



วิทยานิพนธ์

การออกแบบพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สายเพื่อการระบุตำแหน่ง
ด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยน빔

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF WIRELESS SENSOR
NODES FOR LOCALIZATION WITH A SWITCHED
BEAM ANTENNA**

นายวุฒิชัย เกษรปทุมมานันท์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สายเพื่อการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม

Design and Development of Wireless Sensor Nodes for Localization with a Switched Beam Antenna

นามผู้วิจัย นายวุฒิชัย เกษรปทุมานันท์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ณัฐภา หอมทรัพย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 3 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สายเพื่อการระบุตำแหน่ง
ด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม

Design and Development of Wireless Sensor Nodes for Localization
with a Switched Beam Antenna

โดย

นายวุฒิชัย เกษรปทุมานันท์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2551

วุฒิชัย เกษรปทุมานันท์ 2551: การออกแบบพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สายเพื่อ
การระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม, Ph.D. 112 หน้า

ปัญหาของการระบุตำแหน่งบุคคลหรือวัตถุ ได้มีการศึกษาในกลุ่มนักวิจัยอย่างกว้างขวาง
มาเป็นเวลากว่าสิบปี ซึ่งแก้ปัญหานี้ได้ด้วยระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก โดยระบบกำหนดตำแหน่ง
บนโลกสามารถระบุตำแหน่งได้โดยใช้เครื่องรับจีพีเอส ซึ่งใช้ดาวเทียมอย่างน้อยสามดวงเพื่อวัด
ระยะห่างระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับ โดยการวัดระยะจะคิดจากระยะเวลาในการส่งสัญญาณ
จากดาวเทียมมายังเครื่องรับ ที่สำคัญอย่างยิ่งต้องมีระยะตรงตามแนวสายตาระหว่างเครื่องรับจีพีเอส
กับดาวเทียม และต้องเป็นที่โล่ง ซึ่งนักวิจัยได้เล็งถึงปัญหาการระบุตำแหน่งในที่ร่ม จะอาศัยเครื่องช่วย
รับรู้ไร้สายแก้ปัญหานี้เนื่องจากมีราคาถูกและใช้อุปกรณ์อย่างง่าย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบเครื่องช่วยรับรู้ไร้สายสำหรับการระบุตำแหน่งในที่ร่ม ซึ่งในระบบ
ได้ใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากการสื่อสารไร้สายระหว่างตัวรับและตัวส่งในกระบวนการ
ระบุตำแหน่ง วิธีการระบุตำแหน่งด้วยค่าความแรงของสัญญาณเป็นที่แพร่หลายอย่างกว้างขวาง
เนื่องจากไม่ต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มเติม อย่างไรก็ตามค่าความแรงของสัญญาณก็มีความผิดพลาดสูง
เนื่องจากการสูญเสียจากหลายทิศทางและการเลือนของสัญญาณซึ่งเป็นปัญหาที่ต้องแก้ โดยทำ
การออกแบบอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายกับสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม นอกจากนี้อัลกอริทึมในการระบุ
ตำแหน่งจะใช้วิธีพาร์ทิเคิลฟิวเตอร์ที่พัฒนาสำหรับเครื่องช่วยตัวรับรู้ไร้สายด้วยสายอากาศแบบ
เปลี่ยนบีม เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งจากการจำลองกับการทดลองจริง ในการ
จำลองการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมให้ความแม่นยำและถูกต้องมากกว่า
สายอากาศแบบรอบตัว นอกจากนี้สายอากาศแบบเปลี่ยนบีมยังมีความคงทนต่อการประมาณค่า
ผิดพลาดมากกว่าสายอากาศแบบรอบตัว การทดลองจริงจะช่วยยืนยันชั้นผลของการจำลอง

วุฒิชัย เกษรปทุมานันท์

ลายมือชื่อนิติสด

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

28 / พ.ค. / 2551

Vuttichai Kesornpatumanun 2008: Design and Development of Wireless Sensor Nodes for Localization with a Switched Beam Antenna. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Teerasit Kasetkasem, Ph.D. 112 pages.

The problem of localizing a person or an object has been extensively studied by many researchers for decades. The outstanding solution to this problem is the global position systems (GPS). A GPS identifies the location of a GPS receiver by measuring the distances between at least three GPS satellite and the receiver. Their distances are determined from the propagation delay of a GPS signal transmitted from a GPS satellite to a receiver. As a result, it is crucial to have a line-of-sight between the satellites and the receiver. This requirement can only be obtained for outdoor environment. As a result, many researchers have focused on an alternative solution for indoor environment. Among them, wireless sensor networks (WSN) have shown to be a promising solution due to the lower cost and simple hardware.

Hence, this thesis investigates the design of WSN for the indoor localization. Our system employs the received signal strength (RSS) obtained from a wireless communication between a localized node and anchor nodes in the localization process. The RSS has been used extensively in many literatures in the localization problem since no additional equipment is needed. However, the RSS is also known to be highly fluctuated due to shadowing and multipath overcome this problem, we design a wireless sensor node to be equipped with a switched beam antenna. Furthermore, the localization algorithm using the concept particle filters has also be developed for WSN with switched beam antenna. We examine the performance of our localization through both the simulation and actual implementation. In the simulation, we find that localization system with a switched beam antenna is more accurate than the system with an omni directional antenna. Furthermore, the system with switched beam is more robust to the estimation error. The actual implementation has also confirmed our simulation.

Vuttichai Kesornpatumanun

Student's signature



Thesis Advisor's signature

28 / May / 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จเรียบร้อยได้ ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม ประธานกรรมการที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภา หอมทรัพย์ กรรมการร่วม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เด่นชัย วรเสวต ได้ให้คำปรึกษา คำชี้แนะ และความช่วยเหลือ และ โครงการพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สายเพื่อนักวิจัยพื้นฐาน และโครงการระบบระบุตำแหน่ง โดยอาศัยระบบเครือข่ายตรวจสอบไร้สายเพื่องานรักษาความปลอดภัยภายในอาคาร ที่ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำงานวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบคุณ คุณแม่ดวงรัตน์, คุณพ่อเอกชัย เกษรปทุมานันท์ ที่สนับสนุนให้กำลังใจในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ขอกราบขอบคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณ คุณโจ้ คุณมาร์ค คุณกานต์ คุณจอย คุณโต้ง คุณกิ๊ก คุณหวาน คุณนัน ที่ช่วยแนะนำและแก้ไขปัญหาอีกทั้งนำความรู้ใหม่มาให้เสมอ ตลอดจนเพื่อนพี่น้องที่ไม่ได้เอ่ยนาม หากวิทยานิพนธ์นี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับข้อเสนอแนะและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

วุฒิชัย เกษรปทุมานันท์

มีนาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	39
ผล	39
วิจารณ์	58
สรุปและข้อเสนอแนะ	60
สรุป	60
ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	62
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก	67
ภาคผนวก ข	77
ภาคผนวก ค	91
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	112

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การควบคุมการเปลี่ยนเฟสของวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส	34
2	แสดงการทำงานของแอนะล็อกสวิตช์ในวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส	35
3	ค่าตัวแปรที่ดีที่สุดในการทดสอบการระบุตำแหน่งจริง	37
4	คุณสมบัติของสายอากาศแบบโมนโพล $\lambda/4$	37
5	ผลการวัดขนาดและเฟสด้วยเครื่องมือวัด	40
6	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่ตำแหน่งที่ 1	50
7	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่ตำแหน่งที่ 2	50
8	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่ตำแหน่งที่ 3	51
9	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่ตำแหน่งที่ 4	51
10	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่ตำแหน่งที่ 5	52
11	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่ตำแหน่งที่ 6	52
12	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่ตำแหน่งที่ 7	53
13	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่ตำแหน่งที่ 8	53
14	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่ตำแหน่งที่ 9	54
15	อัตราการเพิ่มประสิทธิภาพระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว	56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	ย่านความถี่ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4	70
ก2	พื้นที่ความยาวของเฟรมกลุ่มข้อมูลโปรโตคอลชั้นแม็ค	72
ก3	ค่าที่เป็นไปได้ของชนิดเฟรม	73
ก4	ค่าที่เป็นไปได้ของพื้นที่ย่อโหมดแอดเดรสต้นทางและปลายทาง	75
ข1	การเปลี่ยนระหว่างซิมเบิลและชิพ	80
ข2	รายละเอียดไบต์แสดงสถานะ	83
ข3	รายละเอียดของแรม	85
ค1	รีจิสเตอร์ควบคุมและสถานะยูอาร์ที 0	102
ค2	รีจิสเตอร์ควบคุมและสถานะยูอาร์ที 1	103
ค3	รีจิสเตอร์ควบคุมยูอาร์ที	103
ค4	รีจิสเตอร์ควบคุมการส่งยูอาร์ที	104
ค5	รีจิสเตอร์ควบคุมการรับยูอาร์ที	105
ค6	รีจิสเตอร์ควบคุมอัตราบอดยูอาร์ที 0	106
ค7	รีจิสเตอร์ควบคุมอัตราบอดยูอาร์ที 1	106
ค8	รีจิสเตอร์ควบคุมการมอดูเลชันยูอาร์ที	107
ค9	รีจิสเตอร์บัพเฟอร์การรับยูอาร์ที	107
ค10	รีจิสเตอร์บัพเฟอร์การส่งยูอาร์ที	107
ค11	รีจิสเตอร์การใช้งานมอดูล 1	108
ค12	รีจิสเตอร์การใช้งานมอดูล 2	108
ค13	รีจิสเตอร์การใช้งานการขัดจังหวะ 1	109
ค14	รีจิสเตอร์การใช้งานการขัดจังหวะ 2	109
ค15	รีจิสเตอร์แฟลกซ์การขัดจังหวะ 1	110
ค16	รีจิสเตอร์แฟลกซ์การขัดจังหวะ 2	110

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงวิธีการหามุมของวัตถุ	10
2	แสดงวิธีการคำนวณหามุมโดยใช้ความแตกต่างของระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง	11
3	แสดงวิธีระดับพลังงานและการคำนวณหามุมจากอัตราส่วนความแรงของสัญญาณระหว่างสายอากาศ	12
4	ตัวรับรู้โมทเพื่องานวิจัยทางฟิสิกศาสตร์	16
5	ตัวรับรู้ตรวจวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	17
6	โครงสร้างของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม	24
7	แบบจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม	25
8	ตำแหน่งของตัวรับและกำหนดมุม 0 องศา	28
9	โครงสร้างในส่วนฮาร์ดแวร์	29
10	โครงสร้างในส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์	30
11	โครงสร้างในส่วนมอดูรับส่งสัญญาณ	31
12	โครงสร้างในส่วนยูเอสบี	32
13	โครงสร้างในส่วนวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส	33
14	ห้องที่ใช้วัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม	36
15	สายอากาศแบบโมนิโพล $\lambda/4$	36
16	ตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบการระบุตำแหน่งในภายในห้อง	38
17	ต้นแบบอุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สาย	39
18	อุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สายขนาดเล็ก	39
19	บอร์ดวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส	40
20	สายอากาศแบบเปลี่ยนบีม	41
21	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ Ant1 และ Ant2	42
22	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ Ant3 และ Ant4	43
23	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมในทิศทางด้านหน้า	44

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมในทิศทางด้านขวา	45
25	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมในทิศทางด้านซ้าย	46
26	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว	47
27	ความคลงทนการระบุตำแหน่งระหว่างระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว	48
28	ผลของจำนวนตัวรับรู้ต่อประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว	49
29	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งที่ตำแหน่งจริงต่างๆเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว	55
30	ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งที่จำนวนพาร์ทิเคิลต่างๆเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว	57
ภาพผนวกที่		
ก1	การสร้างเครือข่ายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4	68
ก2	รูปแบบทั่วไปของกลุ่มข้อมูลโปรโตคอลชั้นกายภาพ	71
ก3	โครงสร้างบิตของจุดเริ่มต้นของเฟรม	71
ก4	รูปแบบทั่วไปของกลุ่มข้อมูลโปรโตคอลชั้นกายภาพ	73
ก5	รูปแบบของเฟรมควบคุม	73
ก6	ซีอาร์ซี-16 ตัวสร้างพหุนาม	76
ข1	รายละเอียดของวงจรรวม CC2420	79
ข2	แสดงฟังก์ชันการมอดูเลต	80
ข3	แสดงการส่งข้อมูลซิมเบิล “0”	81

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข4	ขั้นตอนการอ่านและเขียน แรมและรีจิสเตอร์	82
ข5	ขาสัญญาณต่างๆ เมื่ออยู่ในโหมดรับข้อมูล	87
ข6	ขาสัญญาณต่างๆ เมื่ออยู่ในโหมดส่งข้อมูล	88
ข7	สถานะระบบปฏิบัติงานของ CC2420	90
ค1	โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์	93
ค2	ขาของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ MSP430F1611	94
ค3	โครงสร้างยูอาร์ทแบบ โหมดเอสพีไอ	95
ค4	ยูอาร์ทมาสเตอร์และสลาฟภายนอก	97
ค5	ยูอาร์ทสลาฟและมาสเตอร์ภายนอก	98
ค6	ตัวสร้างอัตราบอดเอสพีไอ	99
ค7	การจับเวลายูอาร์ทเอสพีไอ	101

การออกแบบพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สายเพื่อการระบุตำแหน่ง ด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนขั้ว

Design and Development of Wireless Sensor Nodes for Localization with a Switched Beam Antenna

คำนำ

ในปัจจุบันโลกแห่งการสื่อสารได้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่มีประสิทธิภาพและมีขนาดเล็ก ระบบสื่อสารได้ถูกออกแบบมาหลายอย่างตามวัตถุประสงค์ ตัวอย่างเช่น เพื่อเชื่อมต่อระหว่างบุคคล เช่น โทรศัพท์ หรือการส่งข้อมูลจำนวนมาก เช่น ระบบอินเทอร์เน็ต นอกจากนี้ยังมีระบบสื่อสารที่ประกอบด้วยตัวรับรู้ขนาดเล็กสำหรับการตรวจวัดปริมาณต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น แสงสว่าง และทำการติดต่อสื่อสารผ่านช่องสัญญาณแบบไร้สายในระยะสั้นโดยระบบนี้ถูกเรียกว่าระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ระบบตัวรับรู้แบบไร้สายที่สามารถสร้างเครือข่ายสื่อสารตัวเองขึ้นมาได้จากการติดต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลถึงกันแบบอิสระและอัจฉริยะ ก่อให้เกิดเป็นเครือข่ายโยงใยเหมือนใยแมงมุม และกำลังจะเป็นยุคต่อไปของเครือข่ายคอมพิวเตอร์ในอนาคต เครือข่ายคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กของอุปกรณ์ตรวจวัดที่เรียกว่า เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายกำลังได้รับความนิยมอยู่เช่นกัน โดยเฉพาะในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา (Ilyas and Mahgoub, 2005) ทั้งการพัฒนาทางด้านขนาดของตัวรับรู้และอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่มีเล็กกะทัดรัดลงเรื่อยๆ ราคาที่ถูกลงอย่างต่อเนื่อง การใช้พลังงานที่มีแนวโน้มต่ำลงเรื่อยๆ

เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในหลายๆ งาน เช่น การค้นหาไฟฟ้า (Niculescu and Nath, 2001) ทั้งนี้ตัวรับรู้อาจจะได้รับการติดตั้งอย่างเป็นระเบียบตามสถานที่ต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ หรืออาจจะถูกติดตั้งแบบสุ่มโดยการ โปรงลงมาจากเครื่องบิน ซึ่งตัวรับรู้ที่อยู่ในป่าจะมีหน้าที่ในการค้นหาแหล่งกำเนิดของไฟฟ้า แล้วทำการแจ้งข้อมูลดังกล่าวให้กับสถานีฐานทราบเพื่อที่จะได้สามารถควบคุมรัศมีของไฟฟ้า ก่อนที่จะไม่สามารถควบคุมไฟฟ้าได้ ซึ่งแหล่งพลังงานของตัวรับรู้อาจจะอยู่ในรูปของพลังงานแสงอาทิตย์ (solar cells) เพราะว่าตัวรับรู้ที่ถูกติดตั้งในป่าอาจไม่ได้รับการดูแลเป็นเวลานาน การควบคุมจัดการคลังเก็บสินค้า (Ilyas and Mahgoub, 2005) สินค้าแต่ละประเภทจะมีการติดตั้งตัวรับรู้ไว้ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการค้นหาสินค้าของสถานีฐาน โดยทำให้สามารถรู้ตำแหน่ง และจำนวนของสินค้าที่มีอยู่ในคลังเก็บสินค้าได้อย่างรวดเร็ว ระบบ

เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายมาทำการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สาย ซึ่งอาจสามารถนำมาทำเป็นระบบรักษาความปลอดภัย การค้นหาติดตามตัวคนในสถานที่ต่างๆ เช่น ห้างสรรพสินค้า เป็นต้น จะเห็นได้ว่าในอนาคตระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายนี้มีประโยชน์ต่อวิถีชีวิตของเราเป็นอันมาก

ปัญหาหนึ่งของการประยุกต์ใช้เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายก็คือ ปัญหาของการระบุตำแหน่ง โดยปัญหานี้ได้รับการศึกษาโดย (Patwari *et al.*, 2005) และพบว่าสามารถกระทำได้โดย 3 วิธีใหญ่ๆ คือ ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับ (received-signal-strength: RSS) ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง (Time-of-arrival: TOA) และค่ามุมที่สัญญาณเดินทางมาถึง (angle of arrival: AOA) ทั้ง 3 วิธี การใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับจะประหยัดอุปกรณ์เสริมที่สุด แต่ความแม่นยำที่ได้ก็จะลดต่ำกว่าที่เหลืออีก 2 วิธี ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการระบุตำแหน่งโดยใช้สายอากาศแบบเปลี่ยนบีม ซึ่งแต่ละบีมถูกออกแบบให้รับสัญญาณจากทิศทางต่างๆ ซึ่งแนวคิดนี้จะคล้ายกับการระบุตำแหน่งด้วยค่ามุมที่สัญญาณเดินทางมาถึง ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี วิธีแรกแต่ละตัวรับรู้จะได้รับสัญญาณจากสายอากาศมากกว่า 2 อันขึ้นไป เพื่อที่จะเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเฟส ซึ่งวิธีนี้ไม่เหมาะกับการนำไปปฏิบัติจริง เนื่องจากได้ใช้หน่วยประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูง วิธีที่สองใช้อัตราส่วนค่าความแรงของสัญญาณ จากสายอากาศมากกว่า 2 อันขึ้นไปแต่วิธีนี้ต้องใช้ค่าความแรงสัญญาณที่วัดได้จากแต่ละสายอากาศมาเปรียบเทียบกัน ยิ่งไปกว่านั้นหลังจากได้อัตราส่วนค่าความแรงของสัญญาณแล้ว ก็จะไม่ใช้ค่าความแรงของสัญญาณอีก ดังนั้นการระบุตำแหน่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้อัตราส่วนค่าความแรงของสัญญาณโดยตรง แต่ใช้ค่าความแรงสัญญาณ กับรูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศ ในการระบุตำแหน่งของตัวส่ง

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วย 4 ส่วน โดยในส่วนที่ 1 เป็นตรวจเอกสาร ได้กล่าวถึงวิธีการระบุตำแหน่ง ระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย และอัลกอริทึมในการระบุตำแหน่ง ส่วนที่ 2 เป็นวิธีการได้อธิบายขั้นตอนการจำลองการทำงานเพื่อนำไปสู่การออกแบบที่เหมาะสม ขั้นตอนการสร้างและออกแบบอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายตามการจำลอง และขั้นตอนการทดสอบการระบุตำแหน่งจริง ส่วนที่ 3 เป็นผลการทดลอง ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งที่ได้จากการจำลองและการทดสอบจริงด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว ส่วนที่ 4 เป็นสรุปและข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเป็นอุปกรณ์ต้นแบบตัวรับรู้ไร้สายเพื่อการระบุตำแหน่งภายในอาคาร
2. สามารถนำทั้งส่วนอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายและระบบที่ออกแบบ เพื่อนำไปใช้ในเชิงรักษาความปลอดภัย และเชิงพาณิชย์
3. เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง

การตรวจเอกสาร

การระบุตำแหน่ง

วิธีการระบุตำแหน่ง (localization) ของตัวรับรู้ในเครือข่าย ซึ่งถือว่าเป็นหัวข้อหนึ่งที่สำคัญสำหรับเครือข่ายตัวรับรู้ฝังตัว (embedded sensor networks) เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อ (node) เป็นข้อมูลที่เราต้องการในงานต่างๆ เช่น ระบบติดตาม และการระบุตำแหน่งยังช่วยในการหาเส้นทาง (routing) เพื่อให้ลดพลังงานในการส่งข้อมูลภายในเครือข่ายและเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลด้วย

จากรายงานของ Bulusu (Bulusu *et al.*, 2000) มีวิธีระบุตำแหน่งที่นิยมใช้และให้ความแม่นยำสูงที่เรียกว่า ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก (global positioning system: GPS) โดยระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกทำงานได้โดยอาศัยเครื่องรับ แต่อุปกรณ์มีราคาค่อนข้างสูง ต้องการความตรงตามแนวตา (line of sight: LOS) ระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับจึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้กับงานระบุตำแหน่งภายในอาคารที่มีต้นทุนต่ำ ดังนั้นเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายที่มีราคาถูกและมีระดับพลังงานที่ใช้ต่ำ จึงมีความเหมาะสมกับการระบุตำแหน่งภายในอาคารมากกว่า เพราะตัวรับสัญญาณดาวเทียมทำงานภายในที่ร่ม หรือบริเวณที่ไม่ได้ตรงตามแนวตาจากดาวเทียมไม่สามารถคำนวณตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง และนอกจากนี้ปริมาณพลังงานที่เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยังอยู่ในระดับสูงมาก ระยะเวลาการใช้งานจึงจำกัดอย่างมาก

การออกแบบระบบระบุตำแหน่งในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย จำเป็นต้องพิจารณาในส่วนของความสำคัญของการระบุตำแหน่งเช่น เป็นการบันทึกตำแหน่ง (location stamp) สำหรับการวัดค่าของตัวรับรู้เพื่อใช้ระบุตำแหน่งและติดตามวัตถุที่เราสนใจ คุณภาพการครอบคลุมของเครือข่าย (quality of coverage) เพื่อใช้ทำการแบ่งภาระการทำงานของแต่ละโหนด (load balancing) โครงสร้างการเชื่อมต่อควบคุมกลไก (topology control mechanism) เพื่อใช้สร้างกลุ่ม (cluster) เพื่อช่วยในการหาเส้นทางแบบตามลำดับชั้น (hierarchical routing) และการประมวลผลจากหลายส่วน (collaborative processing) เพื่อช่วยในการทำกราฟฟิก การหาเส้นทาง (geographic routing) และแทนที่จะแพร่กระจาย (flood) ข้อมูลไปทั่วทั้งเครือข่าย ได้มีการทำการซักถามข้อมูล (querying) ก่อนเพื่อช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงาน

1. สิ่งจำเป็นให้การระบุตำแหน่ง

เนื่องจากเครือข่ายตัวรับรู้แบบไร้สายเป็นที่นิยมในการนำไปใช้ในหลายงาน ซึ่งงานที่ต่างกันออกไปก็มีความต้องการที่ต่างกันไป ดังนั้นในการออกแบบเครือข่ายตัวรับรู้เราต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

มาตราส่วน (scale) ในการวัดค่า คือระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อแต่ละจุดเชื่อมต่อกันมีค่าเท่าไร ระยะที่ไกลที่สุดเท่าไร ใกล้ที่สุดเท่าไร การระบุตำแหน่งใช้ศูนย์กลางแบบใด ตัวอย่างเช่น ในการระบุตำแหน่งด้วยระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกจะใช้มาตราส่วนของโลกเป็นละติจูดกับลองจิจูดและมีความละเอียดอยู่ในระดับเมตร ถ้าระบุตำแหน่งโดยใช้เครือข่ายรับรู้ไร้สายจะมีความละเอียดอยู่ในระดับเซนติเมตร

ความถูกต้องและแม่นยำ (precision and accuracy) ความเชื่อถือได้ของข้อมูล ต้องพิจารณาว่าต้องการถึงระดับไหนจึงเหมาะสมกับงานที่ใช้ ถ้ามากไปอาจทำให้ใช้หน่วยความจำสูง

ในระบบต้องการตำแหน่งโดยเทียบกับจุดเชื่อมต่ออื่นๆ หรือต้องการตำแหน่งที่แท้จริงในการอ้างอิง

พิจารณาว่าส่วนย่อยต่างๆ ในเครือข่ายนั้นเคลื่อนที่หรือไม่ หรืออยู่นิ่งๆ ตลอดไป ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงควรมีการปรับข้อมูลด้วยอัตราเท่าไร เป็นต้น

ราคาหรือค่าต้นทุนของอุปกรณ์ต่างๆ ว่าการที่ลงทุนลงไปคุ้มค่ากับผลที่ได้หรือไม่ เช่น บางงานจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์รับส่งข้อมูล และสายอากาศแบบพิเศษเพื่อให้การระบุตำแหน่งมีความถูกต้องสูงก็ต้องใช้ แต่บางงานไม่จำเป็นก็เลือกใช้วิธีที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์มาเพิ่ม ซึ่งก็จะลดราคาไปได้มาก นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงการกินพลังงานของจุดเชื่อมต่อถ้าพบว่าจุดเชื่อมต่อนั้นเป็นจุดเชื่อมต่อที่กินพลังงานสูง ซึ่งนั่นแปลว่าอายุการใช้งาน (lifetime) ก็จะสั้นหรือจำเป็นต้องเชื่อมต่อบริเวณไฟฟ้า ดังนั้นอาจจะปรับเปลี่ยนแบ่งการทำงานเพื่อให้จุดเชื่อมต่อนั้นสามารถอยู่นานขึ้น เพราะจุดเชื่อมต่อในเครือข่ายตัวรับรู้บางชนิด เมื่อพลังงานหมด ก็จะทิ้งไปเลยไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำอีก

คำนึงถึงว่าจุดเชื่อมต่อหนึ่งจะมีขนาดใหญ่แค่ไหน แต่ละจุดเชื่อมต่อมีประกอบด้วยตัวรับรู้อะไรบ้าง และทำงานอย่างไร

พิจารณาถึงพลังงานและการติดต่อสื่อสารระหว่างจุดเชื่อมต่อ จุดเชื่อมต่อใดควรเป็นตัวเริ่มต้นกระบวนการระบุตำแหน่ง

สภาพแวดล้อม ถ้าเป็นแบบในที่ร่ม ซึ่งต้องคำนึงถึงผลกระทบจากหลายทิศทาง (multipath) หรือไม่ หรือเป็นแบบในที่โล่ง ซึ่งเทคนิคที่ใช้มีข้อจำกัดด้านการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศหรือไม่

2. ประเภทการระบุตำแหน่ง

การระบุตำแหน่งแบ่งออกกว้างๆ เป็น 2 ประเภท คือ การระบุตำแหน่งโดยไม่ใช้ค่าจากการวัดค่าระยะ (range free localization technique) และการระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจากการวัดค่าระยะ (range base localization technique)

2.1 การระบุตำแหน่งโดยไม่ใช้ค่าจากการวัดค่าระยะ

การระบุตำแหน่งโดยไม่ใช้ค่าจากการวัดอาจเป็นการหาดำแหน่งโดยอาศัยการพิจารณาว่าจุดเชื่อมต่อเคลื่อนที่เข้าใกล้หรือออกห่างจากจุดเชื่อมต่ออ้างอิง เช่น วิธี Active Badge ในรายงานของ Want (Want *et al.*, 1992) จะระบุตำแหน่งโดยใช้แสงอินฟราเรด (infrared) ในการระบุตำแหน่ง การทำงานของอินฟราเรดจะมีแหล่งกำเนิดแสง และรับแสงอยู่แยกกันแล้วหันให้ตรงกัน โดยทำการส่งแสงอินฟราเรดแบบเฉพาะเจาะจงทุกๆ 10 วินาที โดยจะระบุตำแหน่งได้จากตัวรับแสงที่รู้ตำแหน่งแน่นอน วิธีใช้แสงอินฟราเรดเหมาะสำหรับสถานที่ภายในที่ร่มเพราะแสงอินฟราเรดมีระยะการส่งที่สั้นและถูกจำกัดโดยสิ่งขอบเขตสิ่งกีดขวาง เช่น กำแพง อีกทั้งแสงอินฟราเรดจะถูกแสงอาทิตย์รบกวนจึงไม่เหมาะสำหรับในสถานที่โล่งแจ้ง ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องน้อยกว่าการระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจากการวัดค่าระยะ แต่ข้อดีก็คือสามารถหาดำแหน่งได้โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ใดๆ เพิ่มเติม

โดยการทดลองของ Ssu (Ssu *et al.*, 2005) เป็นการระบุตำแหน่งโดยไม่ใช้ค่าจากการวัดค่าระยะใช้หลักการเกี่ยวกับการคาดคะเนทางเรขาคณิต สมมติว่ามีวงกลมอยู่ เมื่อเรารู้คอร์คอย่างน้อย 2 คอร์คบนรูปวงกลมเดียวกัน แล้วเราลากเส้นที่ตั้งฉากกับแต่ละคอร์ค จุดตัดของเส้นตั้งฉากนั้นคือ จุดศูนย์กลางของวงกลมโดยเราทำการทดลองโดยให้ตัวส่งเคลื่อนที่ไปรอบๆ ตัวรับรู้และส่งแบบกระจายข้อความ (broadcast beacon message) ซึ่งมีข้อมูลตำแหน่งของตัวส่ง ถ้าเคลื่อนที่เข้าไปในรัศมีของตัวรับรู้ ก็จะได้จุดตัดที่เส้นรอบวงกลมจุดที่ 1 และเคลื่อนที่ออกจากรัศมีของตัวรับรู้ ก็จะได้จุดตัดที่เส้นรอบวงกลมจุดที่ 2 ซึ่งได้คอร์คของวงกลมมา 1 คอร์ค และเคลื่อนที่เข้าไปในรัศมีของตัวรับรู้อีก ก็จะได้จุดตัดที่เส้นรอบวงกลมจุดที่ 3 ซึ่งจะได้คอร์คของวงกลมมา 2 คอร์ค ซึ่งก็จะสามารถหาดำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลมนั้นได้ซึ่งก็คือตำแหน่งของตัวรับรู้

2.2 การระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจากการวัดค่าระยะ

การระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจากการวัดค่าระยะซึ่งการระบุตำแหน่งด้วยวิธีนี้จะนำข้อมูลที่ได้จากการวัดนำไปวิเคราะห์และทำการระบุตำแหน่งโดยแบ่งการวัดออกเป็น 3 แบบ

2.2.1 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับ (Received-signal-strength: RSS)

ผลงานของ Patwari *et al.* (2005) เป็นวิธีการวัดความแรงของสัญญาณอาศัยหลักการลดทอนของสัญญาณ (signal attenuation) ต่อระยะทางเพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณ โดยการวัดความแรงของสัญญาณจะใช้วงจรที่แปลงค่าความแรงของสัญญาณมาเป็นความแรงของแรงดันไฟฟ้า ข้อดีอย่างหนึ่งของการใช้การวัดแบบนี้คือ ไม่ต้องการฮาร์ดแวร์ที่มีราคาสูงและง่ายต่อการติดตั้ง เหมาะสำหรับการวัดในเมืองหรือในที่ร่ม ในโครงข่าย (cellular) และเครือข่ายไร้สายแบบแลน (wireless LAN: WLAN) มีอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความแรงสัญญาณ อยู่แล้วโดยไม่ต้องเพิ่มอุปกรณ์ใดๆ

อย่างไรก็ตามสำหรับการวัดความแรงสัญญาณโดยตรงจะมีความน่าเชื่อถือน้อย เพราะว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของความผิดพลาด (error) มาก ซึ่งเป็นผลกระทบจากการเลือนเงา (shadow fading) ในช่องสัญญาณสื่อสารแบบไร้สาย การที่จะทำให้ทำให้ค่าความแรงสัญญาณน่าเชื่อถือมากขึ้นจะต้องสร้างระบบในการจดจำพื้นที่นั้นๆ โดยการวัดค่าและเก็บข้อมูลไว้หลายๆ ครั้ง เมื่อนำมาวิเคราะห์ภายหลังก็就会有ความผิดพลาดน้อยลง นอกจากนี้วิธีนี้

มักไม่ใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูงเนื่องจากมีค่าความแปรปรวนของสัญญาณสูงตามสภาพแวดล้อมต่างๆ กัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสัญญาณมาจากหลายทิศทาง และเกิดเงาสะท้อนของสัญญาณ (shadowing effect) อย่างไรก็ตามวิธีการวัดความแรงของสัญญาณ (signal-strength-based) มักนำไปใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งวัตถุหรือนำไปใช้ร่วมกับวิธีอื่นในการพิจารณา

โดยปกติกำลังของสัญญาณจะมีการลดลงเป็นในอัตราส่วนตามระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งยกกำลังสอง สัญญาณจากหลายทิศทาง (multipath signal) และเงาสะท้อนของสัญญาณ (shadowing) เป็นสองสาเหตุหลักของความผิดพลาดที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม (environment error) ในการวัดแบบค่าความแรงสัญญาณจากหลายทิศทาง ที่มีแอมพลิจูดและเฟสต่างกันเมื่อมาถึงตัวรับสัญญาณเหล่านี้จะเกิดการเสริมและลดความถี่เป็นฟังก์ชัน ทำให้เกิดการเลือนของสัญญาณบางความถี่ (frequency selective fading) ผลกระทบดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยใช้วิธีการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ (spread spectrum) โดยการเฉลี่ยค่ากำลังของตัวรับในช่วงความถี่ที่กว้าง นอกจากนี้ยังลดสัญญาณแทรกสอดใน จากความถี่อื่นๆ ด้วย

ในสภาพแวดล้อมจริงค่าความแรงสัญญาณจะลดทอนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ d^{-n} (Reichenbach and Timmermann, 2006) ซึ่งช่องสัญญาณในการสื่อสารจะถูกสมมุติเป็นการเลือนแบบล็อกนอร์มอล (log normal fading) และค่าความแรงของสัญญาณของสายอากาศแบบรอบตัว (omnidirectional antenna) ดังสมการ

$$RSS_i = RSS_0 + 10n \log\left(\frac{d_i}{d_0}\right) + N \quad (1)$$

เมื่อ RSS_i คือค่าประมาณความแรงของสัญญาณอยู่ในหน่วยเดซิเบลระหว่างตัวส่งกับตัวรับที่ i d_i คือระยะทางระหว่างตัวส่งกับตัวรับที่ i d_0 คือระยะอ้างอิง RSS_0 คือค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณอยู่ในหน่วยเดซิเบลที่ระยะอ้างอิง n คือเลขชี้กำลังเส้นทางสูญเสีย (pathloss exponent) ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4 และ N เป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ (normal random variable) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวนเป็น σ^2

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ได้จากรูปแบบล็อกนอร์มอล (log normal model) คือความแปรปรวน (variance) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ที่เป็นค่าคงที่ในหน่วยเดซิเบล สามารถแปลงเป็นตัวประกอบผลคูณ ตัวอย่างเช่น

ตัวประกอบผลคูณเท่ากับ 1.5 จะวัดค่าได้เป็น 150 เมตร จากค่าที่แท้จริง 100 เมตร ซึ่งนั่นเกิดจากความคลาดเคลื่อนไป 50 เมตร ถ้าค่าระยะทางจริงเป็น 10 เมตร ค่าที่วัดได้เป็น 15 คลาดเคลื่อนไป 5 เมตร ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ ทำให้เทคนิคการวัดค่าความแรงสัญญาณเหมาะกับเครือข่ายที่มีการวางตัวแบบหนาแน่นซึ่งระยะห่างระหว่างแต่ละจุดเชื่อมต่อกับค่าของความคลาดเคลื่อนในการวัดก็จะน้อยไปด้วย

2.2.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง (Time-of-arrival: TOA)

วิธีการคำนวณเวลาอาศัยหลักการบันทึกช่วงเวลาของสัญญาณนาฬิกาของเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ (Patwari *et al.*, 2005) แนวทางแรกของวิธีนี้ คือให้เครื่องรับและเครื่องส่งมีการประสานเวลากัน (synchronization) ดังนั้นสัญญาณที่มาถึงเครื่องรับ จึงสามารถเปรียบเทียบค่าความต่างเวลาได้ เช่น ในระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ดาวเทียมจะส่งสัญญาณนาฬิกาไปยังเครื่องรับ โดยแต่ละเครื่องรับจะสร้างสัญญาณนาฬิกาเทียบขึ้นมาเอง (replica signals) เมื่อดาวเทียมส่งสัญญาณมาถึงเครื่องรับ เครื่องรับจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณนาฬิกาที่ได้กับสัญญาณนาฬิกาที่สร้างขึ้นเองเพื่อคำนวณความต่างของเวลา ซึ่งเวลาที่แตกต่างจะบ่งบอกถึงระยะห่าง เพราะระยะห่างเท่ากับเวลาคูณความเร็วแสง

$$\Delta d = C\Delta T \quad (2)$$

โดย Δd คือระยะห่าง C คือความเร็วแสง และ ΔT คือความต่างของสัญญาณนาฬิกา แต่ในทางปฏิบัติการประสานเวลาของสัญญาณนาฬิกาดาวเทียมและเครื่องรับอาจไม่แม่นยำ 100% จึงต้องมีการอ่านสัญญาณดาวเทียมเพื่อคำนวณความคลาดเคลื่อนของเวลาด้วยแนวทางอื่นของวิธีนี้ คือการใช้ 2 สัญญาณนาฬิกาที่มีการแพร่ของสัญญาณต่างกัน ค่าความต่างของสัญญาณที่ไปถึงปลายทางของทั้ง 2 สัญญาณจะนำไปใช้ในการคำนวณระยะทาง ประเด็นสำคัญของการวัดค่าระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางก็คือ ภาครับต้องมีความสามารถในการประมาณเวลาที่เป็นเวลาที่มาถึงของสัญญาณที่เป็นตรงตามแนวคา ซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวน (additive noise) และ สัญญาณจากหลายทิศทาง

