CC1000	Chipcon CC1000	Chipcon CC2420	ZeevoTC2001
Standard	ISM	ISM	802.15.4	Bluetooth 1.1
Frequency Band	315-916 MHz	315-916 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Data Rate	38.4 kbps	38.4 kbps	250 kbps	723.2 kbps
Setup Time	<50 msec ^c	<50 msec ^c	<1 msec	<500 msec
TX powerctrl	30 dB ^c	30 dB ^c	24 dB ^c	-
TX Power ^d	-/+10 dBm ^e	-/+10 dBm ^e	-3/+0 dBm	+5/+4 dBm
Sensitivity	- 101 dBm ^c	- 101 dBm ^c	- 94 dBm	- 80 dBm
Modulation	FSK	FSK	DSSS-QPSK	FHSS-GFSK
Int. Antenna	-	Wire	embed. PIFA	GigaAnt
Ext. Antenna	MMCX conn.	-	SMA conn.	U.FL conn.
Outdoor Range	150 m ^c	150 m ^c	125 m	30 m
Indoor Range	40 m ^c	40 m ^c	50 m	30 m
Channels	4	4	16	79
Max. Endpoints	MAC specific	MAC specific	16-bit	7S, 4M



ภาพที่ 46 แสดงสมบัติของอุปกรณ์การสื่อสารของอุปกรณ์ไร้สาย

อัตราการใช้พลังงานของอุปกรณ์ไร้สาย เป็นอีกภาคส่วนที่สำคัญของการออกแบบระบบเครือข่ายอุปกรณ์ไร้สาย

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบการใช้พลังงานและอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า

	Mica2 ^a	Mica2Dot ^a	Tmote Sky ^b	Imote
Battery Supply	2 AA cells	1 coin cell	2 AA cells	2 CR2 cells
Minimum Vcc	2.7 V ^c	2.7 V ^c	2.1 V ^c	3.0 V
Battery Capacity	2000 mAh	560 mAh	2900 mAh	1600 mAh

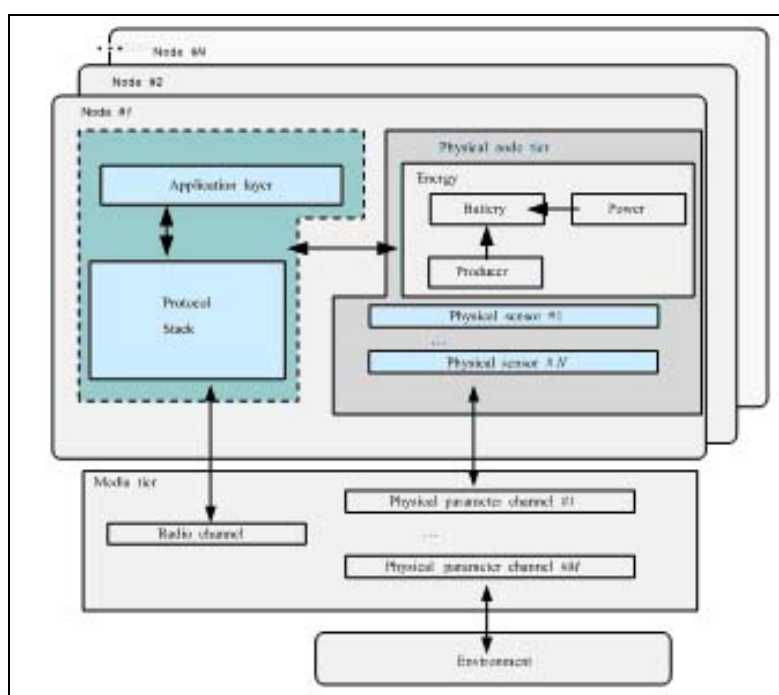
ตารางที่ 7 (ต่อ)

	Mica2 ^a	Mica2Dot ^a	Tmote Sky ^b	Imote
Regulated Supply	-	-	- ^d	yes
CPU sleep, Radio off	0.054 mW ^e	0.054 mW ^e	0.0153 mW ^e	9 mW ^f
CPU on, Radio off	36 mW	36 mW	5.4 mW	27 mW ^f
CPU on, Radio listen ^g	66 mW	66 mW	65.4 mW	62.1 mW ^f
CPU on, Radio RX/TX	117 mW	117 mW	58.5 mW	112.5 mW ^h
Max. Power	165 mW	165 mW	69 mW	195 mW ^h

องค์ประกอบทางซอฟต์แวร์ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นสามารถแบ่งเป็นสองประเภท คือ อุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่มีระบบปฏิบัติการภายในและอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่ไม่มีระบบปฏิบัติการภายใน

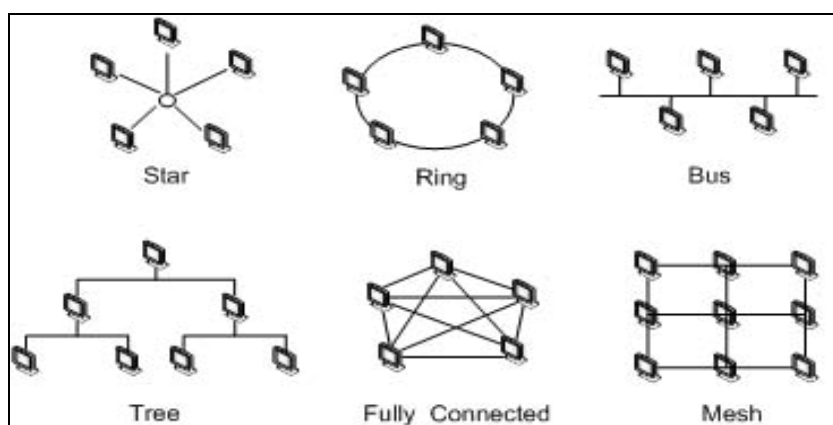
อุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่มีระบบปฏิบัติการภายใน เป็นระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่ใช้ระบบปฏิบัติการภายในที่ใช้มีระดับความสามารถแตกต่างกันออกไปตามแต่ฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายสามารถรองรับ ซึ่งระบบปฏิบัติการบางชนิดภายในสามารถจัดการติดต่อสื่อสารแบบเครือข่ายไร้สายหรือการจัดการพลังงาน ดังนั้นการประยุกต์ใช้งานของระบบปฏิบัติการ ทำให้นักพัฒนาสามารถพัฒนาส่วนประกอบซอฟต์แวร์ในระดับโปรแกรมประยุกต์ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ทั้งนี้ระบบปฏิบัติการที่ใช้ในระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สายนั้นมีหลายระบบ เช่น ระบบปฏิบัติการไทน์โอเอส (TinyOS) (Levis, 2006), ระบบเคอร์เนล สแคตเตอร์เว็บ (Scatterweb kernel), ระบบปฏิบัติการแมนทิส (Mantis OS: multi-threaded operating system, ระบบปฏิบัติการคอนติคิ (CONTIKI) เป็นต้น

อุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่ไม่มีระบบปฏิบัติการภายใน เป็นระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่ไม่ใช้ระบบปฏิบัติการสามารถทำงานได้เช่นเดียวกับระบบที่ใช้ระบบปฏิบัติการ ทั้งนี้ระบบเครือข่ายที่ไม่ใช้ระบบปฏิบัติการมีจุดเด่น คือ ความสามารถในการลดการใช้พลังงานของตัวอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย และ ความเร็วในการตอบสนองต่อเหตุการณ์ที่เข้ามายังอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้งาน Scheduler ภายในเคอร์เนล จึงสามารถตอบสนองเหตุการณ์ได้ทันที (Cerpa and Estrin, 2004)



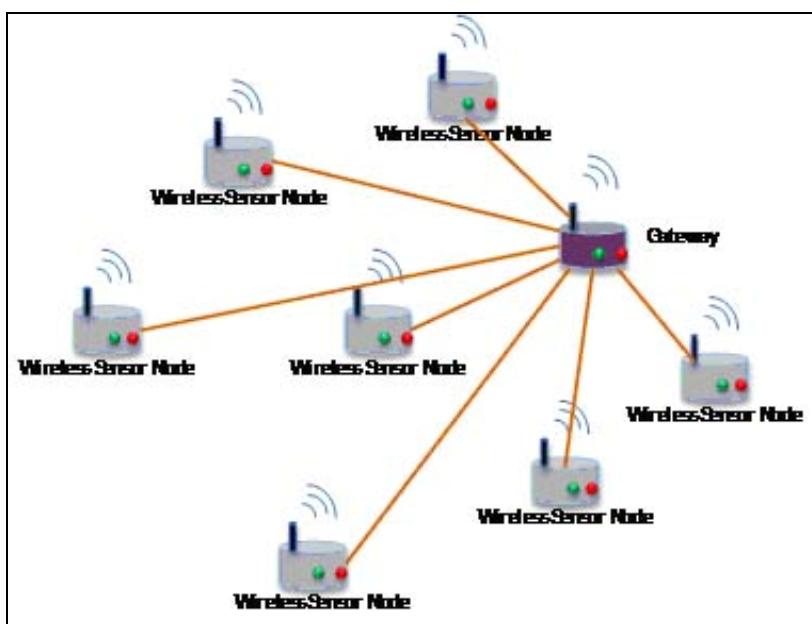
ภาพที่ 47 ส่วนประกอบอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

โครงสร้างเครือข่ายไร้สายมีหลายประเภทที่สามารถนำมาประยุกต์เข้ากับการเชื่อมต่อของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายเช่น การเชื่อมต่อแบบดวงดาว การเชื่อมต่อแบบบัส การเชื่อมต่อแบบร่างแห เป็นต้น โดยในปัจจุบันโพรโทคอลการจัดเส้นทาง การจัดการพลังงาน และการกระจายข้อมูลไปยังเครือข่ายภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ขึ้นอยู่กับประเภทโครงสร้างเครือข่ายโดยตรง ดังนั้น โครงสร้างของเครือข่ายจะมีผลโดยตรงกับโพรโทคอลอื่นๆ ภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

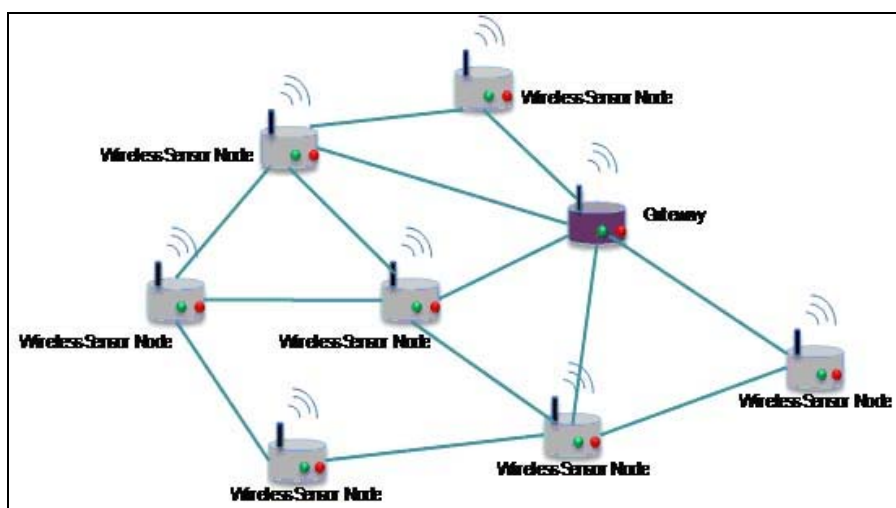


ภาพที่ 48 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบต่างๆ

การประยุกต์ใช้งานในแต่ละด้าน เช่น ระบบเฝ้าดูสภาพแวดล้อมภายในโรงเพาะปลูก ระบบตรวจจับแรงสั่นสะเทือนภายในรถยนต์ ระบบตรวจจับควันภายในอาคาร จะมีโปรโตคอลที่แตกต่างกันออกไปตามข้อจำกัดของแต่ละระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สาย และอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ภายใน

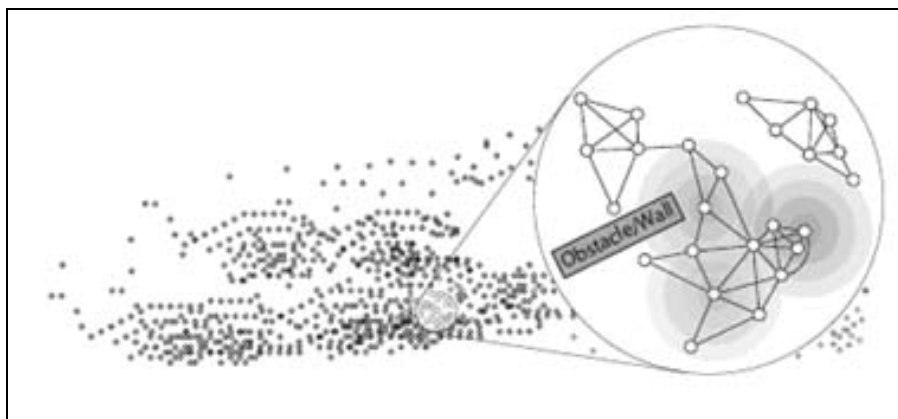


ภาพที่ 49 การเชื่อมต่ออุปกรณ์รับรู้ไร้สายภายในเครือข่ายแบบดวงดาว



ภาพที่ 50 การเชื่อมต่ออุปกรณ์รับรู้ไร้สายภายในเครือข่ายแบบร่างแห

เนื่องจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สายส่วนใหญ่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ขนาดเล็กซึ่งทำให้มีพลังงานไฟฟ้าจำกัดนั้นอาจทำการลดการใช้พลังงานด้วยการนำโครงสร้างเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายออก โดยใช้โครงสร้างเครือข่ายไร้สายเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีโครงสร้างเครือข่ายไร้สาย ดังนั้นระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายสามารถเชื่อมต่อระบบเครือข่ายโดยไม่ต้องทำการกำหนดพื้นฐานโครงสร้างเครือข่ายหรือสถานีฐาน โดยอุปกรณ์สื่อสารผ่านการเชื่อมต่อไร้สายไปยังอุปกรณ์ข้างเคียงแบบจุดต่อจุดและทำการค้นหาอุปกรณ์ปลายทางอัตโนมัติหรือกำหนดเองซึ่งอาจจะเป็นเป็นคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ประเภทอื่นๆ ด้วยวิธีการแพร่สัญญาณ

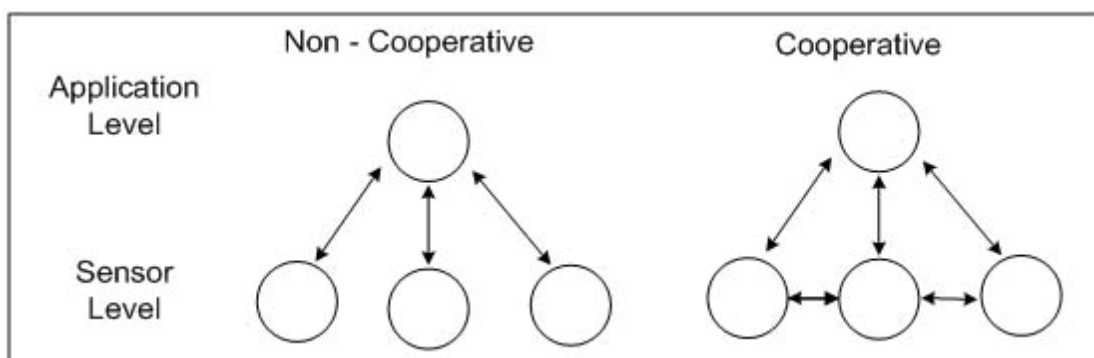


ภาพที่ 51 ลักษณะของระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สายขนาดใหญ่

Wireless Sensor Network Communication Model

รูปแบบการสื่อสารของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะเป็นรูปแบบทั่วไปที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์รับรู้ไร้สายแต่ละตัวเช่น การกำหนดอุปกรณ์รับรู้ไร้สายสามารถติดต่อโดยตรงกับอุปกรณ์รับรู้ไร้สายปลายทางอย่างไร โดยการออกแบบรูปแบบการสื่อสารของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ตรวจจับสภาพแวดล้อมภายนอกทั้งนี้เนื่องจาก อุปกรณ์ตรวจจับแต่ละชนิด มีลักษณะการทำงานที่ไม่เหมือนกัน และความผันแปรของสภาพแวดล้อมที่ตรวจจับได้ และความสามารถของอุปกรณ์รับส่งข้อมูลที่เลือกใช้งาน (U. Anliker, J. Beutel, M. Dyer, R. Enzler, P. Lukowicz, L. Thiele and, G. Tröster. 2004)

โมเดลของการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์รับรู้ไร้สายมี 2 ประเภทคือ 1. Cooperative คือ อุปกรณ์รับรู้ไร้สายแต่ละตัวสามารถสื่อสารกับอุปกรณ์รับรู้ไร้สายตัวอื่นๆ ภายในเครือข่ายได้โดยตรงและอิสระ 2. Non-cooperative คือการที่อุปกรณ์รับรู้ไร้สายแต่ละอุปกรณ์ไม่สามารถติดต่อกับอุปกรณ์รับรู้ไร้สายตัวอื่นๆภายในเครือข่ายได้โดยตรงแต่สามารถติดต่อได้โดยผ่านทางอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่อยู่ในระดับการทำงานของชั้นถัดไปเท่านั้น



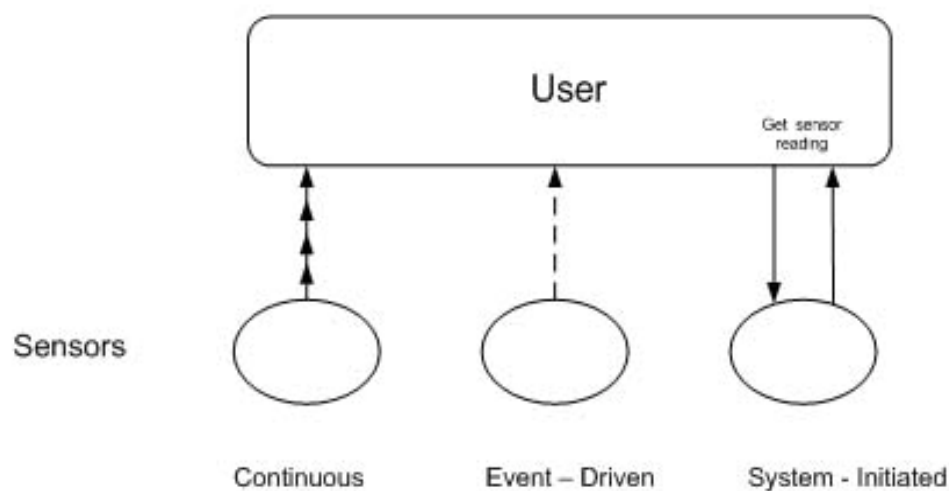
ภาพที่ 52 รูปแบบต่างๆของการส่งข้อมูลจาก Sensor ตัวหนึ่งไปยังตัวอื่นๆ

โมเดลการรับส่งข้อมูล คือ รูปแบบในการรับส่งข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายไปยังส่วนประมวลผลอื่นๆ ภายในเครือข่าย ซึ่งมีรูปแบบที่แตกต่างกัน 4 แบบคือ

- Continuous คือ การรับส่งข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้ใดๆ ไปยังปลายทางแบบต่อเนื่อง

- Event driven คือ การรับส่งข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้จะเกิดขึ้นเมื่อมีเหตุการณ์ที่กำหนดไว้เกิดขึ้นเท่านั้นโดยไม่ทำการรับส่งข้อมูลมาตลอดเวลา เช่น ข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้ตรวจวัดความเข้มแสงที่จะส่งข้อมูลก็ต่อเมื่อมีความเข้มแสงน้อยกว่าที่กำหนดไว้
- System-initiate คือ การรับส่งข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้เมื่อได้รับการร้องขอมาจากผู้ใช้งานเท่านั้น
- Mixture คือ การผสมกันของการทำงานทั้ง 3 รูปแบบที่กล่าวข้างต้น ซึ่งจะนิยมใช้กับระบบที่มีอุปกรณ์ตรวจจับหลายชนิด ภายในอุปกรณ์รับรู้ตัวเดียวกัน ซึ่งมีรูปแบบการส่งข้อมูลที่ไม่เหมือนกัน

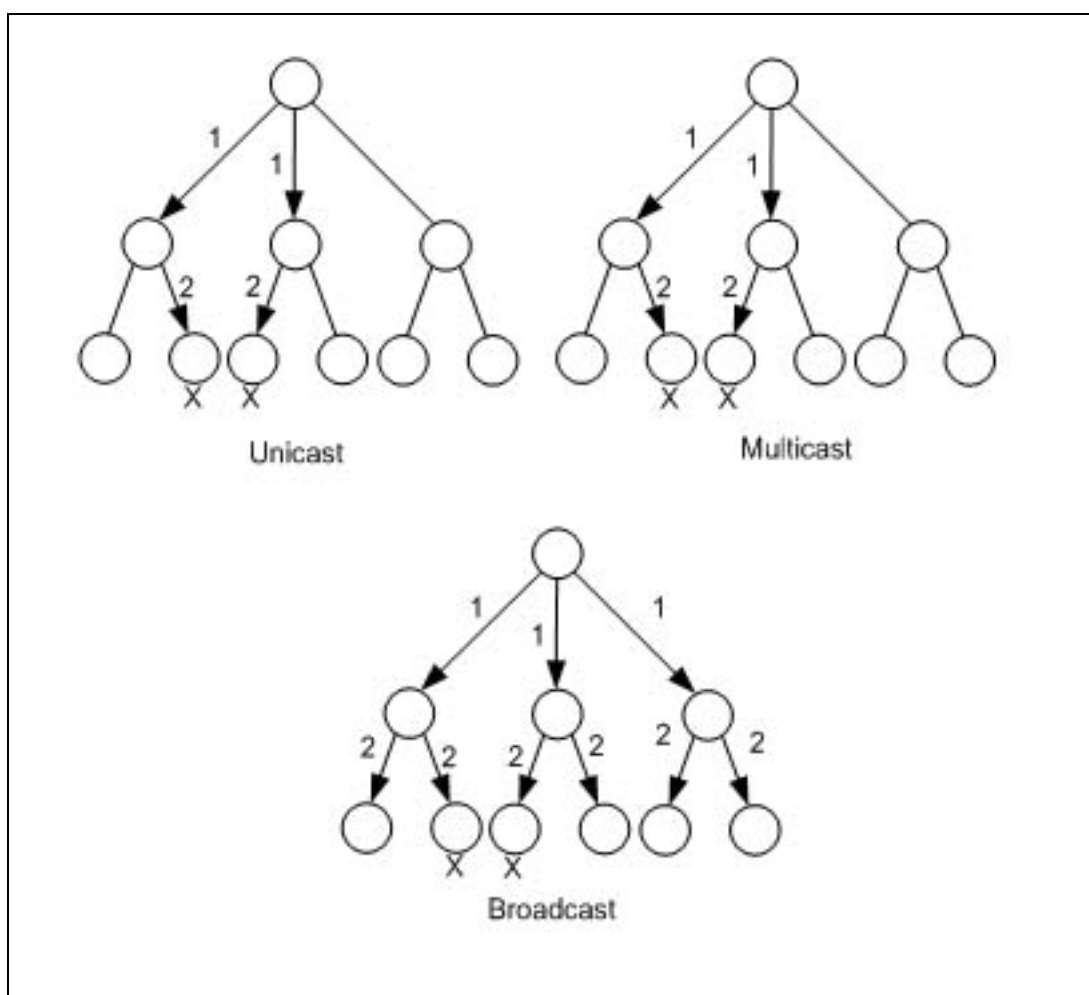
การออกแบบและเลือกใช้รูปแบบการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ตรวจจับขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับ เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิมักจะใช้กับการส่งข้อมูลแบบ System initiated หรืออุปกรณ์วัดความเร็วมักใช้การส่งข้อมูลแบบ continuous เป็นต้น



ภาพที่ 53 รูปแบบต่างๆของการส่งข้อมูลระหว่าง Sensor กับระบบ

โมเดลการสื่อสาร คือ รูปแบบการรับส่งข้อมูลที่ต้องการไปยังปลายทางซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

- Unicast Model คือ รูปแบบการส่งข้อมูลโดยตรงจากอุปกรณ์โดยตรงไปยังปลายทางโดยมีหนึ่งผู้ส่งและหนึ่งผู้รับ โดยข้อมูลสามารถผ่านอุปกรณ์ตัวอื่นๆ และทำการส่งต่อไปยังปลายทางได้ ซึ่งจะทำให้การรับส่งได้ทีละหนึ่งข้อมูลภายในหนึ่งช่วงเวลาเท่านั้น
- Broadcast Model คือ รูปแบบการส่งข้อมูลไปยังทุกๆ อุปกรณ์ภายในเครือข่าย โดยทุกๆ อุปกรณ์ในเครือข่ายจะทำการส่งต่อข้อมูลไปยังอุปกรณ์ข้างเคียง จนกว่าข้อมูลจะกระจายทั่วเครือข่าย
- Multicast Model คือ รูปแบบการรับส่งข้อมูลไปยังกลุ่มของอุปกรณ์ที่ต้องการ



ภาพที่ 54 รูปแบบต่างๆของการส่งข้อมูลจาก Source ไปยัง destination

Wireless Sensor Network Protocol

เนื่องจากต้นทุนในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นมีราคาต่ำลง จึงคาดหมายได้ว่าจำนวนของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายภายในเครือข่ายนั้นจะมีมากขึ้นเรื่อยๆ กล่าวคือ ภายในระบบเครือข่ายจะมีอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจำนวนมากกว่าเมื่อเทียบกับช่วงต้นๆ ของการพัฒนาระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ดังนั้นระบบเครือข่ายไร้สายในปัจจุบันส่วนใหญ่ควรมีสามารถรองรับจำนวนของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่มากเหล่านี้ซึ่งพบโดยทั่วไป เช่น ระบบเฝ้าดูเกี่ยวกับการแพทย์ ระบบตรวจจับสิ่งแวดล้อม ระบบเฝ้าดูตรวจตรา ระบบที่เกี่ยวข้องทางทหาร ระบบเฝ้าดูทางอุตสาหกรรม เป็นต้น (Perillo, Mark and, Heinzelman. 2004)

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานที่มีจำนวนอุปกรณ์รับรู้ไร้สายมากๆ (Large- scale WSN) เช่น

- ระบบเฝ้าดูตรวจตรา การใช้อุปกรณ์รับรู้ไร้สายจำนวนมากเชื่อมต่อกันภายในบริเวณที่ต้องการตรวจตรา เช่น เสียง ภาพ แรงสั่นสะเทือน โดยระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นจะส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้ไปยังผู้ใช้ ซึ่งลักษณะเครือข่ายเป็นแบบ many-to-one ซึ่งข้อมูลแลกเปลี่ยนกันภายในระบบเครือข่ายไร้สายสามารถอยู่ในช่วงตั้งแต่ ข้อมูลดิบถึงข้อมูลที่ถูกคำนวณสำหรับผู้ใช้อ่านได้ ซึ่งการประยุกต์ใช้งานดังกล่าวจะมีการกำหนด คุณภาพของการทำงาน (QoS: Quality of Service) หรือ จำนวนเปอร์เซ็นต์ที่น้อยที่สุดของพื้นที่ที่ตรวจตรา หรือ ความน่าจะเป็นที่มากที่สุดของการพลาดการตรวจจับเหตุการณ์ ในขณะเดียวกัน ระบบเครือข่ายจะถูกกำหนดระยะเวลาทำงานที่ยาวนาน ตั้งแต่ เดือนถึงปี ขณะที่มีความต้องการช่วยเหลือจากผู้ใช้ภายนอกเพียงเล็กน้อย ซึ่งการทำงานของระบบเครือข่ายตรวจจับนี้ต้องอาศัยการออกแบบอย่างดี ตั้งแต่ อุปกรณ์ตรวจจับ ถึง โพรโทคอลของระบบเครือข่ายไร้สาย

- ระบบเฝ้าดูเกี่ยวกับการแพทย์การประยุกต์ที่ใช้งานของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่แตกต่างกันสามารถพบเห็นได้จากการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการรักษาพยาบาลหรือการแพทย์ เช่น ระบบเฝ้าดูผู้ป่วยด้วยระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายภายในโรงพยาบาลช่วยลดความรู้สึกลำบากด้วยอุปกรณ์การแพทย์ขนาดใหญ่ๆ เทอะทะ หรืออุปกรณ์ที่ดูแปลก หรือ ระบบเฝ้าดูจำนวนผู้เสียชีวิตหลายๆในสถานการณ์คับขัน หรือ ระบบเฝ้าดูผู้ป่วยด้วยระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายในชีวิตประจำวันเพื่อทำการทำนายหรือคาดการณ์ของอาการของโรคบางประเภท

อุปกรณ์ตรวจจับที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการแพทย์จะมีตั้งแต่ ขนาดที่หลากหลาย ตั้งแต่ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิร่างกาย ถึงกล้องวิดีโอ หรือ อุปกรณ์ตรวจจับหรือบอกตำแหน่ง ด้วยการทำงานที่ต้องมีความแม่นยำ ยืดหยุ่น และมีอุปกรณ์ตรวจจับสำหรับตรวจวัดและสร้างข้อมูลดิบขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์ประมวลผลภายนอกเช่น PDA สำหรับการคำนวณข้อมูลที่มาจาก อุปกรณ์ตรวจจับที่หลากหลายเช่น ECG EMG ความดันเลือด อ็อกซิเจนในเลือด หรือ อัตราการไหลเวียนโลหิตภายในร่างกาย เป็นต้น ดังนั้นระบบสามารถทำการเตือนเมื่อพบสิ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และทำการบันทึกข้อมูลสุขภาพไปยังอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล ด้วยเหตุผลในการใช้อุปกรณ์รับฐานตัวมนุษย์นั้น ระบบจึงต้องสามารถทำงานด้วยแบตเตอรี่และใช้การสื่อสารไร้สายผ่านไปยังระบบฐานข้อมูล ดังนั้นระบบต้องการระบบเครือข่ายไร้สายที่มีประสิทธิภาพ แม่นยำ สามารถเพิ่มลดจำนวนอุปกรณ์ตรวจจับได้ และมีความปลอดภัย

