

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารโดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายบน  
พื้นฐานมาตรฐานซิกบี**

**INDOOR LOCALIZATION SYSTEM USING RSSI MEASUREMENT IN  
WIRELESS SENSOR NETWORK BASE ON ZIGBEE STANDARD**



**รัตนะ ผิวงาม  
RATANA PRIWGHARM**

รพ.  
ร374ร  
2554

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**117915**  
วัน,เดือน,ปี.....**22 ต.ค. 2554**

b. **12349173**  
i.....

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**INDOOR LOCALIZATION SYSTEM USING RSSI MEASUREMENT IN  
WIRELESS SENSOR NETWORK BASE ON ZIGBEE STANDARD**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2011  
KMITL-2011-EN-M-230-153**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2011**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร โดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายบนพื้นฐานมาตรฐานซิกบี
นักศึกษา	นายรัตนะ ผิวงาม
รหัสนักศึกษา	51061023
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2554
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการศึกษาและการสร้างระบบระบุตำแหน่งของวัตถุภายในอาคาร โดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (มาตรฐาน IEEE 802.15.4) บนพื้นฐานของมาตรฐานซิกบีซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งได้เลือกใช้การวัดความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength Indication : RSSI) โดยสามารถเรียกใช้ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับจากตัวเซ็นเซอร์ไร้สายได้ การคำนวณตำแหน่งของงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบวิธีการคำนวณ 2 แบบ คือ 1) เทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง (Range-based) โดยใช้อัลกอริทึมในการคำนวณ 2 วิธี คือ วิธี MMSE (Minimum Mean Square Error) และ วิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด (Min-Max) 2) เทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการคาดคะเน โดยการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล (Fingerprint) โดยจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูลที่ถูกสร้างจากการวิเคราะห์รูปแบบความเข้มของสัญญาณในแต่ละระยะทางด้วย วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด (Nearest - neighbor) และ วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า (K-Nearest - neighbor) ในงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งเซ็นเซอร์ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ในห้องประชุมภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ และหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของแต่ละวิธีการมาคำนวณเพื่อเปรียบเทียบ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพบว่าประสิทธิภาพแบบเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง ด้วยวิธี MMSE ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดจะน้อยกว่า 50 เซนติเมตร ซึ่งสามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้

<b>Thesis Title</b>	Indoor localization system using RSSI measurement in Wireless Sensor Network base on zigbee standard
<b>Student</b>	Mr. Ratana Priwgharm
<b>Student ID</b>	51061023
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Information Engineering
<b>Year</b>	2011
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Panarat Chermtanomwong

### ABSTRACT

The thesis studies and implements the indoor localization system using wireless sensor network (IEEE 802.15.4). ZigBee as the IEEE 802.15.4 standard is used in the system because it provide the received signal strength indication (RSSI), which is employed to estimate the location of the target. Two main categories of the localization methods: one is the range-based localization method and another one is the fingerprint – based localization method. For each method, two algorithms are used. The MMSE algorithm and the min-max algorithm are algorithms categorized in the range-based localization method, where the range between sensor nodes is the major parameter to estimate the target location. The nearest neighbor algorithm and the proposed K-nearest neighbor algorithm are algorithms categorized in the fingerprint – based localization method. To evaluate the performance of all algorithms and the system, the experiment data are used. The experiments are conducted in the indoor environment; the meeting room for the study case. The average errors of location estimation of the target for all algorithms are compared. It is found that the MMSE method gives the best location estimation result and all algorithms give the average location estimation error less than 50 cm, which is satisfied to be used in practice.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยและให้คำปรึกษา คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้ามีความรู้ความสามารถในการนำเสนองานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา น้องสาว บุคคลที่เปี่ยมด้วยรัก เมตตา และห่วงใยอันแท้จริง บุคคลซึ่งเป็นกำลังใจให้แรงผลักดันที่ทำให้ข้าพเจ้ามุ่งมั่นในการทำวิทยานิพนธ์ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยให้ข้อเสนอแนะ ให้กำลังใจ ช่วยทำการทดลอง และคอยสอบถามถึงความคืบหน้าของงานวิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านซึ่งเป็นที่รักและเคารพของข้าพเจ้า

รัตนะ ศิวงาม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	4
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
บทที่ 2 เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายคืออะไร.....	7
2.3 มาตรฐาน IEEE 802.15.4.....	10
2.3.1 โครงสร้างเครือข่าย ZigBee.....	12
2.3.2 ส่วนประกอบของเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล.....	13
2.4 โครงสร้างของเครือข่าย.....	13
2.4.1 โครงสร้างเครือข่ายแบบดาว.....	14
2.4.2 โครงสร้างเครือข่ายแบบเครื่องต่อเครื่อง.....	14
2.4.3 โครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มของต้นไม้.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 โปรโตคอลของ ZigBee.....	15
2.6 โปรโตคอลค้นหาเส้นทางของ ZigBee.....	18
2.7 การประยุกต์ใช้งานของ ZigBee.....	20
2.8 XBee-Pro.....	21
2.8.1 ชุดทดลองประกอบ XBee-Pro.....	21
2.8.2 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติที่สำคัญ.....	22
2.8.3 รูปการกระจายสัญญาณของ XBee-Pro.....	25
2.9 ปัญหาที่พบในการส่งสัญญาณ.....	27
2.9.1 การจางหายของสัญญาณ.....	27
2.9.1.1 การสูญเสียตามระยะทาง.....	27
2.9.1.2 การถูกบดบัง.....	28
2.9.1.3 การสะท้อนหลายทิศทาง.....	28
2.9.2 การแทรกสอด.....	29
2.9.2.1 การแทรกสอดในช่องสัญญาณเดียวกัน.....	30
2.9.2.2 การแทรกของสัญญาณที่มีความถี่ที่อยู่ติดกัน.....	30
2.9.3 การใช้ความถี่ร่วมกันระหว่าง ZigBee และสัญญาณไร้สาย.....	30
2.10 บทสรุป.....	31
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการของการหาตำแหน่งภายในอาคาร.....	32
3.1 บทนำ.....	32
3.2 การวัดค่าความเข้มของสัญญาณ.....	33
3.3 การหาตำแหน่งโดยวิธีการ Range-Based.....	34
3.3.1 การคำนวณโดยการทำให้สามเหลี่ยมระยะ (Trilateration).....	34
3.3.2 วิธีการหาตำแหน่งด้วยระยะทาง (Lateration).....	36
3.3.2.1 การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากเวลาของการมาถึง.....	36
3.3.2.2 การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงความแตกต่างเวลาของสัญญาณที่มาถึง.....	38
3.3.3 วิธีการหาตำแหน่งด้วยวิธีการ Min-Max.....	40
3.4 วิธีการหาตำแหน่งแบบการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล.....	41

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1 Offline Phase หรือ Training Phase.....	42
3.4.2 Online Phase หรือ Localization Phase.....	42
3.4.3 อัลกอริทึมข้อมูลข้างเคียงที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด.....	43
3.4.4 ระยะห่างยูคลิเดียน.....	43
3.5 บทสรุป.....	44
บทที่ 4 วิธีการและขั้นตอนการทดลองวิจัย.....	45
4.1 บทนำ.....	45
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิจัย.....	46
4.3 การออกแบบอุปกรณ์.....	46
4.3.1 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	47
4.3.2 เซ็นเซอร์วัตถุ.....	48
4.4 องค์ประกอบของโปรแกรมที่ใช้สร้างระบบระบุตำแหน่ง.....	49
4.4.1 X-CTU.....	49
4.4.2 โปรแกรมสำหรับควบคุมการแพร่กระจายสัญญาณของเซ็นเซอร์อ้างอิง.....	50
4.4.3 โปรแกรมแสดงผลค่าความเข้มของสัญญาณ.....	50
4.5 ขั้นตอนและรูปแบบวิธีการทดลองวิจัยในการหาตำแหน่ง.....	50
4.5.1 การจัดเตรียมการทดลองและสภาพแวดล้อมในการทดลอง.....	52
4.5.2 รูปแบบการหาตำแหน่ง.....	54
4.5.2.1 การทดลองหาตำแหน่งโดยการคำนวณแบบ Range-Based.....	54
4.5.2.2 การทดลองหาตำแหน่งโดยการคำนวณแบบ Fingerprint.....	55
4.5.2.2.1 Offline Phase หรือ Training Phase.....	56
4.5.2.2.2 Online Phase หรือ Localization Phase.....	59
4.5.2.2.2.1 Nearest Neighbor algorithm.....	61
4.5.2.2.2.1 K-Nearest Neighbor algorithm.....	61
4.6 บทสรุป.....	65

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหาตำแหน่งภายในอาคาร.....	66
5.1 บทนำ.....	66
5.2 ผลการวิเคราะห์รูปแบบความเข้มของสัญญาณ.....	67
5.3 ผลการทดลองและผลการคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีที่ 1: Range-Based.....	68
5.3.1 ผลการทดลองและผลการคำนวณตำแหน่งด้วยอัลกอริทึม Lateration.....	68
5.3.2 ผลการทดลองและผลการคำนวณตำแหน่งด้วยอัลกอริทึม Min-Max.....	70
5.4 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีที่ 1: Range-Based.....	72
5.5 ผลการทดลองและผลการคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีที่ 2: Fingerprint.....	75
5.5.1 ผลการทดลองและผลการคำนวณตำแหน่งด้วยอัลกอริทึม Nearest.....	76
5.5.2 ผลการทดลองและผลการคำนวณตำแหน่งด้วยอัลกอริทึม K-Nearest.....	78
5.6 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีที่ 2: Fingerprint.....	84
5.7 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างวิธี Range-Based กับ วิธี Fingerprint.....	90
5.8 บทสรุป.....	92
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	93
6.1 บทนำ.....	93
6.2 บทสรุป.....	94
6.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	95
6.3.1 ปัญหาที่พบในงานวิจัย.....	95
6.3.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก ก.บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	113

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แถบความถี่ของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (Frequency Band).....	11
2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ ZigBee, WiFi และ Bluetooth.....	17
2.3 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติที่สำคัญของ Xbee Pro.....	23
2.4 แสดงขาสัญญาณของ โมดูล Xbee-Pro.....	24
4.1 ค่าตัวแปรในเซ็นเซอร์อ้างอิง.....	47
4.2 ค่าตัวแปรในเซ็นเซอร์วัตถุ.....	48
4.3 รายละเอียดค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลองหาตำแหน่ง.....	53
4.4 ตารางรูปแบบฐานข้อมูลของ Fingerprint 36 จุด ของ 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	58
4.5 ตารางรูปแบบฐานข้อมูลของ Observe Location 20 จุด ของ 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	60
5.1 บันทึกการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณกับระยะทางที่วัดได้.....	67
5.2 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ Lateration 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	68
5.3 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ Min-Max 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	70
5.4 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Lateration 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	72
5.5 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Min-Max 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	73
5.6 สรุปค่าความผิดพลาดเฉลี่ยโดยใช้การคำนวณด้วยวิธี Range-Based.....	74
5.7 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ Nearest neighbor 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	76
5.8 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ 3-Nearest neighbor 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	78
5.9 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ 4-Nearest neighbor 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	80
5.10 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ 5-Nearest neighbor 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	82
5.11 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ Nearest 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	84
5.12 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ 3-Nearest 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	85
5.13 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ 4-Nearest 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	86
5.14 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ 5-Nearest 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	87
5.15 สรุปค่าความผิดพลาดเฉลี่ยโดยใช้การคำนวณด้วยวิธี Fingerprint.....	88
5.16 สรุปการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยโดยใช้การคำนวณด้วยวิธี Range-Based กับ Fingerprint.....	90

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ย่านความถี่ของมาตรฐาน IEEE 802.15.4.....	11
2.2 แบบเครือข่าย ZigBee.....	13
2.3 แบบโครงสร้างของเครือข่าย ZigBee.....	14
2.4 โครงสร้างชั้นโปรโตคอลของ ZigBee (ZigBee Protocol Stack).....	16
2.5 แสดงการค้นหาเส้นทางของโปรโตคอล AODV.....	20
2.6 โมดูลสื่อสารข้อมูลไร้สาย Xbee Pro.....	21
2.7 แผงวงจรเชื่อมต่อเชื่อมต่อ Xbee Pro.....	22
2.8 บอร์ดเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์.....	22
2.9 แบบการกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบ U.FL RF Connector.....	25
2.10 แบบการกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบวีพี.....	26
2.11 แบบการกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบซีพี.....	26
2.12 การสะท้อนหลายทิศทาง (Multipath Fading).....	29
2.13 การเปรียบเทียบความถี่ของ IEEE 802.15.4 และ IEEE 802.11.....	31
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณกับระยะทาง.....	34
3.2 แสดงการหาตำแหน่งด้วยการวัดแบบสามเหลี่ยมระยะ.....	35
3.3 แสดงการหาตำแหน่งด้วยการวัดแบบ TOA.....	37
3.4 แสดงการหาตำแหน่งด้วยการวัดแบบ TDOA.....	40
3.5 แสดงการหาตำแหน่งด้วยวิธีการ Min-Max.....	41
3.6 แสดงการหาตำแหน่งด้วยวิธีการหาตำแหน่งแบบ Fingerprint.....	42
4.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับระบบระบุตำแหน่ง.....	46
4.2 ชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์อ้างอิง.....	47
4.3 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ.....	48
4.4 ตัวอย่างโปรแกรม X-CTU.....	49
4.5 โปรแกรมแสดงผลค่าความเข้มของสัญญาณ.....	50
4.6 โพลีชาร์ตของขั้นตอนการทดลองวิจัย.....	51
4.7 แบบการกำหนดตำแหน่ง 36 จุด และ จุดสุ่ม 20 จุด.....	52
4.8 แบบจริงในการกำหนดตำแหน่งในการวัด.....	53
4.9 โพลีชาร์ตของการหาตำแหน่งด้วยวิธี Range-Based.....	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 โพล์ซาร์ตของการหาตำแหน่งด้วยวิธี Fingerprint.....	56
4.11 แบบการกำหนดตำแหน่ง Fingerprint 36 จุด.....	57
4.12 รูปแบบการกำหนดตำแหน่ง Fingerprint 36 จุด และ Observe Location 20 จุด.....	59
4.13 โพล์ซาร์ตของการหาตำแหน่ง Fingerprint ด้วยการเปรียบเทียบแบบ Nearest Neighbor...61	
4.14 โพล์ซาร์ตของการหาตำแหน่ง Fingerprint ด้วยการเปรียบเทียบแบบ K-Nearest Neighbor62	
4.15 แบบการกำหนดตำแหน่งของการทดลองโดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 3 ตัว.....	62
4.16 แบบการกำหนดตำแหน่งของการทดลองโดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 4 ตัว.....	63
4.17 แบบการกำหนดตำแหน่งของการทดลองโดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 5 ตัว.....	63
4.18a แบบจริงในการวัดความเข้มของสัญญาณ.....	64
4.18b แบบจริงในการวัดความเข้มของสัญญาณ.....	64
4.18c แบบจริงในการวัดความเข้มของสัญญาณ (3).....	64
5.1 แบบแผนวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	66
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณกับระยะทาง.....	67
5.3 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณ โดยใช้อัลกอริทึม Lateration....	69
5.4 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณ โดยใช้อัลกอริทึม Min-Max.....	71
5.5 กราฟการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดโดยใช้การคำนวณด้วยวิธี Range-Based.....	75
5.6 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณ โดยใช้อัลกอริทึม Nearest.....	77
5.7 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณ โดยใช้อัลกอริทึม 3-Nearest....	79
5.8 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณ โดยใช้อัลกอริทึม 4-Nearest....	81
5.9 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณ โดยใช้อัลกอริทึม 5-Nearest....	83
5.10 กราฟการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดโดยใช้การคำนวณด้วยวิธี Fingerprint.....	89
5.11 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยโดยใช้การคำนวณด้วยวิธี Range-Based กับ Fingerprint.....	90
5.12 กราฟการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างวิธี Range-Based กับ วิธี Fingerprint.....	91

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network)	WSN
เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network)	WPAN
ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System)	GPS
เครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ (Ad hoc Wireless Network)	AWN
เครือข่ายไร้สายท้องถิ่น (Wireless Local Area Network)	WLAN
ออปเจกต์ของอุปกรณ์ Zigbee (Zigbee Device Object)	ZDO
ความกว้างแถบความถี่ (แบนด์วิดท์)	BW
การเปลี่ยนสัญญาณอะนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter)	ADC
แรงดันไฟฟ้า (Volt)	V
อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นเราท์เตอร์ (Full Function Device)	FFD
อุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย (Reduce Function Device)	RFD
การระบุเครือข่ายเครือข่ายไร้สายแต่ละเครือข่ายที่ไม่ซ้ำกัน (Service Set identifier)	SSID
หน่วยความจำสำรอง (Random Access Memory) แบบการรับและส่งแบบสแตกในเวลาที่ตั้งกัน	RAM
(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)	UART
ความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency)	UHF
การหาเส้นทางจากต้นแบบไดนามิก (Dynamic Source Routing)	DSR
แถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultrawideband)	UWB
การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access)	TDMA
ความถี่สูง (High Frequency)	HF
ความถี่ต่ำ (Low Frequency)	LF
การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด (Amplitude shift keying)	ASK
การมอดูเลตเชิงเลขทางความถี่ (Frequency shift keying)	FSK
การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส (Phase shift keying)	PSK
หน่วยงานกำหนดมาตรฐานสากล (International Standard Organization)	ISO
อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio)	SNR
สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์นานาชาติ (Institute of Electrical and Electronic Engineers)	IEEE
คณะกรรมการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission)	FCC

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

คณะกรรมการสื่อสารคลื่นวิทยุแห่งยุโรป (European Radio Communications Committee) ERCC	
การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากเวลาของการมาถึง (Time of Arrival)	TOA
การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากความแตกต่างของเวลาของสัญญาณที่มาถึง (Time Difference of Arrival)	TDOA
การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากระยะทางได้มาจากการคำนวณการสะท้อนของสัญญาณของสัญญาณวิทยุกับเวลาในการเคลื่อนที่ของสัญญาณ (Round Trip Time of Flight)	RTOF
การหาตำแหน่งเชิงมุม (Angle of Arrival)	AOA
มาตรฐานหน่วยวัด Voltage ของสัญญาณขณะมี Load ( Decibel milli Watt )	dBm
ความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Receive Signal Strength Indicator)	RSSI
การมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation)	FM
วงจรรวม (Integrated Circuit)	IC
การชี้เฉพาะ (Identification)	ID
เครื่องส่ง (Transmitter)	Tx
เครื่องรับ (Receiver)	Rx
ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับในหน่วยวัตต์	$P_r$
ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับใน 1 เมตร	$P_0$
ระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณในหน่วยเมตร	$d$
อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง (Antenna Gain)	$G_t$
อัตราขยายของสายอากาศด้านรับ (Antenna Gain)	$G_r$
ความยาวคลื่น	$\lambda$
ระยะทางระหว่างวัตถุกับ โหนดที่ $i$	$R_i$
ความเร็วแสง (Velocity of light) มีค่าเท่ากับ $3 \times 10^8$ เมตรต่อวินาที	$c$
ระยะเวลาในการเดินทางสัญญาณระหว่างวัตถุไปที่ โหนด $i$	$t_i$
ผลต่างของระยะทางระหว่างโหนด ตำแหน่งที่ $i$ และตำแหน่งที่ $j$	$R_{i,j}$
ความแตกต่างของเวลาของสัญญาณจากวัตถุไปที่ โหนด ตำแหน่งที่ $i$ และตำแหน่งที่ $j$	$t_{i,j}$
ตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ	$x_{est}, y_{est}$
เมกะไบต์ (Megabyte)	MByte
วินาที (Second)	s
เมตร (Meter)	m

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

เซนติเมตร (Centimeter)	cm
กิโลเมตร (Kilometer)	km
ไบต์ (Byte)	Byte
บิต (Bit)	Bit
เฮิรตซ์ (Hertz)	Hz
กิกะเฮิรตซ์ (Gigahertz)	GHz
กิโลเฮิรตซ์ (kilohertz)	KHz
เมกะเฮิรตซ์ (Megahertz)	MHz



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบระบุตำแหน่งนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบริการสำหรับองค์กรต่างๆ ได้ดีในด้านของการอำนวยความสะดวกสำหรับงานด้านการบริการ การดูแล จัดการและควบคุมการทำงานหรือแม้กระทั่งการรักษาความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินภายในองค์กร ซึ่งองค์กรต่างๆ นั้นสามารถประยุกต์ใช้ระบบระบุตำแหน่งได้หลายรูปแบบ เช่น การระบุตำแหน่งผู้ป่วยที่ต้องดูแลเป็นพิเศษภายในโรงพยาบาล ซึ่งทำให้ลดเวลาในการค้นหาผู้ป่วยรายนั้น การระบุตำแหน่งสินค้าที่มีราคาสูงภายในโรงงาน จะช่วยเพิ่มความมั่นใจในการขนส่งสินค้าและลดโอกาสสินค้าจัดส่งผิดชุด การแสดงตำแหน่งเด็กเมื่อพลัดหลงในห้างสรรพสินค้าจะทำให้สามารถตามหาเด็กที่พลัดหลงได้อย่างรวดเร็ว และการแจ้งเตือนเมื่อเข้าใกล้สถานที่ที่กำลังก่อสร้างหรือเขตอันตรายจะทำให้เกิดความปลอดภัยต่อบุคคลที่อยู่ในบริเวณนั้น เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีไร้สายได้เข้ามามีบทบาทกับชีวิตประจำวันมากยิ่งขึ้น เนื่องจากความสะดวกในการติดตั้งและการดูแลรักษาสามารถทำได้ง่าย การนำอุปกรณ์สื่อสารไร้สายมาใช้ในระบบระบุตำแหน่งนั้นสามารถทำได้ง่ายเพราะอุปกรณ์ดังกล่าวมีขนาดเล็กสามารถพกพาได้สะดวก อุปกรณ์ดังกล่าวใช้พลังงานต่ำ สามารถสร้างเครือข่ายได้ และการติดตั้งสามารถทำได้ง่ายตาย การเลือกใช้เครือข่ายเช่นเซอร์ไร้สายมาประยุกต์เข้ากับระบบระบุตำแหน่งจึงได้ถูกนำมาพิจารณา สำหรับระบบระบุตำแหน่งในปัจจุบันที่เห็นได้ชัดคือระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System: GPS) เทคโนโลยีนี้นำมาใช้เพื่อการค้นหาเส้นทางและนำทางไปยังสถานที่ที่ผู้ใช้ต้องการไป แต่จีพีเอสนั้นมีข้อจำกัดเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในอาคารเนื่องจากกำแพงหรือสิ่งกีดขวางภายในอาคารจะกีดขวางสัญญาณดาวเทียมซึ่งทำให้ไม่สามารถคำนวณตำแหน่งได้

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นการสื่อสารระยะใกล้หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network) เครือข่ายนี้มีทั้งความเร็วการรับส่งข้อมูลสูงและต้นทุนวิจัยนี้ได้ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายระยะใกล้ที่มีความเร็วต่ำหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ซิกบี (ZigBee) งานวิจัยนี้ได้ใช้ชิพเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีชื่อว่า XBee-Pro ของบริษัท Max Stream ซึ่งใช้ความถี่ 2.4 GHz สามารถรับส่งข้อมูลสูงสุดที่ 250 กิโลบิตต่อวินาที (Kbps) ชิพเซ็นเซอร์ไร้สายดังกล่าวมีข้อดีคือ มีขนาดเล็กสามารถติดตั้งได้ง่าย ระยะการส่งข้อมูลนั้นสามารถส่งสัญญาณได้ประมาณ 1 ไมล์สำหรับพื้นที่โล่งหรือภายนอกอาคาร ซึ่งการทดลองภายในอาคารนั้นพบว่า สามารถส่งข้อมูลได้ไกลประมาณ 50 ถึง 60 เมตร เมื่อใช้กำลังในการส่งข้อมูลสูงสุด

สำหรับข้อมูลที่ใช้ในระบบระบุตำแหน่งนั้นมีหลายชนิด เช่น การใช้ข้อมูลจากอินฟราเรด (Infrared) การใช้ข้อมูลจากอัลตราโซนิก (Ultrasonic) และ การใช้ข้อมูลจากคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) จากการศึกษาข้อมูลพบว่า การใช้ข้อมูลจากอินฟราเรดและอัลตราโซนิกสามารถใช้ระบุตำแหน่งภายในห้องได้เท่านั้นเนื่องจากคลื่นดังกล่าวไม่สามารถทะลุผ่านกำแพงหรือสิ่งกีดขวางภายในอาคารได้ งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้คลื่นวิทยุซึ่งมีคุณสมบัติการส่งข้อมูลผ่านสิ่งกีดขวางได้ดี การใช้คลื่นวิทยุในระบบระบุตำแหน่งนั้นสามารถใช้วิธีการคำนวณตำแหน่งได้อีกหลายวิธี เช่น การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากเวลาของการมาถึง (Time of Arrival: TOA) การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากความแตกต่างของเวลาของสัญญาณที่มาถึง (Time Difference of Arrival: TDOA) การหาตำแหน่งเชิงมุม (Angle of Arrival: AOA) และการวัดค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับได้ (Received Signal Strength Indication: RSSI) อย่างไรก็ตามแต่ละวิธีนั้นยังมีข้อจำกัดเฉพาะตัวอยู่ เช่น การวัดเวลาที่ได้รับสัญญาณ การวัดค่าความแตกต่างของเวลาที่ได้รับสัญญาณและการวัดมุมที่ได้รับสัญญาณนั้น จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์เข้ามาในระบบอุปกรณ์บางประเภทจะมีราคาสูงทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการทำระบบ แต่สำหรับค่าความเข้มของสัญญาณนั้นสามารถเรียกใช้ค่าความเข้มของสัญญาณจากตัวชิปได้โดยตรง ซึ่งไม่ต้องเพิ่มอุปกรณ์หรือค่าใช้จ่าย งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ค่าความเข้มของสัญญาณมาเป็นข้อมูลในการคำนวณตำแหน่งวัตถุ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การหาตำแหน่งภายในอาคารได้รับความนิยมน้อยแต่แพร่หลายในการทำงานวิจัย เนื่องจากสามารถนำไปใช้ได้ในงานหลายประเภทและมีความปลอดภัยของข้อมูลสูง เช่น การระบุตำแหน่งผู้ป่วยที่ต้องดูแลเป็นพิเศษภายในโรงพยาบาล ซึ่งทำให้ลดเวลาในการค้นหาผู้ป่วยรายนั้น การระบุตำแหน่งสินค้าที่มีราคาสูงภายในโรงงานจะช่วยเพิ่มความมั่นใจในการขนส่งสินค้าและลดโอกาสสินค้าจัดจตุตถ์ การแสดงตำแหน่งเด็กเมื่อพลัดหลงในห้างสรรพสินค้าจะทำให้สามารถตามหาเด็กที่พลัดหลงได้อย่างรวดเร็ว และอื่นๆ ความถูกต้องแม่นยำและความน่าเชื่อถือจากการคำนวณหาตำแหน่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องการทราบ อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงเรื่องของความซับซ้อนและงบประมาณค่าใช้จ่ายด้วย เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจึงน่าจะเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการหาตำแหน่งภายในอาคารเนื่องจากมีข้อดีหลายอย่าง เช่น ระบบมีความคล่องตัวสูง ไม่ว่าจะเคลื่อนที่ไปที่ไหน ระบบสามารถติดตั้งได้ง่ายและรวดเร็วระบบทำให้องค์กรสามารถปรับขนาดและความเหมาะสมได้ง่ายไม่ยุ่งยาก เพราะสามารถโยกย้ายตำแหน่งการใช้งาน ความปลอดภัยของข้อมูลสูง ราคาไม่แพง เป็นต้น วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีหาตำแหน่งภายในอาคารจากเทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในการหาตำแหน่งภายในอาคารและเพื่อพัฒนาระบบติดตามวัตถุภายในอาคารชุดอุปกรณ์(Hardware)เพื่อใช้ในการติดตามตำแหน่งวัตถุ รวมทั้งทำการเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างการคำนวณ

ตำแหน่งแบบวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางและวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล เพื่อประยุกต์ใช้อัลกอริทึมในการติดตามวัตถุ เปรียบเทียบ และคัดแปลงเพื่อสามารถหาตำแหน่งของวัตถุที่ต้องการได้โดยมีความเที่ยงตรงหรือความถูกต้อง (Accuracy) และแม่นยำ (Precision) ในระดับที่เหมาะสม เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานของแบบแผนการวิจัยหรือพัฒนาเทคโนโลยีนี้ต่อไป

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การวิจัยและพัฒนาระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารซึ่งใช้เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองหาตำแหน่งของวัตถุที่มีการเชื่อมต่อแบบไร้สาย โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงเพื่อทำหน้าที่ในการอ้างอิงข้อมูลในการอ่านค่าสัญญาณมาใช้ในการคำนวณตำแหน่ง ในการทดลองนี้จะเสนอการคำนวณตำแหน่ง 2 แบบ โดยแบบแรกใช้วิธีการการหาตำแหน่งวัตถุแบบวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง และแบบที่สองใช้วิธีการหาตำแหน่งวัตถุแบบการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล ซึ่งประสิทธิภาพความแม่นยำของทั้ง 2 แบบนั้นจะใช้การเปรียบเทียบจากค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดเฉลี่ย เพื่อนำมาวิเคราะห์ในการหาความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคาร สมมติฐานของการศึกษานี้เพื่อให้เป็นไปตามคุณลักษณะของการใช้งานจริงในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารของเทคโนโลยีระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยตัวแปรที่สำคัญที่น่าจะมีต่อผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดน่าจะเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาตำแหน่งซึ่งจากการวิเคราะห์ที่อัลกอริทึมมีความซับซ้อนมากขึ้นก็จะนำมาความแม่นยำในการค้นหาตำแหน่งเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่ยังคงมีความซับซ้อนมากขึ้นเท่าไรก็ย่อมต้องใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยเช่นเดียวกัน

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย คือ เทคนิคการหาตำแหน่งแบบการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล โดยจะเสนอวิธีการหาตำแหน่ง 2 วิธี โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด กับ วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด  $K$  ค่ารวมทั้งเทคนิคการหาตำแหน่งแบบเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางโดยเสนอวิธีการหาตำแหน่ง 2 วิธี คือ วิธีการวัดระยะทาง และวิธีอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด

โดยจะนำเทคนิคนี้มาทำการวิจัยเพื่อวิเคราะห์ประเมินหาความแม่นยำในการหาตำแหน่งซึ่งความแม่นยำจะศึกษาจากการเปรียบเทียบจากค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและวิจัย เพื่อนำมาสรุปประเมินในเรื่องของความแม่นยำต่อไป

## 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

มีงานวิจัยหลายเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการติดตามหาตำแหน่ง ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีเช่น (GPS) - Based, Cellular - Based, Wireless Local Area Network (WLAN) [1]-[2], Ultra wideband (UWB) และ Radio Frequency Identification (RFID) [3] ส่วนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาเทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย [4] เข้ามาใช้ในการหาตำแหน่งภายในอาคาร โดยเลือกใช้การวัดความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength Indication : RSSI) เนื่องจากค่าความเข้มของสัญญาณนั้นสามารถเรียกใช้ค่าจากตัวชิปได้โดยตรง ไม่ต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมและการกระจายของสัญญาณวิทยุนั้นสามารถผ่านกำแพงและสิ่งกีดขวางได้ วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อัลกอริทึมในการหาตำแหน่งมี 2 แบบ คือ แบบเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางโดยใช้อัลกอริทึมในการคำนวณ 2 วิธีคือวิธีที่ 1 วิธี MMSE และวิธีที่ 2 การอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุดแบบที่สองการหาตำแหน่งแบบการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูลโดยใช้อัลกอริทึมการคำนวณ 2 วิธีโดยวิธีที่ 1.วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดและวิธีที่ 2.วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของวิธีการหาตำแหน่งภายในอาคารบนพื้นฐานเทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ซึ่งในการทดลองนี้จะเสนอวิธีการหาตำแหน่ง 2 แบบโดยใช้ค่าความเข้มของสัญญาณคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ โดยที่วิธีการทดลองพื้นฐานนั้นจะใช้วิธีการอ่านค่าความเข้มของเซ็นเซอร์อ้างอิงในแต่ละจุดที่สังเกต และวิธีการทดลองต่อมาจะเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิงให้มีจำนวนมากขึ้นเพื่อให้มีความละเอียดและมีความซับซ้อนในการหาตำแหน่งวัตถุมากยิ่งขึ้นกว่าวิธีการพื้นฐานโดยประสิทธิภาพความแม่นยำของทั้ง 2 วิธีที่ได้นำเสนอในการทดลองนี้จะใช้การเปรียบเทียบจากค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดเฉลี่ย เพื่อนำมาวิเคราะห์ในการหาความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคาร

## 1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของวิธีการหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคารโดยการคำนวณแบบเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางและแบบการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล บนพื้นฐานเทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยจะใช้ชิปเป็นเซ็นเซอร์อ้างอิงในแพร่กระจายความเข้มสัญญาณและเป็นเซ็นเซอร์วัตถุในอ่านค่าความเข้มของสัญญาณ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ 2.4 GHz เน้นการใช้พลังงานต่ำและเน้นการสื่อสารที่ทนต่อสภาพสัญญาณรบกวนสูงตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มาใช้ในการทดลอง โดยทำการติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่ทราบ ซึ่งจะทำการทดลองในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร โดยมีพื้นที่ในการหาตำแหน่งขนาดความกว้าง 3 เมตร และความยาว 3 เมตร และเพิ่มจำนวนของเซ็นเซอร์อ้างอิงเพื่อศึกษาเปรียบเทียบจากค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ซึ่งนำมาสู่การวิเคราะห์ในการ

หาความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคาร และสามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนาระบบให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ ซึ่งประกอบไปด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย และเทคนิคการหาตำแหน่ง โดยระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ได้แบ่งเป็นหัวข้อย่อย ๆ ซึ่งประกอบด้วย บทนำ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย องค์ประกอบของระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย หลักการทำงานของระบบ IEEE 802.15.4 โครงสร้างเครือข่ายของ ZigBee โครงสร้างเครือข่ายลักษณะต่างๆ โปรโตคอลของ ZigBee การประยุกต์ใช้งานของ ZigBee และจะได้กล่าวถึงเทคนิคการหาตำแหน่งโดยระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและบทสรุป

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของการหาตำแหน่งภายในอาคารซึ่งจะประกอบด้วย หัวข้อย่อยคือบทนำการวัดค่าความเข้มของสัญญาณ การหาตำแหน่งโดยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง ได้แก่ วิธีการวัดระยะทาง วิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุดการหาตำแหน่งโดยการจับคู่ความเข้มของสัญญาณ ในฐานข้อมูล ได้แก่ ระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidian Distance) วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า และบทสรุป

บทที่ 4 กล่าวถึงรูปแบบ วิธีการและขั้นตอนในการทดลองสำหรับระบบการหาตำแหน่งด้วยเทคนิคต่างๆและอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาตำแหน่ง รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิจัย และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดในงานวิจัย

บทที่ 5 กล่าวถึง รายละเอียดของผลการทดลองและผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการหาตำแหน่งในแต่ละอัลกอริทึมที่ได้ทำการทดลองวิจัย

บทที่ 6 กล่าวถึง การสรุปผลในงานวิจัยและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมของการวิจัยในอนาคต

## บทที่ 2

# เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและเทคนิคการระบุตำแหน่งโดยระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

### 2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น สำหรับเทคโนโลยีไร้สายที่นำมาใช้ระบุตำแหน่งในปัจจุบัน คือ ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System: GPS) [5] ข้อมูลที่จีพีเอสใช้ระบุตำแหน่ง คือ ค่าความแตกต่างของเวลาที่ได้รับการส่งสัญญาณวิทยุจากสถานีส่งหรือสถานีดาวเทียมไปยังสถานีรับซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ผู้ใช้ทำการเชื่อมต่อในระบบจีพีเอส ระบบจีพีเอสนั้นใช้ดาวเทียม NAVSTAR ของสหรัฐอเมริกาจำนวน 24 ดวง ที่อยู่ห่างจากพื้นโลกประมาณ 11,000 ไมล์ ดาวเทียมจะโคจรรอบโลกโดยแบ่งเป็น 6 วงโคจร แต่ละวงโคจรนั้นจะมีดาวเทียม 4 ดวง การวัดระยะทางระหว่างดาวเทียมกับสถานีรับจะใช้อะตอมมิคค็อก (Atomic Clock) ซึ่งอะตอมมิคค็อกจะให้ความละเอียดของข้อมูลด้านเวลาในระดับอะตอม ความแม่นยำที่ได้ขึ้นอยู่กับเวลาของสถานีรับ สถานีรับที่มีความแม่นยำสูง ราคาจะสูงด้วย โดยที่ความคลาดเคลื่อนของระบบจีพีเอสนั้นมีปัจจัยดังนี้ คือ การหักเหของคลื่นวิทยุในชั้นบรรยากาศทำให้ส่งผลต่อเวลาในการเดินทางของคลื่นวิทยุ การสะท้อนของคลื่นวิทยุเมื่อเดินทางมาถึงพื้นโลกทำให้เกิดการเดินทางหลายวิถี (Multi path) เช่น การสะท้อนกับสิ่งก่อสร้าง และภูเขา นอกจากนี้ยังมีปัจจัยคือ มุมและความห่างของดาวเทียมที่นำมาคำนวณหาพิกัด การรับสัญญาณดาวเทียมได้จำนวนน้อย ซึ่งอาจทำให้ได้ดาวเทียมที่ทำมุมแคบต่อกันทำให้การคำนวณตำแหน่งผิดพลาดสำหรับระบบจีพีเอสนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่ที่ไม่สามารถระบุตำแหน่งภายในอาคารได้

การใช้ระบบระบุตำแหน่งนั้นสามารถทำให้เกิดความสะดวกได้ เช่น การใช้ระบบจีพีเอสเพื่อนำทางยานพาหนะทำให้ลดปัญหาการหลงทาง และทำให้ลดปัญหาจราจรติดขัดได้ สำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายวิธีเพื่อทำให้เกิดประโยชน์สำหรับองค์กรต่างๆในปัจจุบันได้ เช่น การระบุตำแหน่งผู้ป่วยที่ต้องดูแลเป็นพิเศษในโรงพยาบาล ทำให้แพทย์พยาบาลและญาติของผู้ป่วยไม่เสียเวลาในการเข้าเยี่ยมผู้ป่วย การระบุตำแหน่งสินค้าที่มีราคาสูงในโรงงาน สินค้าที่มีราคาสูงเมื่อทำการขนย้ายไปผลิตที่จะทำให้เสียเวลาในการค้นหา ระบบนี้ทำให้สินค้าสามารถจัดส่งได้อย่างถูกต้อง การระบุตำแหน่งเด็กเมื่อพลัดหลงในห้างสรรพสินค้า

ผู้ปกครองสามารถตามหาเด็กได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากบางกรณีที่ประชาสัมพันธุ์ประกาศไปแล้วแต่เด็กไม่ได้ยิน หรือเด็กที่พลัดหลงอยู่ในที่ที่ยากต่อการมองเห็น เป็นต้น

ในอนาคตระบบระบุตำแหน่งจะเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น ซึ่งระบบนี้สามารถติดตั้งเข้ากับโทรศัพท์มือถือและนาฬิกา เป็นต้น ทำให้เกิดความสะดวกในการพกพาและการใช้งาน การแสดงผลของตำแหน่งอาจจะแสดงผลบนมือถือ พีดีเอ (PDA) และบนเว็บไซต์ เป็นต้น ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่ง

## 2.2 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย คืออะไร

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network: WSN) [6] คือ การใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์ขนาดเล็กจำนวนมาก เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆของสิ่งแวดล้อมที่สนใจ และประมวลผลข้อมูลเหล่านั้นเพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวเราหรือตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมรอบตัวเราได้โดยอัตโนมัติ

ตัวอย่างการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้แก่ การฝังอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไว้ในรังนกที่หายากบางชนิด เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อการย้ายถิ่นของนกเหล่านั้น การติดตั้งเซ็นเซอร์ไว้ในอุปกรณ์ผสมสารเคมีขนาดใหญ่หรือท่อส่งสารเคมีในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อตรวจจับการรั่วซึมของสารเคมี การใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดการสั่นไหวของอุปกรณ์หลายอย่างที่ใช้สำหรับการสร้างชีพของคอมพิวเตอร์ เพื่อตรวจจับความผิดปกติของเครื่องมือเหล่านั้นเพื่อให้สามารถเข้าไปดูแลก่อนที่จะเกิดความเสียหาย การติดตั้งเซ็นเซอร์ไว้รอบๆสนามบินเพื่อตรวจจับการบุกรุกในบริเวณที่ห้ามเข้า นอกจากนี้ยังสามารถใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อศึกษาผลกระทบของแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างอาคาร โดยการฝังเซ็นเซอร์ไว้ได้กำแพงทดลองที่สร้างขึ้น เพื่อวัดข้อมูลที่ได้จากการจำลองแผ่นดินไหวในลักษณะต่างๆ เป็นต้น จากตัวอย่างเหล่านี้จะเห็นได้ว่านักวิทยาศาสตร์และวิศวกรสามารถใช้ประโยชน์จากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้หลายรูปแบบ

อุปกรณ์พื้นฐานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายคือ เซ็นเซอร์ที่มีขนาดเล็กมากเรียกว่า Mote ซึ่งได้รับการพัฒนาจากบริษัทอินเทลและมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ (University of California Berkeley) Mote เป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กสำหรับวัดอุณหภูมิความชื้นหรือสภาวะแวดล้อมอื่นๆมันทำงานโดยใช้แบตเตอรี่ธรรมดาและสื่อสารกับ Mote ตัวอื่นที่อยู่ใกล้เคียงโดยใช้เครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ (Ad hoc Wireless Network) ข้อมูลจะถูกส่งผ่านระหว่าง Mote ด้วยกันจนกระทั่งถึงปลายทางซึ่งอาจเป็นคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อื่นๆ สำหรับรวบรวมข้อมูลที่วัดได้

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทำให้เกิดการจำลองในการคำนวณ (Computing Paradigm) แบบใหม่เรียกว่า การคำนวณแบบเข้าควบคุมสถานการณ์ (Proactive Computing) จะคาดการณ์ถึงสภาพแวดล้อมที่มนุษย์ต้องการและสามารถดำเนินการล่วงหน้าได้แทนมนุษย์ในกรณีที่ทำเป็น