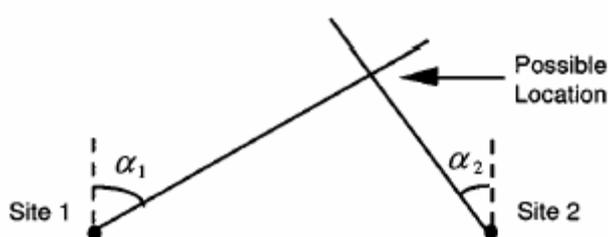
สำหรับเครือข่ายที่มีการประสานเวลาที่ดิการหาค่าระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง อาจหาได้จากเวลารับที่เครื่องรับลบกับเวลาส่งที่เครื่องส่งได้เลย (Sivrikaya and Yener, 2004) โดยมีการศึกษาพบว่า การประสานเวลาในเครือข่ายตัวรับรู้มีความละเอียดถึงระดับ 10 ไมโครวินาที

ซึ่งในระดับนี้เพียงพอกับสัญญาณที่มีความเร็วไม่สูงนักอย่างสัญญาณเสียงเช่น สัญญาณเสียงที่มีความเร็ว 300 เมตรต่อวินาที ถ้าใช้เวลาเดินทาง 1 มิลลิวินาที แปลว่าเครื่องรับและเครื่องส่งอยู่ห่างกัน 0.3 เมตร แต่อาจไม่เพียงพอกับสัญญาณที่มีความเร็วสูงอย่างสัญญาณวิทยุ ซึ่งใช้เวลา 1 ไมโครวินาทีในการวัดระยะห่างที่เท่ากัน

สำหรับเครือข่ายที่ไม่มีการประสานเวลาที่ดีพออาจใช้วิธีการวัดค่าระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางไปกลับที่ไม่ต้องคำนึงถึงเวลาของในแต่ละตัวรับรู้ว่าจะเท่ากันหรือไม่ (Lee and Scholtz, 2002) โดยวัดค่าการเดินทางไปกลับ (round-trip) ก็คือตัวส่งจะส่งสัญญาณไปยังตัวตัวรับรับ แล้วตัวรับก็จะส่งสัญญาณตอบกลับทันทีมายังตัวส่ง ดังนั้นเวลาที่ใช้จะเท่ากับสองเท่าของเวลาที่ใช้ในการเดินทางจากตัวส่งไปยังตัวรับบวกกับค่าหน่วงเวลา (delay) ภายในเครื่องรับตอนที่ตอบกลับมา ซึ่งเป็นค่าที่รู้แน่นอน และสามารถนำมาหักออกในการคำนวณหาค่าระยะเวลาในการเดินทาง

2.2.3 ค่ามุมที่สัญญาณเดินทางมาถึง (Angle-of-arrival: AOA)

เป็นวิธีการที่ต้องพิจารณาค่าตำแหน่งของตัวรับรู้ โดยพิจารณาจากมุมที่ตัวรับรู้ทำอยู่กับสถานีฐาน (Patwari *et al.*, 2005) ด้วยวิธีการนี้จึงจำเป็นที่จะต้องใช้การพิจารณาจากสถานีฐานอย่างน้อย 2 แห่งด้วยกัน ตำแหน่งที่ได้นั้นเป็นจุดตัดของเส้นที่ลากทำมุมตามที่วัดได้ของสถานีฐานแห่งหนึ่งกับเส้นที่ลากทำมุมของอีกสถานีฐานหนึ่งด้วยวิธีการนี้ทำให้ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มขึ้นจากเดิมคือสายอากาศแบบทิศทาง ดังภาพที่ 1

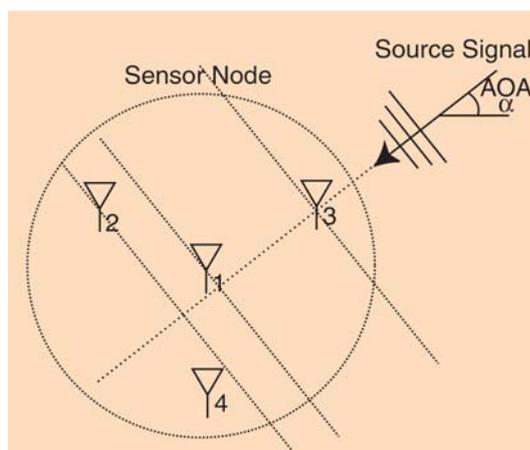


ภาพที่ 1 แสดงวิธีการหามุมของวัตถุ

ที่มา: Patwari (2005)

การวัดค่ามุมที่สัญญาณเดินทางมาถึงเป็นการบอกทิศทางของตัวรับรู้แทนที่จะบอกระยะทางระหว่างตัวรับรู้ ซึ่งปกติมี 2 วิธีที่นิยมใช้ คือ

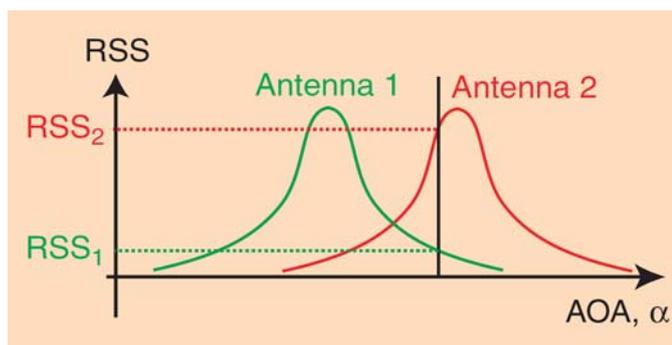
วิธีแรกการวัดค่ามุมที่สัญญาณเดินทางมาถึงต้องใช้ตัวรับรู้แบบอาร์เรย์ ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในระบบเนื่องจากตัวรับรู้แบบอาร์เรย์ มีราคาสูง โดยตัวรับรู้แบบอาร์เรย์ นี้จะสามารถคำนวณหามุมของสัญญาณโดยอาศัยคำนวณความแตกต่างของระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง ที่มาถึงตัวรับรู้คู่หนึ่ง จากรูปตัวอย่าง TOA ที่มาถึง สายอากาศที่ 1 กับ สายอากาศที่ 3 มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งเทคนิคการประมวลผลสัญญาณจากอาร์เรย์จะทำการคำนวณเวลาที่ต่างกันเป็นเฟสที่ต่างกันของสัญญาณ และคำนวณต่อได้ว่าค่ามุมที่สัญญาณเดินทางมาถึงนั้นมีค่าเท่าไร ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงวิธีการคำนวณหามุมโดยใช้ความแตกต่างของระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง

ที่มา: Patwari (2005)

วิธีที่สองคือ ใช้สัดส่วนค่าความแรงของสัญญาณของสายอากาศสองอันมาคำนวณหาทิศทางของสัญญาณ โดยวางสายอากาศสองอันโดยให้มีบีมอยู่คนละทิศทางซึ่งจะมีบางส่วนของบีมทั้งสองอันซ้อนทับกัน แล้วจุดเชื่อมต่อก็คือคำนวณหาจากค่าความแรงของสัญญาณของแต่ละสายอากาศ ที่ได้รับ ซึ่งวิธีนี้ก็ต้องใช้สายอากาศแบบอาร์เรย์ ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนและขนาดของจุดเชื่อมต่อและต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ภาพที่ 3 และระดับพลังงานที่วัดได้ในแต่ละสายอากาศที่ทิศทางต่างกัน



ภาพที่ 3 แสดงวิธีระดับพลังงานและการคำนวณหามุมจากอัตราส่วนความแรงของสัญญาณระหว่างสายอากาศ

ที่มา: Patwari (2005)

3. ความผิดพลาดในการระบุตำแหน่ง

ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นการประมาณค่าตำแหน่งจากการวัดที่มีสัญญาณรบกวน สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้หากเราเข้าใจถึงพฤติกรรมของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ชนิดของความผิดพลาดขึ้นกับชนิดของสัญญาณและสิ่งแวดล้อมของระบบ สามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบดังนี้

3.1 การเลือนจากหลายทิศทางและเงาสะท้อน

การเลือนจากหลายทิศทางและเงาสะท้อน (multipath fading and shadowing) ในการวัดความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุปัญหาการเลือนจากหลายทิศทางและเงาสะท้อน เป็นสาเหตุให้เกิดความแปรปรวนได้ถึง 30-40 เดซิเบล ในช่วงครึ่งความยาวคลื่น การกระจายกระจายใกล้เครื่องรับจะทำให้เกิดการแปรผันทางมุม ทำให้ค่าการวัดมุมที่สัญญาณเดินทางมาถึงคลาดเคลื่อนไป ถ้าใช้วิธีการวัดระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง เมื่อเกิดการเลือนจากหลายทิศทางจะทำให้เกิดค่าหน่วงเวลาการเปรียบเทียบค่าของเวลาคคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

3.2 ความไม่ตรงตามแนวตา

ความไม่ตรงตามแนวตา (nonline-of-sight: NLOS) สำหรับวิธีวัดค่ามุมที่สัญญาณเดินทางมาถึง เมื่อใช้กับระยะทางไกลๆจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง สำหรับวิธีวัดความต่างของเวลา ถ้าเส้นทางไปยังเครื่องรับที่ใกล้ที่สุดถูกกีดขวางจะทำให้ผลของการวัดระยะทางไกลกว่าที่เป็นจริง

3.3 การรบกวนจากการเข้าถึงหลายทาง

การรบกวนจากการเข้าถึงหลายทาง (multiple-access interference) ปัญหานี้มักเกิดกับระบบ CDMA โดยเครื่องที่มีกำลังสูงไปรบกวนเครื่องที่มีกำลังต่ำกว่า สามารถเกิดกับระบบคลื่นเสียงและระบบคลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic) ผลการปรับตัวแปรสัญญาณ (transducer calibration issues) ในระบบที่ใช้การวัดความแรงของสัญญาณที่ได้จากคลื่นวิทยุราคาถูก เมื่อระบบไม่ใช่อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง ความแปรปรวนจะเกิดจากความคลาดเคลื่อนเมื่อใช้เครื่องแปลงกำลัง

3.4 การแปรผันความเร็วในการแพร่กระจายของสัญญาณ

การแปรผันความเร็วในการแพร่กระจายของสัญญาณ (fluctuations in signal propagation speeds) เกิดกับคลื่นเสียงที่การแพร่ถูกรบกวนจากปัจจัยภายนอกเช่น แรงแลมหรืออุณหภูมิ และค่าความชื้นในอากาศ ปัจจัยเหล่านี้จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นเมื่อระยะทางมากขึ้น

เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย

จากรายงานในวารสาร Instrumenting the world (Intel Research, 2004) เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย (wireless sensor networks: WSN) คือการใช้อุปกรณ์ตัวรับรู้เล็กๆ จำนวนมากเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆ ของสิ่งแวดล้อมที่เราสนใจ และประมวลผลข้อมูลเหล่านั้นเพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวเราหรือตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้โดยอัตโนมัติ

ตัวอย่างการใช้งานเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายได้แก่ การฝังอุปกรณ์ตัวรับรู้ไว้ในร่างกายคนบางชนิด เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อการย้ายถิ่นฐานของนกเหล่านั้น การติดตั้งตัวรับรู้ไว้ในอุปกรณ์ผสมสารเคมีขนาดใหญ่หรือท่อส่งสารเคมีในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อตรวจจับการรั่วซึมของสารเคมี การใช้ตัวรับรู้ตรวจวัดการสั่นไหวของอุปกรณ์หลายๆ อย่าง ที่ใช้สำหรับการสร้างชีพคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจจับความผิดปกติของเครื่องมือเหล่านั้น เพื่อให้สามารถเข้าไปดูแลได้ก่อนที่มันจะเสียหาย การติดตั้งตัวรับรู้ไว้รอบๆ สนามบิน เพื่อตรวจจับการบุกรุกในบริเวณที่ห้ามคนเข้า นอกจากนี้เรายังสามารถใช้เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย เพื่อศึกษาผลกระทบของแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างอาคาร โดยฝังตัวรับรู้ไว้ภายใต้กำแพงทดลองที่สร้างขึ้นเพื่อวัดข้อมูลที่ได้จากจำลองแผ่นดินไหวในลักษณะต่างๆ เป็นต้น จากตัวอย่างเหล่านี้จะเห็นได้ว่านักวิทยาศาสตร์และวิศวกรสามารถใช้ประโยชน์จากเครือข่ายตัวรับรู้ได้มากมายในหลายรูปแบบ

อุปกรณ์พื้นฐานของเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายก็คือ ตัวรับรู้ขนาดเล็กมากเรียกว่า (Moteiv Corporation, 2005) โมท (mote) ซึ่งได้รับการพัฒนามาจากบริษัท Intel และ University of California (UC) at Berkeley โมทเป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กสำหรับวัดอุณหภูมิความชื้นหรือสภาวะแวดล้อมอื่นๆ มันทำงานโดยใช้แบตเตอรี่ธรรมดาและสื่อสารกับโมทตัวอื่นที่อยู่ใกล้เคียง โดยใช้เครือข่ายแอดฮอคไร้สาย (ad-hoc wireless network) (Niculescu and Nath, 2001) และข้อมูลจะถูกส่งผ่านระหว่างโมทด้วยกันเองจนกระทั่งถึงจุดหมายซึ่งอาจเป็นคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อื่นๆ สำหรับรวบรวมข้อมูลที่วัดได้ เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายทำให้เกิดแบบจำลองการใช้คอมพิวเตอร์ (computing paradigm) แบบใหม่เรียกว่า การใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมสถานการณ์ (proactive computing) ซึ่งแทนที่คอมพิวเตอร์จะรอรับคำสั่งจากมนุษย์ตามปกติ คอมพิวเตอร์ในระบบการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมสถานการณ์ จะคาดการณ์ถึงสภาพแวดล้อมที่มนุษย์ต้องการและสามารถดำเนินการล่วงหน้าแทนมนุษย์ในกรณีที่จำเป็น

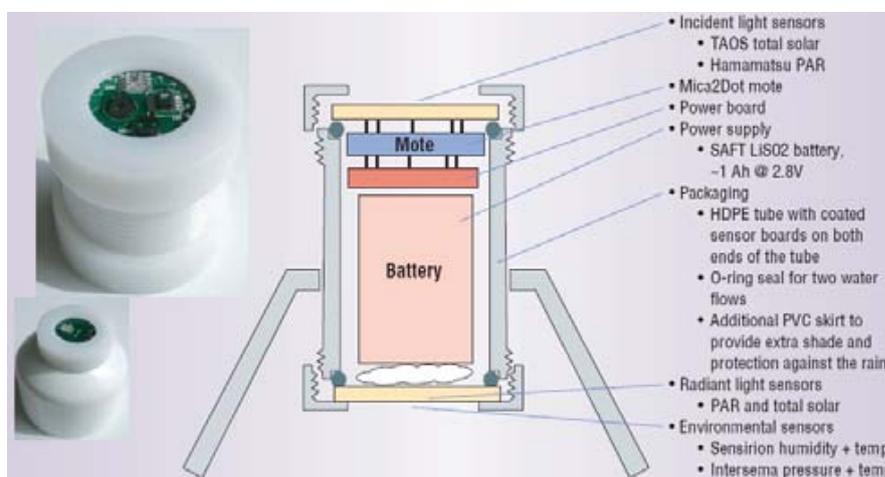
การใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมสถานการณ์เกิดขึ้นได้เนื่องจากเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายทำให้คอมพิวเตอร์สามารถรับข้อมูลจากโลกแห่งความเป็นจริงได้อย่างละเอียดและรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องมีมนุษย์เป็นผู้ป้อนข้อมูลให้ ดังนั้นมนุษย์จึงสามารถโปรแกรมให้คอมพิวเตอร์ควบคุมสถานการณ์ปฏิบัติการได้ทันทีเมื่อสภาวะแวดล้อมเป็นไปตามที่ตนคาดการณ์ไว้โดยไม่ต้องรอสั่งงานคอมพิวเตอร์เหมือนกับในระบบทำงานร่วมกัน ยกตัวอย่างเช่น เราสามารถโปรแกรมให้ตัวรับรู้ที่ถูกฝังอยู่ใต้ดินช่วยจัดการระบบชลประทานหรือระบบการให้น้ำเพื่อการเกษตร การสั่งงานให้เครื่องตรวจจับควันไฟสามารถส่งสัญญาณชี้แนะให้พนักงานดับเพลิงเข้าไปช่วยเหลือผู้ที่ติดอยู่ในตึกเมื่อเกิดเพลิงไหม้ และการโปรแกรมให้โมทตรวจวัดอุณหภูมิและการใช้พลังงานภายในที่อยู่อาศัยเพื่อปรับอุณหภูมิและการใช้พลังงานให้เป็นไปตามที่ผู้ใช้ต้องการ เป็นต้น

ในปัจจุบันเราใช้งานคอมพิวเตอร์โทรศัพท์มือถือและอุปกรณ์ผู้ช่วยดิจิทัลส่วนตัว (Personal Digital Assistant: PDA) ที่ละเครื่องเป็นส่วนใหญ่ แต่ในกรณีที่คอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กมากและมีอยู่กระจัดกระจายรอบๆ ตัวเรา ลักษณะการใช้งานและติดต่อสั่งงานกับเครื่องคอมพิวเตอร์เหล่านั้นก็จะเปลี่ยนไป ตัวอย่างหนึ่งของการนำคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กไปใช้ก็คือ เครื่องข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ซึ่งมีรูปแบบการใช้งานคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กเหล่านี้ในการควบคุมสถานการณ์ ซึ่งแทนที่คอมพิวเตอร์จะทำงานตอบสนองแบบทำงานร่วมกันกับมนุษย์อย่างที่เป็นอยู่ คอมพิวเตอร์จะคาดหวังสิ่งที่มนุษย์ต้องการล่วงหน้าและในบางครั้งดำเนินการบางอย่างแทนมนุษย์โดยอัตโนมัติ ในการที่ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมสถานการณ์จะสามารถอำนวยความสะดวกให้แก่เราในระดับนั้นได้จำเป็นที่จะต้องใช้ตัวรับรู้หลายร้อยหรือหลายพันตัวเพื่อตรวจวัดสถานะแวดล้อมในบริเวณใดบริเวณหนึ่งที่สนใจเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดและถูกต้องตามสภาพของความเป็นจริงและนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการปรับปรุงและดำเนินการตอบสนองความต้องการของผู้ใช้อย่างถูกต้องและปลอดภัย การที่เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายเกิดขึ้นมาได้นั้นมีปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน ปัจจัยแรกคือการที่โปรเซสเซอร์และคอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กลงและมีราคาถูกลงในขณะที่ความสามารถของมันมีมากขึ้น ลักษณะเช่นนี้เป็นไปตามกฎของ Moore (Moore, 1965) ซึ่งกล่าวไว้ว่าจำนวนของทรานซิสเตอร์ บนไมโครชิปจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าทุกๆ สองปี ปัจจัยที่สองคือ การใช้เทคโนโลยีระบบกลไกไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (microelectromechanical systems: MEMS) ในการสร้างตัวรับรู้ขนาดเล็กยกตัวอย่างเช่น ตัวรับรู้ตรวจจับความเร่ง (ซึ่งเป็นตัวสั่งงานให้ถุงลมนิรภัยทำงาน) และเทอร์โมมิเตอร์ขนาดเล็กเป็นต้น ปัจจัยที่สามคือการใช้เทคโนโลยี MEMS สร้างเครื่องส่งและรับสัญญาณวิทยุขนาดเล็กเท่ากับหัวเข็มหมุด ซึ่งผลิตได้ง่ายและมีราคาถูก ปัจจัยหลักทั้งสามอย่างนี้เองที่ส่งผลให้นักวิจัยและพัฒนาทางด้านเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายสามารถพัฒนาโมท ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวรับรู้ MEMS ไมโครโปรเซสเซอร์ และระบบคลื่นวิทยุ ที่มีประสิทธิภาพและใช้งานง่ายขึ้นมาได้

อย่างไรก็ตามการทำให้เครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายทำงานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพนั้นมีอุปสรรคหลายอย่างเนื่องจากโมทมีขีดจำกัดในความเร็วของโปรเซสเซอร์ ความจุของการเก็บข้อมูล และช่องความถี่ของคลื่นวิทยุในการสื่อสาร (Culler *et al.*, 2004) ดังนั้นอายุการใช้งานของมันจึงขึ้นอยู่กับการบริหารการใช้พลังงานของมันเองซึ่งมีอยู่จำกัด ด้วยเหตุนี้ผู้พัฒนาโมทจึงต้องออกแบบระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์รวมถึงระบบการสื่อสารของโมทให้ทำงานโดยใช้พลังงานน้อยที่สุด นอกจากนี้ในแง่ของการใช้งาน ผู้พัฒนาเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายต้องสร้างเครื่องมือที่ทำให้ผู้ใช้ที่ไม่จำเป็นจะต้องมีความรู้ขั้นสูงทางด้านวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สามารถใช้งานและสร้างงานเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายโดยง่ายด้วย

การออกแบบและใช้งาน โมทนั้นขึ้นอยู่กับงานแต่ไม่ว่าเราจะนำมันไปใช้งานในรูปแบบใดก็ตามมันก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้พลังงานซึ่งโมทจำเป็นต้องใช้พลังงานอย่างประหยัดเพื่อยืดอายุการใช้งานของมันให้ยาวนานที่สุด โดยทั่วไปแล้วโมทควรมีอายุการใช้งานอย่างน้อย 1 ปีต่อพลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด AA สองก้อน (Intel Research, 2004) อย่างไรก็ตามอายุการใช้งานของมันก็ขึ้นอยู่กับความถี่ในการตรวจวัดสภาพแวดล้อมและการรับและส่งข้อมูลในงานต่างๆ นั้นเอง

ไมโครโปรเซสเซอร์ของโมทจะประหยัดพลังงานโดยทำงานอยู่ในโหมดเตรียมพร้อม (standby mode) เป็นส่วนใหญ่และจะถูกปลุกขึ้นมาทำงานเมื่อถึงกำหนดเวลาที่มันต้องตรวจวัดข้อมูลและเวลาที่มันต้องส่งหรือรับข้อมูลจากโมทตัวอื่น ไมโครโปรเซสเซอร์ใช้พลังงานน้อยมากประมาณหนึ่งมิลลิวัตต์ในขณะที่มันทำงานและ 1-10 ไมโครวัตต์ ในโหมดเตรียมพร้อม อุปกรณ์เก็บข้อมูลของโมทเองก็มีความจุน้อยมากเมื่อเทียบกับคอมพิวเตอร์ ทั่วๆ ไป โมทมีแรม (RAM) น้อยกว่า 10 กิโลไบต์และใช้หน่วยความจำประมาณ 100 กิโลไบต์ สำหรับเก็บซอฟต์แวร์และประมาณหนึ่งเมกะไบต์สำหรับหน่วยเก็บข้อมูลถาวร ดังภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างของโมทที่มีขนาดเท่ากับกล่องใส่ฟิล์มถ่ายรูปที่ได้รับการพัฒนาโดยนักวิจัยที่ UC Berkeley (Culler *et al.*, 2004) สำหรับตรวจสอบความชื้นและสภาพอากาศอื่นๆ เพื่อการวิจัยทางพืชศาสตร์



ภาพที่ 4 ตัวรับรู้โมทเพื่อการวิจัยทางพืชศาสตร์

ที่มา: Culler (2004)

ปณิธิ และคณะ (2008) ได้นำเสนอระบบตรวจวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบไร้สาย ซึ่งประกอบไปด้วยตัวรับรู้ตรวจวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่สามารถส่งข้อมูลคลื่นไฟฟ้าหัวใจผ่านคลื่นวิทยุไปยังเกตเวย์ ซึ่งจะเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านระบบแลนทั้งแบบไร้สาย โดยผู้ใช้สามารถดูข้อมูลกราฟคลื่นไฟฟ้าหัวใจผ่านทางเว็บเบราว์เซอร์ได้ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ตัวรับรู้ตรวจวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

ที่มา: ปณิธิ (2008)

ในส่วนของระบบไมโครตัวรับรู้ นั้น โมทใช้เทคโนโลยีหลายแบบซึ่งมีขนาดเล็กและใช้พลังงานน้อยเช่นเดียวกับไมโครโปรเซสเซอร์ ตัวอย่างของเทคโนโลยีเหล่านี้ได้แก่ แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog-to-digital converters: ADC) ซึ่งเป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับรู้ที่ใช้ตรวจจับได้มาเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ไมโครโปรเซสเซอร์เข้าใจ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ระบบกลไกไมโครอิเล็กทรอนิกส์เทคโนโลยีมาสร้างตัวรับรู้หลายชนิดซึ่งสามารถผลิตสัญญาณดิจิทัลให้กับโปรเซสเซอร์ได้ด้วย ตัวอย่างของตัวรับรู้เหล่านี้ ได้แก่ ตัวรับรู้สำหรับวัดความเร่ง ซึ่งใช้สำหรับสั่งให้ถุงลมนิรภัยทำงาน ตัวรับรู้สำหรับตรวจจับความร้อนในร่างกาย และสำหรับตรวจวัดสารแปลกปลอมในอากาศ นอกจากนี้บริษัท Intel ก็กำลังสร้างระบบตัวรับรู้ที่เป็นไบโอชิพซึ่งสามารถใช้ตรวจจับสารชีวภาพ หรือชีวเคมีด้วย (Intel Research, 2004)

การพัฒนาาระบบสื่อสารของโมทนั้นใช้ระบบวิทยุสื่อสารพลังงานต่ำ ซึ่งถูกผลิตขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีเดียวกันกับที่ใช้สร้างเครือข่าย IEEE 802.15.4 และอุปกรณ์ผู้ช่วยดิจิทัลส่วนตัวที่สามารถติดต่ออินเทอร์เน็ต (internet) ได้ และโทรศัพท์มือถือ เนื่องจากโมทต้องการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการสื่อสารมันจึงถูกออกแบบมาให้ใช้เครือข่ายแอดฮอคไร้สาย เพื่อส่งข้อมูลผ่านโมทเพื่อนบ้านที่อยู่ใกล้ซึ่งก็จะใช้วิธีส่งผ่านข้อมูลต่อกันเป็นทอดๆ จนถึงจุดหมายปลายทาง

นอกจากนี้นักวิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถเติมพลังงานให้กับโมทด้วย ยกตัวอย่างเช่นระบบที่การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้า และระบบที่เปลี่ยนการสั่นไหวของสภาพแวดล้อมเป็นไฟฟ้าเป็นต้น

ในปัจจุบันการพัฒนาโมทนั้นไม่ได้มีอยู่ในห้องวิจัยในมหาวิทยาลัยเท่านั้นแต่ได้รับการพัฒนาโดยวงการอุตสาหกรรมและผลิตออกมาใช้งานในหลายรูปแบบ ในปัจจุบันโมทมีราคาประมาณตัวละ 50-100 เหรียญสหรัฐ และคาดว่าจะมีราคาลดลงเหลือ 5 เหรียญสหรัฐ ในปี 2009 (Intel Research, 2004) บริษัท Intel และ Crossbow Technology กำลังพัฒนาระบบที่จะช่วยประหยัดพลังงานในการสื่อสารของโมท โดยลดขนาดความสามารถของระบบวิทยุบนโมทลงในขณะที่ใช้ช่องความถี่สูงของคลื่นวิทยุ IEEE 802.15.4 WiFi เกตเวย์ซึ่งมีแหล่งพลังงานถาวรเช่นปลั๊กไฟเป็นอุปกรณ์สื่อสารหลักภายในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ในกรณีนี้โมทจะส่งข้อมูลให้เกตเวย์ที่อยู่ใกล้มันเพื่อให้เกตเวย์ส่งข้อมูลต่อให้โมทและเกตเวย์อื่นๆในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายต่อไป เราเรียกลักษณะการสื่อสารแบบนี้ว่าเครือข่ายตัวรับส่งสัญญาณต่างชนิดกัน (heterogeneous sensor network) นอกจากนี้บริษัท Intel ยังได้พัฒนาโมทที่มีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลและการสื่อสารสูง ชื่อว่าระบบ ไอโมท (iMote) (Intel Research, 2004) ซึ่งประกอบไปด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ขนาด 32 บิตและอุปกรณ์บลูทูธ (bluetooth) ซึ่งใช้กันทั่วไปในโทรศัพท์มือถือ และคอมพิวเตอร์พกพา สำหรับการสื่อสารระหว่างไอโมทด้วยกัน

ในการควบคุมโมทนักวิจัยที่ UC Berkeley ได้พัฒนาระบบปฏิบัติการ (Operating System: OS) ที่ชื่อว่าไทน์โอเอส (TinyOS) (Philip Levis, 2006) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ไม่เสียค่าลิขสิทธิ์ (open source) และในปัจจุบันถือได้ว่าเป็นระบบปฏิบัติการมาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ระบบปฏิบัติการไทน์โอเอสจะทำงานอยู่บนโมททุกตัวโดยมีหน้าที่ควบคุมการใช้พลังงานและการปฏิบัติการของโมท โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของ การสื่อสารแบบไร้สายซึ่งเป็นที่รู้กันดีว่าใช้พลังงานค่อนข้างมาก ไทน์โอเอสจะจัดการการส่งข้อมูลระหว่างโมทในลักษณะหลายทอด (multi-

hop) ซึ่งเป็นการส่งกลุ่มข้อมูลไปให้โหนดใกล้เคียง และให้โหนดที่รับกลุ่มข้อมูลไปส่งกลุ่มข้อมูลต่อในลักษณะเดียวกันเป็นทอดๆ จนกระทั่งถึงจุดหมาย วิธีการสื่อสารแบบนี้ใช้พลังงานน้อยและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ในส่วนของกระบวนการประมวลผลข้อมูล โหนดโหนดจะทำหน้าที่อ่านข้อมูลจากตัวรับรู้ และจัดการข้อมูลตัวรับรู้ที่ได้รับการส่งมาจากโหนดอื่นด้วย ในการสั่งให้แอปพลิเคชันปฏิบัติงานบนโหนดโหนดนั้นเราไม่สามารถโหลดโปรแกรมลงบนโหนดได้ทีละตัว โปรแกรมจะถูกส่งไปสู่โหนด ในเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายในลักษณะเดียวกันกับการแพร่กระจายไวรัสคอมพิวเตอร์ในอินเทอร์เน็ต

นักวิจัยพัฒนาโหนดโหนดจากภาษาโปรแกรมเรียกว่าเนสซี (nesC) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการพัฒนางานเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายได้ด้วยเนสซี ถูกพัฒนาให้รองรับการเขียนโปรแกรมเชิงเหตุการณ์ (event driven) และแบบจำลองเชิงส่วนประกอบ (component-based model) ซึ่งช่วยให้พัฒนาโปรแกรมแบบที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (concurrent) และแบบที่มีการรวมกันของข้อมูล (data aggregation) ได้โดยง่าย การทำงานแบบนี้สามารถช่วยลดจำนวนการส่งข้อมูลซึ่งช่วยประหยัดพลังงานได้ด้วย ยกตัวอย่างเช่นในการหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิจากโหนดทุกตัว แอปพลิเคชันสามารถโปรแกรมให้โหนดคำนวณค่าเฉลี่ยหลังจากที่มันได้รับข้อมูลจากโหนดตัวอื่นและส่งเอาต์พุต ที่ได้ต่อให้โหนดตัวอื่นต่อไปจนกระทั่งถึงคอมพิวเตอร์ปลายทางที่จะแสดงผลสู่ผู้ใช้ วิธีการนี้จะใช้การส่งข้อมูลน้อยกว่าการส่งข้อมูลจากโหนดทุกตัวไปที่คอมพิวเตอร์ปลายทาง และคำนวณค่าเฉลี่ยที่นั่นในครั้งเดียว นอกจากนี้นักวิจัยที่ Intel และ UC Berkeley ยังได้พัฒนาระบบโหนดทีบี (TinyDB) ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถเรียกดูข้อมูลจากตัวรับรู้ โดยใช้ภาษาเอสคิวแอล เครื่องมือเหล่านี้ช่วยให้นักวิจัยทางด้านเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายทั่วโลกสามารถพัฒนางานของตนเองได้สะดวกและง่ายขึ้น

วิธีพาร์ทิเคิลฟิวเตอร์

วิธีพาร์ทิเคิลฟิวเตอร์ (particle filter method) (Gustafsson *et al.*, 2004) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาตำแหน่ง นำร่อง และติดตามการเคลื่อนที่ ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้กับโปรแกรมประยุกต์ทำงานแบบเรียลไทม์ (real time application program) ในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา หรือในระบบที่สัญญาณรบกวนไม่เป็นแบบเกาส์เซียน (non-gaussian noise) โดยการใส่แบบจำลองที่ไม่เป็นเส้นตรง (non-linear model) อีกทั้งยังเป็นที่ยอมรับนำมาใช้ในการระบุตำแหน่ง

แบบจำลองของการเคลื่อนที่นำไปประยุกต์หาค่าแห่ง นำร่อง และติดตามการเคลื่อนที่ที่จะนำมาใช้มีดังต่อไปนี้

$$x_{t+1} = Ax_t + B_u u_t + B_f f_t \quad (3)$$

เมื่อ x_t เป็นเวกเตอร์สถานะซึ่งเป็นตัวแทนของแบบจำลอง u_t คือค่าที่วัดได้ f_t คือค่าความผิดพลาด A คือเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของนิวตัน B_u คือเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของความเร่ง ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์ B_f คือเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของความเร่งซึ่งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์หรือสภาพแวดล้อมเข้ามามีส่วนในการทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน

ในการนำร่องและตามรอยการเคลื่อนที่ นั้นมีความเกี่ยวข้องกับตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ซึ่งจากกฎของนิวตัน $\dot{p}_t = v_t$ และ $\dot{v}_t = a_t$ จะได้ $p_t = p_0 + v_0 t + a_0 t^2 / 2$ โดย p_t คือระยะทางที่เวลา t v_t คือความเร็วที่เวลา t และ a_t คือความเร่งที่เวลา t สมมติให้ความเร็วที่ได้มาจากความเร่งที่ไม่ทราบค่า จะได้แบบจำลองของการเคลื่อนที่อย่างง่ายดังนี้

$$\begin{bmatrix} p_{t+1} \\ v_{t+1} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} I & T_s \cdot I \\ 0 & I \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} p_t \\ v_t \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} T_s^2 / 2 \cdot I \\ T_s \cdot I \end{bmatrix}}_{B_f} f_t \quad (4)$$

เมื่อ p คือตำแหน่งของตัวแทนของแบบจำลอง v คือความเร็วของตัวแทนแบบจำลอง T_s คือคาบของเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่าง f_t คือค่าความผิดพลาด

การนำวิธีพาร์ทิเคิลฟิวเตอร์ไปประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่ง

1. สร้างโมเดลโดยกำหนดจุด $x_t^i; i=1, \dots, N$ แทนเวกเตอร์สถานะ ซึ่งเวกเตอร์สถานะแต่ละตัวคือพาร์ทิเคิล การกำหนดจุดแต่ละจุดจะกำหนดแบบสุ่มลงบนพื้นที่หรือขอบเขตที่สนใจ

2. กำหนดค่าน้ำหนัก $w_t^i; i=1, \dots, N$ ให้กับพาร์ทิเคิลแต่ละตัวแบบมีความเป็นไปได้ (likelihood) โดยที่พาร์ทิเคิลที่อยู่ใกล้กับค่าที่วัดได้จะให้ค่าน้ำหนักมากและตัวที่ไกลจะให้ค่าน้ำหนักน้อยลดหลั่นกันไป และ นอร์มอลไลซ์ค่าน้ำหนักทั้งหมดโดย $w_t^i := w_t^i / \sum_i w_t^i$ จากนั้นประมาณค่าตำแหน่งจากสมการ

$$\hat{x} \approx \sum_{i=1}^N w_t^i x_t^i \quad (5)$$

3. สุ่มตัวอย่างสร้างโมเดลใหม่อีกครั้ง มี 2 แนวทางในการทำคือ

- เบเซน บูตสเตรป (bayesian bootstrap) สุ่มตัวอย่างสร้างโมเดลใหม่อีกครั้ง (แบบขั้นตอนที่ 1) โดยให้พาร์ทิเคิลแต่ละตัวมีค่าน้ำหนักเป็น $1/N$ ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่า สุ่มตัวอย่างให้ความสำคัญแล้วสุ่มตัวอย่างใหม่ (sampling importance re-sampling: SIR)