ลักษณะเฉพาะของเครือข่ายไร้สายที่นำมาประยุกต์ใช้กับงานแต่ละด้านนั้นพบว่ามีความแตกต่างกันออกไปเนื่องจากความต้องการของผู้ใช้งาน

การแบ่งประเภทของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจากการพัฒนาของระบบเครือข่ายที่กำลังเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบเครือข่ายมีลักษณะพิเศษและแตกต่างออกไป ตามการประยุกต์ใช้งานของผู้พัฒนา และประเภทของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นมีหลายวิธีในการจำแนก ซึ่งในที่นี้จะจำแนกโดยแยกความแตกต่างของระบบเครือข่ายที่ส่งผลต่อการออกแบบโปรโตคอล

ลักษณะเครือข่ายที่ทำการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ปลายทางเป็นหลัก (Data sink) ลักษณะการทำงานของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่เป็นปกติ ในหลายๆ กรณี อุปกรณ์ปลายทางหรือผู้ใช้ปลายทางที่ต้องการข้อมูลอาจจะเป็นส่วนหนึ่งในระบบเครือข่าย เช่น อุปกรณ์ควบคุม (Actuator) ทำหน้าที่สั่งการเมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้น หรือ อุปกรณ์เชื่อมต่อ (access point) ทำหน้าที่เชื่อมต่อไปยังเครือข่ายภายนอก หรือ อุปกรณ์เชื่อมต่อแบบพกพา (mobile access point) ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลภายในเครือข่ายหนึ่งครั้งเพื่อทำการวิเคราะห์ของผู้ใช้ ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้มีส่วนสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของเทคนิคการกระจายของข้อมูลภายในระบบเครือข่าย

อุปกรณ์รับรู้เคลื่อนที่ภายในระบบเครือข่ายไร้สาย (Sensor mobility) เป็นลักษณะเด่นของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายในการแบ่งประเภท ในเหตุการณ์ปกติ ผู้พัฒนาสามารถกำหนดให้อุปกรณ์รับรู้ไร้สายอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอนได้ อย่างไรก็ตามในการประยุกต์ใช้งาน เช่น ด้าน

การทหาร ด้วยการนำอุปกรณ์รับรู้ไร้สายติดตั้งที่พลทหาร เพื่อทำการทดลอง ซึ่งอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องมีอิทธิพลต่อระบบเครือข่ายไร้สายอย่างมาก

ทรัพยากรภายในระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย (Sensor resources) ทรัพยากรของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นมีหลากหลายตั้งแต่ มีทรัพยากรจำกัด ไปถึงมีทรัพยากรไม่จำกัด ซึ่งหน่วยความจำหรือความสามารถในการคำนวณนั้นมีอิทธิพลต่อการออกแบบโปรโตคอลเครือข่ายอย่างมาก รวมไปถึงขั้นตอนอื่นในการพัฒนาอีกด้วย

แบบแผนการส่งข้อมูล (Traffic patterns) ในหลายๆ การประยุกต์ใช้งานของระบบที่เรียกว่า event-driven อุปกรณ์รับรู้ไร้สายอาจทำงานคล้ายกับการเฝ้ายามเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะเริ่มทำการส่งข้อมูลไปยังปลายทางก็ต่อเมื่อตรวจพบเหตุการณ์ที่น่าสนใจเท่านั้น แต่ในหลายๆ การประยุกต์ของการเฝ้าคู่นั้น การส่งข้อมูลแบบต่อเนื่องมีประสิทธิภาพมากกว่า

ลักษณะเฉพาะของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นมีส่วนคล้ายกันมากับระบบที่เรียกว่าระบบ ad hoc network ซึ่งมีส่วนที่เหมือนกันดังนี้

- อายุใช้งานจำกัด ซึ่งกำหนดด้วยพลังงานไฟฟ้าที่จำกัดภายในระบบเครือข่าย
- การสื่อสารมีความไม่แน่นอนเมื่อผ่านการสื่อสารแบบไร้สาย
- มีความสามารถในการเริ่มต้นระบบเน็ตเวิร์คเอง แทนไม่ต้องการความช่วยเหลือในการเริ่มต้นจากมนุษย์

สมบัติหรือลักษณะเฉพาะของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ที่ไม่พบในระบบ ad hoc network มีดังนี้

- จำนวนอุปกรณ์ภายในระบบ ad hoc network เป็นหลักสิบ แต่ในระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายสามารถมีจำนวนได้ถึงหลักพัน
- อุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นส่วนมากไม่เคลื่อนที่ ซึ่งการใช้โปรโตคอลเครือข่ายของ ad hoc network สำหรับการเคลื่อนที่โดยเฉพาะอาจไม่จำเป็นต่อระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

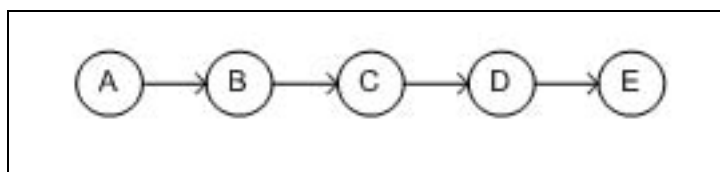
- อุปกรณ์รับรู้ไร้สายอาจนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตราย ดังนั้น อุปกรณ์ที่เสียหายในเครือข่ายหรือใช้การไม่ได้สามารถพบเห็นได้ปกติ
- อุปกรณ์รับรู้ไร้สายอาจมีขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์ทั่วไปของระบบ ad hoc network (PDA , คอมพิวเตอร์โน้ตบุค) ขนาดแบตเตอรี่ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายขนาดเล็กจะมีอายุการใช้งานสั้น และความสามารถในการคำนวณ พลังงาน หน่วยความจำน้อยกว่าอุปกรณ์ของระบบ ad hoc network
- ความสามารถอื่นๆที่เพิ่มขึ้นเช่น ตำแหน่งของอุปกรณ์อาจเป็นสิ่งจำเป็นต่อระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย
- อุปกรณ์ ad hoc network โดยทั่วไป จะแย่งใช้งานทรัพยากร เช่น แบนด์วิดท์ แต่ อุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะมีลักษณะที่ร่วมมือกันการเข้าใช้งานทรัพยากร เพื่อคุณภาพของการทำงานที่ดีขึ้นหรือ ความเที่ยงตรง
- การสื่อสารของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย มักคำนึงถึง ประเภทและความสำคัญของข้อมูล มากกว่า รหัส คือ ข้อมูลสามารถ รวมตัว/บีบอัด/ทำการจัดความสำคัญ/ทิ้ง ขึ้นอยู่กับประเภทของข้อมูล
- การสื่อสารภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สายส่งข้อมูลเป็นกลุ่มข้อมูลเล็กๆ
- เครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายมีลักษณะเป็น many to one ซึ่งนำไปสู่ปัญหาคอขวด

1. การวัดประสิทธิภาพ

เนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ทำให้บางหัวข้อในการวัดประสิทธิภาพที่ใช้ในการวัดไม่เหมาะสมกับการประเมิน โพรโตคอลเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย เช่น อุปกรณ์รับรู้ไร้สายมีความสามารถในการร่วมมือกันในการเข้าใช้ทรัพยากรที่เหมาะสมมากกว่าอุปกรณ์ ad hoc network ทั่วไป ดังนั้น ความยุติธรรมกันต่อการใช้ทรัพยากรจึงไม่สำคัญ หรือ อุปกรณ์รับข้อมูลปลายทางกำลังสนใจข้อมูลสำคัญของสภาพแวดล้อมมากกว่ารับข้อมูลดิบจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สายตัวอื่นๆ ซึ่งทำให้ปริมาณงาน (Throughput) มีความสำคัญน้อยลง

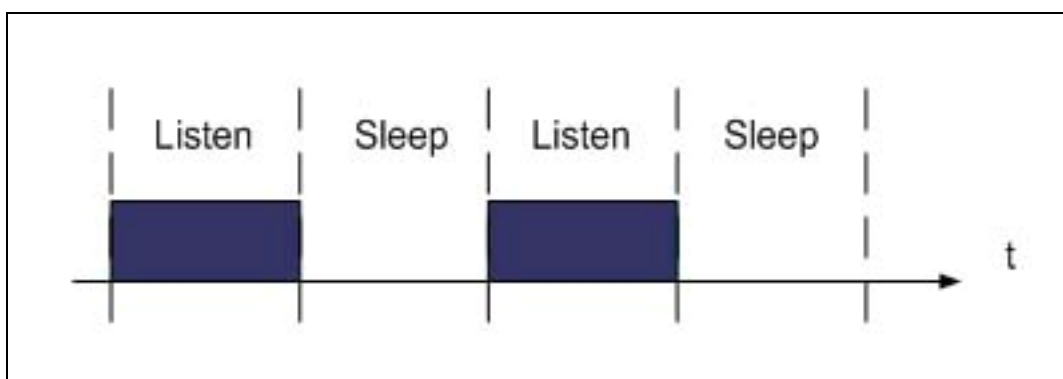
1.1 Medium Access Control Protocols

Medium Access Control (MAC) Protocols ภายในระบบเครือข่าย ad hoc network ออกแบบเพื่อการใช้งานที่ทุกๆ อุปกรณ์สามารถเชื่อมต่อได้อย่างเท่าเทียมและมีปริมาณงาน (Throughput) ที่มาก แต่ไม่ให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มีอยู่อย่างจำกัด ในหลายๆ MAC Protocols ภายในระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย จะมีความสามารถในการลดการใช้พลังงานจากการชนกันของข้อมูลที่ส่งพร้อมกันภายในเครือข่ายไร้สาย หรือทำการลดการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์อื่นๆ ที่ไม่ใช่อุปกรณ์ปลายทาง ซึ่งการประหยัดพลังงานอย่างได้ผลที่สุดนั้น ควรทำการลดการใช้พลังงานขณะว่าง (Idle Mode) ซึ่งการกินพลังงานในโหมดการทำงานนี้จะกินเทียบเท่าการรับ (Received Mode) หรือ การส่ง (Transmit Mode) ของอุปกรณ์การสื่อสารไร้สาย ซึ่งจะเห็นผลอย่างมาในระบบเครือข่ายที่มีการรับส่งข้อมูลระดับต่ำ (low traffic rate) สรุปได้ว่าหัวใจของการลดการใช้พลังงานคือ การควบคุมให้อุปกรณ์ภาคการสื่อสารให้มีโอกาสในการปิดการทำงานให้บ่อยครั้งขึ้นและนานที่สุด



ภาพที่ 55 การส่งข้อมูลที่ละ hop

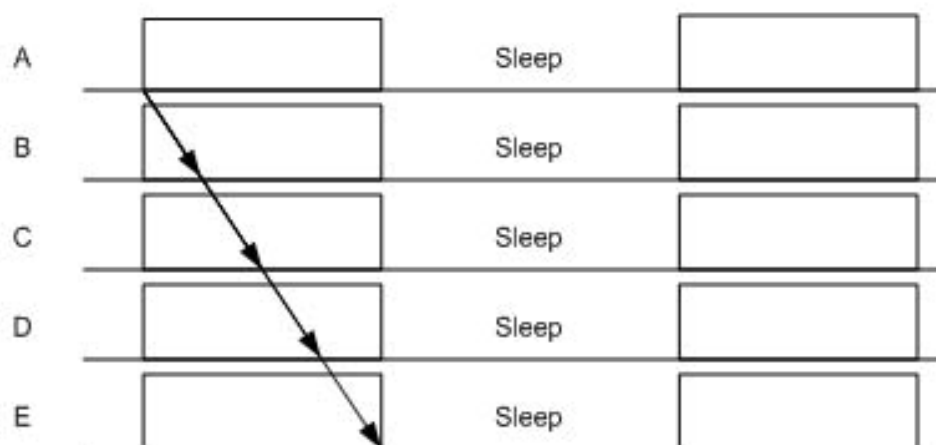
Sensor-MAC (S-MAC) S-MAC เป็นหนึ่งในโพรโทคอลแบบแรกๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย โดยมีหลักการคือ การสลับการเปิดปิดการทำงานตามตารางเวลาทำงานของแต่ละอุปกรณ์ โดยส่วนใหญ่มักใช้เวลาในการรับส่งข้อมูลประมาณ 1 – 10 % ของช่วงเวลาที่ใช้ในการเปิดอุปกรณ์สื่อสาร



ภาพที่ 56 แสดงการสลับเปิดปิดการทำงานของภาคสื่อสารของอุปกรณ์ไร้สาย ของ S-MAC

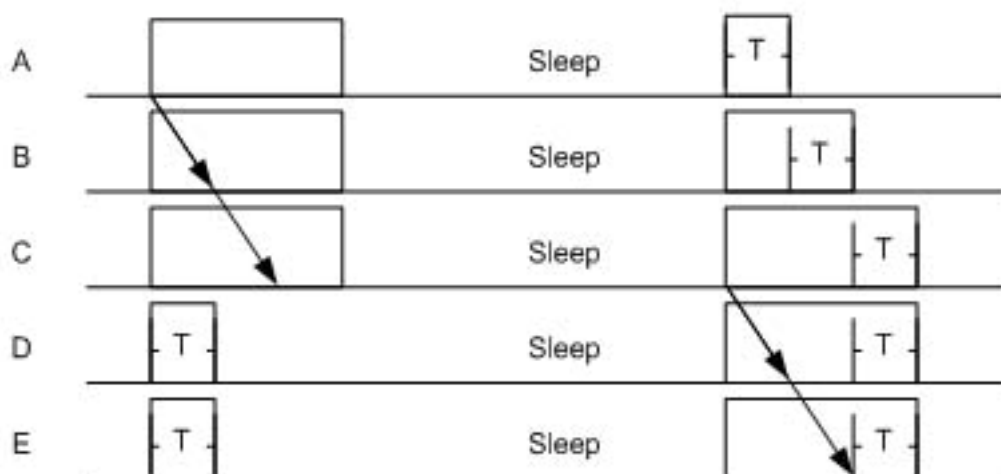
S-MAC มีสมบัติต่างๆ ดังนี้

- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนตารางเวลาทำงานของอุปกรณ์ข้างเคียงเพื่อทำการกำหนดตารางเวลาทำงานของอุปกรณ์ให้พร้อมกันทั้งเครือข่าย ซึ่งจะทำให้ลดพลังงานในการเริ่มต้นในการส่งอย่างมาก
- ประยุกต์ใช้งาน CSMA with collision avoidance (RTS-CTS exchange) ก่อนการเริ่มต้นการส่งเพื่อลดปัญหาอุปกรณ์ข้างเคียงส่งข้อมูลรบกวนไปยังอุปกรณ์ปลายทางที่ต้องการรับข้อมูลจากอุปกรณ์ตัวอื่นๆ (hidden node problem) และลดการใช้พลังงานจากชนกันของการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ติดต่อกัน
- กลุ่มข้อมูลประเภท ACKs สามารถช่วยลดโอกาสการชนกันของข้อมูลเมื่ออุปกรณ์ข้างเคียงเปิดการทำงานของตัวเองในช่วงกลางของการทำงานของอุปกรณ์ตัวอื่นและไม่ได้รับการแลกเปลี่ยนสัญญาณ RTS หรือ CTS



ภาพที่ 57 แสดงการส่งข้อมูลไปยังปลายทางของ S-MAC

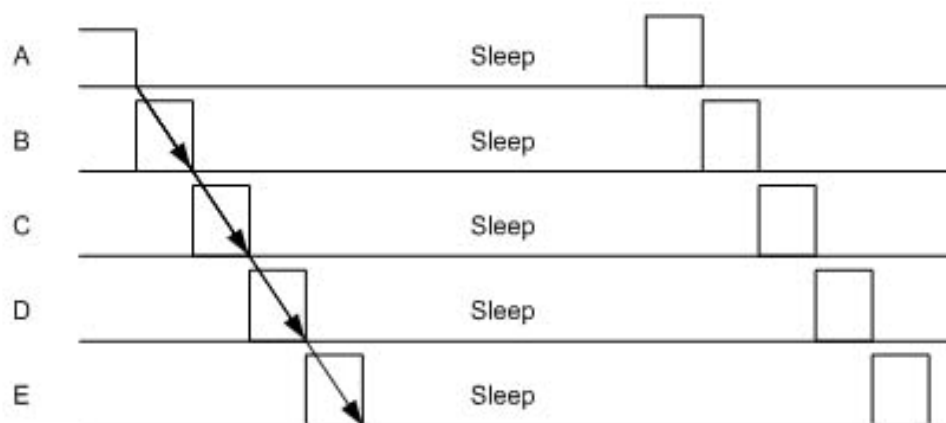
Timeout-MAC (T-MAC) Timeout-MAC ชนิดถูกพัฒนาจาก S-MAC โดยการลดพลังงานขณะอุปกรณ์อยู่ในการทำงานในช่วงเปิดแต่ไม่พบข้อมูลใดๆ เข้ามายังอุปกรณ์ของตัวเอง ด้วยการปรับช่วงการเปิดของการทำงานให้น้อยลงเมื่อในคาบการทำงานนั้นไม่มีเหตุการณ์ในการรับส่งข้อมูล และ รอช่วงการเปิดการทำงานในครั้งถัดไป ตามรูป



ภาพที่ 58 แสดงการลดการเปิดช่องสัญญาณ เมื่อไม่มีข้อมูลรับส่งเมื่อถึงเวลากำหนด T วินาที

DMAC ในการทำงานของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่มีลักษณะการเก็บข้อมูลทางเดียวไปยังอุปกรณ์ปลายทางตัวเดียวและเป็นโครงข่ายเครือข่ายแบบต้นไม้ เป็นลักษณะของการ

ทำงานที่คาดเดาได้ง่ายและมีความแน่นอนกว่า ดังนั้น เพื่อลดพลังงานจากระบบเครือข่ายไร้สายสามารถทำได้วิธี ใช้ตารางเวลาทำงานของโพรโทคอลแบบ S-MAC เพื่อทำการกำหนดอุปกรณ์รับรู้ไร้สายตามลำดับชั้นและทำการส่งข้อมูลไปตามลำดับชั้นดังรูป



ภาพที่ 59 แสดงการเปิดช่องสัญญาณเพื่อรับสัญญาณในจังหวะและทางเดียวของ D-MAC

Traffic-Adaptive Medium Access (TRAMA) ในขณะที่โพรโทคอลอื่นๆ ทำการลดพลังงานขณะอุปกรณ์เปิดการทำงานของภาคสื่อสารแต่ไม่มีข้อมูลรับส่ง (Idle state) แต่ TRAMA ทำการลดการใช้พลังงานจากการหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล โดยอุปกรณ์จะทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลในช่วงแย่งเข้าใช้งานภาคสื่อสารผ่าน Neighbor Protocol (NP) ซึ่งบอกข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์ข้างเคียงถัดไป 2 hop

รายการของการเข้าใช้งานของสัญญาณคลื่นวิทยุจะเข้าใช้งานตามรายการของตารางการทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย โดย อุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะทำการส่งข้อมูลของตารางการทำงานของตัวเองผ่านโพรโทคอล Scheduler Exchange Protocol (SEP) as well as actual data packets.

ข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์ข้างเคียงจาก Neighbor Protocol (NP) และตารางเวลาในการทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจาก Scheduler Exchange Protocol (SEP) ทั้งสองจะใช้ในการคำนวณน่าจะเป็นในการเปิดระบบภาคสื่อสารด้วยอัลกอริทึม Adaptive Election Algorithm (AEA)

Adaptive Election Algorithm (AEA) นั้นจะคำนวณความสำคัญของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายของตัวเองและทุกๆ อุปกรณ์ที่ถัดไป 2 Hop เพื่อหา slot โดยใช้ฟังก์ชัน hashing เช่น ถ้ามีอุปกรณ์รับรู้ไร้สายตัวใดตัวหนึ่งมีความสำคัญมากที่สุดใน slot นั้นและมีข้อมูลที่ต้องการส่ง อุปกรณ์ตัวนั้นจะเลือกใช้ slot ณ ขณะนั้นทันทีและทำการส่งข้อมูล แต่ถ้าอุปกรณ์รับรู้ไร้สายตัวใดๆ ที่เป็นอุปกรณ์ข้างเคียงของอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดจะทำการคำนวณจากการได้มาของข้อมูล SEP และตัดสินใจไม่ทำการส่งข้อมูลและเปิดการทำงานสถานะว่างสำหรับการรับข้อมูลที่เข้ามา ดังนั้นจะสามารถลดการใช้พลังงานจากอุปกรณ์อุปกรณ์ด้วยการลดการชนกันของข้อมูล

Sparse Topology and Energy Management (STEM) ในหลายๆ การประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย คาดหมายว่าอุปกรณ์นั้นจะทำการวัดหรือตรวจจับอย่างต่อเนื่อง แต่ไม่ได้ทำการส่งอย่างต่อเนื่อง เพียงแต่จะทำการส่งข้อมูลเมื่อมีเหตุการณ์ที่กำหนดไว้เท่านั้น ดังนั้นด้วยโพรโทคอลของ STEM จะกำหนดให้อุปกรณ์รับรู้ไร้สายให้อยู่ในสถานะปิดภาคส่วนการสื่อสาร และจำทำการเปิดการทำงานภาคสื่อสารก็ต่อเมื่อมีความจำเป็นในการรับส่งข้อมูลภายในเครือข่าย คือ เมื่อมีเหตุการณ์ที่กำหนดเกิดขึ้นและอุปกรณ์รับรู้ไร้สายมีข้อมูลที่ต้องการส่งไปยังปลายทาง อุปกรณ์จะทำการส่งสัญญาณภายในช่องสัญญาณอื่นๆ ที่ไม่ใช่ช่องสัญญาณของข้อมูล เพื่อทำการปลุกอุปกรณ์ข้างเคียงที่จำเป็นในการส่งข้อมูลไปยังปลายทาง โดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะได้แก่ STEM-T , STEM-B

STEM-T เป็นการใช้ช่องสัญญาณเพื่อปลุกอุปกรณ์ข้างเคียงด้วยสัญญาณในย่านความถี่อื่นๆ หลังจากนั้นจึงทำการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณหลักต่อไป ด้วยโพรโทคอล STEM-T จะสามารถรับประกันเวลาที่น้อยที่สุด ก่อนเริ่มทำการส่งข้อมูลหลังจากมีเหตุการณ์เกิดขึ้น

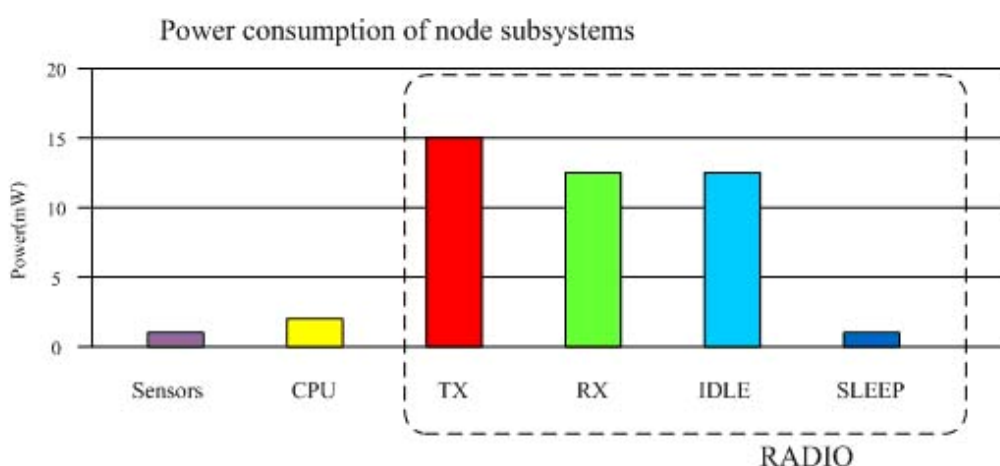
STEM-B เป็นการใช้ช่องสัญญาณเพื่อปลุกอุปกรณ์ข้างเคียงด้วยสัญญาณ beacon ในย่านความถี่อื่นๆ หลังจากนั้นอุปกรณ์ข้างเคียงจะทำงานในลักษณะสลับการเปิดและปิดภาคการสื่อสารในอัตราส่วนที่ต่ำเพื่อรับข้อมูล ดังนั้นโพรโทคอล STEM-B จะมีการกินพลังงานที่น้อยกว่าเพราะไม่จำเป็นต้องทำการเปิดภาคการสื่อสารของช่องสัญญาณรองต่อเนื่อง

Wireless Sensor Routing Protocols

ระบบเครือข่ายที่ใช้ในอุปกรณ์รับรู้ไร้สายมีความแตกต่างจากระบบเครือข่ายประเภทอื่นๆ โดยมีลักษณะเฉพาะมาก คือ เป็นภาพรวมของ เหตุการณ์ (Event) กับ อุปกรณ์ปลายทาง (Sinks node) มากกว่า อุปกรณ์ต้นทาง (Source node) กับ อุปกรณ์ปลายทาง (Sinks node) และ อุปกรณ์รับรู้สนใจข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมดจากสภาพแวดล้อม มากกว่า อ่านข้อมูลจากอุปกรณ์วัดแต่ละชนิด ดังนั้นลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจึงต้องการระบบเครือข่ายที่ตอบสนองกับการทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

ระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นมีส่วนการค้นหาเส้นทางในการส่งข้อมูลภายในเครือข่ายที่เหมาะสมนั้น จะลดการใช้พลังงานในการทำงานของระบบอุปกรณ์เครือข่ายรับรู้ไร้สายโดยรวมอย่างมาก และโพรโทคอลการหาเส้นทางนั้นมีจำนวนมาก ซึ่งจะเหมาะสมกับงานแต่ละด้านโดยเฉพาะมาก การเลือกวิธีการใช้งานของระบบเครือข่ายและโพรโทคอลการหาเส้นทางที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน เพราะโพรโทคอลในการหาเส้นทางแต่ละประเภทมีจุดเด่นที่แตกต่างกันออกไป

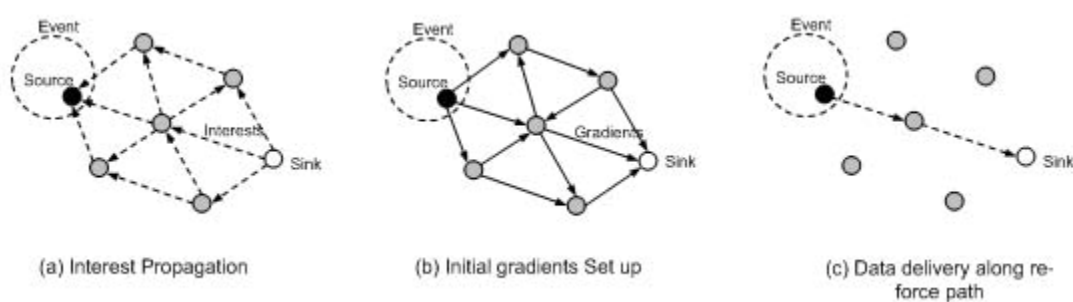
โพรโทคอลที่ใช้ในเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายเป็นสิ่งสำคัญในการใช้พลังงานเนื่องจากการติดต่อสื่อสารผ่านอุปกรณ์เคลื่อนที่วิทยุระยะสั้น



ภาพที่ 60 เปรียบเทียบการกินพลังงานในส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

Flat Networks Routing หมายถึง อุปกรณ์ทุกตัวภายในเครือข่ายทำหน้าที่เหมือนกัน และทำงานร่วมกันในการหาเส้นทางไปยัง Base Station (BS) หรืออุปกรณ์ปลายทาง