การคำนวณแบบเข้าควบคุมสถานการณ์เกิดขึ้นได้เนื่องจากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ซึ่งทำให้คอมพิวเตอร์สามารถรับข้อมูลจากโลกแห่งความจริงได้อย่างละเอียดรวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องใช้มนุษย์เป็นผู้ป้อนข้อมูลให้ ดังนั้นมนุษย์จึงสามารถโปรแกรมให้กับการคำนวณแบบเข้าควบคุมสถานการณ์ปฏิบัติการได้ทันทีเมื่อสภาวะแวดล้อมเป็นไปตามที่ตนคาดการณ์ไว้โดยไม่ต้องรอสั่งงานกับคอมพิวเตอร์ เหมือนกับในระบบการปฏิสัมพันธ์ (Interactive) ยกตัวอย่างเช่นการโปรแกรมให้เซ็นเซอร์ที่ถูกฝังที่ได้ดินช่วยจัดการระบบการชลประทานหรือระบบการใช้ปุ๋ยเพื่อการเกษตร การสั่งงานให้เครื่องตรวจจับควันไฟสามารถส่งสัญญาณขึ้นมาให้พนักงานดับเพลิงเข้าไปช่วยเหลือผู้ที่ติดอยู่ในตึกเมื่อเกิดไฟไหม้ และการโปรแกรมทำให้ Mote ตรวจวัดอุณหภูมิและการใช้พลังงานภายในที่อยู่อาศัยเพื่อปรับอุณหภูมิและการใช้พลังงานให้เป็นไปตามที่ผู้ใช้งานต้องการ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการทำให้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทำงานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพนั้นมีอุปสรรคหลายอย่าง เนื่องจาก Mote มีขีดจำกัดในด้านความเร็วของตัวประมวลผล (Processor) ความจุของแหล่งเก็บข้อมูล (Data Storage) และความกว้างแถบความถี่ (แบนด์วิดท์) ในการสื่อสาร ดังนั้นอายุการใช้งานของมันจึงขึ้นอยู่กับการบริหารการใช้พลังงานของตัวมันเองซึ่งมีอยู่จำกัด ด้วยเหตุนี้ผู้พัฒนา Mote จึงต้องออกแบบระบบฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software) รวมถึงระบบการสื่อสารของ Mote ให้ทำงานโดยใช้พลังงานน้อยที่สุด นอกจากนี้ในแง่ของการใช้งานผู้พัฒนาเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายต้องสร้างเครื่องมือที่ทำให้ผู้ใช้ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีความรู้ขั้นสูงทางด้านวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ (Computer Engineering) สามารถใช้งานและสร้างโปรแกรมประยุกต์ของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้อย่างง่ายดายด้วย

เนื่องจากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทำให้เราสามารถตรวจวัดสิ่งแวดล้อมรอบๆตัวเราได้อย่างทั่วถึงและมีประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลทำให้สามารถปรับตัวและดำรงชีวิตอยู่อย่างปลอดภัยและสะดวกสบายมากขึ้น ในปัจจุบันได้มีการทดลองติดตั้งและใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายอยู่หลายโครงการ เช่น

1. โครงการใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อช่วยนักชีววิทยาศึกษาพฤติกรรมของนก Leach Stor Petrel บนเกาะ Great Duck Island (อินเทลและมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์)

2. โครงการตรวจจับการเคลื่อนไหวของทหารและยานต์ในทะเลทรายหรือพื้นที่อื่นๆที่  
เข้าใจถึงไควาก (Ohio State)
3. โครงการใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับการตรวจวัดความชื้นและสภาวะอื่นๆ  
ทางการเกษตรสำหรับสวนองุ่นขนาดใหญ่ใน โอเรกอน (Oregon) เพื่อพัฒนาระบบชลประทานและ  
การให้น้ำเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร (อินเทลและคิงแฟมมิลีฟาร์ม)
4. โครงสร้างบ้านอัจฉริยะสำหรับผู้สูงอายุและผู้ป่วยเป็น โรคอัลไซเมอร์ (Alzheimer)
5. โครงการตรวจวัดลักษณะความผิดปกติใต้ดินก่อนเกิดแผ่นดินไหว (มหาวิทยาลัยแคลิ  
ฟอร์เนีย ลอสแอนเจลิส)
6. โครงการติดตั้ง Mote บนต้นไม้เพื่อช่วยนักชีววิทยา ศึกษาการดำรงชีวิตและ  
เจริญเติบโตของพืช (มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์)
7. โครงการติดตั้งเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของสะพาน  
Golden Gate เป็นต้น

การออกแบบและใช้งาน Mote นั้นขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้ (Application) แต่ไม่ว่าเราจะ  
นำมันไปใช้งานในรูปแบบใดก็ตามมันยังมีข้อจำกัดในการใช้พลังงานซึ่ง Mote จำเป็นต้องใช้  
พลังงานอย่างประหยัดเพื่อยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานที่สุด โดยทั่วไปแล้ว Mote ควรมีอายุการใช้  
งานอย่างน้อย 1 ปี ต่อพลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด AA จำนวนสองก้อน อย่างไรก็ตามอายุการใช้  
งานของมันก็ขึ้นอยู่กับความถี่ในการตรวจวัดสภาพแวดล้อมและการรับส่งข้อมูลในการประยุกต์ใช้  
งานในด้านต่าง ๆ นั้นเอง

ไมโครโปรเซสเซอร์ของ Mote จะประหยัดพลังงานโดยการทำงานอยู่ในโหมด  
เตรียมพร้อม (Standby) เป็นส่วนใหญ่ และจะถูกกระตุ้นให้ทำงานเมื่อถึงกำหนดเวลาที่มันต้อง  
ตรวจวัดข้อมูลและเวลาที่มันต้องตรวจวัดข้อมูลและเวลาที่มันต้องส่งหรือรับข้อมูลจาก Mote ตัวอื่น  
ไมโครโปรเซสเซอร์ใช้พลังงานน้อยมากหรือประมาณหนึ่งมิลลิวัตต์ ในขณะที่มันทำงานและใช้  
พลังงาน 1 ถึง 10 ไมโครวัตต์ในโหมดเตรียมพร้อม อุปกรณ์เก็บข้อมูลของ Mote มีความจุอย่างมาก  
เมื่อเทียบกับคอมพิวเตอร์ทั่วไป Mote นั้นมีการเข้าถึงหน่วยความจำแบบสุ่ม (RAM) น้อยกว่า 10  
กิโลไบต์ และใช้หน่วยความจำประมาณ 100 กิโลไบต์ สำหรับเก็บซอฟต์แวร์ (Software) และ  
ประมาณ 1 กิโลไบต์ สำหรับหน่วยเก็บข้อมูลถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของเซ็นเซอร์ขนาดเล็กนั้น Mote จะใช้เทคโนโลยีหลายแบบซึ่งมีขนาดเล็กและใช้พลังงานน้อยเช่นเดียวกับไมโครโปรเซสเซอร์ ตัวอย่างของเทคโนโลยีเหล่านี้ได้แก่ การเปลี่ยนสัญญาณอะนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter หรือ ADC) ซึ่งเป็นตัวเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ได้จากเซ็นเซอร์ที่ใช้ตรวจจับหอบอกมาเป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital) ที่ไมโครโปรเซสเซอร์เข้าใจ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคโนโลยีเอ็มซีเอ็มเอสมาสร้างเป็นเซ็นเซอร์หลายชนิดซึ่งสามารถผลิตสัญญาณดิจิทัลให้กับหน่วยประมวลผลได้ด้วย ตัวอย่างของเซ็นเซอร์เหล่านี้ได้แก่ เซ็นเซอร์สำหรับวัดความเร่ง ซึ่งใช้สำหรับสั่งให้ถุงลม (Airbag) ทำงาน เซ็นเซอร์สำหรับตรวจจับความร้อนในร่างกายและสำหรับตรวจวัดสารแปลกปลอมในอากาศ นอกจากนี้บริษัทอินเทลก็กำลังสร้างระบบเซ็นเซอร์ที่เป็น ไบโอดีพ (Biochips) ซึ่งสามารถใช้ตรวจจับสารชีวภาพหรือชีวเคมีด้วย

การพัฒนาระบบสื่อสารของ Mote นั้นใช้ระบบวิทยุสื่อสารพลังงานต่ำซึ่งถูกผลิตขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีเดียวกันกับที่ใช้สร้างเครือข่ายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และพีซีเทีที่สามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้ โทรศัพท์มือถือ เนื่องจาก Mote ต้องประหยัดพลังงานที่ใช้ในการสื่อสารมันจึงถูกออกแบบมาให้ใช้เครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจเพื่อส่งข้อมูลผ่าน Mote เพื่อนบ้านที่อยู่ใกล้ ซึ่งก็จะใช้วิธีส่งผ่านข้อมูลต่อกันจนถึงปลายทาง

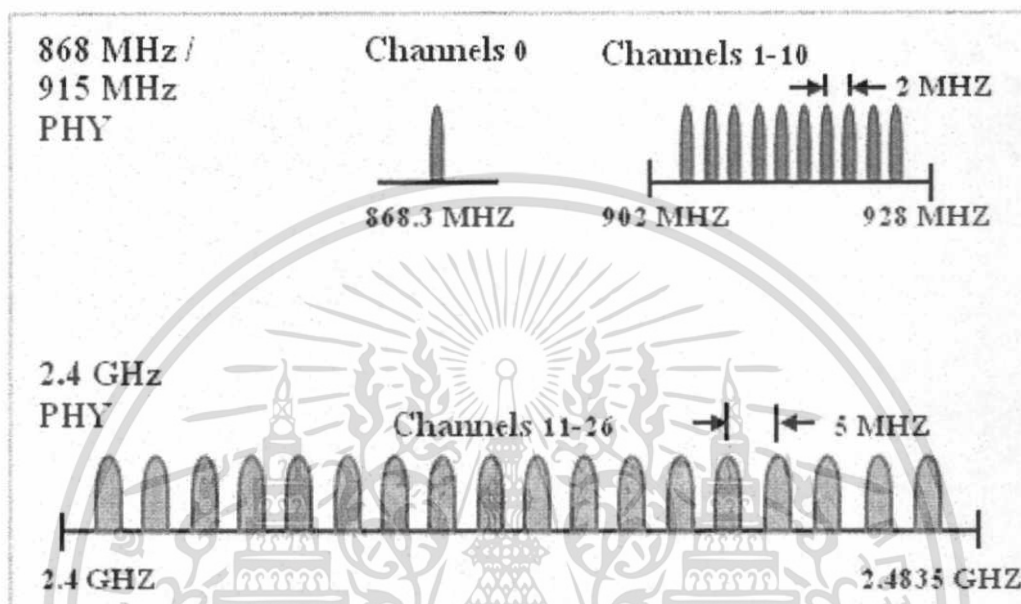
นอกจากนี้นักวิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถเติมพลังงานให้กับ Mote ด้วย ยกตัวอย่างเช่นระบบที่การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าและระบบที่เปลี่ยนการสั่นไหวของสภาพแวดล้อมเป็นพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

### 2.3 มาตรฐาน IEEE 802.15.4

ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 [7] สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าซิกบี ซึ่งคำว่าซิกบีนั้นได้มาจากการสังเกตพฤติกรรมการสื่อสารของผึ้ง การส่งข้อมูลข่าวสารของผึ้งนั้นจะทำการบินซิกแซ็กเพื่อบอก ตำแหน่ง ระยะทาง และทิศทางของอาหารที่พวกมันกำลังหาอยู่ให้กับผึ้งตัวอื่นๆ

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้ถูกกำหนดให้เป็นมาตรฐานสากลโดยสหพันธ์ซิกบี (ZigBee Alliance) [8] โดยมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็นการสื่อสารแบบไร้สายที่ใช้พลังงานต่ำ และมีราคาถูก เหตุผลที่มาตรฐานนี้ใช้พลังงานต่ำ คือ เพื่อให้สามารถทำเป็นระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Sensor Network) ได้ ระบบดังกล่าวสามารถทำงานได้ทุกสภาพแวดล้อมไม่ว่าจะอยู่ในอาคาร หรือนอกอาคาร สามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ขนาดเล็กได้นานหลายเดือน ระบบนี้จึงเหมาะสมกับการตรวจจับ (Monitor) สิ่งที่น่าสนใจได้

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 นั้นได้กำหนดย่านความถี่ในการใช้งานไว้ 3 ย่านความถี่ คือ ที่ ย่านความถี่ 2.4 GHz มีช่องสัญญาณ 16 ช่อง คือช่องสัญญาณที่ 11-26 อัตราส่งข้อมูล 250 Kbps ที่ ย่านความถี่ 915 MHz มีช่องสัญญาณ 10 ช่อง คือ ช่องสัญญาณที่ 1-10 อัตราส่งข้อมูล 40 Kbps และ ที่ย่านความถี่ 868 MHz มีช่องสัญญาณ 1 ช่อง คือช่องสัญญาณที่ 0 อัตราส่งข้อมูล 20 Kbps แสดงได้ ดังภาพที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 ซึ่งต่อไปนี้จะแทนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ด้วยคำว่าซิกบี



รูปที่ 2.1 ย่านความถี่ของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 [8]

ตารางที่ 2.1 กลุ่มความถี่ของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (Frequency Band)

BAND	COVERAGE	DATA RATE	CHANNELS
2.4 GHz (ISM)	Worldwide	250 Kbps	16
915 MHz (ISM)	Americas	40 Kbps	10
868 MHz	Europe	20 Kbps	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 โครงสร้างเครือข่ายของซิกบี (ZigBee Network Topology)

ซิกบี ได้แบ่งชนิดอุปกรณ์ทางกายภาพ (Physical Device) ออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. Full Function Device (FFD) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นเราท์เตอร์ (Router) หรือ สื่อกกลางในการรับส่งข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆ ใช้พลังงานจากสายไฟฟ้า (Power Line) สามารถทำงานได้ทุกโครงข่ายงาน (Topology) และสามารถทำเป็นจุดเชื่อมต่อได้

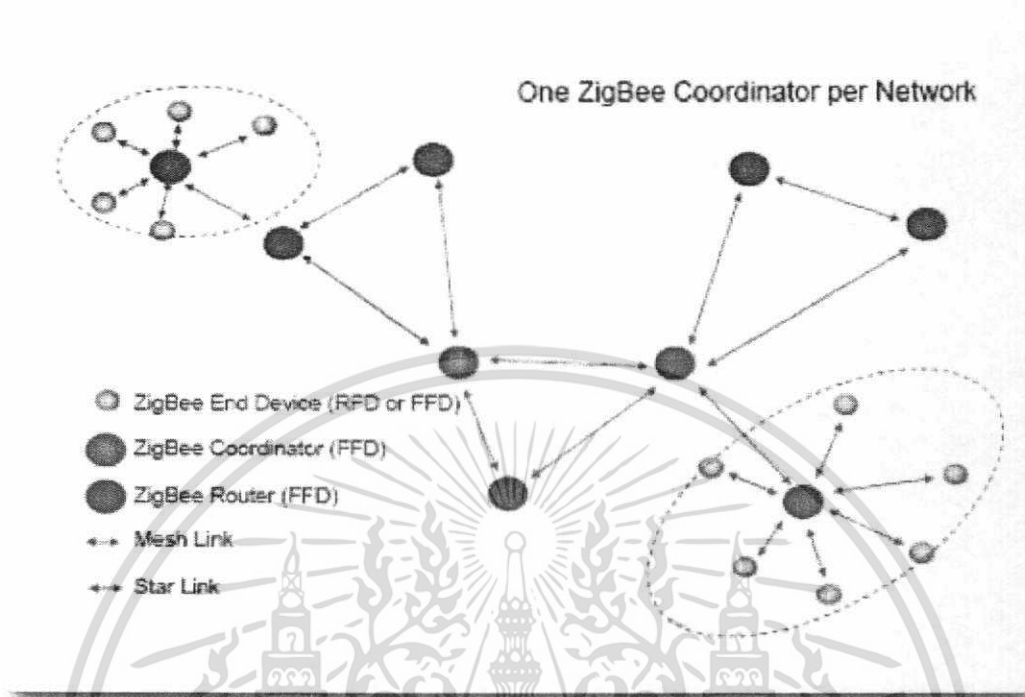
2. Reduce Function Device (RFD) คือ อุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ (Battery) ไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์อื่นๆ ได้ และถูกลดความสามารถในการทำโครงข่าย ซึ่งอุปกรณ์นี้สามารถทำโครงข่ายแบบดาว (Star) ได้ง่าย

ซิกบี ได้แบ่งอุปกรณ์ทางตรรกะ (Logical Device) ออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. ZigBee Coordinator (ZC) ทำหน้าที่สร้างเครือข่ายการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ปลายทาง (End Device) กับเราท์เตอร์ (Router) หรือตัวประสานงาน (Coordinator) กับตัวประสานงานด้วยกัน หรือ ตัวประสานงานกับเราท์เตอร์ โดยการกำหนดแอดเดรส (Address) ให้กับอุปกรณ์ในเครือข่ายที่สร้างขึ้นไม่ให้มีการซ้ำกัน ทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลในเครือข่าย การทำหน้าที่ดังกล่าวทำให้ ZC เป็น FFD

2. ZigBee Router (ZR) ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลและจัดการเส้นทางต่างๆของข้อมูลที่ส่งผ่านภายในโครงข่ายระหว่างคู่ของโหนดใดๆ การทำหน้าที่ดังกล่าวทำให้ ZR เป็น FFD

3. ZigBee End Device (ZED) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ปลายทาง ใช้พลังงานด้าเมื่อใช้งานเป็นโหนดที่อยู่ในส่วนของผู้ใช้งาน การทำหน้าที่ดังกล่าวทำให้ ZED เป็น RFD หรือ FFD บางกรณี จะขึ้นอยู่กับเซ็นเซอร์ที่ใช้ และคอยจัดเส้นทางของข้อความ รูปแบบเครือข่ายของซิกบีสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปแบบเครือข่ายซิกบี [9]

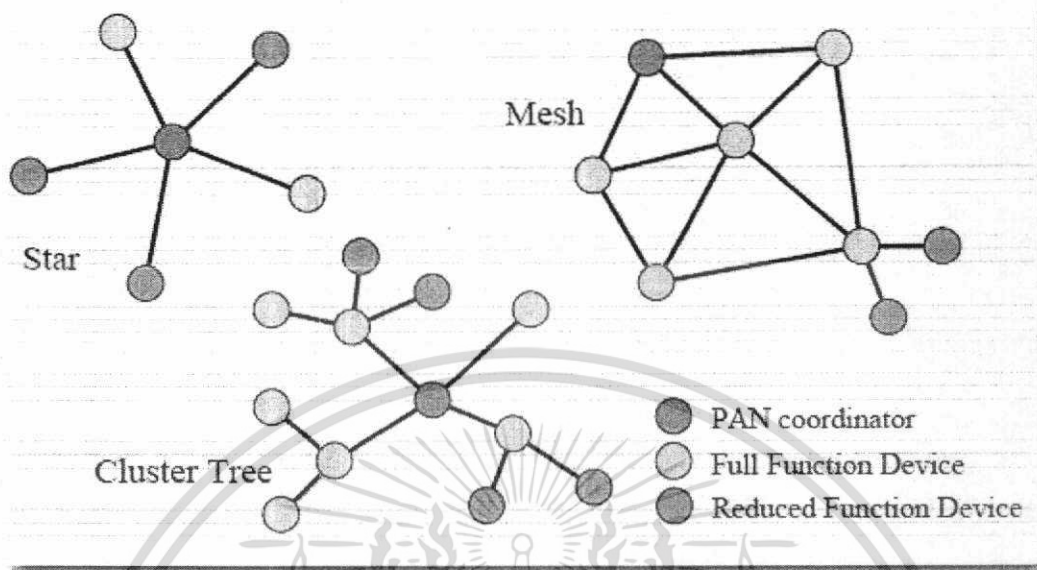
### 2.3.2 ส่วนประกอบของเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network หรือ WPAN)

ในระบบของซิกบีประกอบไปด้วยอุปกรณ์พื้นฐานหลายส่วน คือ Full-Function Device (FFD) หรือ Reduce-Function Device (RFD) ซึ่งภายในเครือข่ายใดๆก็จะมีหนึ่ง FFD ซึ่งใช้เป็นตัวประสานการเชื่อมต่อของเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (PAN Coordinator) FFD สามารถทำงานใน 3 โหมด [26] คือ ตัวประสานการเชื่อมต่อของเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Personal Area Network Coordinate) ตัวประสานการเชื่อมต่อ (Coordinator) และ Reduce Function Device (RFD) โดยที่ FFD สามารถส่งข้อมูลผ่าน RFD หรือ FFD ในขณะที่ RFD สามารถส่งข้อมูลผ่านได้เฉพาะ FFD

### 2.4 โครงสร้างของเครือข่าย (Network Topology)

โครงสร้างเครือข่ายที่ซิกบีรองรับได้แก่ โครงสร้างแบบดาว (Star) โครงสร้างแบบเครื่องต่อเครื่อง (Peer to Peer Topology) และโครงสร้างแบบกลุ่มของต้นไม้ (Cluster Tree) สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปแบบ โครงสร้างของเครือข่ายซิกบี [9]

#### 2.4.1 โครงสร้างเครือข่ายแบบดาว (Star Topology)

ในโครงสร้างเครือข่ายแบบดาวการสื่อสารที่ติดต่อกันระหว่างอุปกรณ์และส่วนควบคุมส่วนกลาง (Single Central Controller) หรือเรียกว่าตัวประสานการเชื่อมต่อของเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล ที่เป็นศูนย์กลางในการส่งข้อมูลของเครือข่าย การใช้ประโยชน์จากเครือข่ายที่มีโครงสร้างแบบนี้ สามารถยกตัวอย่างได้เช่น การทำระบบบ้านอัจฉริยะ (Home Automation) อุปกรณ์ที่ต่อกับคอมพิวเตอร์ (Personal Computer Peripherals) ของเล่นและเกมส์ หลังจากในตัว FFD ทำงาน เริ่มต้น FFD จะสร้างเครือข่ายของตนเองและกลายมาเป็นตัวประสานการเชื่อมต่อของเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล ในแต่ละเครือข่ายแบบดาวจะเลือกหมายเลขเครือข่ายส่วนบุคคล (PAN ID) ที่ยังไม่ได้ถูกเลือกในเครือข่ายอื่นๆ ภายในเครือข่ายที่มันมองเห็น (Radio Sphere)

#### 2.4.2 โครงสร้างเครือข่ายแบบเครื่องต่อเครื่อง (Peer to Peer Topology)

ในโครงสร้างแบบเครื่องต่อเครื่องนี้จะมีหนึ่งตัวที่เป็นตัวประสานการเชื่อมต่อของเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล ส่วนที่แตกต่างกับโครงสร้างแบบดาว คือ ทุกอุปกรณ์สามารถสื่อสารกับทุกอุปกรณ์อื่นได้ในระยะเวลาส่งข้อมูลที่สามารถส่งถึง โครงสร้างแบบเครื่องต่อเครื่องนี้เป็นได้ทั้งแอดฮอค (Ad-Hoc) การจัดตั้งด้วยตัวเอง (Self Organizing) และการรักษาสภาพด้วยตัวมันเอง (Self Healing) เช่น การควบคุม ภายในโรงงานและการดูแลและติดตาม (Monitoring) เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและการติดตามสินค้าหรือสิ่งของ (Inventory Tracking) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 โครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มของต้นไม้ (Cluster Tree Topology)

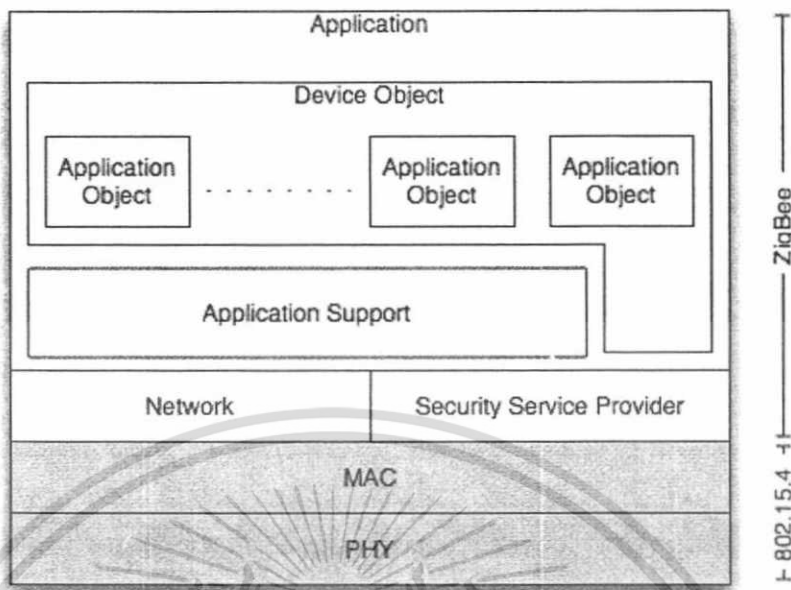
เครือข่ายแบบกลุ่มของต้นไม้เป็นรูปแบบพิเศษของเครือข่ายแบบเครื่องต่อเครื่องซึ่งอุปกรณ์ส่วนมากเป็น FFD และ RFD ที่จะเชื่อมต่อกับเครือข่ายแบบกลุ่มของต้นไม้ที่โหนดสุดท้ายของสาขา สำหรับ FFD บางอุปกรณ์นั้นสามารถเป็นตัวประสานการเชื่อมต่อและมีการประสานเวลา (Synchronization) กับอุปกรณ์อื่นๆ และตัวประสานการเชื่อมต่อเหล่านี้เป็นตัวประสานการเชื่อมต่อของเครือข่ายส่วนบุคคล โดยตัวประสานการเชื่อมต่อของเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลจะสร้างกลุ่มชุดแรกด้วยตัวมันเองที่หัวของกลุ่ม (Cluster Head หรือ CLH) ด้วยหมายเลขของกลุ่ม (Cluster ID หรือ CID) ที่มีค่าหมายเลขเป็น 0

การเลือกหมายเลขของเครือข่ายส่วนบุคคลจะเลือกหมายเลขที่ยังไม่ถูกใช้และการกระจาย (Broadcast) เพรอบคอน (Beacon) ไปยังอุปกรณ์ข้างเคียง อุปกรณ์ที่ได้รับเบคอนอาจจะร้องขอเข้าร่วมเครือข่ายที่ CLH ถ้าตัวประสานการเชื่อมต่อของเครือข่ายส่วนบุคคลอนุญาตจะบันทึกอุปกรณ์ใหม่นั้นเป็นโหนดลูก (Child Node) และอุปกรณ์ตัวใหม่จะบันทึก CLH เป็นโหนดผู้ปกครอง (Parent Node) ข้อดีของโครงสร้างกลุ่มของต้นไม้คือ เป็นการเพิ่มการครอบคลุมพื้นที่ที่มีความต้องการเข้าร่วมในเครือข่ายมาก

### 2.5 โพรโทคอลของซิกบี (ZigBee Protocol)

โพรโทคอลซิกบีจะใช้เฉพาะในส่วนของชั้นโปรแกรมประยุกต์ (Application Layer) ชั้นสนับสนุนโปรแกรมประยุกต์ (Application Support Layer) และชั้นเครือข่าย (Network Layer) เท่านั้น ในส่วนของชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Mac Layer) และชั้นกายภาพ (Physical Layer) จะใช้ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งทำงานในเรื่องของระดับกำลังสัญญาณ คุณภาพของการเชื่อมต่อ (Link Quality) การควบคุมการเข้าถึง (Access Control) และการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น โดยมีโครงสร้างของโพรโทคอลซิกบีเป็นดังนี้

ชั้นโปรแกรมประยุกต์เป็นชั้นที่มีส่วนที่เรียกว่า โครงประกอบโปรแกรมประยุกต์ (Application Framework) โดยมีออปเจกต์ของอุปกรณ์ซิกบี (ZigBee Device Object หรือ ZDO) ทำหน้าที่ในการควบคุมการเข้าถึงและใช้งานในชั้นโปรแกรมประยุกต์ ส่วนในชั้นสนับสนุนโปรแกรมประยุกต์นั้น ทำหน้าที่ในการสร้างเฟรมของชั้นโปรแกรมประยุกต์และทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลรวมถึงการจัดการด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องกับชั้นโปรแกรมประยุกต์ และส่วนของชั้นเครือข่าย ทำหน้าที่ในการค้นหาเส้นทางของข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางที่อยู่ภายในเครือข่ายเดียวกันหรือต่างเครือข่ายกัน โครงสร้างชั้นโพรโทคอลของซิกบีแสดงในภาพที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างชั้น โปรโตคอลของซิกบี (ZigBee Protocol Stack) [8]

ขั้นตอนการทำงานของ โปรโตคอลซิกบีในอุปกรณ์ต่างๆเป็นดังนี้

ตัวประสานการเชื่อมต่อของซิกบี (ZigBee Coordinator) เริ่มต้นเครือข่ายโดยการตรวจสอบการเข้าใช้ช่องสัญญาณของสัญญาณวิทยุในบริเวณรอบๆ ถ้ามีช่องสัญญาณที่ไม่ได้ถูกใช้โดยตัวประสานการเชื่อมต่อของซิกบีตัวอื่น ก็สามารถเริ่มต้นเครือข่ายได้ จากนั้นตัวประสานการเชื่อมต่อของซิกบีจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของเครือข่ายรองรับการเข้าร่วมเครือข่ายของอุปกรณ์ซิกบีปลายทาง (ZigBee End Device) และรองรับการร้องขออื่นๆตามมาตรฐานด้วยเช่นกัน

อุปกรณ์ซิกบีปลายทางเริ่มการทำงานโดยการร้องขอไปยังตัวประสานการเชื่อมต่อของซิกบีประจำเครือข่ายนั้นๆ โดยการตรวจสอบผ่านช่องสัญญาณต่างๆว่าตัวประสานการเชื่อมต่อของซิกบีใช้ช่องสัญญาณใดอยู่ เมื่อทำการเข้าร่วมเครือข่ายเสร็จสิ้นอุปกรณ์ซิกบีปลายทางจึงสามารถทำการร้องขอคำสั่งอื่นๆผ่านทางตัวประสานการเชื่อมต่อของซิกบีได้

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของซิกบี, RFID และ Bluetooth

คุณสมบัติ	ซิกบี	RFID	Bluetooth
มาตรฐาน	802.15.4	802.11b	802.15.1
ย่านความถี่ที่ใช้ งาน	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
จำนวน ช่องสัญญาณ	ประมาณ 16 ช่องสัญญาณ		แถบยุโรปและอเมริกา แบ่งออกเป็น 179 ช่องสัญญาณ
ระยะทำการ	ภายในอาคาร 40 m ภายนอกอาคาร 120 m	< 2 เมตร	5-10 เมตร
อัตราการส่งถ่าย ข้อมูล	1200 - 115200 bps	32-128 bps	1Mbps
การใช้พลังงาน	ต่ำคือ 0.1 มิลลิวัตต์	ต่ำ	ต่ำคือ 0.1 วัตต์
ระบบป้องกัน	128 บิต AES และ Application layer		ใช้การป้อนรหัสก่อน การเชื่อมต่อและป้องกัน
	ผู้ใช้งานกำหนด		การตัดสัญญาณระหว่าง สื่อสารโดยสลับ ช่องสัญญาณไปมา 64 บิต, 128 บิต
ขนาด	เล็ก	เล็ก	เล็ก
ราคา	ถูก	ถูก	สูง
ความเสี่ยงต่อ การถูกรบกวน	สูง	สูง	สูง
Complexity	ง่าย	ง่าย	ยาก
Power Profile	หลายปี	หลายชั่วโมง	หลายวัน

คุณสมบัติ	ซิกบี	RFID	Bluetooth
Nodes/Master	64000		7
Latency	30 มิลลิวินาที	Enumeration สูงสุด 3 วินาที	Enumeration สูงสุด 10 วินาที
Extend ability	ได้	อาจจะได้	ไม่ได้
TX	35 mA	20 +mA	40 mA
Standby	3 ไมโครแอมป์	20 มิลลิแอมป์	200 ไมโครแอมป์
หน่วยความจำ	32-60 กิโลไบต์	100+ กิโลไบต์	100+ กิโลไบต์
Topology	Mesh networking Star networking Cluster tree networking		Point to multi-point

## 2.6 โพรโทคอลค้นหาเส้นทางของซิกบี (ZigBee Routing Protocol)

### AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) Routing Algorithm

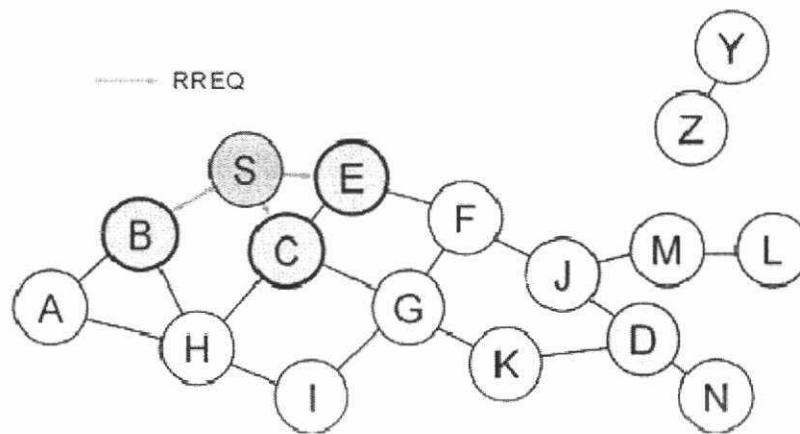
โพรโทคอลค้นหาเส้นทางของซิกบีเป็นโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่นิยมมากชนิดหนึ่งสำหรับเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ (Ad Hoc Network) มีลักษณะคล้ายกับการหาเส้นทางจากต้นแบบไดนามิก (Dynamic Source Routing หรือ DSR) ในส่วนที่มีการกระจายการร้องขอการค้นหาเส้นทาง (Broadcast Route Request) ไปยังเพื่อนบ้านและส่งข้อมูลการร้องขอเป็นแบบเครื่องต่อเครื่อง (Hop-By-Hop) ในการลดโอเวอร์เฮด (Overhead) ของการร้องขอการค้นหาเส้นทาง (Route Request) แต่ละโหนดจะมีกระบวนการปรับปรุงตารางค้นหาเส้นทาง (Routing Table) ในการจัดการข้อมูลของเส้นทางในโหนดข้างเคียง แต่ละโหนดจะมีการปรับปรุงตารางเป็นคาบเวลา (Periodically) โดยที่ขึ้นอยู่กับกรร้องขอด้วย ในการปรับปรุงนั้นจะตรวจสอบแต่ละโหนดข้างเคียงและกระจายไปยังโหนดอื่นๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม AODV มีจุดอ่อนอยู่ที่มีการเคลื่อนที่ของแต่ละ

โหนดสูง (High Mobility) ซึ่งสาเหตุทำให้มีการจราจรที่หนาแน่น (High Traffic) ที่เกิดจากการปรับปรุงตารางการลดความหนาแน่นของการจราจรในเครือข่ายจะช่วยลดอัตราการปรับปรุงตารางการค้นหาเส้นทางได้ แต่ก็ส่งผลให้เกิดความล้มเหลวในการค้นหาเส้นทาง (Routing Failure) ได้เช่นกัน

AODV นั้นเป็นโปรโตคอลแบบ Source Initiated On-Demand Driven/Reactive ซึ่งหาเส้นทางก็ต่อเมื่อต้นทาง (Source) ต้องการหาเส้นทางไปยังปลายทาง (Destination) เมื่อหาเส้นทางได้แล้วจะหยุดการค้นหา ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะช่วยลดการใช้แบนวิธด์ (Bandwidth) ในช่องสัญญาณ แต่จะต้องเสียเวลาการหาเส้นทางใหม่เมื่อต้องการส่งข้อมูล เนื่องจากโปรโตคอลนี้ใช้ในลักษณะของเครือข่ายที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เช่น มีการย้ายตำแหน่งของโหนดที่เคลื่อนย้ายได้ (Mobile Node) เป็นต้น โปรโตคอลนี้จะมีการส่งข้อความควบคุม (Control Message) เป็นช่วงๆ เพื่อใช้ในการกำหนดเส้นทางหรือปรับปรุงเส้นทาง

สำหรับโหนดที่สามารถติดต่อได้โดยตรงจะเรียกว่าโหนดข้างเคียง (Neighbor) โดยโหนดจะเก็บข้อมูลของโหนดข้างเคียง เมื่อได้รับ Hello Message ที่แต่ละโหนดจะทำการกระจายข้อมูลออกมาตามช่วงเวลาที่กำหนดเอาไว้ เมื่อมีโหนดใดๆที่ต้องการส่งข้อความ (Message) ไปยังโหนดอื่นๆที่ไม่ใช่โหนดข้างเคียง โหนดตัวนั้นจะทำการ Broadcast Route Request Message (RREQ) ซึ่งใน RREQ จะประกอบไปด้วย ต้นทาง (Source) ปลายทาง (Destination) อายุ (Life Span) ของข้อมูลและหมายเลขลำดับ (Sequence Number)

การทำงานของการค้นหาเส้นทาง AODV จะเริ่มเมื่อโหนดต้นทางต้องการที่จะส่งข้อมูลไปยังปลายทาง โหนดต้นทางจะทำการส่งข้อมูลการร้องขอการค้นหาเส้นทาง (Route Request หรือ RREQ) ไปยังโหนดข้างเคียงและโหนดที่ได้รับก็จะทำการส่งต่อไปยังโหนดข้างเคียงต่อไปเรื่อยๆ จนถึงโหนดปลายทางที่ต้องการที่จะติดต่อกับ เมื่อโหนดปลายทางได้รับ RREQ ตัวแรกที่มาถึง โหนดปลายทางจะส่งข้อความตอบกลับการค้นหาเส้นทาง (Route Reply) กลับไปยังโหนดต้นทางที่ทำการส่ง RREQ มาให้โดยส่งกลับไปบนเส้นทางที่ RREQ ตัวแรกมาถึง เพราะถือว่าใช้เวลา น้อยที่สุดในการส่ง RREQ มาให้โดยส่งกลับไปบนเส้นทางที่ RREQ ตัวแรกมาถึงเพราะถือว่าใช้เวลา น้อยที่สุดในการส่ง RREQ มาจากต้นทาง การค้นหาเส้นทางของโปรโตคอลนี้ได้แสดงดังภาพที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการค้นหาเส้นทางของโปรโตคอล AODV [10]

## 2.7 การประยุกต์ใช้งานของซิกบี (ZigBee Application)

ซิกบี เป็นชิพเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็ก การนำมาใช้งานนั้น จะใช้ในกรณีที่ต้องการอัตราการส่งข้อมูลต่ำ (Low Data Rate) และใช้พลังงานต่ำ (Low Power Consumption) การประยุกต์ใช้ซิกบีมีตัวอย่างดังนี้คือ

- การควบคุมและความบันเทิงภายในบ้าน (Home Entertainment and Control) เช่น ระบบเปิด ปิด ไฟแบบอัตโนมัติ การควบคุมอุณหภูมิ การรักษาความปลอดภัย การควบคุมการดูหนังและฟังเพลง เป็นต้น
- การรับรู้ภายในบ้าน (Home Awareness) เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับน้ำ ตรวจจับพลังงาน ตรวจจับควัน ตรวจจับไฟ และระบบเครื่องใช้แบบอัจฉริยะ
- การบริการแบบเคลื่อนที่ (Mobile Device) เช่น ระบบชำระเงิน ระบบติดตามและควบคุม ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบดูแลสุขภาพ
- โรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Plant) เช่น การควบคุมกระบวนการ การจัดการสิ่งของที่มีค่า การจัดการด้านสิ่งแวดล้อม การจัดการด้านพลังงาน และการควบคุมอุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 XBee-Pro

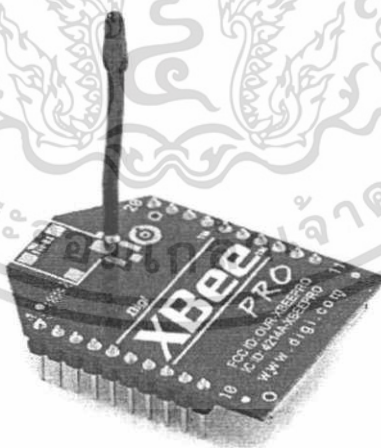
XBee-Pro เป็นอุปกรณ์ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) และมีเสาอากาศอยู่ภายใน อุปกรณ์ XBee-Pro จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่รับและส่งสัญญาณ (Transceiver) สามารถทำหน้าที่ส่งหรือรับสัญญาณสลับกันไปในเวลาเดียวกัน (Half Duplex) ซึ่ง XBee-Pro ที่ใช้ในการวิจัยนั้นใช้ความถี่ 2.4 GHz มีระดับการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ สามารถติดตั้งได้สะดวก การรับส่งข้อมูลจะเป็นการติดต่อภายใน (Interface) แบบการรับและส่งแบบสากลในเวลาที่แตกต่างกัน (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter หรือ UART) การควบคุม XBee-Pro นั้นสามารถควบคุมผ่านทาง AT Command โดยใช้โปรแกรม X-CTU โปรแกรมไฮเปอร์เทอร์มินอล (Hyper Terminal) หรือผ่านทางารรับส่งข้อมูลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

### 2.8.1 ชุดทดลองประกอบ XBee-Pro

ภายในชุดทดลองประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

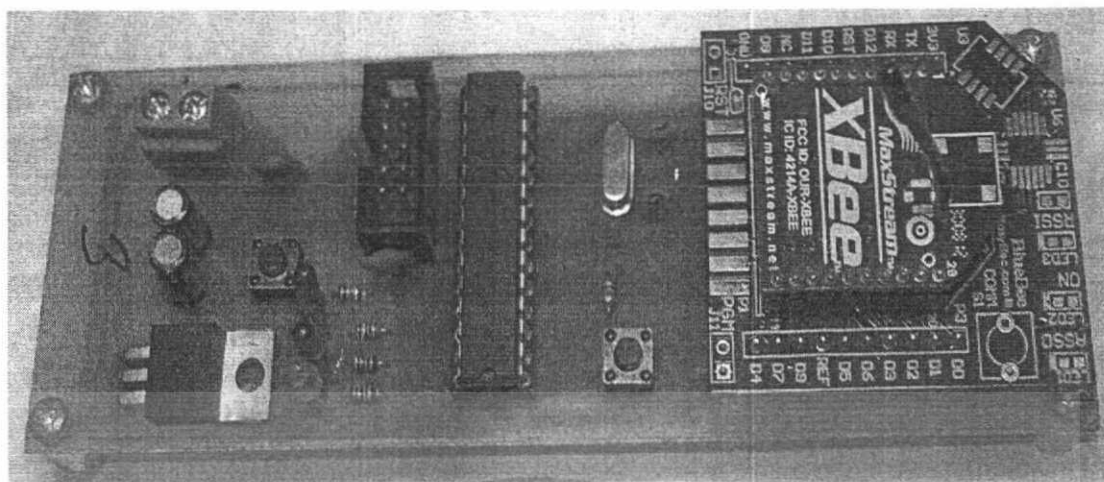
- ชิพ X Bee-Pro โมดูลสื่อสารข้อมูลไร้สาย 2.4 GHz จำนวน 6 ตัว
- แผงวงจรเชื่อมต่อ XBee-Pro จำนวน 5 ตัว
- บอร์ดเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ จำนวน 1 ตัว

ชุดอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6, 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ ชิพ XBee-Pro จะต่อกับแผงวงจรเชื่อมต่อ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ออกแบบมาให้ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด AA 1.5 V จำนวน 4 ก้อน และในส่วนบอร์ดเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์จะใช้พลังงานไฟฟ้าจากคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB รวมทั้งสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ด้วย

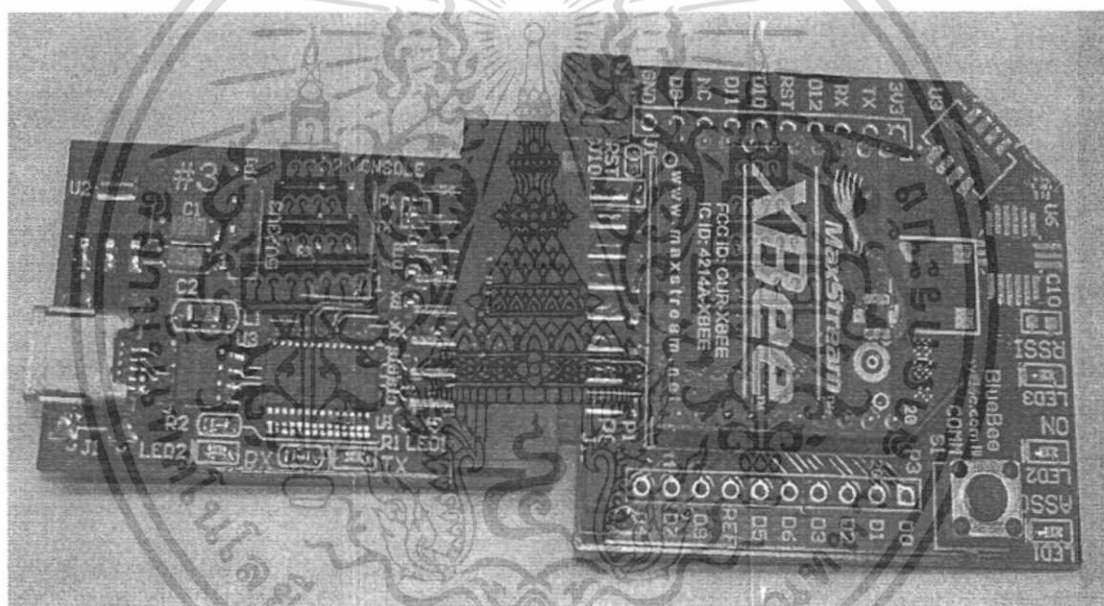


รูปที่ 2.6 โมดูลสื่อสารข้อมูลไร้สาย XBee-Pro [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แผงวงจรเชื่อมต่อเชื่อมต่อ XBee-Pro [11]