- สุ่มตัวอย่างให้ความสำคัญ (importance sampling) เลือกพาร์ทิเคิลออกมาทีละตัวสุ่มกับฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นสะสม (CDF) โดยถ้าสุ่มได้ตรงกับความหนาแน่นของความน่าจะเป็นสะสมของพาร์ทิเคิลใด ให้กำหนดพาร์ทิเคิลที่เลือกมาสุ่มมีค่าน้ำหนักและเวกเตอร์สถานะเท่ากับพาร์ทิเคิลที่สุ่มได้ ซึ่งจะทำวิธีนี้ก็ต่อเมื่อ

$$N_{eff} = \frac{1}{\sum_i (w_t^i)^2} < N_{th} \quad (6)$$

โดยที่ N_{th} มักกำหนดให้มีค่าเป็น $2N/3$

4. จำลองการเคลื่อนที่ จากค่าความผิดพลาด f_t โดยจำลองเวกเตอร์ความเร่งให้กับพาร์ทิเคิลแต่ละพาร์ทิเคิล ซึ่งจะสุ่มทั้งขนาดและทิศทางของเวกเตอร์ ผลของการจำลองหาได้จากสมการ

$$x_{t+1} = Ax_t + B_f f_t^i ; i = 1, \dots, N \quad (7)$$

5. เปลี่ยน $t := t + 1$ และทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งมีคำสั่งให้หยุด

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์
 - 1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ (Pentium(R) CPU 2.80 GHZ, RAM 1GB)
 - 1.2 บอร์ดอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สาย
 - 1.3 บอร์ดวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส
 - 1.4 สายอากาศแบบเปลี่ยนบีม
 - 1.5 มอดูลรับส่งสัญญาณ CC2420 (ภาคผนวก)
 - 1.6 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MSP430 (ภาคผนวก)
 - 1.7 บอร์ดควาน์โพลดิโปรแกรม JTAG
 - 1.8 สายโคแอกเชียล(Coaxial cable) ขั้วต่อ SMA

2. อุปกรณ์การวัด
 - 2.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (Signal Generator)
 - 2.2 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer)
 - 2.3 เครื่องวิเคราะห์วงจรเครือข่าย (Network Analyzer)
 - 2.4 เครื่องวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้า (Oscilloscope Analyzer)

3. โปรแกรมซอฟต์แวร์
 - 3.1 ระบบปฏิบัติการ Window XP
 - 3.2 ระบบปฏิบัติการ Tiny OS
 - 3.3 โปรแกรม Protel 99 se
 - 3.4 โปรแกรม Ensemble
 - 3.5 โปรแกรม TX line
 - 3.6 โปรแกรม NES-C

3.7 โปรแกรม IAR 3.42

3.8 โปรแกรม Visual Studio 2008

วิธีการ

ขั้นตอนการออกแบบพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สายเพื่อการระบุตำแหน่งด้วย
สายอากาศแบบเปลี่ยนบีม แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน

1. ขั้นตอนการจำลองการทำงาน เพื่อนำไปสู่การออกแบบที่เหมาะสม
2. ขั้นตอนการสร้างและออกแบบตามการจำลอง
3. ขั้นตอนการทดสอบ

1. ขั้นตอนการจำลองการทำงาน เพื่อนำไปสู่การออกแบบที่เหมาะสม

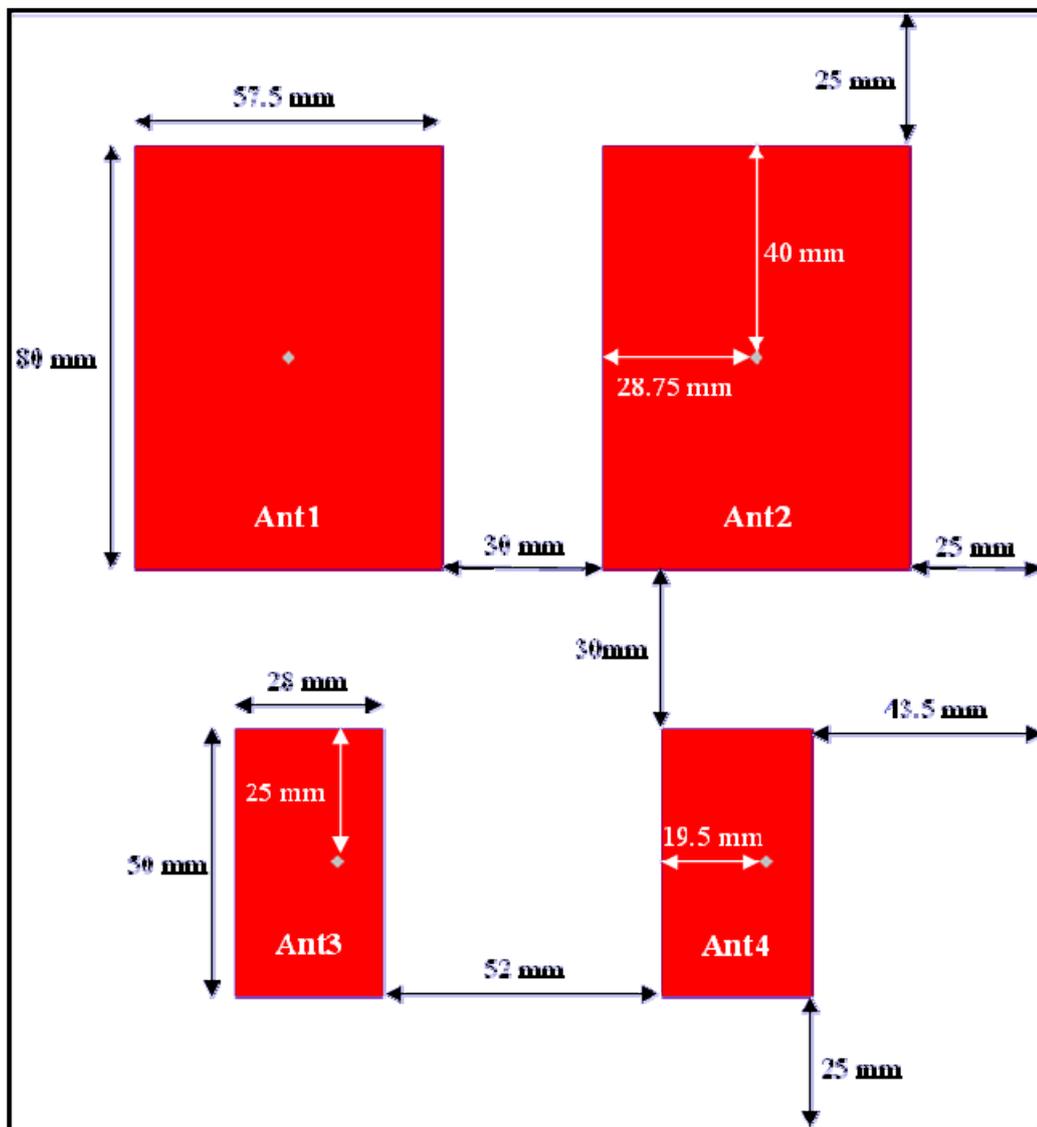
การจำลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ
แบบเปลี่ยนบีม และการจำลองการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม

1.1 การจำลองสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม

ในของส่วนสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมได้กำหนดให้ทำงานในช่วงความถี่ 2.4-2.5
จิกะเฮิร์ต (Worasawate *et al.*, 2008) ทำจากแผ่นทองแดงชนิด FR4 หนา 1.52 มิลลิเมตร โดยออกแบบ
สายอากาศแบบเปลี่ยนบีมให้มีสายอากาศแบบระนาบ 4 อันอยู่ในแผ่นเดียวกัน เพื่อให้สะดวกต่อ
การติดตั้งและนำไปใช้งาน โดยมีระนาบ Ant1, Ant2, Ant3 และ Ant4 ซึ่ง Ant1 และ Ant2 จะมีขนาด
ความกว้าง 57.5 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร จุดป้อนสัญญาณจะอยู่ที่กึ่งกลางของระนาบ Ant1
และ Ant2 โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม และที่ Ant3 และ Ant4 จะมีขนาดความกว้าง 28 มิลลิเมตร
ความยาว 50 มิลลิเมตร จุดป้อนสัญญาณจะอยู่ที่ระยะ 19.5 มิลลิเมตร จากด้านซ้ายของระนาบ Ant3
และ Ant4 ที่ระยะ 25 มิลลิเมตรจากด้านล่างของระนาบ Ant3 และ Ant4 ดังภาพที่ 6

ซึ่งสายอากาศแบบปรับเฟส การปรับเฟสจะใช้วิธีการปรับเฟสโดยอาศัยวงจรถอเล็กทรอนิกส์
ซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อปรับเฟสให้มีผลทำให้ทิศทาง
การแพร่กระจายคลื่นสามารถกวาดไปยังตำแหน่งต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสายอากาศจะถูก

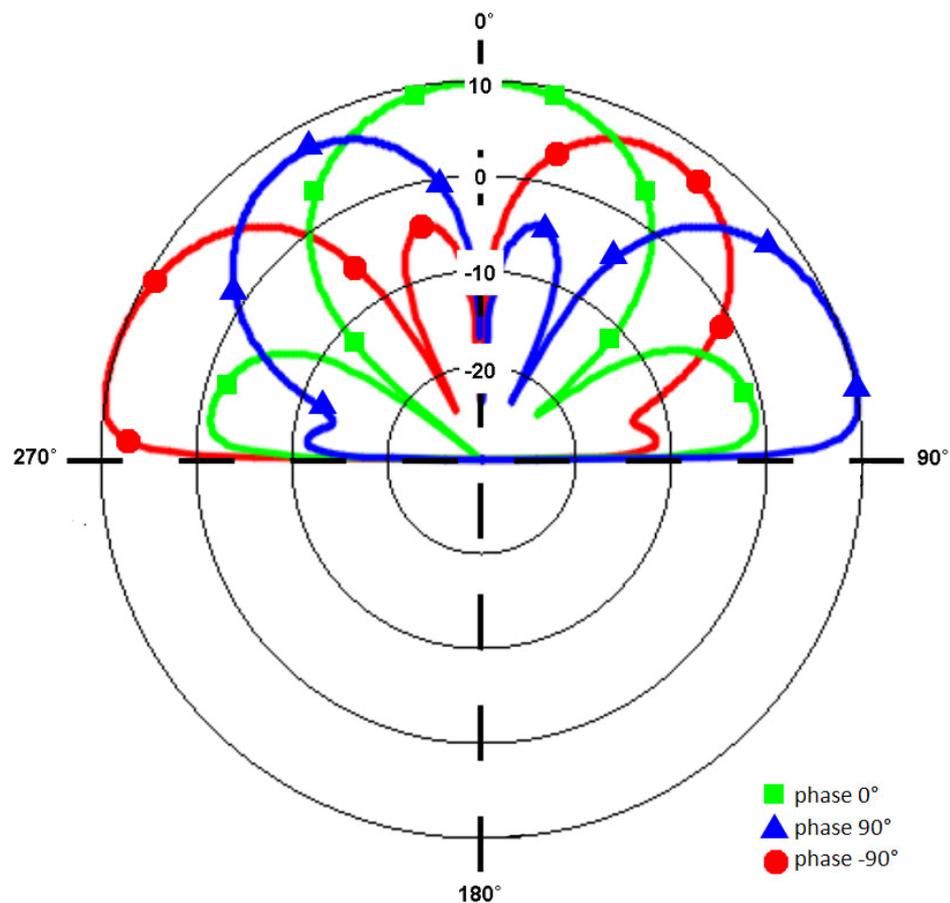
ออกแบบให้มีทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสูงสุด มีทิศทางตั้งฉากหรือเกือบจะตั้งฉากกับเส้นหรือระนาบ เรียกเฉพาะว่า แถวลำดับแบบบรอดไซด์ (Broadside Array)



ภาพที่ 6 โครงสร้างของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม

ทำการจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมที่จะนำไปใช้ในการระบุตำแหน่ง โดยใช้โปรแกรมจำลองรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า Ensemble Ansoft จำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมได้ ดังภาพที่ 7 โดยที่เฟส 0 องศาจะเกิดขึ้นเมื่อระนาบ Ant3 และ Ant4 ทำงาน สัญญาณส่วนใหญ่จะมาในทิศทาง 0 องศา และมีอัตราขยายถึง 10 เดซิเบล ในขณะที่เฟส 90 องศาจะเกิดขึ้นเมื่อระนาบ Ant1 และ Ant2 ทำงาน มีอัตราขยาย

สูงสุดในทิศทาง 80 องศา ถึง 10 เดซิเบล ในขณะที่เฟส -90 องศาจะเกิดขึ้นเมื่อระนาบ Ant1 และ Ant2 ทำงาน มีอัตราขยายสูงสุดในทิศทาง -80 องศา ถึง 10 เดซิเบล



ภาพที่ 7 แบบจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม

ที่มา: เคนชัย (2007)

1.2 จำลองการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม

การจำลองการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะใช้โปรแกรม Visual Studio 2008 ในการจำลองการระบุตำแหน่ง (Kasetkasem *et al.*, 2008) ซึ่งการระบุตำแหน่งจะใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้จากสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมมาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้วิธีพาร์ทิเคิลฟิวเตอร์มาระบุตำแหน่ง ค่าความแรงสัญญาณในสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมโดยในแต่ละ

บีมจะมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแตกต่างจากค่าความแรงสัญญาณในสายอากาศแบบรอบตัวในสมการที่ (1) ดังสมการ

$$RSS_{ij}(\theta_i) = RSS_0 + 10n \log\left(\frac{d_i}{d_0}\right) + N + G_j(\theta_i) \quad (8)$$

เมื่อ RSS_{ij} คือค่าประมาณความแรงของสัญญาณระหว่างตัวส่งกับตัวรับที่ i และ j เปลี่ยนตามทิศทางบีมของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม θ_i คือมุมที่ตัวส่งทำกับสายอากาศของตัวรับที่ตำแหน่ง 0 องศา d_i คือระยะทางระหว่างตัวส่งกับตัวรับที่ i d_0 คือระยะอ้างอิง RSS_0 คือค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่ระยะอ้างอิง n คือเลขชี้กำลังเส้นทางการสูญเสีย ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4 N เป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น σ^2 และ $G_j(\theta_i)$ คืออัตราขยายของมุม θ_i ที่บีม j กำหนดให้ $RM_p^{t_k}$ คือค่าความแรงสัญญาณที่ตัวรับที่ p รับที่เวลา t_k $RM^{t_k} = [RM_1^{t_k} \ RM_2^{t_k} \ \dots \ RM_p^{t_k}]$ คือเวกเตอร์ของค่าความแรงสัญญาณที่เวลา t_k โดย p คือจำนวนตัวรับทั้งหมด $RM^{t_0:t_k} = [RM^{t_0} \ RM^{t_1} \ \dots \ RM^{t_k}]$ คือเวกเตอร์ของค่าความแรงสัญญาณจากเวลา t_0 ถึง t_k และ $u_b^{t_k}$ คือตำแหน่งของตัวส่งที่เวลา t_k

ขั้นตอนการระบุตำแหน่งโดยใช้วิธีพาร์ทิเคิลฟิวเตอร์ ดังนี้

1. เอาตัวพาร์ทิเคิล m ตัว การกำหนดจุดแต่ละจุดจะกำหนดแบบสุ่มลงบนแผนที่
2. หลังจากได้รับ RM^{t_k} จากนั้นหาค่า CDPF $p(u_b^{t_k} | RM^{t_0:t_k})$ จากสมการ

$$w_b^{t_k} = p(u_b^{t_k} | RM^{t_0:t_k}) = \frac{p(RM_{t_k} | u_b^{t_k})p(u_b^{t_k} | RM^{t_0:t_{k-1}})}{c^{t_k}} \quad (9)$$

ถ้า $k=0$ ให้ $p(u_b^{t_k} | RM^{t_0:t_{k-1}})$ เท่ากับ 1

3. ทำการนอร์มอลไลซ์ $p(u_b^{t_k} | RM^{t_0:t_k})$ ซึ่งความน่าจะเป็นเท่ากับ 1 หรือ

$$\sum_{b=1}^m w_b^{t_k} = 1$$

4. ทำการคำนวณประมาณค่าหาตำแหน่งจากสมการ

$$u_b^{opt,t_k} = E[u_b^{t_k} | RM^{t_0}, \dots, RM^{t_k}] = \sum_{b=1}^m u_b^{t_k} w_b^{t_k} \quad (10)$$

5. ทำการสุ่มตัวอย่างพาร์ทิเคิล และสร้างพาร์ทิเคิลตัวใหม่

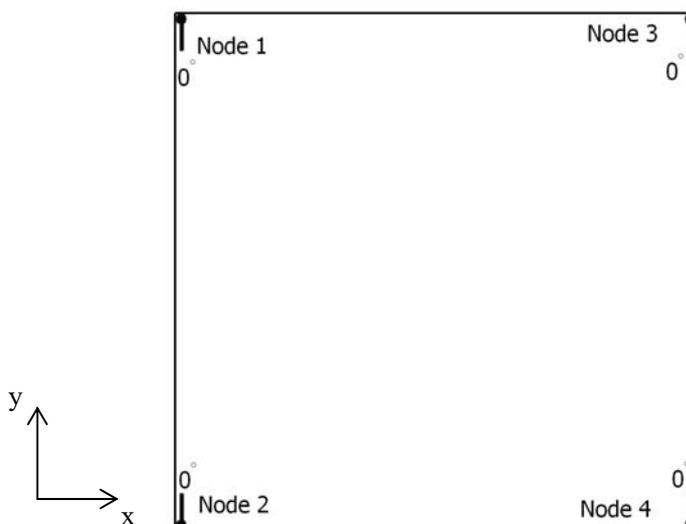
6. ทำการเคลื่อนที่พาร์ทิเคิลตัวใหม่ให้เป็นไปตามรูปแบบสมการ

$$p(u_b^{t_k} | u_b^{t_{k-1}}) \approx N(0, \sigma_x^2) \quad (11)$$

โดยที่ σ_x คือค่าที่ยอมให้การระบุตำแหน่งคลาดเคลื่อน กลับไปที่ขั้นตอนที่ 2

ให้การจำลองเราจะจำลองการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมและสายอากาศแบบรอบตัวโดยสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5×5 ตัวส่งถูกวางกระจายตัวอย่างเท่ากันในพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส การสื่อสารระหว่างตัวส่งและตัวรับสมมติให้เป็นการเคลื่อนแบบลือกนอร์มอลโดยในสมการที่ 1 สำหรับสายอากาศแบบรอบตัว และสมการที่ 8 สำหรับสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมเลขชี้กำลังเส้นทางการสูญเสียให้เท่ากับ 3 ($n = 3$) เนื่องจากเป็นค่ากึ่งกลางระหว่าง 2 กับ 4 ระยะอ้างอิงให้เป็น 1 ($d_0 = 1$) และ ค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่ระยะอ้างอิงให้เป็น -30 เดซิเบล ($RSS_0 = -30$)

ในการจำลองสองส่วนแรกเราจะใช้ ตัวรับ 4 ตัว โดยจะให้ป็น Node 1, Node 2, Node 3, และ Node 4 ซึ่งตัวรับทั้ง 4 ตัวนี้จะถูกวางไว้บนพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส (0.05, 0.05), (0.05, 4.95), (4.95, 4.95) และ (4.95, 0.05) โดยที่มุม 0 องศาของ Node2 และ Node4 อยู่ทิศทาง +y และที่มุม 0 องศาของ Node1 และ Node3 อยู่ทิศทาง -y ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ตำแหน่งของตัวรับ และกำหนดมุม 0 องศา

การจำลองส่วนแรกกำหนดค่าเป็น ค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่ระยะอ้างอิงให้เป็น -30 dBm ระยะอ้างอิงให้เป็น 1 เลขชี้กำลังเส้นทางการสูญเสียให้เท่ากับ 3 และจำนวนตัวรับ 4 ตัว วางที่ตำแหน่งมุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยจะเปลี่ยนค่าความแปรปรวนตั้งแต่ 0.1 ถึง 40 ทำการจำลองซ้ำกัน 100 ครั้ง โดยจะวัดอัตราความผิดพลาดผ่านค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

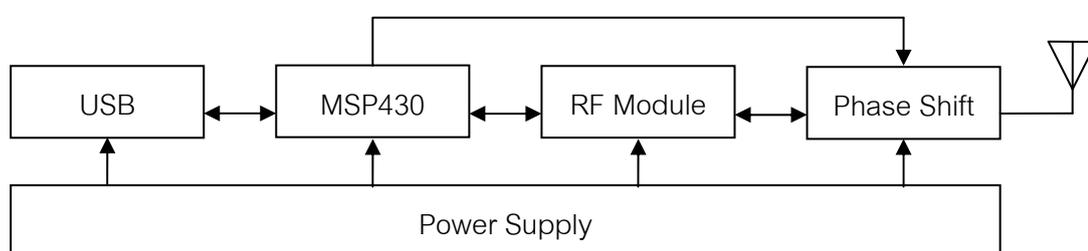
การจำลองส่วนสองกำหนดค่าเป็น ค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่ระยะอ้างอิงให้เป็น -30 dBm ระยะอ้างอิงให้เป็น 1 ค่าความแปรปรวนมีค่าเท่ากับ 5 จำนวนตัวรับ 4 ตัว วางที่ตำแหน่งมุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส กำหนดให้ค่าเลขชี้กำลังเส้นทางการสูญเสียให้เท่ากับ 3 การจำลองส่วนนี้จะแสดงถึงความคงทนของวิธีการที่พัฒนาขึ้น โดยสมมติให้ระบบระบุตำแหน่งประมาณค่าเลขชี้กำลังเส้นทางการสูญเสียอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4 ทำการจำลองซ้ำกัน 100 ครั้ง และวัดอัตราการผิดพลาด

การจำลองส่วนสามจะจำลองผลกระทบของปริมาณตัวรับรู้ต่อประสิทธิภาพ โดยกำหนดค่าเป็น ค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่ระยะอ้างอิงให้เป็น -30 dBm ระยะอ้างอิงให้เป็น 1 เลขชี้กำลังเส้นทางการสูญเสียให้เท่ากับ 3 ค่าความแปรปรวนมีค่าเท่ากับ 5 โดยจะเปลี่ยนจำนวนตัวรับตั้งแต่ 3 ถึง 20 ตัว โดยวางตำแหน่งแบบสุ่ม และทิศทางแบบสุ่ม ทำการจำลองซ้ำกัน 100 ครั้ง และวัดอัตราการผิดพลาด

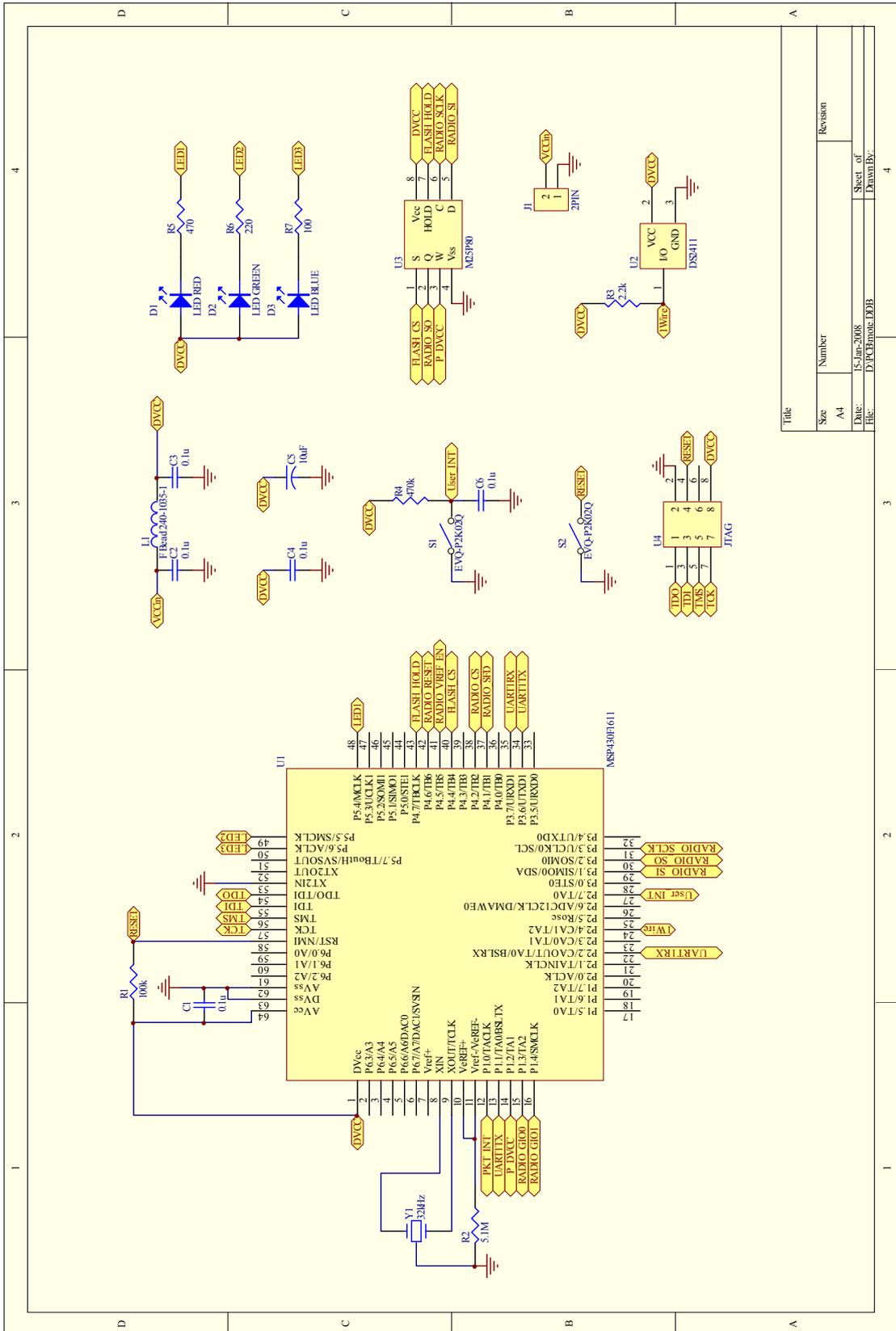
2. ขั้นตอนการสร้างและออกแบบตามการจำลอง

ในการสร้างและออกแบบจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ MSP430 ส่วนมอดูลรับส่งสัญญาณ (RF module) ส่วนยูเอสบี (universal serial bus: USB) ส่วนวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส (phase shift) ส่วนสายอากาศแบบเปลี่ยนนิม ดังภาพที่ 9

ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ MSP430 ส่วนมอดูลรับส่งสัญญาณ และส่วนยูเอสบี ได้ใช้โมทแบบ Telosb เป็นแบบอ้างอิง (Moteiv Corporation, 2005) เนื่องจากออกแบบมาโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ MSP430 ซึ่งประหยัดพลังงาน ภาพที่ 10 แสดงภาพวงจรในส่วนของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ MSP430 และมอดูลรับส่งสัญญาณมาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดยจะใช้มอดูลสำเร็จรูป CC2420 ซึ่งทำงานที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรต์เป็นคลื่นความถี่สาธารณะ (ISM band) ตามแผนภาพวงจรในภาพที่ 11 โดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางวงจรที่เปลี่ยนสัญญาณยูเอสบีเป็นสัญญาณ RS232 ตามวงจรในภาพที่ 12 ระบบปฏิบัติการที่ใช้ในการควบคุมวงจรนี้คือระบบปฏิบัติการไทนี่โอเอส ซึ่งพัฒนามาจากบริษัท Intel และ UCB โดยภาษาที่ใช้เขียนคือเนสซี

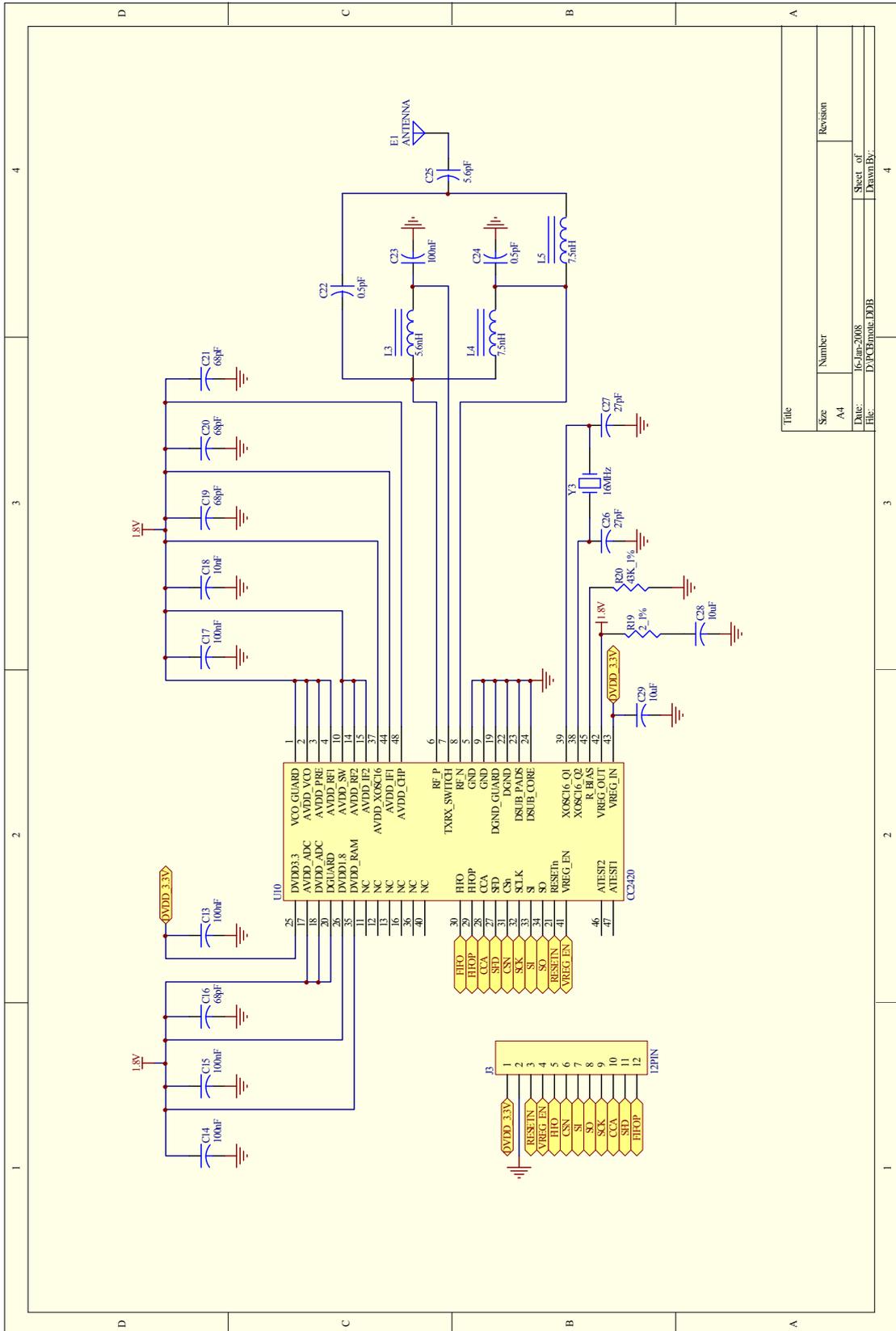


ภาพที่ 9 โครงสร้างในส่วนฮาร์ดแวร์



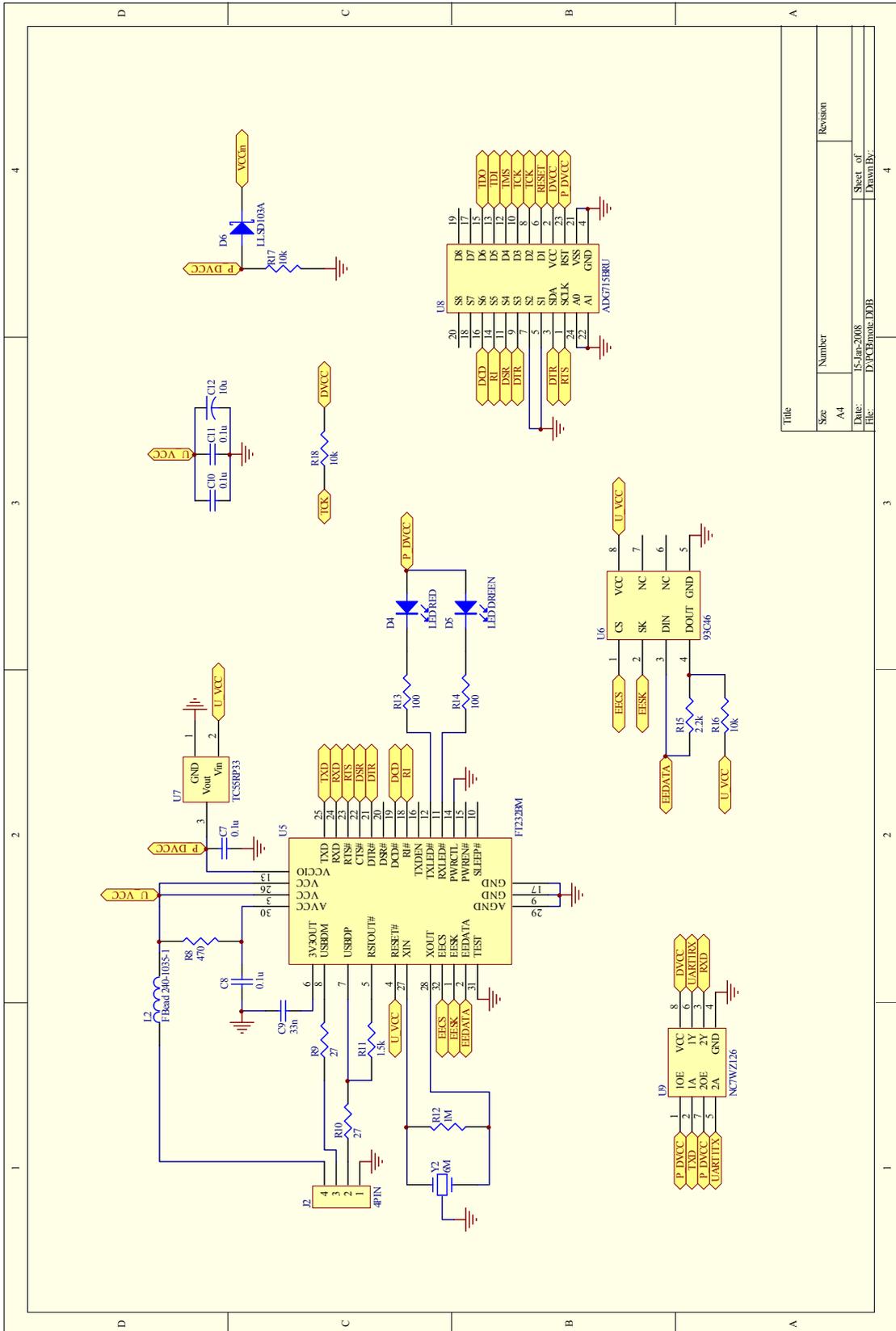
Title		Revision	
Size	A4	Number	
Date	15-Jan-2008	Sheet of	4
File	D:\PC\Broke.LDB	Drawn By	

ภาพที่ 10 โครงสร้างวงจรส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์



Title	
Size	Number
A4	Revision
Date	Sheet of
File: D:\PC\Bomote.LDDB	Drawn By: 4
16-Jan-2008	

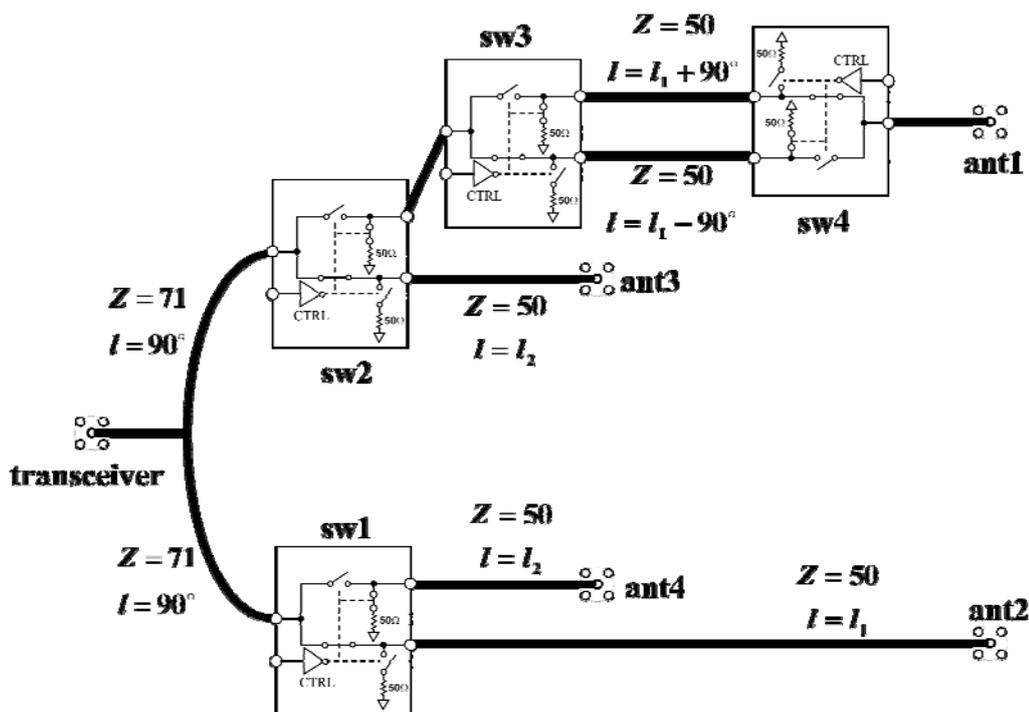
ภาพที่ 11 โครงสร้างวงจรส่วนมอดูลรับส่งสัญญาณ