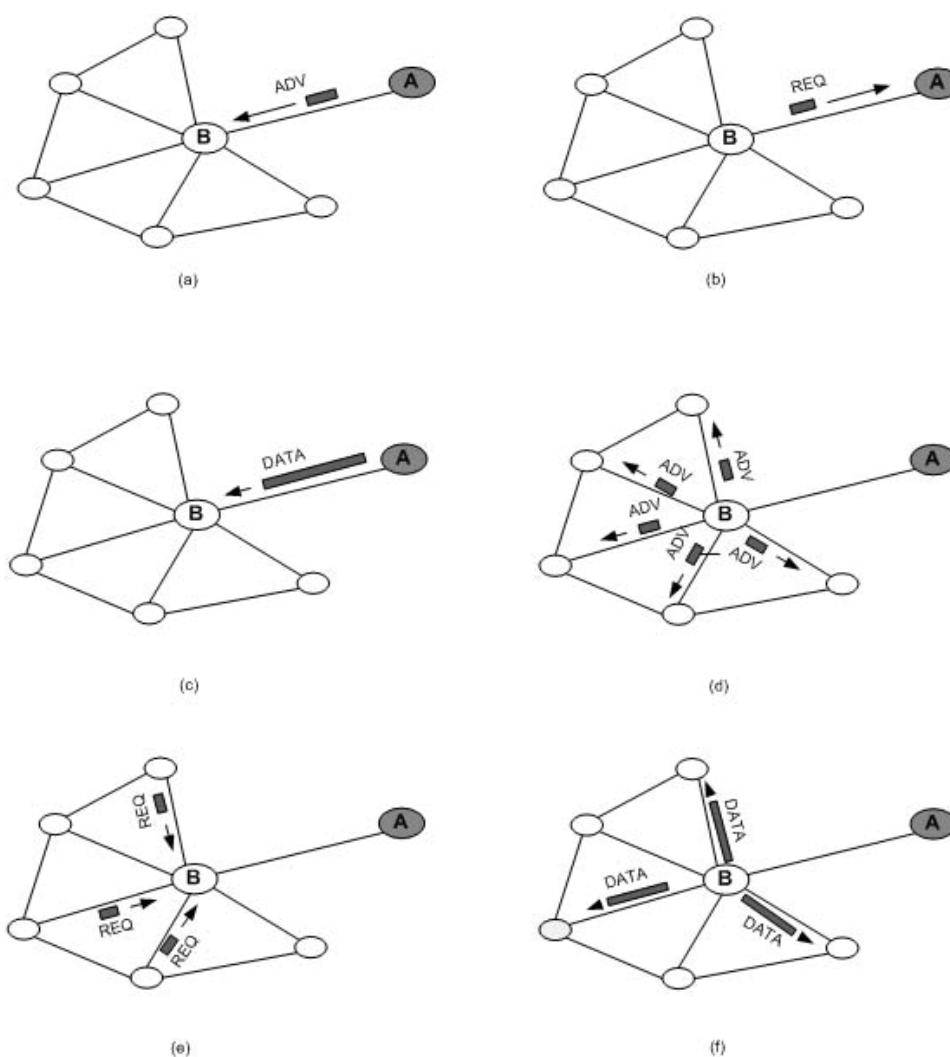
ในการส่งข้อมูลไปยังตัว BS. ซึ่งมีวิธีต่างๆ ดังนี้ คือ Directed Diffusion เป็นการหาเส้นทาง โดยเริ่มจากเกตเวย์ หรือ อุปกรณ์ที่ต้องการรับข้อมูล (Sink Node) ทำการ Flooding Data ไปในเครือข่าย และ อุปกรณ์ที่อยู่ในเครือข่ายจะส่งข้อมูลต่อ (Forward) ไปยังทุกๆ อุปกรณ์ (Source Node) ทั้งหมดในเครือข่าย หลังจากที่ได้ทำการ Flooding Data แล้ว อุปกรณ์ที่เป็น Source node สามารถสร้าง ตาราง Routing Table ที่บอกตำแหน่งของเกตเวย์ เพื่อทำการส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ ทั้งนี้ Sink Node สามารถทำการอัปเดต Routing Table แบบอิสระ



ภาพที่ 61 ขั้นตอนการส่งข้อมูลด้วยวิธีการค้นหาเส้นทาง Directed Diffusion

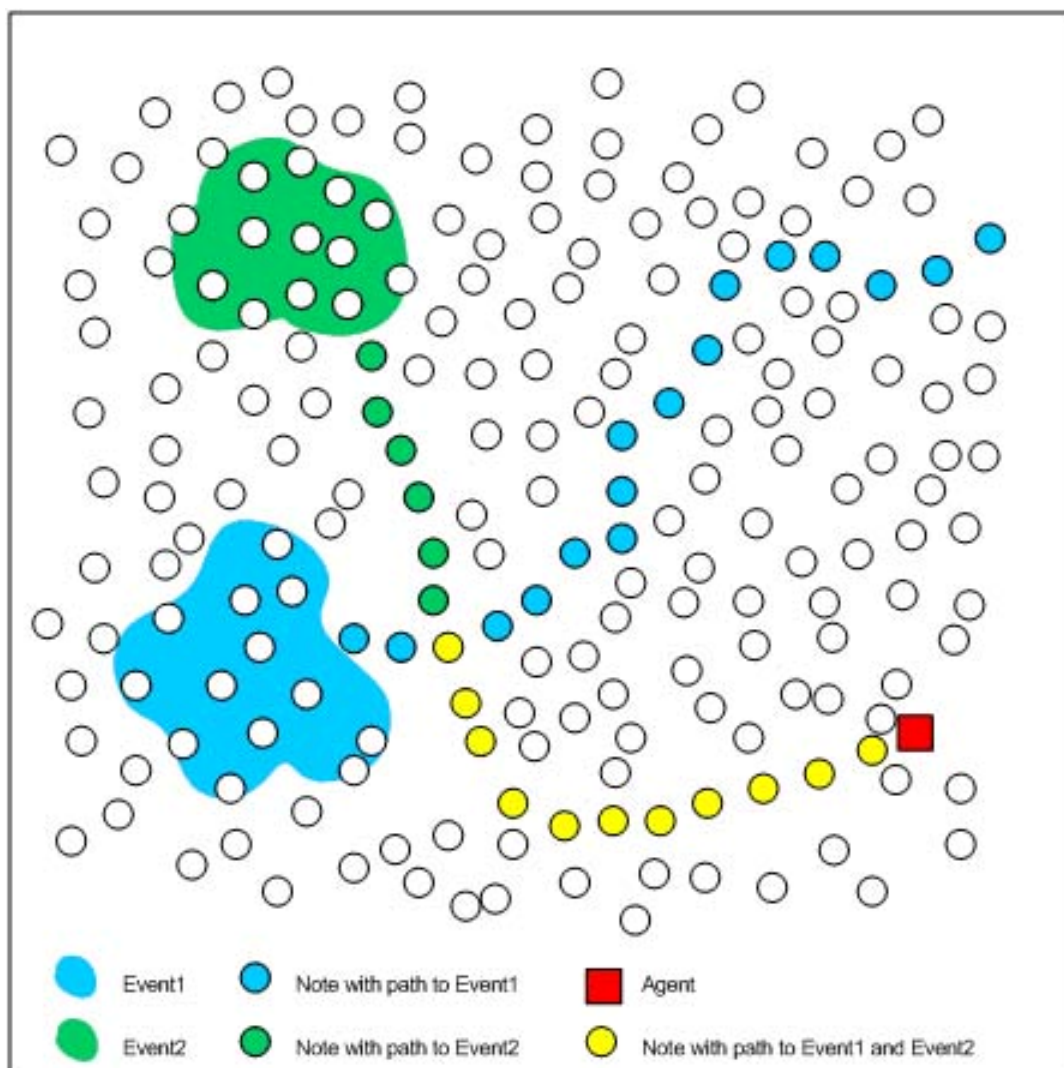
Flooding Technique (SPIN) เป็นการส่งข้อมูล ที่พัฒนาการ flooding ข้อมูล โดยก่อนที่จะส่งข้อมูลแบบ Point-to-point ไปยัง Neighbor node จะทำการส่ง packet ADV (New Data Advertise) เพื่อบอกว่ามีข้อมูลใหม่เข้ามาและพร้อมที่จะส่งให้ และอุปกรณ์ที่ได้รับยังไม่ได้รับข้อมูลใหม่นี้จะทำการส่ง packet REQ (Request for Data) เพื่อขอข้อมูลใหม่นั้น และ หลังจากที่ได้รับ Packet REQ แล้วจะทำการส่งข้อมูลใหม่(Data messages)

โดย SPIN สามารถนำมาใช้กับ การถ่ายทอดสัญญาณ (Broadcast Message) โดยมีข้อดีคือ สามารถส่งเฉพาะอุปกรณ์ที่ยังไม่ได้รับข้อมูลเท่านั้นได้ ซึ่งไม่เหมือนกับการถ่ายทอดสัญญาณ (Broadcast) โดยทั่วไปที่อุปกรณ์บางตัวได้รับข้อมูลที่ได้รับแล้วซ้ำหลายครั้ง โดยมีขั้นตอนการทำงานตามลำดับของโปรโตคอล SPIN ดังรูป



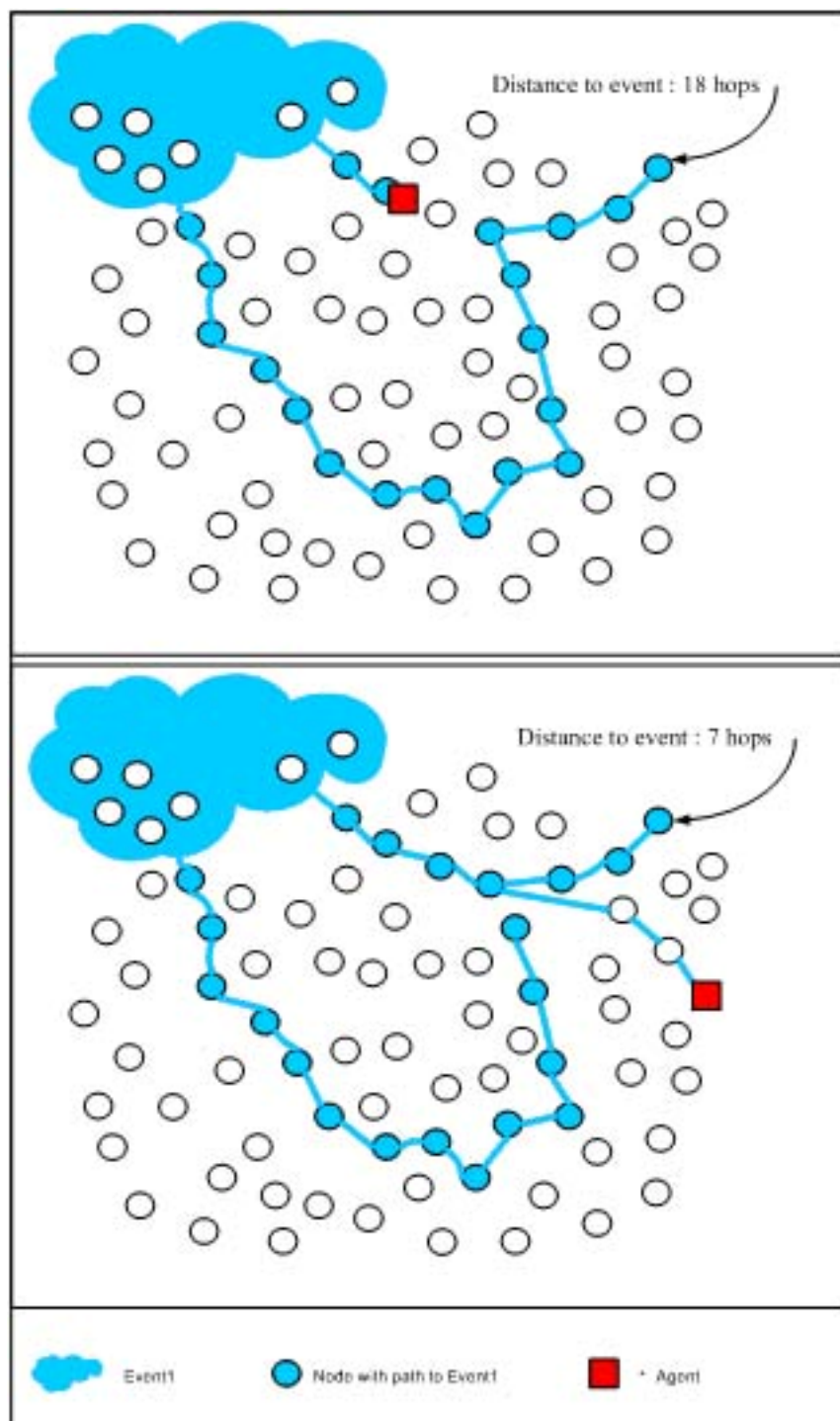
ภาพที่ 62 ขั้นตอนการทำงานของโปรโตคอล SPIN

Rumor Routing Algorithm เป็นการ Random ทิศทางการส่งข้อมูลไปยังปลายทาง ด้วย Packet ที่มีลักษณะผ่านไปยัง node ต่างๆ ได้หลายครั้ง (long-live message) ที่เรียกว่า agent packet และทำการเพิ่มความสามารถต่างๆ ดังนี้ คือ ถ้า Agent packet ผ่านเส้นทางที่ agent ตัวอื่นวิ่ง จะทำการรวม agent เข้าด้วยกัน ดังรูป



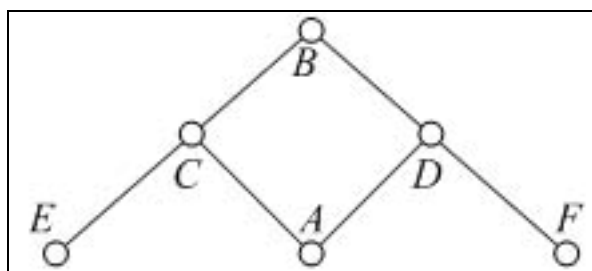
ภาพที่ 63 การรวมเหตุการณ์ 2 เหตุการณ์เข้าร่วมด้วยภายในข้อมูลในการส่ง

และถ้าอุปกรณ์ที่เป็น Agent packet พบว่าอุปกรณ์รับรู้ไร้สายตัวไหนมี hop count ที่ไปยัง sink node ได้น้อยกว่าก็จะทำการแก้เส้นทางให้ใหม่ให้ผ่านทางอุปกรณ์ตัวนั้น ซึ่งเป็นวิธีในการลดจำนวน hop ดังรูป



ภาพที่ 64 การลดจำนวน hops ลงจากการทำงานของโปรโตคอล

Adaptive Protocols ในกรณีของการส่งข้อมูลแบบ Multi-hop เพื่อไปยังเกตเวย์ อุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างทาง จะถูกใช้พลังงานไปด้วย ซึ่งอาจเกิดปัญหาการเปลี่ยนการใช้พลังงานในเครือข่ายดังตัวอย่าง



ภาพที่ 65 การวางโครงข่ายที่ใช้ Adaptive Protocols

ถ้า Node A, Node E ต้องการส่งข้อมูล 50 Packet ให้กับ Node B และ Node F
ต้องการส่งข้อมูล 100 Packet ให้กับ Node B

ด้วยเส้นทาง ADB , ECB, FDB ซึ่งจะเกิดเหตุการณ์ที่ Node D ที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างทาง
นั้น ใช้พลังงานรับส่งข้อมูล 150 Packet ส่วน Node C ใช้พลังงานรับส่งข้อมูล 50 Packet โดย
ออกแบบมาเพื่อ แก้ปัญหาในการหาเส้นทาง โดยสามารถกำหนด Cost ในการเลือกเส้นทางเพิ่มเติม
ได้ โดยอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ที่ทำการส่งข้อมูลไปมากๆ ถึงจุดที่กำหนดก็จะเพิ่ม Cost ในเส้นทางที่
ผ่านอุปกรณ์

วิธีการหาเส้นทางที่ตระหนักถึงพลังงานและภูมิประเทศ (Geographical and Energy Aware Routing, GEAR) (Yu *et al.*, 2001) วิธีการที่กล่าวก่อนหน้านี้ไม่ได้นำลักษณะเชิงภูมิประเทศ หรือ ตำแหน่งของเซนเซอร์มาวิเคราะห์ GEAR (Yu *et al.*, 2001) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยนำพลังงาน และลักษณะที่ตั้งของเซนเซอร์มาพิจารณา โดยการหาเส้นทางแบบ GEAR มีกฎข้อบังคับ 2 ประการ ประการแรกถ้าหากเซนเซอร์ตัวส่งสามารถค้นหาเซนเซอร์ที่เป็นเพื่อนบ้าน และเซนเซอร์ที่อยู่ใกล้ กับสถานีฐานมากกว่าเซนเซอร์ตัวส่ง ก็จะทำการส่งข้อมูลให้กับเซนเซอร์ตัวดังกล่าว โดยพิจารณา จากค่าการเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ที่ให้ค่าต่ำที่สุด ประการที่สองถ้าหากเซนเซอร์ตัวส่งไม่สามารถ ค้นหาเซนเซอร์ที่เป็นเพื่อนบ้าน และอยู่ใกล้กับสถานีฐานมากกว่าเซนเซอร์ตัวส่ง ก็จะทำการ พิจารณาค่าการเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ตัวส่งและเซนเซอร์ที่เป็นเพื่อนบ้าน โดยจะส่งข้อมูลให้กับ เซนเซอร์ที่ให้ค่าการเชื่อมต่อต่ำที่สุด

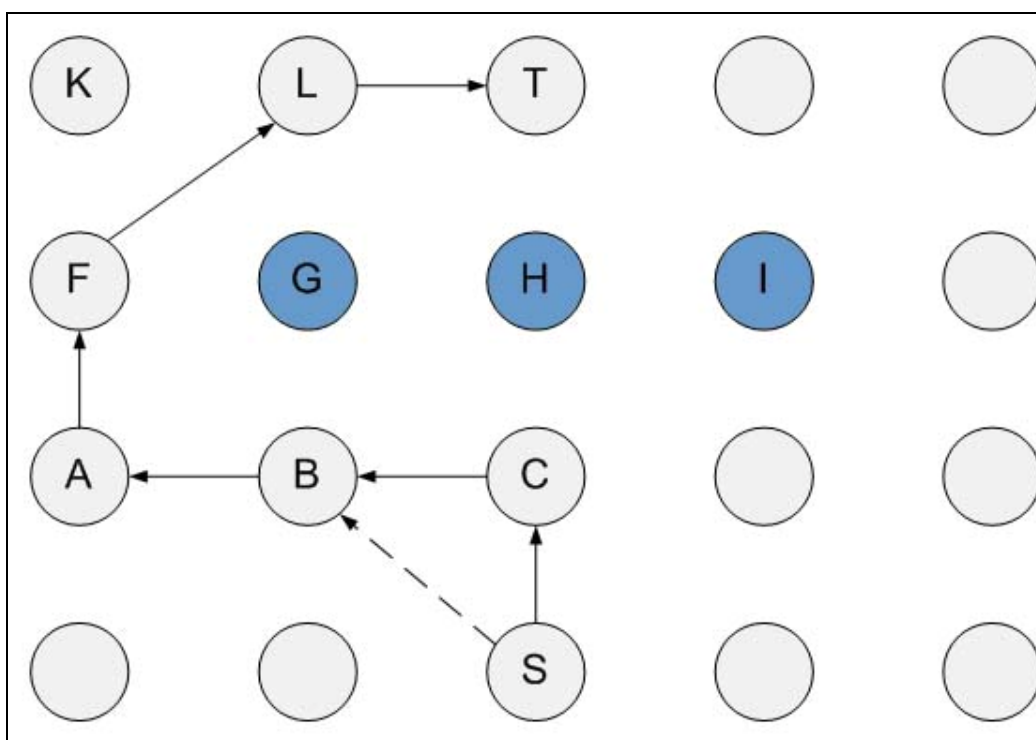
โดยค่าการเชื่อมต่อของวิธีแบบ GEAR ถูกเรียกว่า learned cost ($h(N_i, R)$) ขณะที่ N_i เป็นเซนเซอร์ที่ต้องการส่งข้อมูล ไปยังสถานีฐาน R ซึ่งการคำนวณค่าเริ่มต้นของ learned cost หรือที่เรียกว่า estimated cost ($c(N_i, R)$) สามารถทำได้โดย

$$c(N_i, R) = \alpha d(N_i, R) + (1 - \alpha)e(N_i) \quad (6)$$

โดย α เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก $d(N_i, R)$ เป็นระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ N_i และสถานีฐาน และ $e(N_i)$ เป็นพลังงานที่ถูกใช้ไปแล้วของเซนเซอร์ N_i

ถ้าเซนเซอร์ N_i อยู่ห่างจากสถานีฐาน R มากเกินกว่าที่จะทำการติดต่อโดยตรง เซนเซอร์ N_i จะทำการเลือกเซนเซอร์ที่เป็นเพื่อนบ้าน $N_{\min}$ เพื่อที่จะส่งข้อมูล โดยหลังจากที่ เซนเซอร์ N_i ได้ส่งข้อมูลแล้ว ก็จะทำการปรับค่า $h(N_i, R)$ ของตัวเองให้มีค่าเท่ากับ $h(N_{\min}, R) + c(N_i, N_{\min})$

จากภาพที่ 66 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อ โดยสมมติให้ค่า $\alpha = 1$ เซนเซอร์ S ต้องการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานซึ่งก็คือเซนเซอร์ T โดยขณะที่เซนเซอร์ G, H และ I ไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากไม่มีพลังงาน โดยที่เวลาเริ่มต้น เซนเซอร์ S พบว่ามีเซนเซอร์ B, C และ D ที่เป็นเซนเซอร์ที่เป็นเพื่อนบ้านและอยู่ใกล้กับสถานีฐาน (T) มากกว่าตัวเซนเซอร์ S เอง ซึ่งค่า learned cost ของเซนเซอร์ B, C และ D มีค่าเท่ากับ $h(B, T) = c(B, T) = \sqrt{5}$, $h(C, T) = c(C, T) = 2$, $h(D, T) = c(D, T) = \sqrt{5}$ ดังนั้นเซนเซอร์ที่จะถูกเลือกเพื่อที่จะส่งข้อมูลให้ก็คือ เซนเซอร์ C เนื่องจากให้ค่า learned cost ต่ำที่สุด หลังจาก que เซนเซอร์ C รับข้อมูลมาเรียบร้อยแล้ว ที่เซนเซอร์ C พบว่าไม่มีเซนเซอร์เพื่อนบ้านของเซนเซอร์ C ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐาน (T) มากกว่าเซนเซอร์ C เอง ดังนั้นเซนเซอร์ C จะเลือกส่งข้อมูลให้กับเซนเซอร์เพื่อนบ้าน ที่ให้ค่า learned cost ต่ำที่สุด ในที่นี้มีทั้งเซนเซอร์ B และ D ที่ให้ค่า $h(B, T) = h(D, T) = \sqrt{5}$ สมมติว่าเซนเซอร์ C เลือกเซนเซอร์ B ในการส่งข้อมูลให้ หลังจาก que เซนเซอร์ C ส่งข้อมูลให้เซนเซอร์ B แล้ว ก็จะทำการปรับค่า $h(C, T)$ ของตัวเองให้เป็น $h(C, T) = h(B, T) + c(C, B)$



ภาพที่ 66 เส้นทางการส่งข้อมูลด้วยวิธี GEAR

วิธีการหาเส้นทางโดยใช้การเสริมการไหล (Flow Augmentation , FA) (Chang and Tassiulas, 2004) เป็นการหาเส้นทางการส่งข้อมูลโดยมีพื้นฐานจาก การหาค่าการเชื่อมต่อรวมน้อยที่สุด (*shortest cost path*) ในแต่ละเส้นทาง ซึ่งใน (Chang and Tassiulas, 2004) ได้มีการกำหนดค่าการเชื่อมต่อที่สะท้อนถึงพลังงานที่เหลือของเซนเซอร์ โดยเซนเซอร์ที่เหลือพลังงานน้อยจะให้ค่าการเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์เพื่อนบ้านและตัวเองที่สูง เพื่อให้ตัวเซนเซอร์ที่มีพลังงานเหลือน้อยไม่อยู่ในเส้นทางการส่งข้อมูล โดยได้มีการกำหนดค่าเชื่อมต่อไว้ดังนี้

$$\text{cost}_{ij} = (e_{ij}^t)^{x_1} \underline{E}_i^{-x_2} E_i^{x_3} + (e_{ij}^r)^{x_1} \underline{E}_j^{-x_2} E_j^{x_3} \quad (7)$$

โดย e_{ij}^t คือพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์ i และ j e_{ij}^r คือพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูลระหว่างเซนเซอร์ i และ j $\underline{E}_i$ และ $\underline{E}_j$ คือพลังงานที่เหลือ ณ ปัจจุบันของเซนเซอร์ i และ j ตามลำดับ E_i และ E_j คือพลังงานตอนเริ่มต้นของเซนเซอร์ i และ j ตามลำดับ และ x_1, x_2 และ x_3 เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก โดยซึ่งใน (J.-H. Chang and L. Tassiulas, 2004) กำหนดให้ x_1 มีค่า 1 หรือ 0 ขณะที่ $x_2 = x_3 = x$ โดยที่ $1 \leq x \leq 15$ ขั้นตอนการหาเส้นทางของ FA สามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่

- คำนวณหาค่าการเชื่อมต่อรวมน้อยที่สุด (shortest cost path) จากเซนเซอร์ตัวส่งไปยังสถานีฐาน (base-station) โดยมีการกำหนดค่าการเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ ตามสมการที่ (7)
- ถ้าหากสามารถหาเส้นทางการส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์ตัวส่งและสถานีฐาน (base-station) ได้จึงทำการส่งข้อมูลโดยใช้เส้นทางที่หาได้ แต่ถ้าหากไม่สามารถหาเส้นทางได้ เซนเซอร์ตัวส่งจะทำการละทิ้งข้อมูลดังกล่าว
- ในขณะที่มีการส่งข้อมูลตามเส้นทางที่หาได้ เซนเซอร์แต่ละตัวที่อยู่ในเส้นทางการส่งข้อมูล จะทำการปรับปรุงค่าการเชื่อมต่อของตัวเองให้มีความทันสมัยอยู่เสมอ

วิธีการหาเส้นทางโดยอาศัยค่าความจุกลุ่มข้อมูลที่ตกค้างอยู่มากที่สุด (Maximum Residual Packet Capacity, MRPC) (Misra and Banerjee, 2002) เป็นวิธีการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูล ที่ทำให้เส้นทางที่ถูกเลือกสามารถส่งข้อมูลได้จำนวนมากที่สุด ถ้าสมมติว่ามีเส้นทางที่ถูกเลือกให้ใช้ในการส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์และสถานีฐาน เป็นเส้นทาง P และทั้งเซนเซอร์ i และ j อยู่ในเส้นทาง P การคำนวณหาจำนวนข้อมูลที่ส่งได้ระหว่างเซนเซอร์ด้วยกันเองสามารถทำได้โดย

$$C_{i,j} = \frac{B_i}{E_{i,j}} \quad (8)$$

โดย B_i คือพลังงานที่เหลือ ณ ปัจจุบันของเซนเซอร์ i และ $E_{i,j}$ คือพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์ i และ j จะเห็นได้ว่าอายุการใช้งานของเส้นทางหนึ่งๆ ที่ใช้ในการส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์และสถานีฐานจะถูกกำหนดด้วยค่าของจำนวนข้อมูลที่ส่งได้ระหว่างเซนเซอร์ด้วยกันเอง ที่ให้ค่าน้อยน้อยที่สุด หรือกล่าวคือ อายุการใช้งานของเส้นทาง P สามารถหาได้โดย

$$Life_P = \min_{(i,j) \in P} \{C_{i,j}\} \quad (9)$$

เส้นทางที่ถูกเลือกเพื่อใช้เป็นเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์และสถานีฐานนั้น ด้วยวิธีการ MRPC เราจะได้เส้นทางที่ให้ค่าอายุการใช้งานของเส้นทางมากที่สุด ในเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ระหว่างเซนเซอร์และสถานีฐาน ดังนั้นเส้นทางที่ถูกเลือกคือ

$$P_{candidate} = \max\{Life_p \mid P \in \text{all possible routes}\} \quad (10)$$

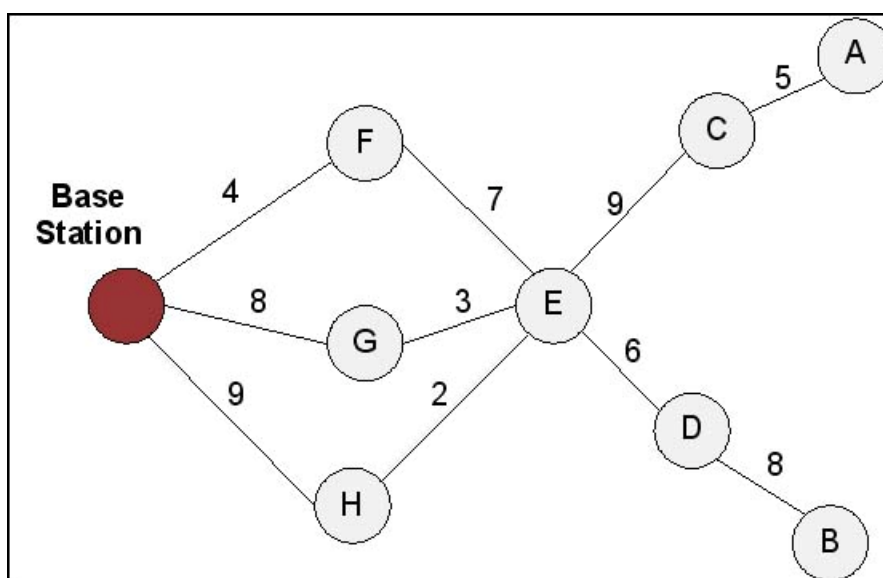
ตัวอย่างการหาเส้นทางได้แสดงไว้ในภาพที่ 22 โดยสมมติว่าเซนเซอร์ a ต้องการส่งข้อมูลมายังสถานีฐาน (base-station) สามารถเลือกเส้นทางได้ทั้งหมด 3 เส้นทาง คือ

เส้นทางที่ 1: จาก a ไปยัง c ไปยัง e ไปยัง f และไปยังสถานีฐาน จากสมการที่ (9) พบว่า $Life_1 = \min\{5, 9, 7, 4\}$ ดังนั้น $Life_1 = 4$

เส้นทางที่ 2: จาก a ไปยัง c ไปยัง e ไปยัง g และไปยัง สถานีฐาน จากสมการที่ (9) พบว่า $Life_2 = \min\{5, 9, 3, 8\}$ ดังนั้น $Life_2 = 3$

เส้นทางที่ 3: จาก a ไปยัง c ไปยัง e ไปยัง h และไปยังสถานีฐาน จากสมการที่ (9) พบว่า $Life_3 = \min\{5, 9, 2, 9\}$ ดังนั้น $Life_3 = 2$