รูปที่ 2.8 บอร์ดเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ [11]

### 2.8.2 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติที่สำคัญ

โมดูลสื่อสารข้อมูลไร้สายแต่ละยี่ห้อนั้นจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับผู้ผลิต สำหรับลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติที่สำคัญของ XBee-Pro นั้นแสดงในตารางที่

2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติที่สำคัญของ XBee-Pro [11]

ประสิทธิภาพ	
ระยะการส่งสัญญาณภายในอาคาร	ประมาณ 100 เมตร
ระยะการส่งสัญญาณภายนอกอาคาร	ประมาณ 1,500 เมตร
กำลังในการส่งสัญญาณเอทพุท	100 mW
อัตราการส่งข้อมูล	250,000 bps
อัตราการส่งข้อมูลในพอร์ตอนุกรม	1200 - 115,200 bps
ความไวในการรับสัญญาณ	100 dBm (ความคลาดเคลื่อน 1%)
ความต้องการด้านพลังงาน	
การใช้แรงดันไฟฟ้า	2.8 - 3.4 V
กระแสไฟฟ้าในการรับข้อมูล	PL=0 (10dBm): 137mA(3.3V) 139mA(3.0V) PL=1 (12dBm): 155mA(3.3V) 153mA(3.0V) PL=2 (14dBm): 170mA(3.3V) 171mA(3.0V) PL=3 (16dBm): 188mA(3.3V) 195mA(3.0V) PL=4 (10dBm): 215mA(3.3V) 227mA(3.0V)
สถานะว่าง/กระแสไฟฟ้าในการส่งข้อมูล	55mA(3.3V)
กระแสไฟฟ้าเมื่อไม่มีการใช้งาน	< 10 $\mu$ A
ลักษณะทั่วไป	
ความถี่	ISM 2.4 GHz
ขนาด	2.438cm x 3.294cm
อุณหภูมิ	40° to 85° C
เสาอากาศที่สามารถใช้ได้	Whip, Chip หรือ U.FL Connector
การทำเครือข่ายและความปลอดภัย	
การสนับสนุน โครงสร้างเครือข่าย	Point-to-Point, Point-to-multipoint & Peer-to-peer
จำนวนช่องสัญญาณ	12 Direct Sequence Channels
การเลือกแอดเดรส	PAN ID, Channel and Address
การรับรองอุปกรณ์	65,535 Device(0x000-0xFFFF) 64 bits

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

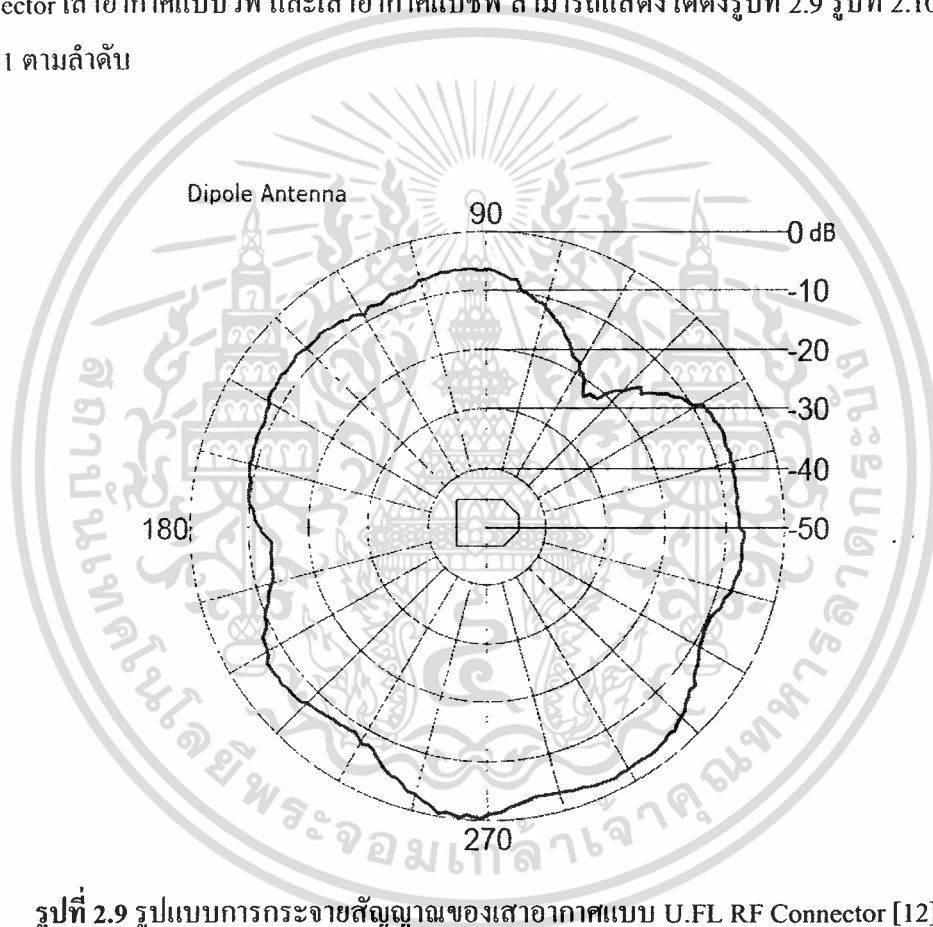
ตารางที่ 2.4 แสดงขาสัญญาณของโมดูล XBee-Pro

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DO8*	Output	Digital Output 8
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI	Output	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator
Pin #	Name	Direction	Description
7	PWM1	Output	PWM Output 1
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ / DI8	Input	Pin Sleep Control Line or Digital Input 8
10	GND	-	Ground
11	AD4 / DIO4	Either	Analog Input 4 or Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator
14	VREF	Input	Voltage Reference for A/D Inputs
15	Associate / AD5 / DIO5	Either	Associated Indicator, Analog Input 5 or Digital I/O 5
16	RTS / AD6 / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Analog Input 6 or Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0	Either	Analog Input 0 or Digital I/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

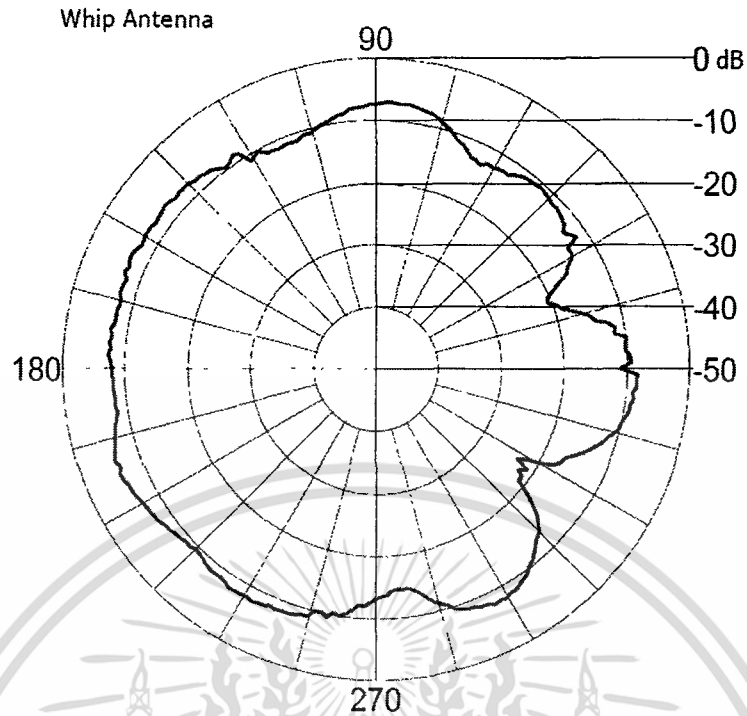
### 2.8.3 รูปการกระจายสัญญาณของ XBee-Pro

ชิพเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแต่ละประเภทนั้นจะมีระยะการกระจายสัญญาณที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดของเสาอากาศแต่ละประเภท โดยทั่วไปแล้วการกระจายสัญญาณคลื่นวิทยุจะเป็นแบบรูปโดนัท (Doughnut) ชิพเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายของ XBee-Pro นั้นมีเสาอากาศ 3 ประเภท คือ เสาอากาศแบบ U.FL RF Connector (U.FL RF Connector Antenna) เสาอากาศแบบวิฟ (Whip Antenna) และเสาอากาศแบบชิพ (Chip Antenna) การกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบ U.FL RF Connector เสาอากาศแบบวิฟ และเสาอากาศแบบชิพ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 รูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 ตามลำดับ

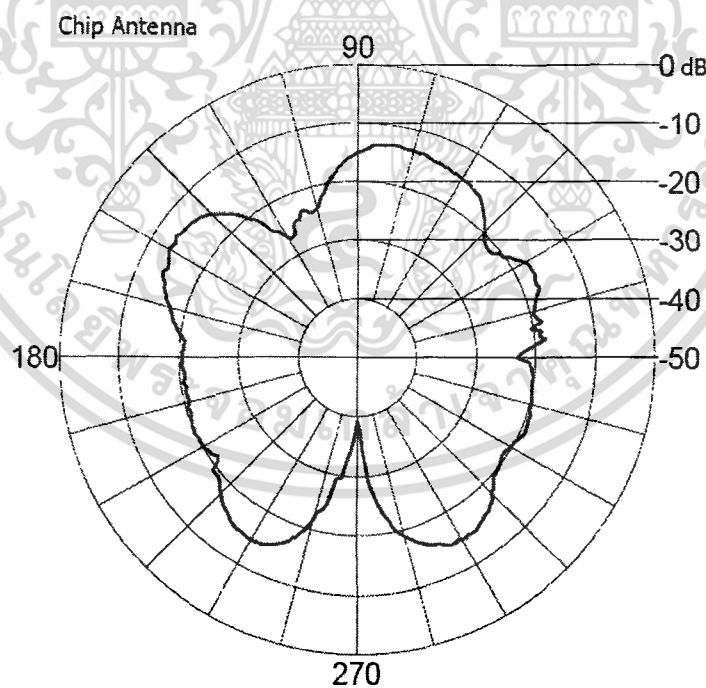


รูปที่ 2.9 รูปแบบการกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบ U.FL RF Connector [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 รูปแบบการกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบวิฟ [12]



รูปที่ 2.11 รูปแบบการกระจายสัญญาณของเสาอากาศแบบชิพ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผู้วิจัยได้ใช้งานสายอากาศชนิดแบบวิฟเนื่องจากชิพของ XBee-Pro ได้ถูกออกแบบมาในลักษณะแบบวิฟเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้เสาอากาศแบบวิฟเพื่อใช้สร้างอุปกรณ์ของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

## 2.9 ปัญหาที่พบในการส่งสัญญาณ

ปัญหาที่เกิดจากการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุขึ้น เกิดจากลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ (Radio Signal Propagation) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การจางหายของสัญญาณ และการแทรกสอด สามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.9.1 การจางหายของสัญญาณ (Fading) [13]

การสื่อสารไร้สายนั้นจะใช้การส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณ สัญญาณวิทยุจะได้รับผลกระทบจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่ผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น ติ๊ก อาคาร และสภาพแวดล้อมในขณะนั้น ทำให้สัญญาณดังกล่าวเกิดการจางหาย (Fading) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) การถูกบดบัง (Shadowing) และการสะท้อนหลายทิศทาง (Multipath)

#### 2.9.1.1 การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss)

การสูญเสียตามระยะทางเป็นการลดทอนของสัญญาณที่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณ ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณจะลดลงตามกฎการสูญเสียตามระยะทาง ซึ่งเมื่อระยะทางมีค่ามากขึ้นจะทำให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณวิทยุลดลง สำหรับสมการสูญเสียตามระยะทางแสดงได้ดังนี้

$$P_r = \frac{P_0}{d^\alpha} \quad (w)$$

โดยที่

$P_r$  คือ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับในหน่วยวัตต์

$P_0$  คือ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับใน 1 เมตร จากตัวส่งสัญญาณในหน่วยวัตต์

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณในหน่วยเมตร

$\alpha$  คือ ค่า Distance Power Gradient (สำหรับอาคารจะมีค่าเท่ากับ 4)

ในการคำนวณค่าความเข้มของสัญญาณในหน่วยเดซิเบลนั้น จะใช้สมการสูญเสียตามระยะทางดังนี้

$$L_p = L_0 + 10 \log_{10} d \quad (dB)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้  $L_0$  เป็นการสูญเสียตามระยะทางในหน่วยเดซิเบลที่ระยะทาง 1 เมตร มีสมการเป็นดังนี้

$$L_0 = 10 \log_{10} P_1 - 10 \log_{10} P_0 \quad (\text{dB})$$

$$L_0 = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_0} \quad (\text{dB})$$

$$L_0 = -10 \log_{10} G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad (\text{dB})$$

โดยที่

$G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง (Antenna Gain) (dB)

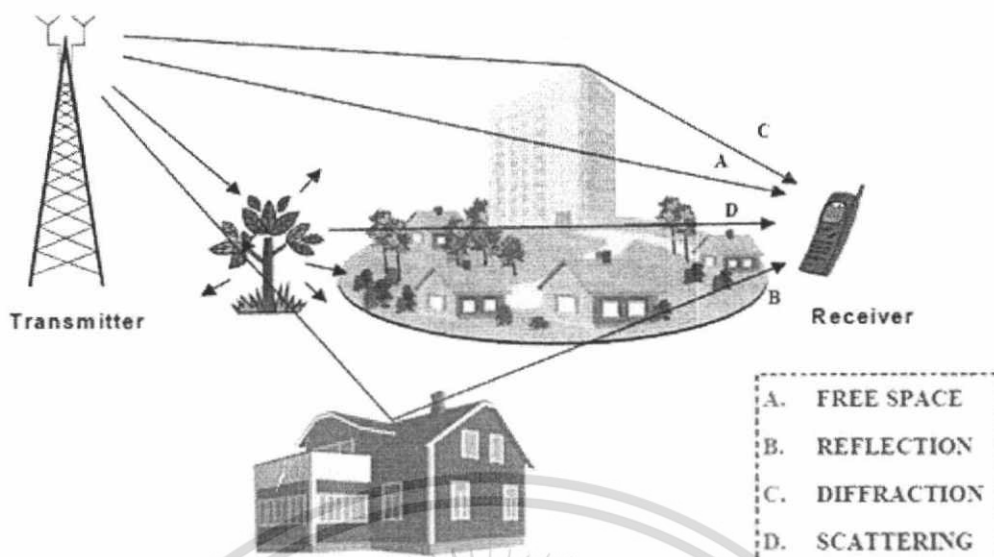
$G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านรับ (Antenna Gain) (dB)

### 2.9.1.2 การถูกบดบัง (Shadowing หรือ Large-Scale Fading)

เกิดขึ้นจากสัญญาณบางส่วนถูกบดบังไปชั่วขณะ โดยเกิดจากสภาพแวดล้อม เช่น การส่งสัญญาณภายในอาคาร เป็นต้น ทำให้ค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ และเมื่อเคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้นจะทำให้ได้สัญญาณที่มีกำลังดังเดิม

### 2.9.1.3 การสะท้อนหลายทิศทาง (Multipath Fading หรือ Small-Scale Fading)

เกิดขึ้นเมื่อเสาอากาศของตัวรับสัญญาณอยู่ใกล้พื้นผิวมาก เช่น การแพร่ของสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีลักษณะของสภาพแวดล้อมภายในอาคารที่มีสิ่งกีดขวางมาก จะทำให้เกิดการสะท้อน การหักเห และการกระเจิงของสัญญาณหลายทิศทาง ส่งผลให้สัญญาณที่ได้รับมีจำนวนหลายสัญญาณที่มาจากทิศทางที่ต่างกัน การมาถึงของสัญญาณที่ตัวรับจะมาถึงด้วยเวลาต่างกันด้วย รวมไปถึงขนาดและเฟสที่ต่างกันแปรผันตามระยะทาง ในบางระยะทางอาจมีเฟสที่ส่งผลให้สัญญาณเกิดการหักล้างกันได้ และในบางระยะทางสัญญาณจะเกิดการรวมกันหรือเสริมกัน ทำให้สัญญาณที่ได้มีแอมพลิจูดที่แตกต่างกันมาก ซึ่งส่งผลให้ระดับของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว โดยผลกระทบต่อลักษณะของการแพร่กระจายของคลื่นนั้น ได้แก่ การสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการกระเจิง (Scattering) การสะท้อนหลายทิศทางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การสะท้อนหลายทิศทาง (Multipath Fading) [14]

1) การสะท้อน (Reflection) การสะท้อนของคลื่นสัญญาณเกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นมีการเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง โดยที่ตัวกลางที่สองมีความยาวคลื่นมากกว่าเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นที่มาตกกระทบ ผลที่ได้คือ คลื่นจะมีการสะท้อนออกบางส่วน ส่วนที่เหลือจากการสะท้อนจะผ่านไปยังตัวกลางที่สอง สิ่งที่ทำให้เกิดการสะท้อนได้แก่ ติ๊ก และ กำแพง เป็นต้น

2) การเลี้ยวเบน (Diffraction) การเลี้ยวเบนของคลื่นเกิดขึ้นเนื่องจาก มีสิ่งกีดขวางหรือขอบกีดขวาง (Sharp Edge) อยู่ระหว่างอุปกรณ์รับและอุปกรณ์ส่งสัญญาณ ทำให้ไม่มีเส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Line of Sight) ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสอง ผลที่ได้คือ คลื่นสัญญาณจะเลี้ยวอ้อมสิ่งกีดขวาง โดยการเลี้ยวเบนของสัญญาณจะทำให้สามารถรับสัญญาณได้บางส่วน

3) การกระเจิง (Scattering) การกระเจิงของคลื่นเกิดขึ้นเนื่องจาก คลื่นเคลื่อนที่ไปตกกระทบกับสิ่งกีดขวางที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณ ผลที่ได้คือ ทำให้คลื่นสัญญาณเกิดการกระเจิงไปในทุกทิศทาง สิ่งที่ทำให้เกิดการกระเจิงได้แก่ เสา เป็นต้น

### 2.9.2 การแทรกสอด (Interference) [15]

การแทรกสอดนั้นเกิดได้จากสัญญาณนอกที่มีมากกว่า 2 สัญญาณ และมีระดับสัญญาณที่ใกล้เคียงกันมาแทรกสอดกัน สัญญาณที่ถูกแทรกสอดเมื่อมาถึงตัวรับจะไม่สามารถแยกข้อมูลออกจากสัญญาณได้ เนื่องจากมีสัญญาณรบกวน (Noise) เพิ่มขึ้นจึงต้องทำการลดระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณรบกวนลง การเกิดการแทรกสอดโดยทั่วไปแล้วเกิดขึ้นกับความถี่ที่สอดคล้องกัน ซึ่งเกิดการแทรกสอดนั้นมี 2 แบบ คือ

### 2.9.2.1 การแทรกสอดในช่องสัญญาณเดียวกัน (Co-Channel Interference)

เป็นการแทรกสอดระหว่างสัญญาณที่ใช้ในช่องสัญญาณเดียวกัน เช่น สถานีส่ง 2 สถานีใช้คลื่นความถี่เดียวกัน ทำให้ผู้รับสามารถรับสัญญาณจาก 2 แหล่งเข้ามาพร้อมกันได้ ผลกระทบที่เกิดขึ้น คือ เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญญาณ 2 สัญญาณที่ส่งจากแต่ละสถานี โดยที่สัญญาณที่ได้รับจากสถานีใดมีกำลังสูงกว่า จะรับได้ชัดมากกว่า แต่ถ้ามีกำลังที่ใกล้เคียงกันสลับสัญญาณชุดนั้นไปมา วิธีการแก้ไขสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกรองสัญญาณ (Filtering) โดยที่เครื่องรับจะต้องมีการกรองเอาเฉพาะสัญญาณที่ต้องการผ่านมาเท่านั้น หรืออาจจะใช้การกำหนดการสื่อสารให้มีแถบคัม กรณิของการแทรกสอดที่เกิดจากสัญญาณเดียวกันแต่เดินทางมาถึงเครื่องรับด้วยวิธีการหรือเส้นทางที่ต่างกัน อาจใช้สายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่น (Beam Width) ที่แคบ กล่าวคือ มีความสามารถในการเลือกทิศทางของลำคลื่น ได้ดี (Directional Antenna) หรืออาจใช้สายอากาศที่สามารถเลือกการแผ่กระจายสัญญาณที่ต้องการรับเข้าช่วย โดยร่วมกับการใช้วิธีการกรองสัญญาณ เป็นต้น

### 2.9.2.2 การแทรกสอดของสัญญาณที่มีความถี่อยู่ติดกัน (Adjacent Interference)

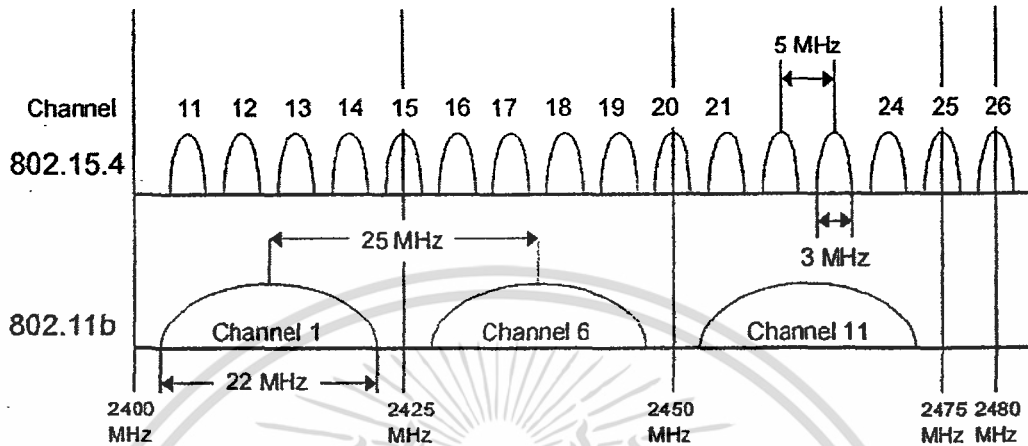
เป็นการแทรกสอดที่เกิดขึ้นระหว่างสัญญาณในช่องที่อยู่ติดกัน ซึ่งเกิดจากเครื่องรับสัญญาณจากช่องสัญญาณที่อยู่ติดกันเข้ามาพร้อมกับสัญญาณในช่องที่ต้องการ เช่น ช่องสัญญาณที่ 412 แทรกสอดกับช่องสัญญาณที่ 413 ดังนั้น การป้องกันการแทรกสอดของช่องประชิดในระบบสามารถทำได้โดยกำหนดแถบคัม หรือแถบกัน (Guard Band) เพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณในช่องที่อยู่ติดกันมาแทรกสอดได้ ยกตัวอย่างเช่น การกระจายเสียงของระบบ FM แถบกว้าง (Wideband FM Broadcasting) แต่ละช่องต้องการแถบความถี่ 200 KHz ในขณะที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณเพียง 180 KHz และเป็นแถบกัน 20 KHz เพื่อป้องกันการแทรกสอดของช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน

### 2.9.3 การใช้ความถี่ร่วมกันระหว่างซิกบีและสัญญาณไร้สาย (ZigBee and Wireless Radio Frequency Coexistence)

การรบกวนกันของซิกบีและสัญญาณไร้สายนั้นจะไม่เกิดขึ้นถ้าทั้ง 2 ระบบเลือกช่องสัญญาณที่ไม่รบกวนกัน เนื่องจากมีการแบ่งช่องสัญญาณ (Channel Spacing) ช่องสัญญาณของ IEEE 802.15.4 มี 16 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีแบนวิธ 3 MHz และมีการแบ่งช่องว่างออกเป็น 5 MHz จากรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงช่องสัญญาณที่ใช้บน WiFi (Wireless Fidelity) คือ ช่องสัญญาณที่ 16 และ 11 วิธีการหลีกเลี่ยงการรบกวนของสัญญาณจากเครือข่ายไร้สายคือ ใช้

ช่องสัญญาณที่ไม่ชนกันกับเครือข่ายแลนไร้สาย ได้แก่ ช่องความถี่ที่ 15 20 25 และ 26 สำหรับสูตรในการคำนวณความถี่คือ

$$\text{Center Frequency} = 2.405 + (CH - 11) \times 5$$



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบความถี่ของ IEEE 802.15.4 และ IEEE 802.11 [16]

## 2.10 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อันประกอบไปด้วยรายละเอียดของหลักการทํางาน ย่านความถี่และมาตรฐานต่างๆ รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายซึ่งปัจจุบันมีการนำมาทดสอบและวิจัยอย่างแพร่หลาย และที่สำคัญระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยใช้ชิปมีการใช้งานที่ย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการส่งผ่านช่องสัญญาณ ในบทต่อไปจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์เทคนิคการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยวิธีต่างๆ

## บทที่ 3

# ทฤษฎีและหลักการของการหาตำแหน่งภายในอาคาร

### 3.1 กล่าวนำ

การหาตำแหน่งภายในอาคารเป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน มีการประยุกต์ใช้งานการหาตำแหน่งภายในอาคารมากมาย อาทิเช่น การหาตำแหน่งของสินค้าในคลังสินค้า การหาตำแหน่งของคนไข้หรือบุคลากรภายในโรงพยาบาล การหาตำแหน่งของพนักงานดับเพลิงในอาคารที่เกิดเพลิงไหม้ การหาตำแหน่งของสุนัขตำรวจที่ถูกฝึกให้ค้นหาวัตถุระเบิดในอาคาร และการหาป้ายของเครื่องมือบำรุงรักษาหรืออุปกรณ์ที่กระจายกระจายในโรงงาน ในบทนี้ได้อธิบายถึงทฤษฎีและหลักการในการหาตำแหน่งภายในอาคาร วิธีการคำนวณตำแหน่งนั้นมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับว่าการออกแบบระบบระบบตำแหน่ง ถูกออกแบบมาอย่างไร และขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งด้วยการศึกษาระบบระบบตำแหน่งนั้น ข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณตำแหน่งมีหลายประเภท ได้แก่ อินฟราเรด (Infrared) อุลตราซาวด์ (Ultrasound) หรือ อุลตราโซนิก (Ultrasonic) และเลือกใช้การวัดความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength Indication : RSSI) งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่า RSSI เป็นข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ เนื่องจากสามารถส่งข้อมูลผ่านกำแพงหรือสิ่งกีดขวางภายในอาคารได้ วิธีการคำนวณตำแหน่งโดยใช้ค่า RSSI จึงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การวัดระยะทาง สามารถวัดได้โดยใช้ข้อมูลของเวลาที่ได้รับสัญญาณ (Time of Arrival) และค่าความแตกต่างของเวลาที่ได้รับสัญญาณ (Time Difference of Arrival) โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายพร้อมทั้งจำแนกประเภทและเทคนิคในการหาตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งวิธีการคำนวณหาตำแหน่งมีด้วยกัน 2 วิธี โดยวิธีการแรกคือเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง มีการคำนวณหาตำแหน่งด้วยวิธี MMSE และการคำนวณหาตำแหน่งโดยวิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด วิธีการที่ 2 คือ การคำนวณหาตำแหน่งแบบการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณโดยมีความสัมพันธ์กับระยะทางบนจุดที่สนใจ

ทั้งนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งเน้นในการพัฒนาเทคนิคและทดสอบเปรียบเทียบในการหาตำแหน่งภายในอาคารบนพื้นฐานเทคโนโลยี เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยจะทำการทดลองหาตำแหน่งต่างๆที่กำหนดไว้ และใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงทำหน้าที่ในการกระจายและอ่านค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ ซึ่งประสิทธิภาพความแม่นยำของทั้ง 2 วิธีนั้นจะทำการเปรียบเทียบจากค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดเฉลี่ย เพื่อนำมาวิเคราะห์ในการหาความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคาร

### 3.2 การวัดค่าความเข้มของสัญญาณ

ความเข้มของสัญญาณเป็นวิธีการวัดรูปแบบการลดทอนของสัญญาณวิทยุ (Radio Frequency Signal Attenuation) ภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารจากเซ็นเซอร์ไร้สายตัวหนึ่งไปยังเซ็นเซอร์ไร้สายอีกตัวหนึ่ง ซึ่งเรียกค่าดังกล่าวว่า ค่าความเข้มของสัญญาณ โดยค่าความเข้มของสัญญาณมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (\text{dB}) \quad (3-1)$$

กำหนดให้

$PL(d)$  คือ การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) ในหน่วยเดซิเบล (dB) ที่ระยะทาง  $d$

$PL(d_0)$  คือ การสูญเสียตามระยะทางที่ทราบแล้วในระยะทาง  $d_0$  (dB)

$n$  คือ เลขชี้กำลัง (Exponent) โดยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการกระจายสัญญาณ

$X_\sigma$  คือ ตัวแปรที่แทนความไม่แน่นอนของสภาวะที่ใช้ทดลอง

ตัวแปร  $n$  จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายในสภาวะแวดล้อมการกระจายสัญญาณภายในอาคาร โดยจะเปลี่ยนไปตามวัตถุและรูปแบบของสิ่งก่อสร้างภายในอาคาร ซึ่งสามารถหาค่า  $PL(d_0)$  ได้จากสมการดังนี้

$$PL(d_0) = 10 \cdot \log_{10}(P_t) - 10 \cdot \log_{10}(P_0) \quad (\text{dB})$$

$$PL(d_0) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_t}{P_0} \right) \quad (\text{dB})$$

$$PL(d_0) = -10 \cdot \log_{10}(G_t \cdot G_r) \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad (\text{dB})$$

$P_t$  คือ ค่ากำลังของสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณ (W)

$P_0$  คือ ค่ากำลังของสัญญาณที่ได้รับใน 1 เมตร จากตัวส่งสัญญาณ (W)

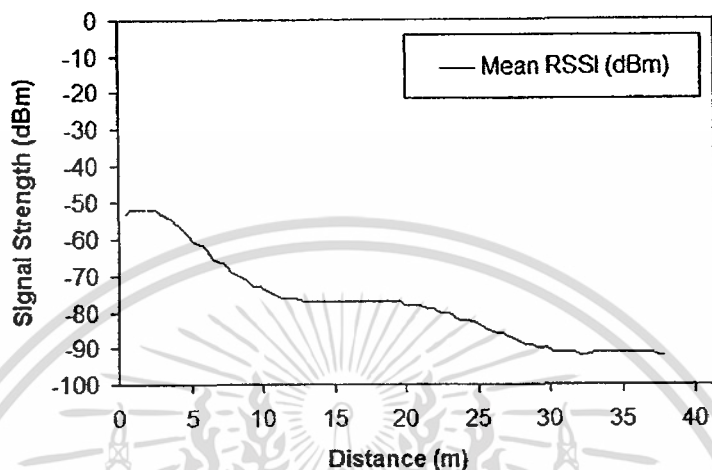
$G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง (Antenna Gain)

$G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านรับ (Antenna Gain)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น (m)

ค่าความเข้มสัญญาณของสัญญาณ (Received Signal Strength Indication หรือ RSSI) นั้นมีหน่วยเป็น เดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm) และมีค่าเป็นลบ (-) เมื่อวิเคราะห์จากสูตรจะพบว่าสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณกับระยะทางได้ เมื่อระยะทางมากขึ้นส่งผลให้ค่า  $d$  มีค่ามากทำให้ค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในขณะนั้นมีค่าลดน้อยลง โดยสูตรดังกล่าวมีความสัมพันธ์

ที่สอดคล้องกับการทดลอง รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณกับระยะทางที่วัดได้ในการทดลอง



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณกับระยะทาง [17]

### 3.3 การหาตำแหน่งโดยวิธีการเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง [18] – [19]

การหาตำแหน่งโดยวิธีการ Range-Based โดยวิธีนี้สามารถจำแนกได้ออกเป็นวิธีย่อย 2 วิธีด้วยกันคือ คือ วิธี MMSE และวิธีการหาตำแหน่งโดยใช้การอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด (Min-Max)

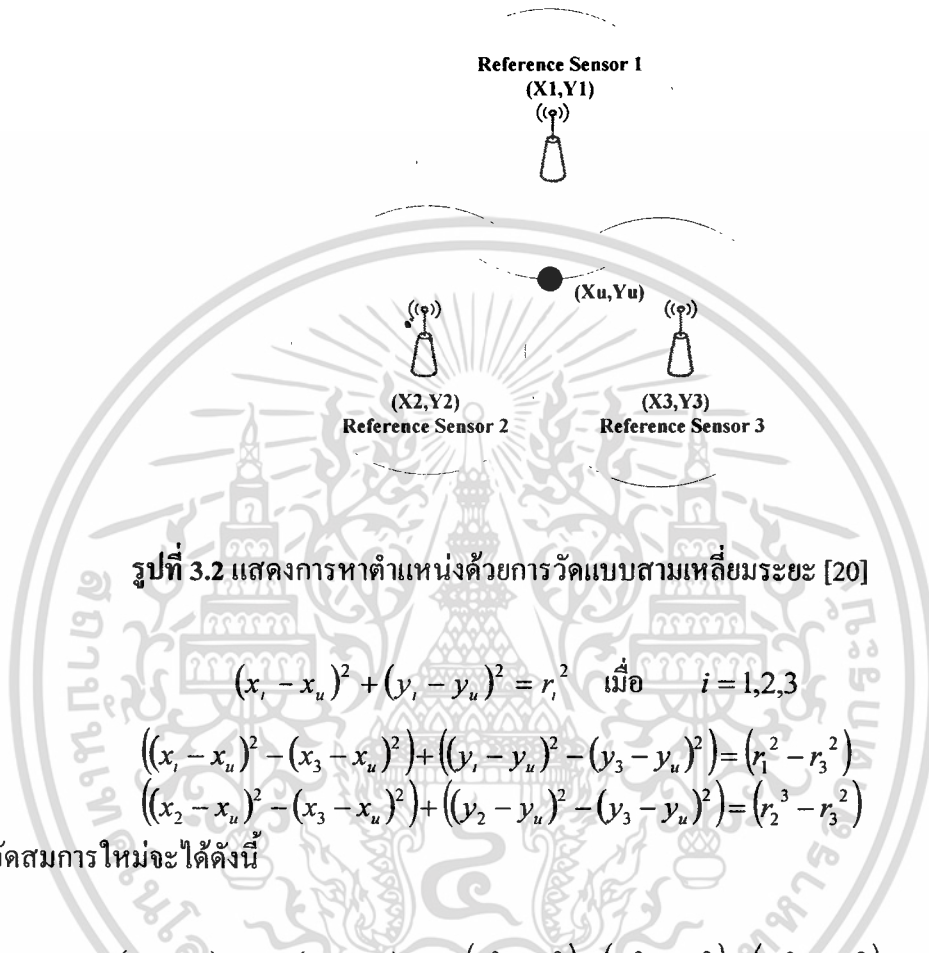
- วิธี MMSE เป็นวิธีการหาตำแหน่งโดยการวัดระยะทางจากหลายจุดอ้างอิง (Reference Point) ซึ่งเทคนิควิธีการที่ใช้หลักการในการหาตำแหน่งด้วยระยะทางมีหลายวิธี อาทิเช่น การวัดโดยอ้างอิงจากเวลาของการมาถึง (Time of Arrival :TOA) หรือการวัดโดยอ้างอิงจากความแตกต่างของเวลาของสัญญาณที่มาถึง (Time Difference of Arrival :TDOA) และการวัดโดยอ้างอิงจากระยะทางได้มาจากการคำนวณการลดทอนของสัญญาณหรือการทำการคูณความเร็ว (Velocity) ของสัญญาณ วิทยุกับเวลาในการเคลื่อนที่ของสัญญาณ Round Trip Time of Flight (RTOF)

- วิธีการหาตำแหน่งโดยใช้การอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด โดยวิธีนี้จะเป็นการหาตำแหน่งด้วยการคำนวณจุดตัดของค่าต่ำสุดและจุดสูงสุดของแต่ละวงกลมหรือค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์อ้างอิง

#### 3.3.1 การคำนวณโดยการสามเหลี่ยมระยะ (Trilateration)

เป็นการคำนวณตำแหน่งโดยใช้การตัดกันของวงกลม แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 จุดที่วงกลมตัดกันจะถือว่าเป็นจุดที่วัดอยู่ โดยรัศมีของวงกลมแต่ละวงได้มาจากความเข้มของสัญญาณที่

วัดได้ในขณะนั้นแล้วแปลงเป็นรัศมีของวงกลม ค่าที่ได้ในแต่ละเซ็นเซอร์อ้างอิงจะถูกนำมาเข้าสมการพีทาโกรัส (Pythagoras) ดังนี้



$$(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 = r_i^2 \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3 \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} ((x_1 - x_u)^2 - (x_3 - x_u)^2) + ((y_1 - y_u)^2 - (y_3 - y_u)^2) &= (r_1^2 - r_3^2) \\ ((x_2 - x_u)^2 - (x_3 - x_u)^2) + ((y_2 - y_u)^2 - (y_3 - y_u)^2) &= (r_2^2 - r_3^2) \end{aligned}$$

เมื่อจัดสมการใหม่จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} 2(x_3 - x_1)x_u + 2(y_3 - y_1)y_u &= (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ 2(x_3 - x_2)x_u + 2(y_3 - y_2)y_u &= (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \\ 2 \begin{bmatrix} x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

โดยที่  $x$ , และ  $y$ , คือ พิกัดของแต่ละจุดอ้างอิง  $x_u$  และ  $y_u$  คือพิกัดของวัตถุ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการแก้สมการโดยใช้กฎของคราเมอร์ (Cramer's Rule) [23] ดังนี้

$$\begin{aligned} 2 \begin{bmatrix} x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \\ \det[A] &= ((x_3 - x_1)(y_3 - y_2)) - ((x_3 - x_2)(y_3 - y_1)) \\ \det[A]_1 &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) & y_3 - y_1 \\ (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) & y_3 - y_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\det[A]_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_3 - x_1 & (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ x_3 - x_2 & (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix}$$

$$x_u = \frac{\det[A]_1}{\det[A]} \quad (3-3)$$

$$y_u = \frac{\det[A]_2}{\det[A]} \quad (3-4)$$

### 3.3.2 วิธี MMSE

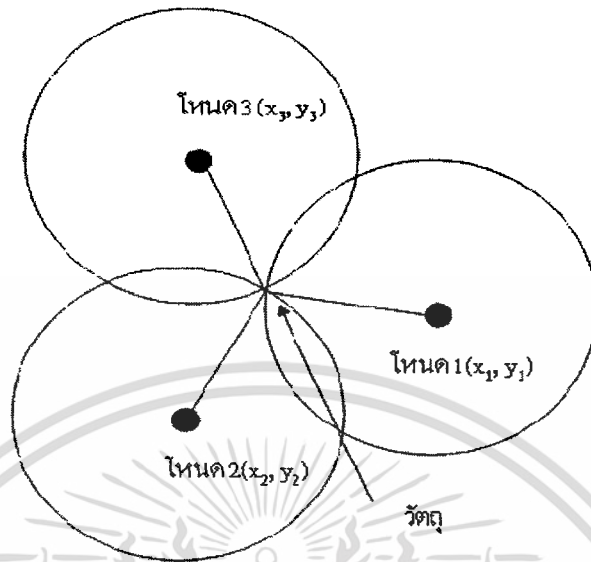
การวัดระยะทางสามารถแบ่งได้อีกเป็น 2 วิธี คือ การวัดค่าเวลาที่ได้รับของสัญญาณ (Time of Arrival) หรือ (Time of Flight) และการวัดค่าความแตกต่างของเวลาที่ได้รับสัญญาณ (Time Difference of Arrival) สามารถอธิบายแต่ละวิธีได้ดังนี้

#### 3.3.2.1 การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากเวลาของการมาถึง

การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากเวลาของการมาถึงเป็นการใช้เวลาที่ได้รับสัญญาณวิทยุจากตัวส่งหนึ่งตัวไปยังตัวรับ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแสงในสุญญากาศและเวลาของความถี่ของสัญญาณที่ส่งไปเป็นการวัดระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์นี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่ออยู่ในสภาวะสุญญากาศ ปัจจัยที่ทำให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อนคือ วัสดุที่เป็นส่วนประกอบภายในอาคาร เช่น เหล็กและกำแพง เป็นต้น ในการหาตำแหน่งแบบการใช้เวลาที่ได้รับสัญญาณนั้นจะใช้การตัดกันของวงกลมเช่นเดียวกับการวัดความเข้มของสัญญาณ ซึ่งเป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะทางของวัตถุที่อยู่ห่างจากสถานีฐาน ซึ่งสามารถหาระยะทางโดยการคำนวณเวลาในการส่งข้อมูลของวัตถุไปยังสถานีฐาน วิธีการนี้จะต้องใช้วงกลมอย่างน้อยสามวงมาตัดกันจึงจะได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง

การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากเวลาของการมาถึง (TOA) ในกรณีที่เป็นตำแหน่งตำแหน่ง 2 มิติ การวัดแบบ TOA จะต้องพิจารณาสัญญาณที่มาจากอย่างน้อย 3 จุดตามรูปที่ 3.1 และจับเวลาในการเคลื่อนที่ของสัญญาณทางเดียว (One Way) เพื่อคำนวณระยะทางระหว่างหน่วยวัดกับเครื่องส่งสัญญาณ (Signal Transmitter) โดยทั่วไปวิธี TOA จะพบปัญหา 2 ข้อคือ

- เครื่องส่งและรับสัญญาณในระบบจะต้องทำให้พร้อมกัน เป็นจังหวะเดียวกัน (Synchronize)
- ไทม์สแตมป์ (Timestamp) จะถูกคิดไว้ที่สัญญาณที่ถูกส่งออกมา เพื่อหาระยะทางที่สัญญาณเดินทาง



รูปที่ 3.3 แสดงการหาตำแหน่งด้วยการวัดแบบ TOA [17]

สำหรับวิธีการคำนวณตำแหน่งแบบวิธีการอ้างอิงจากเวลาของการมาถึง คือการหา ระยะห่างระหว่างวัตถุและโหนด หลักการคือสามารถหาระยะห่าง  $R_i$  ซึ่งเป็นระยะทางระหว่างวัตถุ กับ โหนด ที่  $i$  ได้จากสมการ

$$R_i = ct_i \quad (m) \quad (3-5)$$

เมื่อ  $c$  คือค่าความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

และ  $t_i$  คือระยะเวลาในการเดินทางสัญญาณ (TOA) ระหว่างวัตถุไปที่

โหนด  $i$  แต่วิธีการนี้ต้องมีวงจรในการสร้างความสอดคล้องของสัญญาณนาฬิกา ระหว่างวัตถุกับ โหนด จึงจะทำให้สามารถวัดค่า  $t_i$  ได้ พิจารณาจากสมการมาตรฐานของวงกลมที่รัศมี  $R$  คือ