ภาพที่ 12 โครงสร้างวงจรส่วนยูเอสบี

Title	
Size	Number
A4	
Date	Revision
15-Jan-2008	
File:	Sheet of
D:\PC\Broke\JDB	Drawn By:
	4

เนื่องจากวงจรนี้ใช้สายอากาศแบบเปลี่ยนบีมได้ จึงมีความจำเป็นจะต้องออกแบบวงจรเปลี่ยนบีมโดยสายอากาศตามภาพที่ 6 ดังนั้นจึงนำเอาวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟสที่ได้จากการคำนวณหาขนาดของลายทองแดงโดยใช้โปรแกรม TX Line โดยวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟสทำจากแผ่นทองแดงชนิด FR4 หนา 1.52 มิลลิเมตร ในส่วนนี้จะทำให้บีมของสายอากาศเปลี่ยนทิศทาง โดยจะเปลี่ยนทิศทางบีมของสายอากาศ 3 ทิศทาง ด้านหน้าที่เฟส 0 องศา ด้านขวาที่เฟส 90 องศา และ ด้านซ้ายที่เฟส -90 องศา ซึ่งจะเปลี่ยนเฟสของสายอากาศโดยใช้ ADG918 แอนะล็อกสวิตช์ (analog switch) ในการควบคุมการเปลี่ยนเฟสของสายอากาศ ซึ่ง ADG918แอนะล็อกสวิตช์เป็นสวิตช์แถบความถี่กว้าง (wideband) 4 จิกะเฮิรต์ ใช้แรงดันไฟฟ้า 1.65-2.75 โวลต์ ใช้พลังงานต่ำกินกระแสไม่น้อยกว่า 1 ไมโครแอมป์ โดยใช้แอนะล็อกสวิตช์ทั้งหมด 4 ตัว ซึ่งจะควบคุมการทำงานของแอนะล็อกสวิตช์ที่ขา CTRL ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 โครงสร้างในส่วนวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส

ถ้าต้องการบีมไปด้านหน้า sw1 ต้องเลือกไปที่ ant4 และ sw2 ต้องเลือกไปที่ ant3 ถ้าต้องการให้บีมไปด้านขวาหรือด้านซ้าย sw1 ต้องเลือกไปที่ ant4 และ sw2 ต้องเลือกไปที่ sw3 ถ้าต้องการให้บีมไปด้านขวา sw3 และ sw4 ต้องเลือกสายส่งที่มีความยาวเป็น $I_1 + 90^\circ$ ถ้าต้องการให้บีมไปทางด้าน

ซ้าย sw3 และ sw4 ต้องเลือกสายส่งที่มีความยาวเป็น $l_1 - 90^\circ$ การควบคุมบีมเป็นไป ดังตารางที่ 1 ซึ่งสรุปวิธีการควบคุมสายอากาศเปปบเปลี่ยนบีมตามที่ได้อธิบายไว้ข้างบน

ตารางที่ 1 การควบคุมการเปลี่ยนเฟสของวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส

	sw 1	sw 2	sw 3	sw 4
เฟส 0 องศา	1	0	-	-
เฟส 90 องศา	0	1	0	1
เฟส -90 องศา	0	1	1	0

ในการออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ในแต่ละส่วน จะออกแบบโดยโปรแกรมออกแบบวงจรลายพิมพ์ Protel 99 SE เพื่อลดขนาดของวงจรถ่ายสำหรับประกอบเป็นอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สาย

3. ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การทดสอบวงจรมิโครสตริปเปลี่ยนเฟส การทดสอบสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม และการทดสอบการระบุตำแหน่งจริง

3.1 ทดสอบวงจรมิโครสตริปเปลี่ยนเฟส

ทำการป้อนสัญญาณความถี่ 2.45 จิกะเฮิรต์ ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ให้กับวงจรมิโครสตริปเปลี่ยนเฟส และตรวจสอบสัญญาณจากวงจรมิโครสตริปเปลี่ยนเฟสด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม และควบคุมการเปลี่ยนเฟสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตรวจสอบสัญญาณว่าเป็นไปตาม ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการทำงานของแอนะล็อกสวิตช์ในวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส

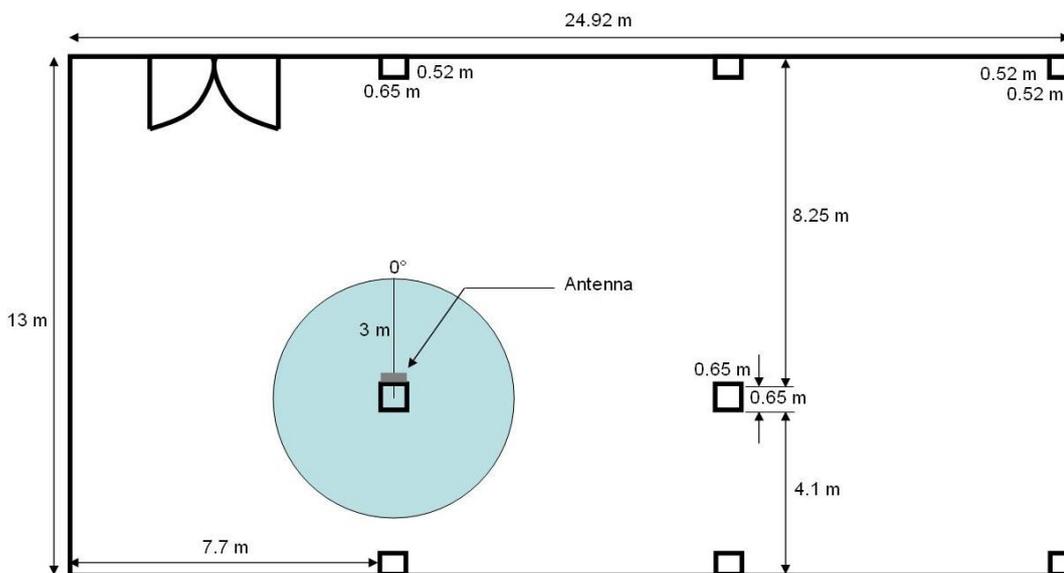
	Ant1	Ant2	Ant3	Ant4
Phase 0°	ไม่ทำงาน	ไม่ทำงาน	ทำงาน	ทำงาน
Phase 90°	ทำงาน	ทำงาน	ไม่ทำงาน	ไม่ทำงาน
Phase -90°	ทำงาน	ทำงาน	ไม่ทำงาน	ไม่ทำงาน

จากนั้นทำการวัดเฟสโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรเครือข่าย ซึ่งจะวัดทั้งขนาดและเฟสของสัญญาณ และควบคุมการเปลี่ยนเฟสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตรวจสอบว่าที่เฟส 0 องศา บีมด้านหน้า Ant3 และ Ant4 มีเฟสต่างกัน 0 องศา หรือไม่ ที่เฟส 90 องศา บีมด้านขวา Ant1 มีเฟสมากกว่า Ant2 อยู่ 90 องศา หรือไม่ และที่เฟส -90 องศา บีมด้านซ้าย Ant1 มีเฟสน้อยกว่า Ant2 อยู่ 90 องศา หรือไม่

3.2 ทดสอบสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม

ทำการวัดความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม โดยจะทำการวัดความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับโดยเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรเครือข่าย โดยทำการวัดที่ Ant1, Ant2, Ant3 และ Ant4

ทำการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมภายในห้องการติดตั้งอุปกรณ์จะมีอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนรับ และส่วนส่ง โดยส่วนรับจะติดตั้งที่เสาภายในห้องประกอบไปด้วย เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม วงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส สายอากาศไมโครสตริปไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนส่ง ประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ สายอากาศไดโพล โดยทำการวัดทุกๆ 10 องศา ภาพที่ 14 แสดงรูปแบบการวัดภายในห้องและแผนภาพห้อง



ภาพที่ 14 ห้องที่ใช้วัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม

3.3 ทดสอบการระบุตำแหน่งจริง

ใช้โปรแกรม Visual Studio 2008 ในการทดสอบโดยวิธีการคำนวณระบุตำแหน่งจะใช้วิธีการคำนวณเหมือนในขั้นตอนการจำลองการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมและสายอากาศแบบรอบตัว โดยสายอากาศแบบรอบตัวจะเป็น สายอากาศแบบโมโนโพล $\lambda/4$ ดังภาพที่ 15 ซึ่งมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเป็นวงกลม และมีคุณสมบัติ ดังตารางที่ 3



ภาพที่ 15 สายอากาศแบบโมโนโพล $\lambda/4$

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของสายอากาศแบบโมนโพล $\lambda/4$

Central frequency	2.4-2.5 GHz
Bandwidth	310 MHz
Impedance	50 Ω
Polarization	Linear
Efficiency (Typ)	65%
VSWR	<1.5:1
Antenna Type	Swivel
Size	20×19.5×62.5 mm
Weight	7.5 g

โดยการทดสอบการระบุตำแหน่งจริงจะกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 4 ซึ่งเป็นค่าตัวแปรที่ทำให้การระบุตำแหน่งดีที่สุดโดยทำการทดสอบที่จำนวนพาร์ทิเคิล 50, 100, 150, 200, 250, 300 ตัว ทำการทดสอบการระบุตำแหน่งในห้องกว้าง 8 เมตร ยาว 8 เมตร โดยใช้ตัวรับ 4 ตัว ซึ่งวางอยู่ที่ตำแหน่งมุมของห้อง โดยแบ่งจุดที่พิจารณาออกเป็น 9 จุด ดังภาพที่ 16

ตารางที่ 4 ค่าตัวแปรที่ดีที่สุดในการทดสอบการระบุตำแหน่งจริง

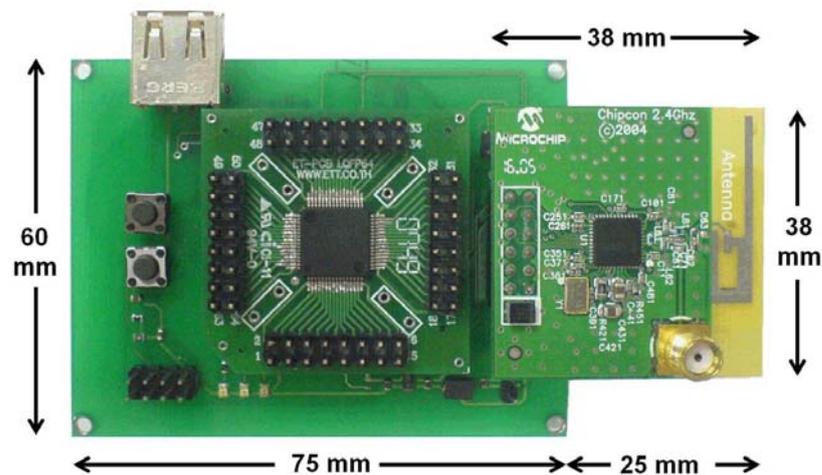
สายอากาศ	RSS_0 (dBm)	n	σ	d_0
แบบเปลี่ยนบีม	-75	2.05	2	39
แบบรอบตัว	-60	2.05	2	62

ผลและวิจารณ์

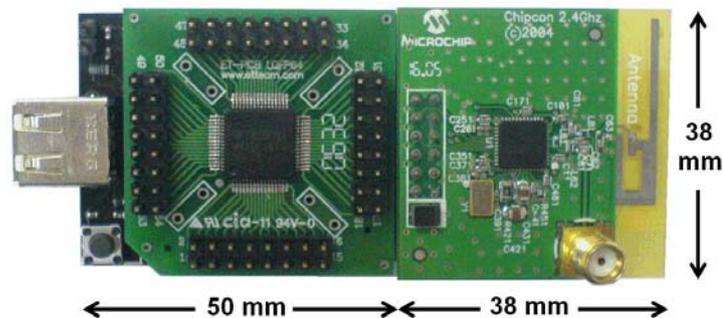
ผล

1. อุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สาย

อุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สายถูกออกแบบให้เหมาะสมและยืดหยุ่นเพื่อใช้ในงานต่างๆ อีกทั้งออกแบบให้สามารถนำมาประยุกต์และพัฒนาต่อได้ง่ายซึ่งได้ทำการออกแบบ 2 รุ่น คือต้นแบบอุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สาย ดังภาพที่ 17 และอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายขนาดเล็ก ดังภาพที่ 18



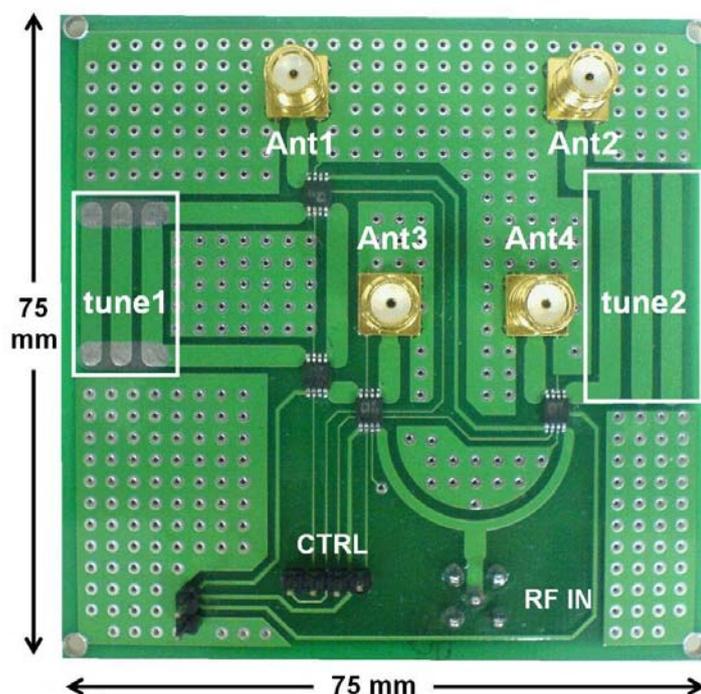
ภาพที่ 17 ต้นแบบอุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สาย



ภาพที่ 18 อุปกรณ์ตัวรับรู้แบบไร้สายขนาดเล็ก

2. วงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส

บอร์ดวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส มีขา CTRL ที่ใช้สำหรับต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของแอนะล็อกสวิตช์ ที่เฟส 0 องศา สัญญาณเข้าทาง RF IN ออกทาง Ant3 กับ Ant4 ที่เฟส 90 องศา และ -90 องศา สัญญาณเข้าทาง RF IN ออกทาง Ant1 กับ Ant2 ที่ tune1 เอาไว้ปรับเฟสที่ Ant1 และ tune2 เอาไว้ปรับเฟสที่ Ant2 ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 บอร์ดวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส

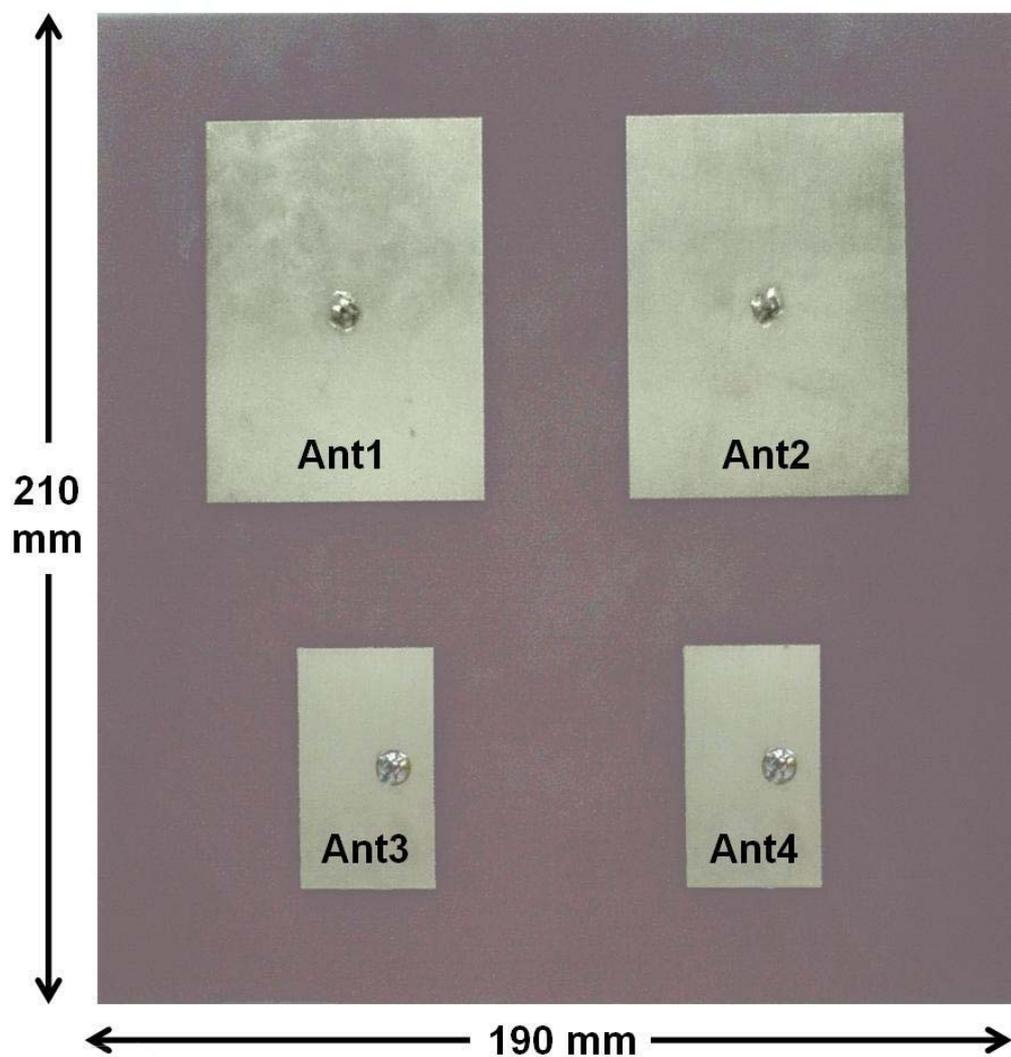
ตารางที่ 5 ผลการวัดขนาดและเฟสด้วยเครื่องมือ

	ขนาด	เฟส	ขนาด	เฟส
	Ant1-Ant2	Ant1-Ant2	Ant3-Ant4	Ant3-Ant4
	เดซิเบล	องศา	เดซิเบล	องศา
ด้านหน้า	-	-	-1.6	5
ด้านขวา	-0.5	120	-	-
ด้านซ้าย	-1	-80	-	-

จากตารางที่ 5 ประสิทธิภาพของวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส ซึ่งแอมพลิจูดของวงจรดี และเฟสของวงจรสมดุล ขนาดคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 2 เดซิเบล และเฟสคลาดเคลื่อนในด้านหน้า 5 องศา ด้านขวา 30 องศา ด้านซ้าย 10 องศา

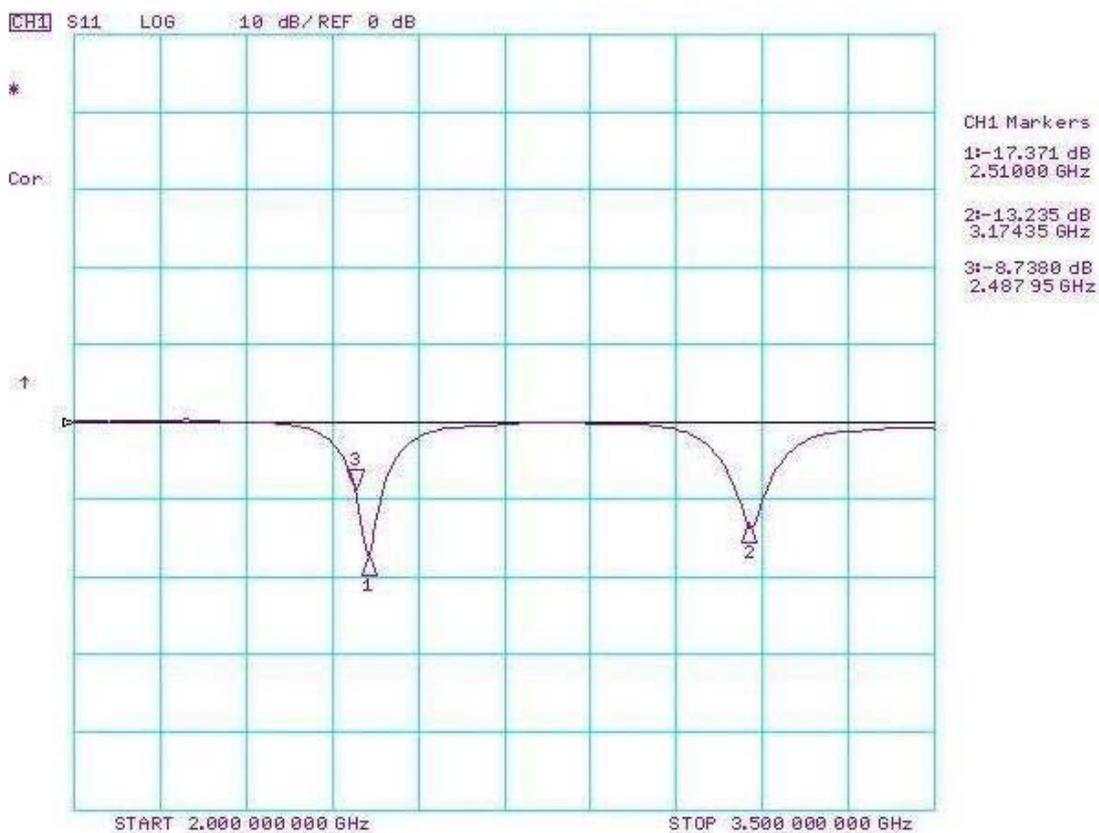
3. สายอากาศ

จะแสดงถึงตัวสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมที่จะใช้ในการระบุตำแหน่งจะประกอบด้วย สายอากาศแบบระนาบ 4 อันอยู่บนแผ่นเดียวกัน โดยต้องใช้ร่วมกับวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟส จึงจะสามารถเปลี่ยนทิศทางบีมของสายอากาศได้ ดังภาพที่ 20



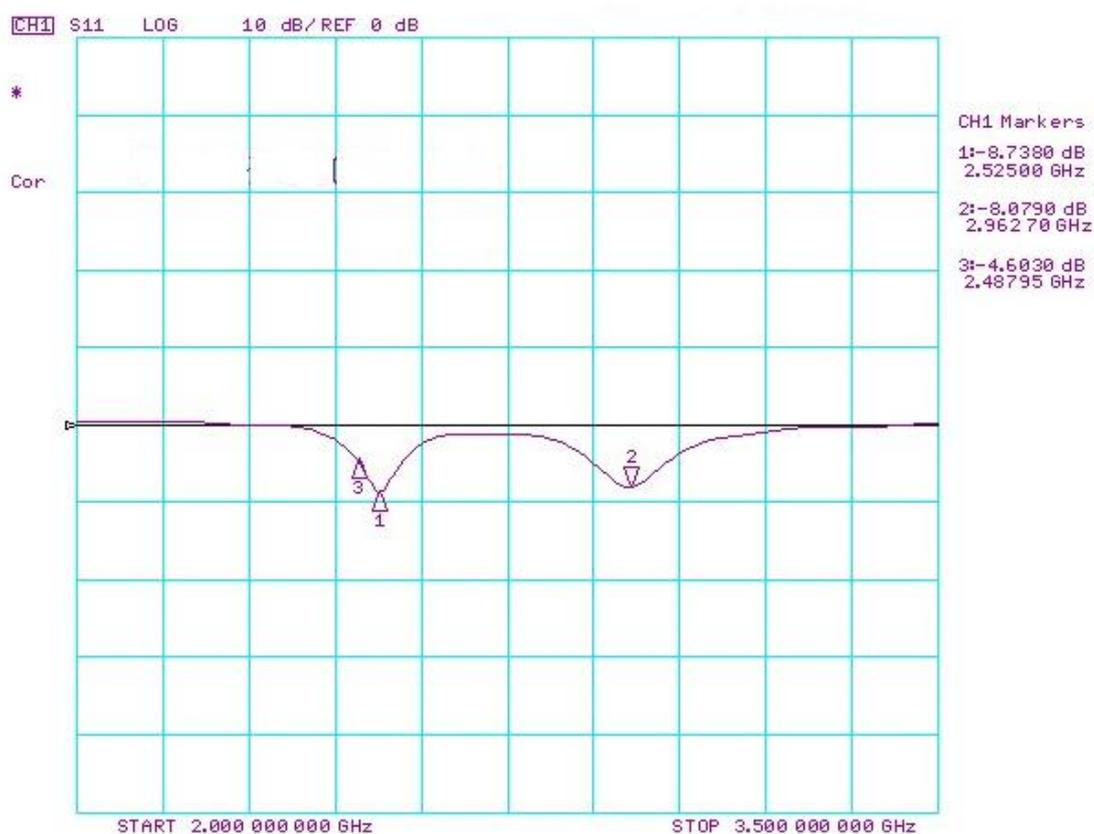
ภาพที่ 20 สายอากาศแบบเปลี่ยนบีม

ผลการวัดความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะแสดงให้เห็นว่าสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมทำงานได้ 2 ความถี่ ซึ่งจะทำงานดีที่ความถี่ประมาณ 2.5 จิกะเฮิรต์ โดยค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของ Ant1 และ Ant2 จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ -17.371 เดซิเบล ที่ความถี่ 2.51 จิกะเฮิรต์ และ -13.235 เดซิเบลที่ความถี่ 3.17435 จิกะเฮิรต์ ดังภาพที่ 21



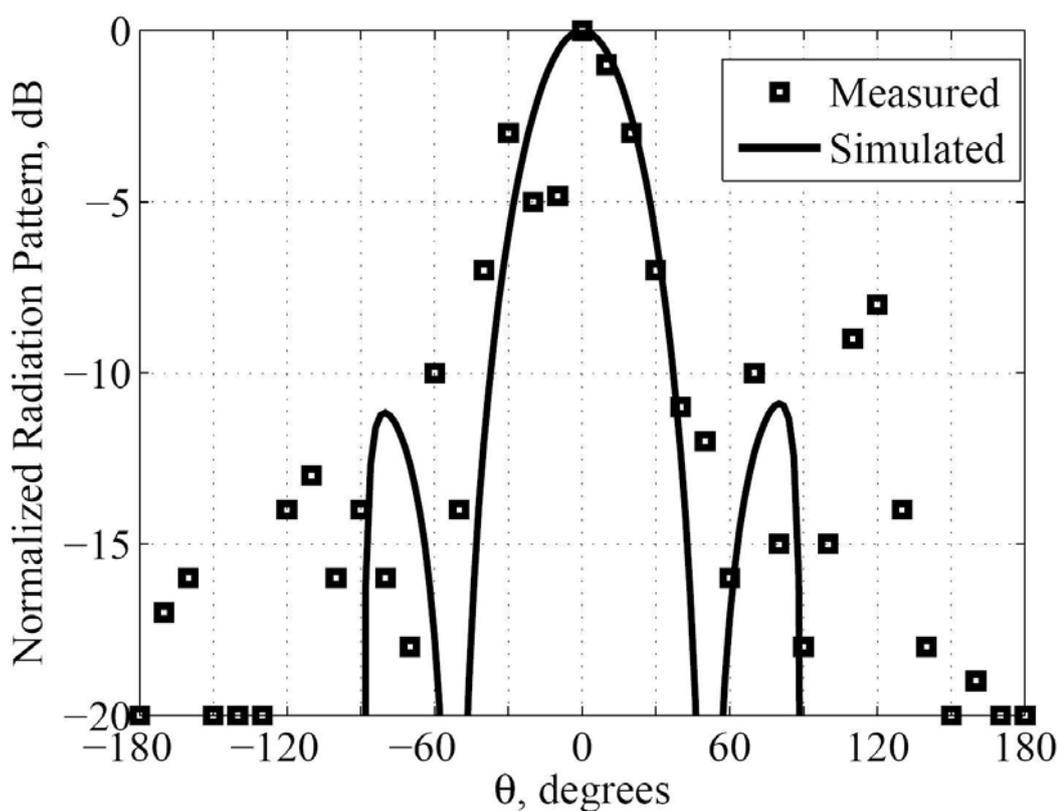
ภาพที่ 21 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ Ant1 และ Ant2

ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของ Ant3 และ Ant4 จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ -8.738 เดซิเบล ที่ความถี่ 2.525 จิกะเฮิรต์ และ -8.079 เดซิเบล ที่ความถี่ 2.9627 จิกะเฮิรต์ ดังภาพที่ 22



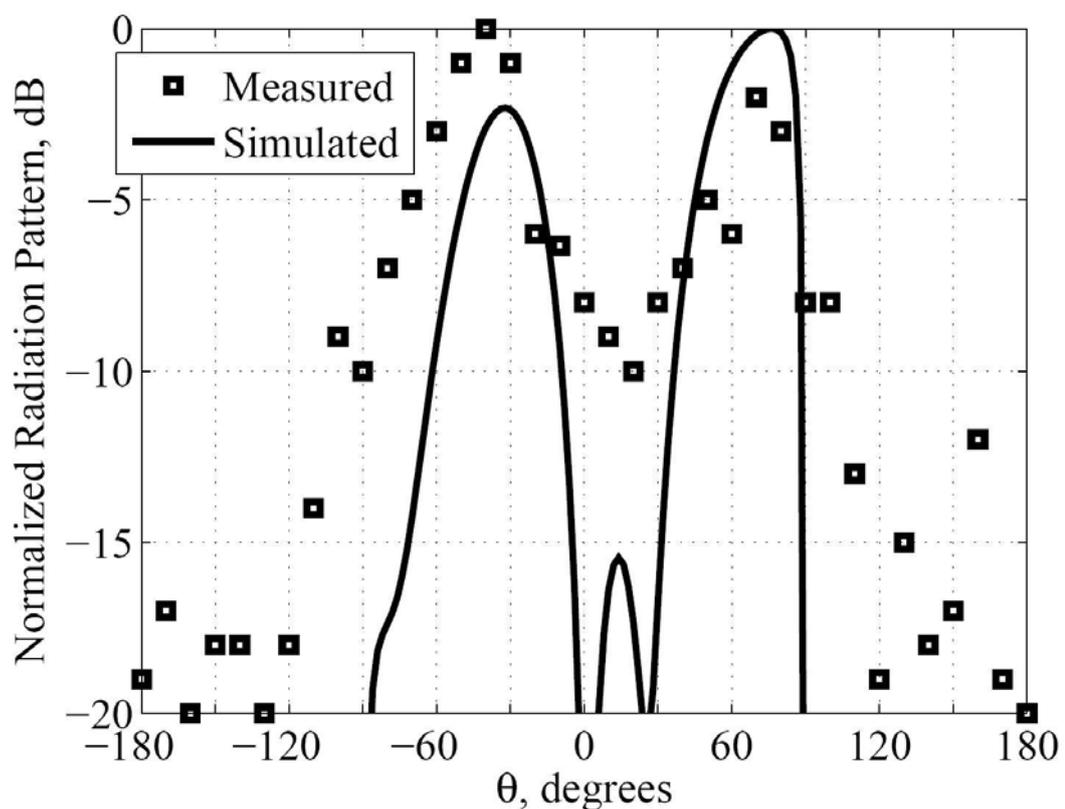
ภาพที่ 22 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ Ant3 และ Ant4

ผลระหว่างของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเปลี่ยนบีมจากการจำลองและจากการวัดจริงในห้องที่ระยะ 3 เมตร จากสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมมีดังนี้คือ โดยทิศทางด้านหน้าจะมีค่าสูงสุดที่ 0 องศา ทั้งจากการจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมและจากการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมภายในห้อง ดังภาพที่ 23 จากการจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบบีมด้านหน้า แตกต่างจากผลที่วัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบบีมด้านหน้า เนื่องจากแบบจำลองได้จำลองสถานที่ในภาวะอุดมคติ ซึ่งคลื่นความถี่ไม่มีการตกกระทบสะท้อน แต่จากการวัดได้ทำการวัดภายในห้องซึ่งมีคลื่นความถี่การตกกระทบและสะท้อนกับกำแพง ทำให้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองและการวัดมีรูปแบบที่แตกต่างกัน แต่ก็สามารถบ่งบอกทิศทางบีมของสายอากาศได้



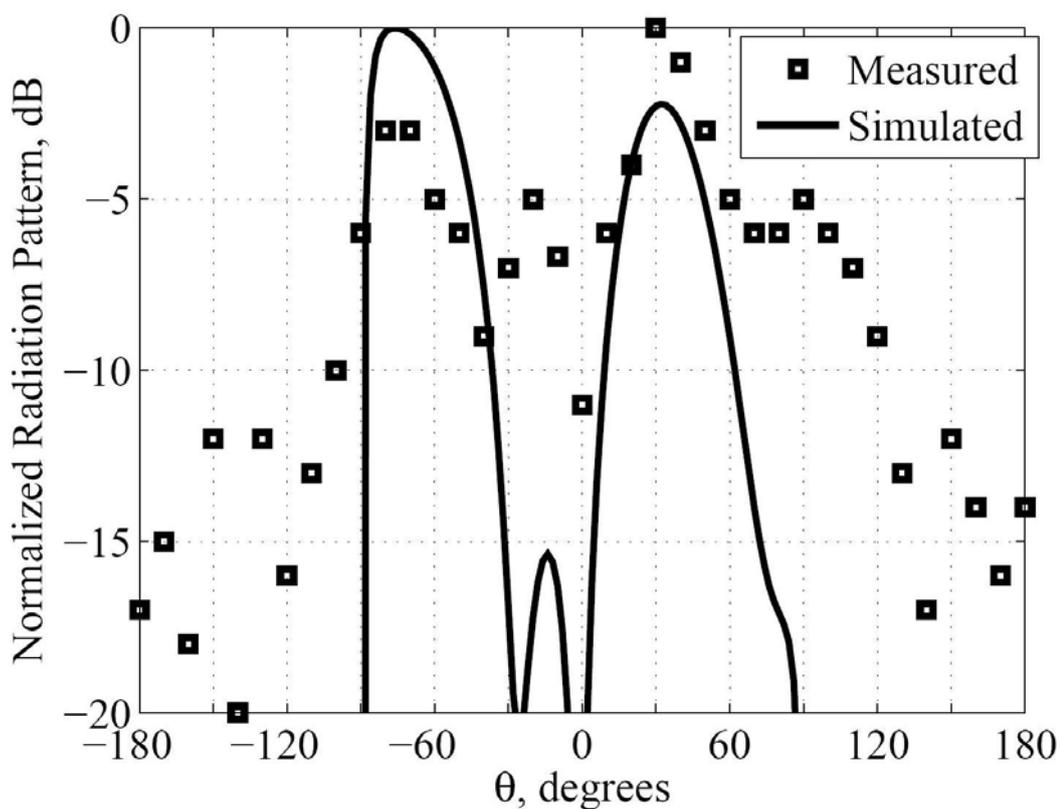
ภาพที่ 23 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมในทิศทางด้านหน้า

ทิศทางด้านขวามีค่าสูงสุดที่ 80 องศา จากการจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม และจะมีค่าสูงสุดที่ -40 และ 70 องศา จากการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมภายในห้อง ดังภาพที่ 24 จากการจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบบีมด้านขวา แตกต่างจากผลที่วัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบบีมด้านขวา เนื่องจากแบบจำลองได้จำลองสถานที่ในภาวะอุดมคติ ซึ่งคลื่นความถี่ไม่มีการตกกระทบสะท้อน แต่จากการวัดได้ทำการวัดภายในห้องซึ่งมีคลื่นความถี่การตกกระทบและสะท้อนกับกำแพง ทำให้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองและการวัดมีรูปแบบที่แตกต่างกัน แต่ก็สามารถบ่งบอกทิศทางบีมของสายอากาศได้



ภาพที่ 24 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมในทิศทางด้านขวา

ทิศทางด้านซ้ายมีค่าสูงสุดที่ -80 องศา จากการจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม และจะมีค่าสูงสุดที่ -40 และ 30 องศา จากการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมภายในห้อง ดังภาพที่ 25 จากการจำลองรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบบีมด้านซ้าย แตกต่างจากผลที่วัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบบีมด้านซ้าย เนื่องจากแบบจำลองได้จำลองสถานที่ในภาวะอุดมคติ ซึ่งคลื่นความถี่ไม่มีการตกกระทบสะท้อน แต่จากการวัดได้ทำการวัดภายในห้องซึ่งมีคลื่นความถี่การตกกระทบและสะท้อนกับกำแพง ทำให้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองและการวัดมีรูปแบบที่แตกต่างกัน แต่ก็สามารถบ่งบอกทิศทางบีมของสายอากาศได้