จากสมการที่ (10) เซนเซอร์ a จึงเลือกใช้เส้นทางที่ 1 เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน (base-station) ทั้งนี้เนื่องจากเส้นทางดังกล่าวให้ค่าอายุการใช้งานของเส้นทางมากที่สุด ซึ่งเท่ากับ 4



ภาพที่ 67 การเชื่อมต่อของระบบเซนเซอร์ และจำนวนข้อมูลที่สามารถส่งได้ระหว่างเซนเซอร์

การทำให้ค่าความจุมีค่าสูงสุด (Capacity Maximization, CMAX) (Kar *et al.*, 2003) เป็นวิธีการค้นหาเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลโดยมุ่งเน้นที่การยืดอายุการใช้งานของระบบ เซนเซอร์ ซึ่งผู้เขียน (Kar *et al.*, 2003) ได้ใช้จำนวนข้อมูลที่ส่งสำเร็จ เพื่อเป็นตัวบอกถึงอายุการใช้งานของระบบเซนเซอร์ ซึ่งการหาเส้นทางโดยที่สามารถรู้ถึงลำดับข้อมูลที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้า หรือที่เรียกว่า การหาเส้นทางแบบออฟไลน์ (off-line routing algorithm) นั้นจะทำให้สามารถหาค่าอายุการใช้งานมากที่สุดของระบบเซนเซอร์ได้อย่างแท้จริง แต่เนื่องจากในการใช้งานจริงของระบบเซนเซอร์ เราไม่สามารถรู้ถึงลำดับของการเกิดเหตุการณ์ได้ ดังนั้นจึงมีกระบวนการค้นหาเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบออนไลน์ หรือกล่าวคือการค้นหาเส้นทางโดยที่ไม่ต้องรู้ลำดับการเกิดของข้อมูล (on-line routing algorithm) ซึ่งค่าอายุการใช้งานที่ได้นั้น จะไม่ใช่ค่าอายุการใช้งานของระบบเซนเซอร์ที่มากที่สุดเท่าที่ระบบดังกล่าวสามารถทำได้ การค้นหาเส้นทางแบบ CMAX ก็เป็นหนึ่งในรูปแบบการหาเส้นทางแบบออนไลน์ โดยใช้วิธีการกำหนดค่าเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ อีกทั้งยังใช้วิธีการหาค่าเชื่อมต่อรวมน้อยที่สุด (shortest cost path) เพื่อค้นหาเส้นทางในการส่งข้อมูลจากเซนเซอร์ไปยังสถานีฐาน ซึ่งการกำหนดค่าเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ u และ v ใน CMAX มีดังนี้

$$w(u, v) = e(u, v) \times (\lambda^{\alpha(u)} - 1) \quad (11)$$

โดย $e(u, v)$ เป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์ u และ v และค่า λ เป็นค่าคงที่ ส่วนค่า $\alpha(u)$ นั้นนิยามเป็น

$$\alpha(u) = 1 - \frac{ce(u)}{ie(u)} \quad (12)$$

โดยค่า $ce(u)$ เป็นพลังงาน ณ ปัจจุบันของเซนเซอร์ u และ $ie(u)$ เป็นพลังงานเริ่มต้นของเซนเซอร์ u หลังจากที่ได้กำหนดค่าเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ภายในระบบแล้ว เมื่อมีเซนเซอร์ตัวใดต้องการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน จะต้องทำการค้นหาเส้นทางโดยวิธีการหาค่าเชื่อมต่อรวมน้อยที่สุด (shortest cost path) เมื่อได้เส้นทางแล้วจึงทำการส่งข้อมูล พร้อมทั้งการปรับปรุงค่าการเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ที่อยู่ในเส้นทาง ขั้นตอนการหาเส้นทางของ CMAX สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

- ทำการคัดเซนเซอร์ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่าพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลออกจากระบบ $ce(u) < e(u, v)$ ในขณะที่ v คือเซนเซอร์ที่เป็นเพื่อนบ้านของเซนเซอร์ u

- กำหนดค่าการเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ที่เหลือจากขั้นตอนที่ 1 ตามสมการที่ (11)
- ทำการหาเส้นทางที่ให้ค่าเชื่อมต่อรวมน้อยที่สุด (shortest cost path) ระหว่างเซนเซอร์ตัวส่งและสถานีฐาน (base-station) โดยใช้ค่าเชื่อมต่อที่กำหนดในขั้นตอนที่ 2
- ทำการส่งข้อมูลตามเส้นทางที่หาได้มาในขั้นตอนที่ 3

วิธีการหาเส้นทางแบบอายุชีวิตสูงสุดแบบออนไลน์ (Online Maximum Lifetime, OML) (Park and Sahni, 2006) เพื่อที่จะเป็นการยืดอายุการใช้งานของเซนเซอร์แต่ละตัว จึงมีความจำเป็นที่เซนเซอร์จะต้องส่งข้อมูลให้กับเซนเซอร์เพื่อนบ้านที่ใกล้ตัวเซนเซอร์เองมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการส่งขึ้นกับระยะทาง (d^n) โดยที่ n เป็น path loss exponent ด้วยวิธีการของ OML จึงแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนในการหาเส้นทางเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลในแต่ละครั้ง โดยขั้นตอนแรกจะทำการหาเส้นทางที่ใช้พลังงานรวมในการส่งน้อยที่สุด (ซึ่งอาจจะใช้วิธีแบบ MTE) จากนั้นเซนเซอร์ทุกตัวที่อยู่ในเส้นทางที่ได้จากขั้นตอนแรก จะทำการคำนวณหาพลังงานที่เหลือหลังจากที่ได้ส่งข้อมูลการส่งข้อมูล เพื่อหาว่าเซนเซอร์ที่มีพลังงานเหลือน้อยที่สุดมีค่าเป็นเท่าไรหลังจากที่ได้ส่งข้อมูลแล้วให้ค่าดังกล่าวมีค่าเป็น minRE จากนั้นทำการพิจารณาเซนเซอร์ทุกตัวที่อยู่ในระบบ ว่ามีเซนเซอร์ตัวใดบ้าง ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่า minRE หากเซนเซอร์ตัวใดมีพลังงานเหลือน้อยกว่า ก็จะถูกตัดออกไปจากระบบ ไม่นำมาพิจารณาในการคำนวณหาเส้นทางในขั้นตอนต่อไป ฉะนั้นหลังจากที่เสร็จการคำนวณหาเส้นทางในขั้นตอนแรก เราจะได้กลุ่มของเซนเซอร์ที่มีพลังงานมากกว่า minRE ซึ่งในการคำนวณหาเส้นทางในขั้นตอนที่สองผู้เขียน (Park and Sahni, 2006) ได้กำหนดค่าการเชื่อมต่อ $\{w''(u, v)\}$ ระหว่างเซนเซอร์ โดยกำหนดไว้ดังนี้

$$w''(u, v) = w(u, v) + \rho(u, v)(\lambda^{\alpha(u)} - 1) \quad (13)$$

โดย $w(u, v)$ คือพลังงานที่ใช้ในการส่งระหว่างเซนเซอร์ u และ v และ λ คือค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก ส่วนค่าเลขกำลัง $\alpha(u)$ นิยามเป็น

$$\alpha(u) = \frac{\min RE}{ce(u)} \quad (14)$$

โดย $ce(u)$ คือพลังงาน ณ ปัจจุบันของเซนเซอร์ u และค่าสัมประสิทธิ์ $\rho(u, v)$ ถูกกำหนดให้เป็น

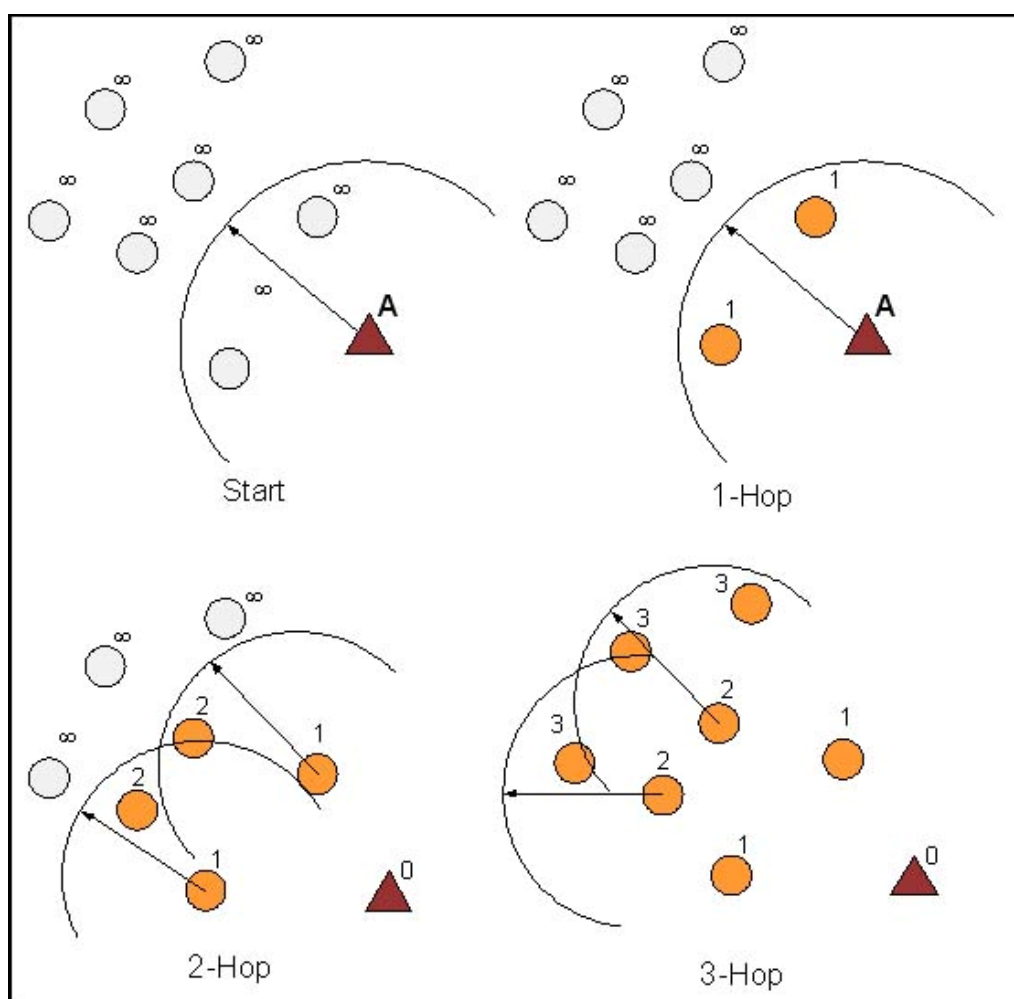
$$\rho(u, v) = \begin{cases} 0 & \text{if } ce(u) - w(u, v) > eMin(u) \\ c & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

โดย $eMin(u)$ คือพลังงานที่ใช้ในการส่งระหว่างเซนเซอร์ u และ v ที่น้อยที่สุด การหาเส้นทางที่ใช้ส่งข้อมูลด้วยวิธี OML สามารถแบ่งได้ 6 ขั้นตอนดังนี้

- ทำการคัดเซนเซอร์ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่าพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลออกจากระบบ $ce(u) < w(u, v)$ ในขณะที่ v คือเซนเซอร์ที่เป็นเพื่อนบ้านของเซนเซอร์ u
- ทำการหาเส้นทางที่ใช้พลังงานรวมในการส่งน้อยที่สุด (ซึ่งอาจจะใช้วิธีแบบ MTE) จากเซนเซอร์ตัวส่งไปยังสถานีฐาน (base-station)
- ทำการจำลองการส่งข้อมูลโดยใช้เส้นทางในขั้นตอนที่ 2 เพื่อหาว่าเซนเซอร์ที่มีพลังงานเหลือน้อยที่สุดมีค่าเป็นเท่าไรหลังจากที่ได้ส่งข้อมูล แล้วให้ค่าดังกล่าวมีค่าเป็น minRE
- ทำการเปรียบเทียบพลังงานของเซนเซอร์ทุกตัวที่มีจากขั้นตอนที่ 1 ถ้าหากเซนเซอร์มีพลังงานเหลือน้อยกว่า minRE จะถูกคัดออกจากระบบ
- เมื่อได้กลุ่มของเซนเซอร์ที่มีพลังงานเหลือมากกว่า minRE จึงมีการกำหนดค่าการเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ ตามสมการที่ (13)
- ทำการหาเส้นทางที่ให้ค่าเชื่อมต่อรวมน้อยที่สุด (shortest cost path) ระหว่างเซนเซอร์ตัวส่งและสถานีฐาน (base-station) โดยใช้ค่าเชื่อมต่อที่กำหนดในขั้นตอนที่ 5

การหาเส้นทางโดยใช้วิธีการเลือกตั้ง (Election) (Cheng and Jia, 2005) การส่งข้อมูลแบบ Election มีพื้นฐานคล้ายกับ MH กล่าวคือทุกเซนเซอร์ที่อยู่ในระบบจะต้องทราบว่าตัวเองอยู่ห่างจากสถานีฐาน (base-station) เป็นจำนวนกี่ก้าวกระโดดตัวอย่างของการหาจำนวนก้าวกระโดดได้แสดงไว้ในภาพ ที่ 58 โดยหลักของการส่งข้อมูลแบบ Election คือทุกครั้งที่มีการส่งข้อมูลจะต้อง

เข้าใกล้กับสถานีฐานมากขึ้น เมื่อเซนเซอร์ตัวใดต้องการที่ส่งข้อมูล มันจะทำการตรวจสอบดูว่า ในบรรดาเซนเซอร์ที่เป็นเพื่อนบ้าน มีเซนเซอร์ที่ได้ถูกกำหนดให้เป็นตัวรับข้อมูลหรือยัง ถ้าหากมีการกำหนดแล้ว ก็จะทำการส่งข้อมูลไปยังเซนเซอร์ที่ได้ถูกกำหนดทันที แต่ถ้าหากว่ายังไม่ได้ถูกกำหนด ต้องทำกระบวนการเลือกจากเซนเซอร์ที่เป็นเพื่อนบ้าน



ภาพที่ 68 การหาจำนวนก้าวกระโดดของระบบเซนเซอร์

ส่วน ภาพที่ 69 เป็นกระบวนการเลือกตั้งของเซนเซอร์เพื่อหาเซนเซอร์ที่จะทำหน้าที่รับข้อมูล โดยเซนเซอร์ที่จะเป็นคู่แข่งในการเลือกนั้น จะต้องมีความสมบัติ 2 ประการ

- เซนเซอร์ต้องมีพลังงานมากกว่า 0
- เซนเซอร์ต้องอยู่ใกล้กับสถานีฐานมากกว่าเซนเซอร์ตัวส่งข้อมูล

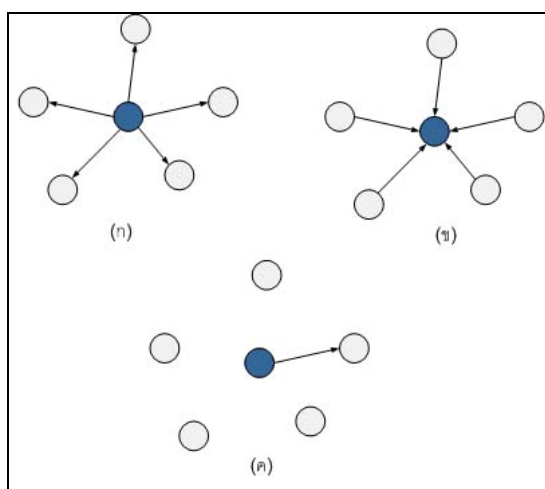
หลังจากนั้นเซนเซอร์ที่เป็นคู่แข่งทุกตัว จะทำการหาค่าระยะเวลาที่ให้ใช้งาน ($time_to_work$) ซึ่งเป็นค่าที่บอกว่าเซนเซอร์ที่ได้ถูกรับเลือกจะอยู่ในสถานะเป็นเซนเซอร์ที่ได้ถูกเลือกจนกระทั่งพลังงานของตัวเซนเซอร์ถูกใช้ไปครึ่งหนึ่งของพลังงานตอนที่ได้รับเลือก โดยสามารถหาระยะเวลาที่ให้ใช้งาน ($time_to_work$) ได้ดังนี้

$$time_to_work = current_energy / Pt_ / 2 \quad (16)$$

โดย $current_energy$ เป็นพลังงานที่เหลือ ณ ปัจจุบัน

$Pt_$ เป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล

เมื่อเซนเซอร์คู่แข่งได้ทำการคำนวณหาค่าระยะเวลาที่ให้ใช้งานของตัวเองตามสมการที่ (16) ก็จะมีการส่งค่าระยะเวลาที่ให้ใช้งาน กลับไปยังเซนเซอร์ที่ต้องการส่งข้อมูล เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าระยะเวลาที่ให้ใช้งานของเซนเซอร์คู่แข่งแต่ละตัว และทำการส่งข้อมูลให้กับเซนเซอร์ที่ให้ค่าระยะเวลาที่ให้ใช้งานมากที่สุด



ภาพที่ 69 การเลือกตั้งของเซนเซอร์เพื่อหาเซนเซอร์ที่จะทำหน้าที่รับข้อมูล (ก) เซนเซอร์ประกาศข้อความการเลือกตั้ง (ข) เซนเซอร์ตอบกลับข้อความการเลือกตั้ง (ค) เซนเซอร์ส่งข้อมูลให้กับเซนเซอร์ที่ได้รับการเลือกตั้ง

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH) (Heinzelman *et al.*, 2000) เป็นการสุ่มตัวเก็บข้อมูล (Base Station) จากอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่อยู่ในระบบเครือข่ายโดยจำนวนของตัวเก็บข้อมูลจะเท่ากับจำนวนของcluster และเพื่อการกระจายการกินพลังงานของ

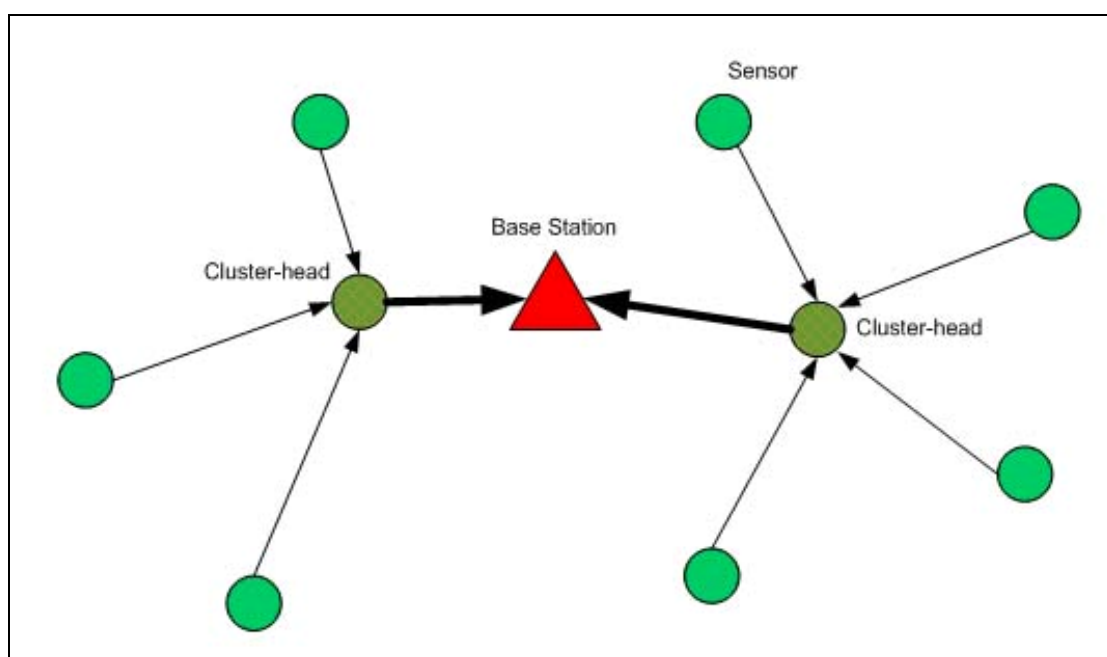
ระบบเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั้งระบบเครือข่ายนั้น ระบบก็จะทำการสุ่มตัวเก็บข้อมูลอีกหลายรอบเพื่อเวียนการทำงานของตัวเก็บข้อมูลเนื่องจากตัวเก็บข้อมูลนั้นจะกินพลังงานมากกว่าอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่อยู่ในเครือข่าย และเมื่อได้ตัวเก็บข้อมูลจะการสร้างความตารางของ TDMA และอุปกรณ์รับรู้ไร้สายก็จะทำการส่งข้อมูลไปยังตัวเก็บข้อมูลตามตาราง schedule และตัวเก็บข้อมูลจะทำการเปิดภาครับวิทยุตลอดจนกว่าจะทำการ รวบรวมข้อมูลครบทั้ง cluster และส่วนอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่ไม่ได้รับการสุ่มจะทำการปิดการสื่อสารส่วนวิทยุจนกว่าจะถึงเวลาของการส่งใน slot ตัวเอง

การส่งข้อมูลแบบ LEACH เซนเซอร์ที่อยู่ในระบบจะถูกจัดแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย (cluster) โดยมีเซนเซอร์บางตัวทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ที่อยู่ภายในกลุ่ม เพื่อทำการรวมข้อมูล (aggregation data) ก่อนที่จะส่งไปยังสถานีฐาน โดยเซนเซอร์ที่ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลถูกเรียกว่า cluster-head ซึ่งนอกจากจะมีหน้าที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์ที่อยู่ภายในกลุ่มแล้ว ยังมีหน้าที่ส่งข้อมูลที่ผ่านการบีบอัด (compress data) แล้ว ไปยังสถานีฐานโดยตรง

ในภาพที่ 60 เป็นรูปแบบการส่งข้อมูลแบบ LEACH หรืออาจกล่าวง่ายๆว่า เซนเซอร์ที่ถูกเลือกเป็น cluster-head นั้น จะถูกใช้พลังงานหมดไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้น LEACH จึงมีกระบวนการสุ่มเลือกเซนเซอร์เพื่อมาเป็น cluster-head ทั้งนี้เพื่อเป็นการกระจายการใช้พลังงานของเซนเซอร์ในระบบ ซึ่งการเลือกเซนเซอร์เพื่อทำหน้าที่ cluster-head สามารถทำได้โดยการให้เซนเซอร์แต่ละตัวทำการสุ่มหิบบค่าระหว่าง 0 และ 1 ถ้าหากค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่า $T(n)$ เซนเซอร์ตัวนั้นจะกลายมาเป็น cluster-head ซึ่งค่า $T(n)$ สามารถหาได้จาก

$$T(n) = \frac{P}{1 - P \times \left(r \bmod \frac{1}{P} \right)}, n \in G \quad (17)$$

โดย P เป็นจำนวนร้อยละของ cluster-head ในระบบเซนเซอร์ r จำนวนรอบปัจจุบัน (round) โดย 1 รอบ นับได้จาก การที่เซนเซอร์ทุกตัวทำการส่งข้อมูล 1 ครั้ง และ G เป็นกลุ่มของเซนเซอร์ที่ยังไม่ได้รับการถูกเลือกให้เป็น cluster-head ใน $\frac{1}{P}$ รอบ ซึ่งการใช้วิธีดังกล่าวในสมการ (17) ทำให้แน่ใจได้ว่าเซนเซอร์ทุกตัวในระบบ จะต้องถูกเลือกให้เป็น cluster-head ภายใน $\frac{1}{P}$ รอบ โดยผู้เขียน (Heinzelman *et al.*, 2000) ได้ทำการทดลองหาจำนวน cluster-head ที่เหมาะสม



ภาพที่ 70 การส่งข้อมูลแบบ LEACH

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์

- 1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ
- 1.2 บอร์ดอุปกรณ์รับรู้ไร้สายต้นแบบ 8 อุปกรณ์
- 1.3 บอร์ดอุปกรณ์ควบคุมไร้สายต้นแบบ 2 อุปกรณ์
- 1.4 บอร์ดสำเร็จรูปสำหรับนักพัฒนาใช้หน่วยประมวลผลตระกูล ARM 9
- 1.5 บอร์ดสำเร็จรูปสำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตและอินเทอร์เน็ตแบบไร้

สาย (Lantronix) พร้อมสายแลน 1 เส้น

- 1.6 อุปกรณ์จัดเส้นทางสำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตภายในแบบไร้สาย (Wireless Router) พร้อมสายแลน 1 เส้น เพื่อเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตภายนอก

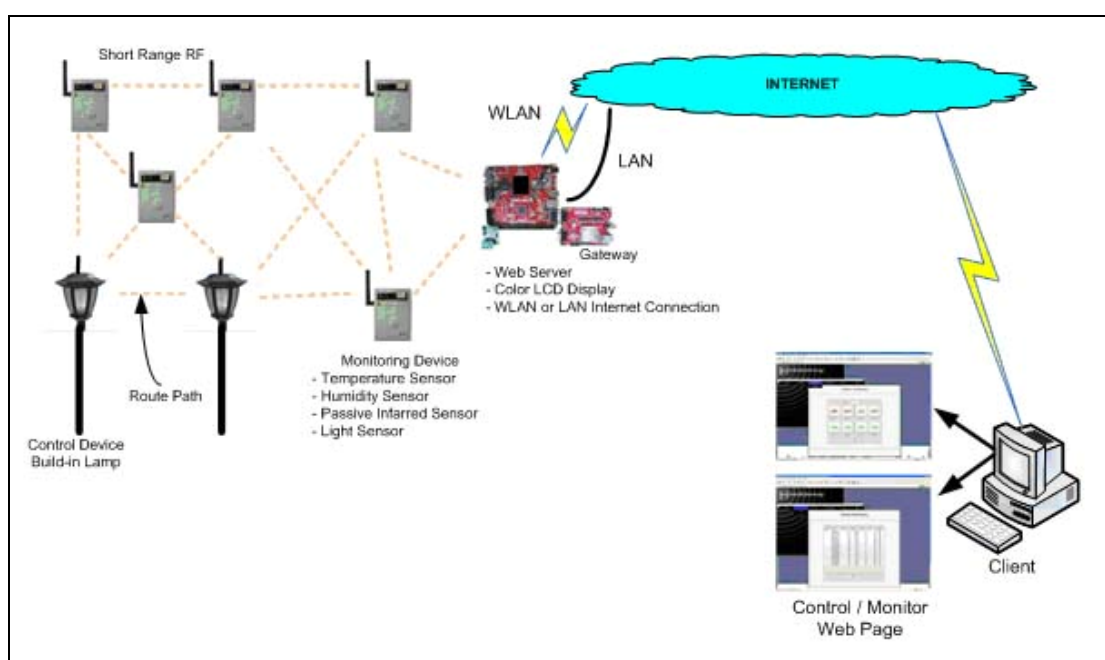
- 1.7 โมดูลรับส่งสัญญาณ CC2500
- 1.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ MSP430
- 1.9 บอร์ดดาวน์โหลดโปรแกรมสำหรับ MSP430 (JTAG)
- 1.10 บอร์ดดาวน์โหลดโปรแกรมสำหรับ ARM9 (N-Link)
- 1.11 อุปกรณ์การวัดวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้า (Oscilloscope Analyzer)
- 1.12 อุปกรณ์การวัดแรงดันไฟฟ้าดิจิทัลมัลติมิเตอร์
- 1.13 อุปกรณ์อื่นๆ เช่น Power Supply, อุปกรณ์สำหรับปักกรี

2. โปรแกรมซอฟต์แวร์

- 2.1 ระบบปฏิบัติการ Windows XP
- 2.2 ระบบปฏิบัติการ UCOS-II สำหรับเกตเวย์
- 2.3 โปรแกรม PADS Logic, PADS Layout
- 2.4 โปรแกรม IAR IDE MSP430 3.41A, Keil uVersion ARM IDE
- 2.5 โปรแกรม Eclipse Java IDE
- 2.6 โปรแกรม สำหรับโปรแกรม Wiport
- 2.7 โปรแกรม เชื่อมต่อข้อมูลอนุกรมผ่านสายเชื่อมต่อแบบอนุกรม

วิธีการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการสร้างระบบเครือข่ายไร้สาย ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ อุปกรณ์รับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Node) อุปกรณ์ควบคุมไร้สาย (Wireless Actuator Node) และเกตเวย์ (Gateway) ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายภายนอก ลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์เป็นเครือข่ายไร้สายแสดงดังภาพที่ 71



ภาพที่ 71 ระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

โดยระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายมีลักษณะการทำงานเป็นแบบรายคาบเพื่อทำการส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ โดยเริ่มจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สายแต่ละตัวจะทำการตรวจวัดสภาพแวดล้อมทางกายภาพ ตามที่ได้ติดตั้งไว้ในภายในตัวอุปกรณ์เอง คือ อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นในอากาศ อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง และอุปกรณ์ตรวจจัดการเคลื่อนไหว ภายในบริเวณของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นๆ และหลังจากรวบรวมข้อมูลของอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ ที่อยู่ภายในจะทำการส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ โดยวิธีการส่งต่อไปเป็นขั้นๆ (Hop by Hop) ซึ่งเส้นทางการส่งข้อมูลได้มาจากการทำงานของโพรโทคอลการหาเส้นทางภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สายแต่ละตัว