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} \quad \text{โดย } i=1,2,3,\dots,N \quad (3-6)$$

เมื่อ  $(X_i, Y_i, Z_i)$  เป็นพิกัดของ โหนด  $i$

และ  $(x, y, z)$  เป็นพิกัดของตำแหน่งของวัตถุที่ต้องการทราบตำแหน่ง

จากที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าการหาตำแหน่งของวัตถุด้วยวิธีนี้มีข้อเสียของวิธีการค้นหาตำแหน่ง ด้วยวิธีนี้ได้แก่การต้องการความสอดคล้องกันของสัญญาณนาฬิกา ระหว่างวัตถุและโหนดจะพบว่า เมื่อนับระยะเวลาของสัญญาณจากวัตถุไปที่โหนดผิดพลาด 1 ไมโครวินาที จะให้วัดระยะทาง ผิดพลาดถึง 300 เมตร

### 3.3.2.2 การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากความแตกต่างของเวลาของสัญญาณที่มาถึง

การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากความแตกต่างของเวลาของสัญญาณที่มาถึง (TDOA) ได้นำแนวคิดมาใช้เพื่อแก้ปัญหาด้านความถูกต้องของความสอดคล้องของสัญญาณนาฬิกา ระหว่างวัตถุกับโหนด (Synchronize) เนื่องจากสัญญาณเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสงทำให้พบว่าในกรณีที่วัดเวลาผิดพลาดเพียง 1 ไมโครวินาทีทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวัดระยะทางถึง 300 เมตร ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาเรื่องของการสอดคล้องของสัญญาณนาฬิกาทำให้เกิดแนวคิดแทนที่จะทำการนับเวลาที่มาถึงโหนดเราจะทำการนับเวลาที่แตกต่างกันที่รับได้จากโหนดจำนวน 2 คู่ เพื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการไฮเปอร์โบลิกเพื่อหาตำแหน่งของวัตถุโดยพิจารณาการหาค่าตำแหน่งของโหนดได้ โดยใช้หลักการของการนับเวลาเวลาที่แตกต่างกันที่รับได้จากคู่ของสัญญาณจากวัตถุไปที่โหนดตำแหน่งที่  $i$  และตำแหน่งที่  $j$  เพื่อสร้างสมการไฮเปอร์โบลิกพิจารณาความสัมพันธ์ของผลต่างของระยะทางระหว่าง โหนด ตำแหน่งที่  $i$  และตำแหน่งที่  $j$  ดังนี้

$$R_{i,j} = ct_{i,j} = R_i - R_j \quad (3-7)$$

โดยที่  $R_{i,j}$  เป็นผลต่างของระยะทางระหว่างโหนด ตำแหน่งที่  $i$  และตำแหน่งที่  $j$  และ  $t_{i,j}$  เป็นความแตกต่างของเวลาของสัญญาณจากวัตถุไปที่ โหนดตำแหน่งที่  $i$  และตำแหน่งที่  $j$  และ  $c$  คือค่าความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที และ  $R_i$  คือระยะห่างระหว่างโหนด ที่ ตำแหน่งที่พิกัด  $(x, y)$  กับวัตถุซึ่งมีพิกัดเป็น  $(X, Y)$  ดังสมการนี้

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 - 2X_i x - 2Y_i y + x^2 + y^2} \quad (3-8)$$

และสามารถหาความสัมพันธ์ของผลต่างของระยะทางได้จากวัตถุไปที่โหนด ที่  $i, j$  โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$R_{i,j} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} = \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2} \quad (3-9)$$

โดยที่  $R_{i,j}$  เป็นผลต่างของระยะทางระหว่างวัตถุตำแหน่งที่  $i$  และตำแหน่งที่  $j$  และ  $(X_i, Y_i)$  และ  $(X_j, Y_j)$  เป็นพิกัดของ โหนด ที่  $i$  และ  $j$  และ  $(x, y)$  เป็นตำแหน่งของวัตถุที่ต้องการทราบตำแหน่ง

สามารถหาคำตอบของสมการได้เมื่อจำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า เนื่องจากสมการที่ 3-9 ทำการแก้สมการค่อนข้างยากทำให้ต้องจัดรูปแบบของสมการใหม่ดังนี้

$$R_i^2 = (R_{i,j} + R_j)^2 \quad (3-10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ทำการจัดรูปของสมการ (3-9) เขียนได้เป็น

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 + R_1^2 = X_i^2 + Y_i^2 - 2X_i x - 2Y_i y + x^2 + y^2 \quad (3-11)$$

ทำการลบค่าของสมการ(3-10) ที่  $i = 1$  ออกจากสมการ (3-11) จะได้เป็น

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 = X_i^2 + Y_i^2 - 2X_{i,1}x - 2Y_{i,1}y \quad (3-12)$$

เมื่อ  $X_{i,1}$  และ  $Y_{i,1}$  มีค่าเท่ากับ  $(X_i - X_1)$  และ  $(Y_i - Y_1)$  ตามลำดับ สมการ(3-12) สามารถหาคำตอบของสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} R_{2,1} \\ R_{3,1} \end{bmatrix} R_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (3-13)$$

เมื่อ

$$K_1 = X_1^2 + Y_1^2$$

$$K_2 = X_2^2 + Y_2^2$$

$$K_3 = X_3^2 + Y_3^2$$

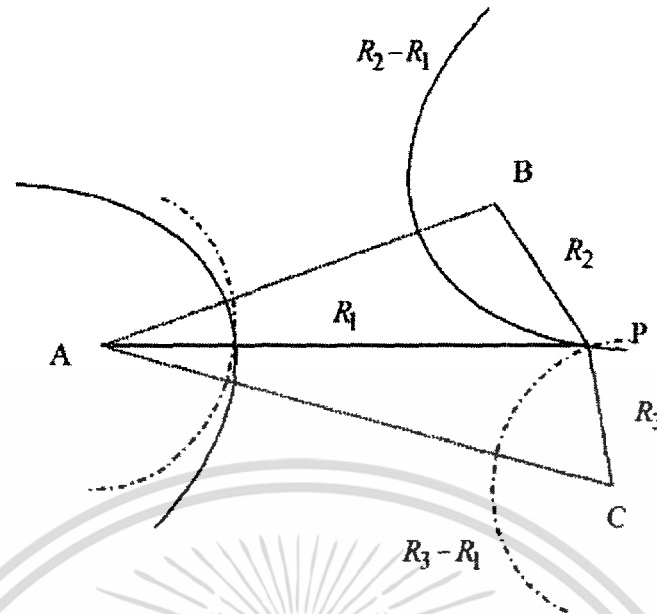
เราสามารถทำการหาค่า  $x$  และ  $y$  ได้ในเทอมของ  $R_1$  ได้ โดยการแทนค่าของ  $x$  และ  $y$  ในสมการที่ 3-13 ไปแทนค่าในสมการ(3-12) และจัดรูปแบบสมการ(3-12) ในเทอมของ  $R_1$  ในรูปแบบของสมการ Quadratic ดังนี้

$$aR_1^2 + bR_1 + c = 0 \quad (3-14)$$

สามารถหาคำตอบของสมการตามสูตรได้เป็น

$$R_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3-15)$$

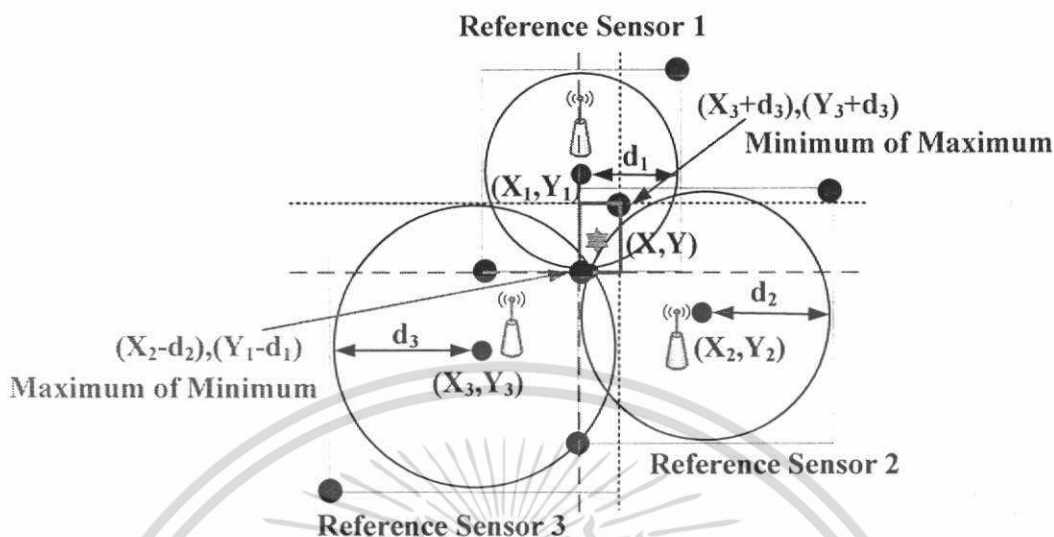
เลือกใช้รากของสมการเพียงค่าเดียวเนื่องจาก  $R_1$  เป็นระยะห่างระหว่างวัตถุและโหนดที่ 1 ทำให้รากของสมการมีค่าเป็นบวกเพียงค่าเดียวแล้วนำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการ (3-13)



รูปที่ 3.4 แสดงการการหาตำแหน่งด้วยการวัดแบบ TDOA [16]

### 3.3.3 วิธีการหาตำแหน่งด้วยวิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด

วิธีการหาตำแหน่งด้วยวิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุดเป็นวิธีการสร้าง Stray โหนดติดต่อกันระหว่างแต่ละการหาตำแหน่งของเบคอน โหนดและค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับจากเบคอนโหนด และเปลี่ยนกำลังเป็นระยะทางตามกฎของการสูญเสียตามระยะทาง โหนดที่ต้องการหาตำแหน่งจะคำนวณตำแหน่งจากระยะทางของแต่ละเบคอน โหนด ดังนั้นแต่ละโหนดที่ต้องการหาตำแหน่งจะวาดคู่ของเส้นแนวนอนและแนวตั้งอยู่รอบๆของแต่ละเบคอน โหนด ระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างเส้นแต่ละเส้นและแต่ละตำแหน่งของเบคอน โหนดจะเท่ากับระยะทางของตำแหน่งระหว่างโหนดวัดกับเบคอน โหนด โหนดวัดจะถูกจำกัดด้วยตัวมันเองในศูนย์กลางของพื้นที่สี่เหลี่ยมมุมฉากจะนำมาพิจารณาที่ส่วนในสุดของเส้นแนวนอนและเส้นตั้งฉาก ซึ่งเป็นจุดที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดของเส้นแต่ละเส้นที่อยู่ในส่วนบนและล่างของแต่ละเบคอน โหนด ตามลำดับและทางซ้ายสุดและขวาสุดของเส้นตั้งฉากที่อยู่ด้านขวาและซ้ายของแต่ละเบคอน โหนด ซึ่งจะได้ว่าจุดที่เล็กที่สุดที่ตัดกันบนพื้นที่นั้นเป็นการคำนวณตำแหน่งที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุด



รูปที่ 3.5 แสดงการหาตำแหน่งด้วยวิธีการ Min-Max

ในรูปที่ 3.5 โดยในกล่องสี่เหลี่ยมแต่ละกล่องจะถูกกลับและเพิ่มด้วยรัศมี  $d_i$  ออกจากตำแหน่งของเซ็นเซอร์อ้างอิง  $(x_i, y_i)$  ดังสมการ

$$(x_i - d_i, y_i - d_i) \text{ และ } (x_i + d_i, y_i + d_i) \quad (3-16)$$

ดังนั้นจุดตัดของกล่องแต่ละกล่องจะได้รับจุดที่มากที่สุดและจุดที่น้อยที่สุดของพิกัด  $x$  และพิกัด  $y$  โดยพิจารณาค่าพิกัดที่น้อยที่สุดของพิกัดจุดตัดที่มากที่สุดและพิจารณาค่าพิกัดที่มากที่สุดของพิกัดจุดตัดที่น้อยที่สุดจุดตัดที่ จากรูปที่ 3.5 จะได้สมการดังนี้

$$(x_2 - d_2, y_1 - d_1) \text{ และ } (x_3 + d_3, y_3 + d_3) \quad (3-17)$$

### 3.4 วิธีการหาตำแหน่งแบบการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานะข้อมูล

วิธีการหาตำแหน่งแบบการจับคู่ความเข้มของสัญญาณ ในฐานะข้อมูลเป็นการวัดค่าเป็นการวัดค่าความเข้มของสัญญาณ โดยอาศัยวิธีการลดทอนของสัญญาณ (Signal Attenuation) ที่มีความสัมพันธ์กับระยะทางในพื้นที่ที่สนใจ เพื่อใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งโดยอาศัยการวัดความเข้มของสัญญาณที่เปลี่ยนไปในตำแหน่งแต่ละระยะทางใดๆ บนพื้นที่ต่างๆ สำหรับวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์เพิ่ม เนื่องจากชิปนั้นสามารถวัดค่าความเข้มของสัญญาณได้โดยตรง วิธีนี้จะใช้การวัดหลายๆครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อให้ค่าที่วัดได้นั้นเข้าใกล้ค่าจริงมากที่สุด เพื่อความถูกต้องแม่นยำ จากนั้นนำค่าที่เฉลี่ยมาแล้วไปใช้ร่วมกับวิธีทางสถิติอีกครั้ง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการประมาณตำแหน่ง สำหรับตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่าความเข้มของสัญญาณคือ วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบภายในอาคาร อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในสถานที่ทำการทดลอง สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

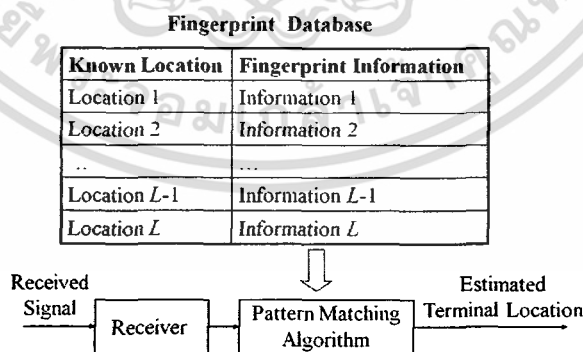
ค่าที่ได้จากความเข้มของสัญญาณจะแสดงถึงระยะห่างจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง เทคนิคนี้จะช่วยสร้างรูปแบบความเข้มของสัญญาณบนพื้นที่ต่างๆเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป วิธีนี้จะต้องมีการเก็บค่าของสัญญาณก่อนครั้งหนึ่งแล้วจึงค่อยมีการนำสัญญาณที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ต้องการค้นหาตำแหน่ง โดยใช้อัลกอริทึมในการเปรียบเทียบ วิธีนี้จะสามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 2 ขั้นตอนซึ่งจะได้อธิบายแต่ละขั้นตอนบนพื้นฐานของเทคนิคการหาตำแหน่งของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ซึ่งเป็นเทคนิคที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

### 3.4.1 Offline Phase หรือ Training Phase

ในการทำงานของช่วงนี้จะเป็นช่วงของการเก็บสัญญาณ โดยจะทำการวัดสัญญาณ RSSI จากเซ็นเซอร์อ้างอิงหลายๆตัวของบริเวณที่ต้องการหาตำแหน่ง ซึ่งจะต้องทำการกำหนดตำแหน่ง (Grid Point) ที่ต้องการเก็บสัญญาณให้ครอบคลุมบริเวณที่ต้องการหาตำแหน่ง โดยระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่กำหนดเรียกว่า Grid Spacing หรือ Grid Size กำหนดค่าเป็น เมตร หรือ ฟุต ก็ได้ ส่วนค่า RSSI ที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งจะถูกเก็บไว้ในฐานข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณทางสถิติ ซึ่งเรียกว่าเป็นการทำ Radio Map และค่า RSSI ที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งที่กำหนดจะเรียกว่า Location Fingerprint

### 3.4.2 Online Phase หรือ Localization Phase

ในการทำงานช่วงนี้จะเป็นช่วงของการหาตำแหน่ง โดยจะทำการหาตำแหน่งของชิปด้วยการวัดสัญญาณ RSSI ณ ตำแหน่งที่ผู้ใช้ขณะนั้น แล้วนำค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้เก็บไว้ในฐานข้อมูลในช่วงแรก ด้วยอัลกอริทึมต่างๆต่อนั้นเมื่อเปรียบเทียบเสร็จแล้วก็จะแสดงตำแหน่งของผู้ใช้ออกมา โดยส่วนมากจะแสดงออกมาเป็นตัวเลขพิกัดและภาพกราฟิก ซึ่งประสิทธิภาพของการหาตำแหน่งที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับ Radio Map ที่ทำไว้ในช่วงแรกและอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในปัจจุบัน



รูปที่ 3.6 แสดงการหาตำแหน่งด้วยวิธีการหาตำแหน่งแบบ Fingerprint [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 จะเป็นการแสดงการหาตำแหน่งด้วยวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล โดยขั้นตอนแรกจะทำการโดยจะทำการวัดสัญญาณ RSSI จากเซ็นเซอร์อ้างอิงหลายๆตัวของบริเวณที่ต้องการหาตำแหน่ง โดยข้อมูลทั้งหมดนี้จะเก็บไว้ในฐานข้อมูล ในขั้นตอนต่อมาจะเป็นขั้นตอนในการหาตำแหน่งโดยจะนำข้อมูลของค่า RSSI ที่ได้มาไปทำการเปรียบเทียบกับ Fingerprint ที่ได้เก็บไว้ในฐานข้อมูลในช่วงแรก ด้วยอัลกอริทึมต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบเสร็จแล้วก็จะแสดงตำแหน่งออกมา โดยข้อมูลจะแสดงออกมาเป็นพิกัด

### 3.4.3 วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด

เป็นอัลกอริทึมทางสถิติ สำหรับการจัดกลุ่มข้อมูลที่อยู่ใกล้กันเป็นวิธีการจำแนกข้อมูลแต่ละหน่วยในชุดข้อมูล โดยการรวมหน่วยที่คล้ายกันมากที่สุดเข้าเป็นกลุ่มเดียวกัน ระบบจะสะสมการสุ่มตัวอย่างมากมายของความเข้มของสัญญาณในพื้นที่ที่สนใจ ในตำแหน่งที่เก็บรวบรวมค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณทุกๆตำแหน่งที่ถูกตรวจตราลงใน Radio Map ในช่วงของการติดตามวัตถุความเข้มของสัญญาณที่ได้รับปัจจุบันถูกเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยใน Radio Map บันทึกแล้วจับคู่ความเข้มของสัญญาณปัจจุบันที่ดีที่สุด โดยใช้การคำนวณระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidian Distance) ระหว่างความเข้มของสัญญาณที่ได้รับปัจจุบันและค่าความเข้มของสัญญาณที่บันทึกใน Radio Map ค่าที่คำนวณออกมาแล้วมีจำนวนที่น้อยที่สุดหนึ่งจำนวนของระยะห่างยูคลิเดียนจะถูกนำมาใช้

### 3.4.4 ระยะห่างยูคลิเดียน [17]

เป็นวิธีการคำนวณหารูปแบบที่ใกล้เคียงกับค่าที่อ้างอิง โดยระยะห่าง  $d$  น้อยที่สุดจะถือว่ารูปแบบดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับค่าที่อ้างอิงมากที่สุดและจะเลือกใช้ค่าความเข้มของสัญญาณชุดนั้น วิธีการนี้ได้นำมาใช้ร่วมกับวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล สูตรของระยะห่างยูคลิเดียนสามารถแสดงได้ดังนี้

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x - x_i|^2} \quad (3-18)$$

จะได้ว่า

$$d = \sqrt{|x - x_1|^2 + |x - x_2|^2 + |x - x_3|^2 + \dots + |x - x_n|^2}$$

กำหนดได้

$d$  คือ ระยะห่างยูคลิเดียน (m)

$n$  คือ จำนวนของเซ็นเซอร์อ้างอิง

$x$  คือ ค่าความเข้มของสัญญาณปัจจุบัน (dBm)

$x_i$  คือ ค่าความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูลแต่ละชุด (dBm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและอัลกอริทึมที่สำคัญที่ใช้ในการหาตำแหน่งภายในอาคารและได้จำแนกประเภทเทคนิคของการหาตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งเน้นในการเปรียบเทียบเทคนิคในการหาตำแหน่งภายในอาคารระหว่างวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางกับวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานะข้อมูล บนพื้นฐานเทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ข้อมูลที่งานวิจัยได้ใช้นั้นเป็นค่าความเข้มของสัญญาณมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะทำการทดลองหาตำแหน่งจากการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์อ้างอิงตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดยใช้ชิปเป็นตัวอ่านค่าสัญญาณและกระจายสัญญาณเพราะว่าค่อนข้างเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและสามารถดึงได้จากชิปได้โดยตรง สำหรับในบทถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนและการดำเนินการทดลองวิจัยเพื่อพิจารณาตามทฤษฎีและอยู่บนหลักของเหตุและผลเป็นสำคัญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# วิธีการและขั้นตอนการทดลองวิจัย

### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ได้ทำการศึกษารายละเอียดแบบจำลองและขั้นตอนในการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคาร ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้การหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการใช้การวัดความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength Indication: RSSI) มาคำนวณและจะใช้เทคนิคการคำนวณแบบเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง และการคำนวณโดยการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล ที่อยู่บนพื้นฐานเทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ซึ่งกำหนดรายละเอียดต่างๆ ได้ดังนี้

- กำหนดแบบจำลองในการทดลองเพื่อวัดความเข้มของสัญญาณที่ได้รับระหว่าง เซ็นเซอร์ไร้สายกับเซ็นเซอร์วัตถุ ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ ในห้องประชุมภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศชั้น 12 ซึ่งในการคัดเลือกสถานที่ที่ใช้ในการทดลองดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับแบบทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพและประยุกต์ใช้งาน ได้จริง

- การกำหนดตำแหน่งของเซ็นเซอร์อ้างอิงและเซ็นเซอร์วัตถุสำหรับการทดลองนี้ ได้ทำการกำหนดให้เหมาะสมกับแบบจำลองที่ต้องการศึกษา โดยได้คำนึงถึงระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่กำหนดไว้ ซึ่งระยะห่างในแต่ละแกนต้องมีระยะเท่าๆกัน เพื่อนำค่าความเข้มของสัญญาณมาคำนวณเพื่อหาตำแหน่งของวัตถุภายในอาคาร

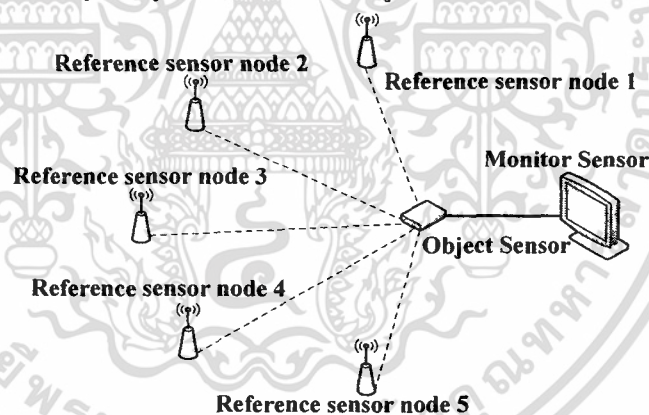
- การกำหนดแบบจำลองการทดลองในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบไว้ 3 การทดลองในแต่ละการทดลองจะมีการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิงอย่างละ 1 ตัว การทดลองแรกจะใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว การทดลองที่สองจะมีเซ็นเซอร์อ้างอิงเป็น 4 ตัว และการทดลองสุดท้ายจะใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 5 ตัว ซึ่งขั้นตอนการทดลองทั้ง 3 เหมือนกันทุกประการ โดยทำการทดลองซ้ำกันจำนวน 5 ครั้งในแต่ละตำแหน่งที่สุ่มและที่กำหนดไว้ และนำค่าความเข้มของสัญญาณมาเฉลี่ยเพื่อพิจารณาค่าที่เหมาะสมมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งในการทดลองจะแตกต่างกันในเรื่องค่าความเข้มของสัญญาณในแต่ละตำแหน่งที่รับได้ และนำค่าความเข้มของสัญญาณมาใช้ในการคิดคำนวณหาค่าประมาณความผิดพลาดของแต่ละวิธีการคำนวณ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับความเหมาะสมในการคัดเลือกที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานจริงในสถานะแวดล้อมที่เหมาะสม

## 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิจัย

ในการทดลองหาค่าแรงซึ่งในการทดลองวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการตึก 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ ชิพเซ็นเซอร์ไร้สาย Xbee Pro ของบริษัท Max stream จำนวน 6 ชุด โดยแบ่งเป็นเซ็นเซอร์อ้างอิงที่ติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega168 จำนวน 5 ชุด เซ็นเซอร์วัตถุที่ติดต่อกับส่วนแสดงผล 1 ชุด เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Notebook) สำหรับแสดงผลตำแหน่งจำนวน 1 ชุด

ระบบระบุตำแหน่งของงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบมาให้เซ็นเซอร์วัตถุเป็นตัวร้องขอความเข้มของสัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัวที่ติดตั้งไว้ในพื้นที่ต่างๆภายในอาคาร เมื่อเซ็นเซอร์อ้างอิงได้รับข้อมูลร้องขอตำแหน่ง เซ็นเซอร์อ้างอิงจะส่งค่าความเข้มของสัญญาณพร้อมกับหมายเลขที่อยู่มาให้เซ็นเซอร์วัตถุ เซ็นเซอร์วัตถุจะรวบรวมข้อมูลจากเซ็นเซอร์ทุกตัวนำมาเรียงเป็นชุดข้อมูลใหม่ที่ประกอบไปด้วยหมายเลขที่อยู่ของเซ็นเซอร์อ้างอิงและค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในขณะนั้น จากนั้นจะส่งข้อมูลดังกล่าวไปให้เซ็นเซอร์แสดงผลที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และเซ็นเซอร์แสดงผลจะส่งข้อมูลไปยังโปรแกรมประยุกต์ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับระบบระบุตำแหน่ง [21]

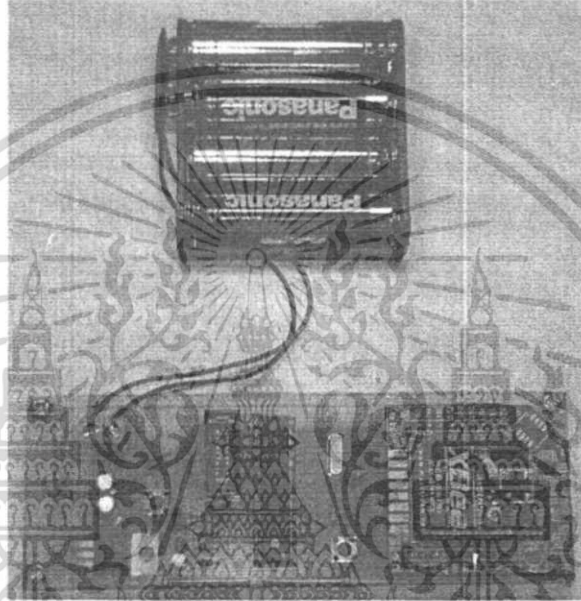
## 4.3 การออกแบบอุปกรณ์

อุปกรณ์ในงานวิจัยนี้มี 2 ประเภท ได้แก่ เซ็นเซอร์อ้างอิง เซ็นเซอร์วัตถุ การออกแบบอุปกรณ์แต่ละประเภทสามารถทำได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 เซ็นเซอร์อ้างอิง

ผู้วิจัยออกแบบเซ็นเซอร์อ้างอิงให้ใช้พลังงานไฟฟ้าจากถ่านไฟฉายขนาด AA จำนวน 4 ก้อน เนื่องจากเหตุผลเรื่องความสะดวกในการนำไปใช้และการเคลื่อนย้ายจุดติดตั้ง เซ็นเซอร์อ้างอิงจะมีการติดต่อกับกับชุดควบคุมไมโครคอนโทรเลอร์โดยจะทำหน้าที่ร้องขอค่าความเข้มของสัญญาณจากเซ็นเซอร์วัตถุ และจะส่งค่าความเข้มของสัญญาณไปให้กับเซ็นเซอร์วัตถุ ชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์อ้างอิงที่สร้างเสร็จสมบูรณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และเซ็นเซอร์อ้างอิงนั้นได้กำหนดค่าตัวแปรภายในซิปดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 ชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์อ้างอิง

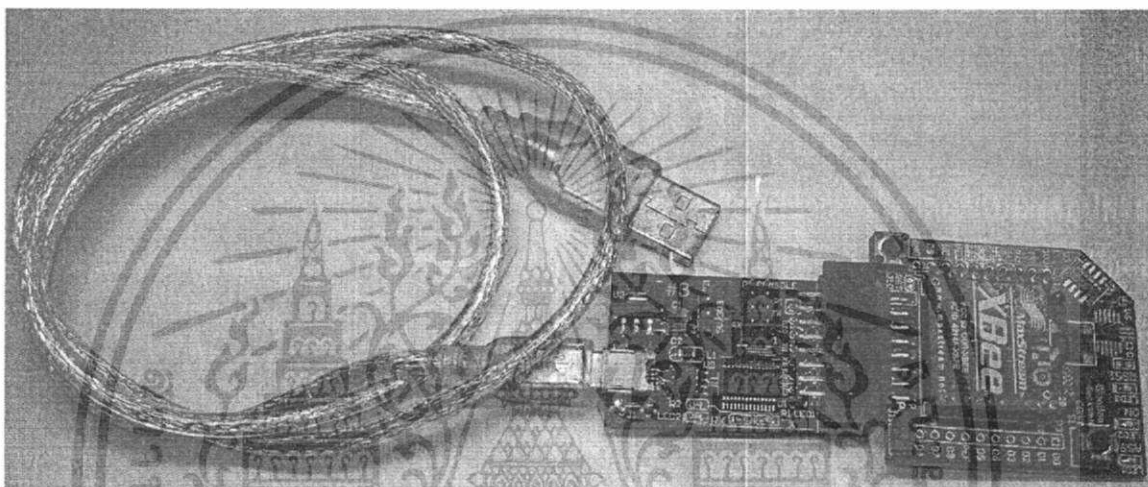
ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรในเซ็นเซอร์อ้างอิง

Channel (CH)	15 (0x0F)
PAN ID (ID)	1000
Destination Address High (DH)	0
Destination Address High (DL)	0
16-Bit Source Address (MY)	[6001, 6002, 6003, 6004, 6005]
Node Discover Time (NT)	1
Power Level (PL)	4
API Enabled	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 เซ็นเซอร์วัตถุ

ผู้วิจัยได้ออกแบบเซ็นเซอร์วัตถุที่ใช้พลังงานจากเครื่องคอมพิวเตอร์โดยออกแบบชุดอุปกรณ์ดังกล่าวให้สามารถพกพาได้ ในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างคอมพิวเตอร์พกพาจะใช้พอร์ตยูเอสบีและสายยูเอสบีในการติดต่อสื่อสารและจ่ายพลังงาน เซ็นเซอร์วัตถุทำหน้าที่ร้องขอค่าความเข้มของสัญญาณจากทุกเซ็นเซอร์อ้างอิง และจะรวบรวมค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้มาจัดเป็นรูปแบบข้อมูลใหม่อีกครั้งหนึ่งจากนั้นจะส่งข้อมูลดังกล่าวไปให้เซ็นเซอร์แสดงผล ชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์วัตถุสร้างเสร็จสมบูรณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 และเซ็นเซอร์วัตถุนั้นได้กำหนดค่าตัวแปรภายในชิพดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 เซ็นเซอร์วัตถุ

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปรในเซ็นเซอร์วัตถุ

Channel (CH)	15 (0x0F)
PAN ID (ID)	1000
Destination Address High (DH)	0
Destination Address High (DL)	0
Destination Address High (DL)	0
16-Bit Source Address (MY)	5001
Node Discover Time (NT)	1
Power Level (PL)	4
API Enabled	1

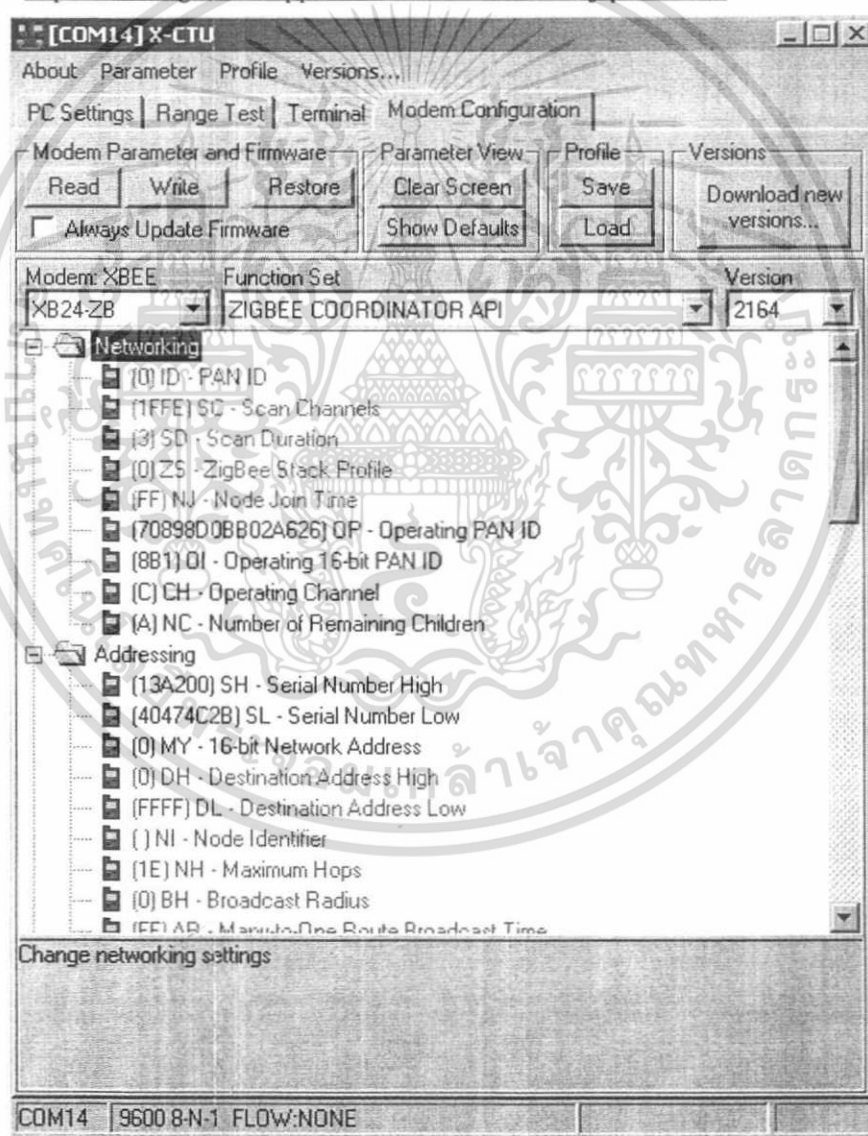
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 องค์ประกอบของโปรแกรมที่ใช้สร้างระบบระบุตำแหน่ง

ในส่วนของโปรแกรมประยุกต์นั้น ได้พัฒนาบนโปรแกรม Visual Basic 6.0 ผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับระบบระบุตำแหน่ง ได้แก่ โปรแกรมแสดงผลตำแหน่งวัตถุ

##### 4.4.1 X-CTU

X-CTU เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับปรับและแก้ไขค่าตัวแปรต่างๆที่อยู่ในชิพเซ็นเซอร์ไร้สาย สามารถปรับปรุงซอฟต์แวร์เริ่มต้น (Update Firmware) หรือทดสอบการใช้ของ Xbee Pro โปรแกรม X-CTU แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และสามารถดาวน์โหลด (Download) ฟรีได้ที่เว็บไซต์ของบริษัท Max Stream ดังนี้ <http://www.digi.com/support/kbase/kcasesresultdetl.jsp?id=2125>



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างโปรแกรม X-CTU [15]

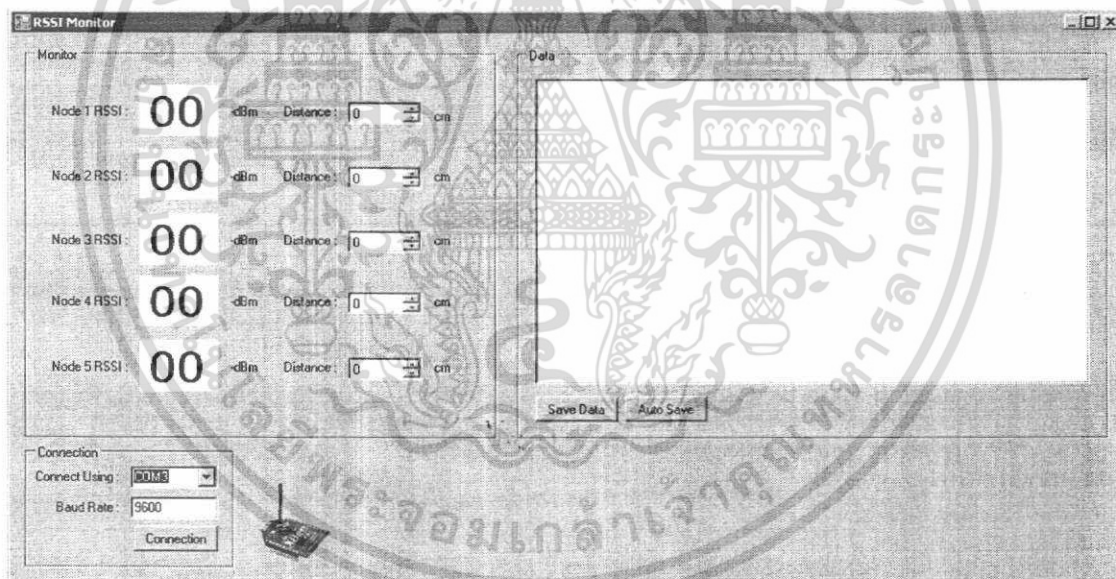
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 โปรแกรมสำหรับควบคุมการแพร่กระจายสัญญาณของเซ็นเซอร์อ้างอิง

โปรแกรมสำหรับควบคุมการแพร่กระจายสัญญาณของเซ็นเซอร์อ้างอิงเป็นโปรแกรมขนาดเล็กที่เขียนขึ้นโดยใช้ภาษาซี เพื่อทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์และเซ็นเซอร์อ้างอิง โปรแกรมจะดำเนินการสั่งการให้ Xbee Pro ดำเนินการกระจายค่าความเข้มของสัญญาณจากเซ็นเซอร์อ้างอิงไปยังเซ็นเซอร์วัตถุ โดยที่ไม่ต้องการการรบกวน โดยใช้คำสั่ง ATND (Node Discovery) จาก API Command ของ Xbee Pro จากนั้นเซ็นเซอร์วัตถุจะเก็บรวบรวมค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้มาใส่ค่าหมายเลขที่อยู่ และค่าความเข้มของสัญญาณในแต่ละเซ็นเซอร์อ้างอิง ได้รับแล้วส่งไปให้แสดงผลคำนวณตำแหน่งต่อไป

#### 4.4.3 โปรแกรมแสดงผลค่าความเข้มของสัญญาณ

โปรแกรมที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกในการอ่านค่าความเข้มของสัญญาณในแต่ละเซ็นเซอร์อ้างอิง โปรแกรมจะทำหน้าที่แสดงข้อมูลค่าความเข้มของสัญญาณในแต่ละเซ็นเซอร์อ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 4.5

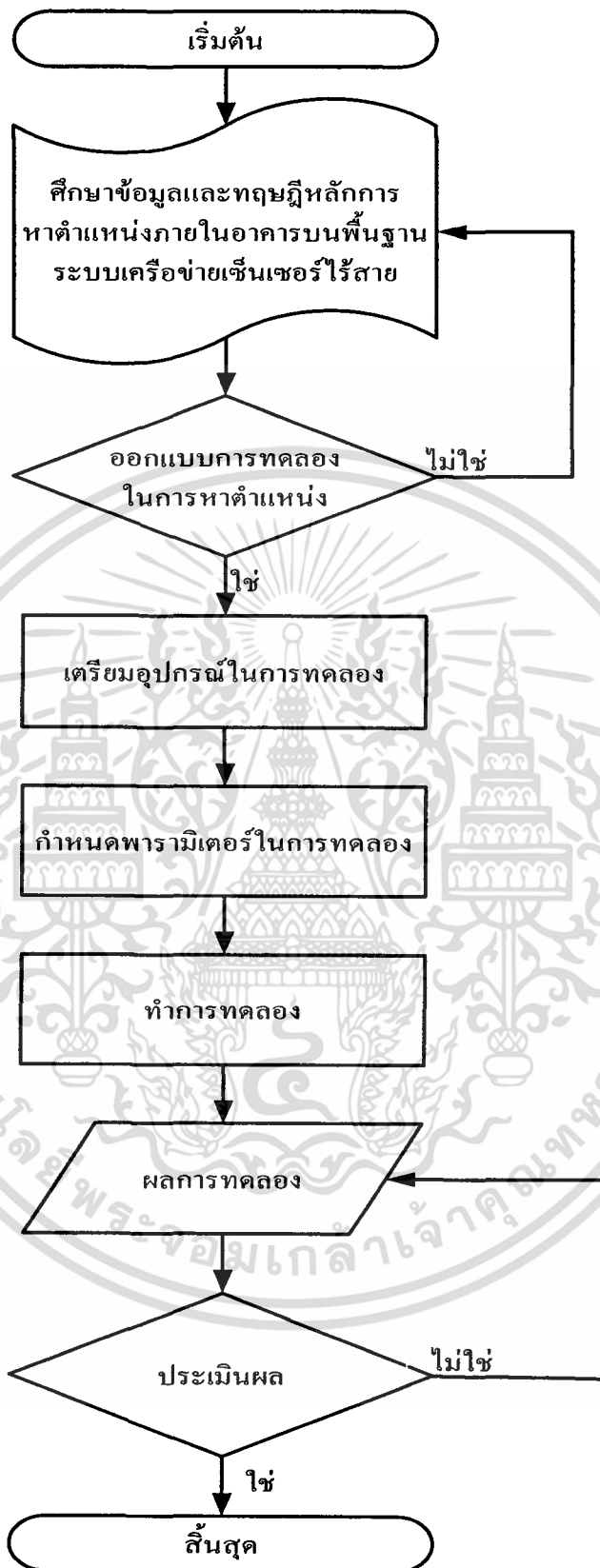


รูปที่ 4.5 โปรแกรมแสดงผลค่าความเข้มของสัญญาณ

#### 4.5 ขั้นตอนและรูปแบบวิธีการทดลองวิจัยในการหาตำแหน่ง

ในหัวข้อนี้จะเสนอขั้นตอนและรูปแบบวิธีการทดลองวิจัยในการหาตำแหน่ง โดยไฟล์ชาร์ตของขั้นตอนการทดลองวิจัย แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และมีวิธีการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