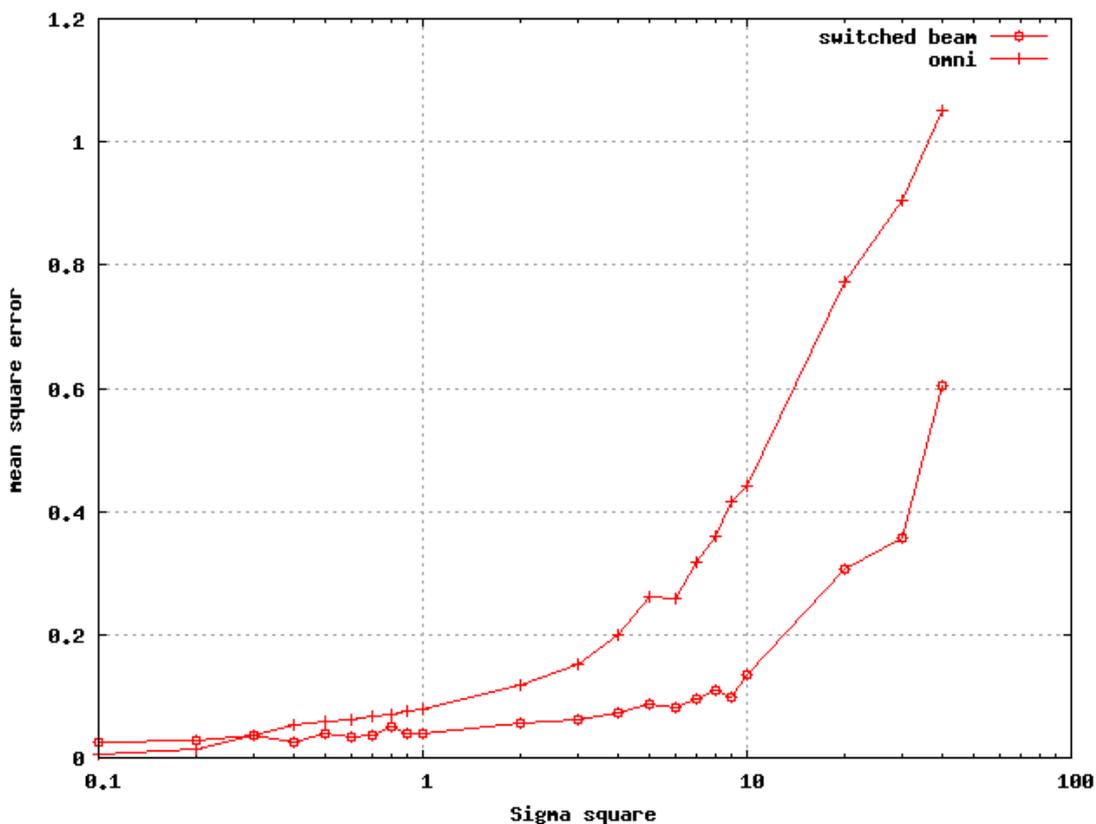


ภาพที่ 25 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมในทิศทางด้านซ้าย

4. การระบุตำแหน่ง

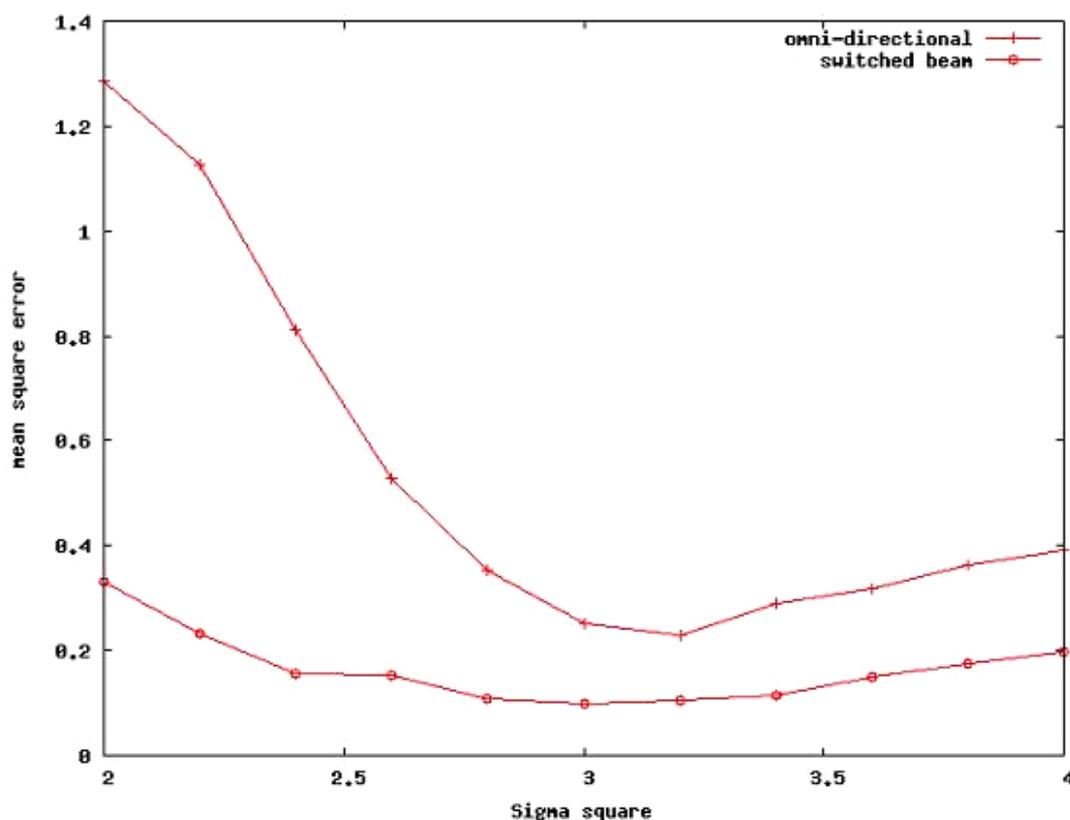
4.1 ผลการจำลองการระบุตำแหน่ง

เราทำการพิจารณาประสิทธิภาพของวิธีที่ระบุตำแหน่งของเราที่ความแปรปรวนต่างๆ โดยทำซ้ำๆ 100 ครั้งแต่ละครั้งตัวส่งถูกวางตำแหน่งแบบสุ่ม ดังภาพที่ 26 แสดงให้เห็นได้ว่า สายอากาศแบบเปลี่ยนบีมให้ผลที่ดีกว่าสายอากาศแบบรอบตัวที่ความแปรปรวนมาก เนื่องจากสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมให้ข้อมูลเกี่ยวกับมุม ทำให้สามารถระบุตำแหน่งได้ดีขึ้น โดยค่าความผิดพลาดของค่าความแรงสัญญาณลดน้อยลง ทำให้การระบุตำแหน่งได้มีประสิทธิภาพมากกว่าสายอากาศแบบรอบตัวถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ที่ความแปรปรวนต่ำ การระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบรอบตัวจะดีกว่าสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม



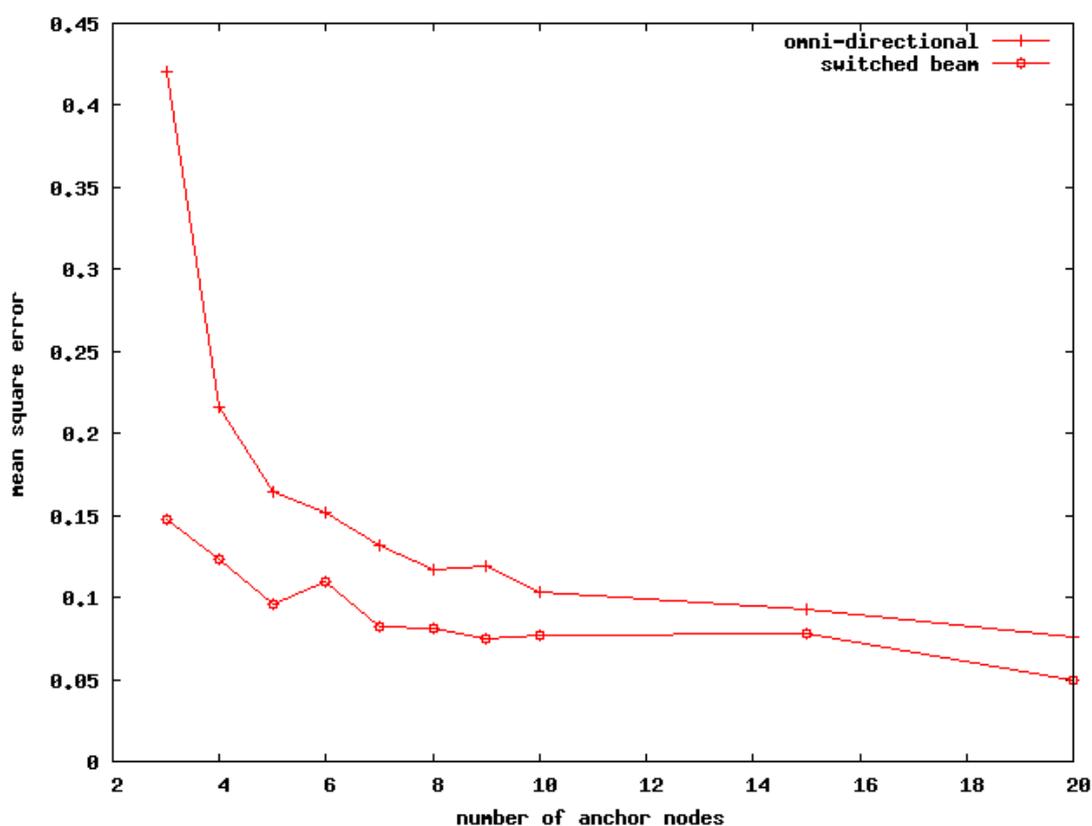
ภาพที่ 26 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว

เราทำการพิจารณาความคงทนในการระบุตำแหน่ง เมื่อมีการประมาณค่าพารามิเตอร์ผิดพลาดของระบบสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม ซึ่งจะกำหนดพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยกำลังเส้นทางสัญญาณจริงมีค่าเท่ากับ 3 แต่ระบบประมาณค่าผิดพลาดโดยให้ผันแปรจาก 2 ถึง 4 โดยทำซ้ำ 100 ครั้ง แต่แต่ละครั้งตัวส่งถูกวางตำแหน่งแบบสุ่ม ดังภาพที่ 27 แสดงผลที่ได้โดยพบว่าที่ค่าประมาณเท่ากับค่าจริง ทั้งสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมและสายอากาศแบบรอบตัวทำงานได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อประมาณค่าผิดพลาดการระบุตำแหน่งจะมีการผิดพลาด การใช้สายอากาศแบบเปลี่ยนบีมมีความคงทนมากกว่า เพราะที่การประมาณค่าผิดพลาดเป็น 2 จะมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่างจากค่าต่ำสุด 3.4 เท่า ในขณะที่สายอากาศแบบรอบตัวมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นถึง 5.2 เท่า



ภาพที่ 27 ความคงทนการระบุตำแหน่งระหว่างระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว

เราทำการพิจารณาประสิทธิภาพของวิธีที่ระบุตำแหน่งของจำนวนตัวรับรู้ที่ต่างกัน โดยจำนวนตัวรับรู้ที่ใช้ทดลองจะอยู่ระหว่าง 3 ถึง 20 ตัว และทำซ้ำ 100 ครั้ง โดยตัวส่งถูกวาง ทั้งตำแหน่งและทิศทางแบบสุ่ม ดังภาพที่ 28 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพได้ว่าสายอากาศแบบ เปลี่ยนบีมและสายอากาศแบบรอบตัวให้ผลเหมือนกัน เมื่อจำนวนตัวรับรู้เพิ่มขึ้น ค่าคลาดเคลื่อน กำลังสองเฉลี่ยจะลดลง จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนตัวรับรู้เพิ่มขึ้นถึงค่าๆหนึ่ง ประสิทธิภาพของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัวจะไม่ต่างกันมาก ดังนั้นเมื่อเพิ่มจำนวนตัวรับถึงค่าๆ หนึ่ง ประสิทธิภาพไม่ได้ดีขึ้นมากนัก



ภาพที่ 28 ผลของจำนวนตัวรับรู้ต่อประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว

4.2 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งจริง

ผลการทดลองที่ได้สำหรับจำนวนพาร์ทิเคิลต่างๆ ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้อง ดังภาพที่ 15 ทั้ง 9 ตำแหน่ง ถูกสรุปใน ตารางที่ 6-14

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่ตำแหน่งที่ 1

จำนวน พาร์ทิเคิล (ตัว)	ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (เมตร)		รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง เฉลี่ย (เมตร)	
	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว
	50	1.6993	1.8469	1.7241
100	1.6959	1.8469	1.7218	1.8502
150	1.6927	1.8399	1.7197	1.8455
200	1.5530	1.8390	1.6035	1.8447
250	1.5395	1.8308	1.5703	1.8360
300	1.5247	1.8077	1.5532	1.8125

ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่ตำแหน่งที่ 2

จำนวน พาร์ทิเคิล (ตัว)	ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (เมตร)		รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง เฉลี่ย (เมตร)	
	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว
	50	1.6005	1.7891	1.6538
100	1.5403	1.7716	1.5859	1.7794
150	1.4755	1.7645	1.5598	1.7739
200	1.4484	1.7610	1.5256	1.7699
250	1.4419	1.7591	1.4996	1.7670
300	1.4170	1.7260	1.4948	1.7386

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่
ตำแหน่งที่ 3

จำนวน พาร์ทิเคิล (ตัว)	ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (เมตร)		รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง เฉลี่ย (เมตร)	
	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว
	50	2.1328	2.3582	2.2003
100	2.0420	2.3500	2.0810	2.3539
150	1.9563	2.2895	1.9879	2.2926
200	1.9062	2.2678	1.9383	2.2702
250	1.8948	2.2677	1.9288	2.2702
300	1.8622	2.2002	1.8850	2.2017

ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัวที่
ตำแหน่งที่ 4

จำนวน พาร์ทิเคิล (ตัว)	ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (เมตร)		รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง เฉลี่ย (เมตร)	
	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว
	50	0.7882	1.8452	0.8539
100	0.6799	1.8451	0.7262	1.8488
150	0.5681	1.8325	0.6287	1.8366
200	0.4691	1.8163	0.5335	1.8209
250	0.4656	1.8124	0.5248	1.8175
300	0.4248	1.8122	0.4779	1.8155

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัว
ที่ตำแหน่งที่ 5

จำนวน พาร์ทิเคิล (ตัว)	ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (เมตร)		รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง เฉลี่ย (เมตร)	
	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว
	50	1.4252	2.1312	1.4379
100	1.3503	2.1286	1.3734	2.1371
150	1.3476	2.1187	1.3723	2.1270
200	1.3242	2.1049	1.3610	2.1144
250	1.2687	2.1002	1.2844	2.1067
300	1.2553	2.0951	1.2752	2.1045

ตารางที่ 11 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัว
ที่ตำแหน่งที่ 6

จำนวน พาร์ทิเคิล (ตัว)	ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (เมตร)		รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง เฉลี่ย (เมตร)	
	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว
	50	1.0529	1.8149	1.1336
100	0.9912	1.8054	1.0842	1.8108
150	0.9149	1.7886	1.0063	1.7940
200	0.8269	1.7707	0.8868	1.7748
250	0.7736	1.7628	0.8196	1.7681
300	0.7113	1.7518	0.8045	1.7565

ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัว
ที่ตำแหน่งที่ 7

จำนวน พาร์ทิเคิล (ตัว)	ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (เมตร)		รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง เฉลี่ย (เมตร)	
	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว
	50	2.0465	2.2471	2.0881
100	2.0420	2.2462	2.0639	2.2575
150	1.9853	2.2004	2.0332	2.2152
200	1.9641	2.1903	2.0079	2.2034
250	1.9399	2.1743	1.9788	2.1910
300	1.9079	2.1525	1.9578	2.1668

ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัว
ที่ตำแหน่งที่ 8

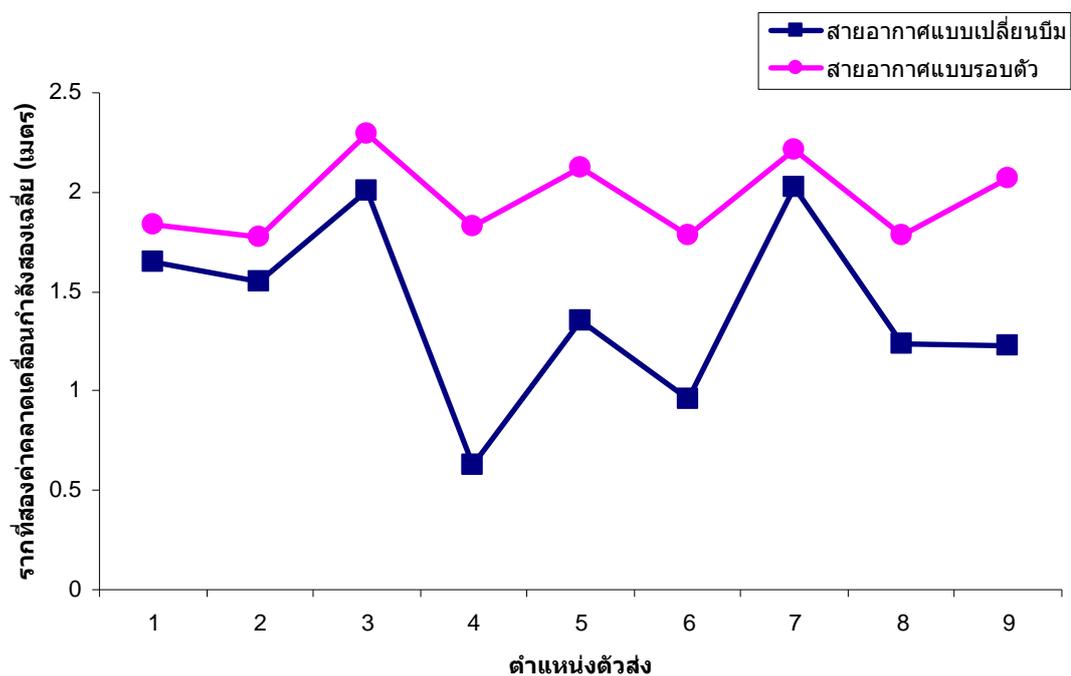
จำนวน พาร์ทิเคิล (ตัว)	ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (เมตร)		รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง เฉลี่ย (เมตร)	
	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว
	50	1.4687	1.8134	1.4779
100	1.4063	1.8096	1.4506	1.8178
150	1.3005	1.7867	1.3923	1.7960
200	1.1810	1.7586	1.2732	1.7687
250	0.8437	1.7446	0.9884	1.7533
300	0.7262	1.7314	0.8604	1.7404

ตารางที่ 14 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศรอบตัว
ที่ตำแหน่งที่ 9

จำนวน พาร์ทิเคิล (ตัว)	ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (เมตร)		รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง เฉลี่ย (เมตร)	
	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว	สายอากาศแบบ เปลี่ยนบีม	สายอากาศแบบ รอบตัว
	50	1.3192	2.0841	1.3904
100	1.1937	2.0766	1.2692	2.0788
150	1.1817	2.0743	1.2443	2.0761
200	1.1262	2.0665	1.1887	2.0684
250	1.1135	2.0565	1.1771	2.0580
300	1.0323	2.0460	1.1136	2.0478

จากการทดสอบการระบุตำแหน่งทั้ง 9 ตำแหน่ง จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัวนั้น ที่ตำแหน่งที่ 4 ให้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัวมากที่สุด 98.33 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งที่ 6 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการระบุตำแหน่ง 60.62 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งที่ 9 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการระบุตำแหน่ง 50.83 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งที่ 5 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการระบุตำแหน่ง 44.39 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งที่ 8 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการระบุตำแหน่ง 35.88 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งที่ 3 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการระบุตำแหน่ง 13.43 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งที่ 2 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการระบุตำแหน่ง 13.09 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งที่ 1 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการระบุตำแหน่ง 10.97 เปอร์เซ็นต์ และที่ตำแหน่งที่ 7 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการระบุตำแหน่งน้อยที่สุด 9.15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแต่ละตำแหน่งให้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างไม่เท่ากันเนื่องจากสภาพแวดล้อมใกล้เคียงของแต่ละตำแหน่งไม่เหมือนกัน แต่ตำแหน่งทั้ง 9 ตำแหน่งให้ผลที่เหมือนกันคือ การระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมให้ความถูกต้องและแม่นยำมากกว่าการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบรอบตัว และเมื่อเพิ่มจำนวนพาร์ทิเคิลการระบุตำแหน่งจะมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นทั้งสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมและสายอากาศแบบรอบตัว

ที่ตำแหน่ง 4, 5, 6, 8 และ 9 ความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าสายอากาศแบบรอบตัวอย่างมาก และที่ตำแหน่ง 1, 2, 3 และ 7 ความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมน้อยกว่าสายอากาศแบบรอบตัวแต่ไม่มากนัก ซึ่งตำแหน่งทั้ง 9 ตำแหน่ง ให้ความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งเหมือนกันความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมน้อยกว่าสายอากาศแบบรอบตัว ดังภาพที่ 29



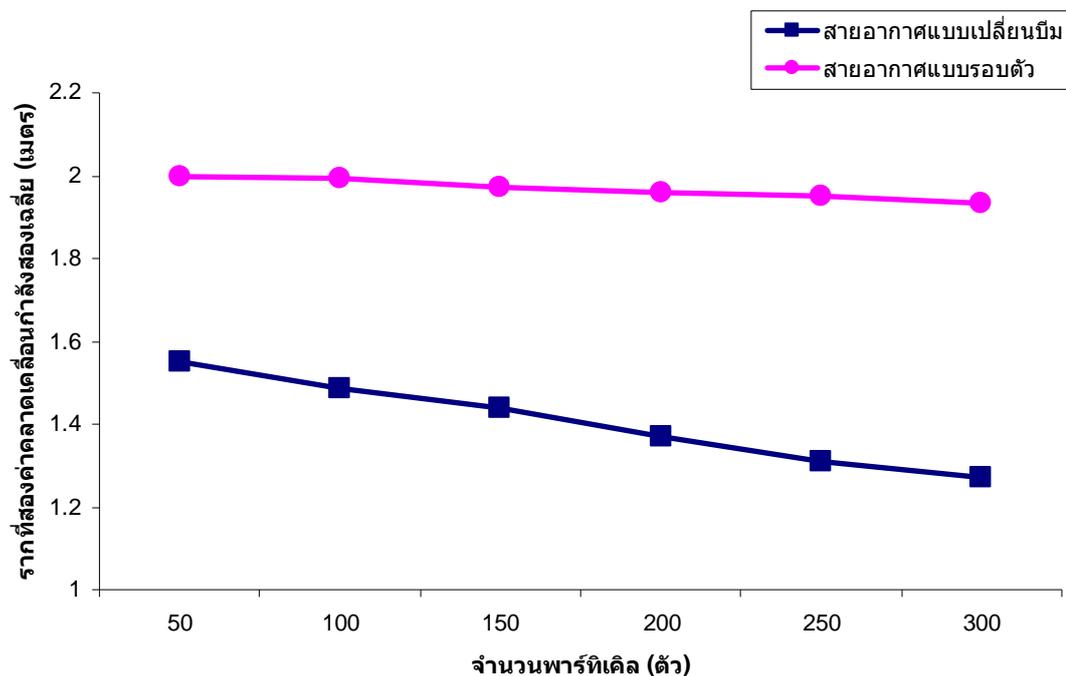
ภาพที่ 29 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งที่ตำแหน่งจริงต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว

จากตารางที่ 15 อัตราการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะมีค่าสูงที่สุดที่ตำแหน่งที่ 4 และอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งที่ 1 ซึ่งอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดและต่ำสุดเป็นผลมาจากจำนวนพาร์ทิเคิล โดยที่อัตราการเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดจะคิดที่จำนวนตัวพาร์ทิเคิลจะเท่ากับ 300 และอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพต่ำสุดจะคิดที่จำนวนตัวพาร์ทิเคิลจะเท่ากับ 50 แต่เมื่อเทียบกับอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยแล้วอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเหมือนกับอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุด แต่ที่อัตราการเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยต่ำสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งที่ 7 ซึ่งไม่เหมือนกับอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพต่ำสุด ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าจำนวนตัวพาร์ทิเคิลมีผลต่ออัตราการเพิ่มประสิทธิภาพ

ตารางที่ 15 อัตราการเพิ่มประสิทธิภาพระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว

ตำแหน่งที่	อัตราการเพิ่มประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)		
	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
1	6.93	14.31	10.40
2	7.96	14.02	12.29
3	6.91	14.38	12.59
4	53.83	73.68	65.92
5	32.76	39.41	36.33
6	37.69	54.20	46.52
7	7.53	9.65	8.75
8	18.85	50.56	30.42
9	33.34	45.62	40.53

การเพิ่มจำนวนพาร์ทิเคิลตั้งแต่ 50 ถึง 300 อัตราการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะเพิ่มขึ้น 18.18 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศแบบรอบตัวจะเพิ่มขึ้น 3.34 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการเพิ่มจำนวนพาร์ทิเคิลทำให้ทำให้ความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัวลดลง แต่เมื่อเพิ่มจำนวนพาร์ทิเคิลให้การระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะเห็นผลความคลาดเคลื่อนลดลงมากกว่าสายอากาศแบบรอบตัวที่จำนวนพาร์ทิเคิลเท่ากัน ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งที่จำนวนพาร์ทิเคิลต่างๆเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัว

วิจารณ์

อัลกอริทึมในการระบุตำแหน่งจะใช้ค่าความแรงของสัญญาณในการระบุตำแหน่งตามหลักทฤษฎีนั้น (Lymberopoulos *et al.*, 2006) การระบุตำแหน่งจะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีเกิดขึ้นที่สถานะในอุดมคติ แต่ในทางปฏิบัติแล้วสถานะต่างๆห่างไกลจากสถานะอุดมคติมาก ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากทางทฤษฎีและทางปฏิบัติจึงไม่ตรงกันตามที่ควรจะเป็นเสมอ ทำให้การระบุตำแหน่งที่ทำงานได้ดีในสถานะอุดมคติอาจจะไม่สามารถนำมาใช้ได้จริงมีสถานะแวดล้อมจริงตัวอย่างเช่น การระบุตำแหน่งด้วยค่าความแรงของสัญญาณ มีข้อสมมติฐานว่ารูปแบบการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุเป็นวงกลมหรือเป็นทรงกลม และสูตรการลดทอนของค่าความแรงของสัญญาณเป็นไปตามระยะทาง แต่ในทางปฏิบัติรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุของสายอากาศไม่ได้เป็นวงกลมหรือเป็นทรงกลมและปัญหาเส้นทางการสูญเสีย อาจจะไม่ลดลงตามระยะห่างเสมอ เนื่องจากสาเหตุจากอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายและสภาพแวดล้อมรอบตัวอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สาย ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่ทำให้การระบุตำแหน่งคลาดเคลื่อนและไม่แม่นยำเท่าที่ควร ดังนั้นการแก้ปัญหานี้จะใช้สายอากาศแบบเปลี่ยนบีมเข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่ง

การจำลองการระบุตำแหน่งแสดงให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมที่มีความแปรปรวนสูงการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมให้ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งสูงกว่าการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบรอบตัวถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อประมาณค่าผิดพลาดในการระบุตำแหน่งจะเกิดการคลาดเคลื่อน ซึ่งการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะมีความคงทนต่อการประมาณค่าผิดพลาดในการระบุตำแหน่งมากกว่าการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบรอบตัว และเมื่อเราทำการเพิ่มจำนวนตัวรับรู้ประสิทธิภาพในการระบุด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมและสายอากาศแบบรอบตัวจะเพิ่มขึ้นเหมือนกัน แต่ที่จำนวนตัวรับรู้น้อยๆสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะให้ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งมากกว่าสายอากาศแบบรอบตัว ถ้ามองในแง่ราคาของอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายที่นำมาใช้ในการระบุตำแหน่งต่อประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งนั้นที่ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งเท่ากันระหว่างสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมกับสายอากาศแบบรอบตัวนั้น การระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะใช้จำนวนตัวรับรู้น้อยกว่าการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบรอบตัว ทำให้ใช้อุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายน้อยทำให้ราคาถูกลง ถึงแม้ว่าราคาอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายแบบสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะมีราคาต้นทุนสูงกว่าอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายแบบสายอากาศแบบรอบตัวก็ตาม

การทดสอบการระบุตำแหน่งจริงภายในห้อง ดังภาพที่ 15 โดยทำการพิจารณาทดสอบทั้งหมด 9 ตำแหน่งภายในห้อง ซึ่งทั้ง 9 ตำแหน่ง ให้ผลเหมือนกันหมดคือ การระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมให้ความแม่นยำและถูกต้องมากกว่าสายอากาศแบบรอบตัว การเพิ่มจำนวนพาร์ทิเคิลเพิ่มขึ้นการระบุตำแหน่งจะมีความแม่นยำและถูกต้องเพิ่มขึ้นทั้งสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมและสายอากาศแบบรอบตัว เมื่อเพิ่มจำนวนพาร์ทิเคิลในการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งสูงกว่าการเพิ่มจำนวนพาร์ทิเคิลในการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบรอบตัว เมื่อพิจารณาที่ประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมและสายอากาศแบบรอบตัวเท่ากัน จำนวนพาร์ทิเคิลที่ใช้ในสายอากาศแบบรอบตัวจะมากกว่าจำนวนพาร์ทิเคิลที่ใช้ในสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม ซึ่งเมื่อใช้จำนวนพาร์ทิเคิลที่มาก ๆ จะทำให้การประมวลผลหาตำแหน่งช้าลงและสิ้นเปลืองพลังงาน

สายอากาศแบบเปลี่ยนบีมให้ข้อมูลเกี่ยวกับทิศทางและมุม โดยทิศทางจะสามารถบอกได้ว่าตัวส่งนั้นอยู่ทางทิศทางด้านไหนของสายอากาศ และมุมจะนำไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของค่าความแรงของสัญญาณ ซึ่งค่าความแรงของสัญญาณเป็นพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการคำนวณระบุตำแหน่ง จึงทำให้สายอากาศแบบเปลี่ยนบีมระบุตำแหน่งได้ดีกว่าสายอากาศแบบรอบตัว

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ผลของการจำลองการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม และผลการทดสอบการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม จะเห็นได้ว่าสามารถระบุตำแหน่งได้แม่นยำและถูกต้องดีกว่าสายอากาศแบบรอบตัว

การจำลองการระบุตำแหน่งจะทำให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ จะเกิดผลต่อการระบุตำแหน่ง เมื่อความแปรปรวนสูงจะเห็นได้ว่าการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะมีความแม่นยำและถูกต้องมากกว่าสายอากาศแบบรอบตัวอย่างมาก แต่ที่ความแปรปรวนต่ำการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบรอบตัวจะมีความแม่นยำและถูกต้องมากกว่าสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมแต่ไม่มาก และสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะมีความคงทนต่อการประมาณค่าพารามิเตอร์ผิดพลาดมากกว่าเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบรอบตัว และการเพิ่มจำนวนตัวรับรู้จะทำให้การระบุตำแหน่งมีความแม่นยำและถูกต้องเพิ่มขึ้น ทั้งในการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมและการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบรอบตัว โดยที่จำนวนตัวรับน้อยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะระบุตำแหน่งได้แม่นยำและถูกต้องมากกว่าสายอากาศแบบรอบตัวอย่างเห็นได้ชัด และที่จำนวนตัวรับมากสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะระบุตำแหน่งได้แม่นยำและถูกต้องใกล้เคียงกับสายอากาศแบบรอบตัว

การทดสอบการระบุตำแหน่งจริงภายในห้อง ที่บริเวณกลางห้องด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมสามารถระบุตำแหน่งได้แม่นยำและถูกต้องมากกว่าสายอากาศแบบรอบตัวอย่างมาก และการทดสอบการระบุตำแหน่งที่บริเวณมุมห้อง สายอากาศแบบเปลี่ยนบีมสามารถระบุตำแหน่งได้ใกล้เคียงกับสายอากาศแบบรอบตัว แต่สายอากาศแบบเปลี่ยนบีมก็ยังสามารถระบุตำแหน่งได้ดีกว่าสายอากาศแบบรอบตัวที่บริเวณมุมห้อง และการเพิ่มจำนวนพาร์ทิเคิลทำให้ทำให้การระบุตำแหน่งแม่นยำและถูกต้องเพิ่มขึ้น ทั้งในการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีม และการระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบรอบตัว แต่เมื่อเพิ่มจำนวนพาร์ทิเคิลให้การระบุตำแหน่งด้วยสายอากาศแบบเปลี่ยนบีมจะเห็นผลความคลาดเคลื่อนลดลงมากกว่าสายอากาศแบบรอบตัว

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะสำหรับการทดลอง

1.1 ควรใช้แอนะล็อกสวิตช์ที่มีค่าการสูญเสียน้อย

1.2 ควรทำการรวมวงจรไมโครสตริปเปลี่ยนเฟสกับสายอากาศเข้าด้วยกันเพื่อเป็นการลดการสูญเสียที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อ

1.3 การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นควรวัดในห้องที่ดูดซับคลื่น

2. ข้อเสนอแนะสำหรับผู้สนใจจะนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาและจัดทำต่อ

2.1 ควรออกแบบสายอากาศให้มีขนาดเล็กลงเพื่อสะดวกให้การใช้งาน

2.2 ควรออกแบบวงจรอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สายให้ประหยัดพลังงานเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานให้กับอุปกรณ์ตัวรับรู้ไร้สาย

2.3 อาจดัดแปลงวงจรใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หาซื้อได้โดยไม่ต้องสั่งจากต่างประเทศเพื่อลดต้นทุนการทำ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- สิทธิพล อยู่รอด. 2005. การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ MSP430 และไปการทดลอง. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท อีทีที จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ทีมวิชาการโรงเรียนแสงอิเล็กทรอนิกส์. 2003. การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยโปรแกรม **Protel 99 SE**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงเรียนแสงทองอิเล็กทรอนิกส์, กรุงเทพฯ.
- ปณิธิ จันทร์รอด, สัจจา อธิกิจ, จิรพงษ์ มั่นเจริญ, นวัช เหลืองวิริยะแสง, ทรงพล บัวสถิต และ ณัฐวุฒิ ขวัญแก้ว. 2008. ระบบตรวจวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบไร้สาย. **International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology (ICESIT)**.
- Bulusu, N., J. Heidemann and D. Estrin. 2000. Gps-less low-cost outdoor localization for very small devices. **IEEE Personal Communications Magazine**. 7: 28-34.
- David, C., E. Deborah and S. Mani. 2004, Overview of Sensor Networks. **IEEE Computer Magazine**. 37: 41-49.
- David, M. and Pozar. 2005. **Microwave engineering**. 3rd ed. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Gustafsson, F., F. Gunnarsson, N. Bergman, U. Forssell, J. Jansson, R. Karlsson and P-J. Nordlund. 2005. Particle Filters for Positioning, Navigation and Tracking. **Final version for IEEE Transactions on Signal Processing. Special issue on Monte Carlo methods for statistical signal processing**. 50: 425-437
- Intel Research. 2004. **Instrumenting the world**. Wireless Sensor Networks. Available Source: http://www.intel.com/research/downloads/overview_instrument_world.pdf, January 25, 2008.

IEEE Standard. 2006. **Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)**. IEEE std 802.15.4. Available Source: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>, May 2, 2007.

Kasetkasem, T. , V. Kesornpatumanun and D. Worasawate. 2008. On the Use of Switched-Beam Antennas for a Beacon Node Localization in Wireless Sensor Networks. **Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference**.

Lee, J.Y. and R.A. Scholtz. 2002. Ranging in a dense multipath environment using an UWB radio link. **IEEE J. Sel. Areas Commun.** 20: 1677–1683.

Lymberopoulos, D., Q. Lindsey and A. Savvides. 2006. An Empirical Analysis of Radio Signal Strength Variability in IEEE 802.15.4 Networks using Monopole Antennas. **European Workshop on Sensor Networks (EWSN)**. 326-341.

Mohammad Ilyas and Imad Mahgoub. 2005. **Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing System**. 1 ed. CRC Press, USA.

Moore, G. E. 1998. Cramming more components onto integrated circuits. **Proceedings of the IEEE**. 86: 82-85.

Moteiv Corporation. 2005. **Tmote sky Low Power Wireless Sensor Module**. Tmote sky. Available Source: <http://www.sentilla.com/pdf/eol/tmote-sky-datasheet.pdf>, May 2, 2007.

Niculescu, D. and B. Nath. 2001. Ad hoc Positioning System (APS). **IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM'01)**. 2926-2931.

- Patwari, N., J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, R. L. Moses and N. S. Correal. 2005. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. **IEEE Signal Processing Magazine**. 22: 54–69.
- Philip Levis. 2006. **TinyOS Programming**. TinyOS 2.0. Available Source: <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/pdf/tinyos-programming.pdf>, May 2, 2007.
- Reichenbach, F. and D. Timmermann. 2006. Indoor Localization with Low Complexity in Wireless Sensor Networks. **IEEE International Conference on Industrial Informatics**. 1018-1023.
- Sivrikaya, F. and B. Yener. 2004. Time synchronization in sensor networks: A survey. **IEEE Network**. 18: 45–50.
- Ssu, K.F., C.H. Ou and H.C. Jiau. 2005. Localization With Mobile Anchor Points in Wireless Sensor Networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. 54: 1187-1197.
- Texas Instruments. 2006. **MSP430x15x, MSP430x16x, MSP430x161x MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER**. MSP430F1611. Available Source: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f1611.pdf>, May 2, 2007.
- _____. 2007. **2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver**. CC2420. Available Source: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>, May 2, 2007.
- Want, R., A. Hopper, V. Falcao and J. Gibbons. 1992. The Active Badge Location System. **ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC)**. 10: 91–102.