เกตเวย์เมื่อได้รับข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สายตัวใดตัวหนึ่งแล้วจะทำการรวบรวมข้อมูลไปยังฐานข้อมูลภายในตัวเกตเวย์ และทำการจัดการข้อมูลให้เป็นรูปแบบหน้าเว็บ ซึ่งสามารถให้ผู้ใช้งานติดต่อผ่านทางหน้าเว็บเพจจากอินเทอร์เน็ตเว็บเบราว์เซอร์ได้อย่างสะดวก รวดเร็ว นอกจากนี้หน้าเว็บเพจสามารถทำการติดต่อกับอุปกรณ์ควบคุมไร้สายได้อีกด้วย ซึ่งเกตเวย์จะทำการส่งคำสั่งควบคุมไปยังอุปกรณ์ควบคุมไร้สายปลายทางผ่านระบบเครือข่ายแบบไร้สายด้วยคลื่นวิทยุระยะสั้น ซึ่งสามารถทำให้ผู้ใช้งานควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมได้

การสร้างระบบต้นแบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายและโปรโตคอลการหาเส้นทางแบ่งขั้นตอนการสร้างได้เป็น 5 ขั้นตอน คือ

- การพัฒนาฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Node) และอุปกรณ์ควบคุมไร้สาย (Wireless Actuator Node)
- การพัฒนาซอฟต์แวร์การเชื่อมต่ออุปกรณ์รับรู้ไร้สายและอุปกรณ์ควบคุมไร้สายเป็นเครือข่ายรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network)
- การพัฒนาฮาร์ดแวร์ของเกตเวย์
- การพัฒนาซอฟต์แวร์บนเกตเวย์
- การทดสอบการทำงานของเครือข่ายทั้งหมด

1. การพัฒนาฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Node) และอุปกรณ์ควบคุมไร้สาย (Wireless Actuator Node)

1.1 การพัฒนาฮาร์ดแวร์ต้นแบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ อุปกรณ์รับรู้ไร้สายประเภทเฝ้าดู (อุปกรณ์รับรู้ไร้สาย) และ อุปกรณ์รับรู้ไร้สายประเภทควบคุม (อุปกรณ์ควบคุมไร้สาย) โดยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ

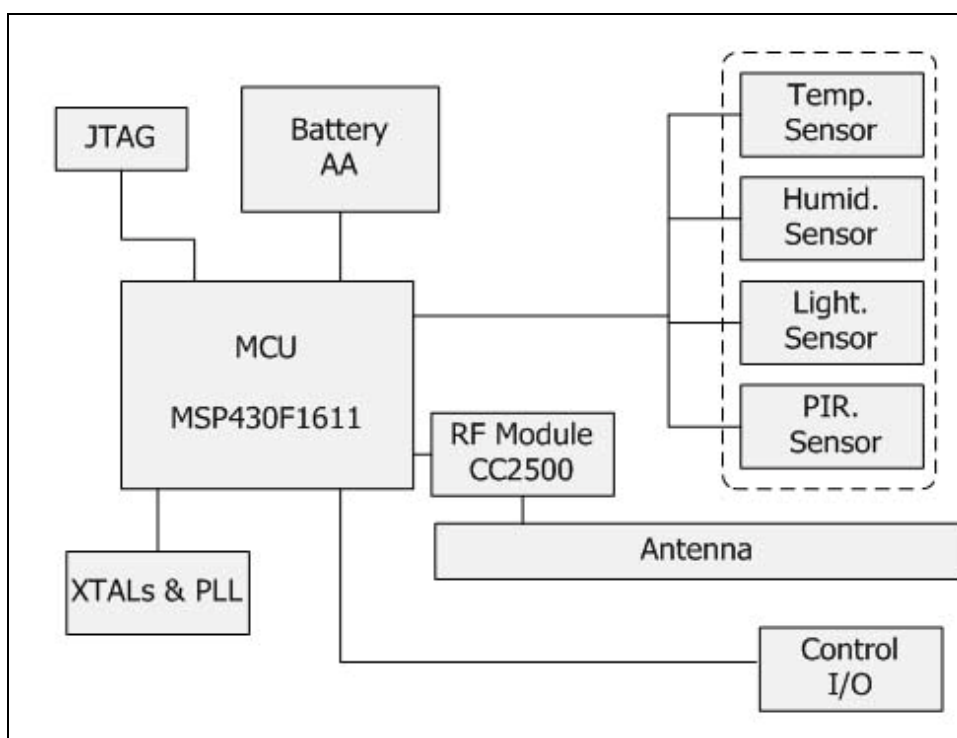
1.1.1 ออกแบบแผงวงจรพิมพ์ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายประเภทเฝ้าดูและประเภทควบคุม โดยให้เชื่อมต่อองค์ประกอบต่างๆ ตามภาพที่ 72 สำหรับการทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายแบบเฝ้าดู

1.1.2 จัดทำแผ่นวงจรพิมพ์พร้อมประกอบบอร์ดด้วยอุปกรณ์ต่างๆ

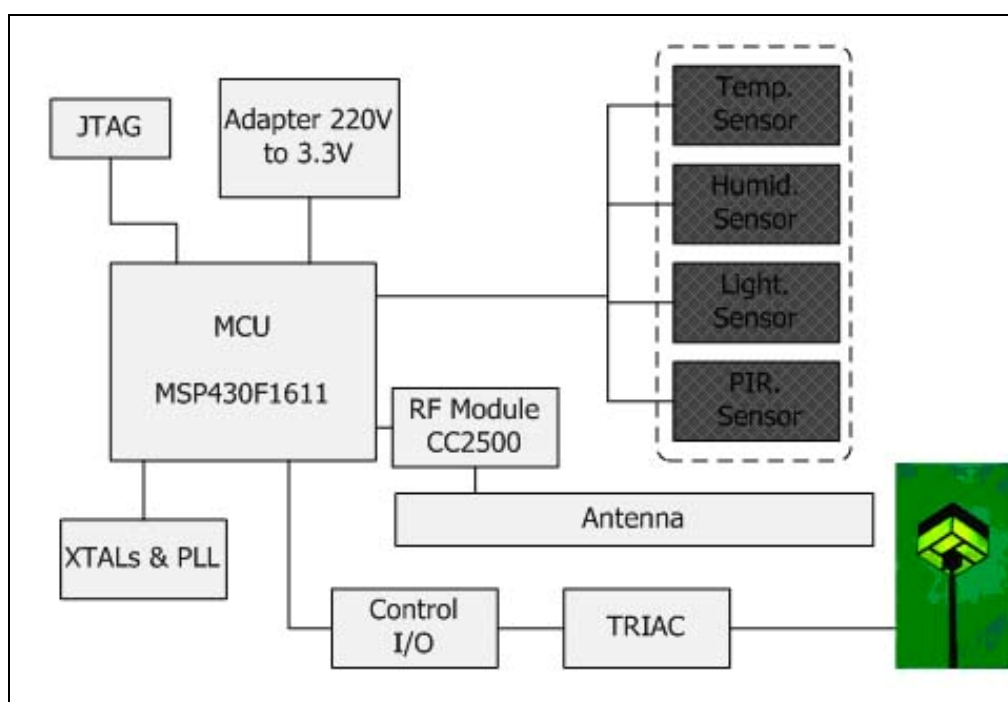
1.1.3 ประกอบบอร์ดพร้อมแบตเตอรี่ภายในกล่องพกพาสำหรับอุปกรณ์เฝ้าดู

1.1.4 ออกแบบวงจรพร้อมประกอบบอร์ดสำหรับขับเคลื่อน 10 A สำหรับขับเคลื่อนหลอดไฟให้แสงสว่างขนาด 100 Watt ตามรายละเอียดตามภาพที่ 73

1.1.5 ติดตั้งบอร์ดอุปกรณ์รับรู้ไร้สายและบอร์ดขับเคลื่อนเข้าภายในโคมไฟให้แสงสว่างขนาด 220 Volt เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุม



ภาพที่ 72 แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย



ภาพที่ 73 แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์ควบคุมไร้สาย

1.2 โดยอุปกรณ์รับรู้ไร้สายมีองค์ประกอบและรายละเอียดทางเทคนิคต่างๆ ดังนี้

1.2.1 ไมโครคอนโทรเลอร์รหัส MSP430F1611

ก. หน่วยความจำ 48KB+256B Flash Memory และ 10KB RAM

ข. ใช้ไฟเลี้ยงวงจรต่ำ ที่ช่วง 1.8 Volts ถึง 3.6 Volts

ค. ประหยัดพลังงาน

1) Active Mode : กินกระแส 330 μ A ที่ความถี่ 1 MHz แรงดัน 2.2 V.

2) Standby Mode : 1.1 μ A

3) Off Mode : 0.2 μ A

ง. ใช้ความถี่ในระบบได้ตั้งแต่ 32.768 kHz จนถึง 8 MHz

จ. มีพอร์ต I/O ขนาด 8 บิต

ฉ. มี A/D ขนาด 12 บิต

ช. มี Timer ขนาด 16 บิต 2 ตัว

ซ. มีพอร์ตสำหรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมได้ 2 ชุด

1.2.2 โมดูลเชื่อมต่อวิทยุระยะสั้น Chipcon CC2500 ที่ใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz

ก. ใช้ช่วงคลื่นความถี่ตั้งแต่ 2400-2483.5 MHz

ข. ความเร็วในการสื่อสาร 250 kbps

ค. กินพลังงานต่ำที่ 13.3 mA ในการใช้งานปกติ

1.2.3 อุปกรณ์วัดต่างๆ คือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้น อุปกรณ์วัดความเข้มแสง และอุปกรณ์วัดการเคลื่อนไหว

ก. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้น SHT15 (SENSIRION)

1) วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -40 องศาถึง 123.8 องศา (เซลเซียส)

2) ระยะเวลาในการตอบสนองกับอุณหภูมิภายใน 5 – 30 วินาที

3) ความผิดพลาดไม่เกิน +/- ไม่เกิน 0.3 องศา (เซลเซียส)

4) วัดความชื้นได้ตั้งแต่ 0 – 100 %RH

5) ระยะเวลาในการตอบสนองกับความชื้นภายใน 8 วินาที

6) ความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 2.0\%RH$

7) โหมดประหยัดพลังงาน $0.3 - 0.15\ \mu A$

8) โหมดทำงาน $0.55 - 1\ mA$

ข. อุปกรณ์วัดการเคลื่อนไหว MP10M

1) ระยะการวัดการเคลื่อนไหวสูงสุด 10 เมตร

2) อัตราการกินพลังงาน ตั้งแต่ $170 - 300\ \mu A$

ค. อุปกรณ์วัดความเข้มแสง KE-10715

1) วัดความเข้มแสงตั้งแต่ $10 - 100\ Lux$

1.2.4 แบตเตอรี่ขนาด AA 2 ก้อน สำหรับจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์

2. การพัฒนาซอฟต์แวร์การเชื่อมต่ออุปกรณ์รับรู้ไร้สายและอุปกรณ์ควบคุมไร้สายเป็นเครือข่ายรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network)

2.1 กำหนดขอบเขตการทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายสำหรับออกแบบการทำงานด้วยโครงสร้างการออกแบบ คือ .

2.1.1 การติดตั้งอุปกรณ์สามารถเพิ่มหรือลดจำนวนอุปกรณ์รับรู้ไร้สายและอุปกรณ์ควบคุมไร้สายได้ตามต้องการ

2.1.2 อุปกรณ์สามารถเคลื่อนย้ายได้อย่างอิสระภายในบริเวณที่สัญญาณของระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สายครอบคลุมไปถึง โดยไม่ส่งผลต่อการทำงานแต่อย่างใด

2.1.3 ราคา ขนาด ทรัพยากรภายในและพลังงาน คือ มีขนาดเล็กโดยใช้พลังงานแบตเตอรี่ขนาด AA 2 ก้อนบรรจุภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

2.1.4 อุปกรณ์เครือข่ายสื่อสารกันโดยใช้คลื่นวิทยุระยะสั้นย่านความถี่ 2.4 GHz

2.1.5 ทอพอโลยีเครือข่าย เป็นแบบร่างแห

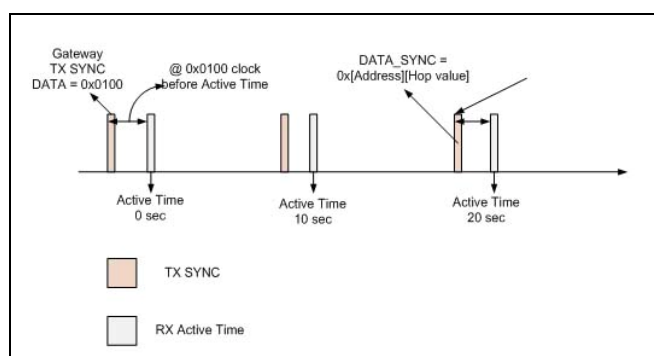
2.1.6 ทำการส่งข้อมูลไม่เกิน 1 ครั้งต่อ 30 นาที

2.1.7 จำนวนของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายภายในเครือข่ายไม่เกิน 255 ตัว

2.1.8 อายุการใช้งาน สามารถทำงานภายในระบบเครือข่ายได้นาน 1 ปี

2.2 ออกแบบและปรับปรุงซอฟต์แวร์ใช้งานภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สายให้สามารถทำงานได้ตามโครงสร้างการออกแบบสำหรับการทำงานของที่ได้กำหนดไว้ โดยระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายมีวิธีการดังนี้

เกตเวย์ทำการส่งสัญญาณชีพจรไปยังเครือข่ายเป็นรายคาบ ทุกๆ 10 วินาที (คาบของการส่งสามารถเพิ่มได้เพื่อประหยัดพลังงาน) เรียกว่าช่วง TX SYNC (ช่วงการส่งสัญญาณ Sync packet) และทำการเปลี่ยนโหมดการส่งเข้าสู่โหมดการรับ (เรียกว่า RX Active Time) ซึ่งเป็นช่วงการรับส่งข้อมูลภายในเครือข่ายทั้งหมด ดังนั้น อุปกรณ์ใดที่ได้รับสัญญาณ SYNC Package นี้จะทราบถึงตำแหน่งเวลาที่ถูกต้องสำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ใดๆที่ได้รับสัญญาณจากเกตเวย์



ภาพที่ 74 แสดงระยะเวลาในการส่งสัญญาณชีพจรของเกตเวย์

โดยข้อมูลที่ส่งในช่วง TX SYNC นั้นจะมีขนาด 2 byte ซึ่งมีลักษณะเป็น broadcast package ซึ่งไบต์แรกหมายถึงสองความหมายคือ รหัสประจำตัวของเกตเวย์ และ ตำแหน่งของเวลาก่อนการสื่อสารมีหน่วยเป็นจำนวนคล็อกของออสซิลเลเตอร์ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ภายในเครือข่าย (เท่ากับ 32.768 kHz) โดยเวลาเป็นวินาทีที่สามารถคำนวณได้คือ นำไบต์แรก (0x01) คูณเข้ากับค่าคงที่ 0x0100 (256 ฐานสิบ) เท่ากับ 0x0100 คล็อกของออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเท่ากับ 256หารด้วย 32768 = 7.1825 มิลลิวินาที โดยการใช้ประโยชน์จากรหัสประจำตัวของเกตเวย์มาใช้ในการเลือกตำแหน่งการสื่อสารจะทำให้ลดพลังงานไฟฟ้าในการส่งข้อมูลอย่างมากเนื่องจากการส่งสัญญาณชีพจรต้องทำการส่งข้อมูลเป็นรายคาบจนถึงอายุการใช้งาน

ไบต์ที่สองแบ่งออกเป็นสี่บิตบนและสี่บิตล่าง โดยมีความหมายคือ สี่บิตบนหมายถึง ชนิดของอุปกรณ์ต่างๆ รวมไปถึงการบอกสถานะการทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายของเครือข่าย ซึ่งสามารถกำหนดให้เข้ากับการประยุกต์งานต่างๆ ได้ถึง 16 ประเภทแต่ในโครงงานวิจัยนี้จะใช้ 3 ประเภทคือ

2.2.1 สี่บิตบนมีข้อมูลเท่ากับ 1 (0x1?) หมายถึง เป็นอุปกรณ์เกตเวย์

2.2.2 สี่บิตบนมีข้อมูลเท่ากับ 2 (0x2?) หมายถึง เป็นอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

2.2.3 สี่บิตบนมีข้อมูลเท่ากับ F (0xF?) หมายถึง อุปกรณ์รับรู้ไร้สายไม่พบสัญญาณเครือข่ายใดๆ

2.2.4

Position 0x00	Position 0x00
0x0? = Gateway Device	0x8? = N/A
0x1? = Node Device	0x9? = N/A
0x2? = N/A	0xA? = N/A
0x3? = N/A	0xB? = N/A
0x4? = N/A	0xC? = N/A
0x5? = N/A	0xD? = N/A
0x6? = N/A	0xE? = N/A
0x7? = N/A	0xF? = Can't be router.

ภาพที่ 75 สี่บิตบนของไบต์ที่สองของข้อมูลสัญญาณชีพจร

สื่อบิตต่างของไบต์ที่สองหมายความว่า ค่าที่ใช้ในการคำนวณในการหาเส้นทางของอุปกรณ์โดยถ้ายังมีค่ามาก เส้นทางที่ผ่านอุปกรณ์นั้นๆ จะมีค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลมาก ดังนั้นอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะเลือกเส้นทางที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

Position 0x00	Position 0x00
0x?0 = 1 hop and battery = 100 %	0x?8 = 3 hop and battery = 100 %
0x?1 = 1 hop and battery = 90 %	0x?9 = 3 hop and battery = 90 %
0x?2 = 1 hop and battery = 80 %	0x?A = 3 hop and battery = 80 %
0x?3 = 1 hop and battery = 70 %	0x?B = 3 hop and battery = 70 %
0x?4 = 2 hop and battery = 100 %	0x?C = 4 hop and battery = 100 %
0x?5 = 2 hop and battery = 90 %	0x?D = 4 hop and battery = 90 %
0x?6 = 2 hop and battery = 80 %	0x?E = 4 hop and battery = 80 %
0x?7 = 2 hop and battery = 70 %	0x?F = 4 hop and battery = 70 %

ภาพที่ 76 สื่อบิตต่างของไบต์ที่สองของข้อมูลสัญญาณชีพจร

อุปกรณ์รับรู้ไร้สายเริ่มทำงานจากสถานะเริ่มต้น (Initial State) เป็นสถานะการทำงาน หลังจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์รับรู้ไร้สายให้ทำงานโดย กำหนดตัวแปรที่สำคัญในการทำงาน และกำหนดรีจิสเตอร์ภาคการสื่อสารไร้สาย อุปกรณ์ประมวลผล และอุปกรณ์รับรู้ทั้งหมดที่ติดตั้งภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

ในกรณีที่ไม่สามารถกำหนดรีจิสเตอร์ภายในภาคการสื่อสารได้นั้น อุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะกระพิบไฟสีแดงเพื่อบอกถึงการทำงานที่ไม่สมบูรณ์ของภาคการสื่อสารไร้สาย โดยสามารถแก้ไขได้โดยตรวจสอบเช็คอุปกรณ์รับรู้ไร้สายส่วนภาคการสื่อสารซึ่งสามารถทำให้ผู้ติดตั้งใช้งานทราบได้ถึงปัญหาของอุปกรณ์ได้ทันที

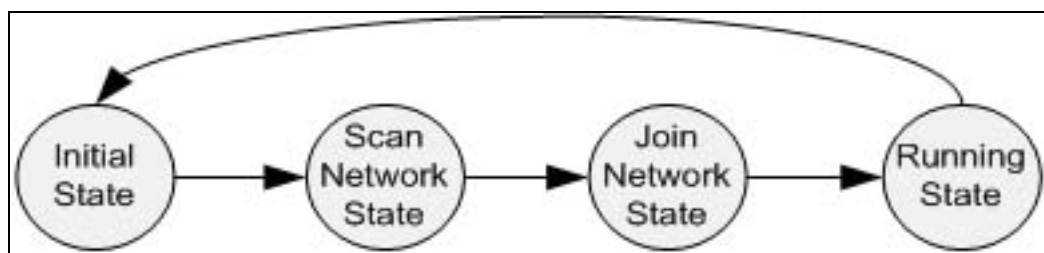
ในกรณีที่ไม่สามารถอ่านค่าสัญญาณจากอุปกรณ์รับรู้ได้นั้น อุปกรณ์จะทำการกระพิบไฟสีเขียวเพื่อบอกถึงการทำงานที่ไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์รับรู้ โดยสามารถแก้ไขได้โดยตรวจสอบเช็คอุปกรณ์รับรู้ที่ติดตั้งภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สายได้อย่างรวดเร็ว

หลังจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สายเริ่มต้นทำงานโดยการเปลี่ยนสถานะของภาคการสื่อสารเป็นภาครับเพื่อทำการค้นหาสัญญาณชีพจรภายในระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สายซึ่งจะเรียกว่าสถานะค้นหาเครือข่าย (Find Network State) โดยเมื่อได้รับสัญญาณชีพจรจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สายข้างเคียงหรือ

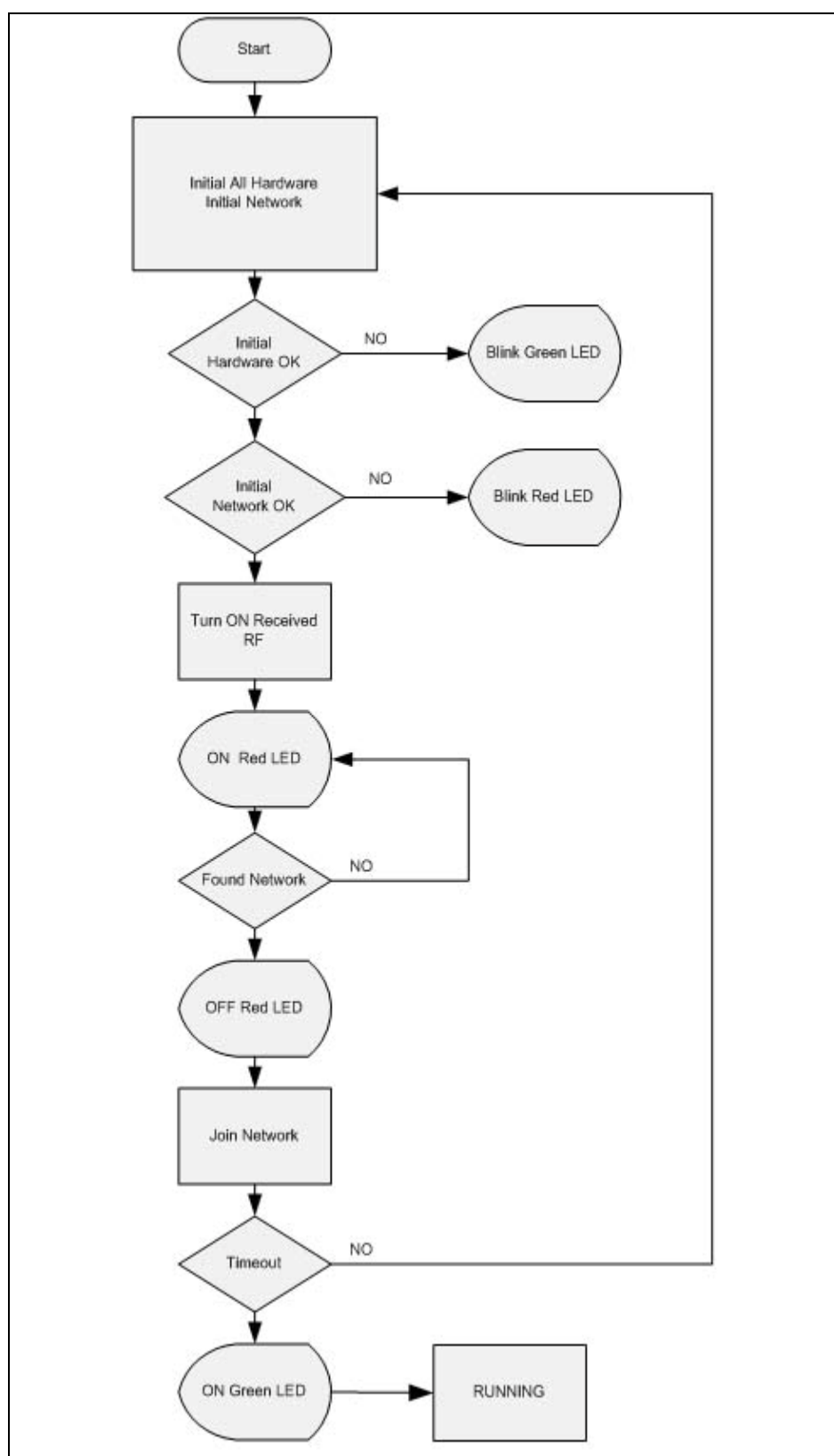
สัญญาณชีพจรของเกตเวย์ อุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะทำการอ่านข้อมูลสัญญาณชีพจรของอุปกรณ์ เพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์ข้างเคียงที่พบนั้นสามารถส่งข้อมูลต่อไปยังอุปกรณ์ข้างเคียงนั้นๆ ได้หรือไม่เพื่อ จำกัดค่ามากที่สุดของจำนวนการส่งต่อ (Max Hop count) และทำการสร้าง ตารางการหาเส้นทาง (Routing Table) สำหรับการเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด ในการส่งข้อมูล ไปยังเกตเวย์ผ่านทางอุปกรณ์ข้างเคียง

ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณชีพจรของเกตเวย์หรืออุปกรณ์รับรู้ไร้สายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะทำการรอนกระทั่งเกตเวย์ถูกติดตั้งภายในระบบเครือข่ายรับรู้ไร้สาย ด้วยความสามารถในการรอ สัญญาณของเกตเวย์ระบบจะสามารถทำการติดตั้งอุปกรณ์รับรู้ไร้สายก่อนเกตเวย์ หรือติดตั้งเกตเวย์ ก่อนอุปกรณ์รับรู้ไร้สายได้ และหลังจากที่ได้รวบรวมข้อมูลอุปกรณ์ข้างเคียงทั้งหมดพร้อมทั้งเพิ่ม ค่าในตารางค้นหาเส้นทางครบแล้วจะเปลี่ยนสถานะของตนเองเป็นสถานะเข้าร่วมเครือข่าย (Join Network State) เพื่อทำการส่งสัญญาณชีพจรสำหรับอุปกรณ์ถัดไป พร้อมทั้งยังค้นหาอุปกรณ์ ข้างเคียงต่อเนื่องไปอีกหนึ่งรายการสำหรับอุปกรณ์ที่เปิดการทำงานพร้อมซึ่งจะอุปกรณ์จะเห็น สัญญาณชีพจรของอีกฝ่ายในสถานะนี้ และเพื่อทำการกระจายพื้นที่ของการติดต่อสื่อสาร

โดยการส่งสัญญาณชีพจรเหมือนกับเกตเวย์ใช้โดยมีข้อมูลประเภทเดียวกันเพื่อให้อุปกรณ์ รับรู้ไร้สายอื่นๆ ได้รับสัญญาณและตัดสินใจในการหาเส้นทางต่อไปได้ โดยจะมีเวลาในการส่งที่ เลื่อนออกไปจากเวลา (RX Active Time) โดยใช้รหัสประจำตัว ควบคุมด้วยค่าคงที่ 0x0100 (256 ฐานสิบ) หลังจากนั้นเมื่อได้ข้อมูลการค้นหาเส้นทางครบทั้งหมด อุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะเข้าสู่สถานะการ ทำงานปกติ (Running State)



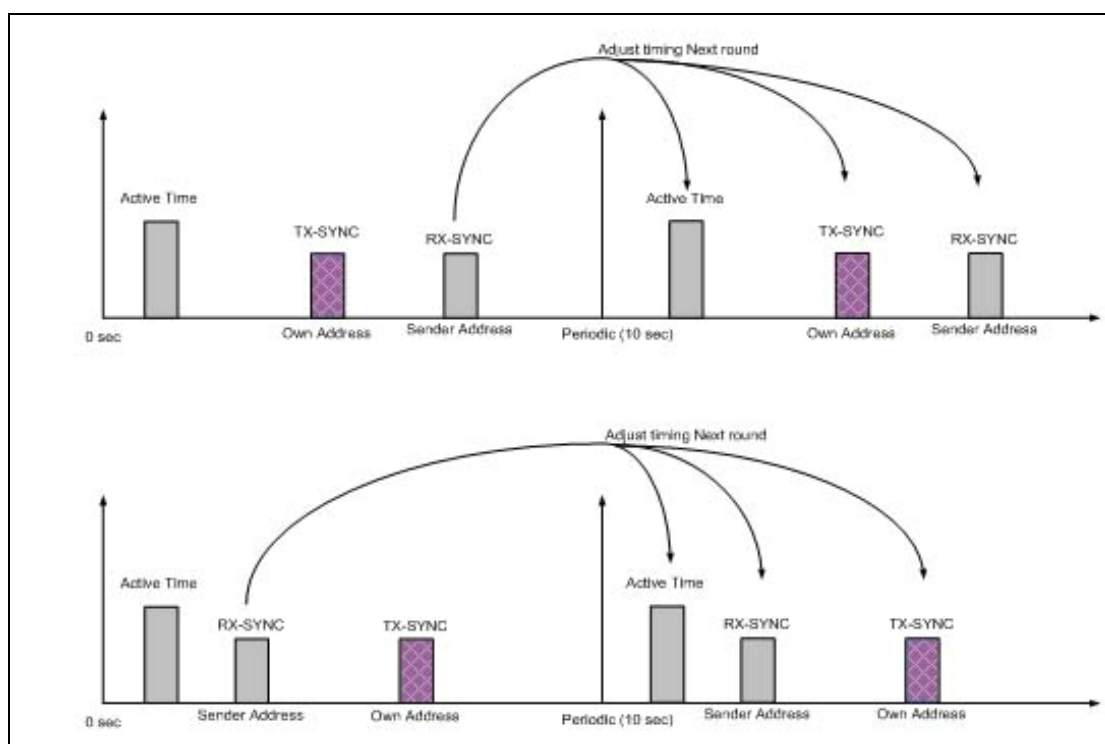
ภาพที่ 77 สถานะของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย