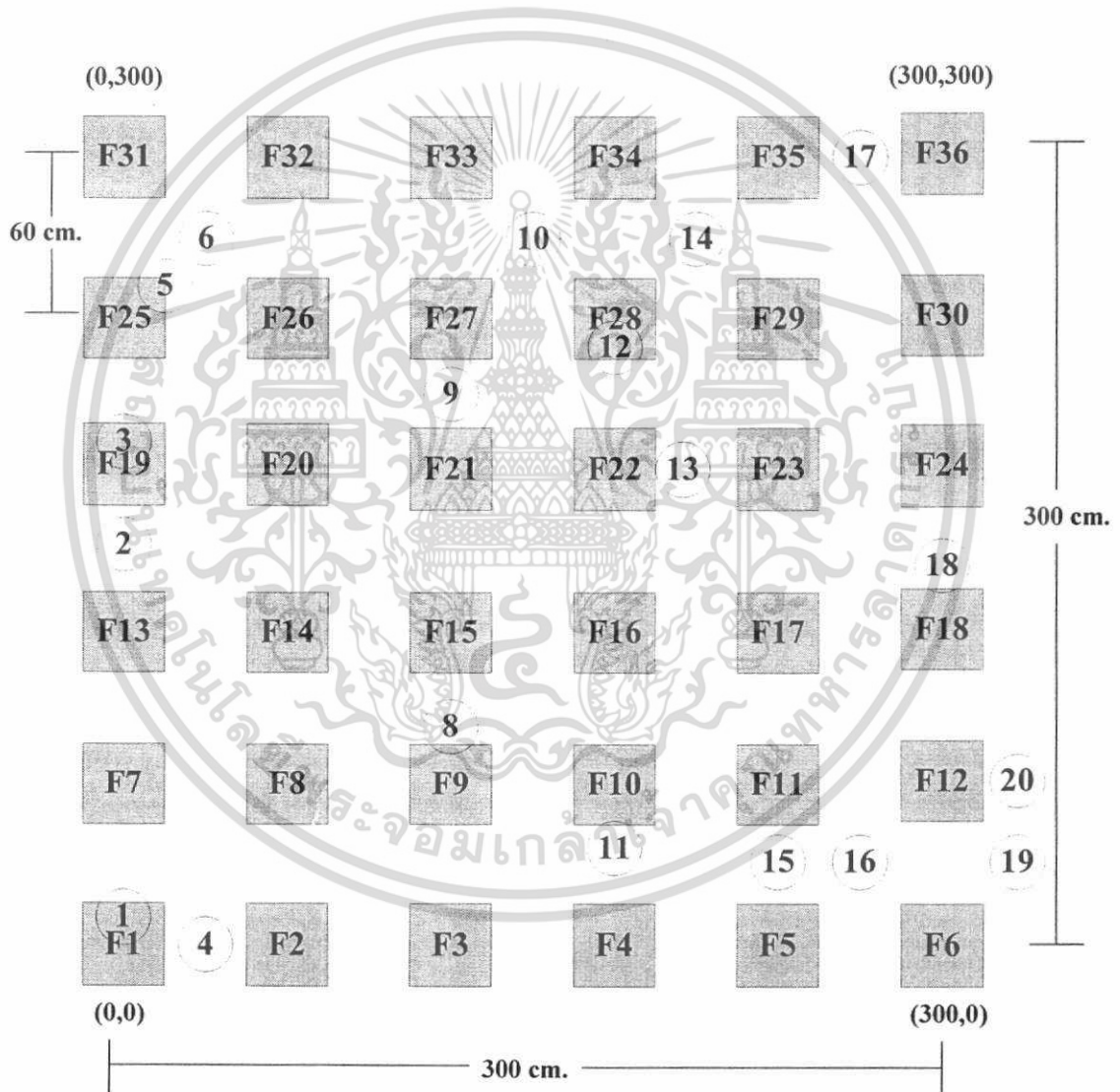


รูปที่ 4.6 โฟลว์ชาร์ตของขั้นตอนการทดลองวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

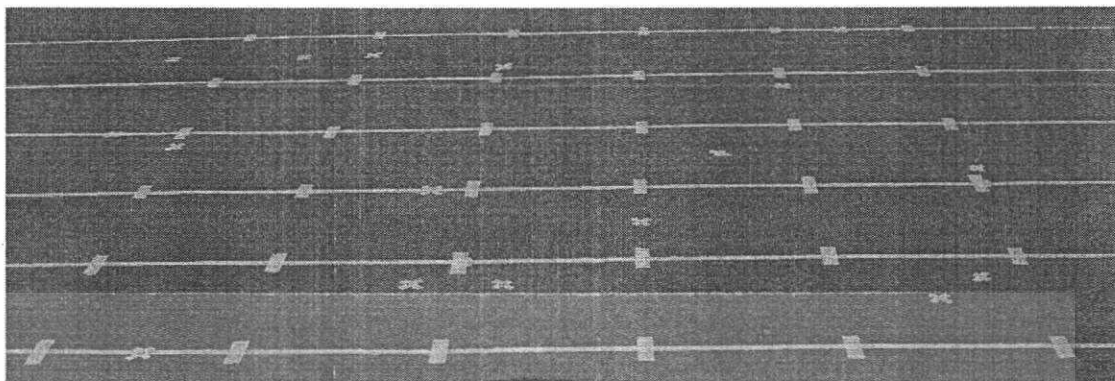
#### 4.5.1 การจัดเตรียมการทดลองและสภาพแวดล้อมในการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้มีการจัดเตรียมการทดลองและสภาพแวดล้อมในการทดลอง สำหรับสถานที่ทำการทดลอง คือ ห้องปฏิบัติการตึก 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศชั้น 12 พื้นที่ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองมีความยาว 3 เมตร และความกว้าง 3 เมตร ระยะห่างในแต่ละแกนมีระยะ 60 เซนติเมตร ชั้นแรกดำเนินการกำหนดจุดที่ต้องการวัดค่าความเข้มของสัญญาณทั้งหมด 36 จุด ซึ่งก็คือตำแหน่งของ Fingerprint คือ F1 ถึง F36 ชั้นตอนที่สองกำหนดจุดสุ่มทดสอบในการหาตำแหน่งของเป้าหมายทั้งหมด 20 จุด โดยมีการกำหนดจุดดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 รูปแบบการกำหนดตำแหน่ง Fingerprint 36 จุด และ จุดสุ่มทดสอบ 20 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 รูปแบบจริงในการกำหนดตำแหน่งในการวัด

จากรูปที่ 4.7 - 4.8 การทดลองจะเคลื่อนที่เซ็นเซอร์ไปยังตำแหน่งทั้งหมด 36 จุด จากนั้นทำการวัดค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้จากเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัว เพราะฉะนั้นแต่ละตำแหน่งที่กำหนดไว้จะได้ค่าความเข้มของสัญญาณของเซ็นเซอร์อ้างอิงที่ติดตั้งในพื้นที่ทั้งหมดเช่น หากมีเซ็นเซอร์อ้างอิง 3 ตัว จุดที่ทำการวัดทั้งหมด 36 จุด โดยแต่ละจุดจะได้รับค่าความเข้มของสัญญาณ 3 ค่าเช่นเดียวกัน เป็นต้น

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลองหาตำแหน่ง

รายละเอียด	ค่า
จำนวนเซ็นเซอร์อ้างอิง	3, 4, 5 ตัว
พื้นที่ในการหาตำแหน่ง	3x3 เมตร
ระยะห่างในแต่ละจุดที่ใช้ในการวัด	60 เซนติเมตร
ย่านความถี่ในการรับ-ส่ง ของเซ็นเซอร์	2.4 GHz
ความเร็วในการส่ง	250 Kbps
มอดูเลชัน	O-QPSK
กำลังในการส่ง	1mW (0 dBm)
สายอากาศของเซ็นเซอร์	แบบวีฟ
Spread spectrum	DS-SS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2 รูปแบบการหาค่าแห่ง

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ถึงทฤษฎีการหาค่าแห่ง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้เทคนิคการหาค่าแห่ง 2 วิธี คือ วิธีการแรกแบบเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางได้แก่ วิธี MMSE , วิธีอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งวิธีการนี้จะสามารถวัดค่าความเข้มของสัญญาณในแต่ละจุดและนำข้อมูลที่ได้รับมาประมวลผล โดยใช้กฎของเรขาคณิต ทางคณิตศาสตร์ในการประมวลผล วิธีการที่สอง วิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล ได้แก่ วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด, วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า ซึ่งวิธีการนี้จะต้องมีการเก็บค่าของสัญญาณก่อนครั้งหนึ่งแล้วจึงค่อยมีการนำสัญญาณที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ต้องการค้นหาค่าแห่งโดยใช้อัลกอริทึมในการเปรียบเทียบ

##### 4.5.2.1 การทดลองหาค่าแห่งโดยการคำนวณแบบ เทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง

การทดลองในส่วนนี้ดำเนินการทดลองตามจุดที่ต้องการหาค่าแห่งของเป้าหมายโดยในงานวิจัยนี้จะดำเนินการหาค่าแห่งของเป้าหมายแบบสุ่มจำนวน 20 จุด ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดยเริ่มต้นเซ็นเซอร์วัดจะร้องขอค่าความเข้มของสัญญาณไปยังเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัว จากนั้นเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัวจะแพร่กระจายความเข้มของสัญญาณและหมายเลขที่อยู่ของเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัวไปยังไปยังเซ็นเซอร์เป้าหมาย การเก็บค่าสัญญาณความเข้มจะดำเนินการวัดค่าซ้ำกันทุกจุดทั้ง 5 ครั้ง จากนั้นนำค่าทั้งหมดมาเฉลี่ยเพื่อหาค่าเฉลี่ยค่าความเข้มของสัญญาณ ขั้นตอนนำค่าความเข้มของสัญญาณมาแปลงเป็นค่าระยะทางโดยสมการดังนี้

$$RSSI[dBm] = -10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) + A \quad (4.1)$$

เมื่อ

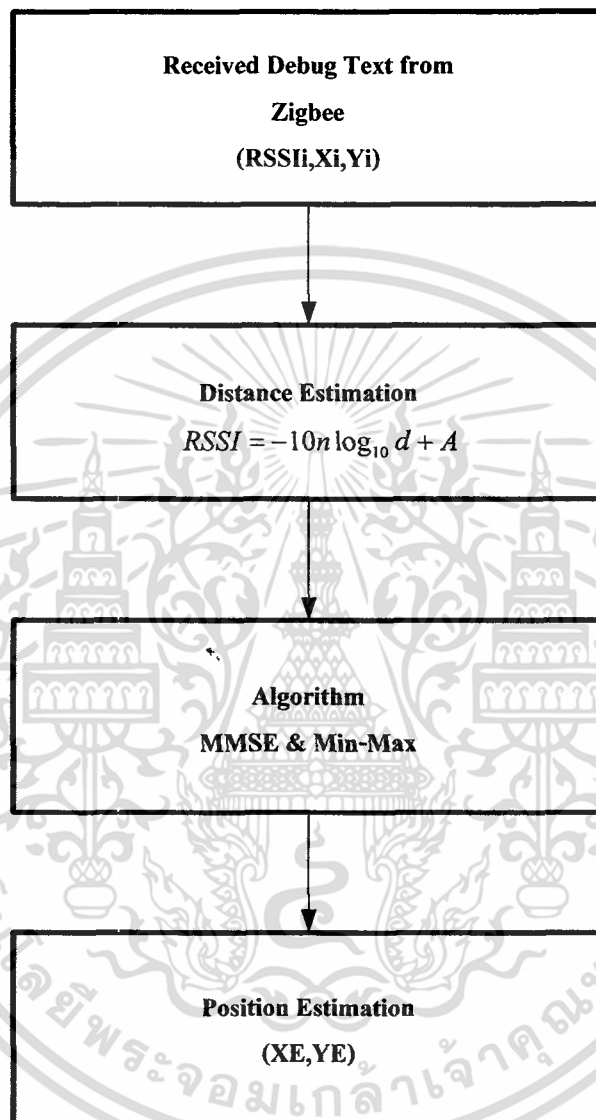
$n$  คือค่าคงที่ของการกระจายค่าสัญญาณ

$d$  คือระยะห่างจากตัวส่ง (m)

$A$  คือความเข้มของสัญญาณที่ได้รับใน 1 เมตร (m)

วิธีการทดลองและคำนวณค่าแห่งด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง แสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.9 ขั้นตอนต่อมา นำข้อมูลที่ได้นำมาเก็บเป็นฐานข้อมูล เพื่อง่ายการนำมาพิจารณาโดยวิธีอัลกอริทึมลักษณะต่างๆ (งานวิจัยนี้ใช้อัลกอริทึมการคำนวณ 2 แบบ คือ วิธี MMSE กับวิธีอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุดจากนั้นเพิ่มเงื่อนไขคือการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4 และ 5

เซ็นเซอร์อ้างอิงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดจากจุดศูนย์กลางที่กำหนดขึ้นดังรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17 ตามลำดับ ค่าสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณคือค่าพิกัดแกน X และ Y



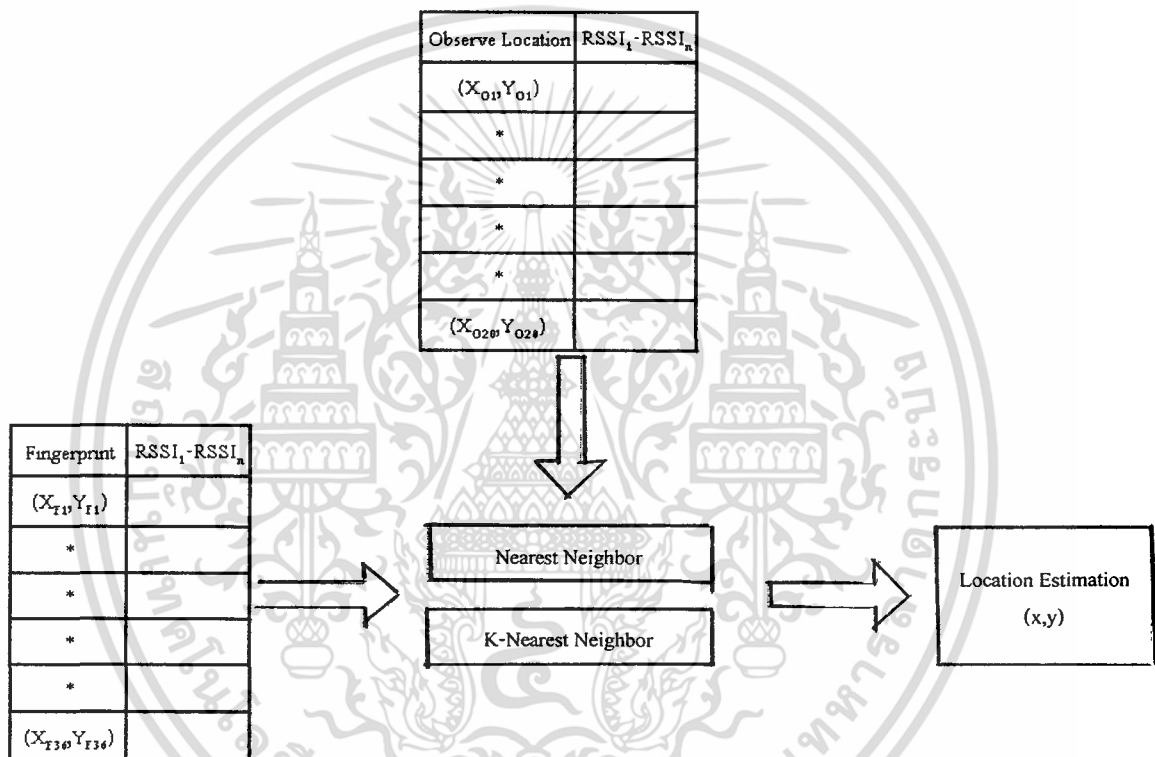
รูปที่ 4.9 โฟลว์ชาร์ตของการหาตำแหน่งด้วยวิธี เทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง

#### 4.5.2.2 การทดลองหาตำแหน่งโดยการคำนวณแบบ การจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล

การทดลองในส่วนนี้ดำเนินการทดลองตามจุดที่ต้องการวัดสัญญาณวิธีนี้จะต้องมีการเก็บค่าของสัญญาณก่อนครั้งหนึ่งแล้วจึงค่อยมีการนำสัญญาณที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ต้องการค้นหาตำแหน่งโดยใช้อัลกอริทึมในการเปรียบเทียบรูปแบบในการทดลองวิจัยนี้ก็จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นดังรูปที่ 4.10 ขั้นตอนแรกจะทำการเก็บข้อมูลค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้จากเซ็นเซอร์อ้างอิง แต่ละตัวของตำแหน่งที่  $F_1(0, 0)$ ,  $F_2(0.6, 0)$ ,  $F_3(1.2, 0)$ ,  $F_4(1.8, 0)$ ,  $F_5(2.4, 0)$ , ...  $F_{36}(3, 3)$  ทั้งหมด 36 จุด จากนั้นเก็บข้อมูลค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้จากเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัวจากตำแหน่งที่สุ่มไว้ 20 จุด ข้อมูลค่าความเข้มของสัญญาณทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ในฐานข้อมูล ในขั้นตอนต่อมาจะเป็นขั้นตอนในการหาตำแหน่งโดยนำข้อมูลค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้จากตำแหน่งทั้งหมด 20 จุดไปทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้จากตำแหน่งที่สุ่มไว้ 36 จุด ด้วยอัลกอริทึมต่างๆ (ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเสนออัลกอริทึมที่ใช้ในการเปรียบเทียบหาตำแหน่งทั้งหมด 2 อัลกอริทึม) เมื่อเปรียบเทียบเสร็จแล้วจะแสดงตำแหน่งออกมา โดยข้อมูลจะแสดงออกมาเป็นค่าพิกัดแกน X และ Y



รูปที่ 4.10 โฟลว์ชาร์ตของการหาตำแหน่งด้วยวิธี Fingerprint

ในการทดลองหาตำแหน่งโดยการใช้เทคนิคการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล ซึ่งวิธีนี้สามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

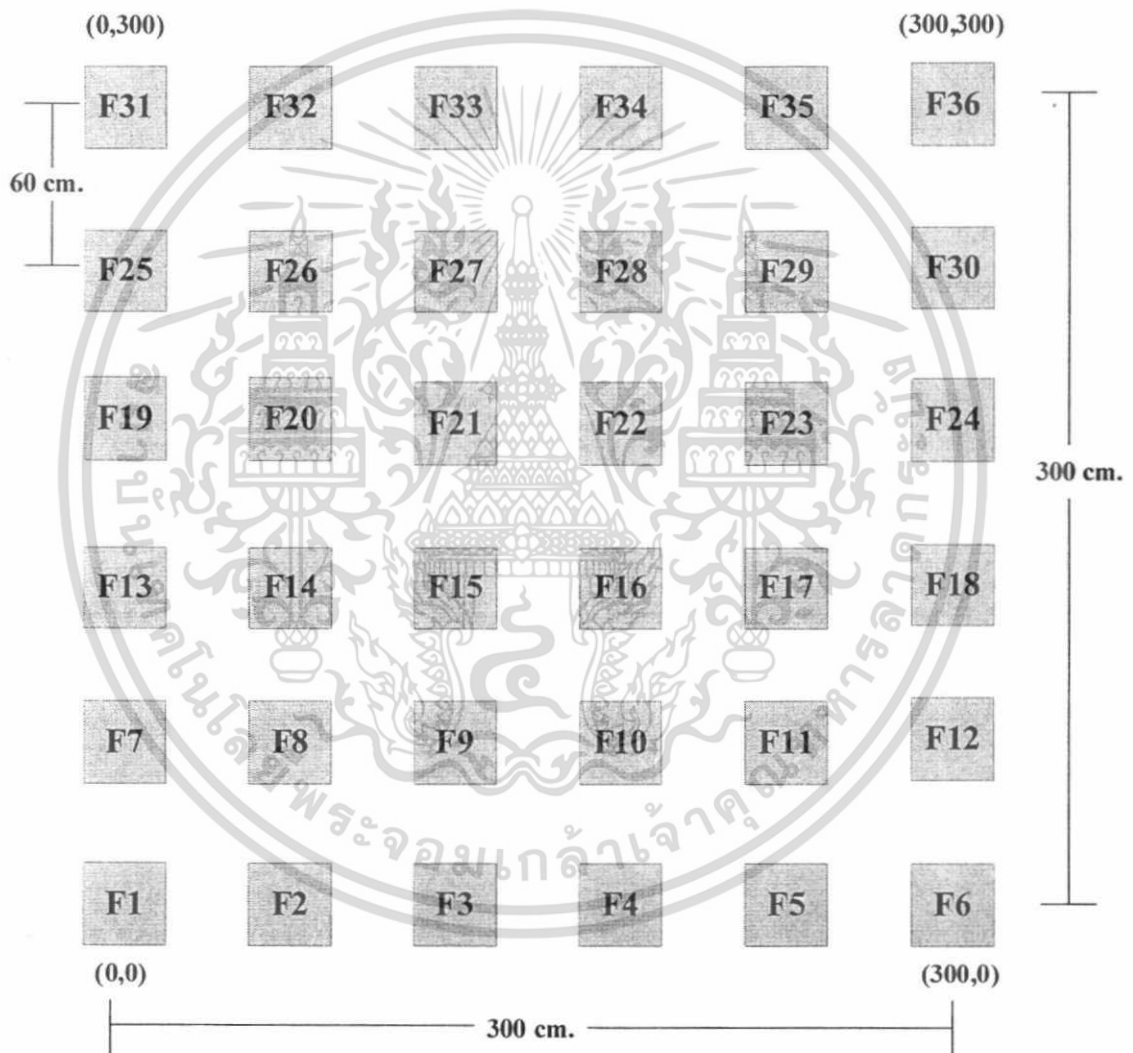
1) Offline phase หรือ Training phase

ในการทำงานของช่วงนี้จะเป็นช่วงการเก็บข้อมูลค่าความเข้มของสัญญาณของเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัว ซึ่งทำการเก็บข้อมูลในแต่ละตำแหน่ง 36 จุด โดยจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- กำหนดตำแหน่งของ Fingerprint ที่จะทำการสำรวจเก็บไว้ในฐานข้อมูล ทั้งหมด 36 จุดในการทดลองวิจัยนี้ได้กำหนดตำแหน่งของ Fingerprint โดยใช้ตัวอักษร  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_{36}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.11

- นำเซ็นเซอร์วัดคุณภาพ ณ ตำแหน่ง Fingerprint และบันทึกค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ จากเซ็นเซอร์อ้างอิงทุกตัวในทุกๆตำแหน่งของ Fingerprint ซึ่งจะทำการทดลองซ้ำกันทั้งหมด 5 รอบแล้วนำค่ามาทำการเฉลี่ย

- ข้อมูลของ Fingerprint ที่ถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลดังแสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.11 รูปแบบการกำหนดตำแหน่ง Fingerprint 36 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางรูปแบบฐานข้อมูลของ Fingerprint 36 จุด ของ 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง

Object Node	X_True (m)	Y_True (m)	Reference Node (dBm)		
			RSSI-1	RSSI-2	RSSI-3
1	0	0	-46	-61	-62
2	0.6	0	-47	-60	-61
3	1.2	0	-49	-58	-60
4	1.8	0	-56	-50	-60
5	2.4	0	-59	-46	-61
6	3	0	-61	-41	-62
7	0	0.6	-47	-62	-60
8	0.6	0.6	-48	-60	-59
9	1.2	0.6	-52	-56	-58
10	1.8	0.6	-56	-54	-58
11	2.4	0.6	-60	-46	-59
12	3	0.6	-62	-46	-60
13	0	1.2	-50	-62	-57
14	0.6	1.2	-51	-60	-55
15	1.2	1.2	-56	-58	-54
16	1.8	1.2	-59	-56	-54
17	2.4	1.2	-60	-53	-55
18	3	1.2	-62	-51	-57
19	0	1.8	-58	-63	-54
20	0.6	1.8	-59	-62	-53
21	1.2	1.8	-60	-61	-52
22	1.8	1.8	-61	-60	-52
23	2.4	1.8	-62	-59	-53
24	3	1.8	-63	-58	-54
25	0	2.4	-60	-64	-52
26	0.6	2.4	-61	-63	-48
27	1.2	2.4	-61	-62	-47
28	1.8	2.4	-62	-61	-47
29	2.4	2.4	-63	-60	-48
30	3	2.4	-64	-60	-53
31	0	3	-62	-65	-53
32	0.6	3	-62	-64	-51
33	1.2	3	-63	-64	-43
34	1.8	3	-64	-63	-40
35	2.4	3	-64	-62	-48
36	3	3	-64	-61	-48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

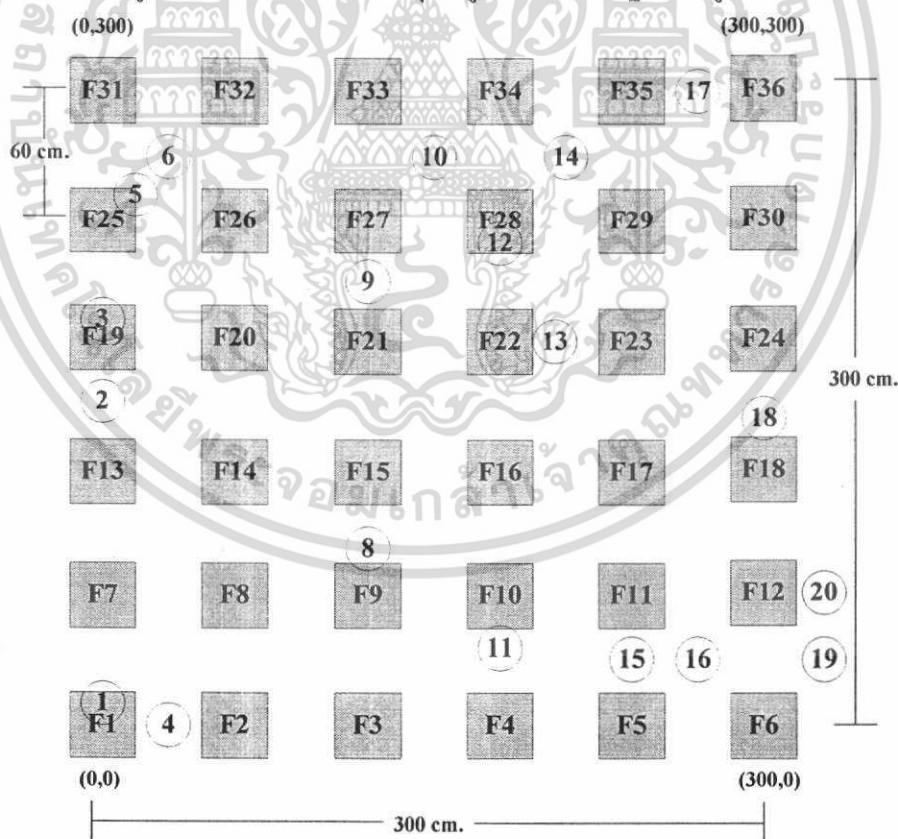
## 2) Online Phase หรือ Localization Phase

ในการทำงานช่วงนี้จะเป็นช่วงของการหาตำแหน่ง โดยจะทำการหาตำแหน่งของเซ็นเซอร์วัด ด้วยการวัดค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ ณ ตำแหน่งที่เซ็นเซอร์วัดอยู่ขณะนั้น แล้วนำค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ ไปทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้เก็บไว้ในฐานข้อมูลในช่วงแรกด้วยอัลกอริทึมต่างๆ ต่อจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบเสร็จแล้วก็แสดงตำแหน่งของเซ็นเซอร์วัดออกมา โดยจะแสดงออกมาเป็นตัวเลขของพิกัดของตำแหน่ง Fingerprint โดยมีขั้นตอนการทดลองวิจัยดังต่อไปนี้

- กำหนดตำแหน่งของเป้าหมายแบบสุ่มที่จะทำการสำรวจเก็บไว้ในฐานข้อมูล ทั้งหมด 20 จุดในการทดลองวิจัยนี้ได้กำหนดตำแหน่งของ Fingerprint โดยใช้ตัวอักษร  $O_1, O_2, O_3, \dots, O_{20}$  ดังแสดงรูปที่ 4.12

- นำเซ็นเซอร์วัดมาวาง ณ ตำแหน่งของเป้าหมายแบบสุ่มและบันทึกค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ จากเซ็นเซอร์อ้างอิงทุกตัวในทุกๆ ตำแหน่งของของเป้าหมายแบบสุ่มซึ่งจะทำการทดลองซ้ำกันทั้งหมด 5 รอบแล้วนำค่ามาทำการเฉลี่ย

- ข้อมูลของของเป้าหมายแบบสุ่มที่ถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลดังแสดงดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.12 รูปแบบการกำหนดตำแหน่ง Fingerprint 36 จุด และ ตำแหน่งของเป้าหมายแบบสุ่ม 20 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ตารางรูปแบบฐานข้อมูลของตำแหน่งของเป้าหมายแบบสุ่ม 20 จุด ของ 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง

Object Node	X_True (m)	Y_True (m)	Reference Node (dBm)		
			RSSI-1	RSSI-2	RSSI-3
O <sub>1</sub>	0	0	-46	-61	-62
O <sub>2</sub>	0	1.65	-50	-62	-50
O <sub>3</sub>	0	1.8	-52	-62	-48
O <sub>4</sub>	0.3	0	-47	-60	-61
O <sub>5</sub>	0.15	2.55	-61	-64	-54
O <sub>6</sub>	0.3	2.7	-61	-64	-53
O <sub>7</sub>	0.9	1.5	-58	-61	-55
O <sub>8</sub>	1.2	0.75	-55	-58	-58
O <sub>9</sub>	1.2	2.1	-61	-62	-54
O <sub>10</sub>	1.5	2.7	-62	-62	-48
O <sub>11</sub>	1.8	0.45	-58	-56	-59
O <sub>12</sub>	1.8	2.4	-62	-61	-46
O <sub>13</sub>	1.95	1.8	-61	-59	-50
O <sub>14</sub>	2.1	2.7	-63	-62	-48
O <sub>15</sub>	2.4	0.3	-60	-46	-60
O <sub>16</sub>	2.7	0.3	-61	-46	-60
O <sub>17</sub>	2.7	3	-64	-62	-50
O <sub>18</sub>	3	1.35	-62	-52	-56
O <sub>19</sub>	3.3	0.3	-62	-43	-61
O <sub>20</sub>	3.3	1.2	-63	-45	-58

- ขึ้นต่อมานำค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ของเซ็นเซอร์วัดมาเปรียบเทียบกับระหว่างตำแหน่ง Fingerprint กับ ตำแหน่งของเป้าหมายแบบสุ่มในงานวิจัยนี้จะเสนอวิธีการหาตำแหน่ง 2 วิธีดังนี้

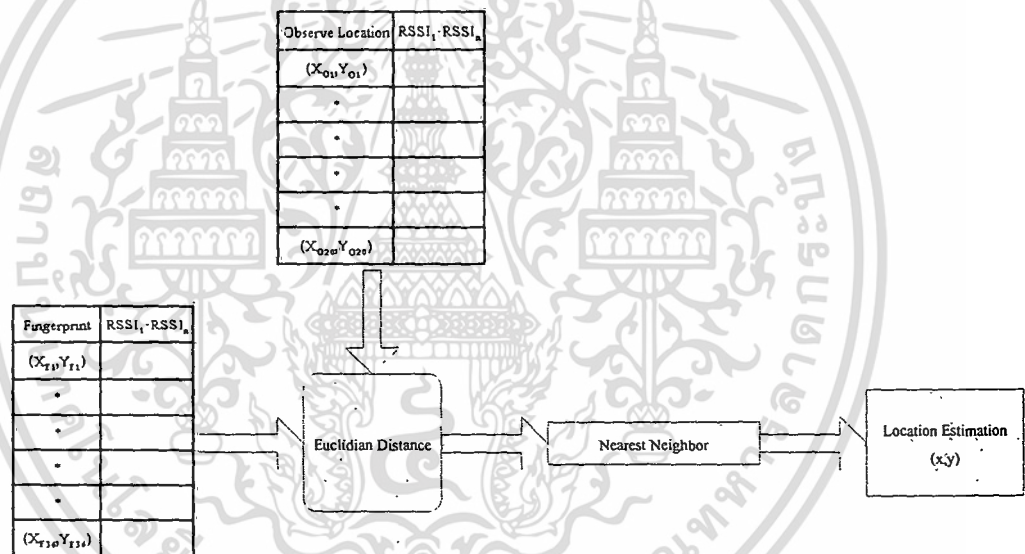
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1) วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด

วิธีการนี้จะค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ทุกๆตำแหน่งของเป้าหมายแบบสุ่ม  $O_1, O_2, O_3, \dots, O_{20}$  นำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ทุกๆตำแหน่งของ Fingerprint ตัวอักษร  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_{36}$  การคำนวณตำแหน่งโดยการจับคู่ความเข้มของสัญญาณ โดยใช้การคำนวณซึ่งต้องได้ระยะห่าง  $d$  น้อยที่สุดจะถือว่ารูปแบบดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับค่าที่อ้างอิงมากที่สุด สมการระยะห่างยูคลิเดียนในการคำนวณและนำค่าตำแหน่ง ดังนี้

$$dist_i(x, y) = \sqrt{\sum_{n=1}^N (RSSI_{n,F_i} - RSSI_{n,O})^2}$$

Fingerprint ที่มีค่าระยะห่าง  $d$  น้อยที่สุดมาใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ค่าสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณคือค่าพิกัดแกน X และ Y วิธีการคำนวณตำแหน่งแบบการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 4.13

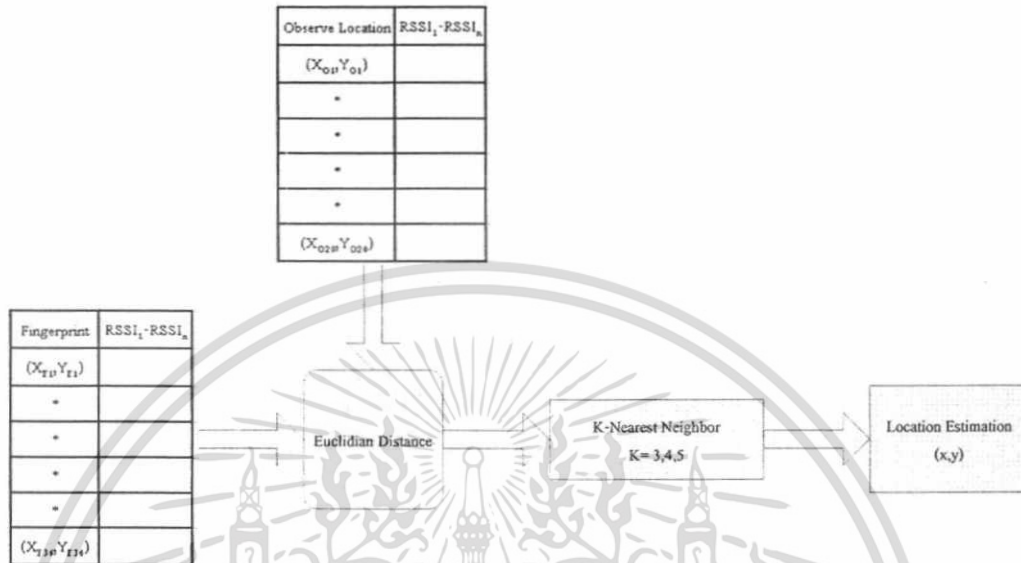


รูปที่ 4.13 โฟลว์ชาร์ตของการหาดำแหน่ง Fingerprint ด้วยการเปรียบเทียบแบบ วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด

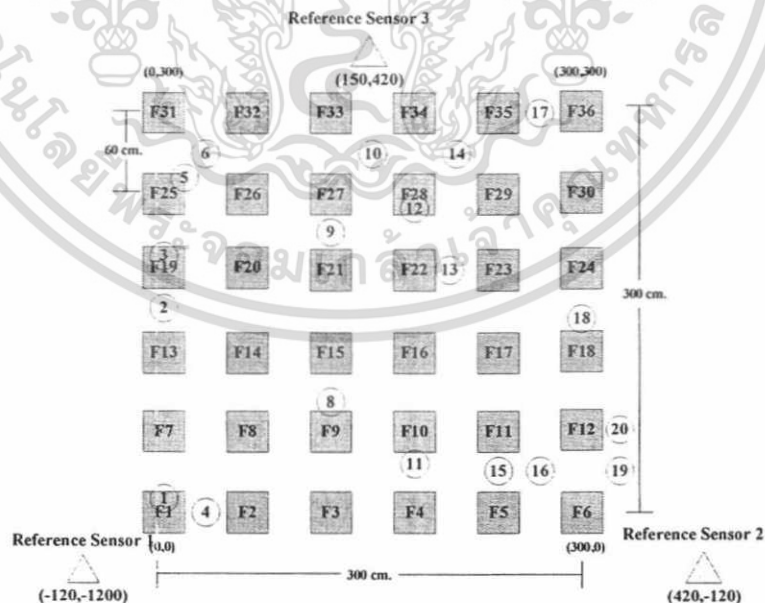
### 2) วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า

วิธีการนี้จำนำค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ทุกๆตำแหน่งของตำแหน่งของเป้าหมายแบบสุ่ม  $O_1, O_2, O_3, \dots, O_{20}$  นำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ทุกๆตำแหน่งของ Fingerprint ตัวอักษร  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_{36}$  เช่นเดียวกับวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดแต่จะใช้ตำแหน่งที่ได้รับการคำนวณระยะห่าง  $d$  จากสมการระยะห่างยูคลิเดียน โดยนำค่าระยะ  $d$  ที่น้อยรองลงมา โดยในวิทยานิพนธ์นี้เลือกตำแหน่ง Fingerprint มีค่าระยะ  $d$  น้อยที่สุดคือ 3 อันดับแรก,

4 อันดับแรก และ 5 อันดับแรก ค่าพิกัด Fingerprint ทั้ง 3 , 4 และ 5 อันดับ นำมาเฉลี่ยออกมาเป็นพิกัดแกน X และ Y วิธีการคำนวณแบบการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า แสดงได้ดังรูปที่ 4.14

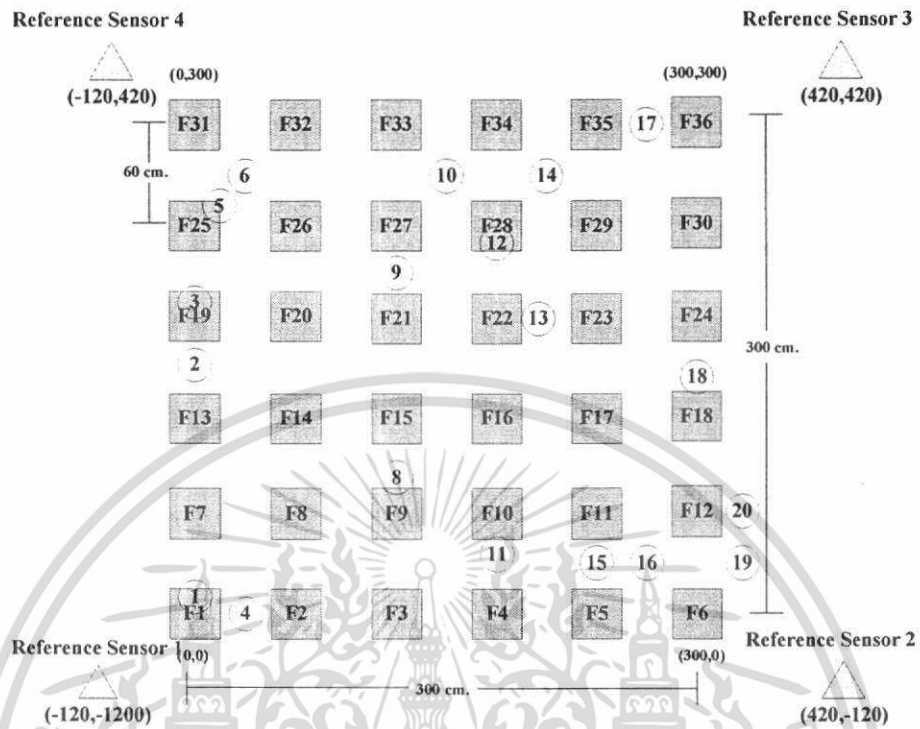


รูปที่ 4.14 โพลาร์ชาร์ตของการหาดำแหน่ง Fingerprint วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า จากนั้นเพิ่มเงื่อนไขด้วยการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4 และ 5 เซ็นเซอร์อ้างอิงเพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากจุดศูนย์กลางที่กำหนดขึ้นดังรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ ค่าสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณคือค่าพิกัดแกน X และ Y

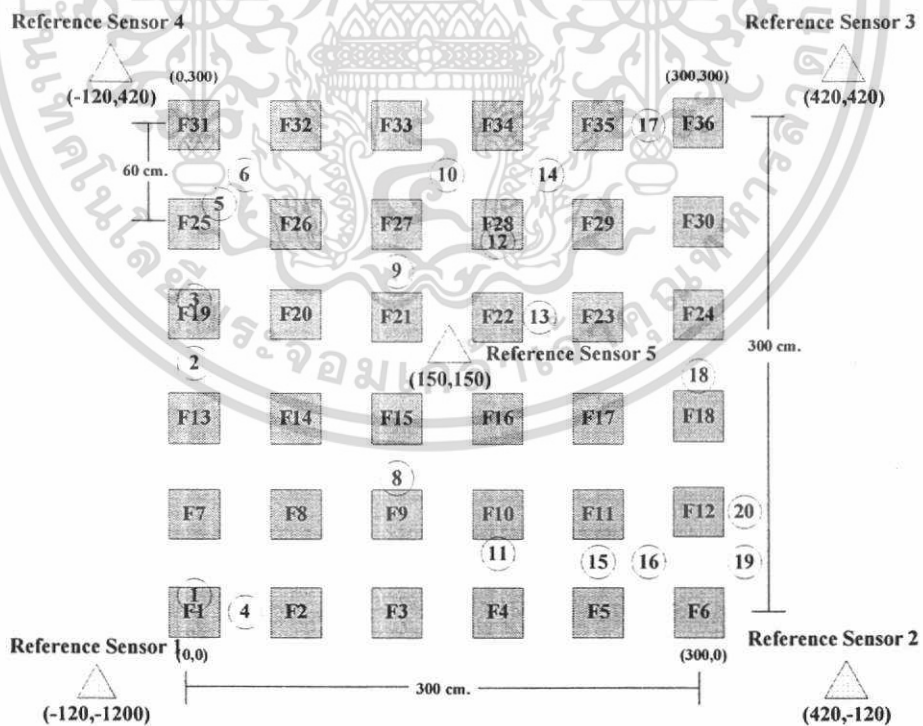


รูปที่ 4.15 รูปแบบการกำหนดตำแหน่งของการทดลองโดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 3 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

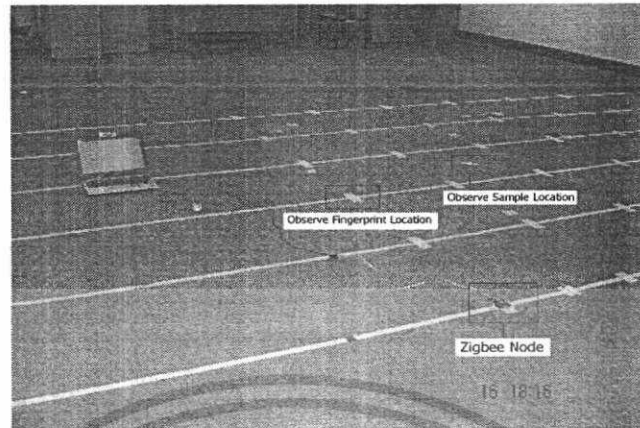


รูปที่ 4.16 รูปแบบการกำหนดตำแหน่งของการทดลองโดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 4 ตัว

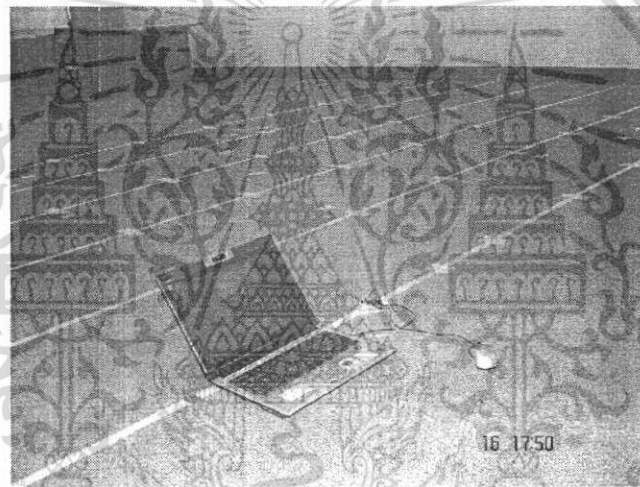


รูปที่ 4.17 รูปแบบการกำหนดตำแหน่งของการทดลองโดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 5 ตัว