Worasawate, D., T. Kasetkasem, V. Kesornpatumanun, A. Noymai, P. Klongpramong and A. Ampungart. 2008. A Simple Switched Beam Antenna System for a Beacon Node Localization in Wireless Sensor Networks. **Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference.**

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

มาตรฐาน IEEE 802.15.4

1. อุปกรณ์พื้นฐานในเครือข่าย IEEE 802.15.4

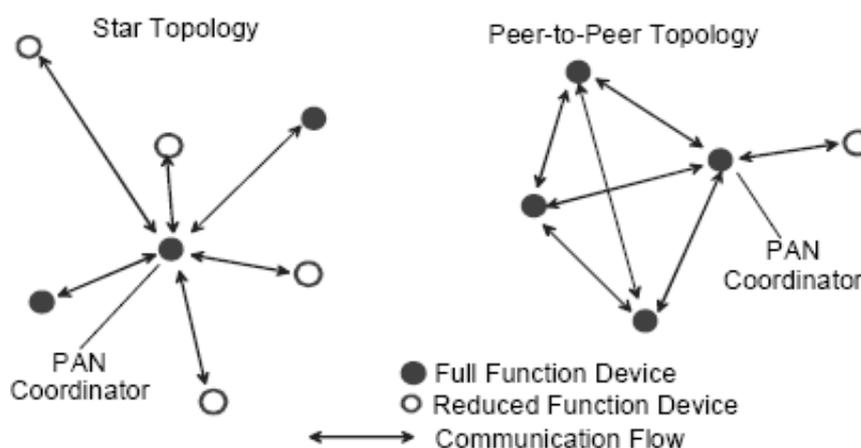
อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้งานในเครือข่าย ได้แก่ Full function device (FFD) และ Reduced function device (RFD) ในเครือข่าย 1 เครือข่าย จะต้องมี FFD ที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของเครือข่าย (PAN Coordinator) อย่างน้อย 1 ตัว

Full function device (FFD) สามารถฟังกัซันได้ในทุกๆเครือข่าย สามารถทำเป็นศูนย์กลางของเครือข่ายได้ สามารถทำเป็นตัวประสาน (coordinator) สามารถติดต่อกับทุกๆ อุปกรณ์

Reduced function device (RFD) ทำได้เฉพาะในเครือข่ายแบบดาว ไม่สามารถเป็นศูนย์กลางของเครือข่ายได้ สามารถคุยได้กับศูนย์กลางของเครือข่ายเท่านั้น สะดวกในการติดตั้ง

2. รูปแบบของเครือข่าย (Network topology)

เครือข่ายของ IEEE 802.15.4 สามารถทำงานได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบดาว (star topology) และแบบตารางแห่ (mesh topology) ดังภาพผนวกที่ ก1



ภาพผนวกที่ ก1 การสร้างเครือข่ายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

ในเครือข่ายแบบดาว ต้องมี FFD อย่างน้อย 1 ตัวทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของเครือข่าย ซึ่งทำหน้าที่ในการเริ่มต้นหรือยกเลิกการเชื่อมต่อหรือการหาเส้นทาง (route) ข้อมูลภายในเครือข่าย อุปกรณ์ที่เข้ามาร่วมเครือข่ายแบบดาว จะถูกกำหนดเลขหมายชั่วคราว (Short Address, 16 บิต) ให้โดยศูนย์กลางของเครือข่ายประจำเครือข่ายนั้นๆ สำหรับการสื่อสารแบบทางอ้อม หรืออาจใช้หมายเลข (IEEE address, 64 บิต) ในการสื่อสารทางตรงก็ได้

ในเครือข่ายแบบดาวร่างแห ยังคงใช้หลักการของศูนย์กลางของเครือข่าย เช่นเดิม แต่ต่างจากเดิมตรงที่ศูนย์กลางของเครือข่ายที่อยู่ภายในเครือข่ายทุกตัวสามารถติดต่อสื่อสารกันได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวใดตัวหนึ่งเป็นศูนย์กลางของเครือข่าย ซึ่งการกำหนดลักษณะของเครือข่าย เช่นนี้ ทำให้เครือข่ายเกิดความยืดหยุ่นและมีความซับซ้อนมากขึ้นกว่าเดิม โดยโครงสร้างมาตรฐาน IEEE 802.15.4 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่คือ ชั้นกายภาพ (physical layer) และชั้นแม็ค (MAC sublayer)

3. ชั้นกายภาพ

ชั้นกายภาพทำหน้าที่จัดการเชื่อมต่อ และการส่งสัญญาณทางไฟฟ้าจากผู้ส่งไปยังผู้รับ โดยผ่านสื่อกลางอากาศ โดยสัญญาณที่ผ่านเป็นสัญญาณคลื่นวิทยุ ซึ่งในชั้นนี้จะสนใจ พิจารณาการส่งข้อมูลเป็นบิต 0 และบิต 1 จากต้นทางไปให้ถึงปลายทาง

3.1 ย่านความถี่ที่ใช้งาน

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้กำหนดย่านความถี่ที่ใช้ไว้ 3 ย่านความถี่ ที่ย่านความถี่ 868 เมกกะเฮิร์ตใช้ใน โชนยุโรปมี 1 ช่องสัญญาณ ที่ย่านความถี่ 915 เมกกะเฮิร์ต เป็นย่านความถี่อิสระใช้ใน โชนอเมริกา มี 10 ช่องสัญญาณ ที่ย่านความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ต เป็นย่านความถี่อิสระใช้ได้ทั่วโลกมี 16 ช่องสัญญาณ ข้อมูลเหล่านี้ถูกสรุปในตารางผนวก ก1

ตารางผนวกที่ ก1 ย่านความถี่ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameters			Data parameters	
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kbps)	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

3.2 การกำหนดช่องสัญญาณ

มีช่องสัญญาณสำหรับใช้งานทั้งหมด 27 ช่องสัญญาณ ได้แก่ ช่องสัญญาณหมายเลข 0 ถึงช่องสัญญาณหมายเลข 26 โดยมี 1 ช่องสัญญาณสำหรับย่านความถี่ 868 เมกกะเฮิร์ต, 10 ช่องสัญญาณสำหรับย่านความถี่ 915 เมกกะเฮิร์ต และ 16 ช่องสัญญาณในย่านความถี่ 2.4 จิกะเฮิร์ต ซึ่งกำหนดตามดังต่อไปนี้

$$f_c = 868.3 \quad \text{สำหรับ } k = 0$$

$$f_c = 906 + 2(k - 1) \quad \text{สำหรับ } k = 1, \dots, 10$$

และ

$$f_c = 2405 + 5(k - 11) \quad \text{สำหรับ } k = 11, \dots, 26$$

โดย k หมายถึง หมายเลขของช่องสัญญาณ

3.3 รูปแบบเฟรมของกลุ่มข้อมูลโปรโตคอลชั้นกายภาพ

แต่ละกลุ่มข้อมูลโปรโตคอลชั้นกายภาพ (physical protocol data unit: PPDU) มีส่วนประกอบพื้นฐานคือ ส่วนต้นของการประสานเวลา (synchronization header: SHR) ช่วยในการประสานเวลาระหว่างข้อมูลกับอุปกรณ์ภาครับข้อมูล ส่วนต้นกายภาพ (physical header: PHR) ประกอบด้วยข้อมูลความยาวเฟรม ส่วนโหนดชั้นกายภาพ (physical payload) มีขนาดไม่คงที่ บรรจุเฟรมของชั้นแม่ค ซึ่งมีการเรียบเรียง ดังภาพผนวกที่ ก2

Octets: 4	1	1		variable
Preamble	SFD	Frame length (7 bits)	Reserved (1 bit)	PSDU
SHR		PHR		PHY payload

ภาพผนวกที่ ก2 รูปแบบทั่วไปของกลุ่มข้อมูล โพรโตคอลชั้นกายภาพ

พื้นที่พรีแอมเบิล (preamble field) ใช้ในการประสานเวลา สำหรับการรับข้อมูล ประกอบด้วย 0 จำนวน 32 บิต

จุดเริ่มต้นของเฟรม (start of frame delimiter: SFD) ใช้บอกการสิ้นสุดของพรีแอมเบิล และจุดเริ่มต้นของข้อมูล มีรูปแบบ ดังภาพผนวกที่ ก3

Bits: 0	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	1	0	1

ภาพผนวกที่ ก3 โครงสร้างบิตของจุดเริ่มต้นของเฟรม

พื้นที่ความยาวของเฟรม (frame length field) มีขนาด 7 บิต บอกจำนวนไบต์ที่มีอยู่ในกลุ่มข้อมูลบริการชั้นกายภาพมีค่า 0 ถึง aMaxPHYPacketSize 127 ไบต์ โดยค่าของความยาวของเฟรมกลุ่มข้อมูล โพรโตคอลชั้นแม็ค (MAC protocol data unit: MPDU) สามารถมีค่า ตามตารางผนวกที่ ก2

ตารางผนวกที่ ก2 พื้นที่ความยาวของเฟรมกลุ่มข้อมูลโปรโตคอลชั้นแม็ค

Frame length value	Payload
0 – 4	Reserved
5	MPDU (Acknowledgment)
6 – 7	Reserved
8 to aMaxPHYPacketSize	MPDU

กลุ่มข้อมูลบริการชั้นกายภาพ (physical service data unit: PSDU) มีขนาดไม่คงที่ บรรจุข้อมูลส่วนข้อมูลชั้นกายภาพ โดยกลุ่มข้อมูลที่มีความยาว 5 ไบต์ หรือมากกว่า 7 ไบต์ จะเป็นเฟรมของ ชั้นแม็ค

4. ชั้นแม็ค

ที่ด้านตัวส่งจะทำงานเกี่ยวกับการรับข้อมูลจากชั้นที่สูงกว่าโดยชั้นแม็คนี้จะสนับสนุนการปฏิบัติงาน ตัดสินใจที่จะส่งข้อมูลเมื่อเครือข่ายว่าง และข้อมูลพร้อมที่จะส่ง ตัดสินใจช่วงเวลาในการส่งข้อมูล เพิ่มไบต์ควบคุมให้กับข้อมูล โดยมีรูปแบบข้อมูลเรียกว่า เฟรมและควบคุมถึงข้อมูลที่ส่งผ่านทางชั้นกายภาพด้วย

ที่ด้านตัวรับชั้นแม็คจะรับข้อมูลจากชั้นกายภาพ ตรวจสอบไบต์ควบคุมของข้อมูลที่ถูกต้องได้เพิ่มเข้าไปโดยชั้นแม็คของด้านตัวส่ง และตัดสินใจเกี่ยวกับข้อมูลที่ได้รับการว่าเป็นไปตามรูปแบบที่ส่งมาจากทางด้านตัวส่งหรือไม่เพราะระหว่างทางการส่งอาจจะมีการรบกวนหรือปัจจัยอื่นๆ ชั้นแม็คนี้จะถอดไบต์ควบคุมจากข้อมูล และส่งข้อมูลไปยังชั้นที่สูงขึ้นไป

4.1 รูปแบบทั่วไปของกลุ่มข้อมูลโปรโตคอลชั้นแม็ค

แต่ละเฟรมของชั้นแม็ค ประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐาน คือ ส่วนต้นของแม็ค (MAC header: MHR) ประกอบด้วย เฟรมควบคุม (frame control) เลขลำดับ (sequence number) และข้อมูลแอดเดรส (address information) ส่วนโหนดของแม็ค (MAC payload) มีขนาดไม่คงที่ ข้อมูลที่บรรจุในโหนด ขึ้นอยู่กับชนิดของเฟรม ถ้าเป็นเฟรมแสดงการรับ (acknowledgment) ไม่มี

โหนด ส่วนท้ายของแม็ค (MAC footer: MFR) ประกอบด้วย เฟรมตรวจสอบลำดับ (frame check sequence: FCS) สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของเฟรม ดังภาพผนวกที่ ก4 พื้นที่เฟรมควบคุม (frame control field) มีความยาว 16 บิต บรรจุข้อมูลเกี่ยวกับชนิดเฟรม (frame type) พื้นที่แอดเดรส (addressing field) และแฟล็กควบคุม (control flag) อื่นๆ ซึ่งมีรูปแบบ ดังภาพผนวกที่ ก5

Octets: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	variable	2
Frame control	Sequence number	Destination PAN identifier	Destination address	Source PAN identifier	Source address	Frame payload	FCS
		Addressing fields					
MHR						MAC payload	MFR

ภาพผนวกที่ ก4 รูปแบบทั่วไปของกลุ่มข้อมูลโปรโตคอลชั้นกายภาพ

Bits: 0-2	3	4	5	6	7-9	10-11	12-13	14-15
Frame type	Security enabled	Frame pending	Ack request	Intra-PAN	Reserved	Dest. addressing mode	Reserved	Source addressing mode

ภาพผนวกที่ ก5 รูปแบบของเฟรมควบคุม

พื้นที่ย่อยชนิดเฟรม (frame type subfield) มีความยาว 3 บิต และมีค่า ตามตารางผนวกที่ ก3

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าที่เป็นไปได้ของชนิดเฟรม

Frame type value	Description
000	Beacon
001	Data
010	Acknowledgment
011	MAC command
100-111	Reserved

พื้นที่ย่อยทำให้ปลอดภัย (security enabled subfield) มีขนาด 1 บิต มีค่าเป็น 0 เมื่อไม่ต้องการเข้ารหัสในระดับชั้นแม่ค และมีค่าเป็น 1 เมื่อต้องการเข้ารหัส

พื้นที่ย่อยเฟรมที่ยังค้างอยู่ (frame pending subfield) มีขนาด 1 บิต ถ้ามีค่าเป็น 1 หมายถึง ผู้ที่ส่งยังมีข้อมูลที่จะส่งเพิ่มอีกในขณะนั้น ผู้รับจะส่งคำสั่ง Data request ไปยังผู้ส่งเพื่อขอข้อมูลส่วนที่เหลือ แต่ถ้าไม่มีข้อมูลจะส่งเพิ่มเติม พื้นที่ย่อยเฟรมที่ยังค้างอยู่จะมีค่าเป็น 0

พื้นที่ย่อยร้องขอการตอบรับ (acknowledgment request subfield) มีขนาด 1 บิต ใช้บ่งบอกว่าผู้ส่งต้องการ การตอบรับจากผู้รับเมื่อได้รับข้อมูลแล้วหรือไม่ ถ้ามีค่าเป็น 1 หมายถึง ผู้ส่งต้องการให้ผู้รับส่ง การตอบรับหลังจากได้รับเฟรมแล้ว แต่ถ้าเป็น 0 หมายถึง ผู้ส่งไม่ต้องการให้ผู้รับส่ง การตอบรับหลังจากได้รับเฟรมนี้

พื้นที่ย่อยกลุ่มภายใน (intra-PAN subfield) มีขนาด 1 บิต ใช้บ่งบอกว่าเฟรมที่ส่งนี้จะถูกส่งไปในกลุ่มเดียวกันหรือไม่ ถ้ามีค่าเป็น 1 แล้ว เฟรมนี้จะไม่มีพื้นที่ย่อยกลุ่มภายในเพราะเป็นการส่งในกลุ่มเดียวกัน แต่ถ้ามีค่าเป็น 0 แล้ว เฟรมนี้จะมีทั้ง ตัวระบุกลุ่มต้นทาง และตัวระบุกลุ่มปลายทาง

พื้นที่ย่อยโหมดแอดเดรสปลายทาง (destination addressing mode subfield) มีขนาด 2 บิต และมีค่าตามตารางที่ 4 ถ้ามีค่าเป็น 0 และไม่ได้เป็นเฟรมการตอบรับหรือให้สัญญาณ แล้วพื้นที่ย่อยโหมดแอดเดรสต้นทางจะมีค่าไม่เท่ากับ 0 เป็นการบอกว่าเฟรมถูกส่งไปยังศูนย์กลางของเครือข่ายด้วยผู้ส่งที่มีตัวระบุกลุ่ม ดังที่ปรากฏในพื้นที่ตัวระบุกลุ่มต้นทาง

พื้นที่ย่อยโหมดแอดเดรสต้นทาง (source addressing mode subfield) มีขนาด 2 บิต และมีค่าตามตารางผนวกที่ 4 ถ้ามีค่าเป็น 0 และไม่ได้เป็นเฟรมการตอบรับหรือให้สัญญาณพื้นที่ย่อยโหมดแอดเดรสปลายทางจะมีค่าไม่เท่ากับ 0 เป็นการบอกว่าเฟรมถูกส่งจากศูนย์กลางของเครือข่ายไปยังผู้รับที่มีตัวระบุกลุ่ม ดังปรากฏในพื้นที่ตัวระบุกลุ่มปลายทาง

ตารางผนวกที่ ก4 ค่าที่เป็นไปได้ของพื้นที่ย่อโหมคแอดเดรสต้นทางและปลายทาง

Addressing mode value	Description
00	ตัวระบุกลุ่ม และพื้นที่แอดเดรส ไม่ใช้ในเฟรม
01	Reserved
10	พื้นที่แอดเดรสประกอบด้วยแอดเดรสแบบสั้นขนาด 16 บิต
11	พื้นที่แอดเดรสประกอบด้วยแอดเดรสแบบกว้างขนาด 64 บิต

พื้นที่เลขลำดับ (sequence number field) มีความยาว 8 บิต ใช้บอกลำดับของเฟรม

พื้นที่ตัวระบุกลุ่มปลายทาง (destination PAN identifier field) มีความยาว 16 บิต บอกตัวระบุกลุ่มของผู้รับ ถ้ามีค่าเป็น 0xFFFF แล้วจะเป็นพื้นที่ตัวระบุกลุ่มกระจาย (broadcast PAN identifier field) นี้จะรวมอยู่ในเฟรมของชั้นแม็ค ถ้าพื้นที่ย่อโหมคแอดเดรสปลายทางมีค่าไม่เท่ากับ 0

พื้นที่แอดเดรสปลายทาง (destination address field) มีความยาว 16 บิตหรือ 64 บิต ขึ้นอยู่กับค่าในพื้นที่ย่อโหมคแอดเดรสปลายทาง ใช้บอกแอดเดรสของผู้รับ ถ้ามีค่าเป็น 0xFFFF จะเป็นแอดเดรสสั้นกระจาย (broadcast short address) พื้นที่นี้จะรวมอยู่ในเฟรมของชั้นแม็ค พื้นที่ย่อโหมคแอดเดรสปลายทางมีค่าไม่เท่ากับ 0

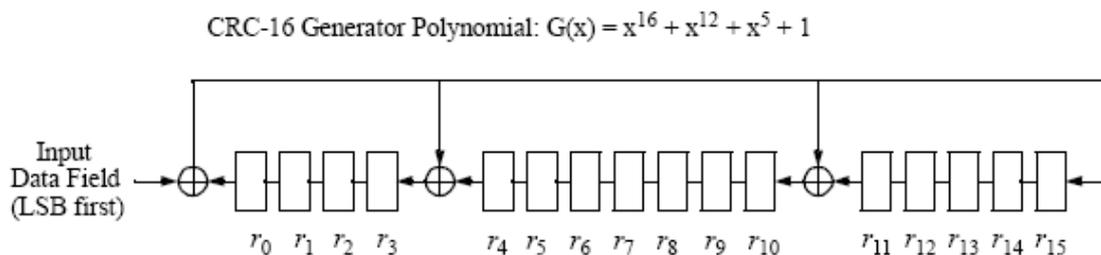
พื้นที่ตัวระบุกลุ่มต้นทาง (source PAN identifier field) มีความยาว 16 บิต บอกตัวระบุกลุ่มของผู้ส่งพื้นที่นี้จะรวมอยู่ในเฟรมของชั้นแม็ค ถ้าพื้นที่ย่อโหมคแอดเดรสต้นทางมีค่าไม่เท่ากับ 0 และพื้นที่ย่อกลุ่มภายในมีค่าเป็น 0 ตามลำดับ

พื้นที่แอดเดรสต้นทาง (source address field) จะมีความยาว 16 บิตหรือ 64 บิต ขึ้นอยู่กับค่าในพื้นที่ย่อโหมคแอดเดรสต้นทางบอกแอดเดรสของผู้ส่ง พื้นที่นี้จะรวมอยู่ในเฟรมของชั้นแม็ค ถ้าพื้นที่ย่อโหมคแอดเดรสต้นทางมีค่าไม่เท่ากับ 0

พื้นที่โหนดของเฟรม (frame payload field) มีความยาวไม่คงที่ ตามประเภทของเฟรม

เฟรมตรวจสอบลำดับ (frame check sequence: FCS) มีความยาว 16 บิต เป็น 16 Bit ITU-T CRC โดยคำนวณจากส่วนต้นของเม็ค และ โหนดเม็คจะคำนวณโดยใช้ มาตรฐานการสร้างพหุนามในสมการ $G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ เฟรมตรวจสอบลำดับ ดังภาพผนวกที่ ก6 สามารถทำการคำนวณได้โดยขั้นตอนต่อไปนี้

1. ให้ $M(x) = b_0x^{k-1} + b_1x^{k-2} + \dots + b_{k-2}x + b_{k-1}$ เป็นพหุนามที่ใช้แทนบิตของข้อมูลที่ต้องการหา FCS
2. นำ $M(x)$ คูณด้วย x^{16} จะได้พหุนาม $x^{16} \times M(x)$
3. ทำการหาร $x^{16} \times M(x)$ หารเอาเศษด้วย 2 ตัวสร้างพหุนาม (generator polynomial) $G_{16}(x)$ จะได้เศษที่เหลือจากการหาร $R(x) = r_0x^{15} + r_1x^{14} + \dots + r_{14}x + r_{15}$
4. เฟรมตรวจสอบลำดับคือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ $R(x)$



ภาพผนวกที่ ก6 ซีอาร์ซี-16 ตัวสร้างพหุนาม

ภาคผนวก ข

วงจรรวมรับส่งคลื่นวิทยุ CC2420

CC2420 เป็นชิพเดี่ยวที่ใช้งานในย่านความถี่ 2.4GHz ในมาตรฐาน IEEE 802.15.4 สามารถใช้รับและส่งได้ในตัวเดียวกัน โดยออกแบบมาเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการประหยัดพลังงาน และใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำแบบไร้สาย ตัว CC2420 สามารถรองรับการใช้งานกับอุปกรณ์ทั่วไป การควบคุม CC2420 สามารถทำได้โดยการควบคุมผ่านทางโหมดเอสพีไอ (synchronous peripheral interface :SPI) จากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยที่ขาของโหมดเอสพีไอของไมโครคอนโทรลเลอร์จะต่อกับขา SI, SO, SCLK, CSn ซึ่งเป็นขาที่ใช้ควบคุมตัว CC2420 โดยตรง

1. คุณสมบัติของวงจรรวมรับส่งคลื่นวิทยุ CC2420

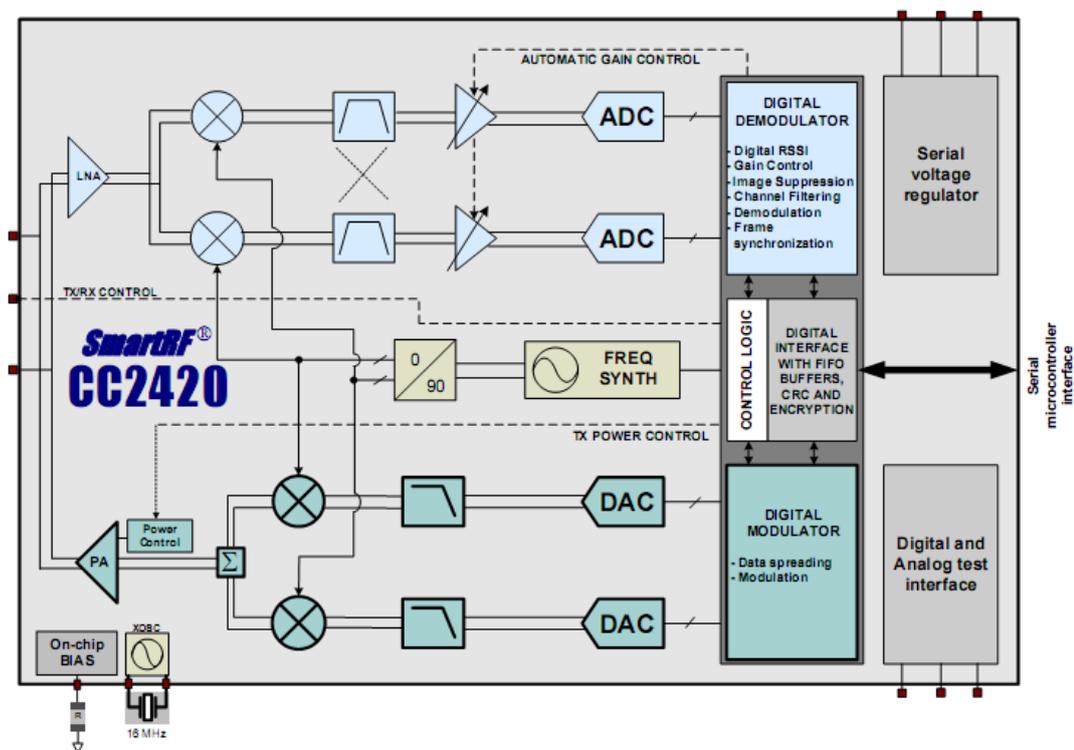
ใช้ย่านความถี่ 2.4 จิกะเฮิร์ต ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ส่งสัญญาณแบบดีเอสเอสเอส (direct sequence spread spectrum: DSSS) อัตราการส่งข้อมูล 250 กิโลบิตต่อวินาที รองรับการทำงานในโหมดเอฟเฟคทีฟ และอาร์เอฟเฟคทีฟ ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำประมาณ 18.8 มิลลิแอมป์ ในโหมดส่งข้อมูล และ 17.4 มิลลิแอมป์ ในโหมดรับข้อมูล ใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 2.1-3.6 โวลต์ เมื่อใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าภายใน (voltage regulator) หรือ 1.6-2.0 โวลต์ เมื่อใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าภายนอก ควบคุมกำลังส่งได้ผ่านการโปรแกรม บัฟเฟอร์สำหรับรับข้อมูลขนาด 128 ไบต์ และบัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูล 128 ไบต์ แสดงค่าความแรงของสัญญาณ และคุณภาพของสัญญาณ

2. การทำงานวงจรรวมรับส่งคลื่นวิทยุ CC2420

สัญญาณที่ได้รับจะถูกขยายโดยวงจขยายสัญญาณต่ำ (low noise amplifier: LNA) และถูกแยกออกเป็นเฟส I และเฟส Q สัญญาณที่ได้ในแต่ละเฟสจะถูกกรองและขยายซ้ำ ก่อนเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลที่วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog to digital converter: ADC)

เมื่อขา SFD มีค่าเป็น 1 เป็นการบ่งบอกว่ามีการตรวจพบจุดเริ่มต้นของเฟรม CC2420 จะทำการเก็บข้อมูลไว้ในบัฟเฟอร์สำหรับรับข้อมูล (RX FIFO) ซึ่งสามารถอ่านข้อมูลออกไปได้ผ่านอินเตอร์เฟซแบบเอสพีไอ การตรวจสอบความถูกต้องของเฟรมที่ได้รับ โดยการตรวจสอบ CRC นั้นถูกกระทำที่วงจรรวมแล้ว

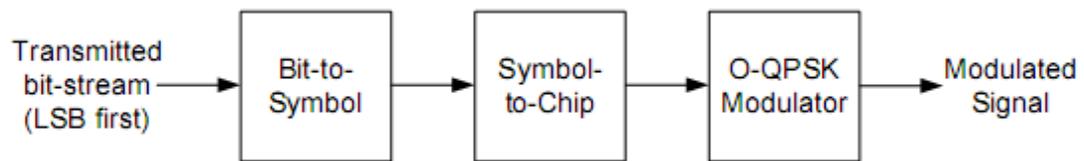
การส่งข้อมูลของ CC2420 นั้นกระทำโดยการ นำข้อมูลใส่ลงในบัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูล (TX FIFO) ผ่านอินเตอร์เฟสแบบเอสพีไอ ส่วนของเฟรมที่เป็นพรีแอมเบิล และ SFD นั้น วงจรรวม CC2420 จะสร้างขึ้นโดยอัตโนมัติ ข้อมูลแต่ละซิมเบิล (symbol) 4 บิต จะถูกขยายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 กลายเป็นข้อมูลขนาด 32 ซิฟ แบ่งออกเป็นเฟส I และเฟส Q แล้วส่งให้กับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (digital to analog converter: DAC) สัญญาณในแต่ละเฟสจะผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ แล้วนำมารวมกันเพื่อทำการขยายสัญญาณ ก่อนส่งให้กับสายอากาศต่อไป ดังภาพผนวกที่ ข1



ภาพผนวกที่ ข1 รายละเอียดของวงจรรวม CC2420

3. รูปแบบการมอดูเลต

เป็นกระบวนการทำดีเอสเอสเอส ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ดังภาพผนวกที่ ข2 แสดงบล็อกของการทำงาน ข้อมูลแต่ละซิมเบิลจะประกอบด้วย 4 บิต แต่ละซิมเบิลจะถูกแปลงเป็นข้อมูลขนาด 32 ซิฟ ดังตารางผนวกที่ ข1

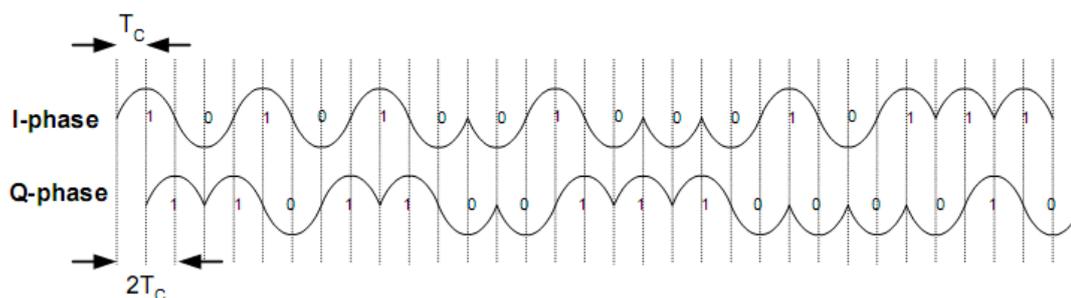


ภาพผนวกที่ ข2 แสดงฟังก์ชันการมอดูเลต

ตารางผนวกที่ ข1 การเปลี่ยนระหว่างซิมเบิลและชิพ

Symbol	Chip sequence ($C_0, C_1, C_2, \dots, C_{31}$)
0	1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0
1	1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0
2	0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0
3	0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1
4	0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1
5	0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0
6	1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1
7	1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1
8	1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1
9	1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1
10	0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1
11	0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0
12	0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0
13	0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1
14	1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0
15	1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0

เป็นการมอดูเลตแบบ โอควีพีเอสเค (offset-quadrature phase shift keying: O-QPSK) ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการมอดูเลตแบบเอ็มเอสเค (minimum shift keying: MSK) ข้อมูลแต่ละชิพจะมีรูปร่างเป็นครึ่งหนึ่งของไซน์ ถูกส่งไปในช่องสัญญาณของ I และ Q โดยมีคาบการส่งเท่ากับเวลาครึ่งหนึ่งของ 1 ชิป ดังภาพผนวกที่ ข3



ภาพผนวกที่ ข3 แสดงการส่งข้อมูลซิมเบิล “0”

4. การตั้งค่าวงจรรวม CC2420

วงจรรวม CC2420 สามารถตั้งค่าให้มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับงานแต่ละชนิดได้ โดยสามารถโปรแกรมผ่านรีจิสเตอร์ (register) ของ CC2420 ได้แก่ ตั้งให้อยู่ในโหมดรับหรือส่งข้อมูลเลือกช่องสัญญาณวิทยุ กำหนดกำลังในการส่งข้อมูล การเปิดปิดกระแส การเปิดหรือปิด ออสซิลเลเตอร์ผลึก (crystal oscillator) การช่วยรับข้อมูลโดยฮาร์ดแวร์ การเข้ารหัสข้อมูล

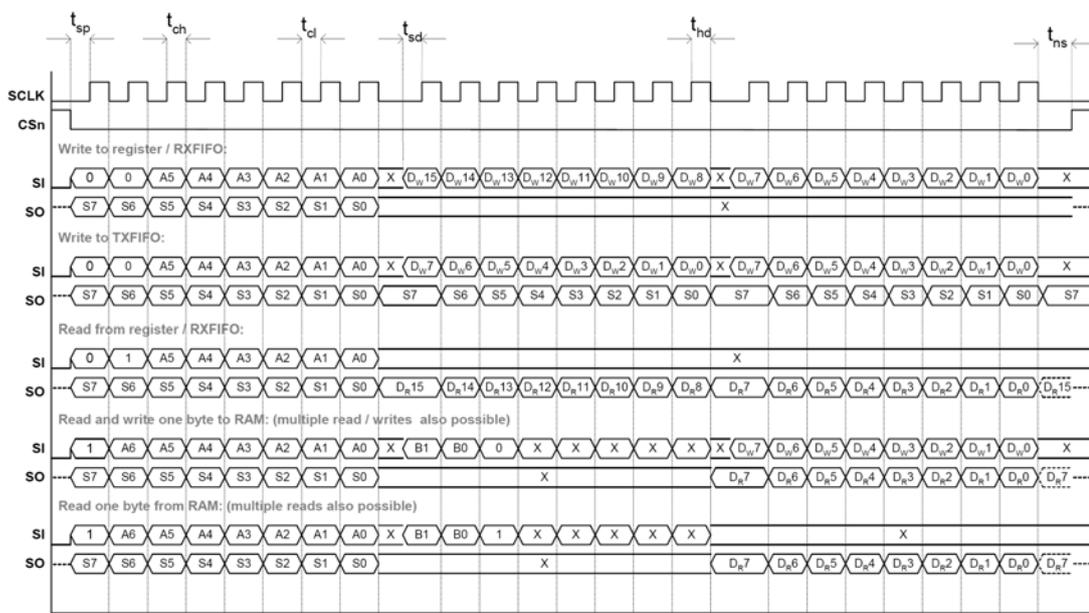
5. อินเทอร์เฟซแบบเอสพีไอ

CC2420 ถูกควบคุมโดยอินเทอร์เฟซแบบเอสพีไอ มีสายสัญญาณ 4 เส้น ได้แก่ SI, SO, SCLK และ CS_n โดยจะทำหน้าที่เป็นสลาฟ (slave) เท่านั้น

6. การเข้าถึงรีจิสเตอร์

ในวงจรรวม CC2420 ประกอบด้วยรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต จำนวน 33 รีจิสเตอร์, 15 รีจิสเตอร์คอมมานด์สโตรบ (command strobe) และรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต อีก 2 ชุดสำหรับรับและส่งข้อมูล การเข้าถึง รีจิสเตอร์เหล่านี้ ใช้การกำหนดแอดเดรส แบบ 6 บิต โดยมี บิต ที่ 6 และ 7 สำหรับบ่งบอกชนิดและวิธีการเข้าถึงรีจิสเตอร์

ในการอ่านหรือเขียนรีจิสเตอร์ 1 รอบ จะต้องมีการส่งข้อมูล 24 บิต โดยขาสัญญาณ CSn จะต้องมีค่าเป็น 0 ตลอดเวลาในการรับส่ง บิตแรกที่ส่งคือ บิตแรมและรีจิสเตอร์ (ram/register) ตั้งค่าเป็น 0 สำหรับการเข้าถึงรีจิสเตอร์ และตั้งค่าเป็น 1 สำหรับการเข้าถึงแรม บิตที่สอง คือ บิตอ่านและเขียน (read/write) (ตั้งค่าเป็น 0 สำหรับการเขียน และตั้งเป็น 1 สำหรับการอ่าน) ส่วนอีก 6 บิตที่เหลือ คือแอดเดรสของแรมหรือรีจิสเตอร์ ที่ต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูล ดังภาพผนวกที่ ข4



ภาพผนวกที่ ข4 ขั้นตอนการอ่านและเขียน แรมและรีจิสเตอร์

ช่วงเวลาที่กำลังส่งข้อมูลการอ่านหรือเขียนแรมหรือรีจิสเตอร์ไบต์แรก CC2420 จะทำการส่งไบต์แสดงสถานะ มาทางขาสัญญาณ SO เราสามารถที่จะรับไบต์แสดงสถานะ โดยการส่งคำสั่ง SNOP ในกรณีที่ต้องการรู้สถานะ แต่ไม่มีความต้องการที่จะอ่านหรือเขียนแรม หรือรีจิสเตอร์ไบต์แสดงสถานะ มีโครงสร้าง ดังตารางผนวกที่ ข2

ตารางผนวกที่ ข2 รายละเอียดบิตแสดงสถานะ (status byte)

บิตที่	ชื่อ	คำอธิบาย
7	-	ไม่ได้ใช้งาน
6	XOSC16M_STABLE	ใช้บอกว่า ออสซิลเลเตอร์ขนาด 16 เมกกะเฮิร์ต ทำงานหรือไม่ 0 หมายถึง ออสซิลเลเตอร์ยังไม่ทำงาน 1 หมายถึง ออสซิลเลเตอร์ทำงานแล้ว
5	TX_UNDERFLOW	ใช้บอกว่าเกิด FIFO น้อยเกินเก็บ (underflow) ระหว่างการส่งหรือไม่ 0 หมายถึง ไม่เกิด TX น้อยเกินเก็บ 1 หมายถึง เกิด TX น้อยเกินเก็บ
4	ENC_BUSY	ใช้บอกว่ามอดูลเข้ารหัสว่างหรือไม่ 0 หมายถึง มอดูลเข้ารหัสว่าง 1 หมายถึง มอดูลเข้ารหัสกำลังใช้งาน
3	TX_ACTIVE	ใช้บอกว่ามีการส่งข้อมูลเกิดขึ้นหรือไม่ 0 หมายถึง ยังไม่มีการส่งข้อมูล 1 หมายถึง อยู่ในระหว่างการส่งข้อมูล
2	LOCK	ใช้บอกว่าเฟสล็อกคูลูป (Phase Lock loop: PLL) ถูกล็อกหรือไม่ 0 หมายถึง เฟสล็อกคูลูปไม่ถูกล็อก 1 หมายถึง เฟสล็อกคูลูปถูกล็อก
1	RSSI_VALID	
0	-	ไม่ได้ใช้งาน