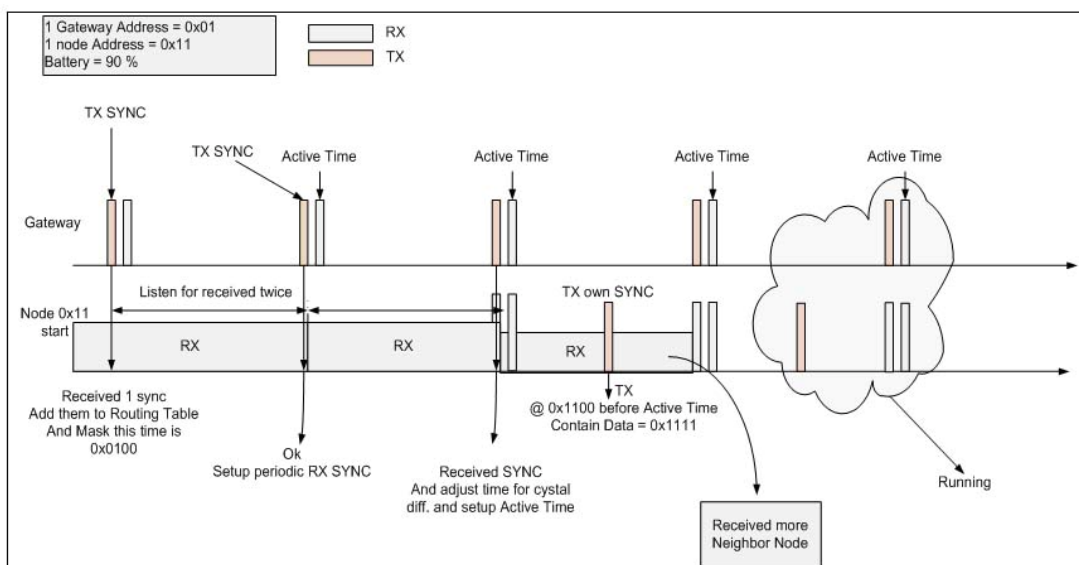
ภาพที่ 78 แผนภูมิสายงานการทำงานแรกเริ่มของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

2.3 ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ซิงโครไนซ์เวลาคลาดเคลื่อนระหว่างอุปกรณ์ไร้สาย

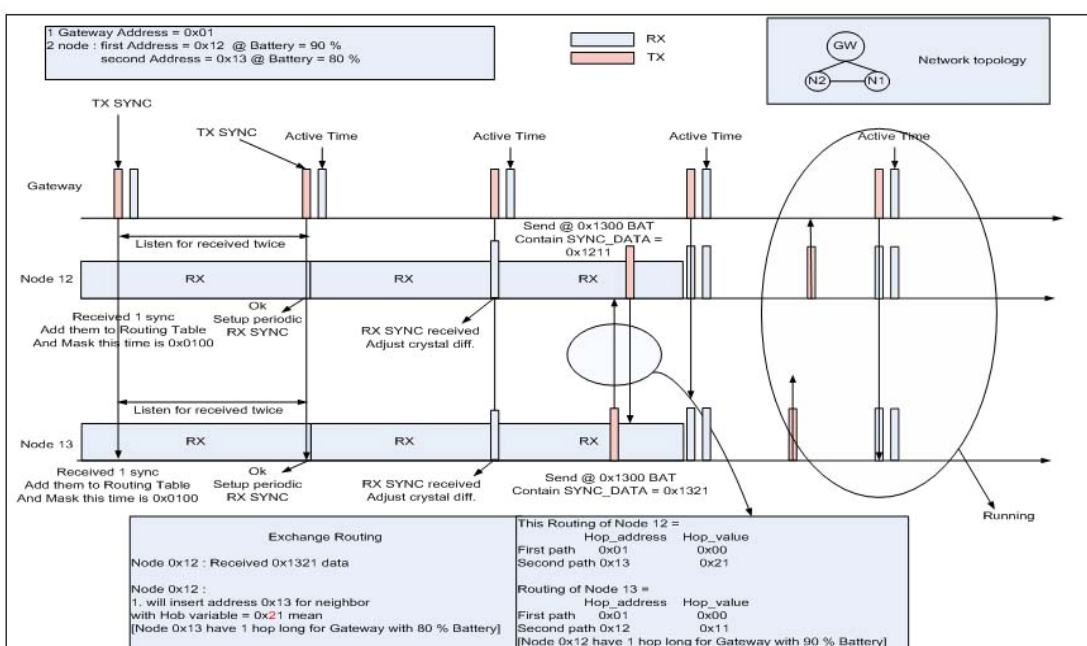
เนื่องจากการทำงานของการเปิดและปิดของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่มีเวลานาน ผลจาก Crystal oscillator แต่ละอันมีค่าความผิดพลาดอยู่ในระดับ ± 20 ppm ซึ่งในการเว้นจังหวะการทำงานที่อาจสูงได้ถึง 30 วินาที จะทำให้มีความคลาดเคลื่อนกันในเวลาเปิดการทำงาน Active เพื่อทำการส่งข้อมูลได้ถึง 1.2 มิลลิวินาที ซึ่งเป็นสาเหตุให้อุปกรณ์เลื่อนเวลาออกไปทุกๆ การครบรอบของรายการ และทำให้การสื่อสารผิดพลาดทั้งระบบ จึงจำเป็นต้องมีการตั้งเวลาหรือออฟเซตของนาฬิกาภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สายทุกครั้งเมื่อจำเป็น โดยอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจำเป็นต้องทำการรับสัญญาณชีพจรจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่เป็นเส้นทางการสื่อสารหลัก (Primary Route Path) และอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะทำการปรับออฟเซตของนาฬิกาภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ดังนั้นเมื่ออุปกรณ์รับรู้ไร้สายออกนอกบริเวณการติดต่อสื่อสาร สัญญาณชีพจรที่หายไปจะบ่งบอกถึงสถานะที่จำเป็นในการหาเส้นทางอื่นได้ทันทีซึ่งเป็นวิธีการที่รวดเร็วในการใช้งานเส้นทางในตารางการหาเส้นทาง ดังนั้นในการทำงานแต่ละรอบการทำงาน จะมีการส่งข้อมูล 1 ครั้ง และรับข้อมูล 2 ครั้ง คือ Tx Sync, Rx Sync, RX Active time



ภาพที่ 79 ลักษณะของการปรับออฟเซตของนาฬิกาภายในอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย



ภาพที่ 80 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างเกตเวย์และอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย



ภาพที่ 81 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างเกตเวย์และอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย 2 อุปกรณ์

การทำงานในสถานะทำงานปกติที่อุปกรณ์รับรู้ไร้สายจะทำหน้าที่ส่งข้อมูลที่ตรวจจับและสถานะการควบคุมอุปกรณ์ไปยังเกตเวย์ โดยมีลักษณะของข้อมูลดังนี้

ตารางที่ 8 ลักษณะของข้อมูลที่ส่งไปยังเกตเวย์

Byte	Name
1	LENGTH
2	HOP_ADDRESS
3	OWN_ADDRESS
4	MAC_CONTROL
5	SEQ_NUMBER
6	DEST_ADDRESS
7	SOURCE_ADDRESS
8	NETWORK_CONTROL
9	HOP_COUNT
10	MOTION_LIGHT_H
11	LIGHT_L
12	TEMP_H
13	TEMP_L
14	HUMI_H
15	HUMI_L
16	SWITCH_STATUS

2.3.1 ไบต์ที่ 1 LENGTH หมายถึง ความยาวข้อมูลทั้งหมดของที่ส่งไปยังเกตเวย์

2.3.2 ไบต์ที่ 2 HOP_ADDRESS หมายถึง รหัสประจำตัวอุปกรณ์รับรู้ไร้สายของผู้รับ

2.3.3 ไบต์ที่ 3 OWN_ADDRESS หมายถึง รหัสประจำตัวอุปกรณ์รับรู้ไร้สายของผู้ส่ง

2.3.4 ไบต์ที่ 4 MAC_CONTROL หมายถึงรหัสที่ใช้บอกชนิดของข้อมูล

2.3.5 ไบต์ที่ 5 SEQ_NUMBER หมายถึง ตัวเลขลำดับของข้อมูล (Sequence Number)

2.3.6 ไบต์ที่ 6 DEST_ADDRESS หมายถึง รหัสประจำตัวอุปกรณ์ปลายทางซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ต้องการทราบถึงข้อมูลชุดนี้ โดยจะเป็นรหัสประจำตัวของเกตเวย์เสมอ

2.3.7 ไบต์ที่ 7 SOURCE_ADDRESSES หมายถึง รหัสประจำตัวของอุปกรณ์ต้นทางที่สร้างข้อมูลชุดนี้ขึ้นเพื่อส่งไปยังปลายทาง

2.3.8 ไบต์ที่ 8 NETWORK_CONTROL หมายถึง ชนิดของเน็ตเวิร์ค

2.3.9 ไบต์ที่ 9 HOP_COUNT หมายถึง ตัวเลขที่นับลดลงทุกครั้งหลังการส่งต่อ 1 ครั้ง เมื่อลดลงถึง 0 ข้อมูลจะถูกตัดทิ้ง

2.3.10 ไบต์ที่ 10 MOTION_LIGHT_H แบ่งออกเป็นสามบิตบนและห้าบิตล่าง

โดยสามบิตบนเป็นบิตสำหรับบอกว่ามีข้อมูลตรวจวัดหรือไม่ เป็น 0 คือไม่มีข้อมูล และเป็น 1 คือมีข้อมูล โดยบิตที่ 7 หมายถึง มีหรือไม่มีข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหว บิตที่ 6 หมายถึง มีหรือไม่มีข้อมูลจากอุปกรณ์วัดความเข้มแสง บิตที่ 5 หมายถึง มีหรือไม่มีข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิหรือความชื้น บิตที่ 4 หมายถึง ข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหว บิตที่ 0-3 หมายถึง ครึ่งไบต์บนของข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง

2.3.11 ไบต์ที่ 11 LIGHT_L หมายถึง ไบต์ล่างของข้อมูลอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง

2.3.12 ไบต์ที่ 12 TEMP_H หมายถึง ไบต์บนของข้อมูลอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

2.3.13 ไบต์ที่ 13 TEMP_L หมายถึง ไบต์ล่างของข้อมูลอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

2.3.14 ไบต์ที่ 14 HUMI_H หมายถึง ไบต์บนของข้อมูลอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นในอากาศ

2.3.15 ไบต์ที่ 15 HUMI_L หมายถึง ไบต์ล่างของข้อมูลอุปกรณ์ตรวจวัด
ความชื้นในอากาศ

2.3.16 ไบต์ที่ 16 SWITCH_STATUS หมายถึง การเปิด/ปิดของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อเข้ากับสัญญาณควบคุมของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย 8 ช่อง

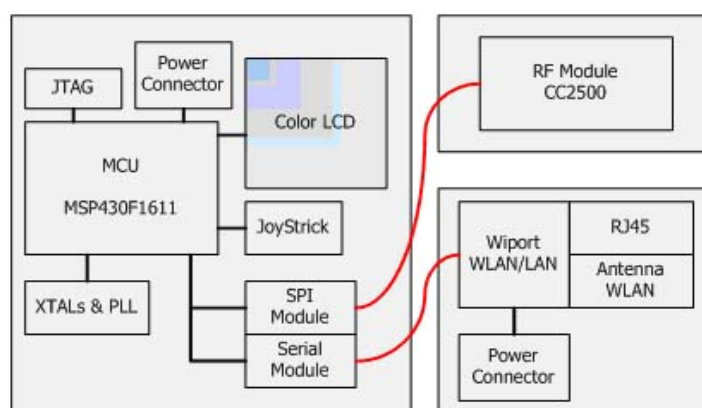
ตารางที่ 9 ลักษณะของข้อมูลของ MAC_CONTROL ภายใน package ของการส่ง

Name	Data
ACK_PACKET	0xAC
ACK_BUSY_PACKET	0xAB
DATA_PACKET	0xDA
SYNC_PACKET	0xCC
BROADCAST_PACKET	0xBC
COMMAND_PACKET	0xCD
ROUTE_PACKET	0xEA
ERROR_REPORT	0xEE
NO_DATA	0x00

2.4 ตรวจสอบการใช้พลังงานของซอฟต์แวร์ที่ออกแบบโดยอุปกรณ์การวัดวิเคราะห์
แรงดันไฟฟ้า (Oscilloscope Analyzer) ขณะทำงานบนระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย เพื่อ
คำนวณหาอายุการใช้งานอย่างต่ำด้วยแบตเตอรี่ขนาด 2200 mAh

3 การพัฒนาฮาร์ดแวร์ของเกตเวย์

เกตเวย์ที่ใช้ในระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นจำเป็นต้องมีส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน
เพื่อช่วยในการทำงานและวิเคราะห์ผลการทำงานได้ ดังนั้นในโครงการนี้ จะใช้บอร์ดสำเร็จรูป
สำหรับนักพัฒนา โดยเป็นต้องทำการเพิ่มส่วนการเชื่อมต่อวิทยุไร้สายระยะสั้น และอุปกรณ์
เชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบมีสายและไร้สาย เข้าในบอร์ดสำเร็จรูปสำหรับนักพัฒนา



ภาพที่ 82 แสดงองค์ประกอบเกตเวย์

โดยมีรายละเอียดทางเทคนิค ดังนี้

- ใช้บอร์ดสำเร็จรูปสำหรับช่วยในการพัฒนา โดยใช้หน่วยประมวลผลรหัส STR912 FW44 ของบริษัท ST Microelectronics ใช้หน่วยความจำแบบ Flash ขนาด 512KB และแบบ RAM ขนาด 96 KB แสดงผลการทำงานด้วยจอภาพแบบแอลซีดีสี ขนาด 128x128 พิกเซล พร้อมไฟส่องพื้นจอด้านหลัง ควบคุมการทำงานด้วยปุ่มควบคุมทิศทางแบบ 5 ทิศทาง
- ติดตั้งโมดูลเชื่อมต่อวิทยุระยะสั้น Chipcon CC2500 ที่ใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz
- ติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตทั้งแบบมีสายและไร้สาย ซึ่งมีการเข้ารหัสความปลอดภัย IEEE 802.11 แบบ i-PSK, WPA-PSK, TKIP

4 การพัฒนาซอฟต์แวร์บนเกตเวย์

ซอฟต์แวร์บนเกตเวย์ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนของซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของเกตเวย์สำหรับเชื่อมต่อกับเครือข่ายรับรู้ไร้สายและติดต่อกับผู้ใช้ (User Interface) ทำเป็นโปรแกรมประยุกต์บนระบบปฏิบัติการเวลาจริง uCOS-II คือ ปรับแต่งโปรแกรมระบบปฏิบัติการ uCOS-II (The Real Time Kernel) เวอร์ชัน 2.83 (2006/06/02) จากบริษัท Micrium ลงในบอร์ดสำเร็จรูปสำหรับนักพัฒนา และส่วนที่สองคือ ออกแบบการทำงานของโปรแกรมประยุกต์ภายในระบบปฏิบัติการ UCOS-II สำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ภายใน โดยกำหนดคาบของนาฬิกาที่ 10 มิลลิวินาที ซึ่งทำให้ระบบมีงาน (Task) ในการทำงานได้นานถึง 9.9 มิลลิวินาที

ก่อนที่จะถูก เคนเนล ของระบบ ปฏิบัติการจะแทรกการทำงานของงานปัจจุบัน และสำหรับการ
การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต กำหนดค่าของพอร์ทอนุกรมดังนี้ Baud rate
เท่ากับ 57600 baud Data bits เท่ากับ 8 บิต

Parity เท่ากับ None Stop bit เท่ากับ 1 บิต Flow control เท่ากับ None ซึ่งใช้รูปแบบของข้อมูลจาก
เกตเวย์ไปยังอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตมีลักษณะตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 รูปแบบของข้อมูลของเกตเวย์ไปยังอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต

index	data
0	A
1	X
2	X
3	T
4	X
5	X
6	X
7	X
8	H
9	X
10	X
11	X
12	X
13	L
14	X
15	X
16	M
17	X
18	S
19	X
20	X
21	P
22	X
23	X
24	Ext
25	/n

- ตำแหน่งที่ 0 ส่งข้อมูล 'A' เพื่อระบุรหัสประจำตัวของอุปกรณ์
- ตำแหน่งที่ 3 ส่งข้อมูล 'T' สำหรับ อุณหภูมิ
- ตำแหน่งที่ 8 ส่งข้อมูล 'H' สำหรับ ความชื้น
- ตำแหน่งที่ 13 ส่งข้อมูล 'L' สำหรับ ความเข้มแสง
- ตำแหน่งที่ 16 ส่งข้อมูล 'M' สำหรับ การเคลื่อนไหว

- ตำแหน่งที่ 18 ส่งข้อมูล 'S' สำหรับ สถานะของสวิทช์
- ตำแหน่งที่ 21 ส่งข้อมูล 'P' สำหรับ ระบุเส้นทางของการส่งข้อมูลมายังเกตเวย์
- ตำแหน่งที่ 25 ส่งข้อมูล '/n' (10) เพื่อบอกจุดสิ้นสุดของข้อมูล
- ตำแหน่งที่ X ใดๆ เป็นข้อมูลประเภท ASCII และเป็นเลขฐานสิบหก

ตัวอย่างการส่งข้อมูลที่มีข้อมูล คือ A17T1024H2301L32M1S5AP1213/n หมายความว่า อุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่มีรหัสประจำตัว 0x17 วัดอุณหภูมิได้ 0x1024 (ข้อมูลดิบ) ความชื้น 0x2301 (ข้อมูลดิบ) ความเข้มแสง 0x32 (ด้วย 4096 ระดับที่ 12 บิต) การตรวจจับการเคลื่อนไหว 0 (ไม่มีพบการเคลื่อนไหว) การควบคุมของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย หมายความว่า ช่องควบคุมที่ 1, 3, 6, 8 เป็นการปิด และ ช่องควบคุมที่ 2, 4, 5, 7 เป็นการเปิด (01011010) และ เส้นทางของการส่งได้แก่ อุปกรณ์รับรู้ไร้สายรหัส 0x17 ทำการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์รับรู้ไร้สายรหัสที่ 0x12 และส่งต่อไปยัง อุปกรณ์รับรู้ไร้สายรหัสที่ 0x13 และส่งต่อไปยังเกตเวย์

โดยการรับข้อมูลของเกตเวย์จะตอบสนองเฉพาะข้อมูลจากอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตด้วยการร้องขอด้วยข้อมูล คือ AFFR\n\r สำหรับการเรียกดูข้อมูลอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจากเกตเวย์ทั้งหมดและ AXXR\n\r สำหรับการเรียกดูข้อมูล อุปกรณ์รับรู้ไร้สายรหัส 0x'XX' (เลขฐานสิบหก) จากเกตเวย์รวมทั้ง AXXSY\n\r สำหรับการส่งคำสั่งควบคุม ไปอุปกรณ์ควบคุมไร้สายรหัส 0x'XX' (เลขฐานสิบหก) ผ่านเกตเวย์ โดย Y เป็นเลขฐานสิบหกซึ่งควบคุมอุปกรณ์ 8 ช่องควบคุม

ส่วนของการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป สำหรับแสดงผลแบบ Web Page ซึ่งเขียนด้วยภาษา java applet

5. การทดสอบการทำงานของเครือข่ายทั้งหมด

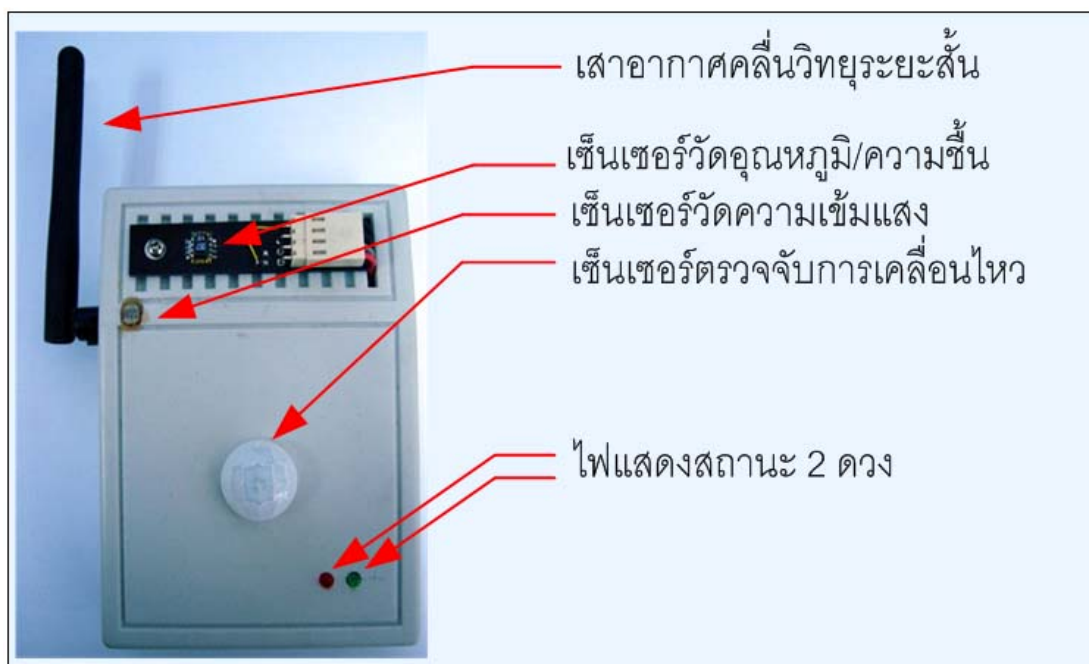
ทดสอบการทำงานกับอุปกรณ์ทั้ง 10 อุปกรณ์ ซึ่งเป็น อุปกรณ์รับรู้ไร้สายประเภทเสา 8 อุปกรณ์ และอุปกรณ์รับรู้ไร้สายประเภทควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดใหญ่ 2 อุปกรณ์ วัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายด้วยอุปกรณ์การวัดวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้า (Oscilloscope Analyser)

ผลและวิจารณ์

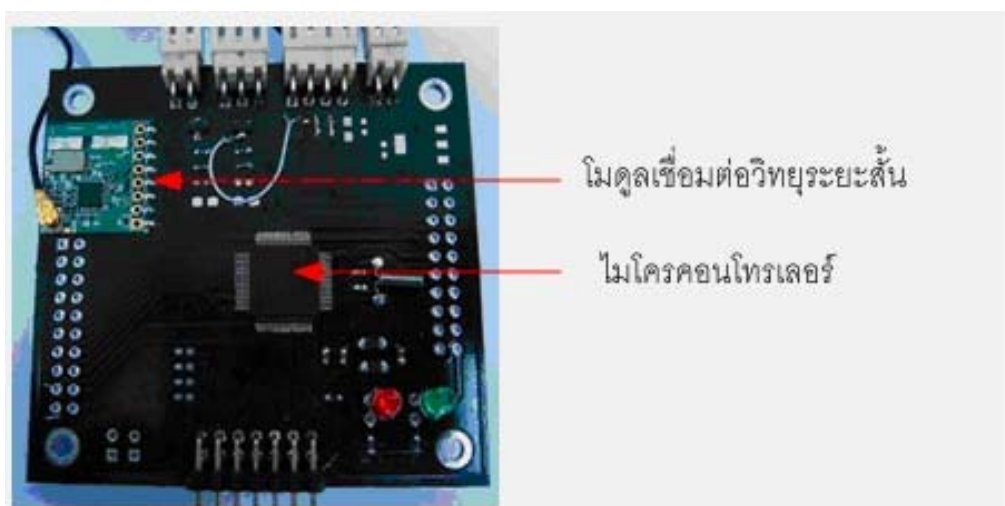
ผล

1. การพัฒนาฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Node) และอุปกรณ์ควบคุมไร้สาย (Wireless Actuator Node)

การพัฒนาฮาร์ดแวร์ต้นแบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ อุปกรณ์รับรู้ไร้สายประเภทฝ้าดู (อุปกรณ์รับรู้ไร้สาย) และ อุปกรณ์รับรู้ไร้สายประเภทควบคุม ซึ่ง เป็นต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยส่วนต่างๆ ภาพที่ 83

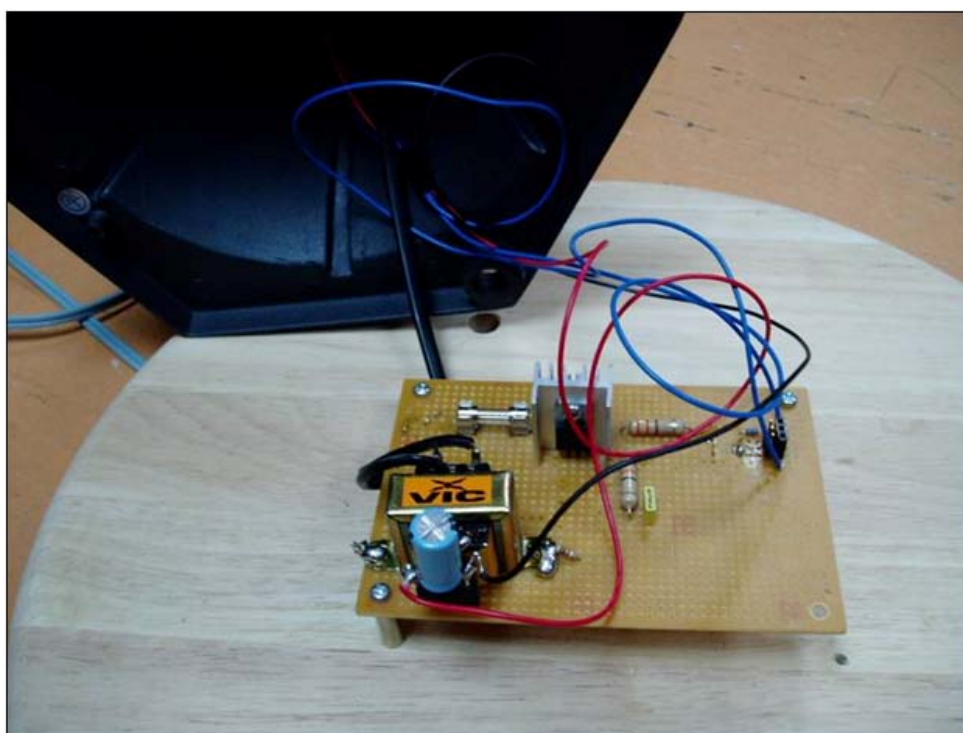


ภาพที่ 83 อุปกรณ์รับรู้ไร้สายสำหรับฝ้าดู

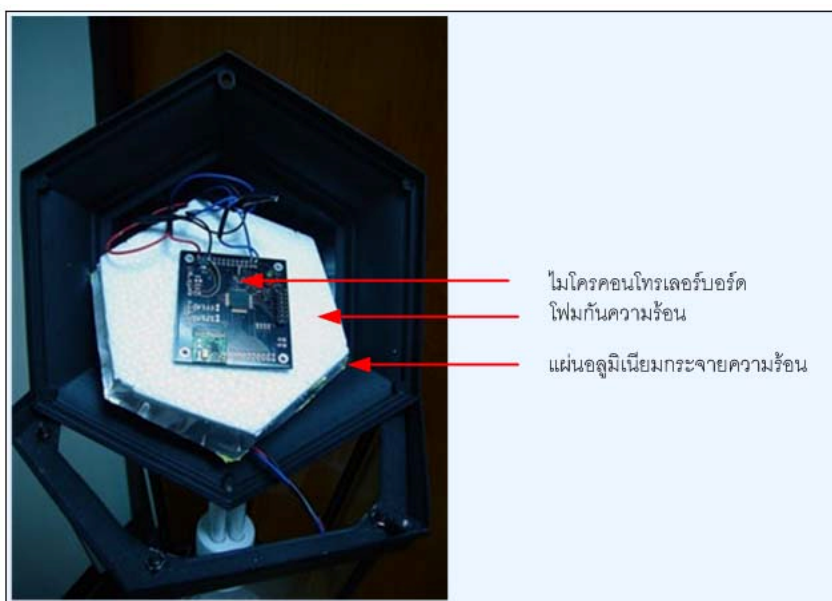


ภาพที่ 84 โครงสร้างวงจรส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์

อุปกรณ์ควบคุมไร้สายประกอบด้วยบอร์ดสำหรับขับกระแส 10 A สำหรับขับกระแสหลอดไฟให้แสงสว่างขนาด 100 Watt ตามรายละเอียดตามภาพที่ 99 และแผงวงจรควบคุมการทำงานดังรูป ซึ่งติดตั้งเข้าไปภายในโคมไฟให้แสงสว่างขนาด 220 Volt การติดตั้งเป็นดังรูป