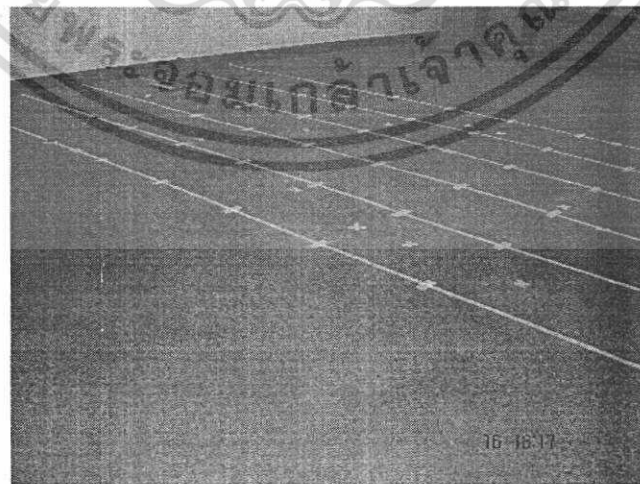
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก้นำไปใช้



รูปที่4.18a รูปแบบจริงในการในการวัดความเข้มของสัญญาณ



รูปที่4.18b รูปแบบจริงในการในการวัดความเข้มของสัญญาณ



รูปที่4.18c รูปแบบจริงในการในการวัดความเข้มของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 บทสรุป

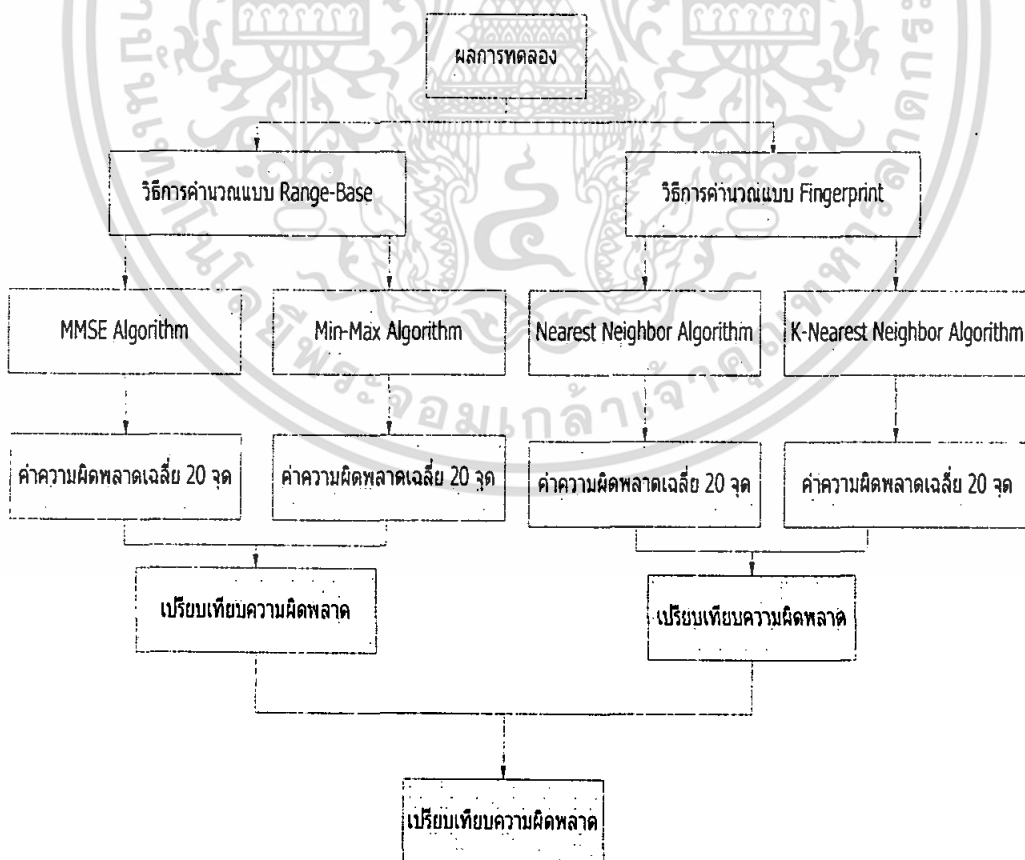
ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการและขั้นตอนในการทดลองเพื่อหาตำแหน่งของเป้าหมาย ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ชิพเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย Xbee Pro ของบริษัท Max Stream มาใช้เป็นเซ็นเซอร์ ในการวัดค่าความเข้มของสัญญาณเนื่องจากสามารถเรียกใช้ค่าจากชิพได้โดยตรง ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในระบบระบุตำแหน่งมา 2 ชนิด ได้แก่ เซ็นเซอร์อ้างอิง และเซ็นเซอร์วัดจุด เซ็นเซอร์อ้างอิงนั้นได้สร้างมาจำนวน 5 ชุด และเซ็นเซอร์วัดจุดจำนวน 1 ชุด ในส่วนแสดงผลนั้นผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมสำหรับแสดงผลค่าความเข้มของสัญญาณในแต่ละเซ็นเซอร์อ้างอิง จากนั้นผู้วิจัยได้ออกแบบและทดสอบการทำงานของระบบ และดำเนินผลการทดลองระบบทั้งหมด ซึ่งในการทดลองวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การหาตำแหน่งภายในอาคาร 2 วิธี วิธีการแรกคือ เทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางโดยใช้การวัดค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัวมาทำการเปลี่ยนเป็นระยะทางโดยใช้กฎของเรขาคณิตทางคณิตศาสตร์ 2 อัลกอริทึม ได้แก่ วิธี MMSE และวิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด ในการประมวลผลออกมาเป็นตำแหน่งของวัตถุที่ต้องการทราบ วิธีการที่สองคือ เทคนิคการหาตำแหน่งแบบการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล มาทำการหาตำแหน่ง โดยการเปรียบเทียบค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ในเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัวของตำแหน่งของเป้าหมายแบบสุ่ม กับค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ในเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัวของตำแหน่ง Fingerprint ที่ได้ทำการสำรวจเก็บข้อมูลเอาไว้แล้วในฐานข้อมูล โดยใช้ อัลกอริทึมในการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งหมด 2 อัลกอริทึม ได้แก่ วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า จากนั้นทางผู้วิจัยได้ดำเนินการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 เซ็นเซอร์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทั้ง 2 วิธีในการคำนวณ ในการทดลองต้องการกำหนดแผนการทดลองและขั้นตอนทำการทดลองวิจัยให้คำนึงถึงปัจจัยต่างๆ อันได้แก่ สถานที่ที่ทำการทดลองวิจัย กำลังส่งของเซ็นเซอร์ไร้สาย อายุการใช้งานของเซ็นเซอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับการบริหารใช้พลังงาน พื้นที่ในการหาตำแหน่ง เป็นต้น เพื่อให้สอดคล้องกับการนำไปประยุกต์ในการใช้งานจริงของเทคโนโลยีระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยใช้เซ็นเซอร์ไร้สาย เพื่อให้ได้มาซึ่งผลงานวิจัยที่เชื่อถือได้ ในบทต่อไปจะได้อีกกล่าวถึงรายละเอียดของผลการทดลองและผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการหาตำแหน่งในแต่ละอัลกอริทึมที่ได้ทำการทดลองวิจัย

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหาตำแหน่งภายในอาคาร

#### 5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งภายในอาคาร โดยการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความแม่นยำในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานเทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณตำแหน่งที่ได้ศึกษาและค้นคว้า การอ้างอิงตำแหน่งนั้นจะใช้ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัวมาเป็นข้อมูลในการคำนวณตำแหน่ง ซึ่งในการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารนั้นได้ทำการนำวิธีการเปรียบเทียบ 2 วิธี อัลกอริทึมทั้งหมด 4 อัลกอริทึม โดยนำค่าของตำแหน่งที่ได้มาจากการคำนวณในแต่ละอัลกอริทึมมาทำการเปรียบเทียบหาความแม่นยำในการหาตำแหน่ง ซึ่งความแม่นยำจะศึกษาจากการเปรียบเทียบจากค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและวิจัย เพื่อนำมาสรุปประเมินในเรื่องของความแม่นยำ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1

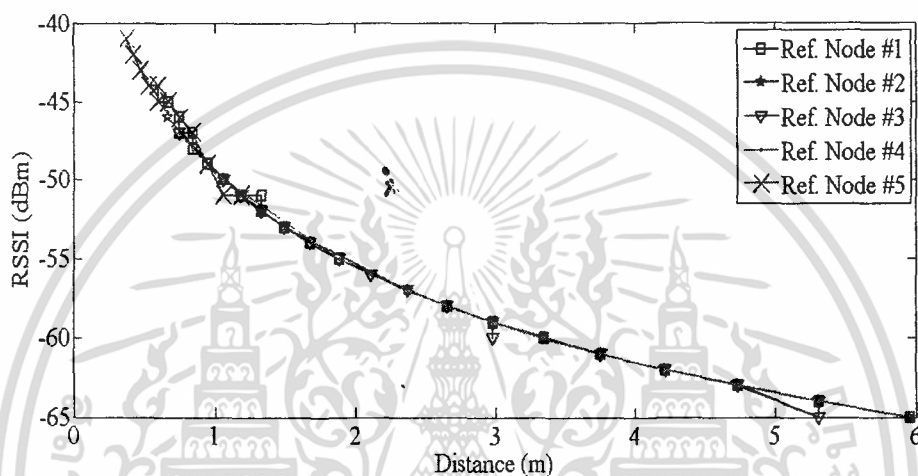


รูปที่ 5.1 แบบแผนวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ผลการวิเคราะห์รูปแบบความเข้มของสัญญาณ

ในการวิเคราะห์รูปแบบความเข้มของสัญญาณนั้นวิธีการที่ง่ายที่สุดคือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณกับระยะทาง ซึ่งจะช่วยให้วิเคราะห์ข้อมูลได้ง่ายขึ้น เนื่องจากจะทราบได้ว่าพื้นที่ที่ทำการวัดมีค่าความเข้มของสัญญาณของแต่ละเซ็นเซอร์อ้างอิงประมาณเท่าใด จากผลการทดลองสามารถคำนวณได้ เมื่อระยะทางมากขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในขณะนั้นมีค่าน้อยลง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และแสดงรูปแบบการบันทึกข้อมูลได้ดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณกับระยะทาง

ตารางที่ 5.1 บันทึกการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณกับระยะทางที่วัดได้

(Observe Location	RSSI (dBm)					Calculated (m)				
	Ref-1	Ref-2	Ref-3	Ref-4	Ref-5	Distance - 1	Distance - 2	Distance - 3	Distance - 4	Distance - 5
1	-44	-42	-44	-50	-42	0.4217	0.4217	0.5309	0.9441	0.4217
2	-43	-42	-51	-50	-42	0.4732	0.4217	1.1885	1.0593	0.4217
3	-51	-43	-54	-51	-42	1.1885	0.4732	1.6788	1.1885	0.4217
4	-52	-44	-54	-52	-42	1.3335	0.5309	1.6788	1.3335	0.4217
5	-53	-50	-55	-53	-42	1.4962	1.0593	1.8836	1.4962	0.4217
6	-54	-55	-56	-54	-43	1.6788	1.8836	2.1135	1.6788	0.4732
7	-57	-57	-56	-55	-43	2.3714	2.3714	2.1135	1.8836	0.4732
8	-58	-59	-56	-58	-43	2.6607	2.9854	2.1135	2.6607	0.4732
9	-58	-59	-58	-58	-43	2.6607	2.9854	2.6607	2.6607	0.4732
10	-59	-60	-59	-58	-44	2.9854	3.3497	2.9854	2.6607	0.4732
11	-59	-60	-59	-59	-44	2.9854	3.3497	2.9854	2.9854	0.5309
12	-59	-60	-59	-59	-45	2.9854	3.3497	2.9854	2.9854	0.5309
13	-60	-60	-60	-60	-45	3.3497	3.3497	3.3497	3.3497	0.5957
14	-61	-61	-60	-61	-45	3.7584	3.7584	3.3497	3.7584	0.5957
15	-62	-61	-60	-62	-45	4.217	3.7584	3.3497	4.217	0.5957
16	-62	-61	-61	-62	-45	4.217	3.7584	3.7854	4.217	0.5957
17	-62	-62	-62	-63	-45	4.217	4.217	4.217	4.7315	0.5957
18	-62	-62	-62	-63	-45	4.7315	4.217	4.217	4.7315	0.5957
19	-63	-64	-64	-64	-45	5.3088	5.3088	5.3088	5.3088	0.5957
20	-64	-64	-65	-65	-46	4.217	5.3088	5.3088	5.9566	0.6683

### 5.3 ผลการทดลองและผลการคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีที่ 1: เทคนิคการใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง

จากผลการทดลองที่ได้ทำการสุ่มทดสอบทั้ง 20 ตำแหน่ง โดยทำการทดลองซ้ำกัน 5 ครั้ง และทำการหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณเปรียบเทียบ 2 อัลกอริทึม ได้แก่ วิธี MMSE กับ วิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด รวมทั้งมีการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัว โดยสามารถคำนวณพิกัดได้ดังนี้

#### 5.3.1 ผลการทดลองและคำนวณตำแหน่งด้วยวิธี MMSE

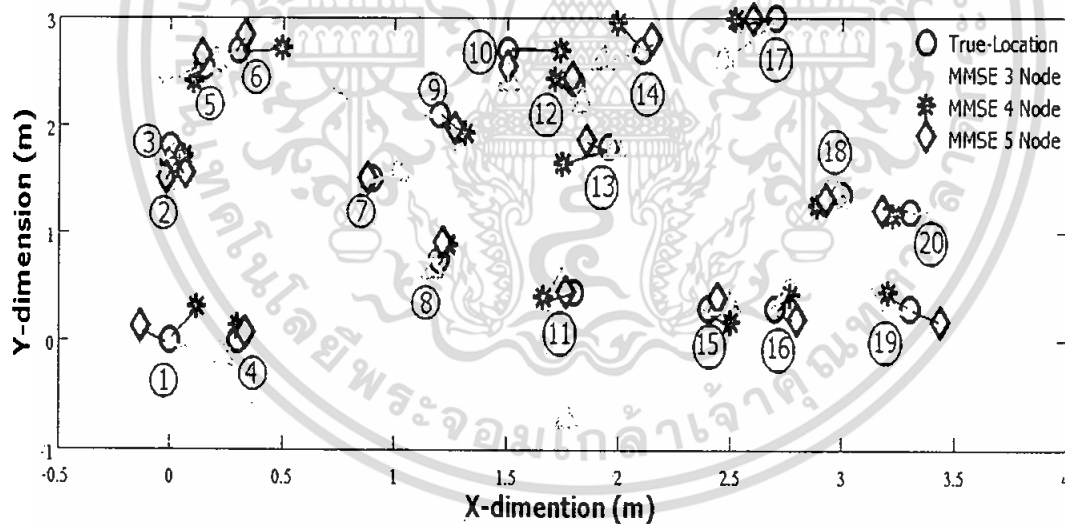
ในแต่ละชุดการทดลองได้ทำการทดลองทั้งหมดจำนวน 20 ตำแหน่ง โดยทำการทดลองซ้ำกัน 5 ครั้ง และทำการวัดค่าความเข้มในแต่ละตำแหน่ง จากนั้นนำค่าความเข้มที่ได้ทั้งหมดมาเฉลี่ยเพื่อหาค่าความเข้มเฉลี่ยและทำการคำนวณด้วยวิธี MMSE เพื่อคำนวณหาตำแหน่งซึ่งค่าที่ถูกคำนวณออกมาเป็นตำแหน่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 จากนั้นดำเนินการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัว พร้อมทั้งเปรียบเทียบตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้เพื่อแสดงประสิทธิภาพซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี MMSE 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง

ตำแหน่งสุ่มทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี MMSE 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี MMSE 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี MMSE 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	(0, 0)	(0.23, -0.15)	(0.12, 0.31)	(-0.13, -0.13)
ตำแหน่งที่ 2	(0, 1.65)	(-0.04, 1.6)	(0.06, 1.70)	(-0.01, 1.5)
ตำแหน่งที่ 3	(0, 1.8)	(0.02, 1.66)	(0.06, 1.71)	(0.07, 1.55)
ตำแหน่งที่ 4	(0.30, 0)	(1.77, -0.73)	(0.30, 0.14)	(0.34, 0.07)
ตำแหน่งที่ 5	(0.15, 2.55)	(-0.07, 2.39)	(0.10, 2.41)	(0.14, 2.65)
ตำแหน่งที่ 6	(0.30, 2.7)	(0.2, 2.58)	(0.49, 2.72)	(0.33, 2.84)
ตำแหน่งที่ 7	(0.9, 1.5)	(1.02, 1.56)	(0.88, 1.5)	(0.88, 1.5)
ตำแหน่งที่ 8	(1.2, 0.75)	(1.17, 0.66)	(1.24, 0.88)	(1.22, 0.91)
ตำแหน่งที่ 9	(1.2, 2.1)	(0.74, 2.25)	(1.31, 1.92)	(1.26, 1.98)
ตำแหน่งที่ 10	(1.5, 2.7)	(1.5, 2.4)	(1.74, 2.7)	(1.5, 2.55)
ตำแหน่งที่ 11	(1.8, 0.45)	(1.74, 0.53)	(1.66, 0.4)	(1.76, 0.44)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งจุดทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี MMSE 3 เซ็นเซอร์ อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี MMSE 4 เซ็นเซอร์ อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี MMSE 5 เซ็นเซอร์ อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 12	(1.8, 2.4)	(1.84, 2.2)	(1.71, 2.43)	(1.79, 2.44)
ตำแหน่งที่ 13	(1.95, 1.8)	(1.98, 1.79)	(1.75, 1.65)	(1.85, 1.85)
ตำแหน่งที่ 14	(2.1, 2.7)	(1.93, 2.62)	(1.99, 2.95)	(2.14, 2.8)
ตำแหน่งที่ 15	(2.4, 0.3)	(2.5, 0.33)	(2.5, 0.17)	(2.44, 0.39)
ตำแหน่งที่ 16	(2.7, 0.3)	(2.77, 0.46)	(2.77, 0.42)	(2.79, 0.2)
ตำแหน่งที่ 17	(2.7, 3)	(2.46, 2.62)	(2.52, 2.99)	(2.6, 2.98)
ตำแหน่งที่ 18	(3, 1.35)	(2.98, 1.32)	(2.89, 1.25)	(2.93, 1.3)
ตำแหน่งที่ 19	(3.3, 0.3)	(3.13, 0.35)	(3.2, 0.45)	(3.44, 0.17)
ตำแหน่งที่ 20	(3.3, 1.2)	(3.54, 1.22)	(3.22, 1.16)	(3.17, 1.12)



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณโดยใช้วิธี MMSE

จากการทดลองด้วยวิธีการหาตำแหน่งด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางโดยใช้วิธี MMSE จากตารางที่ 5.2 ได้ดำเนินการคำนวณตำแหน่งจากค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งที่กำหนดไว้และนำค่าที่คำนวณได้ในแต่ละตำแหน่งมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงที่กำหนดไว้ ซึ่งตำแหน่งที่นำมาเปรียบเทียบกับนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 สัญลักษณ์วงกลมคือพิกัดของตำแหน่งจริง ส่วนสัญลักษณ์สามเหลี่ยมคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว สัญลักษณ์ดอกจันคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 4 ตัว และสัญลักษณ์ดอกจิกคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัว เส้นที่ลากเชื่อมต่อของสัญลักษณ์แต่ละเส้นหมายถึงผลลัพธ์ความผิดพลาดจากการทดสอบตำแหน่งในตำแหน่งเดียวกัน โดยเป็นเส้นแสดงการเปรียบเทียบระหว่างพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากรูปที่ 5.3 สังเกตจากเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากการคำนวณ โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว ส่วนใหญ่เส้นจะยาวที่สุดในแต่ละตำแหน่ง และเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัว เส้นจะสั้นที่สุด

### 5.3.2 ผลการทดลองและคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด

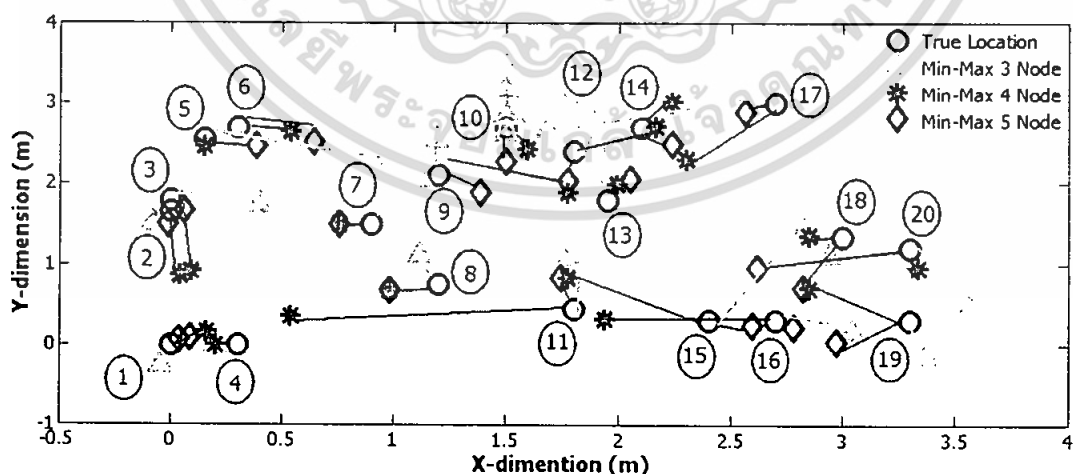
ในแต่ละชุดการทดลองได้ทำการทดลองทั้งหมดจำนวน 20 ตำแหน่ง โดยทำการทดลองซ้ำกัน 5 ครั้ง และทำการวัดค่าความเข้มในแต่ละตำแหน่ง จากนั้นนำค่าความเข้มที่ได้ทั้งหมดนำมาเฉลี่ยเพื่อหาค่าความเข้มเฉลี่ยและทำการคำนวณด้วยวิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด เพื่อประมาณหาตำแหน่งซึ่งค่าที่ถูกคำนวณออกมาเป็นตำแหน่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 จากนั้นดำเนินการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัว พร้อมทั้งเปรียบเทียบตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้เพื่อแสดงประสิทธิภาพซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง

ตำแหน่งสุ่มทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Min-Max 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Min-Max 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Min-Max 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	(0, 0)	(-0.05, -0.27)	(0.16, 0.16)	(0.09, 0.09)
ตำแหน่งที่ 2	(0, 1.65)	(-0.08, 1.5)	(0.04, 0.86)	(-0.01, 1.5)
ตำแหน่งที่ 3	(0, 1.8)	(0.4, 1.746)	(0.09, 0.92)	(0.06, 1.67)
ตำแหน่งที่ 4	(0.30, 0)	(0.20, -0.01)	(0.20, -0.01)	(0.04, 0.06)
ตำแหน่งที่ 5	(0.15, 2.55)	(0.99, 2.33)	(0.15, 2.46)	(0.38, 2.46)
ตำแหน่งที่ 6	(0.30, 2.7)	(1.5, 2.63)	(0.54, 2.65)	(0.64, 2.52)
ตำแหน่งที่ 7	(0.9, 1.5)	(1.11, 2.05)	(0.76, 1.5)	(0.76, 1.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งจุดทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Min-Max 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Min-Max 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Min-Max 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 8	(1.2, 0.75)	(1.11, 1.11)	(0.98, 0.67)	(0.98, 0.67)
ตำแหน่งที่ 9	(1.2, 2.1)	(1.19, 2.54)	(1.77, 1.89)	(1.39, 1.89)
ตำแหน่งที่ 10	(1.5, 2.7)	(1.5, 3.44)	(1.59, 2.43)	(1.5, 2.28)
ตำแหน่งที่ 11	(1.8, 0.45)	(1.77, 1.06)	(0.54, 0.36)	(1.74, 0.83)
ตำแหน่งที่ 12	(1.8, 2.4)	(1.50, 2.85)	(2.16, 2.71)	(1.77, 2.03)
ตำแหน่งที่ 13	(1.95, 1.8)	(1.88, 2.46)	(1.99, 1.99)	(2.05, 2.05)
ตำแหน่งที่ 14	(2.1, 2.7)	(1.5, 3.18)	(2.24, 3.01)	(2.24, 2.49)
ตำแหน่งที่ 15	(2.4, 0.3)	(2.84, 1.5)	(1.77, 0.84)	(2.59, 0.24)
ตำแหน่งที่ 16	(2.7, 0.3)	(3.05, 0.16)	(1.94, 0.32)	(2.78, 0.22)
ตำแหน่งที่ 17	(2.7, 3)	(1.68, 2.67)	(2.30, 2.30)	(2.56, 2.88)
ตำแหน่งที่ 18	(3, 1.35)	(2.94, 1.11)	(2.85, 1.36)	(2.82, 0.71)
ตำแหน่งที่ 19	(3.3, 0.3)	(3.37, -0.14)	(2.85, 0.7)	(2.97, 0.036)
ตำแหน่งที่ 20	(3.3, 1.2)	(3.57, 0.47)	(3.34, 0.96)	(2.62, 0.96)



รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณโดยใช้วิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองด้วยวิธีการหาตำแหน่งด้วยเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางโดยใช้วิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด จากตารางที่ 5.3 ได้ดำเนินการคำนวณตำแหน่งจากค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งที่กำหนดไว้และนำค่าที่คำนวณได้ในแต่ละตำแหน่งมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงที่กำหนดไว้ ตำแหน่งที่นำมาเปรียบเทียบกับนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งสัญลักษณ์วงกลมคือพิกัดของตำแหน่งจริง ส่วนสัญลักษณ์สามเหลี่ยมคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว สัญลักษณ์ดอกจันคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 4 ตัว และสัญลักษณ์ดอกจิกคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัว เส้นที่ลากเชื่อมต่อของสัญลักษณ์แต่ละเส้นหมายถึงผลลัพธ์ความผิดพลาดจากการทดสอบตำแหน่งในตำแหน่งเดียวกัน โดยเป็นเส้นแสดงการเปรียบเทียบระหว่างพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากรูปที่ 5.4 สังเกตจากเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากการคำนวณโดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว ส่วนใหญ่เส้นจะยาวที่สุดในแต่ละตำแหน่ง และเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัวจะสั้นที่สุด

#### 5.4 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีที่ 1: เทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง

ในการทดลองวิจัยนี้ได้นำเทคนิคของระยะห่างยูคลิเดียนมาคำนวณหาค่าความผิดพลาดซึ่งสมการที่ใช้หาค่าความผิดพลาดของพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณกับพิกัดตำแหน่งจริงเป็นดังสมการนี้

$$\text{Error Distance} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (5.1)$$

โดยที่  $x_1$  และ  $y_1$  เป็นพิกัดตำแหน่งจริงส่วน  $x_2$  และ  $y_2$  เป็นพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณในแนวแกน  $x$  และแนวแกน  $y$  ตามลำดับ ซึ่งในการคำนวณหาตำแหน่งด้วยวิธีที่ 1 มีค่าความผิดพลาดดังตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.4 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี วิธี MMSE 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง

ตำแหน่งกลุ่มทดสอบ	ค่าความผิดพลาด MMSE 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด MMSE 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด MMSE 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	0.28	0.33	0.19
ตำแหน่งที่ 2	0.07	0.08	0.15
ตำแหน่งที่ 3	0.14	0.11	0.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งกลุ่มทดสอบ	ค่าความผิดพลาด MMSE 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด MMSE 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด MMSE 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 4	1.64	0.14	0.08
ตำแหน่งที่ 5	0.27	0.14	0.10
ตำแหน่งที่ 6	0.16	0.20	0.14
ตำแหน่งที่ 7	0.13	0.02	0.02
ตำแหน่งที่ 8	0.09	0.14	0.16
ตำแหน่งที่ 9	0.49	0.21	0.14
ตำแหน่งที่ 10	0.29	0.24	0.15
ตำแหน่งที่ 11	0.10	0.14	0.03
ตำแหน่งที่ 12	0.21	0.09	0.04
ตำแหน่งที่ 13	0.03	0.25	0.11
ตำแหน่งที่ 14	0.19	0.27	0.11
ตำแหน่งที่ 15	0.10	0.16	0.10
ตำแหน่งที่ 16	0.17	0.14	0.14
ตำแหน่งที่ 17	0.44	0.18	0.10
ตำแหน่งที่ 18	0.04	0.15	0.09
ตำแหน่งที่ 19	0.18	0.18	0.19
ตำแหน่งที่ 20	0.24	0.09	0.12

ตารางที่ 5.5 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี การอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุดโดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัวตามลำดับ

ตำแหน่งกลุ่มทดสอบ	ค่าความผิดพลาด Min-Max 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด Min-Max 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด Min-Max 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	0.28	0.23	0.13
ตำแหน่งที่ 2	0.17	0.79	0.15
ตำแหน่งที่ 3	0.40	0.89	0.14

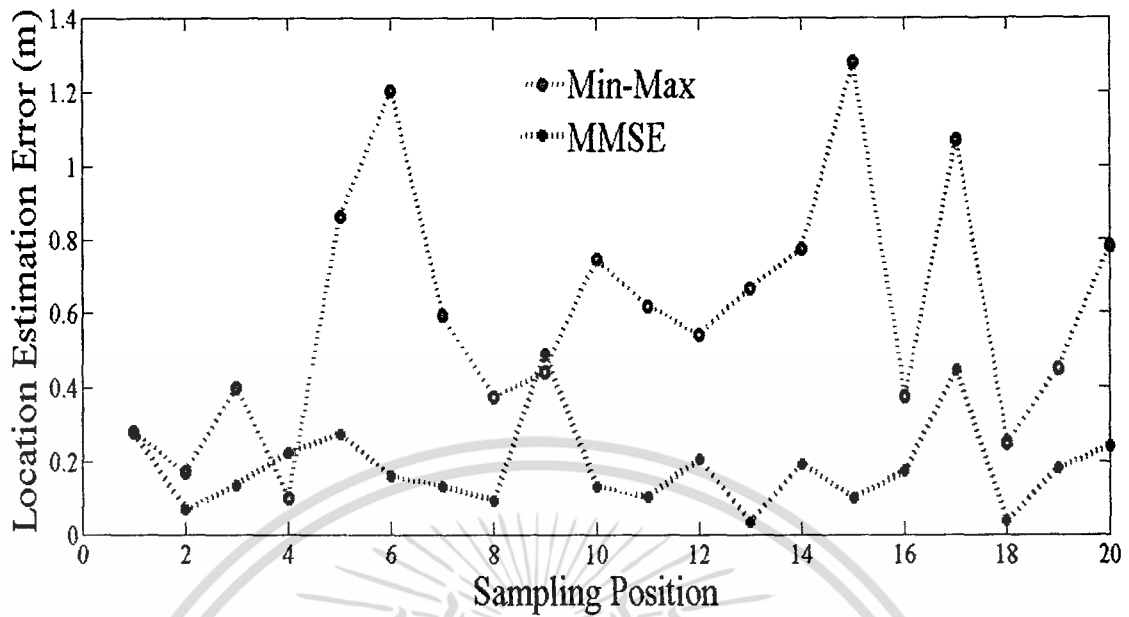
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแบบเนื้อหา และต้องอ้างอิงของเอกสารทุกครั้งที่จะนำไปใช้

ตำแหน่งลุ่มทดสอบ	ค่าความผิดพลาด Min-Max 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด Min-Max 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด Min-Max 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 4	0.10	0.10	0.27
ตำแหน่งที่ 5	0.86	0.09	0.25
ตำแหน่งที่ 6	1.20	0.24	0.39
ตำแหน่งที่ 7	0.59	0.14	0.14
ตำแหน่งที่ 8	0.37	0.23	0.23
ตำแหน่งที่ 9	0.44	0.61	0.28
ตำแหน่งที่ 10	0.75	0.29	0.42
ตำแหน่งที่ 11	0.61	1.27	0.38
ตำแหน่งที่ 12	0.54	0.48	0.37
ตำแหน่งที่ 13	0.67	0.20	0.27
ตำแหน่งที่ 14	0.77	0.34	0.25
ตำแหน่งที่ 15	1.28	0.82	0.20
ตำแหน่งที่ 16	0.37	0.76	0.12
ตำแหน่งที่ 17	1.07	0.81	0.18
ตำแหน่งที่ 18	0.25	0.15	0.67
ตำแหน่งที่ 19	0.45	0.60	0.42
ตำแหน่งที่ 20	0.78	0.24	0.72

ตารางที่ 5.6 สรุปค่าความผิดพลาดเฉลี่ยโดยใช้การคำนวณด้วยวิธี เทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหา ระยะทาง

Node	ค่าผิดพลาดเคลื่อนเฉลี่ย Min-Max (m)	ค่าผิดพลาดเคลื่อนเฉลี่ย Lateration (m)
3 เซ็นเซอร์อ้างอิง	0.60	0.26
4 เซ็นเซอร์อ้างอิง	0.46	0.16
5 เซ็นเซอร์อ้างอิง	0.30	0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 กราฟการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดโดยใช้การคำนวณด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง

จากผลการคำนวณสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5 ซึ่งแสดงถึงค่าความผิดพลาดที่คำนวณได้จากค่าความเข้มของสัญญาณในตำแหน่งที่กำหนด 20 จุด จากนั้นดำเนินการเฉลี่ยค่าความผิดพลาดออกมาเป็นค่าเฉลี่ยทั้ง 20 จุดมาได้ดังตารางที่ 5.6 จากผลการทดลองค่าความผิดพลาดของวิธี MMSE มีค่าน้อยกว่าค่าความผิดพลาดของอัลกอริทึม Min-Max และจากรูปที่ 5.5 แสดงถึงค่าความผิดพลาดด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางโดยใช้วิธีการ MMSE กับวิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด โดยแสดงความผิดพลาดแต่ละจุดทั้งหมด 20 จุด จากกราฟซึ่งสรุปได้ว่าการคำนวณด้วยวิธีการเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง วิธี MMSE มีความแม่นยำมากกว่าวิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุดผลการทดลองในขั้นต่อมาผู้วิจัยได้เพิ่มจำนวนเซ็นเซอร์อ้างอิง ซึ่งพบว่าเซ็นเซอร์อ้างอิงที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการแสดงตำแหน่งขึ้นเล็กน้อย

## 5.5 ผลการทดลองและผลการคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีที่ 2: การจับคู่ความเข้มของ

### สัญญาณในฐานะข้อมูล

จากผลการทดลองที่ได้ทำการสุ่มทดสอบทั้ง 20 ตำแหน่ง โดยทำการทดลองซ้ำกัน 5 ครั้ง และทำการหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณเปรียบเทียบ 2 อัลกอริทึม ได้แก่ วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด กับ วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า รวมทั้งมีการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัว สามารถคำนวณพิกัดได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

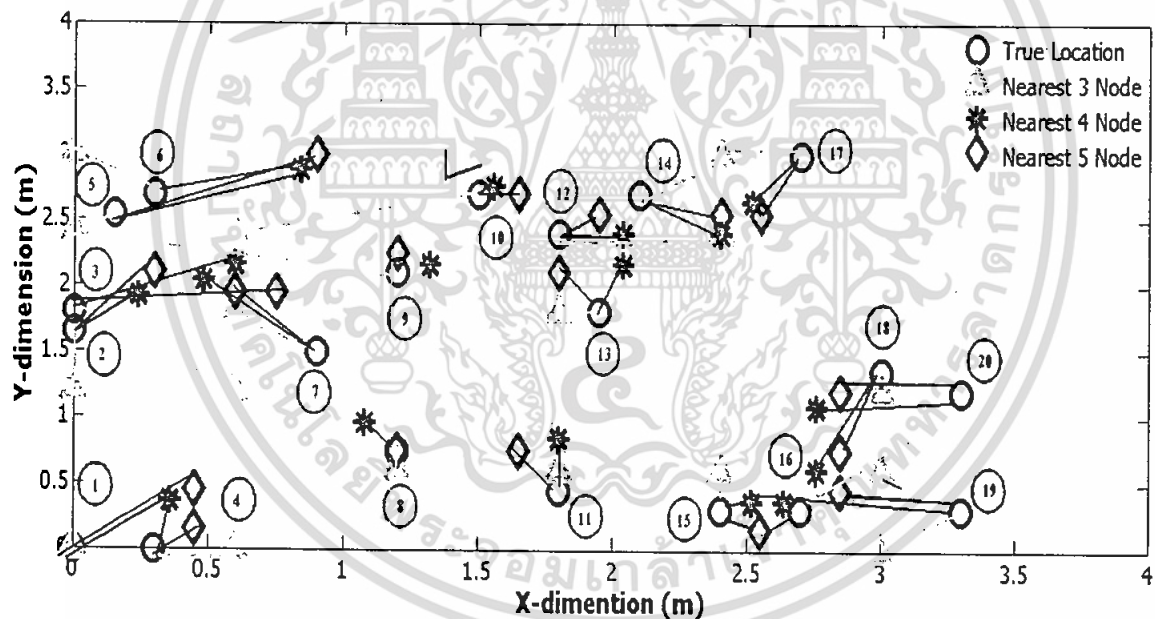
### 5.5.1 ผลการทดลองและคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด

ในแต่ละชุดการทดลองได้ทำการทดลองทั้งหมดจำนวน 20 ตำแหน่ง โดยทำการทดลองซ้ำกัน 5 ครั้ง และทำการวัดค่าความเข้มในแต่ละตำแหน่ง จากนั้นนำค่าความเข้มที่ได้ทั้งหมดมาเฉลี่ยเพื่อหาค่าความเข้มเฉลี่ยและทำการคำนวณด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด โดยเลือกใช้ค่าอ้างอิงที่ใกล้ที่สุด เพื่อประมาณหาตำแหน่งซึ่งค่าที่ถูกคำนวณออกมาเป็นตำแหน่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.7 จากนั้นดำเนินการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัว และดำเนินการเปรียบเทียบพร้อมทั้งหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.7 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัวตามลำดับ

ตำแหน่งกลุ่มทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	(0.00, 0.00)	(0.00, 0.00)	(0.36, 0.36)	(0.45, 0.45)
ตำแหน่งที่ 2	(0.00, 1.65)	(0.00, 1.20)	(0.24, 1.92)	(0.30, 2.10)
ตำแหน่งที่ 3	(0.00, 1.80)	(0.60, 1.20)	(0.60, 2.16)	(0.75, 1.95)
ตำแหน่งที่ 4	(0.30, 0.00)	(0.60, 0.00)	(0.36, 0.36)	(0.45, 0.15)
ตำแหน่งที่ 5	(0.15, 2.55)	(0.00, 2.4)	(0.84, 2.88)	(0.90, 3.00)
ตำแหน่งที่ 6	(0.30, 2.7)	(0.00, 3.00)	(0.84, 2.88)	(0.90, 3.00)
ตำแหน่งที่ 7	(0.90, 1.50)	(0.60, 1.80)	(0.48, 2.04)	(0.60, 1.95)
ตำแหน่งที่ 8	(1.20, 0.75)	(1.20, 0.60)	(1.08, 0.96)	(1.20, 0.75)
ตำแหน่งที่ 9	(1.20, 2.10)	(0.00, 2.40)	(1.32, 2.16)	(1.20, 2.25)
ตำแหน่งที่ 10	(1.50, 2.70)	(0.60, 2.40)	(1.56, 2.76)	(1.65, 2.70)
ตำแหน่งที่ 11	(1.80, 0.45)	(1.80, 0.60)	(1.80, 0.84)	(1.65, 0.75)
ตำแหน่งที่ 12	(1.80, 2.40)	(2.40, 2.40)	(2.04, 2.40)	(1.95, 2.55)
ตำแหน่งที่ 13	(1.95, 1.80)	(1.80, 1.80)	(2.04, 2.16)	(1.80, 2.10)
ตำแหน่งที่ 14	(2.10, 2.70)	(2.40, 3.00)	(2.40, 2.40)	(2.40, 2.55)

ตำแหน่งสุ่มทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 15	(2.40, 0.30)	(2.40, 0.60)	(2.64, 0.36)	(2.55, 0.15)
ตำแหน่งที่ 16	(2.70, 0.30)	(3.00, 0.60)	(2.52, 0.36)	(2.55, 0.15)
ตำแหน่งที่ 17	(2.70, 3.00)	(0.00, 3.00)	(2.52, 2.64)	(2.55, 2.55)
ตำแหน่งที่ 18	(3.00, 1.35)	(3.00, 1.20)	(2.76, 0.60)	(2.85, 0.75)
ตำแหน่งที่ 19	(3.30, 0.30)	(3.00, 0.00)	(2.64, 0.36)	(2.85, 0.45)
ตำแหน่งที่ 20	(3.30, 1.20)	(3.00, 0.60)	(2.76, 1.08)	(2.85, 1.20)



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด

จากการทดลองด้วยวิธีการหาค่าตำแหน่งด้วยวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด จากตารางที่ 5.7 ได้ดำเนินการคำนวณตำแหน่งค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งที่กำหนดไว้และนำค่าที่คำนวณได้ในแต่ละตำแหน่งมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงที่กำหนดไว้ ตำแหน่งที่นำมาเปรียบเทียบกับนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งสัญลักษณ์วงกลมคือพิกัดของตำแหน่งจริง ส่วนสัญลักษณ์สามเหลี่ยมคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว สัญลักษณ์ดอกจันหรือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 4 ตัว และสัญลักษณ์ดอกจิกคือพิกัด

เฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัว เส้นที่ลากเชื่อมต่อของสัญลักษณ์แต่ละเส้น หมายถึงผลลัพธ์ความผิดพลาดจากการทดสอบตำแหน่งในตำแหน่งเดียวกัน โดยเป็นเส้นแสดง การเปรียบเทียบระหว่างพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากรูปที่ 5.6 สังเกตจากเส้นที่ลาก เชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากการคำนวณโดยใช้เซ็นเซอร์ อ้างอิงจำนวน 3 ตัว ส่วนใหญ่เส้นจะยาวที่สุดในแต่ละตำแหน่ง และเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่าง ตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัว เส้นจะสั้นที่สุด