7. คอมมанд์สโตป

เป็นคำสั่งที่จะส่งให้กับ CC2420 เพื่อให้ทำงานอย่างใดอย่างหนึ่ง เมื่อออสซิลเลเตอร์ ยังไม่ทำงาน จะต้องทำการเปิดการทำงานด้วยคำสั่ง SXOSCON ก่อน เนื่องจากในสภาวะนี้ CC2420 จะไม่สนใจคำสั่งอื่นๆ โดยออสซิลเลเตอร์จะต้องเสถียรเสียก่อน CC2420 จึงจะพร้อมรับคำสั่งอื่น โดยสามารถดูได้จากบิต XOSC16M_STABLE ที่อยู่ในไบต์แสดงสถานะ

การเข้าถึงรีจิสเตอร์คอมมанд์สโตป มีวิธีการเช่นเดียวกับการเข้าถึงแรมหรือรีจิสเตอร์ แต่จะไม่มีคำสั่งส่งข้อมูลใดๆ เพิ่มหลังจากส่งคอมมанд์สโตป

การส่งคอมมанд์สโตปทำโดยกำหนดให้บิตแรมและรีจิสเตอร์ และ บิตอ่านและเขียนเป็น 0 และ 6 บิตที่เหลือมีค่าอยู่ในช่วง 0x00 ถึง 0x0E

8. การเข้าถึงแรม

วงจรรวม CC2420 มีแรมภายในขนาด 368 ไบต์ สามารถเขียนหรืออ่านได้ที่หลายๆ ไบต์ โดย CC2420 จะทำการเลื่อนแอดเดรสขึ้นเองทีละ 1 ไบต์หลังจากเขียนหรืออ่านข้อมูล

ในการเข้าถึงแรมจะต้องตั้งค่าบิตแรมและรีจิสเตอร์เป็น 1 การอ้างแอดเดรสของแรมมีขนาด 9 บิต ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ B1:0 (MSB) ใช้ในการเลือกแรมแบงก์ (ram bank) และ B6:0 (LSB) ใช้ในการเลือกแอดเดรสในแรมแบงก์นั้นๆ

แรมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก TXFIFO (แบงก์ 0), RXFIFO (แบงก์ 1) และ security (แบงก์ 2) โดย FIFO แบงก์ จะมีขนาด 128 ไบต์ แต่ความปลอดภัยแบงก์จะมีขนาด 112 ไบต์ รายละเอียดแอดเดรสของแรม เป็นไปตามรายละเอียดต่อไปนี้ ดังตารางผนวกที่ ข3

ตารางผนวกที่ ข3 รายละเอียดของแรม

แอดเดรส	การเรียงลำดับไบต์	ชื่อ	คำอธิบาย
0x16F – 0x16C	-	-	ไม่ใช้งาน
0x16B – 0x16A	MSB LSB	SHORTADR	16 บิต แอดเดรสแบบสั้นใช้เมื่อต้องการให้ CC2420 จำแอดเดรส
0x169 – 0x168	MSB LSB	PANID	16 บิต ตัวระบุกลุ่มใช้เมื่อต้องการให้ CC2420 จำแอดเดรส
0x167 – 0x160	MSB LSB	IEEEADR	64 บิต IEEE แอดเดรสใช้เมื่อต้องการให้ CC2420 จำแอดเดรส
0x15F – 0x150	MSB LSB	CBCSTATE	ที่เก็บข้อมูลชั่วคราวสำหรับการคำนวณ CBC-MAC
0x14F – 0x140	MSB (Flags) LSB	TXNONCE / TXCTR	
0x13F – 0x130	MSB LSB	KEY1	การเข้ารหัสกุญแจ (encryption key) 1
0x12F – 0x120	MSB LSB	SABUF	บัฟเฟอร์การเข้ารหัสแบบเดี่ยว (stand- alone encryption buffer) สำหรับอินพุตที่ เป็น plaintext และเอาท์พุทเป็น cipher text
0x11F – 0x110	MSB (Flags) LSB	RXNONCE / RXCTR	
0x10F – 0x100	MSB LSB	KEY0	การเข้ารหัสกุญแจ 0
0x0FF – 0x080	MSB LSB	RXFIFO	128 ไบต์ RXFIFO
0x07F – 0x000	MSB LSB	TXFIFO	128 ไบต์ TXFIFO

9. การเข้าถึง FIFO

TXFIFO โดยปกติแล้วจะเขียนได้อย่างเดียว แต่ในบางครั้งก็สามารถอ่านข้อมูลใน TXFIFO กลับได้ โดยวิธีการเข้าถึงแรม ในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วน RXFIFO สามารถอ่านและเขียนได้ การเขียน RXFIFO จะทำเพื่อการแก้ไขจุดบกพร่อง (debug) เท่านั้น

ขาสัญญาณ FIFO และ FIFOP จะเป็นตัวบ่งบอกข้อมูลที่อยู่ใน RXFIFO ไม่เกี่ยวข้องกับ TXFIFO แต่อย่างไร ในการลบข้อมูลที่อยู่ใน TXFIFO จะใช้คำสั่งคอมมานด์สโตป SFLUSHTX และเช่นเดียวกันกับการลบข้อมูลใน RXFIFO ก็จะใช้คำสั่ง SFLUSHRX

10. การเชื่อมต่อ CC2420 กับไมโครคอนโทรลเลอร์

ต้องทำการเชื่อมต่ออินเตอร์เฟสเอสพีไอของ MSP430 และ CC2420 เข้าด้วยกัน นอกจากนี้ยังต้องเชื่อมต่อ FIFO, FIFOP, VREG_EN, RESET เข้ากับ Port I/O ของ MSP430 ด้วยเช่นกัน

11. โหมดรับข้อมูล

ในโหมดรับข้อมูล ขาสัญญาณ SFD จะมีค่าเป็น 1 เมื่อตรวจพบการเริ่มต้นของเฟรมใหม่ และ SFD จะกลับเป็น 0 เมื่อข้อมูลไบต์สุดท้ายของเฟรม ได้รับ

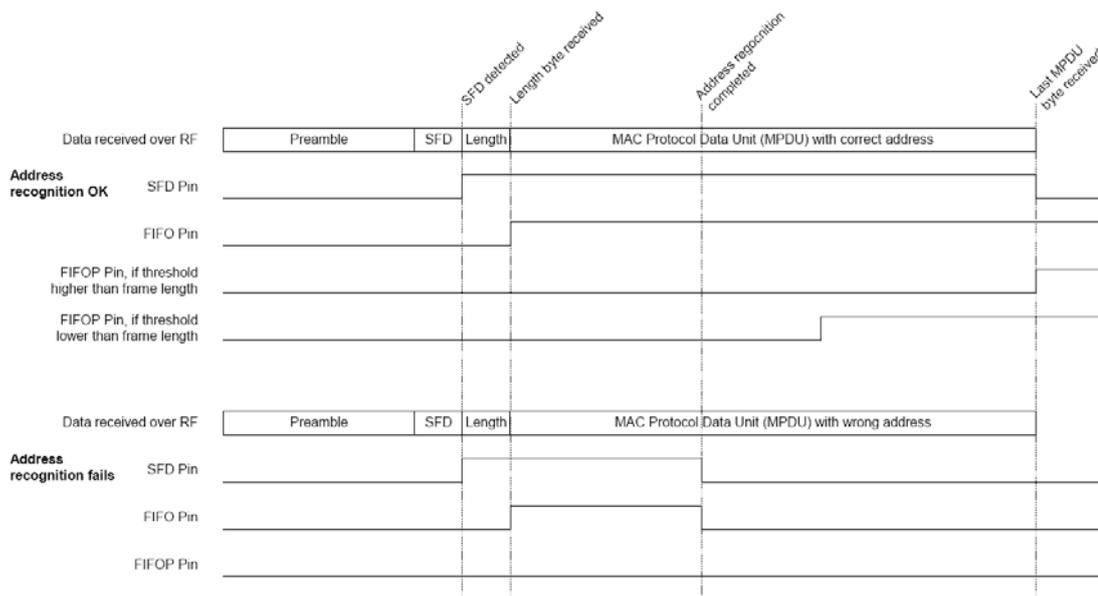
ขาสัญญาณ FIFO จะเป็น 1 เมื่อมีข้อมูลที่ยังไม่ได้อ่านอย่างน้อย 1 ไบต์อยู่ใน RXFIFO โดยข้อมูลไบต์แรกที่ยังเก็บอยู่ใน RXFIFO คือ ความยาวของเฟรม โดย FIFO จะมีค่าเป็น 1 ทันทีที่ได้รับไบต์แรก และจะกลับเป็น 0 ก็ต่อเมื่อไม่มีข้อมูลเหลืออยู่ใน RXFIFO แล้ว

ขาสัญญาณ FIFOP จะมีค่าเป็น 1 เมื่อมีจำนวนไบต์ของข้อมูลอยู่มากกว่าที่กำหนดไว้ใน IOCFG0.FIFOP_THR เมื่ออยู่ในโหมดจำแอดเดรส ขาสัญญาณ FIFOP จะไม่เป็น 1 ถ้าเฟรมที่เข้ามาไม่ผ่านการตรวจแอดเดรส

ขาสัญญาณ FIFOP จะมีค่าเป็น 1 ในอีกกรณี คือ เมื่อได้รับข้อมูลไบต์สุดท้ายของเฟรมนั้นๆ แล้ว ถ้าจำนวนข้อมูลใน RXFIFO ยังไม่เกินที่กำหนดไว้ FIFOP จะกลับเป็น 0 ทันทีที่เริ่มอ่านข้อมูลไบต์แรกออกจาก RXFIFO

RXFIFO สามารถเก็บข้อมูลได้สูงสุด 128 ไบต์ ซึ่งอาจจะประกอบด้วยหลายเฟรมรวมกันก็ได้ ถ้าเกิดการมากเกินไป (overflow) ใน RXFIFO แล้ว CC2420 จะส่งสัญญาณให้กับ MSP430 เพื่อบอกว่าเกิดการมากเกินไปใน RXFIFO ขึ้น โดยให้ให้สัญญาณ FIFO เป็น 0 พร้อมกับ FIFOP เป็น 1

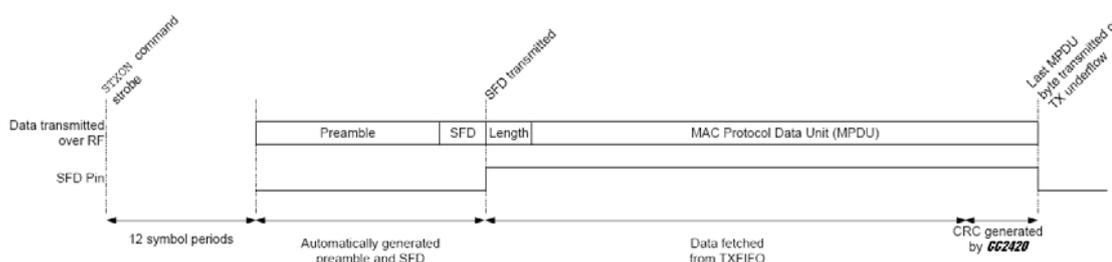
หลังจากเกิดการมากเกินไปใน RXFIFO แล้ว MSP430 จะต้องทำการลบข้อมูลใน RXFIFOทิ้ง โดยการส่งคำสั่ง SFLUSHRX โดยจะต้องส่งคำสั่งนี้ไป 2 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าสถานะของขาสัญญาณ SFD กลับสภาวะสู่ปกติ ดังภาพผนวกที่ ข5



ภาพผนวกที่ ข5 ขาสัญญาณต่างๆ เมื่ออยู่ในโหมดรับข้อมูล

12. โหมคส่งข้อมูล

ในขณะที่อยู่ในโหมคส่งข้อมูล ขาสัญญาณ FIFO และ FIFOP ยังคงทำงานสัมพันธ์กับ RXFIFO เช่นเดิม ขาสัญญาณ SFD จะเป็น 1 เมื่อพื้นที่จุดเริ่มต้นของเฟรม ถูกส่งออกไปแล้ว และจะกลับเป็น 0 อีกครั้งเมื่อกลุ่มข้อมูล โปรโตคอลชั้นแม็คถูกส่งออกไปแล้วทั้งหมดหรือเมื่อเกิดเหตุการณ์น้อยเกินเก็บ ดังภาพผนวกที่ ข6



ภาพผนวกที่ ข6 ขาสัญญาณต่างๆ เมื่ออยู่ในโหมคส่งข้อมูล

13. Address Recognition

โดยจะทำหน้าที่ตรวจสอบว่าเฟรมที่ได้รับมีคุณลักษณะไม่ตรงกับลักษณะทั้งหมดในข้างล่าง CC2420 จะละทิ้งเฟรมนั้นจะทำการลบข้อมูลของเฟรมนั้นออกจาก RXFIFO ซึ่ง CC2420 สามารถทำการจำแอดเดรสของตัวเองได้ โดยสามารถเปิดหรือปิด ความสามารถในการจำแอดเดรสผ่านบิต MDMCTRL0.ADR_DECODE

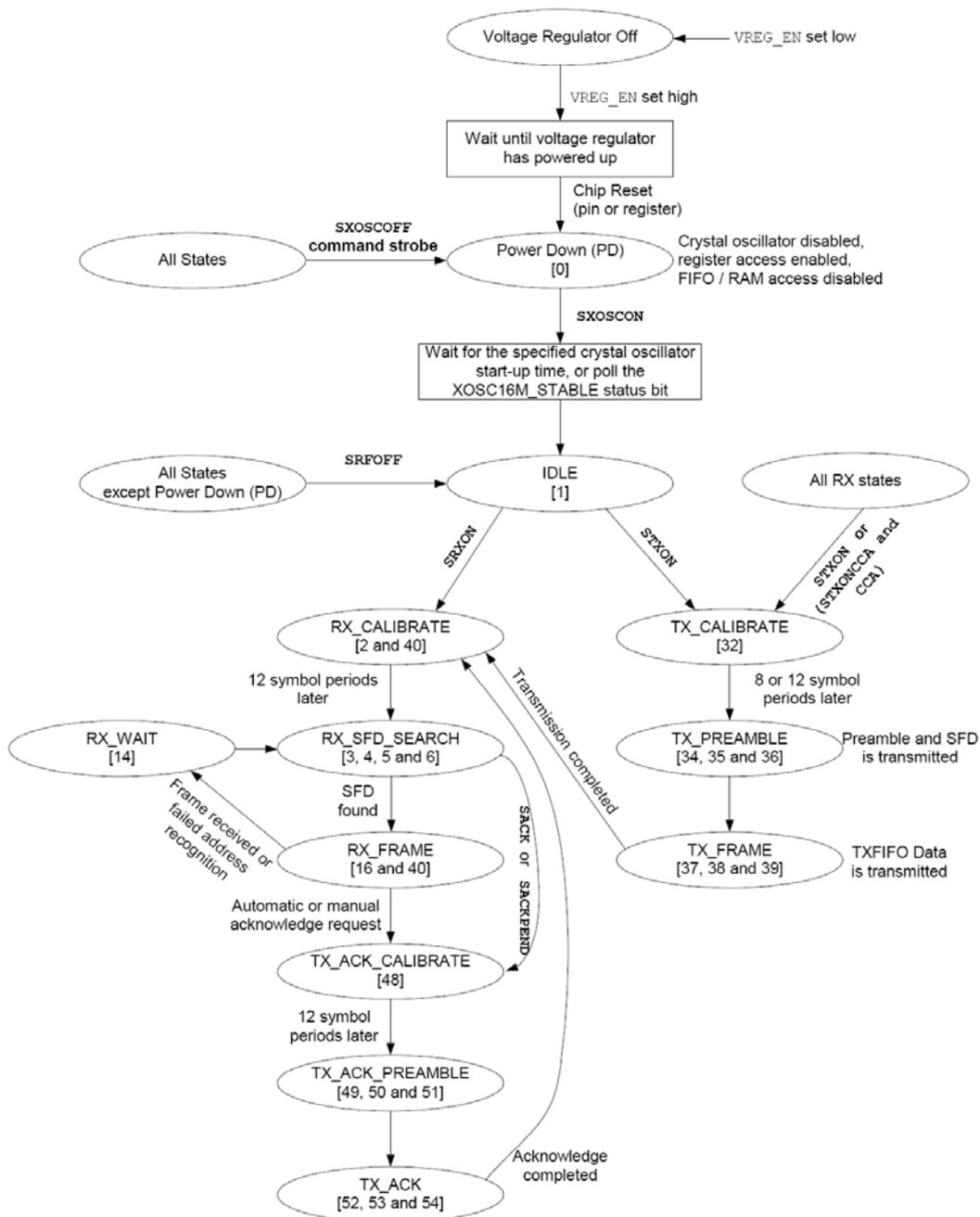
การกำหนดให้ CC2420 จำแอดเดรสจะต้องอยู่บนสมมติฐานในการใช้งานต่อไปนี้ พื้นที่ชนิดเฟรมจะต้องไม่เป็นแบบไม่ถูกต้อง (illegal) ถ้าชนิดเฟรมกำหนดเป็นเฟรมบีคอนแล้ว CC2420 จะทำการเปรียบเทียบตัวระบุกลุ่มต้นทาง กับ ใอดิกลุ่มแม็ค (macPANId) ถ้าตรงกันจึงจะรับเฟรมนั้นเข้ามา ยกเว้นในกรณีใอดิกลุ่มแม็คเป็น 0xFFFF จะรับเฟรมเข้ามาทั้งหมดโดยไม่สนใจตัวระบุกลุ่มต้นทาง ถ้าในเฟรมมีตัวระบุกลุ่มปลายทางจะทำการเปรียบเทียบกับใอดิกลุ่มแม็ค ยกเว้นในกรณีที่เป็นตัวระบุกลุ่มกระจาย (0xFFFF) ถ้าในเฟรมมีแอดเดรสปลายทางแบบสั้น จะทำการเปรียบเทียบกับ แม็คแอดเดรสแบบสั้น (macShortAddress) ยกเว้นในกรณีที่เป็นแอดเดรสกระจาย (0xFFFF) หรือถ้าในเฟรมมีแอดเดรสปลายทางแบบกว้าง ก็จะทำกรเปรียบเทียบกับแอดเดรสแบบกว้าง

ถ้าในเฟรมมีเพียงพื้นที่แอดเดรสต้นทางอย่างเดียวเฟรมจะถูกรับก็ต่อเมื่อศูนย์กลางของเครือข่าย และตัวระบุกลุ่มต้นทางตรงกับไอดีกลุ่มแม่ค่านั้น

14. สถานะระบบปฏิบัติงานของการควบคุม CC2420

ภายใน CC2420 ถูกออกแบบสถานะระบบปฏิบัติงาน (state machine) เพื่อรองรับขั้นตอนการทำงานในโหมดต่างๆ กัน การเปลี่ยนสถานะ ทำได้โดยการส่งคอมมานด์สโตปหรือเมื่อเกิดเหตุการณ์บางอย่างขึ้น เช่น การตรวจพบจุดเริ่มต้นเฟรม เมื่ออยู่ในโหมดรับข้อมูล เป็นต้น

ก่อนที่จะเข้าสู่โหมดรับหรือส่ง จะต้องเปิดการทำงานของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและออสซิลเลเตอร์ผลึกก่อน โดยสามารถเปิดออสซิลเลเตอร์ผลึกผ่านคำสั่ง SXOSCON และสามารถตรวจสอบการทำงานของออสซิลเลเตอร์ผลึกว่าเสถียรหรือไม่ โดยดูจากบิต XOSC16M_STABLE ที่อยู่ในไบต์แสดงสถานะ ดังภาพผนวกที่ ข7



ภาพผนวกที่ ๗ สถานะระบบปฏิบัติงานของ CC2420

ภาคผนวก ค

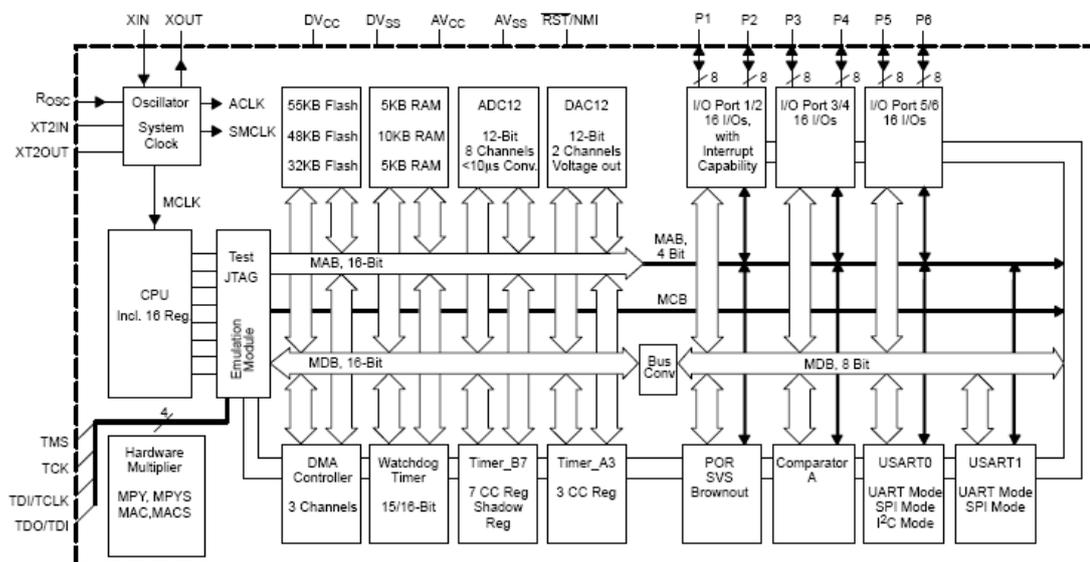
ไมโครคอนโทรลเลอร์ MSP430F1611

สิทธิพล (2005) ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MSP430 (Mixed-Signal Processors) นี้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต ที่บริษัท Texas Instruments เป็นผู้ผลิตขึ้นมาซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายเบอร์ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้จะใช้กำลังไฟฟ้าต่ำมาก มีความยืดหยุ่นในระบบนาฬิกา (clock) ลักษณะตัวถังก็จะเป็นแบบติดพื้นผิวซึ่งทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็ก ในส่วนพอร์ตอินพุตและเอาต์พุต (port I/O) และทรัพยากรรอบข้างจะถูกออกแบบให้มีความยืดหยุ่นใช้งานได้ง่าย จำนวนขาในการใช้งานและหน่วยความจำแฟลช (flash memory) จะมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละเบอร์ การดาวน์โหลดโปรแกรมจะดาวน์โหลดผ่านอุปกรณ์ต่อร่วมเจแท็ก (JTAG) ผ่านทางพอร์ตขนาน (Printer Port) โดยเจแท็กจะเป็นมาตรฐาน JEDEC ใช้ 4 ขา คือ TMS, TCK, TDI และ TDO โดยใช้การเลื่อนรีจิสเตอร์ หรือดาวน์โหลดผ่านทางวงจรมูลฐานบูตสเตรปโหลด (bootstrap Loader) ใช้กับโปรเซสเซอร์ของ MSP430 ที่เป็นแบบแฟลช (flash) ทั้งหมด ใช้เชื่อมต่อแบบอะซิงโครนัส (asynchronous) ด้วยอัตราเร็วมาตรฐาน 9600 โบต์ (Baud) สำหรับ MSP430 รุ่นที่มีแรม (random access memory: RAM) 10 กิโลไบต์ จะสามารถดาวน์โหลดโดยใช้บูตสเตรปโหลดซึ่งมีอัตราเร็ว 38400 โบต์ โดยการทำงานเริ่มด้วยการดาวน์โหลดบูตสเตรปโหลด ด้วยอัตราเร็ว 9600 โบต์ แล้วจึงทำการแฟลช ที่อัตราเร็ว 38400 โบต์ เหมาะกับการลงโปรแกรมที่ขนาดเกิน 10 กิโลไบต์ ทำให้สามารถลงโปรแกรมได้เร็วขึ้น

1. คุณสมบัติของ MSP430F1611

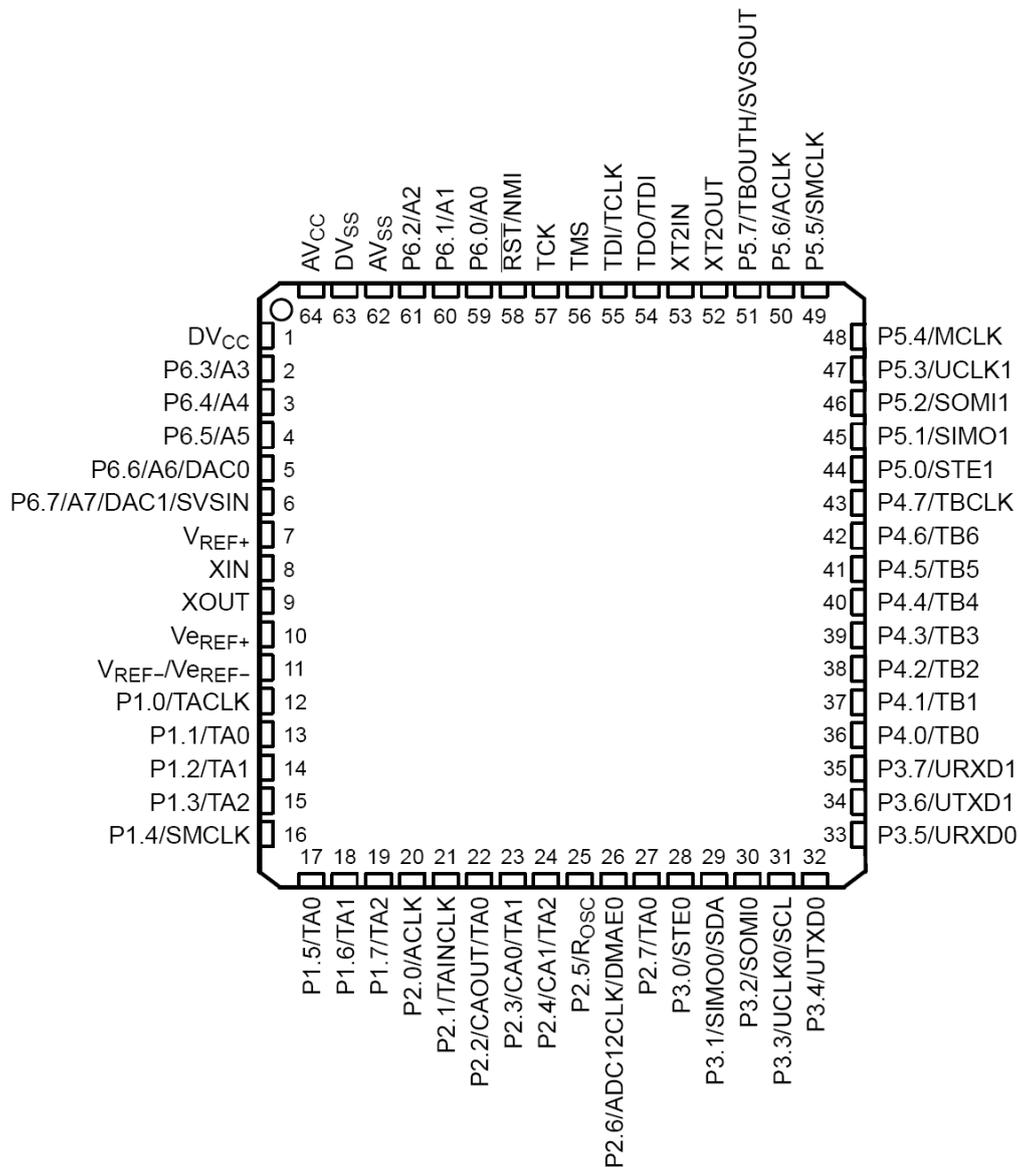
ทำงานที่แรงดัน 1.8-3.6 โวลต์ ความสิ้นเปลืองทางด้านกำลังงานต่ำ โดยที่โหมดทำงาน (active) กินกระแส 330 ไมโครแอมป์ ที่ 1 เมกกะเฮิร์ต 2.2 โวลต์ ที่โหมดเตรียมพร้อม (standby): 1.1 ไมโครแอมป์ ที่โหมดปิด (ram retention): 0.2 ไมโครแอมป์ ตื่นจากโหมดเตรียมพร้อมใช้เวลา 6 ไมโครวินาที มีสัญญาณนาฬิกาภายใน และสัญญาณนาฬิกาภายนอก ซึ่งใช้สัญญาณนาฬิกาที่ความถี่ 32 กิโลเฮิร์ต ถึง 8 เมกกะเฮิร์ต ใช้กระแสไฟต่ำเนื่องจากมีโหมดประหยัดพลังงานถึง 5 โหมด มีตัวจับแรงดันไฟฟ้า (brownout detector) ถ้าแรงดันไฟฟ้าต่ำเกินไปก็จะทำการรีเซตตัวเอง สามารถดาวน์โหลดโปรแกรมผ่านทางวงจรมูลฐานบูตสเตรปโหลดได้ มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแอนะล็อกบนไมโครคอนโทรลเลอร์ การติดต่อเป็นแบบอนุกรมประกอบด้วย เอสพีไอ 2 ช่อง ไอสแควร์ซี 1 ช่อง มีไทมเมอร์ (timer) ขนาด 16 บิต โดยมี ไทมเมอร์ A 3 ช่อง ไทมเมอร์ B 7 ช่อง ตัวแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัลมีความละเอียด 12 บิต และมีหน่วยความจำแฟลช

48 กิโลไบต์ บวกกับ 256 ไบต์ แรม 10 กิโลไบต์ ไมโครคอนโทรลเลอร์มีโครงสร้างสถาปัตยกรรมแบบฟอนนอยมันน์ (von-neumann) ดังภาพผนวกที่ ค1



ภาพผนวกที่ ค1 โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีขาทั้งหมด 64 ขา โดยเป็นพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตขนาด 8 บิต มีด้วยกันทั้งหมดจำนวน 6 พอร์ตคือ P1, P2, P3, P4, P5 และ P6 รวมทั้งหมด 48 ขา ลักษณะตัวถังเป็นมี 2 แบบ คือแบบ 64 LQFP กับแบบ 64QFN ดังภาพผนวกที่ ค2

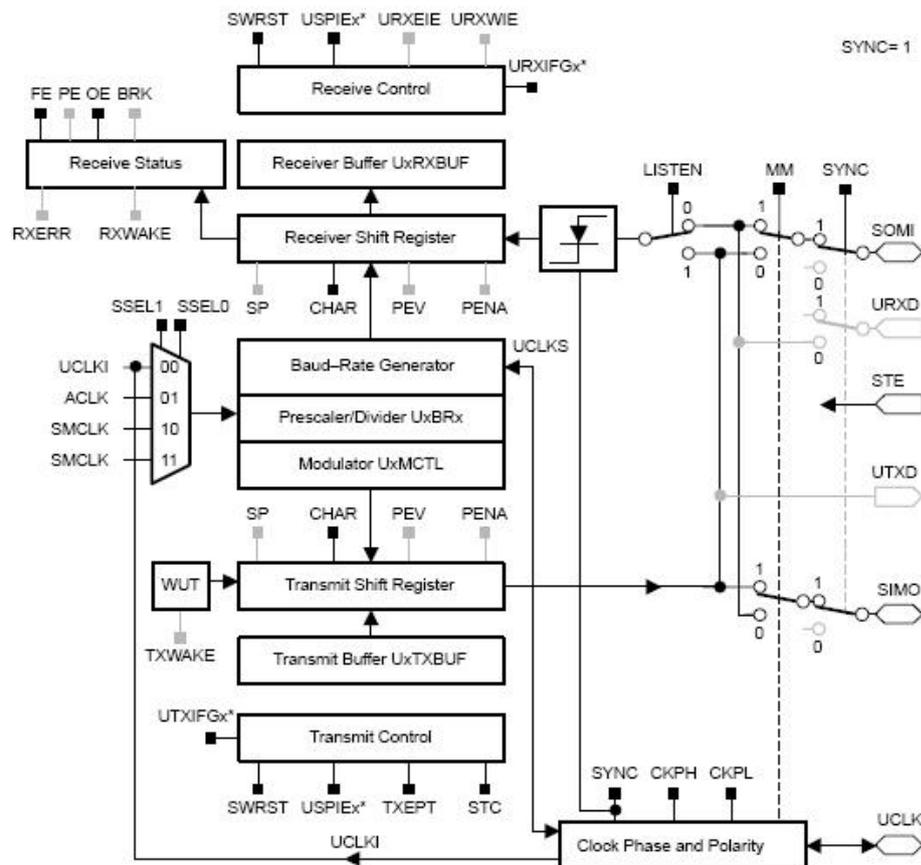


ภาพผนวกที่ ค2 ขาของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ MSP430F1611

การใช้งาน MSP430F1611 จะเน้นการทำงานของโหมดเอสพีไอ เป็นหลักเนื่องจากได้ใช้ติดต่อกับ CC2420 โดยตรง ทั้งนี้การทำงานของพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตเป็นสิ่งที่เข้าใจได้ง่ายจึงขอละไว้ ณ ที่นี้

2. การใช้งานเชื่อมต่อยูอาร์ทีแบบโหมดเอสพีไอ

การใช้งานยูอาร์ทีแบบโหมดเอสพีไอ ซึ่งการติดต่อสื่อสารแบบเอสพีไอนี้ MSP430 จะมี ขาสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารอยู่ด้วยกัน 4 ขาสัญญาณอันได้แก่ SIMO, SOMI, UCLK และ STE โดย โหมด SPI นี้จะถูกเลือกเมื่อบิต SYNC ถูกเซตเท่ากับ 1 และบิต I2C ถูกเคลียร์เท่ากับ 0 ดังภาพผนวกที่ ค3 คุณสมบัติของ MSP430 ในโหมด SPI สามารถสรุปได้ดังนี้ จำนวนบิตในการส่ง ข้อมูลสามารถกำหนดได้ที่ 7 บิตหรือ 8 บิต การทำงานของเอสพีไอ สามารถเลือกการทำงานเป็น โหมดมาสเตอร์หรือโหมดสลาฟได้ การเลื่อนรีจิสเตอร์และบัฟเฟอร์รีจิสเตอร์สำหรับการรับและ การส่ง จะแยกเป็นอิสระกัน สามารถเลือกควบคุมพัลส์และเฟส การทำงานของสัญญาณนาฬิกาได้ การขัดจังหวะ (interrupt) ในการรับและการส่งจะแยกเป็นอิสระต่อกัน สามารถโปรแกรมความถี่ ที่ขาสัญญาณ UCLK ในโหมดมาสเตอร์ได้



ภาพผนวกที่ ค3 โครงสร้างยูอาร์ทีแบบโหมดเอสพีไอ

2.1 การทำงานโหมด SPI

ในโหมด SPI นี้ การรับส่งข้อมูลจะเป็นแบบอนุกรม ซึ่งจะใช้ สัญญาณนาฬิกาจากตัว Master เป็นตัวควบคุมการรับส่งข้อมูลให้สอดคล้องกับตัวสลาฟ ที่นำมาต่อ สำหรับขา STE จะเพิ่มเข้ามาเพื่อใช้ในการใช้งาน อุปกรณ์ในการรับส่งข้อมูล ซึ่งจะใช้ตัวมาสเตอร์เป็นตัวควบคุมขาสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารแบบเอสพีไอ ทั้ง 4 ขาสัญญาณมีรายละเอียดดังนี้ ที่ขาสัญญาณ SIMO (slave in master out) ในโหมดมาสเตอร์ขาสัญญาณ SIMO ก็คือสายข้อมูลออก และในโหมดสลาฟขาสัญญาณ SIMO ก็คือสายข้อมูลเข้า ที่ขาสัญญาณ SOMI (slave out master in) ในโหมดมาสเตอร์ขาสัญญาณ SIMO ก็คือสายข้อมูลเข้า และในโหมดสลาฟขาสัญญาณ SIMO ก็คือสายข้อมูลออก ที่ขาสัญญาณ UCLK (uart spi clock) ในโหมดมาสเตอร์ขาสัญญาณ UCLK ก็คือสายสัญญาณนาฬิกาออก ในโหมดสลาฟ ขาสัญญาณ UCLK ก็คือสายสัญญาณนาฬิกาเข้า ที่ขาสัญญาณ STE (slave transmit enable) จะถูกใช้ในโหมด 4 ขา จะไม่ใช้ในโหมด 3 ขา โดยในโหมดมาสเตอร์ 4 ขา ที่ขาสัญญาณ STE เป็น 1 ขาสัญญาณ SIMO และ UCLK จะทำงานปกติ ที่ขาสัญญาณ STE เป็น 0 ขาสัญญาณ SIMO และ UCLK จะถูกเซตให้เป็นทิศทางการเข้า (input direction) ในโหมดสลาฟ 4 ขา ที่ขาสัญญาณ STE เป็น 1 การทำงานในส่วนของ RX/TX ของตัวสลาฟจะถูกให้ใช้งาน และขาสัญญาณ SOMI จะเปลี่ยนมาเป็นทิศทางการเข้า และที่ขาสัญญาณ STE เป็น 0 การทำงานในส่วนของ RX/TX ของตัวสลาฟ จะถูกใช้งาน และขา SOMI จะทำงานปกติ