ภาพที่ 85 ลักษณะของไดรเวอร์ขับวงจรไฟฟ้าขนาดแรงดันสูง



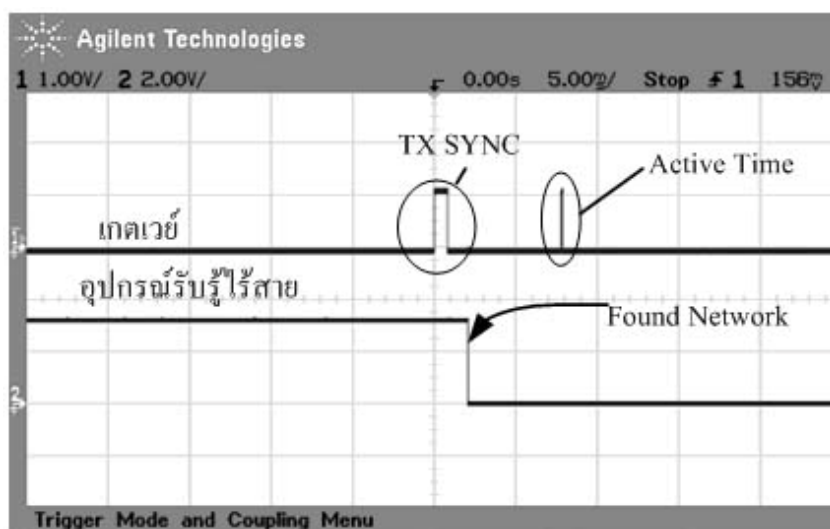
ภาพที่ 86 อุปกรณ์รับรู้ไร้สายสำหรับควบคุม



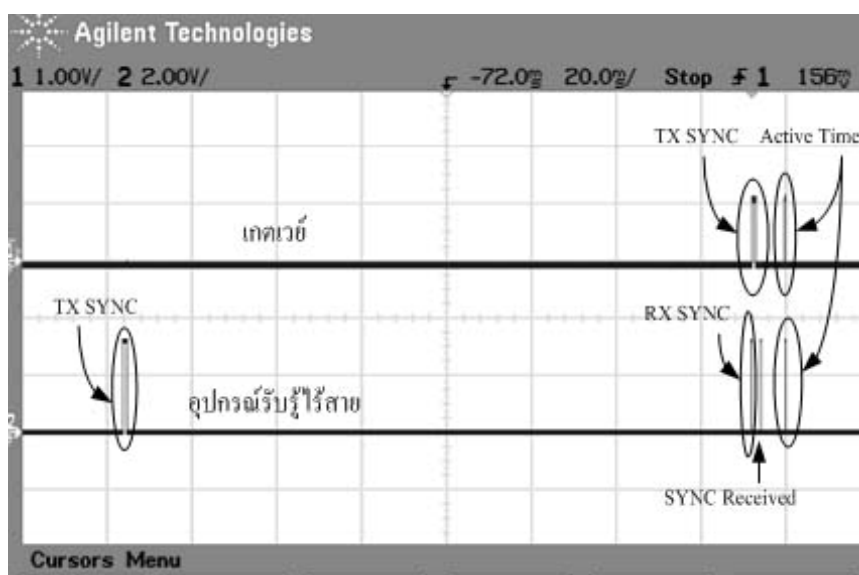
ภาพที่ 87 การติดตั้งแผงวงจรภายในฝาครอบเสาไฟฟ้า

2. การพัฒนาซอฟต์แวร์การเชื่อมต่ออุปกรณ์รับรู้ไร้สายและอุปกรณ์ควบคุมไร้สายเป็นเครือข่ายรับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network)

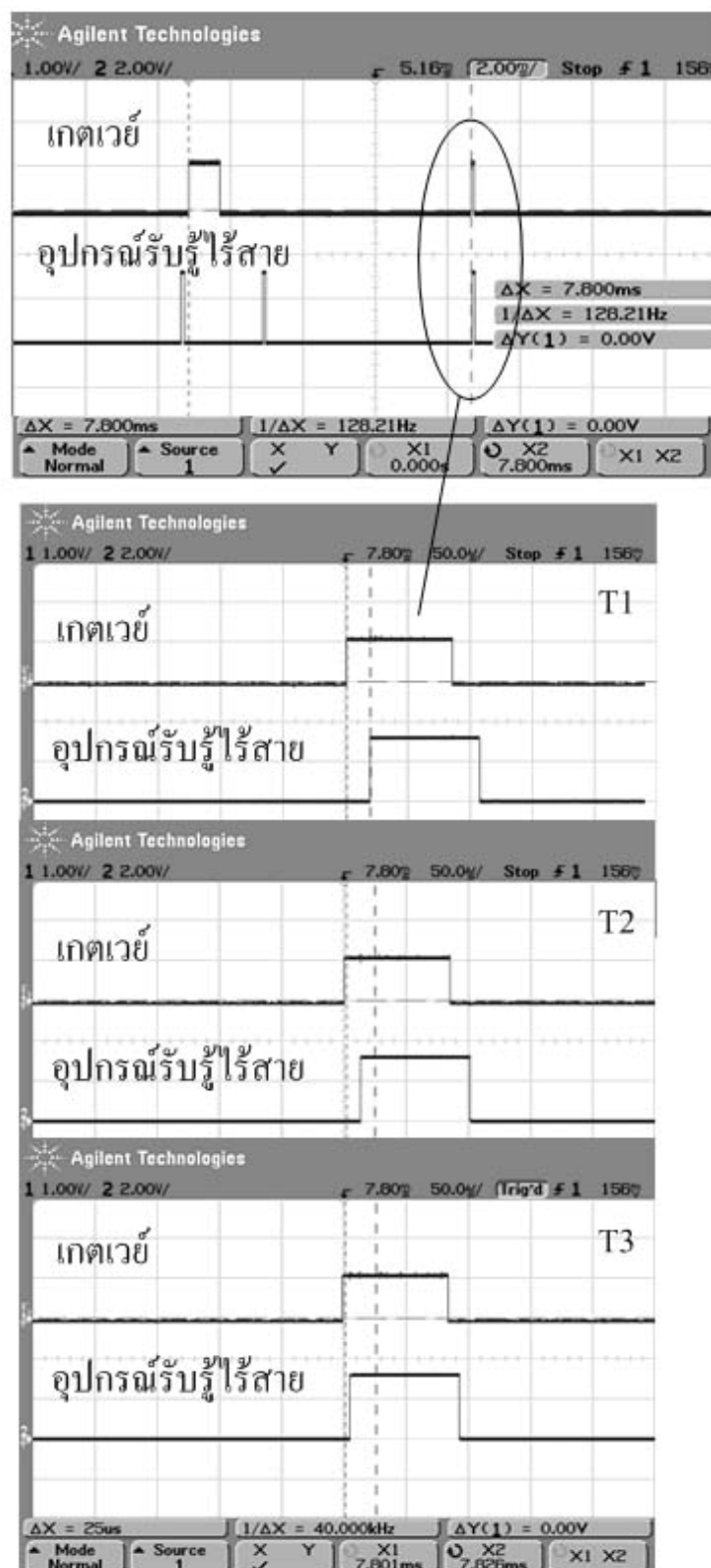
2.1 การทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายสามารถค้นหาระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายนั้นสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ สามารถวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์แรงดันไฟฟ้า



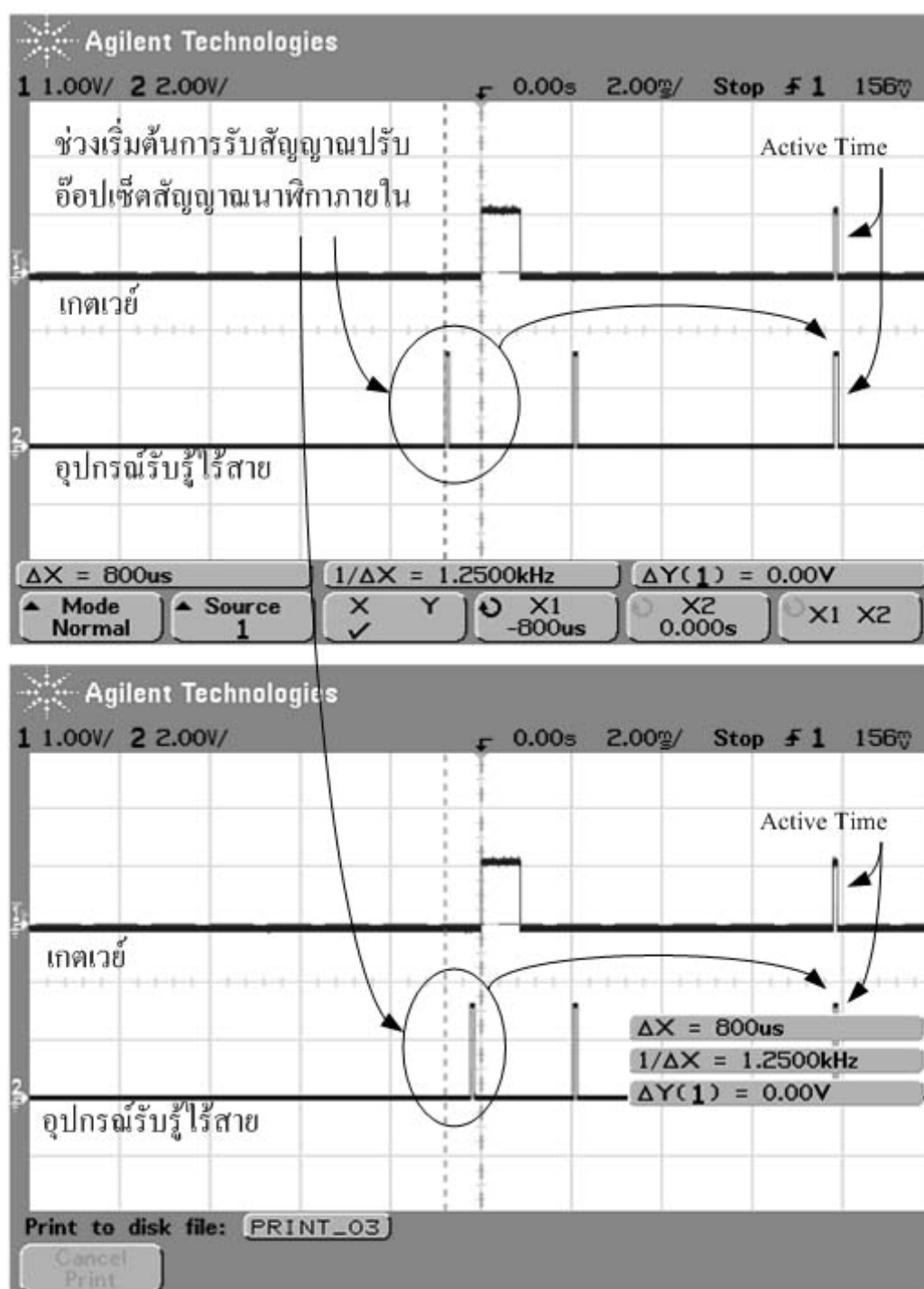
ภาพที่ 88 แสดงการทำงานค้นหาสัญญาณชีพจร



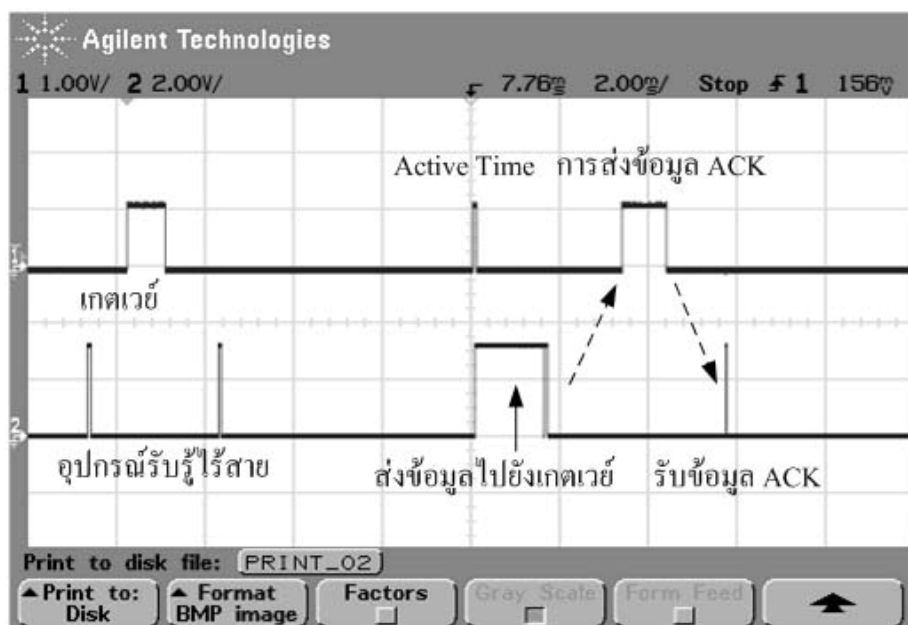
ภาพที่ 89 แสดงการทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย



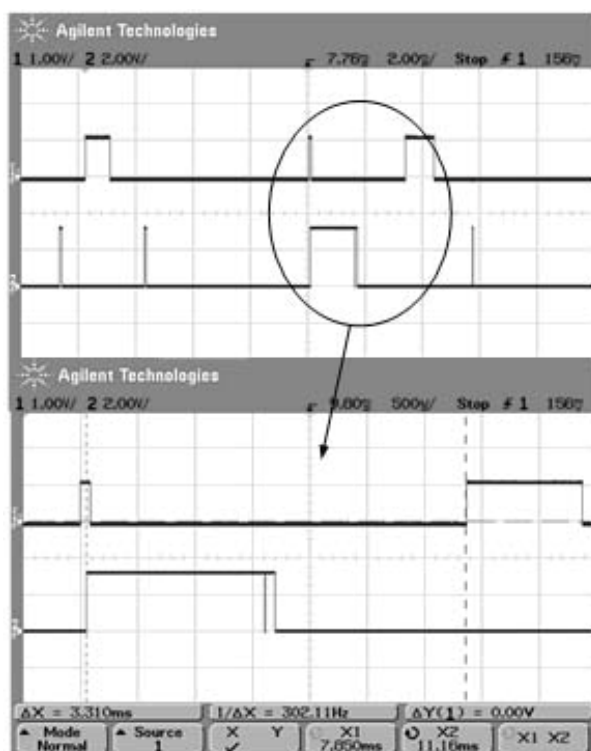
ภาพที่ 90 การปรับออฟเซตของนาฬิกาภายในของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายขณะเวลาทำงาน



ภาพที่ 91 ภาพการปรับเวลา RX เพื่อประหยัดพลังงาน



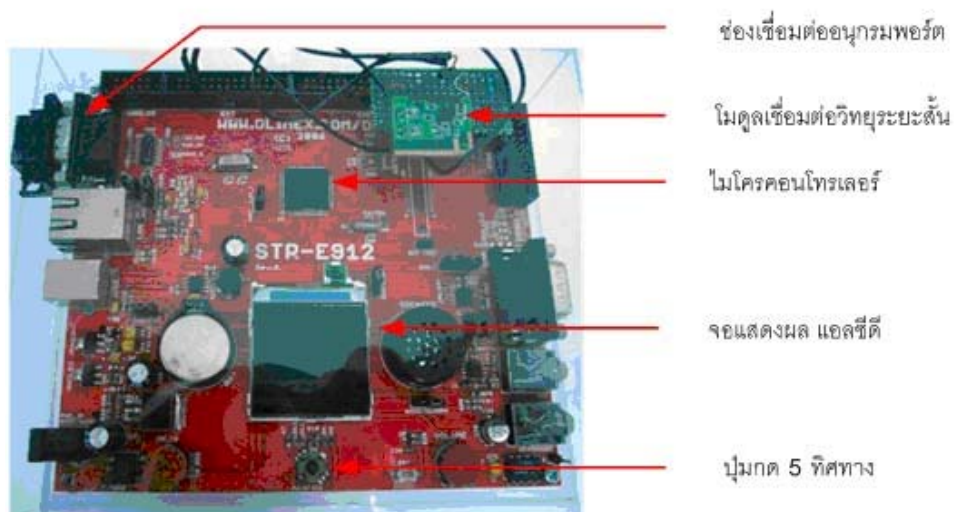
ภาพที่ 92 การส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์



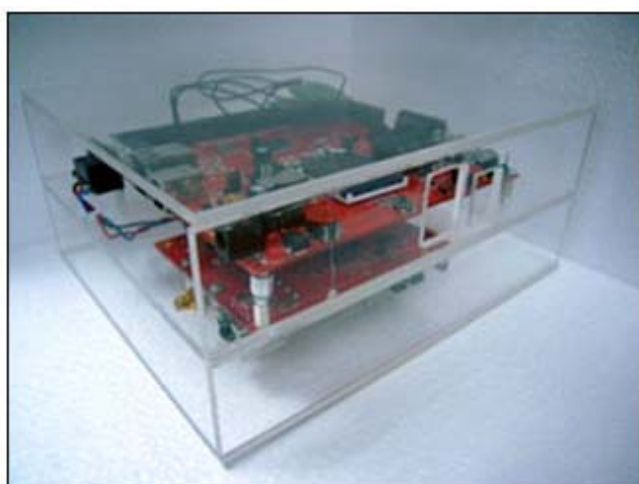
ภาพที่ 93 เวลาการตอบสนองในการส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ 3.3 มิลลิวินาที

3. การพัฒนาฮาร์ดแวร์ของเกตเวย์

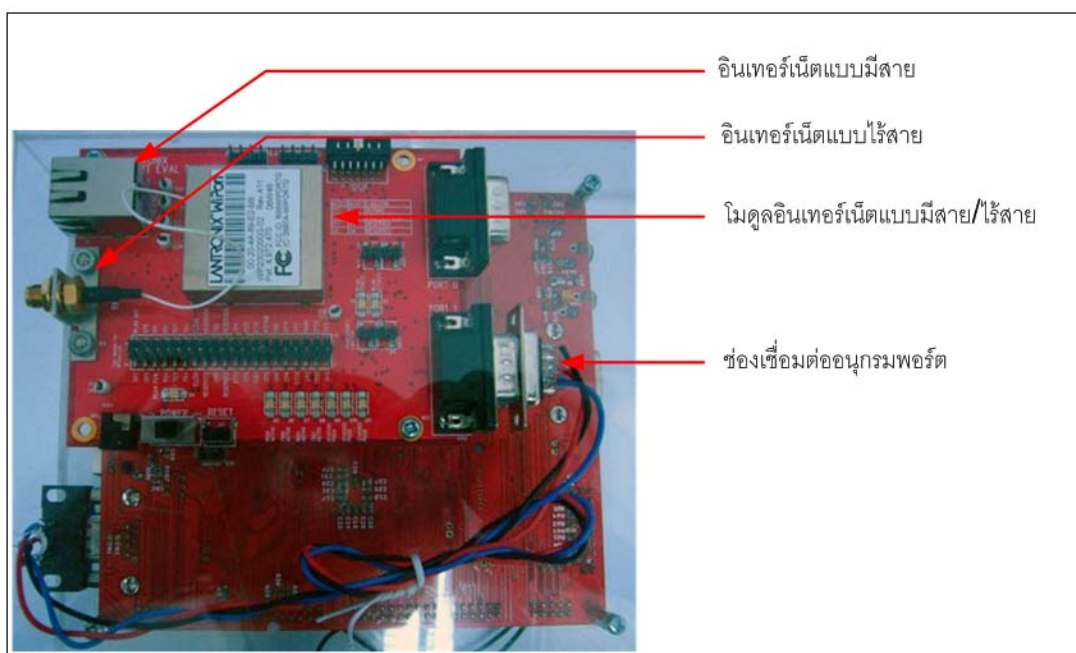
เกตเวย์ที่พัฒนาด้วยการแทรกวงจรสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุระยะสั้นมีลักษณะตามภาพที่ 94 โดยมีโมดูลเชื่อมต่อวิทยุระยะสั้นต่อกับขาต่อสัญญาณภายนอกเกตเวย์ และอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสามารถเชื่อมต่อกับเกตเวย์ด้วยช่องเชื่อมต่ออนุกรมพอร์ต ซึ่งอยู่ด้านหลังของกล่องเกตเวย์ตามภาพที่ 94



ภาพที่ 94 ส่วนประกอบของเกตเวย์



ภาพที่ 95 เกตเวย์



ภาพที่ 96 โมดูลเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

4. การพัฒนาซอฟต์แวร์บนเกตเวย์

ซอฟต์แวร์บนเกตเวย์ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

4.1 ส่วนของซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของเกตเวย์สำหรับเชื่อมต่อกับเครือข่ายรับรู้ไร้สายและติดต่อกับผู้ใช้ (User Interface)



ภาพที่ 97 การเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าแรกของการใช้งาน



ภาพที่ 98 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าควบคุม เลือก NODE ID = 18



ภาพที่ 99 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าเฝ้าดูของ NODE ID = 18



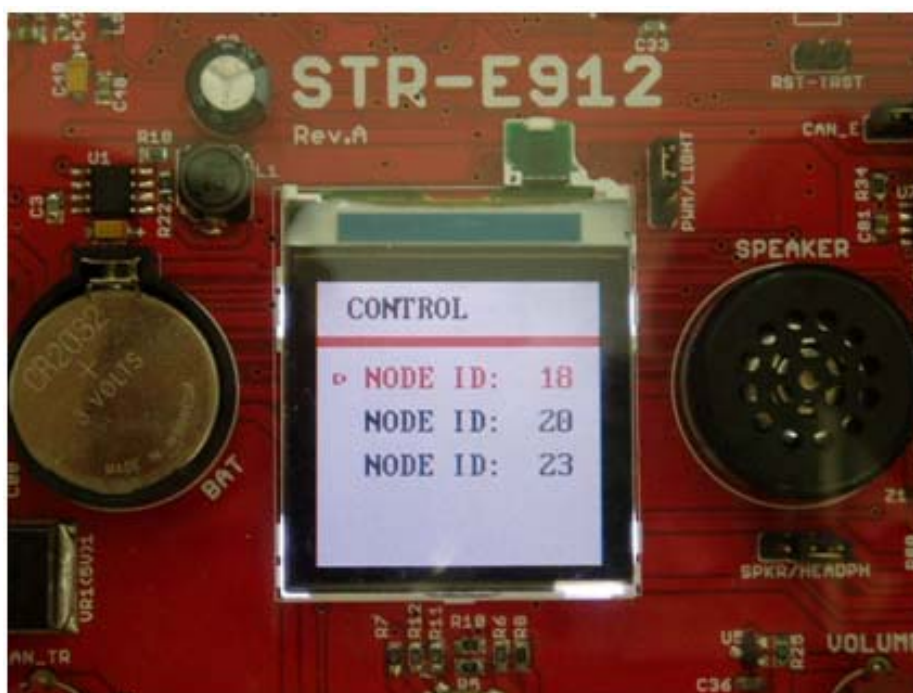
ภาพที่ 100 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าควบคุม เลือก NODE ID = 23



ภาพที่ 101 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าเฝ้าดูของ NODE ID = 23



ภาพที่ 102 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าแรก เลือกหน้าควบคุม

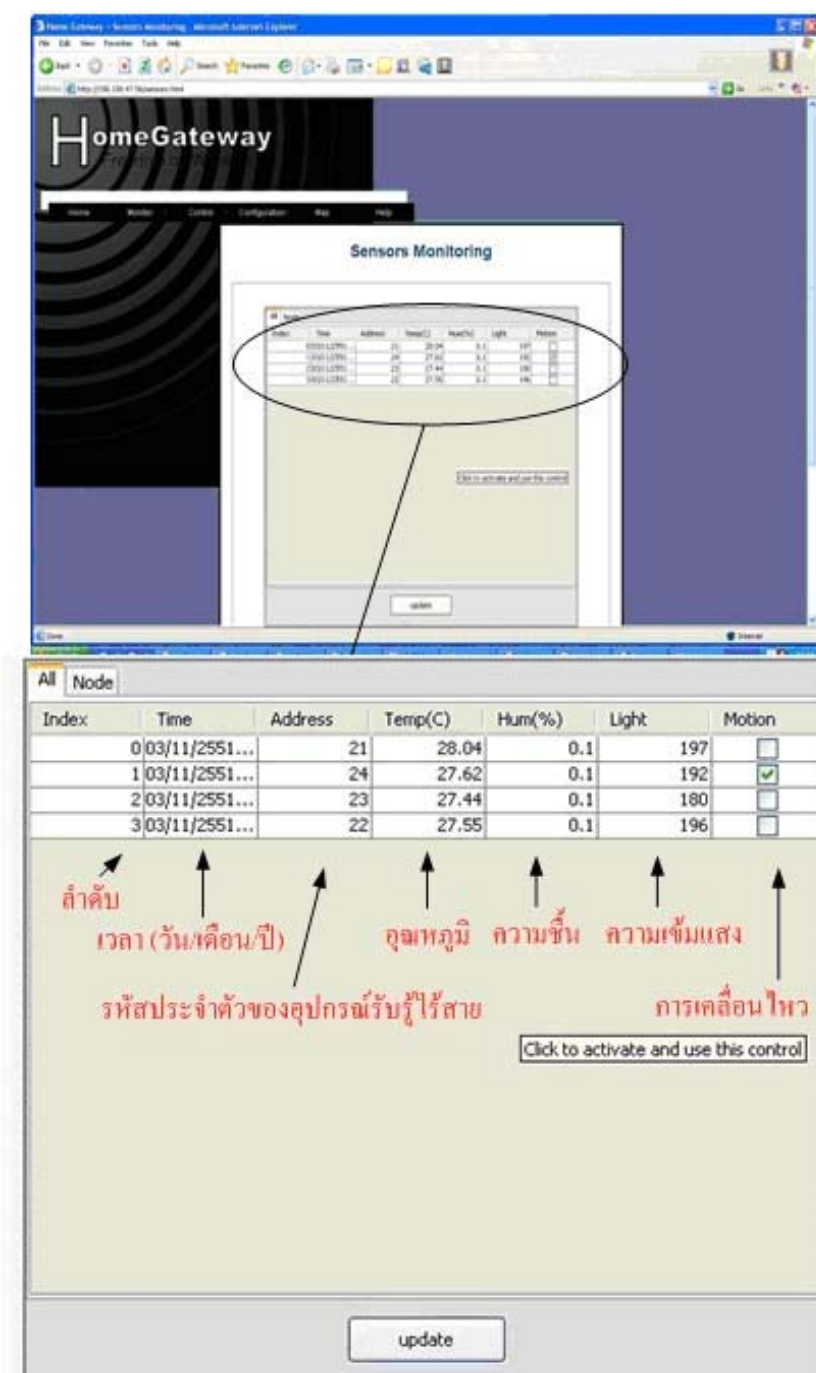


ภาพที่ 103 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสีหน้าควบคุม เลือก NODE ID = 18

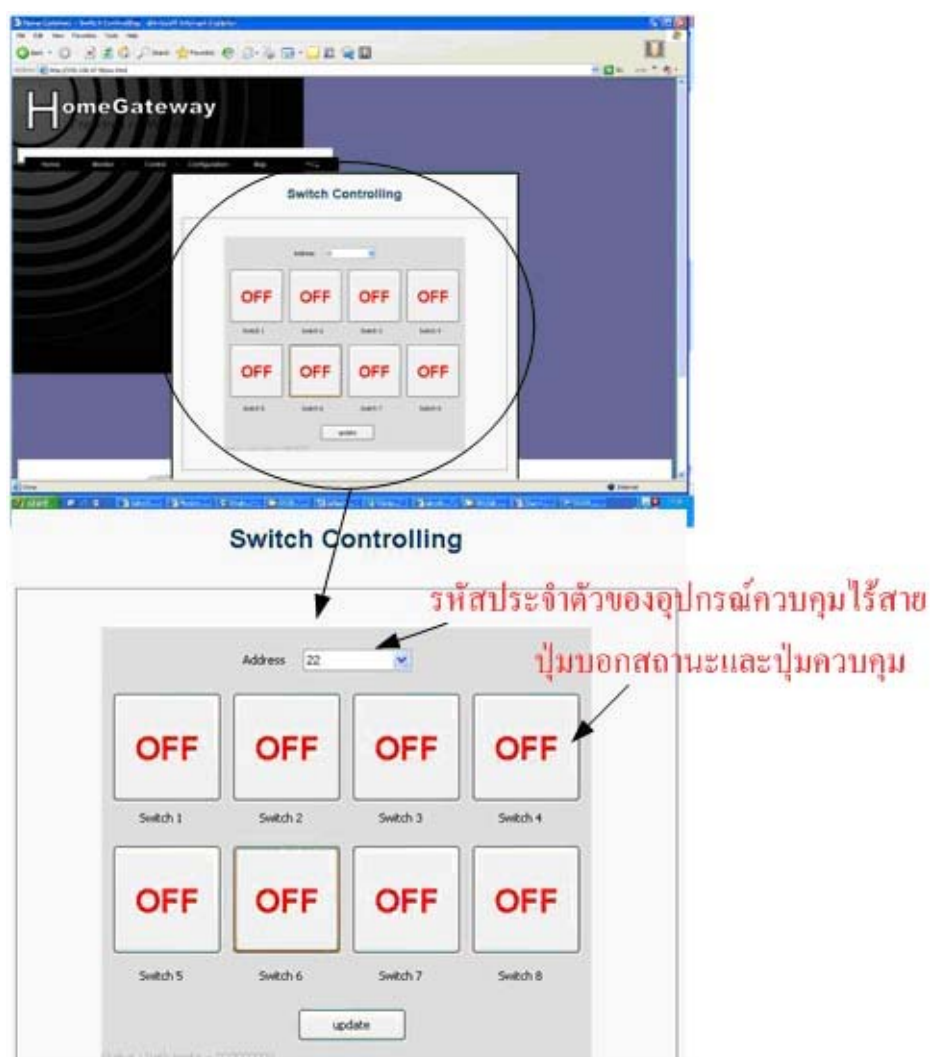


ภาพที่ 104 รูปการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอแสดงผลแอลซีดีสี หน้าควบคุม ของ NODE ID = 18

4.2 ส่วนของการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับแสดงผลแบบ Web Page ซึ่งเขียนด้วยภาษา java applet เมื่อเข้าหน้าเว็บเพื่อดูข้อมูลที่ตรวจวัดจะได้ผลดังภาพที่ 105