### 5.5.2 ผลการทดลองและคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด

#### K ค่า

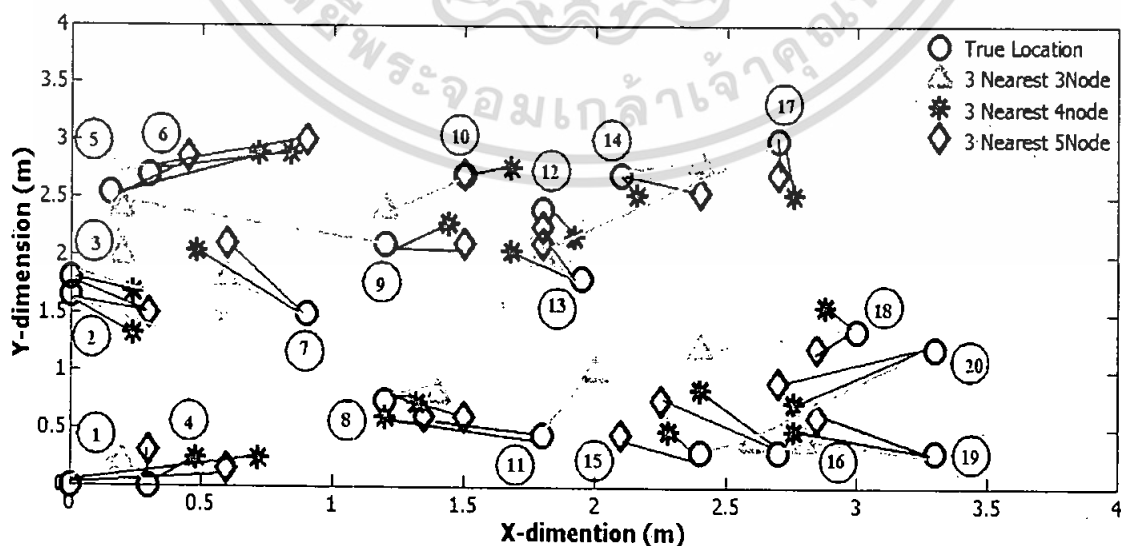
ในแต่ละชุดการทดลองได้ทำการทดลองทั้งหมดจำนวน 20 ตำแหน่ง โดยทำการทดลอง ซ้ำกัน 5 ครั้ง และทำการวัดค่าความเข้มในแต่ละตำแหน่ง จากนั้นนำค่าความเข้มที่ได้ทั้งหมด นำมาเฉลี่ยเพื่อหาค่าความเข้มเฉลี่ยและทำการคำนวณด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อย ที่สุด K ค่า เพื่อประมาณหาตำแหน่ง งานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าอ้างอิงที่ใกล้มากที่สุด K=3, K=4, K=5 ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ถูกคำนวณออกมาเป็นตำแหน่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.8 ตารางที่ 5.9 และตารางที่ 5.10 ตามลำดับ จากนั้นดำเนินการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัว และดำเนินการ เปรียบเทียบพร้อมทั้งหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพซึ่งสามารถแสดง ได้ ดังรูปที่ 5.7, 5.8, 5.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.8 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วย วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด 3 ค่า โดยใช้ เซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัวตามลำดับ

ตำแหน่งสุ่ม ทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณ ด้วยวิธี 3-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณ ด้วยวิธี 3-Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณ ด้วยวิธี 4-Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	(0.00, 0.00)	(0.20, 0.20)	(0.72, 0.24)	(0.60, 0.15)
ตำแหน่งที่ 2	(0.00, 1.65)	(0.60, 1.20)	(0.24, 1.32)	(0.30, 1.50)
ตำแหน่งที่ 3	(0.00, 1.80)	(0.60, 1.40)	(0.24, 1.68)	(0.30, 1.50)
ตำแหน่งที่ 4	(0.30, 0.00)	(0.20, 0.20)	(0.48, 0.24)	(0.30, 0.30)
ตำแหน่งที่ 5	(0.15, 2.55)	(0.20, 2.00)	(0.72, 2.88)	(0.45, 2.85)
ตำแหน่งที่ 6	(0.30, 2.70)	(0.20, 2.80)	(0.84, 2.88)	(0.90, 3.00)
ตำแหน่งที่ 7	(0.90, 1.50)	(0.60, 1.80)	(0.48, 2.04)	(0.60, 2.10)

เอกสารนี้เป็นตำแหน่งที่ 7 ได้มีการคำนวณค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด 3 ค่า โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัวตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าครุณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งสุ่มทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 3-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 3-Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 4-Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 8	(1.20, 0.75)	(1.40, 0.80)	(1.32, 0.72)	(1.50, 0.60)
ตำแหน่งที่ 9	(1.20, 2.10)	(0.20, 2.40)	(1.44, 2.28)	(1.50, 2.10)
ตำแหน่งที่ 10	(1.50, 2.70)	(1.20, 2.40)	(1.68, 2.76)	(1.50, 2.70)
ตำแหน่งที่ 11	(1.80, 0.45)	(2.00, 1.00)	(1.20, 0.60)	(1.35, 0.60)
ตำแหน่งที่ 12	(1.80, 2.40)	(1.80, 2.00)	(1.92, 2.16)	(1.80, 2.25)
ตำแหน่งที่ 13	(1.95, 1.80)	(1.80, 2.00)	(1.68, 2.04)	(1.80, 2.10)
ตำแหน่งที่ 14	(2.10, 2.70)	(2.40, 2.80)	(2.16, 2.52)	(2.40, 2.55)
ตำแหน่งที่ 15	(2.40, 0.30)	(2.60, 0.40)	(2.28, 0.48)	(2.10, 0.45)
ตำแหน่งที่ 16	(2.70, 0.30)	(2.60, 0.40)	(2.40, 0.84)	(2.25, 0.75)
ตำแหน่งที่ 17	(2.70, 3.00)	(1.80, 2.20)	(2.76, 2.52)	(2.70, 2.70)
ตำแหน่งที่ 18	(3.00, 1.35)	(2.40, 1.20)	(2.88, 1.56)	(2.85, 1.20)
ตำแหน่งที่ 19	(3.30, 0.30)	(2.80, 0.40)	(2.76, 0.48)	(2.85, 0.60)
ตำแหน่งที่ 20	(3.30, 1.20)	(2.60, 0.40)	(2.76, 0.72)	(2.70, 0.90)



รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่า

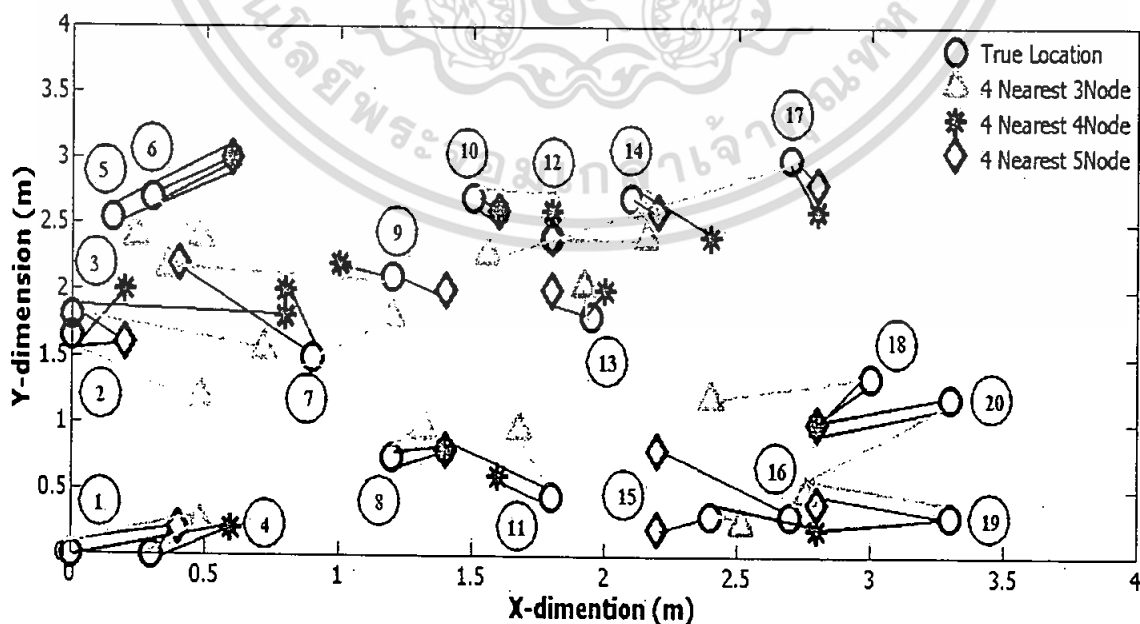
เอกสารนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่น้อยที่สุด 3 คำการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองด้วยวิธีการหาตำแหน่งด้วยวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด 3 ค่า จากตารางที่ 5.8 ได้ดำเนินการคำนวณตำแหน่งจากค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งที่กำหนดไว้และนำค่าที่คำนวณได้ในแต่ละตำแหน่งนำมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงที่กำหนดไว้ โดยตำแหน่งที่นำมาเปรียบเทียบกับนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 ซึ่งสัญลักษณ์วงกลมคือพิกัดของตำแหน่งจริง ส่วนสัญลักษณ์สามเหลี่ยมคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว สัญลักษณ์ดอกจันคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 4 ตัว และสัญลักษณ์ดอกจิกคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัว เส้นที่ลากเชื่อมต่อของสัญลักษณ์แต่ละเส้นหมายถึงผลลัพธ์ความผิดพลาดจากการทดสอบตำแหน่งในตำแหน่งเดียวกัน โดยเป็นระยะทางแสดงการเปรียบเทียบระหว่างพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากรูปที่ 5.7 สังเกตจากเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากการคำนวณโดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว ส่วนใหญ่ระยะทางจะยาวที่สุดในแต่ละตำแหน่ง และเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัว ระยะทางจะสั้นที่สุด

ตารางที่ 5.9 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด 4 ค่า โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัวตามลำดับ

ตำแหน่งจุดทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 4-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 4-Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 4-Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	(0.00, 0.00)	(0.48, 0.24)	(0.60, 0.20)	(0.40, 0.20)
ตำแหน่งที่ 2	(0.00, 1.65)	(0.48, 1.20)	(0.20, 2.00)	(0.20, 1.60)
ตำแหน่งที่ 3	(0.00, 1.80)	(0.72, 1.56)	(0.80, 1.80)	(0.20, 1.60)
ตำแหน่งที่ 4	(0.30, 0.00)	(0.48, 0.24)	(0.60, 0.20)	(0.40, 0.20)
ตำแหน่งที่ 5	(0.15, 2.55)	(0.24, 2.4)	(0.60, 3.00)	(0.60, 3.00)
ตำแหน่งที่ 6	(0.30, 2.70)	(0.48, 2.40)	(0.60, 3.00)	(0.60, 3.00)
ตำแหน่งที่ 7	(0.90, 1.50)	(1.20, 1.80)	(0.80, 2.00)	(0.40, 2.20)
ตำแหน่งที่ 8	(1.20, 0.75)	(1.32, 0.96)	(1.40, 0.80)	(1.40, 0.80)
ตำแหน่งที่ 9	(1.20, 2.10)	(0.36, 2.16)	(1.00, 2.20)	(1.40, 2.00)

ตำแหน่งสุ่มทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 4-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 4-Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 4-Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 10	(1.50, 2.70)	(1.80, 2.64)	(1.60, 2.60)	(1.60, 2.60)
ตำแหน่งที่ 11	(1.80, 0.45)	(1.68, 0.96)	(1.60, 0.60)	(1.40, 0.80)
ตำแหน่งที่ 12	(1.80, 2.40)	(2.16, 2.40)	(1.80, 2.60)	(1.80, 2.40)
ตำแหน่งที่ 13	(1.95, 1.80)	(1.92, 2.04)	(2.00, 2.00)	(1.80, 2.00)
ตำแหน่งที่ 14	(2.10, 2.70)	(2.16, 2.64)	(2.40, 2.40)	(2.20, 2.60)
ตำแหน่งที่ 15	(2.40, 0.30)	(2.52, 0.24)	(2.80, 0.20)	(2.20, 0.20)
ตำแหน่งที่ 16	(2.70, 0.30)	(2.76, 0.48)	(2.80, 0.20)	(2.20, 0.80)
ตำแหน่งที่ 17	(2.70, 3.00)	(1.56, 2.28)	(2.80, 2.60)	(2.80, 2.80)
ตำแหน่งที่ 18	(3.00, 1.35)	(2.40, 1.20)	(2.80, 1.00)	(2.80, 1.00)
ตำแหน่งที่ 19	(3.30, 0.30)	(2.76, 0.48)	(2.80, 0.20)	(2.80, 0.40)
ตำแหน่งที่ 20	(3.30, 1.20)	(2.76, 0.48)	(2.80, 1.00)	(2.80, 1.00)



รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่า

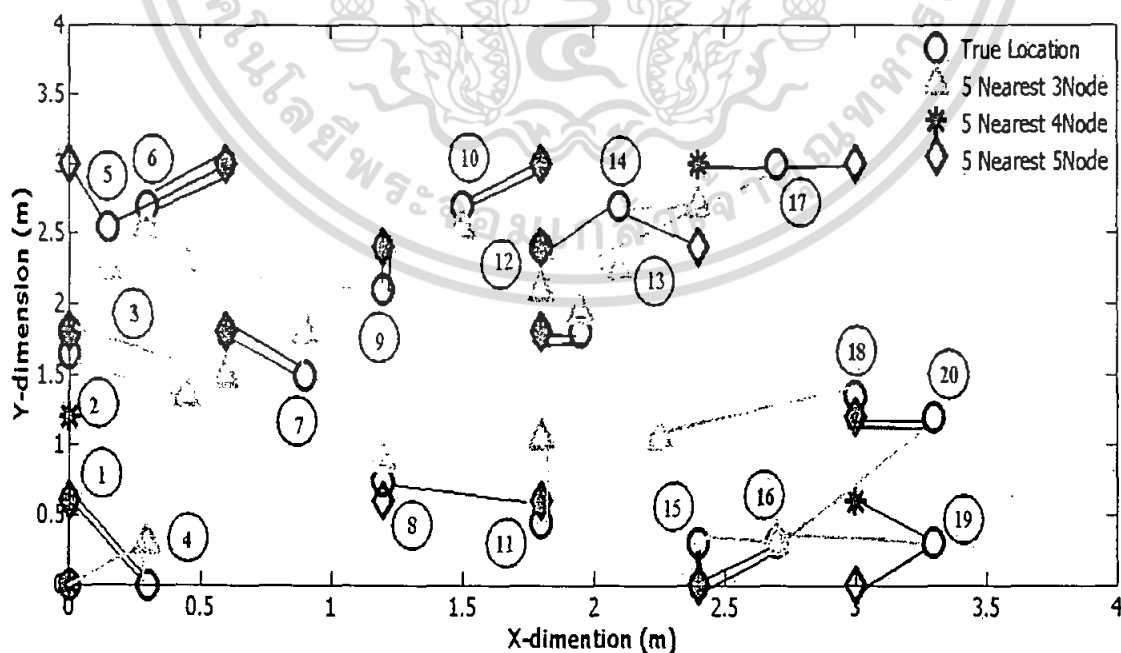
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ผลิตพลาคที่น้อยที่สุด 4 คา  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองด้วยวิธีการหาตำแหน่งด้วยวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณข้อมูล โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด 4 ค่า จากตารางที่ 5.9 ได้ดำเนินการคำนวณตำแหน่งจากค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งที่กำหนดไว้และนำค่าที่คำนวณได้ในแต่ละตำแหน่งมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงที่กำหนดไว้ โดยตำแหน่งที่นำมาเปรียบเทียบกับนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 ซึ่งสัญลักษณ์วงกลมคือพิกัดของตำแหน่งจริง ส่วนสัญลักษณ์สามเหลี่ยมคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว สัญลักษณ์ดอกจันคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 4 ตัว และสัญลักษณ์ดอกจิกคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัว เส้นที่ลากเชื่อมต่อของสัญลักษณ์แต่ละเส้นหมายถึงผลลัพธ์ความผิดพลาดจากการทดสอบตำแหน่งในตำแหน่งเดียวกันโดยเป็นเส้นแสดงการเปรียบเทียบระหว่างพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากรูปที่ 5.8 สังเกตจากเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากการคำนวณโดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว ส่วนใหญ่ระยะทางจะยาวที่สุดในแต่ละตำแหน่ง และเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัว ระยะทางจะสั้นที่สุด

ตารางที่ 5.10 พิกัดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด 5 ค่า โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัวตามลำดับ

ตำแหน่งกลุ่มทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 5-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 5-Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 5-Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	(0.00, 0.00)	(0.3.00, 0.3.00)	(0.00, 0.00)	(0.00, 0.60)
ตำแหน่งที่ 2	(0.00, 1.65)	(0.45, 1.35)	(0.00, 1.20)	(0.00, 1.80)
ตำแหน่งที่ 3	(0.00, 1.80)	(0.60, 1.50)	(0.00, 1.80)	(0.00, 1.80)
ตำแหน่งที่ 4	(0.30, 0.00)	(0.30, 0.30)	(0.00, 0.60)	(0.00, 0.60)
ตำแหน่งที่ 5	(0.15 , 2.55)	(0.15, 2.25)	(0.60, 3.00)	(0.00, 3.00)
ตำแหน่งที่ 6	(0.30, 2.70)	(0.30, 2.55)	(0.60, 3.00)	(0.60, 3.00)
ตำแหน่งที่ 7	(0.90, 1.50)	(0.90, 1.80)	(0.60, 1.80)	(0.60, 1.80)
ตำแหน่งที่ 8	(1.20, 0.75)	(1.20, 0.90)	(1.80, 0.60)	(1.20, 0.60)
ตำแหน่งที่ 9	(1.20, 2.10)	(0.45, 2.25)	(1.20, 2.40)	(1.20, 2.40)
ตำแหน่งที่ 10	(1.50, 2.70)	(1.50, 2.55)	(1.80, 3.00)	(1.80, 3.00)

ตำแหน่งส่วนทดสอบ	พิกัดจริง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 5-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 5-Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	พิกัดที่คำนวณด้วยวิธี 5-Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 11	(1.80, 0.45)	(1.80, 1.05)	(1.80, 0.60)	(1.80, 0.60)
ตำแหน่งที่ 12	(1.80, 2.40)	(2.10, 2.25)	(1.80, 2.40)	(1.80, 2.40)
ตำแหน่งที่ 13	(1.95, 1.80)	(1.95, 1.95)	(1.80, 1.80)	(1.80, 1.80)
ตำแหน่งที่ 14	(2.10, 2.70)	(2.40, 2.70)	(1.80, 2.40)	(2.40, 2.40)
ตำแหน่งที่ 15	(2.40, 0.30)	(2.70, 0.30)	(2.40, 0.00)	(2.40, 00)
ตำแหน่งที่ 16	(2.70, 0.30)	(2.70, 0.30)	(2.40, 0.00)	(3.00, 0.00)
ตำแหน่งที่ 17	(2.70, 3.00)	(1.80, 2.10)	(2.40, 3.00)	(3.00, 3.00)
ตำแหน่งที่ 18	(3.00, 1.35)	(2.25, 1.05)	(3.00, 1.20)	(3.00, 1.20)
ตำแหน่งที่ 19	(3.30, 0.30)	(2.70, 0.30)	(3.00, 0.60)	(3.00, 0.00)
ตำแหน่งที่ 20	(3.30, 1.20)	(2.70, 0.30)	(3.00, 1.20)	(3.00, 1.20)



รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่า

เอกสารนี้เป็นผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด 5 คำ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองด้วยวิธีการหาตำแหน่งด้วยวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด 5 ค่า จากตารางที่ 5.10 ได้ดำเนินการคำนวณตำแหน่งจากค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งที่กำหนดไว้และนำค่าที่คำนวณได้ในแต่ละตำแหน่งมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงที่กำหนดไว้ โดยตำแหน่งที่นำมาเปรียบเทียบกับนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 ซึ่งสัญลักษณ์วงกลมคือพิกัดของตำแหน่งจริง ส่วนสัญลักษณ์สามเหลี่ยมคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว สัญลักษณ์ดอกจันคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 4 ตัว และสัญลักษณ์ดอกจิกคือพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัว เส้นที่ลากเชื่อมต่อของสัญลักษณ์แต่ละเส้นหมายถึงผลลัพธ์ความผิดพลาดจากการทดสอบตำแหน่งในตำแหน่งเดียวกัน โดยเป็นเส้นแสดงการเปรียบเทียบระหว่างพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากรูปที่ 5.9 สังเกตจากเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้ จากการคำนวณโดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 3 ตัว ส่วนใหญ่ระยะทางจะยาวที่สุดในแต่ละตำแหน่ง และเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณออกมาได้โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงจำนวน 5 ตัว ระยะทางจะสั้นที่สุด

## 5.6 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีที่ 2: การจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล

ในการทดลองวิจัยนี้ได้นำเทคนิคของระยะห่างยูคลิดเดียวมาคำนวณหาค่าความผิดพลาด ซึ่งสมการที่ใช้หาค่าความผิดพลาดของพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณกับพิกัดตำแหน่งจริงเป็นดังสมการ (5.1) ซึ่งในการคำนวณหาตำแหน่งด้วยวิธีที่ 2 มีค่าความผิดพลาดดังตารางที่ 5.11 ตารางที่ 5.12 ตารางที่ 5.13 และตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.11 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง

ตำแหน่งจุดทดสอบ	ค่าความผิดพลาด Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	0.00	0.51	0.64
ตำแหน่งที่ 2	0.45	0.36	0.54
ตำแหน่งที่ 3	0.85	0.70	0.76
ตำแหน่งที่ 4	0.30	0.36	0.21

ตำแหน่งสู่มทดสอบ	ค่าความผิดพลาด Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 5	0.21	0.76	0.87
ตำแหน่งที่ 6	0.42	0.57	0.67
ตำแหน่งที่ 7	0.42	0.68	0.54
ตำแหน่งที่ 8	0.15	0.24	0.00
ตำแหน่งที่ 9	1.24	0.13	0.15
ตำแหน่งที่ 10	0.95	0.08	0.15
ตำแหน่งที่ 11	0.15	0.39	0.34
ตำแหน่งที่ 12	0.60	0.24	0.21
ตำแหน่งที่ 13	0.15	0.37	0.34
ตำแหน่งที่ 14	0.42	0.42	0.34
ตำแหน่งที่ 15	0.30	0.25	0.21
ตำแหน่งที่ 16	0.42	0.19	0.21
ตำแหน่งที่ 17	2.70	0.40	0.47
ตำแหน่งที่ 18	0.15	0.79	0.62
ตำแหน่งที่ 19	0.42	0.66	0.47
ตำแหน่งที่ 20	0.67	0.55	0.45

ตารางที่ 5.12 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด  
3 ค่า, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง

ตำแหน่งสู่มทดสอบ	ค่าความผิดพลาด 3-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 3-Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 3-Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	0.28	0.76	0.62
ตำแหน่งที่ 2	0.75	0.41	0.34
ตำแหน่งที่ 3	0.72	0.27	0.42
ตำแหน่งที่ 4	0.22	0.30	0.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรมการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัยหรือข้อผิดพลาด กรุณาแจ้งให้ติดต่อขอแก้ไข และต้องอ้างอิงของเอกสารทุกครั้งที่จะนำไปใช้

ตำแหน่งตู้ทดสอบ	ค่าความผิดพลาด 3-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 3-Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 3-Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 5	0.55	0.66	0.42
ตำแหน่งที่ 6	0.14	0.57	0.67
ตำแหน่งที่ 7	0.42	0.68	0.67
ตำแหน่งที่ 8	0.21	0.12	0.34
ตำแหน่งที่ 9	1.04	0.30	0.30
ตำแหน่งที่ 10	0.42	0.19	0.00
ตำแหน่งที่ 11	0.59	0.62	0.47
ตำแหน่งที่ 12	0.40	0.27	0.15
ตำแหน่งที่ 13	0.25	0.36	0.34
ตำแหน่งที่ 14	0.32	0.19	0.34
ตำแหน่งที่ 15	0.22	0.22	0.34
ตำแหน่งที่ 16	0.14	0.62	0.64
ตำแหน่งที่ 17	1.20	0.48	0.30
ตำแหน่งที่ 18	0.62	0.24	0.21
ตำแหน่งที่ 19	0.51	0.57	0.54
ตำแหน่งที่ 20	1.06	0.72	0.67

ตารางที่ 5.13 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด  
4 ค่า 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง

ตำแหน่งตู้ทดสอบ	ค่าความผิดพลาด 4-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 4-Nearest 4 เซ็นเซอร์ อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 4-Nearest 5 เซ็นเซอร์ อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	0.54	0.63	0.45
ตำแหน่งที่ 2	0.66	0.40	0.21
ตำแหน่งที่ 3	0.76	0.80	0.28
ตำแหน่งที่ 4	0.30	0.36	0.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หากมีให้คัดค้านเนื้อหา และต้องอ้างอิงชื่อของเอกสารทุกครั้งให้นำไปใช้

ตำแหน่งผู้ทดสอบ	ค่าความผิดพลาด 4-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 4-Nearest 4 เซ็นเซอร์ อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 4-Nearest 5 เซ็นเซอร์ อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 5	0.17	0.64	0.64
ตำแหน่งที่ 6	0.35	0.42	0.42
ตำแหน่งที่ 7	0.42	0.51	0.86
ตำแหน่งที่ 8	0.24	0.21	0.21
ตำแหน่งที่ 9	0.84	0.22	0.22
ตำแหน่งที่ 10	0.31	0.14	0.14
ตำแหน่งที่ 11	0.52	0.25	0.53
ตำแหน่งที่ 12	0.36	0.20	0.00
ตำแหน่งที่ 13	0.24	0.21	0.25
ตำแหน่งที่ 14	0.08	0.42	0.14
ตำแหน่งที่ 15	0.13	0.41	0.22
ตำแหน่งที่ 16	0.19	0.14	0.71
ตำแหน่งที่ 17	1.35	0.41	0.22
ตำแหน่งที่ 18	0.62	0.40	0.40
ตำแหน่งที่ 19	0.57	0.51	0.51
ตำแหน่งที่ 20	0.90	0.54	0.54

ตารางที่ 5.14 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด  
5 ค่า 3, 4, 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง

ตำแหน่งผู้ทดสอบ	ค่าความผิดพลาด 5-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 5-Nearest 4 เซ็นเซอร์ อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 5-Nearest 5 เซ็นเซอร์ อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 1	0.42	0.00	0.60
ตำแหน่งที่ 2	0.54	0.45	0.15
ตำแหน่งที่ 3	0.67	0.00	0.00
ตำแหน่งที่ 4	0.30	0.67	0.67

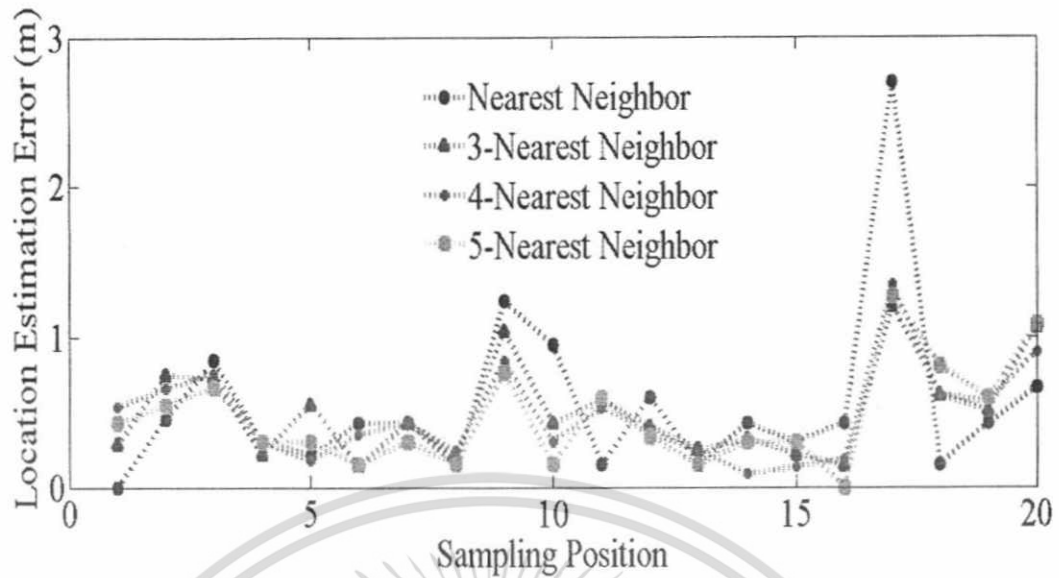
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตามหากมีให้คัดค้านหรือข้อสงสัยใดๆ กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของเอกสารทุกครั้งที่จะนำข้อมูลไปใช้

ตำแหน่งตู้มทดสอบ	ค่าความผิดพลาด 5-Nearest 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 5-Nearest 4 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)	ค่าความผิดพลาด 5-Nearest 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง (เมตร)
ตำแหน่งที่ 5	0.30	0.64	0.47
ตำแหน่งที่ 6	0.15	0.42	0.42
ตำแหน่งที่ 7	0.30	0.42	0.42
ตำแหน่งที่ 8	0.15	0.62	0.15
ตำแหน่งที่ 9	0.76	0.30	0.30
ตำแหน่งที่ 10	0.15	0.42	0.42
ตำแหน่งที่ 11	0.60	0.15	0.15
ตำแหน่งที่ 12	0.34	0.00	0.00
ตำแหน่งที่ 13	0.15	0.15	0.15
ตำแหน่งที่ 14	0.30	0.42	0.42
ตำแหน่งที่ 15	0.30	0.30	0.30
ตำแหน่งที่ 16	0.00	0.42	0.42
ตำแหน่งที่ 17	1.27	0.30	0.30
ตำแหน่งที่ 18	0.81	0.15	0.15
ตำแหน่งที่ 19	0.60	0.42	0.42
ตำแหน่งที่ 20	1.08	0.30	0.30

ตารางที่ 5.15 สรุปค่าความผิดพลาดเฉลี่ยโดยใช้การคำนวณด้วยวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานะข้อมูล

Node	Nearest Neighbor (m)	Average K-Nearest Neighbor (m)		
		K=3	K=4	K=5
3 เซ็นเซอร์อ้างอิง	0.549	0.504	0.478	0.459
4 เซ็นเซอร์อ้างอิง	0.434	0.427	0.391	0.328
5 เซ็นเซอร์อ้างอิง	0.410	0.403	0.359	0.312

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 กราฟการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดโดยใช้การคำนวณด้วยการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล

จากผลการคำนวณโดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.11 ตารางที่ 5.12 ตารางที่ 5.13 และ ตารางที่ 5.14 ซึ่งแสดงถึงค่าความผิดพลาดที่คำนวณได้จากค่าความเข้มของสัญญาณในตำแหน่งที่กำหนด 20 จุด จากนั้นดำเนินการเฉลี่ยค่าความผิดพลาดออกมาเป็นค่าเฉลี่ยทั้ง 20 จุดออกมาได้ดัง ตารางที่ 5.6 ผลการวิจัยพบว่า การจับคู่ความเข้มด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด  $K$  ค่า มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด เนื่องจากวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด  $K$  ค่า ได้ใช้การคำนวณหาค่าเฉลี่ยของจุดศูนย์กลาง (Average Centroid) ของจุดอ้างอิงโดยการใช้จุดอ้างอิงที่ใกล้ที่สุด  $K$  จุด โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบค่า ระยะห่างยูคลิเดียนระหว่างจุดอ้างอิงบริเวณต่างๆ ในบริเวณนั้น ซึ่งพบว่าเมื่อมีการกำหนดจุดวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด  $K$  ค่า เมื่อค่า  $K$  เพิ่มมากขึ้นจะช่วยให้การคำนวณตำแหน่งแม่นยำเพิ่มมากขึ้น และจากรูปที่ 5.10 แสดงถึงค่าความผิดพลาดด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดกับวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด  $K$  ค่า โดยแสดงความผิดพลาดแต่ละจุดทั้งหมด 20 จุด จากกราฟซึ่งสรุปได้ว่าการคำนวณด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด  $K$  ค่า มีความแม่นยำมากกว่าวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด ผลการทดลองในขั้นต่อมาผู้วิจัยได้เพิ่มจำนวนเซ็นเซอร์อ้างอิง ซึ่งพบว่าเซ็นเซอร์อ้างอิงที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้การคำนวณตำแหน่งมีความแม่นยำในการแสดงตำแหน่งมากขึ้นตามไปด้วย

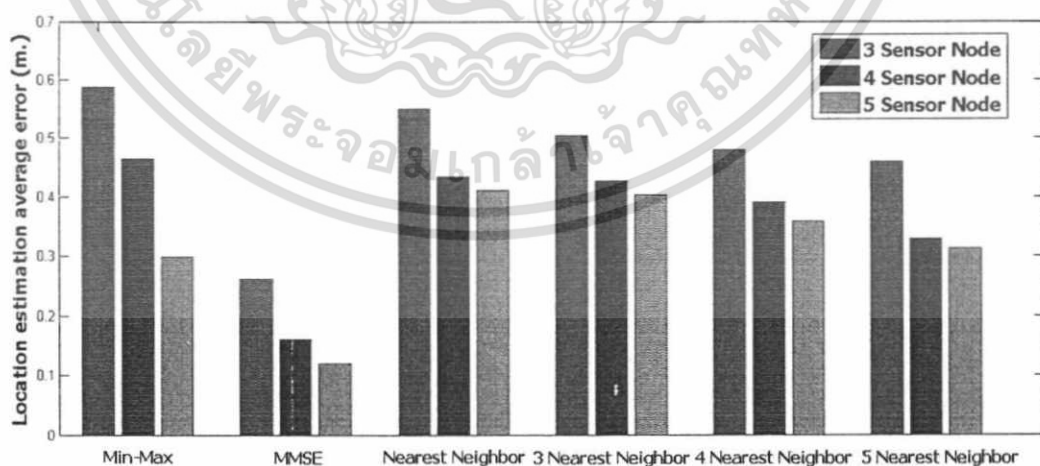
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.7 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการหาตำแหน่งระหว่างวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง กับ วิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล

จากผลการทดลองที่ได้ทำการสุ่มทั้ง 20 ตำแหน่ง แล้วนำมาคำนวณหาตำแหน่งทั้ง 2 วิธี เพื่อหาพิกัดตำแหน่งเมื่อได้พิกัดที่คำนวณออกมาได้ทำการเปรียบเทียบกับพิกัดจริงและหาค่าความผิดพลาดจากสมการที่ 5.1 จะได้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณทั้ง 2 วิธี ดังตารางที่ 5.16 และสามารถนำมาเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดแต่ละจุดแต่ละวิธีดังรูปที่ 5.11

ตารางที่ 5.16 สรุปการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยโดยใช้การคำนวณด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางกับการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล

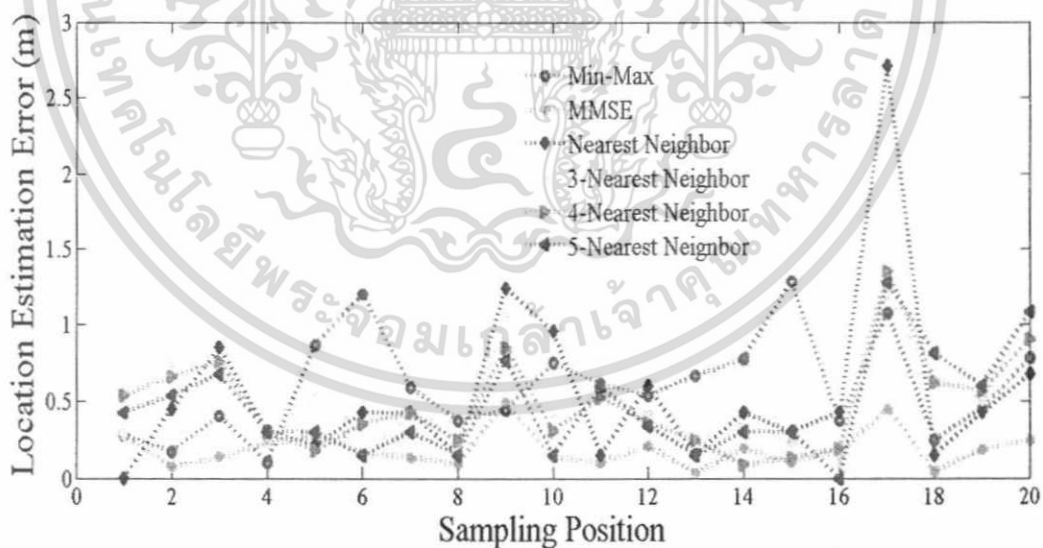
Node	ความผิดพลาดเฉลี่ย Min-Max (m)	ความผิดพลาดเฉลี่ย MMSE (m)	Nearest Neighbor (m)	Average K-Nearest Neighbor (m)		
				K=3	K=4	K=5
3 เซ็นเซอร์ อ้างอิง	0.597	0.263	0.549	0.504	0.478	0.459
4 เซ็นเซอร์ อ้างอิง	0.464	0.162	0.434	0.427	0.391	0.328
5 เซ็นเซอร์ อ้างอิง	0.298	0.12	0.41	0.403	0.359	0.312



รูปที่ 5.11 สรุปการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยโดยใช้การคำนวณด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางกับการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.16 และรูปที่ 5.11 มีการนำค่าความผิดพลาดมาเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง กับ วิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณ วิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง มีการใช้อัลกอริทึมในการคำนวณ 2 แบบ คือวิธี MMSE กับวิธี Min-Max ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าวิธี MMSE มีความแม่นยำในการคำนวณหาตำแหน่งที่ดีกว่าวิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุด จากนั้นได้ดำเนินการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 3, 4, 5 ตัวตามลำดับ จะพบว่าเมื่อเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิงจะทำให้การคำนวณตำแหน่งของเป้าหมายมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นไปด้วย ต่อมาผู้วิจัยดำเนินการด้วยวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณ ซึ่งในอัลกอริทึมในการคำนวณ 2 แบบ คือวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดกับวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า ซึ่งจากการทดลองพบว่าวิธีการคำนวณโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า มีความแม่นยำในการคำนวณ ได้ดีกว่าวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด เนื่องจากวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า ใช้การคำนวณหาค่าเฉลี่ยจุดศูนย์กลางของจุดอ้างอิงที่ใกล้ที่สุด K จุด ซึ่งพบว่าเมื่อมีการเพิ่มค่า K จะทำให้การคำนวณตำแหน่งแม่นยำมากยิ่งขึ้น และเมื่อมีการเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิงก็ทำให้การคำนวณตำแหน่งเพิ่มขึ้นอีกด้วย ขั้นตอนต่อมาจากตารางที่ 5.16 เมื่อนำวิธีการคำนวณเปรียบเทียบทั้ง 2 แบบพบว่าวิธีการคำนวณแบบวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางด้วยวิธี MMSE มีประสิทธิภาพการคำนวณจากการวัดให้ค่าแม่นยำที่สุดและให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนการสังเกตที่เท่ากัน รวมทั้งเมื่อจำนวนเซ็นเซอร์อ้างอิงมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยลงตามไปด้วย



รูปที่ 5.12 กราฟการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางกับวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.12 แสดงถึงค่าความผิดพลาดแต่ละพิกัดตำแหน่งทั้งหมด 20 จุด โดยเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความผิดพลาดที่มาจากการคำนวณด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง ซึ่งมีวิธี MMSE และวิธีการอินเตอร์เซกชันของจุดสูงสุดและต่ำสุดกับการคำนวณด้วยวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล ซึ่งมีวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดและ วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า ซึ่งส่วนใหญ่ในแต่ละพิกัดตำแหน่งการคำนวณด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง วิธี MMSE ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด แต่มีบางจุดความผิดพลาดด้วยวิธีการคำนวณดังกล่าวอาจไม่ใช่ค่าน้อยที่สุดในพิกัดตำแหน่งนั้น ซึ่งอาจเกิดจากพื้นที่วัตถุในพิกัดตำแหน่งในจุดที่เซ็นเซอร์วัดค่าความเข้มของสัญญาณมีผิดเพี้ยนไป เช่น มุมเสา หรือ กำแพง หรือ โถ้ เป็นต้น

## 5.8 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งของเป้าหมายภายในอาคาร โดยใช้เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ผลการคำนวณตำแหน่งของเป้าหมายหาได้จากอัลกอริทึมที่นำเสนอทั้งหมด 2 วิธี ซึ่งผลที่คำนวณออกมาได้ในแต่ละวิธีจะนำมาทำการเปรียบเทียบกับพิกัดตำแหน่งจริง เพื่อทำการวิเคราะห์หาความแม่นยำในแต่ละวิธี โดยทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแต่ละวิธี ซึ่งบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงในบทต่อไป

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีไร้สายได้เข้ามามีบทบาทกับชีวิตประจำวันมากยิ่งขึ้น เนื่องจากความสะดวกในการติดตั้งและการดูแลรักษาสามารถทำได้ง่าย การนำอุปกรณ์สื่อสารไร้สายมาใช้ในระบบระบุตำแหน่งนั้นสามารถทำได้ง่ายเพราะอุปกรณ์ดังกล่าวมีขนาดเล็กสามารถพกพาได้สะดวก อุปกรณ์ดังกล่าวใช้พลังงานต่ำ สามารถสร้างเครือข่ายได้ และติดตั้งสามารถทำได้ง่าย การเลือกใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมาประยุกต์เข้ากับระบบระบุตำแหน่งจึงได้ถูกนำมาพิจารณา สำหรับระบบระบุตำแหน่งในปัจจุบันที่เห็นได้ชัดคือ ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System: GPS) เทคโนโลยีนี้นำมาใช้เพื่อการค้นหาเส้นทางและนำทางไปยังสถานที่ที่ผู้ใช้ต้องการไป แต่จีพีเอสนั้นมีข้อจำกัดเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในอาคารเนื่องจากกำแพงหรือสิ่งกีดขวางภายในอาคารจะกีดขวางสัญญาณดาวเทียม ซึ่งทำให้ไม่สามารถคำนวณตำแหน่งได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ศึกษาการทำงานของระบบหาตำแหน่งภายในอาคาร โดยใช้เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยใช้ค่าความเข้มของสัญญาณ การคำนวณตำแหน่งภายในอาคาร โดยใช้ข้อมูลจากค่าความเข้มของสัญญาณนั้น เป็นวิธีที่นิยมมากสำหรับการหาตำแหน่งในงานวิจัยต่างๆ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์ในระบบ แต่ประสิทธิภาพของข้อมูลจากความเข้มของสัญญาณนั้นค่อนข้างต่ำ เพราะในบางจุดที่ทำการวัดค่านั้น ค่าความเข้มของสัญญาณจะเกิดความแปรปรวนมากทำให้การแสดงผลในบางครั้งเกิดความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากลักษณะของการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองซ้ำกันจำนวน 5 ครั้ง เพื่อเฉลี่ยค่าสำหรับนำค่าความเข้มของสัญญาณไปคำนวณและเฉลี่ยค่าความแปรปรวนของค่าความเข้มของสัญญาณลงระดับหนึ่ง

งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการคำนวณตำแหน่ง 2 วิธี คือ การคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางและการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล ซึ่งวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางนั้นใช้ค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในขณะนั้นมาคำนวณตำแหน่ง ส่วนการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูลนั้นค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับในปัจจุบันจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูลที่ทำการเก็บข้อมูลบนพื้นที่ต่างๆ ประสิทธิภาพความแม่นยำของทั้ง 2 วิธีที่ได้นำเสนอในการทดลองนั้นจะใช้

การเปรียบเทียบจากค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของทั้ง 2 วิธี โดยจะนำค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยมาวิเคราะห์ในการหาความแม่นยำของการหาตำแหน่งของเป้าหมายภายในอาคาร ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองวิจัยได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

## 6.2 บทสรุป

จากการศึกษาวิธีการที่ใช้ในระบบการหาตำแหน่งของเป้าหมายภายในอาคารบนพื้นฐานเทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง และวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณกับฐานข้อมูล ในที่นี้จะทำการหาตำแหน่งของเซ็นเซอร์วัตถุในพื้นที่พิกัดตำแหน่งต่างๆที่กำหนดไว้ โดยใช้เซ็นเซอร์อ้างอิงในการแพร่กระจายค่าความเข้มของสัญญาณ และทำการทดลองภายในอาคารบนพื้นที่ที่ใช้ในการทดลองหาตำแหน่งขนาด 3x3 เมตร ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมในการเปรียบเทียบทั้งหมด 2 วิธี 4 อัลกอริทึม โดยแต่ละอัลกอริทึมก็จะมีข้อดีข้อด้อยในการเปรียบเทียบแตกต่างกัน ซึ่งวิธีที่ 1 ใช้ค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในขณะนั้นมาคำนวณตำแหน่ง และ วิธีที่ 2 ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับในปัจจุบันจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูลที่ทำการเก็บข้อมูลบนพื้นที่ต่างๆ จาก