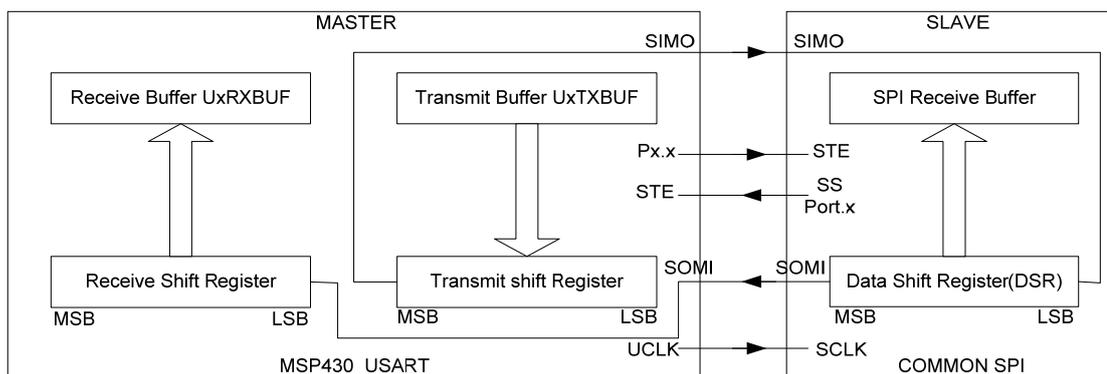
2.1.1 สภาวะเริ่มต้นทำงานและสภาวะรีเซต ของโหมดเอสพีไอ

เอสพีไอจะถูกรีเซต เมื่อมีสัญญาณ PUC เกิดขึ้น (จะเกิดขณะจ่ายไฟให้ MCU) หรือถูกรีเซตจากการเซตที่บิต SWRST ก็ได้ หลังจากมีสัญญาณ PUC เกิดขึ้นบิต SWRST ก็จะถูกเซตให้อัตโนมัติ จะทำให้เอสพีไออยู่ในสภาวะรีเซตคือเมื่อบิต SWRST ถูกเซต จะเป็นการรีเซตบิต URXIE_x, UTXIE_x, URXIFG_x, OE และ FE และจะเป็นการเซตแฟลกซ์ UTXIFG ส่วน USPIE_x จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามการเซตของบิต SWRST เมื่อบิต SWRST ถูกเคลียร์เอสพีไอ ก็จะทำงานสรุปขั้นตอน ในการกำหนดสภาวะเริ่มต้นให้กับ SPI เวลาจะใช้งานดังนี้ เซตบิต SWRST (ปกติจะเซตเป็น 1 เสมอ หลังจากที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ถูกรีเซต) กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับรีจิสเตอร์ยูอาร์ทีทั้งหมด ตามที่ผู้ใช้ต้องการจะใช้งานขณะที่บิต SWRST เท่ากับ 1 ใช้งานมอดูลยูอาร์ทีผ่านรีจิสเตอร์ MEX โดยการเซตบิต URXE_x และ UTXE_x สำหรับการรับส่ง เคลียร์บิต SWRST โดยใช้

ซอฟต์แวร์ ใช้งานการขัดจังหวะ (ถ้าต้องการใช้) ผ่านรีจิสเตอร์ IEx ในบิต URXIE_x และ UTXIE_x ตามที่จะใช้งาน

2.1.2 การทำงานเป็นโหมด Master

จากภาพผนวกที่ ค4 แสดงการติดต่อในโหมดเอสพีไอระหว่างมาสเตอร์กับสลาฟ ในรูปแบบการติดต่อแบบ 3 ขา และ 4 ขา เมื่อเริ่มต้นทำการส่งข้อมูล ข้อมูลจะถูกส่งไปพักไว้ที่บัฟเฟอร์ UxTXBUF จากนั้นเมื่อรีจิสเตอร์เลื่อน TX ว่าง ข้อมูลก็จะถูกส่งมายังรีจิสเตอร์เลื่อน TX นี้ แล้วจึงส่งออกไปยังขา SIMO โดยบิตสูงจะถูกส่งออกไปก่อน ส่วนข้อมูลที่เข้ามาทางขา SOMI จะถูกเลื่อนเข้าไปยังรีจิสเตอร์เลื่อน RX โดยจะเลื่อนบิตสูงเข้ามาก่อนเช่นกัน เมื่อรับข้อมูลเข้ามาแล้ว ข้อมูลที่รับเข้ามาจะถูกเคลื่อนย้ายจากรีจิสเตอร์เลื่อน RX ไปยังบัฟเฟอร์ UxRXBUF และจะทำให้แฟล็กซ์ URXIFG_x ถูกเซต แสดงว่าการรับส่งทำงานสมบูรณ์



ภาพผนวกที่ ค4 ยูอาร์ทมาสเตอร์และสลาฟภายนอก

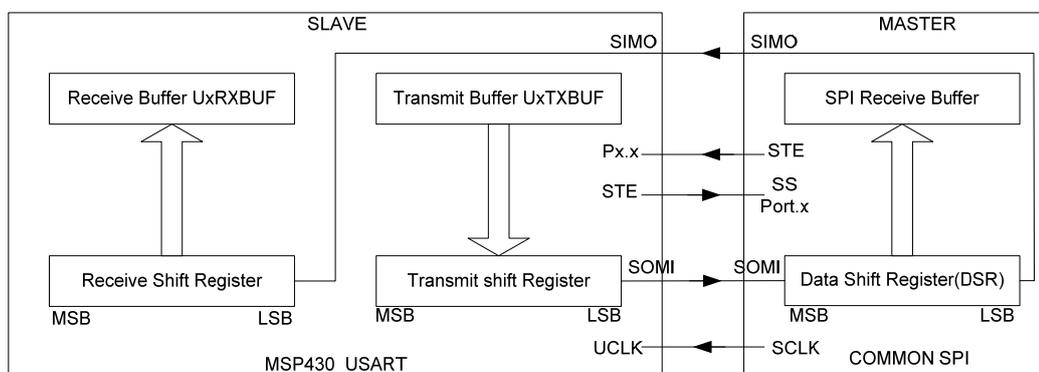
ในส่วนของแฟล็กซ์การขัดจังหวะ (interrupt flag) สำหรับการส่งคือ UTXIFG_x จะเซตต่อเมื่อมีการเคลื่อนย้ายข้อมูลจาก UxTXBUF ไปยังรีจิสเตอร์เลื่อน TX และ UxTXBUF พร้อมสำหรับข้อมูลใหม่

สำหรับในเอสพีไอในโหมดมาสเตอร์ 4 ขา ขาสัญญาณ STE จะถูกใช้เพื่อป้องกันการชนกันของมาสเตอร์ตัวอื่นๆ โดยมาสเตอร์จะทำงานปกติเมื่อขาสัญญาณ STE เท่ากับ 1 และเมื่อขาสัญญาณ STE เท่ากับ 0 จะมีผลคือ ขาสัญญาณ SOMI และ UCLK จะถูกเซตไปเป็นอินพุตใน

ระยะเวลาหนึ่ง และบิต FE จะเซตเพื่อแสดงการติดต่อสื่อสารที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งจะถูกขัดจังหวะอยู่
โดยผู้ใช้

2.1.3 การทำงานเป็นโหมด Slave

จากภาพผนวกที่ ค5 แสดงการติดต่อในโหมดเอสพีไอระหว่างมาสเตอร์กับสลาฟ
ในรูปแบบการติดต่อแบบ 3 ขา และ 4 ขา ความสำเร็จ UCLK จะถูกใช้เป็นสัญญาณนาฬิกาเข้า
ดังนั้นสัญญาณนาฬิกาจะต้องจ่ายมาจากตัวมาสเตอร์ที่อยู่ภายนอก อัตราการส่งข้อมูลจะถูกกำหนด
โดยสัญญาณนาฬิกา นี้ โดยจะไม่มีกรสร้างอัตราบอด (baud rate) จากซีพียูขึ้นมา เริ่มต้นข้อมูลจะ
ถูกเขียนไปยัง UxTXBUF จากนั้นก็จะเคลื่อนย้ายไปยังรีจิสเตอร์เลื่อน TX ก่อนที่จะมีการส่งข้อมูล
ไปยังขา SIMO ด้วย UCLK สัญญาณนาฬิกาสำหรับข้อมูลที่อยู่บนขา SIMO จะถูกเลื่อนไปยัง
รีจิสเตอร์เลื่อน RX และถูกส่งต่อไปยัง UxRXBUF หลังจากที่ข้อมูลเคลื่อนที่จากรีจิสเตอร์เลื่อน RX
ไปยัง UxRXBUF จะทำให้แฟล็กซ์ขัดจังหวะ URXIFGx ถูกเซตเพื่อแสดงว่าข้อมูลถูกรับแล้ว บิต
OE จะถูกเซต เมื่อข้อมูลที่รับเข้ามาตอนแรกยังไม่ถูกอ่านจาก UxRXBUF ก่อนที่จะมีข้อมูลใหม่
เคลื่อนที่เข้ามายัง UxRXBUF ทับข้อมูลเดิม



ภาพผนวกที่ ค5 ยูอาร์ทีสลาฟและมาสเตอร์ภายนอก

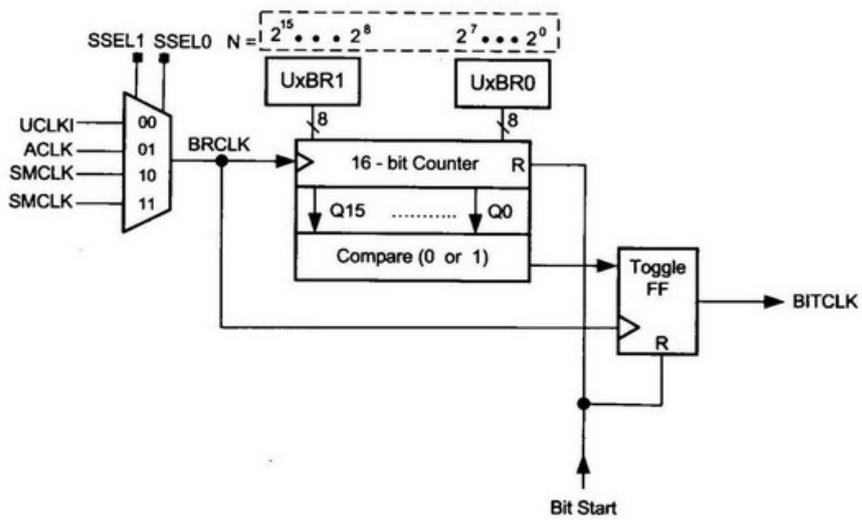
สำหรับเอสพีไอในโหมดสลาฟ 4 ขา ความสำเร็จ STE จะถูกใช้โดยสลาฟเพื่อ
ใช้งาน การทำงานในส่วนของการส่งและรับข้อมูล ซึ่งเอสพีไอที่เป็นมาสเตอร์จะเป็นตัวจัดการ
ในส่วนนี้ เมื่อขา STE เท่ากับ 0 สลาฟจะทำงานเป็นปกติ แต่เมื่อขา STE เท่ากับ 1 จะมีผลดังนี้
การทำงานของภาครับที่ดำเนินอยู่ที่ขา SIMO จะถูกหยุด ขา SOMI จะถูกกำหนดให้อยู่ในทิศ
ทางเข้า

2.1.4 การ Enable SPI

ในการรับส่งข้อมูลของเอสพีไอนั้นจะต้องทำการใช้งาน บิต USPIEx ซึ่งก็คือ การใช้งานหรือไม่ใช้งานยูอาร์ทีไน โหมดเอสพีไอ เมื่อบิต USPIEX เท่ากับ 0 ยูอาร์ทีไนจะหยุดทำงาน หลังจากที่มีการส่งข้อมูลสมบูรณ์แล้ว หรือหยุดโดยตรงถ้าไม่มีการทำงานในส่วนของคุณอาร์ทีไน ยูอาร์ทีไน จะถูกไม่ใช้งานพร้อมกับการส่งข้อมูลสิ้นสุดลงเมื่อมีสัญญาณ PUC เกิดขึ้นหรือบิต SWRST ถูกเซต

2.1.5 การควบคุมสัญญาณนาฬิกาอนุกรมและกำหนดอัตราบอด

เมื่อบิต MM เท่ากับ 1 เอสพีไอจะทำงานเป็นมาสเตอร์และขาสัญญาณ UCLK จะทำงานเป็นสัญญาณนาฬิกาออก โดยอัตราบอดที่ถูกสร้างขึ้นจะส่งออกมาที่ขา UCLK เมื่อบิต MM เท่ากับ 0 เอสพีไอจะทำงานเป็นสลาฟ ขาสัญญาณ UCLK จะทำงานเป็นสัญญาณนาฬิกาเข้าคือจะรับ สัญญาณนาฬิกาจากภายนอกเข้ามา อัตราบอดที่สร้างขึ้นมาจะไม่ถูกใช้งาน รวมทั้งจะไม่สนใจการ เซตของบิต SSELx ดังภาพผนวกที่ ๑๖



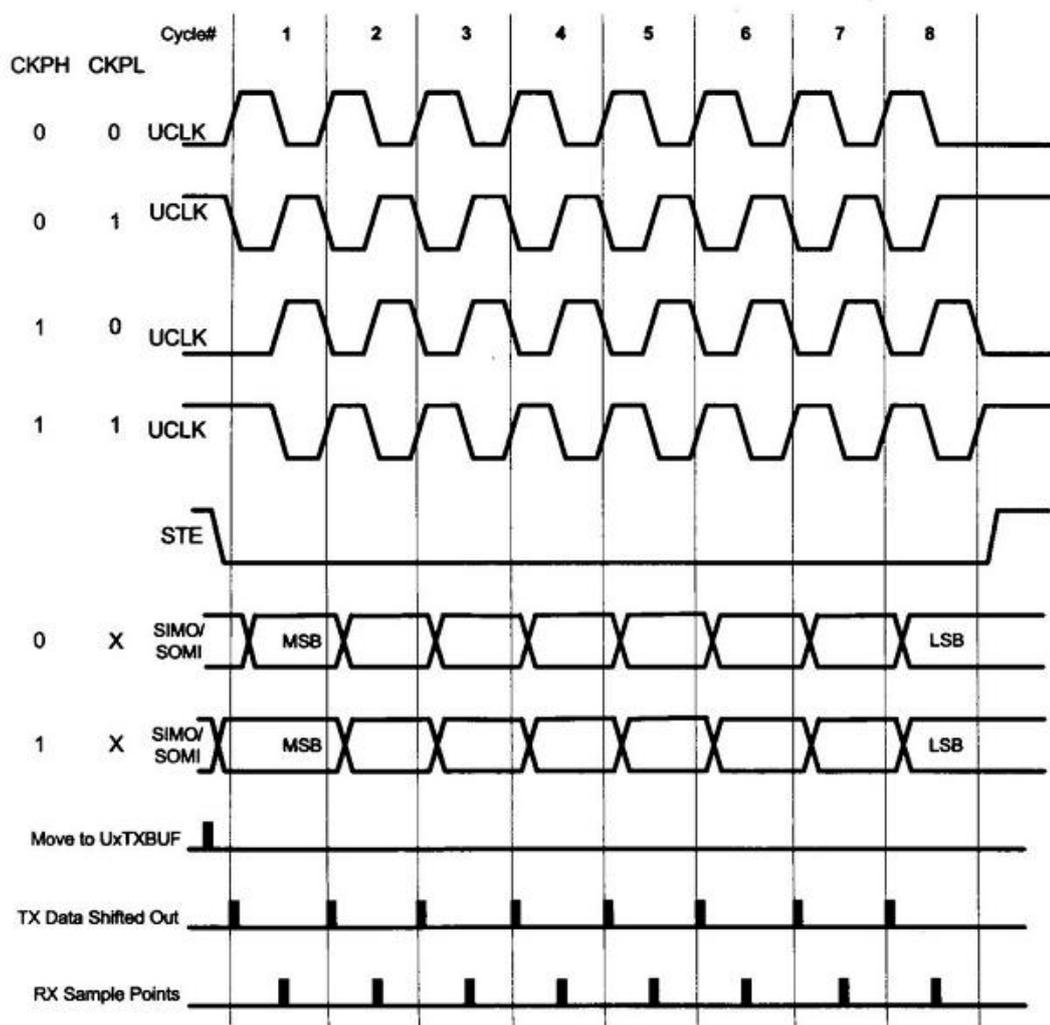
ภาพผนวกที่ ๑๖ ตัวสร้างอัตราบอดเอสพีไอ

สำหรับอัตราบอดของยูอาร์ทีในโหมดเอสพีไอ จะมีความละเอียดที่ 16 บิต แบ่งเป็น UxBR0+UxBR1 โดยอัตราบอดสูงสุดที่สามารถสร้างได้ในการทำงานเป็นโหมดมาสเตอร์ จะมีค่าเท่ากับ BRCLK/2 ส่วนค่ามอดูเลเตอร์ในยูอาร์ที อัตราบอดจะไม่ถูกใช้สำหรับโหมดเอสพีไอ ซึ่งจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 000h ค่าอัตราบอดที่จะกำหนดให้กับรีจิสเตอร์ UxBR0 และ UxBR1 หาได้จากสูตร $UxBR = BRCLK / \text{Baud rate} \dots\dots\dots$ (...)

เมื่อ UxBR คือ UxBR1กับUxBR0 และ BRCLK คือความถี่ของสัญญาณนาฬิกา จากแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่เลือกใช้ และ Baud Rate คืออัตราการรับส่งข้อมูลที่ใช้ต้องการ ใช้งาน เช่น 2400, 4800 และ 9600

2.1.6 การกำหนดคุณสมบัติการมีขั้วและเฟสของสัญญาณนาฬิกาอนุกรม

สำหรับคุณสมบัติของการมีขั้ว (polarity) และเฟสของสัญญาณนาฬิกา UCLK จะแยกบิตควบคุมเป็นอิสระกัน โดยกำหนดได้ที่บิต CKPL และ CKPH ของยูอาร์ที โดยพิจารณาการทำงานได้ตามการจับเวลา (timing) ดังภาพผนวกที่ ค7



ภาพผนวกที่ ค7 การจับเวลายูอาร์ทีเอสพีไอ

2.1.7 SPI Interrupt

ในโหมดเอสพีไอนี้ ยูอาร์ทีเอสพีไอจะรองรับ หนึ่ง เวกเตอร์ขัดจังหวะ (interrupt vector) ที่เกิดจากการส่ง และหนึ่งเวกเตอร์ขัดจังหวะที่เกิดจากการรับ โดยจะเกิดขึ้นดังนี้ การทำงานของเอสพีไอขัดจังหวะการส่ง แฟล็กซ์ขัดจังหวะ UTXIFGx จะเซตเมื่อมีการส่งข้อมูลไปแล้วเพื่อแสดงให้ทราบว่าบัฟเฟอร์ UxTXBUF พร้อมที่จะรับอักขระ (character) ตัวต่อไป การร้องขอการขัดจังหวะนี้ จะสามารถใช้งานได้ถ้าบิต UTXIE_x และ GIE ถูกเซต โดยบิต UTXIFG_x นี้จะรีเซตอัตโนมัติ ถ้าการร้องขอการขัดจังหวะกระโดดไปทำโปรแกรมสำหรับตอบสนองการขัดจังหวะแล้ว หรือถ้ามีการเขียนข้อมูลไปยังบัฟเฟอร์ UxTXBUF และการทำงานของเอสพีไอขัดจังหวะการรับ

แฟลชขัดจังหวะ URXIFGx จะเซตทุกครั้งที่ยกขระถูกรับเข้ามาและถูกโหลดไปยังบัฟเฟอร์ UxRXBUF การที่จะใช้งานการร้องขอขัดจังหวะจะต้องทำการเซตบิต URXIEx และ GIE ก่อน โดยรีจิสเตอร์ URXIFGx และ URXIEx จะถูกรีเซตด้วยระบบรีเซต หรือเมื่อบิต SWRST เท่ากับ 1 นอกจากนี้ URXIFGx ยังสามารถรีเซตโดยฮาร์ดแวร์ถ้ามีการตอบสนองรับใช้การขอขัดจังหวะแล้ว หรือถ้า UxRXBUF มีการอ่านข้อมูลไปแล้ว

2.2 รีจิสเตอร์ยูอาร์ทีทีใช้งานในโหมด SPI

ตารางผนวกที่ ๑1 รีจิสเตอร์ควบคุมและสถานะยูอาร์ที 0 (UART0 Control and Status Register)

Register Name	Short Form	Register Type	Address	Initial State
UART control register	U0CTL	Read/Write	070h	001h with PUC
Transmit control register	U0TCTL	Read/Write	071h	001h with PUC
Receive control register	U0RCTL	Read/Write	072h	000h with PUC
Modulation control register	U0MCTL	Read/Write	073h	Unchanged
Baud rate control register 0	U0BR0	Read/Write	074h	Unchanged
Baud rate control register 1	U0BR1	Read/Write	075h	Unchanged
Receiver buffer register	U0RXBUF	Read	076h	Unchanged
Transmit buffer register	U0TXBUF	Read/Write	077h	Unchanged
SFR module enable register 1	ME1	Read/Write	004h	000h with PUC
SFR interrupt enable register 1	IE1	Read/Write	000h	000h with PUC
SFR interrupt flag register 1	IFG1	Read/Write	002h	082 with PUC

ตารางผนวกที่ ค2 รีจิสเตอร์ควบคุมและสถานะยูอาร์ที 1 (UART1 Control and Status Register)

Register Name	Short Form	Register Type	Address	Initial State
UART control register	U1CTL	Read/Write	078h	001h with PUC
Transmit control register	U1TCTL	Read/Write	079h	001h with PUC
Receive control register	U1RCTL	Read/Write	07Ah	000h with PUC
Modulation control register	U1MCTL	Read/Write	07Bh	Unchanged
Baud rate control register 0	U1BR0	Read/Write	07Ch	Unchanged
Baud rate control register 1	U1BR1	Read/Write	07Dh	Unchanged
Receiver buffer register	U1RXBUF	Read	07Eh	Unchanged
Transmit buffer register	U1TXBUF	Read/Write	07Fh	Unchanged
SFR module enable register 2	ME2	Read/Write	005h	000h with PUC
SFR interrupt enable register 2	IE2	Read/Write	001h	000h with PUC
SFR interrupt flag register 2	IFG2	Read/Write	003h	020 with PUC

2.2.1 การกำหนดรีจิสเตอร์มอดูลยูอาร์ทีในโหมดเอสพีไอ

ตารางผนวกที่ ค3 รีจิสเตอร์ควบคุมยูอาร์ที (UxCTL)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD	Unused	Unused	I2C	CHAR	LISTEN	SYNC	MM	SWRST
RESET	0	0	0	0	0	0	0	0
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
ADDR	070h, 078h							

I2C-I2C mode enable: บิตนี้จะใช้สำหรับเลือกการทำงานระหว่างโหมดไอสแควร์ซี หรือเอสพีไอ เมื่อ SYNC เท่ากับ 1

0 = โหมดเอสพีไอ

1 = โหมดไอสแควร์ซี

CHAR-Character length: เลือกความยาวของอักขระที่ 7 บิต หรือ 8 บิต ดังนี้

0 = ข้อมูล 7 บิต

1 = ข้อมูล 8 บิต

LISTEN-Listen enable: ใช้สำหรับเลือกโหมดลูปตอบกลับ (loop back mode) โดยถ้าบิตนี้เป็น

0 = ไม่ใช้งาน ไม่มีลูปตอบกลับ

1 = ใช้งาน UTXDx ซึ่งตัวป้อนกลับภายในให้กับตัวรับ

SYNC-Synchronous mode enable: เลือกรการทำงานระหว่างโหมดยูอาร์ท หรือเอสพีไอ โดยถ้าบิตนี้เป็น

0 = โหมดยูอาร์ท

1 = โหมดเอสพีไอ

MM-Master mode: บิตนี้ใช้สำหรับเลือกรการทำงานของเอสพีไอว่าจะให้เป็นมาสเตอร์ หรือสลาฟ ถ้าบิตนี้เป็น

0 = เอสพีไอทำหน้าที่เป็นสลาฟ

1 = เอสพีไอทำหน้าที่เป็นมาสเตอร์

SWRST-Software reset enable: ใช้รีเซตการทำงานของยูอาร์ท โดยถ้าบิตนี้เป็น

0 = ไม่ใช้งาน หยุดการรีเซตยูอาร์ทพร้อมทำงาน

1 = ใช้งาน ยูอาร์ทอยู่ในสถานะรีเซต

ตารางผนวกที่ ๑4 รีจิสเตอร์ควบคุมการส่งยูอาร์ท (UxTCTL)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD	CKPH	CKPL	SSELx		Unused	Unused	STC	TXEPT
RESET	0	0	0	0	0	0	0	0
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
ADDR	071h, 079h							

CKPH-Clock phase select: บิตนี้ใช้ในการควบคุมเฟสของ UCLK โดยถ้าบิตนี้เป็น

0 = UCLK สัญญาณนาฬิกาจะทำงานปกติตามรูปแบบที่สร้างขึ้นมา

1 = UCLK สัญญาณนาฬิกาจะถูกหน่วงเวลาไปครึ่งรอบ

CKPL-Clock phase select: ถ้าบิตนี้เป็น

0 = สัญญาณนาฬิกาจะเริ่มจากระดับต่ำ ข้อมูลเอาต์พุตจะปรากฏที่ขอบขาขึ้นของ UCLK สัญญาณนาฬิกาและข้อมูลอินพุตจะถูกยึดไว้ที่ขอบขาลงของ UCLK สัญญาณนาฬิกา

1 = สัญญาณนาฬิกาจะเริ่มจากระดับสูง ข้อมูลเอาต์พุตจะปรากฏที่ขอบขาลงของ UCLK สัญญาณนาฬิกาและข้อมูลอินพุตจะถูกยึดไว้ที่ขอบขาขึ้นของ UCLK สัญญาณนาฬิกา

SSELx-Source select: บิตนี้ใช้สำหรับเลือกแหล่งสัญญาณนาฬิกาที่จะใช้งาน ดังนี้

00 = UCLK เลือกแหล่งสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกเข้ามาทางขา UCLK สำหรับโหมดสลาฟเท่านั้น

01 = ACLK เลือกแหล่งสัญญาณนาฬิกาจากคริสตอลที่ต่ออยู่ที่ขา XIN และ XOUT สำหรับโหมดมาสเตอร์

10 = SMCLK เลือกแหล่งสัญญาณนาฬิกาจากภายในซีพียูที่สร้างจากมอดูล DCO สำหรับโหมดมาสเตอร์

11 = SMCLK เลือกแหล่งสัญญาณนาฬิกาจากภายในซีพียูที่สร้างจากมอดูล DCO สำหรับโหมดสลาฟ

STC-Slave transmit control: บิตนี้จะใช้สำหรับควบคุมการส่งของสลาฟ โดยถ้าบิตนี้เป็น

0 = โหมดเอสพีไอ 4 ขา ที่ขา STE ใช้งาน

1 = โหมดเอสพีไอ 3 ขา ที่ขา STE ไม่ใช้งาน

TXEPT-Transmit empty flag จะไม่ถูกใช้ในโหมดสลาฟ โดยถ้าบิตนี้เป็น

0 = ยูอาร์ทกำลังส่งข้อมูล และหรือ มีข้อมูลรออยู่ที่บัฟเฟอร์ UxTXBUF

1 = รีจิสเตอร์เลื่อน TX และบัฟเฟอร์ UxTXBUF ว่างพร้อมรับข้อมูล

ตารางผนวกที่ ๑5 รีจิสเตอร์ควบคุมการรับยูอาร์ท (UxRCTL)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD	FE	Unused	OE	Unused	Unused	Unused	Unused	Unused
RESET	0	0	0	0	0	0	0	0
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
ADDR	072h, 07Ah							

FE-Framing error flag: บิตนี้จะแสดงในกรณีที่มีบัสชนกัน เมื่อบิต MM เป็น 1 และ STC เป็น 0 บิต

FE นี้จะไม่ถูกใช้ในโหมดสลาฟ โดยถ้าบิตนี้เป็น

0 = ไม่พบว่ามีบัสชนกัน

1 = มีขอบสัญญาณลบปรากฏที่ขา STE แสดงว่ามีบัสชนกัน

OE-Overrun error flag: บิตนี้จะเซตเมื่อมีการส่งอักขระเข้าไปในบัฟเฟอร์ UxRXBUF ก่อนที่อักขระจะถูกอ่าน บิต OE นี้จะรีเซตอัตโนมัติเมื่อ UxRXBUF ถูกอ่านแล้ว หรือเมื่อ SWRST เป็น 1 หรือสามารถที่จะรีเซต โดยซอฟต์แวร์ก็ได้ โดยถ้าบิตนี้เป็น

0 = ไม่ผิดพลาด

1 = ปรากฏความผิดพลาด

ตารางผนวกที่ ๑๖ รีจิสเตอร์ควบคุมอัตราบอดยูอาร์ท 0 (UxBR0)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD	BRL							
RESET	X	X	X	X	X	X	X	X
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
ADDR	074h, 07Ch							

BRL-Uart Baud Rate Low Byte (2^7-2^0)

ตารางผนวกที่ ๑๗ รีจิสเตอร์ควบคุมอัตราบอดยูอาร์ท 1 (UxBR1)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD	BRH							
RESET	X	X	X	X	X	X	X	X
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
ADDR	075h, 07Dh							

BRL-Uart Baud Rate Low Byte ($2^{15}-2^8$)

อัตราบอดที่อยู่ในช่วงที่ควบคุมได้จะอยู่ในย่าน $3 \leq UxBR < 0FFFFh$ เมื่อ $UxBR = UxBR1 + UxBR0$

ตารางผนวกที่ ค8 รีจิสเตอร์ควบคุมการมอดูเลชันยูอาร์ที (UxMCTL)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD	m7	m6	m5	m4	m3	m2	m1	m0
RESET	X	X	X	X	X	X	X	X
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
ADDR	073h, 07Bh							

UxMCTLx-Modulation Control: รีจิสเตอร์นี้จะไม่ถูกใช้ในโหมดเอสพีไอและควเรตเป็น 000h

ตารางผนวกที่ ค9 รีจิสเตอร์บัฟเฟอร์การรับยูอาร์ที (UxRXBUF)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD	UxRXBUFx							
RESET	X	X	X	X	X	X	X	X
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
ADDR	076h, 07Eh							

UxRXBUFx-Receive data buffer (2^7-2^0): รีจิสเตอร์ 8 บิตนี้จะใช้เป็นบัฟเฟอร์ในการรับข้อมูลเข้ามาพักไว้เพื่อรอให้ซีพียูมาอ่านข้อมูลไปใช้งาน เมื่อมีการอ่านข้อมูลจาก UxRXBUF จะทำให้บิต OE และแฟลคซ์ URXIFGx ถูกรีเซตในข้อมูล 7 บิต ซึ่ง บิต 7 ของ UxRXBUFx เป็น 0 เสมอไม่ใช้งาน

ตารางผนวกที่ ค10 รีจิสเตอร์บัฟเฟอร์การส่งยูอาร์ที (UxTXBUF)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD	UxTXBUFx							
RESET	X	X	X	X	X	X	X	X
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
ADDR	077h, 07Fh							

UxTXBUFx-Transmit data buffer (2^7-2^0): รีจิสเตอร์ 8 บิตนี้จะใช้เป็นบัฟเฟอร์ในการพักข้อมูลที่ต้องการเขียน ก่อนที่จะถูกส่งออกไปภายนอก เมื่อมีการเขียนมาที่บัฟเฟอร์นี้จะทำให้แฟลกซ์ UTXIFGx ถูกเคลียร์เมื่อมีการเลือกความยาวอักขระแบบ 7 บิต ข้อมูลบิต MSB จะถูกส่งออกไปเป็นบิตแรก

ตารางผนวกที่ ค11 รีจิสเตอร์การใช้งานมอดูล 1 (ME1)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD		USPIE0						
RESET		X						
R/W		R/W						
ADDR	004h							

USPIE0-UART0 SPI enable: บิตนี้จะใช้สำหรับใช้งานโหมดเอสพีไอ สำหรับยูอาร์ท 0 ถ้าบิตนี้เป็น 0 = มอดูลเอสพีไอ 0 ไม่ถูกใช้งาน
1 = มอดูลเอสพีไอ 0 ถูกใช้งาน

ตารางผนวกที่ ค12 รีจิสเตอร์การใช้งานมอดูล 2 (ME2)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD				USPIE1				
RESET				X				
R/W				R/W				
ADDR	005h							

USPIE1-UART1 SPI enable: บิตนี้จะใช้สำหรับใช้งานโหมดเอสพีไอ สำหรับยูอาร์ท 1 ถ้าบิตนี้เป็น 0 = มอดูลเอสพีไอ 1 ไม่ถูกใช้งาน
1 = มอดูลเอสพีไอ 1 ถูกใช้งาน

ตารางผนวกที่ ๑๓ รีจิสเตอร์การใช้งานการขัดจังหวะ 1 (IE1)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD	UTXIE0	URXIE0						
RESET	0	0						
R/W	R/W	R/W						
ADDR	000h							

UTXIE0-UART0 transmit interrupt enable: บิตนี้จะใช้สำหรับใช้งานแฟลกซ์การขัดจังหวะ UTXIFG0 ถ้าบิตนี้เป็น

0 = ขัดจังหวะการส่งไม่ถูกใช้งาน

1 = ขัดจังหวะการส่งถูกใช้งาน

URXIE0-UART0 receive interrupt enable: บิตนี้จะใช้สำหรับใช้งานแฟลกซ์การขัดจังหวะ URXIFG0 ถ้าบิตนี้เป็น

0 = ขัดจังหวะการรับไม่ถูกใช้งาน

1 = ขัดจังหวะการรับถูกใช้งาน

ตารางผนวกที่ ๑๔ รีจิสเตอร์การใช้งานการขัดจังหวะ 2 (IE2)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD			UTXIE1	URXIE1				
RESET			0	0				
R/W			R/W	R/W				
ADDR	001h							

UTXIE1-UART1 transmit interrupt enable: บิตนี้จะใช้สำหรับใช้งานแฟลกซ์การขัดจังหวะ UTXIFG1 ถ้าบิตนี้เป็น

0 = ขัดจังหวะการส่งไม่ถูกใช้งาน

1 = ขัดจังหวะการส่งถูกใช้งาน

URXIE1-UART1 receive interrupt enable: บิตนี้จะใช้สำหรับใช้งานแฟลกซ์การขัดจังหวะ

URXIFG1 ถ้าบิตนี้เป็น

0 = จัดจ้งหะการรับไม่ถูกใช้งาน

1 = จัดจ้งหะการรับถูกใช้งาน

ตารางผนวกที่ ค15 รีจิสเตอร์แฟลกซ์การจัดจ้งหะ 1 (IFG1)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD	UTXIFG0	URXIFG0						
RESET	1	0						
R/W	R/W	R/W						
ADDR	002h							

UTXIFG0-UART0 transmit interrupt flag: UTXIFG0 จะเซตเมื่อ U0TXBUF ว่างถ้าบิตนี้เป็น

0 = ไม่เกิดการจัดจ้งหะ คือมีข้อมูลอยู่ในบัฟเฟอร์ U0TXBUF ข้อมูลยังไม่ถูกส่ง

1 = เกิดการจัดจ้งหะ คือบัฟเฟอร์ U0TXBUF ว่างข้อมูลถูกส่งไปแล้ว

URXIFG0-UART0 receive interrupt flag: URXIFG0 จะเซตเมื่อ U0RXBUF รับอักขระสมบูรณ์ถ้าบิตนี้เป็น

0 = ไม่เกิดการจัดจ้งหะ คือบัฟเฟอร์ U0RXBUF ว่างพร้อมรับข้อมูล

1 = เกิดการจัดจ้งหะ คือรับข้อมูลมาเก็บในบัฟเฟอร์ U0RXBUF แล้ว

ตารางผนวกที่ ค16 รีจิสเตอร์แฟลกซ์การจัดจ้งหะ 2 (IFG2)

BITS	7	6	5	4	3	2	1	0
FIELD			UTXIFG0	URXIFG0				
RESET			1	0				
R/W			R/W	R/W				
ADDR	003h							

UTXIFG1-UART1 transmit interrupt flag: UTXIFG1 จะเซตเมื่อ U1TXBUF ว่างถ้าบิตนี้เป็น

0 = ไม่เกิดการขัดจังหวะ คือมีข้อมูลอยู่ในบัฟเฟอร์ U1TXBUF ข้อมูลยังไม่ถูกส่ง

1 = เกิดการขัดจังหวะ คือบัฟเฟอร์ U1TXBUF ว่างข้อมูลถูกส่งไปแล้ว

URXIFG1-UART1 receive interrupt flag: URXIFG1 จะเซตเมื่อ U1RXBUF รับอักขระสมบูรณ์ถ้าบิตนี้เป็น

0 = ไม่เกิดการขัดจังหวะ คือบัฟเฟอร์ U1RXBUF ว่างพร้อมรับข้อมูล

1 = เกิดการขัดจังหวะ คือรับข้อมูลมาเก็บในบัฟเฟอร์ U1RXBUF แล้ว

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายวุฒิชัย เกษรปทุมานันท์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 18 ตุลาคม 2526
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน พ.ศ. 2547