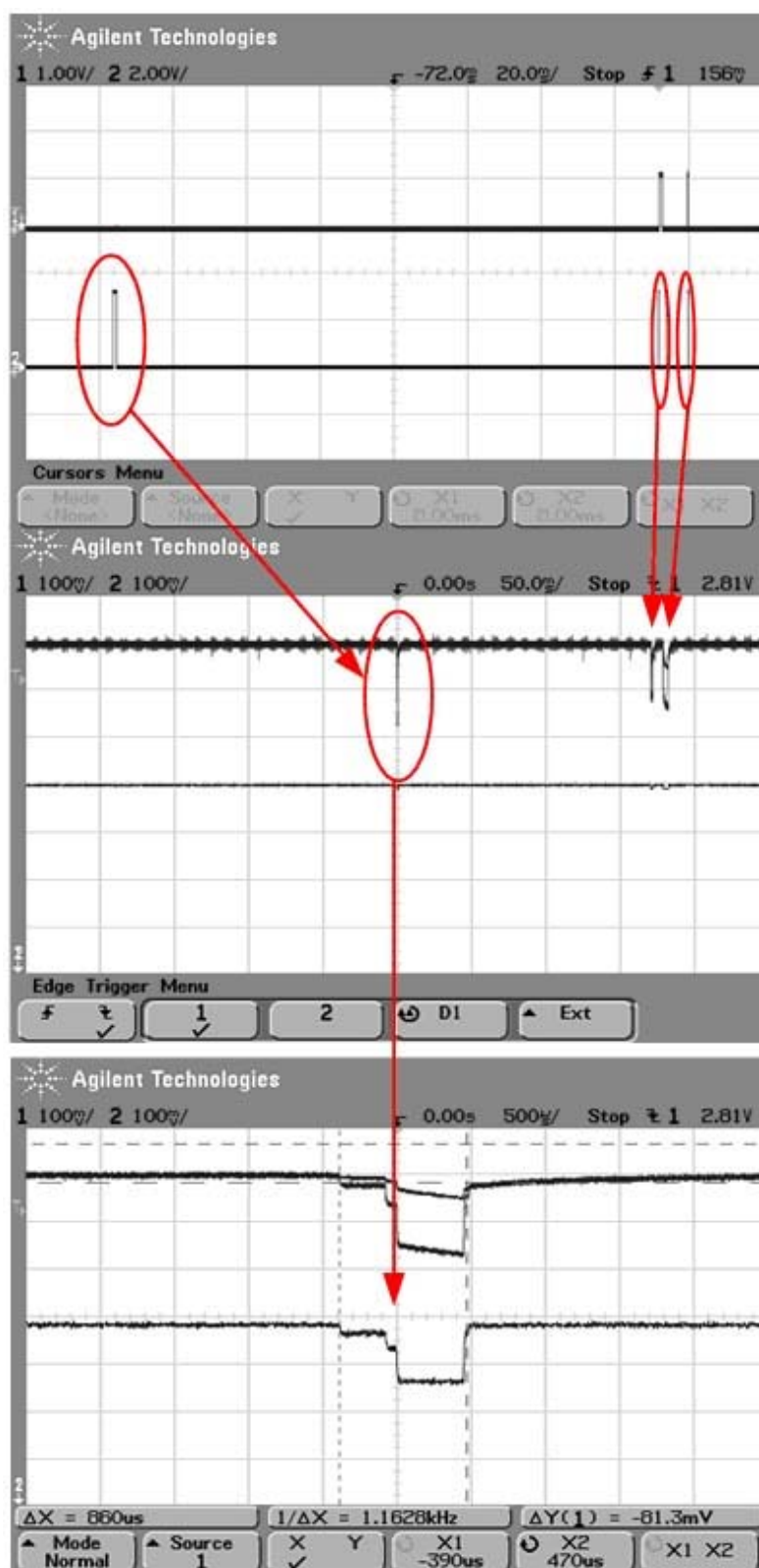
ภาพที่ 105 หน้าเว็บสำหรับการเฝ้าดูข้อมูลตรวจวัดจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย



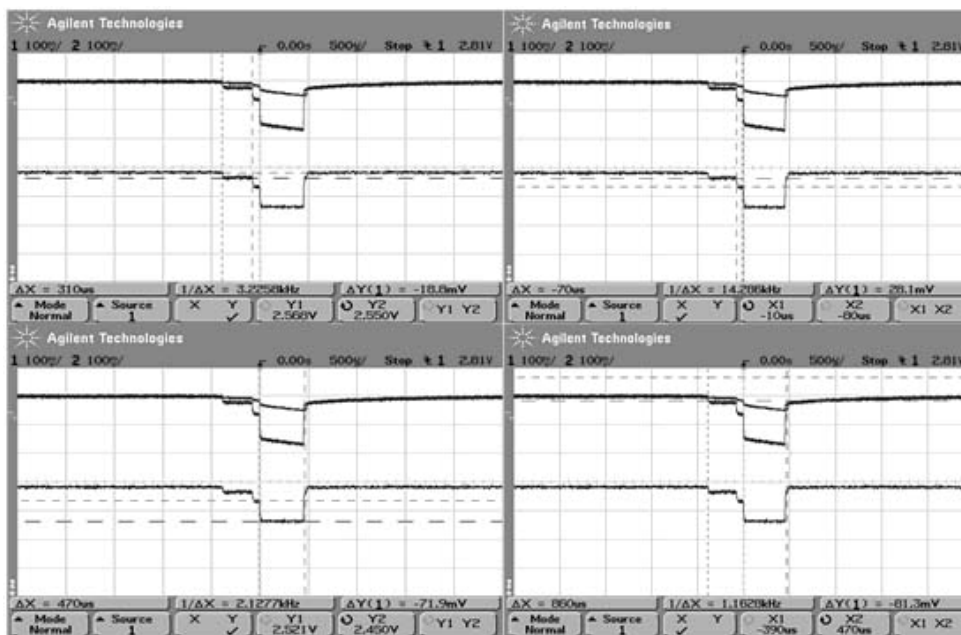
ภาพที่ 106 หน้าเว็บสำหรับการควบคุมช่องเชื่อมต่อทั้ง 8 ของอุปกรณ์ควบคุมไร้สาย

5. การทดสอบการทำงานของเครือข่ายทั้งหมด

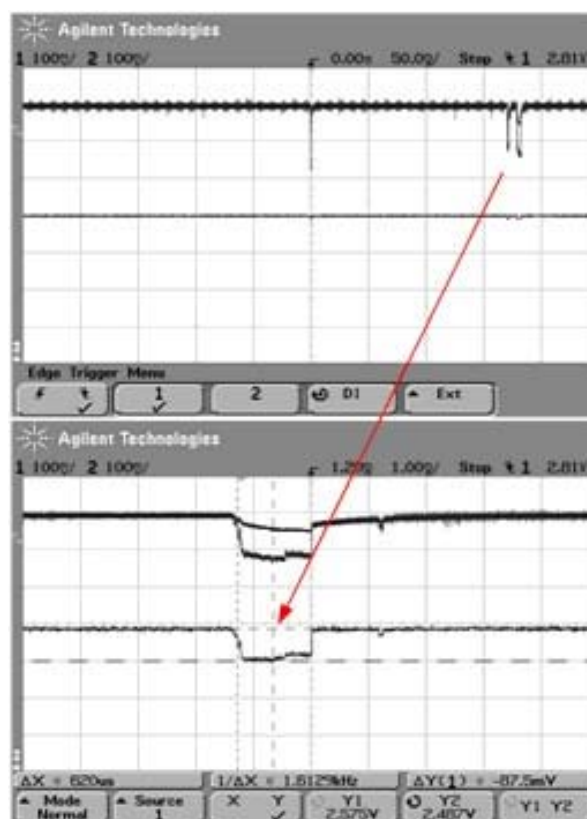
ใช้การวัดพลังงานจากการวิเคราะห์กระแสผ่าน โหลด R_L ซึ่งมีค่าความต้านทานเท่ากับ 5.1Ω และ มีความต้านทางรวมวงจรพร้อมสายวัดมีความต้านทานเท่ากับ 0.8Ω ดังนั้นวงจรการวัดมีความต้านทานรวมเท่ากับ 5.9Ω โดยคำนวณจากการวัดค่าการใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย โดยการออกแบบการทำงานของอุปกรณ์ทำงานเป็นรายคาบที่ 10 วินาทีในการทำงาน



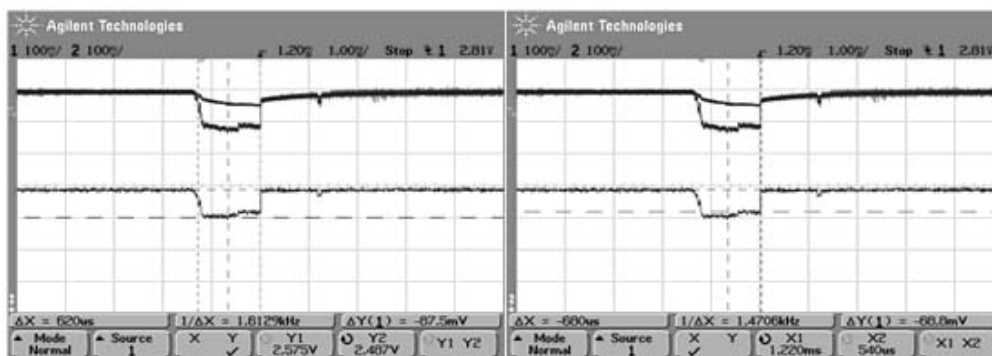
ภาพที่ 107 การเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาการทำงานกับระยะเวลาการกินพลังงาน



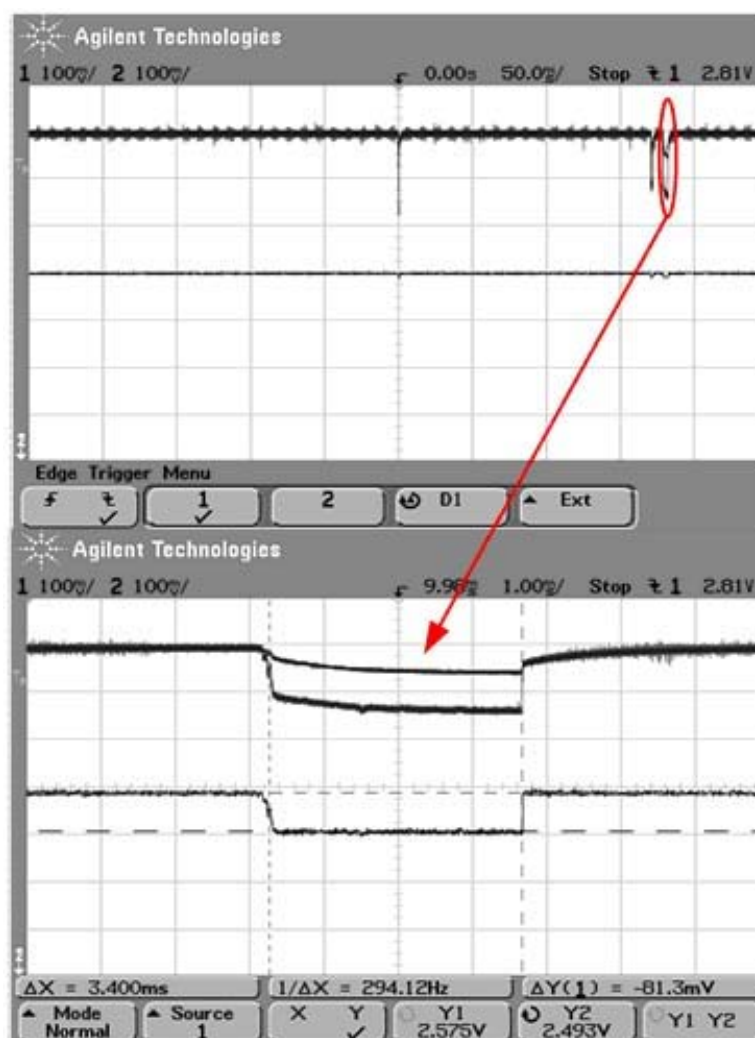
ภาพที่ 108 การกินพลังงาน Timing ของช่วงการทำงาน TX Sync



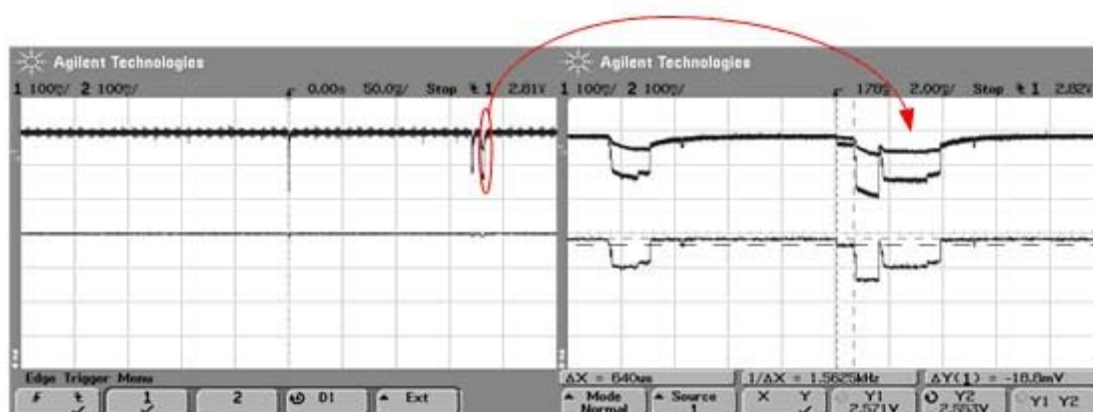
ภาพที่ 109 ขยายของการใช้พลังงานในช่วงการรับข้อมูลในช่วง RX Sync



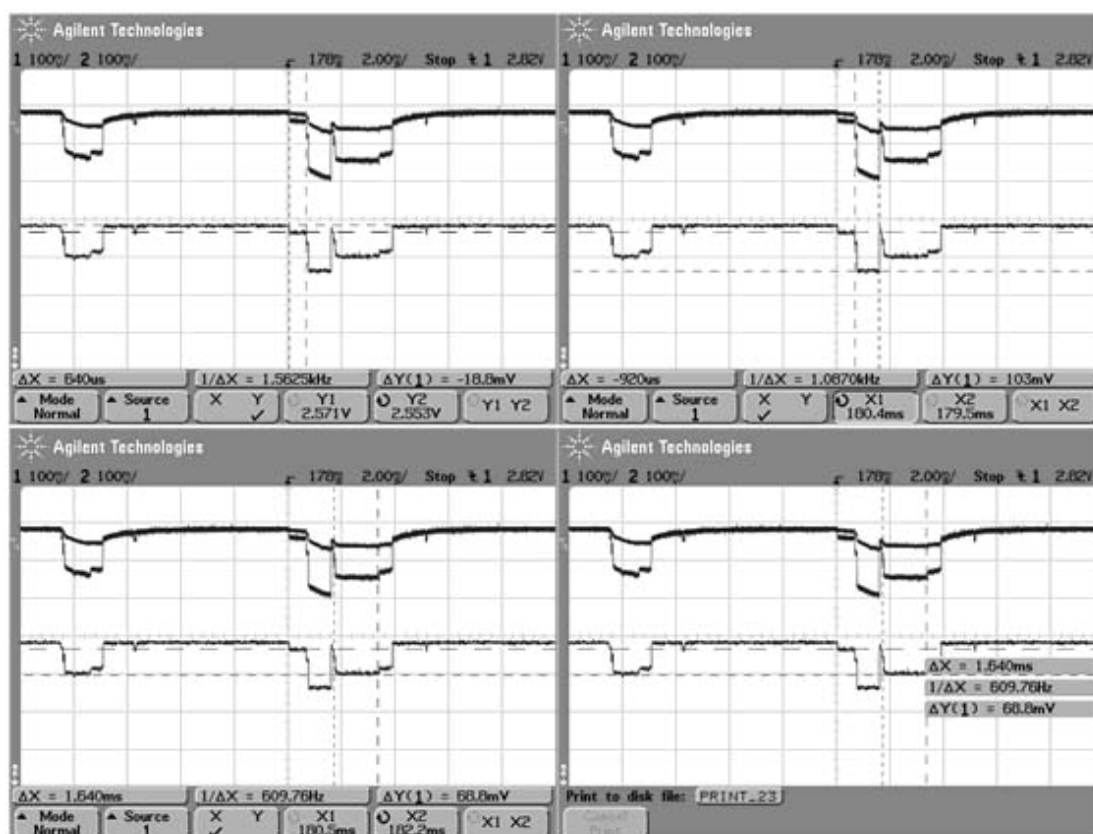
ภาพที่ 110 การกินพลังงาน Timing ของช่วงการทำงาน RX Sync



ภาพที่ 111 การกินพลังงาน Timing ของช่วงการทำงาน Active (ไม่มีข้อมูลส่ง)

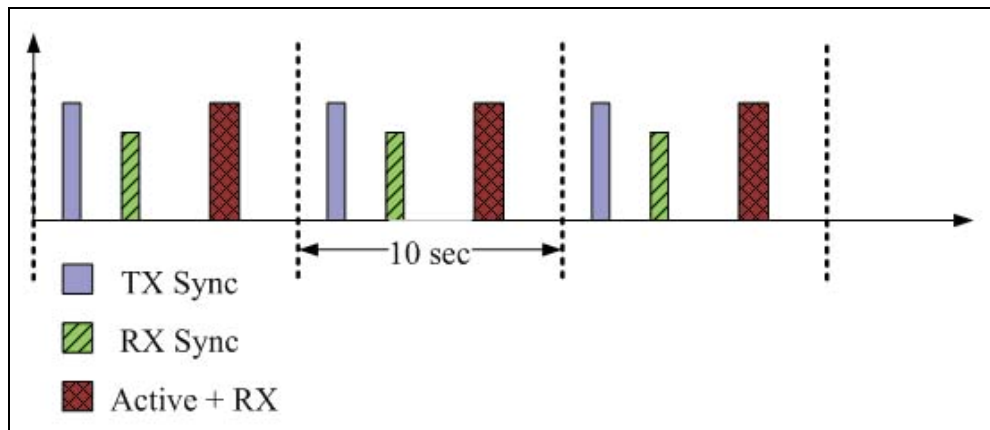


ภาพที่ 112 การกินพลังงาน Timing ของช่วงการทำงาน Active (ทำการข้อมูลส่ง)



ภาพที่ 113 การกินพลังงานของช่วงการทำงาน Active (ทำการข้อมูลส่ง)

จากการคำนวณของจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่ทำงานเป็นรายคาบจะได้ดังนี้



ภาพที่ 114 การทำงานแบบรายคาบของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

$$\begin{aligned} &\text{ช่วงเวลาสำหรับการทำงาน TX Sync ใช้พลังงานเท่ากับ } \frac{3.186\text{mV} \times 310\mu\text{sec}}{10\text{sec}} + \\ &\frac{7.949\text{mV} \times 70\mu\text{sec}}{10\text{sec}} + \frac{20.135\text{mV} \times 470\mu\text{sec}}{10\text{sec}} \text{ มีค่าเท่ากับ } 1.100 \mu\text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{ช่วงเวลาสำหรับการทำงาน RX Sync ใช้พลังงานเท่ากับ } \frac{14.830\text{mV} \times 620\mu\text{sec}}{10\text{sec}} + \\ &\frac{11.661\text{mV} \times 680\mu\text{sec}}{10\text{sec}} \text{ มีค่าเท่ากับ } 1.712 \mu\text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{ช่วงเวลาสำหรับการทำงาน Active RX ปกติใช้พลังงานเท่ากับ} \\ &\frac{13.779\text{mV} \times 3400\mu\text{sec}}{10\text{sec}} \text{ มีค่าเท่ากับ } 4.691 \mu\text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{การใช้พลังงานของ ช่วงเวลาสำหรับการส่งข้อมูล ไปยังเกตเวย์ Active TX-RX(Ack)} \\ &\text{ขึ้นอยู่กับความถี่ในการส่งข้อมูล โดยจากการส่งข้อมูลทุกๆ 30 นาที จะใช้พลังงานเท่ากับ} \\ &\frac{(3.186\text{mA} \times 640\mu\text{sec})}{30 \times 60\text{sec}} + \frac{(20.64\text{mA} \times 920\mu\text{sec})}{30 \times 60\text{sec}} + \frac{(14.847\text{mA} \times 1640\mu\text{sec})}{30 \times 60\text{sec}} + \\ &\frac{(12.186\text{mA} \times 520\mu\text{sec})}{30 \times 60\text{sec}} \text{ มีค่าเท่ากับ } 0.028729 \mu\text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{สำหรับการใช้พลังงานของการส่งข้อมูลสำหรับการทำงานทุกๆ 10 นาที จะใช้พลังงาน} \\ &\text{เท่ากับ } \frac{(3.186\text{mA} \times 640\mu\text{sec})}{10 \times 60\text{sec}} + \frac{(20.64\text{mA} \times 920\mu\text{sec})}{10 \times 60\text{sec}} + \frac{(14.847\text{mA} \times 1640\mu\text{sec})}{10 \times 60\text{sec}} + \\ &\frac{(12.186\text{mA} \times 520\mu\text{sec})}{10 \times 60\text{sec}} \text{ มีค่าเท่ากับ } 0.0861893 \mu\text{A} \end{aligned}$$

โดยการกินพลังงานขณะพักการทำงานสามารถทำการวัดปกติโดยมีการใช้กระแสเท่ากับ $30\ \mu\text{A}$ ดังนั้นการกินพลังงานรวมทั้งหมดของการทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายโดยการส่งข้อมูลเท่ากับ $37.531729\ \mu\text{A}$

$(1.100\ \mu\text{A} + 1.712\ \mu\text{A} + 4.691\ \mu\text{A} + 0.028729\ \mu\text{A} + 30\ \mu\text{A})$ เมื่อใช้แบตเตอรี่ขนาดเท่ากับ $1700\ \text{mAh}$ อุปกรณ์จะสามารถทำงานนานประมาณ $(1700\text{mAh}/37.531729\ \mu\text{A})$ 45295 ชั่วโมง หรือ 5 ปี โดยการส่งข้อมูลทุกๆ 30 นาทีตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งการทำการส่งข้อมูลต่อผ่านอุปกรณ์รับรู้ไร้สายไปยังเกตเวย์ที่ต้องผ่านอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจำนวนอย่างน้อย 100 อุปกรณ์ต่อเนื่อง ทำให้การกินพลังงานในส่วนการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น $0.028729\ \mu\text{A} \times 100$ อุปกรณ์ เท่ากับ $2.8729\ \mu\text{A}$ ดังนั้นการกินพลังงานทั้งหมดเท่ากับ $37.531729\ \mu\text{A} + 2.8729\ \mu\text{A} = 40.404629\ \mu\text{A}$ อุปกรณ์จะสามารถทำงานได้นานถึง 4.8 ปี

วิจารณ์

โครงการวิทยานิพนธ์การพัฒนาระบบต้นแบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายและโปรโตคอลการหาเส้นทาง โดยระบบต้นแบบอุปกรณ์รับรู้ไร้สายสามารถนำไปพัฒนาต่อได้ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับบุคคลที่สนใจ โปรโตคอลสำหรับการหาเส้นทางนั้นสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ซึ่งโปรโตคอลในการหาเส้นทางที่นักวิจัยคนอื่นๆ ที่ทำเอกสารตีพิมพ์ได้ออกแบบไว้จะมีลักษณะการทำงานที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆหรือลักษณะต่างๆ ที่มากที่สุดหรือน้อยที่สุด ซึ่งตอบโจทย์ว่าดีกว่าเอกสารตีพิมพ์ฉบับอื่นๆ อย่างไร ซึ่งไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริงเพราะการทำงานจริงจะมีจุดสมดุลง่ายๆซึ่งไม่ให้ค่าพารามิเตอร์หรือลักษณะที่มากที่สุดหรือน้อยที่สุด แต่จะเป็นค่าพารามิเตอร์หรือลักษณะที่มีค่ากลางๆ ที่สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากกว่าตามที่ได้ระบุไว้ในการตรวจเอกสารโครงการวิทยานิพนธ์จึงลู่ลงไปตามจุดประสงค์ของข้อเสนอของโครงการที่สามารถนำมาติดตั้งใช้งาน และทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การทำงานของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายสามารถทำงานได้ประหยัดพลังงานมาก โดยถ้าไม่ทำการเชื่อมต่อเป็นเครือข่ายและทำงานในโหมดเฝ้าดูต่อเนื่องสามารถทำงานได้นานถึง 5 ปีเป็นอย่างน้อย ซึ่งมีประสิทธิภาพเป็นไปตามที่คาดหวังไว้ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการทดสอบการใช้งานเพื่อทดสอบ ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่ออุปกรณ์ โดยเฉพาะสถานที่ติดตั้งที่มีสถานะแวดล้อมสามารถรบกวนด้วยคลื่นวิทยุความถี่ในย่านต่างๆ เพราะจากการทดสอบเมื่อได้รับสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สายที่ช่องสัญญาณเดียวกัน ที่มีลักษณะข้อมูลที่เหมือนกันจะทำให้อุปกรณ์เข้าสู่การทำงานที่ผิดพลาดได้ และนอกจากนี้การเปลี่ยนตำแหน่งของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายอาจต้องอาศัยเวลาในการเชื่อมต่อเครือข่ายใหม่เพื่อทำการหาเส้นทางที่ดีที่สุด ซึ่งอาจทำให้การส่งข้อมูลล่าช้าหรือเลื่อนออกไป ซึ่งเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของการทำงานลดลง เพราะการออกแบบไม่ได้มุ่งเน้นให้อุปกรณ์มีความสามารถในการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ดังนั้นสำหรับการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์รับรู้ไร้สายเข้ากับงานที่มีข้อกำหนดในการเคลื่อนที่รวดเร็วและต่อเนื่องจำเป็นต้องอาศัยการใช้งานตารางการหาเส้นทางให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

การทดสอบการทำงานของระบบเครือข่ายนั้นสามารถทำงานได้ต่อเนื่องถ้าอุปกรณ์ให้สัญญาณคล็อกยังคงให้ค่าที่ผิดพลาดไม่เกิน 20 ppm (part per million) ถ้าสัญญาณของอุปกรณ์ให้สัญญาณมีความผิดพลาดมากกว่า 20 ppm จะทำให้ระบบเครือข่ายไม่สามารถเชื่อมต่อกันได้ และทำให้การทำงานของระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายหยุดการทำงานลงได้ ซึ่งการแก้ไขสามารถเพิ่มและลดพารามิเตอร์บางตัวในอัลกอริทึมให้สามารถทนต่อ ค่าความผิดพลาดจากอุปกรณ์ให้สัญญาณคล็อก

การออกแบบระบบเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายมีพื้นฐานเริ่มต้นจากระบบเฝ้าดู ซึ่งเป็นสาเหตุให้การประหยัดพลังงานจะอยู่ในการทำงานสภาวะการเฝ้าดูของสภาพแวดล้อมและการควบคุมอุปกรณ์ไร้สายจะค่อนข้างกินพลังงาน โดยการลดการกินพลังงานของระบบ จึงจำเป็นต้องออกแบบวิธีการทำงานของโปรโตคอลใหม่ เพื่อให้การส่งคำสั่งสามารถลดการใช้พลังงานลงได้

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะสำหรับการทดลอง

1.1 ทดสอบการทำงานด้วยการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สายเพิ่มเติมเพื่อหาอิทธิพลหรือผลกระทบของการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย

1.2 ทดสอบการทำงานในสถานะที่อันตรายเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการใช้งานภายนอกอาคาร

2 ข้อเสนอแนะสำหรับผู้สนใจจะนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาและจัดทำต่อ

2.1 ทดสอบเปลี่ยนเสาอากาศที่ประเภทอื่นๆ เพื่อหาประเภทที่สามารถเพิ่มระยะการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุระยะสั้น

2.2 ออกแบบโปรโตคอลใหม่เพื่อทำการลดการใช้พลังงานสำหรับการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในอาคารโดยตรง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- BEUTEL, J. 2005. **Design and Deployment of Wireless Networked Embedded Systems.** Ph.D thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Anliker, U., J. Beutel, M. Dyer, R.ENZLER, P. Lukowicz, L. Thiele and G. Tröster. 2004. **A systematic approach to the design of distributed wearable systems.** 16.
- Perillo, Mark A. and B.W. Heinzelman. 2004. **Wireless Sensor Network Protocols.** 35.
- Cerpa, A. and D. Estrin. 2004. **ASCENT: Adaptive self-configuring sensor networks topologies.** 13.
- Yu, Y., R. Govindan and D. Estrin. 2001. **Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks.** 11.
- Heinzelman, W. R., A. Chandrakasan and H. Balakrishnan. 2000. **Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks.** 10.
- Chang, J. H. and L. Tassiulas. 2004. **Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks.** 20.
- Park, J. and S. Sahni. 2006. **An Online Heuristic for Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks.** 8.
- Misra, A. and S. Banerjee. 2002. **MRPC: Maximizing Network Lifetime for Reliable Routing in Wireless Environments.** 7.
- Kar, K., M. Kodialam, T. Lakshman, and L. Tassiulas. 2003. **Routing for Network Capacity Maximization in Energy-Constrained Ad-Hoc Networks.** 9.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายสัจจา อธิกิจ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 5 พฤษภาคม 2526
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน พ.ศ.2547
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักศึกษาระดับปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	อาคารวิศวกรรมศาสตร์ 60 ปี ตึก 14 ชั้น 6 ห้อง 603/R4
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ไทย ปี พ.ศ. 2548 โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)