ผลการทดลองที่ได้ทำการทดลองวิจัยจะเห็นได้ว่าในบางตำแหน่งมุมจะมีความผิดพลาดมากกว่าตำแหน่งมุมอื่นๆ โดยเฉพาะตำแหน่งมุม 1, 4, 5, 6, 19 และ 20 ก่อนข้างมีค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งสูงกว่าตำแหน่งมุมทดสอบอื่นๆ สาเหตุก็อาจจะเป็นมาจากตำแหน่งมุมดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับประตูทางเข้าทางออกและกำแพง รวมถึงโต๊ะและเก้าอี้ที่มีอยู่ในห้องประชุมที่ดำเนินการทดลอง ผลการทดลองด้วยวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง โดยใช้วิธี MMSE จะมีความแม่นยำกว่าวิธี Min-Max ประมาณ 38.8 % สำหรับ 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง จากนั้นเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 4 และ 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง วิธี MMSE มีความแม่นยำกว่า วิธี Min-Max ประมาณ 48.2 % และ 42.5 % ตามลำดับ ต่อมาจากการทดลองโดยวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณ โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า จะมีความแม่นยำกว่าวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด โดยเมื่อใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด 3, 4, 5 ค่า จะมีความแม่นยำกว่าวิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดประมาณ 4.27 %, 0.8 %, 6.9 % ตามลำดับ สำหรับ 3 เซ็นเซอร์อ้างอิง จากนั้นเพิ่มเซ็นเซอร์อ้างอิง 4 และ 5 เซ็นเซอร์อ้างอิง วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด 3, 4, 5 ค่า มีความแม่นยำกว่า วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดประมาณ 0.813%, 5.2 %, 3.9 % และ ประมาณ 0.86 %, 6.63 %, 13.57 % ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยจุดศูนย์กลางของจุดอ้างอิงที่ใกล้ที่ K จุด ซึ่งพบว่าเมื่อมีการเพิ่มค่า K จะทำให้การคำนวณตำแหน่งแม่นยำมากยิ่งขึ้น

สรุปจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง ด้วยวิธี MMSE มีผลลัพธ์ที่ดีที่สุด วิธี Min-Max และ วิธีการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุด K ค่า ผลลัพธ์ดีตามลำดับ นอกจากนั้นค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจะต่ำกว่า 50 เซนติเมตร จากนั้นผู้วิจัยได้เพิ่มจำนวนเซ็นเซอร์อ้างอิง สำหรับวิธีเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาและวิธีการจับคู่ความเข้มของสัญญาณในฐานข้อมูล ซึ่งพบว่า เซ็นเซอร์อ้างอิงที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการแสดงตำแหน่ง เนื่องจากการเพิ่มรูปแบบ ความเข้มของสัญญาณในรูปแบบทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลได้ดีขึ้น

ในการทดลองวิจัยครั้งนี้มุ่งหวังว่าน่าจะมีประโยชน์ในการนำเทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย มาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งของเป้าหมายภายในอาคาร อาทิเช่น การระบุตำแหน่งผู้ป่วยที่ต้องดูแลเป็นพิเศษในโรงพยาบาล ทำให้แพทย์พยาบาลและญาติของผู้ป่วยไม่เสียเวลาในการเข้าเยี่ยมผู้ป่วย การระบุตำแหน่งสินค้าที่มีราคาสูงในโรงงาน สินค้าที่มีราคาสูงเมื่อทำการขนย้ายไปผิดที่จะทำให้เสียเวลาในการค้นหา ซึ่งทางผู้วิจัยหวังว่าผลงานวิจัยที่ได้จัดทำขึ้นน่าจะมีประโยชน์สามารถจะนำมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งภายในอาคาร ได้ต่อไปในภายภาคหน้า

## 6.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

### 6.3.1 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

ปัญหาที่พบในงานวิจัยนี้ในส่วนแรกคือการออกแบบเซ็นเซอร์อ้างอิง เนื่องจากเซ็นเซอร์อ้างอิงเป็นชุดอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้อย่างสะดวกและการคำนึงของการแพร่กระจายความเข้มของสัญญาณ พร้อมทั้งอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานควรเป็นอุปกรณ์ที่ประหยัดพลังงาน เพื่อสามารถใช้งานได้ทั้งถ่านไฟฉายขนาด AA ได้ ในการออกแบบจึงจำเป็นต้องออกแบบโดยคำนึงปัญหาดังกล่าว ปัญหาต่อมาในการติดตั้งเซ็นเซอร์อ้างอิงในตำแหน่งต่างๆที่กำหนดไว้ควรติดตั้งไว้ในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางของสัญญาณเพราะจะทำให้การวัดค่าสัญญาณในการวัดแต่ละครั้งมีความผิดพลาดสูง ซึ่งในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการวางเซ็นเซอร์วัดลู่ไว้กับพื้นที่ทั้งหมด แต่เนื่องจากพื้นที่ที่ติดตั้งมีความแตกต่างของสิ่งกีดขวางไม่เหมือนกัน การวางเซ็นเซอร์อ้างอิงไว้กับพื้นที่ทั้งหมดทำให้ค่าเซ็นเซอร์อ้างอิงแต่ละตัวได้รับค่าความเข้มของสัญญาณไม่เต็มประสิทธิภาพ ปัญหาสุดท้ายเนื่องจากความเข้มของค่าสัญญาณมีความแปรปรวนมากทำให้ยากต่อการวิเคราะห์และคำนวณ

### 6.3.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบเซ็นเซอร์อ้างอิงให้สามารถเคลื่อนย้ายไปยังตำแหน่งอื่นๆได้อย่างสะดวก โดยใช้ Microcontroller ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดจึงทำให้ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กและเคลื่อนย้ายได้ง่าย ต่อมาในการวัดแต่ละจุดนั้นถ้าพื้นที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เสียเวลาในเก็บค่าความเข้มของสัญญาณค่อนข้างมาก จึงอาศัยการกำหนดระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการวัดเป็นระยะ

เท่าๆกัน เพื่อครอบคลุมพื้นที่ในการวัดได้ดียิ่งขึ้น และทำการเก็บค่าอ้างอิงในบางจุดเท่านั้น ต่อมาในการลดค่าความแปรปรวนของค่าความเข้มของสัญญาณทางผู้วิจัยจึงดำเนินการทดลองซ้ำ 5 ครั้งและนำค่าเฉลี่ยทั้ง 5 ครั้ง มาใช้ในการคำนวณ รวมทั้งมีการเพิ่มขึ้นเซอร์อ้างอิงเพื่อให้การวิเคราะห์ความเข้มดียิ่งขึ้น แต่เมื่อจำนวนเซ็นเซอร์อ้างอิงเพิ่มขึ้นค่าใช้จ่ายในการทำระบบเพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย ในการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุ โดยใช้ค่าความเข้มของสัญญาณเป็นข้อมูลในการคำนวณตำแหน่งนั้น การแสดงผลที่เหมาะสมที่สุดควรแสดงเป็นพื้นที่ที่วัตถุตั้งอยู่ เนื่องจากความน่าเชื่อถือของค่าความเข้มของสัญญาณยังมีความน่าเชื่อถือน้อย และยังมีผลผิดพลาดในการแสดงตำแหน่งค่อนข้างสูง สุดท้ายนี้ทางผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์และสามารถที่จะนำเทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย มาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งของเป้าหมายภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไปในภายภาคหน้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Soonjun, S. Promwong and P. Chermtanomwong, "Improvement of RFID based Location Fingerprint Technique for Indoor Environment," The 9<sup>th</sup> International Symposium on Communication and Information Technology 2009 (ISCIT2009), pp.916-921, Incheon, Korea., 28-30 September 2009.
- [2] Balh, P. and V. N. Padmanabhan, "Radar: An in-building RF-based user location and tracking system," Proc. of IEEE INFOCOM, 775-784, 2000.
- [3] R. Zhou. "Wireless Indoor Tracking System (WITS)", Aktuelle Trends in der Softwareforschung, Tagungsband zum doIT Software-Forschungstag. dpunkt.verlag Heidelberg, Germany. To appear. (2006).
- [4] Wenping Chen and Xiaofeng Meng, "A cooperative localization scheme for zigbee-based wireless sensor networks," ICON '06. 14th IEEE International Conference, vol. 2, Sept. 2006, pp. 1-5.
- [5] **Global Positioning System.** [online] 2007 [cited 2007 Sep 2]. Available from: <http://www.gps.gov/systems/gps/index.html>
- [6] Intel Reserch, **Instrument the world.** [online] 2004 [cited 2007 Aug 19]. Available from: <http://www.intel.com/reserch/index.html>
- [7] **IEEE 802.15. Personal Area Network.** [online] 2007 [cited 2007 Sep 10]. Available from: <http://www.cs.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/wpans/index.html>
- [8] **Zigbee Alliance.** [online] 2007 [cited 2007 Aug 10]. Available from: <http://www.zigbee.org/en/index.asp>
- [9] ผศ.ดร. สุภชัย วงพจน์พิศุทธิ์. **Zigbee Interference Experiment .** [online] 2007 [cited 2007 Sep 26]. Available from: <http://zigbee-interference.blogspot.com/2007/08/zigbee.html>
- [10] **Distributed Security Scheme for Ad Hoc Networks.** [online] 2007 [cited 2007 Sep 30]. Available from: <http://www.acm.org/crossroads/xrds11-1/adhoc.html>
- [11] **Innovative Eperiment.** [online] 2007 [cited 2008 April 20]. Available from: <http://www.index.co.th>
- [12] MaxStream, Inc. **2.4 GHz and 900 MHz RF Product Overview.** [online] 2007 [cited 2007 Aug 14]. Available from: <http://www.digi.com/technology/wireless/products.jsp>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] David Tse, Pramod Viswanath. **Fundamentals of Wireless Communication**. New York: Cambridge University Press 2005.
- [14] **Wireless Internetworking**. [online] 2003 [cited 2008 Dec 23]. Available from: <http://www.cisco.com/en/US/docs/internetworking/technology/handbook/wireless.html>
- [15] Lawrence Harte, Richard Levine, Roman kiksa. **3G Wireless Demystified**. New York: Mcgraw-Hill Professional; 2002.
- [16] Robert Morrow. **Wireless Network Coexistence**. New York: McGraw-Hill Professional; 2004
- [17] Krzysztof W.Kolodziej, Johan Hjelm. **“Local Positioning Systems”**, Florida: CRC Press; 2006
- [18] K. Langendoen and N. Reijers, **“Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison”**, Computer Network 43, pp. 499-518, 2003
- [19] W. Murphy and W. Hereman, **“Determination of a Position in Three Dimensions Using Trilateration and Approximate Distances”**, 1995,tech. report MCS-95-07, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- [20] R. Priugharm, K. Srivilas and P. Chermtanomwong, **“A Comparative Study on Indoor Localization based on RSSI Measurement in Wireless Sensor Network”** The 8<sup>th</sup> International Joint Conference on Computer Science and Software Engineer , pp. 1 - 6, Nakhon Pathom, Thailand, 11-13 May 2011.
- [21] R. Priugharm, K. Srivilas and P. Chermtanomwong, **“Indoor Localization System using RSSI Measurement in Wireless Sensor Network Base On Zigbee Standard,”** The 3<sup>rd</sup> National Conference on Information Technology (NCIT 2010), pp. 225-228, October 2010



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

งานประชุมในระดับนานาชาติ


- [1] **R. Priwgharm**, K. Srivilas and P. Chermtanomwong, “Indoor Localization System using RSSI Measurement in Wireless Sensor Network Base On Zigbee Standard,” The 3<sup>rd</sup> National Conference on Information Technology (NCIT 2010), pp. 225-228, October 2010.

งานประชุมในระดับนานาชาติ

- [2] **R. Priwgharm** and P. Chermtanomwong, “A Comparative Study on Indoor Localization based on RSSI Measurement in Wireless Sensor Network” The 8<sup>th</sup> International Joint Conference on Computer Science and Software Engineer, pp. 1-6 , Nakhon Pathom, Thailand, 11-13 May 2011.

# NCIT

The 3<sup>rd</sup> National Conference  
on Information Technology: NCIT 2010  
"IT Innovation for Global Awareness"  
28-29 October 2010, Bangkok, Thailand



ISBN 978-616-7367-21-7 <http://www.ncit.in.th>

Sponsored by



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Indoor Localization System using RSSI Measurement in Wireless Sensor Network Based on ZigBee Standard

Ratana Priwgharm . Krit Srivilas and Panarat Chermtanomwong

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Email: s1061023@kmitl.ac.th. krpanara@kmitl.ac.th

### ABSTRACT

This paper presents the studies and experiments of indoor object localization system using wireless sensor network (IEEE 802.15.4). The system is defined upon the analysis of the models of maximum likelihood estimation and received-signal-strength indicator (RSSI) by a novel method for localizing a stationary object in an indoor office environment. The proposed method utilizes the RSSI of radio signals radiating from fixed reference sensors and move target sensor placed at known positions to generate a precise signal propagation model. The performance of the system is evaluated using the experimental data. The experiments were done by increasing the number of reference sensors in the system. Results show that the increasing number of reference sensors can reduce the object location error as expected.

*Index Terms-- Wireless Sensor Network; Localization; RSSI; Maximum Likelihood Estimation*

### 1. INTRODUCTION

Radio localization has been extensively researched because of its importance to many wireless applications. The accuracy of the location estimation and the reliable localization system are the main factors required. Nevertheless, the relatively simple and low cost system is also preferable. To deal with these requirements, many localization techniques related with the recent technologies have been proposed in the literature. The localization techniques can be mainly categorized as range-based and proximity-based [1]. The former is defined by algorithms that use absolute point-to-point estimated distance (range) or estimated angle for calculating the target location. The latter makes no assumption about the availability or validity of such information. Instead, the unknown location of the target is inferred from the references with known locations. The range-based technique can be generally divided into: (i) time based, e.g., time of arrival (TOA), time difference of arrival (TDOA), (ii) angle based, i.e., angle of arrival (AOA), and (iii) received signal strength indicator (RSSI). Among these techniques, RSSI-based approaches are widely applied due to its well tradeoff between hardware cost and localization accuracy.

Wireless sensor networks (WSNs) are networks composed of numerous small, independent, self-contained, often battery-powered nodes including a wireless transceiver, sensors, and micro-controller which are capable to self-organize in a communication network. The most common modern WSN applications are the area of surveillance and monitoring, home control, logistics, as well as office and industrial automation. Localization in WSN often uses the RSSI-based localization system. Some nodes are placed at known locations and referred to as beacon nodes (sometimes called anchor nodes). By measuring the signal strength between beacon nodes and other non-beacon nodes (called unknown nodes), the system can then calculate the locations of unknown nodes based on radio signal propagation models.

ZigBee [2], [3] is the standard which follows the rules of IEEE 802.15.4. Moreover, for ZigBee, the distance between nodes can be calculated from RSSI. It is a challenge to propose a new localization algorithm based on the RSSI parameter. Furthermore, ZigBee technology has a good number of advantages such as originally lower cost than other wireless technologies, low data transfer, easily covers wide range and able to be any network topology e.g. star, mesh, ad-hoc, and hybrid forms. Comparing to other wireless technologies such as Bluetooth, Zigbee has not only a low-power output but also a short latency time. Therefore, we would like to propose a relatively simple method for the localization system using ZigBee-based WSNs. The maximum likelihood estimation is utilized to support estimating the location of the object. To evaluate the performance of the proposed method, the experiments are conducted and used for location estimation.

### 2. DESCRIPTION OF ALGORITHMS MODEL

#### 2.1. RSSI and distance

The relationship between distance and RSSI can be determined according to the following formula based on Friis transmission equation

$$RSSI[dBm] = -[10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) + A] \quad (1)$$

where  $n$  is the path loss exponent.

$d$  is the Distance from sender and

$A$  is the Received signal at 1 meter distance.

**2.2. Maximum likelihood estimation localization algorithm**

In this section, we show the localization algorithm using the maximum likelihood estimation, which is based on transmitter-receiver RSSI measurement. Node distance related information is obtained through measurement of the RSSI under the circumstance without additional node hardware design. Figure 1 illustrates the flow diagram of the classical location estimation algorithm using the Zigbee system, while figure 2 illustrates the flow diagram of the location estimation algorithm applied by the maximum likelihood algorithm and using the Zigbee system.

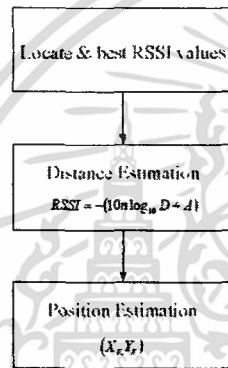


Figure 1. Classical Location Estimation Algorithm

Suppose coordinates of beacon nodes  $B1(x_1, y_1), B2(x_2, y_2), \dots, Bn(x_n, y_n)$ , and coordinate of unknown node with position to be determined  $O(x, y)$ , distance between unknown node and the beacon nodes are  $d_1, \dots, d_n$ , respectively. A group of non-linear equation [4]-[5] can be obtained according to the calculation formula for distance in a two-dimensional space, as shown by Eq. (2)

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = d_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = d_2^2 \\ \vdots \\ (x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (2)$$

When the last equation was subtracted from the other equations in turn beginning from the first equation, equation (2) becomes

$$\begin{cases} x^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x + y_1^2 \\ - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y = d_1^2 - d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 - 2(x_{n-1} - x_n)x + y_{n-1}^2 \\ - y_n^2 - 2(y_{n-1} - y_n)y = d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{cases} \quad (3)$$

Linear equation in equation (3) can be shown as  $AX = b$  where

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 - d_1^2 + d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 - d_{n-1}^2 + d_n^2 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

The error of the node estimated location can be obtained by applying standard minimum mean square error as shown by equation (4) as

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4)$$

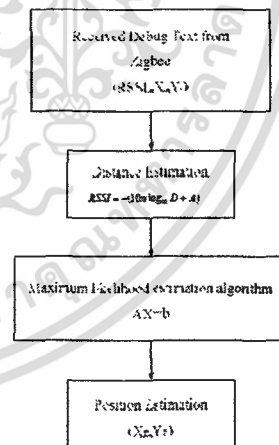


Figure 2 Location Maximum likelihood Estimation Algorithm

**3. RESULT AND DISCUSSION**

**3.1. Experiment Setup**

For the experiment, the ZigBee modules used are the XBee and XBee-PRO OEM RF Modules with frequency of 2.4 GHz. Localization systems of this paper were designed to estimate the location of target where

reference sensors are installed in different areas. The reference sensor receiving the request message will send value of the intensity of the signal to the target sensor. The target sensor will then collect all data (RSSI) from reference sensors and forward data to the computer for estimating the target sensor location. Equipment for localization system is shown in figure 3.

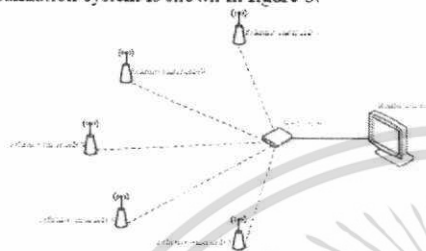


Figure 3 Equipment setup for localization system

Experiments were conducted on the sample locations by moving the target sensor and then displaying results from the developed location estimation algorithm. Three conditions of experiments were considered. Each condition is different from one another by a number of reference nodes that are 3,4 and 5 reference nodes for each condition. The sample observed locations are 30 locations by moving the unknown node to each observed location for each measurement. The signal intensity received from each reference node will be recorded and then used to calculate the location of target node. Then, the location estimation errors at each observed location are calculated.

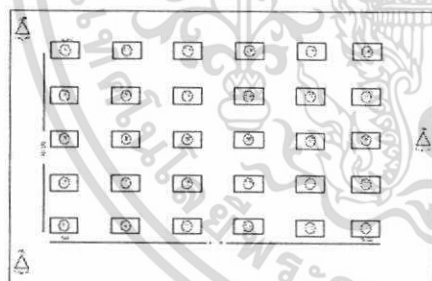


Figure 4 The layout of the experiment setup of 3 reference sensor nodes

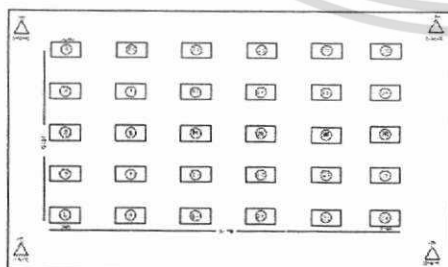


Figure 5 The layout of the experiment setup of 4 reference sensor nodes

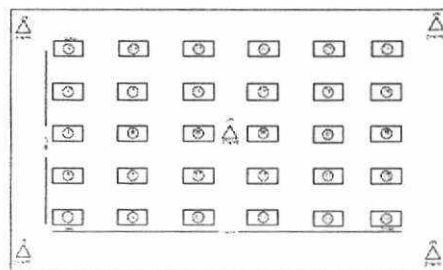


Figure 6 The layout of the experiment setup of 5 reference sensor nodes

The layouts of experiment setup of 3,4 and 5 nodes are shown in Figure 4,5 and 6, respectively. These reference nodes thus form a rectangular test area with physical dimension of 4.8m x 3m. During the experiment, we carry the target node and walk from an indoor starting point with coordinate (0,0) to an ending point with coordinate (300,480). The experiment was conducted at a time when the interference from human activities was minimal. Before the experiment was carried out, the available radio frequency channels were scanned to avoid interference from wireless LAN at the area.

The accuracy of the propose system with refining algorithm was found by comparing the position estimated by this system with the predicted position calculated mathematically.

The experiments were conducted in the seminar room with relatively not many obstracles. Figure 7 demonstrates the Zigbee node which can be used as reference sensors and target sensor. Figure 8 also demonstrates the Zigbee node and shows the layout of the observed locations, marked on the floor.

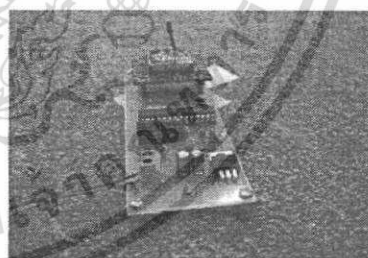


Figure 7 Zigbee Reference Sensor & Target sensor.

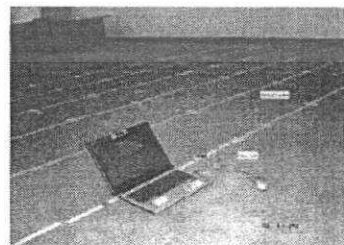


Figure 8. The marks of observed locations on the floor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2. Experiment Result

The objective of this work is to estimate the location of the target node in the indoor environment using the proposed method. The intensity of the signal from each reference sensor is measured and used to estimate the target location. It is well known that in indoor environment; it is difficult to analyze the signal intensity because it is much fluctuated. To help improving this, a number of reference nodes may be used as the space diversity. It can be found from the results that the more number of reference nodes, the better location estimation accuracy.

Figure 9 demonstrates the relationship between the measured RSSI and the distance for the condition of three reference nodes. It follows the theory that when the node is far, the RSSI value is small. Figure 10 compares the location estimation error between conditions of 3, 4, 5 reference node. It is found for the most observed location that when the number of reference nodes increase, the location estimation errors decrease.

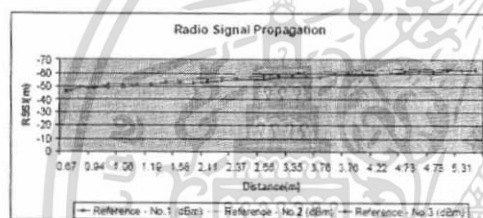


Figure 9 Relationship between communication distance and RSSI value for the 3 reference node condition.

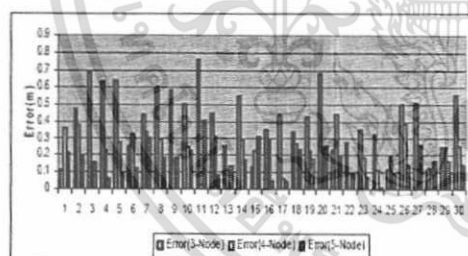


Figure 10 Location estimation Error for the conditions of 3, 4, 5 reference sensors involved in localization.

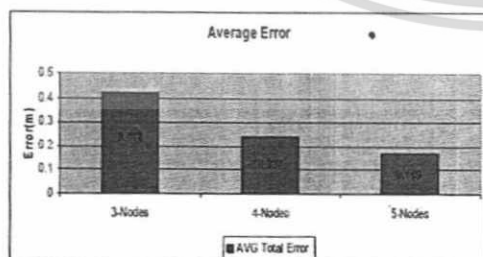


Figure 11. Average estimation error compared to 3,4,5 reference sensor

Table 1. Localization error statistics table

Number of Sensor	Min Error (m)	Max Error (m)	AVG Error (m)
3 Node	0.115	0.763	0.418
4 Node	0.031	0.445	0.237
5 Node	0.0134	0.404	0.169

Figure 11 shows the results of the average location estimation error calculated from all observed location. It is also found that when the number of reference nodes increase, the average location estimation errors decrease. Table 1 summarizes the minimum, maximum and average location estimation errors for three conditions of 3, 4, 5 reference nodes, respectively. It is also observed from figure 11 and Table 1 that the average location estimation error is less than 50 cm which is an applicable range in practice.

### 4. CONCLUSIONS

This paper presents a method of calculating the location of the target sensor using the maximum likelihood algorithm. The proposed method is evaluate using the experimental data. The results show that the more number of the reference nodes, the better accuracy of the location estimation. Moreover, it is observed that the average location estimation error is less than 50 cm which is an applicable range in practice. Therefore, the proposed method using in the indoor environment can be practical used in the real location estimation system.

### REFERENCES

- [1] H. Liu, H. Darabi, P. Ganesjee, and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, pp. 1067-1080, Vol. 37, No. 6, November 2007.
- [2] F. Sottile, R. Giannantonio, M. A. Spirito, and F. L. Bellitamine, "Design, Deployment and Performance of a Complete Real-time ZigBee Localization System," *Wireless Days, 2008. WD '08. 1st IFIP*, pp. 1-5, November 2008.
- [3] A. Noh, W. Lee and J. Ye, "Comparison of the mechanisms of the Zigbee's indoor Localization algorithm," *Ninth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing*, pp.13-18, August 2008.
- [4] XUE Feng, LIU Zhong, QU Yi, *Decentralized Algorithm for Target Passive Tracking in Wireless Sensor Networks*, Beijing, China: *Journal of System Simulation*, 2007.8, 19 (15), 3499-3503.
- [5] Sun Li-min, Li Jian-zhong, Chen Yu, et al. *Wireless sensor networks*. Beijing: Tsinghua university press, 2005, 138-14 5035 Authorized licensed

# 2011 Eighth International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)

May 11-13, 2011

Faculty of ICT, Mahidol University  
Nakhon Pathom, THAILAND

Editors :  
Jarernsri L. Mitranont  
Sudsanguan Ngamsuriyaroj

National Sessions



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## A Comparative Study on Indoor Localization based on RSSI Measurement in Wireless Sensor Network

Ratana Priwgharm

Department of Computer Engineering,  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
1 Soi Chalongkrung 1, Ladkrabang Bangkok 10520,  
Thailand, Tel. 0-2329-8329.  
Email: sl061023@kmitl.ac.th

Panarat Cherntanomwong

Department of Computer Engineering,  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
1 Soi Chalongkrung 1, Ladkrabang Bangkok 10520,  
Thailand, Tel. 0-2329-8329,  
Email: krpanara@kmitl.ac.th

**Abstract**— This paper studies on the localization techniques using in wireless sensor network (WSN) for an indoor environment. We compare two main categories of localization techniques: range-based and fingerprinting-based techniques on a single experimental environment. The received signal strength indicator (RSSI) received at sensor nodes are used for all localization techniques. For the range-based techniques, the location estimation approach based on the iteration estimation and the min-max approach are employed. For the fingerprinting based techniques, two pattern matching approaches are used: one is the simple nearest neighbor algorithm and another one is the k-nearest-nearest neighbor algorithm. The experiments are conducted in a meeting room where is a small number of obstacles inside to evaluate the performance of each technique. The results demonstrate that the location estimation algorithm using iteration estimation gives the best accuracy and also less computational time compared to other techniques.

**Keywords**—component; Localization, Wireless Sensor Network, RSSI Introduction

### I. INTRODUCTION

Radio localization has been extensively researched because of its importance to many wireless applications. The accuracy of the location estimation and the reliable localization system are the main factors required. Nevertheless, the relatively simple and low cost system is also preferable. To deal with these requirements, many localization techniques related with the recent technologies have been proposed in the literature. The localization techniques can be mainly categorized as range-based and proximity-based [1]. The former is defined by algorithms that use absolute point-to-point estimated distance (range) or estimated angle for calculating the target location. The latter makes no assumption about the availability or validity of such information. Instead, the unknown location of the target is inferred from the references with known locations. The range-based technique can be generally divided into: (i) time based, e.g., time of arrival (TOA), time difference of arrival (TDOA), (ii) angle based, i.e., angle of arrival (AOA), and (iii) received signal strength indicator (RSSI). Among these techniques, RSSI-based approaches are widely applied due to its well tradeoff between hardware cost and localization accuracy.

Wireless sensor networks (WSNs) are networks composed of numerous small, independent, self-contained, often battery-powered nodes including a wireless transceiver, sensors, and micro-controller which are capable to self-organize in a communication network. The most common modern WSN applications are the area of surveillance and monitoring, home control, logistics, as well as office and industrial automation. Localization in WSN often uses the RSSI-based localization system. Some nodes are placed at known locations and referred to as beacon nodes (sometime called anchor nodes). By measuring the signal strength between beacon nodes and other non-beacon nodes (called unknown nodes), the system can then calculate the locations of unknown nodes based on radio signal propagation models.

ZigBee [2], [3] is the standard which follows the rules of IEEE 802.15.4. Moreover, for ZigBee, the distance between nodes can be calculated from RSSI. The main contribution of our work in this paper is to compare the performance of localization techniques which are mainly categorizes into range-based and fingerprinting-based techniques. The rest of the paper is organized as follows. In section II, location estimation techniques are briefly explained. Section III describes measurement system and setup. Section IV gives the results and discussion. Finally, the conclusion is given in Section V.

### II. LOCATION ESTIMATION TECHNIQUES

There are a number of methods to calculate the location of the target. It depends on how the system is designed and what the available data used for localization is. In this paper, the localization system deploys the wireless sensor node based on ZigBee standard. ZigBee provides useful parameters for location estimation, i.e. received signal strength indicator (RSSI) and link quality indicator (LQI). In this paper, RSSI is used for location estimation.

The relationship between distance and RSSI can be determined according to the following formula based on Friis transmission equation

$$RSSI[dBm] = -10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) + A, \quad (1)$$

where  $n$  is the path loss exponent.

$d$  is the distance from sender (m) and

$A$  is the received signal at 1-m distance.

The RSSI between sensor nodes can be automatically measured as shown in figure 1.

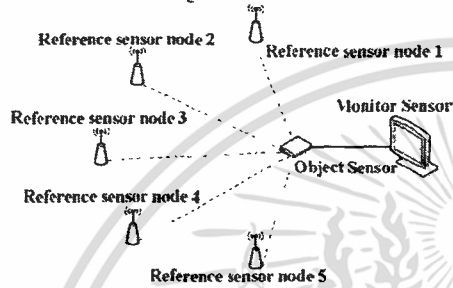


Figure 1. The target sensor can measure RSSIs from all reference nodes

Both range-based and fingerprint-based localization methods are used and the accuracy of location estimation based on these techniques is compared. There are many approaches for each type of localization methods which are briefly explained in the following subsections.

#### A. Range-Based Localization Techniques

##### 1) Trilateration

Suppose coordinates of reference (beacon) nodes  $B_i(x_i, y_i)$ , and coordinate of target (unknown) node with position to be determined  $O(x, y)$ , distance between target node and reference nodes are  $d_i$ . A group of non-linear equation [4]-[5] can be obtained according to the calculation formula for distance in a two-dimensional space, shown as

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = d_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = d_2^2 \\ \vdots \\ (x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (2)$$

When the last equation was subtracted from the other equations in turn beginning from the first equation, equation (2) becomes

$$\begin{cases} x^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x + y_1^2 - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y = d_1^2 - d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 - 2(x_{n-1} - x_n)x + y_{n-1}^2 - y_n^2 - 2(y_{n-1} - y_n)y = d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{cases} \quad (3)$$

Linear equation in equation (3) can be shown as

$$\mathbf{X}\mathbf{b} = \mathbf{a}$$

where

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 - d_1^2 + d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 - d_{n-1}^2 + d_n^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

The error of the node estimated location can be obtained by applying standard minimum mean square error as

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{a} \quad (4)$$

##### 2) Min-Max

The concept is to construct the bounding box of each reference node using its coordinate and the distance between target node and itself, then determine the intersection of these bounding boxes using the concept of selecting the min-max coordinates [4]. Figure 2 and figure 3 demonstrate the Min-max method by using three reference nodes. The bounding boxes of all reference nodes are shown in Figure 1. Each bounding box is created by adding and subtracting the distance  $d_i$  from the reference node coordinate  $(x_i, y_i)$ , i.e.

$$(x_i - d_i, y_i - d_i) \text{ and } (x_i + d_i, y_i + d_i).$$

Then, the intersection of the bounding boxes is obtained by taking the maximum of all coordinate minimums for  $x$  axis and  $y$  axis and the minimum of all coordinate maximums for  $x$  axis and  $y$  axis. Therefore, according to figure 1, the coordinates of the intersected box are

$$(x_2 - d_2, y_1 - d_1) \text{ and } (x_3 + d_3, y_3 + d_3)$$

as shown in figure 2. The location of the target node is calculated from the central of gravity of the intersected box.

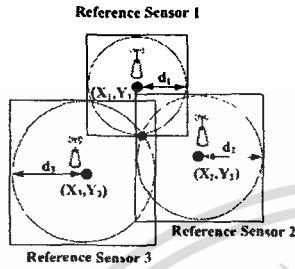


Figure 2. Determine position using Min-Max

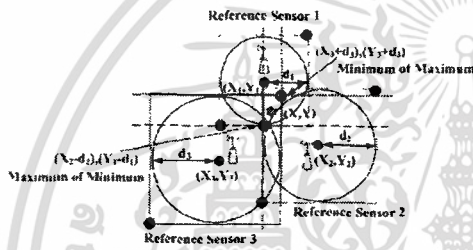


Figure 3. Determine position using Min-Max

**B. Fingerprint**

By using the fingerprint localization, the location of the target can be estimated by comparing its information with a previously recorded database of known information-location data through pattern matching algorithms as shown in figure.

**Fingerprint Database**

Known Location	Fingerprint Information
Location 1	Information 1
Location 2	Information 2
Location <i>l</i> - 1	Information <i>l</i> - 1
Location <i>L</i>	Information <i>L</i>



Figure 4. Fingerprint localization

**Construction of Fingerprint Database**

As shown in figure 2, the RSSI between sensor nodes can be automatically measured. For simplicity, the fingerprint can be defined as a set of measured RSSIs from all reference sensor nodes. Let number of reference nodes placed at fixed locations

be  $N$ , number of fingerprint locations be  $M$  and  $D_i$  be fingerprints at positions  $D_i (i = 1, \dots, M)$ . Therefore, the fingerprint database can be illustrated as Table 1.

TABLE 1. FINGERPRINT DATABASE

Fingerprint Location	Fingerprint
$F_1(x_1, y_1)$	$D_1 = \{rssi_{1,r_1}, rssi_{2,r_1}, \dots, rssi_{N,r_1}\}$
$F_2(x_2, y_2)$	$D_2 = \{rssi_{1,r_2}, rssi_{2,r_2}, \dots, rssi_{N,r_2}\}$
$\vdots$	$\vdots$
$F_M(x_M, y_M)$	$D_M = \{rssi_{1,r_M}, rssi_{2,r_M}, \dots, rssi_{N,r_M}\}$

There are many pattern matching algorithms. In this paper, two simple algorithms are employed and is briefly explained as follow

**1) Nearest Neighbor Algorithm**

When the target node is in the fingerprint area, it collects the RSSIs from all reference nodes which can be expressed as

$$T = \{rssi_{1,T}, rssi_{2,T}, \dots, rssi_{N,T}\} \quad (5)$$

The location of the target node is then calculated based on the Euclidean distance estimation.  $D_i$  and  $T$  are two points in Euclidean  $N$ -space, then the distance from  $T$  to  $D_i$  is given by

$$dist_i(x, y) = \sqrt{\sum_{n=1}^N (rssi_{n,F_i} - rssi_{n,T})^2} \quad (6)$$

By using the nearest neighbor algorithm, the fingerprint location in which its fingerprint provides the smallest  $dist_i$  is returned as the location of the target node.

**2) k-Nearest Neighbor Algorithm**

In the similar way of the nearest neighbor algorithm, the location of the target node can be estimated based on the average of  $k$  nearest points in the fingerprint database.

**III. MEASUREMENT SYSTEM AND SETUP**

For the experiment, the ZigBee modules used are the XBee and XBee-PRO OEM RF Modules with frequency of 2.4 GHz. Figure 5 demonstrates the Zigbee node which can be used as reference sensors and target sensor. Localization systems of this paper were designed to estimate the location of the target node using the range-based and fingerprinting-based techniques. The experiments were conducted in the typically

blank room (not many obstacles). The effective area is 3 m × 3 m. The experiment environment can be shown in figure 6.

For the fingerprinting-based technique, the effective area is divided into 36 grids of fingerprint locations which inter-grid spacing is 60 cm as shown in Figure 7. The 36 fingerprint locations are represented by  $F_1, F_2, \dots, F_{36}$ , respectively. The experiments were conducted for 3 cases of different number of reference nodes: cases of 3, 4 and 5 reference nodes. The experiment environment can be shown in figure 6 and setup for cases of 3, 4 and 5 reference nodes can be shown in figure 8-10, respectively. To construct the fingerprint database, the test node is used to measure RSSI values from all reference nodes at each fingerprint location. From each node, 100 RSSI values are collected, then further averaged, and stored as a fingerprint. The observed locations is sampled into 20 locations and represented by the circle with the number in it in figure 8-10. During the experiment, the target node was carried and moved from the starting point with coordinate (0, 0) to an ending point with coordinate (300,300). The experiment was conducted at a time when the interference from human activities was minimal. Before conducting the experiment, the available radio frequency channels were scanned to avoid interference from wireless LAN at the area. For each observed location, 100 RSSI values received by the target are collected from each reference node. For each reference node, measured RSSI values are averaged to be used to find the location of the target node.

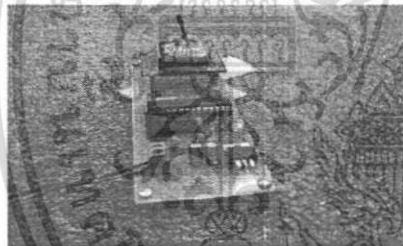


Figure 5. ZigBee module used as reference and target nodes.

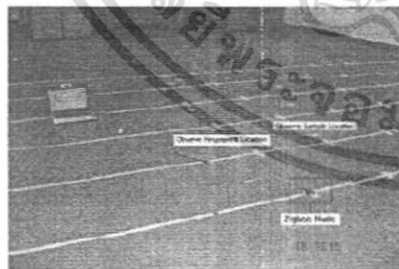


Figure 6. The marks of observed locations on the floor.

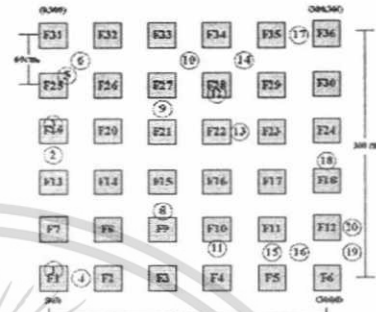


Figure 7. The layout of the experiment setup of fingerprint location & sampling positions

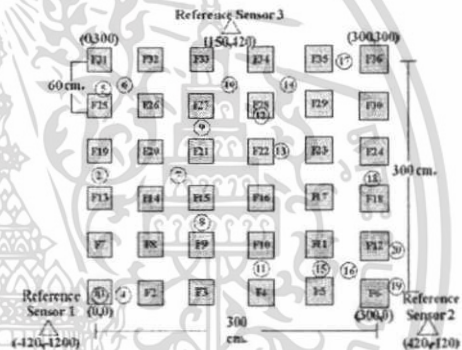


Figure 8. The layout of the experiment setup of 3 reference sensor nodes

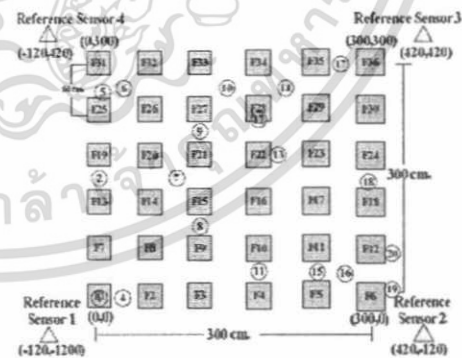


Figure 9. The layout of the experiment setup of 4 reference sensor nodes.

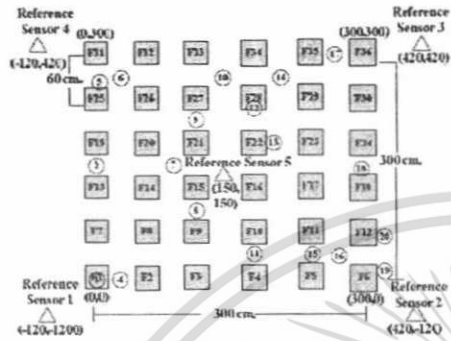


Figure 10. The layout of the experiment setup of 5 reference sensor nodes

IV. RESULT AND DISCUSSION

The objective of this work is to estimate the location of the target node in the indoor environment using the proposed method. The intensity of the signal from each reference sensor is measured and used to estimate the target location. It is well known that in indoor environment, it is difficult to analyze the signal intensity because it is much fluctuated. To help improving this, a number of reference nodes may be used as the space diversity. It can be found from the results that the more number of reference nodes, the better location estimation accuracy. Figure 11 is an example to demonstrate the relationship between the measured RSSI and the distance for the condition of a variability of a number of reference nodes. It follows the theory that the longer the separated distance between nodes, the smaller the RSSI value. Figure 12 compares the location estimation error among the range-based techniques. It seems that lateration gives better results than min-max techniques. Figure 13 compares the location estimation error conditions of fingerprint. It is observed that the more number of reference sensor nodes, the better results of location estimation. Figure 14 compares the location estimation error between range-based and fingerprinting-based techniques. Figure 15 shows the true location and the estimated location using lateration technique for all samples.

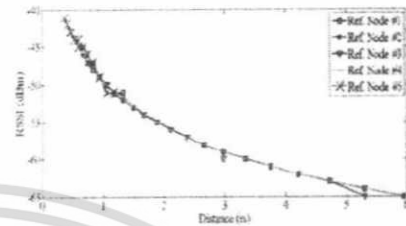


Figure 11. Relationship between communication distance and RSSI value for the 5 reference node conditions.

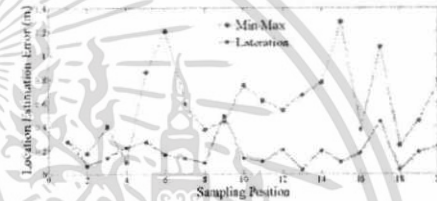


Figure 12. Comparison of location estimation error using range-based technique

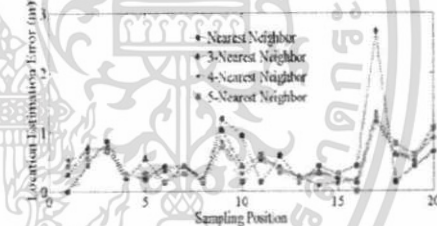


Figure 13. Comparison of location estimation error among pattern matching algorithms of fingerprint technique.

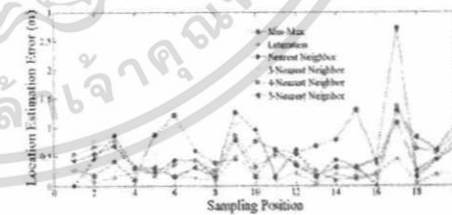


Figure 14. Comparison of location estimation error between range-based and fingerprinting-based techniques.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

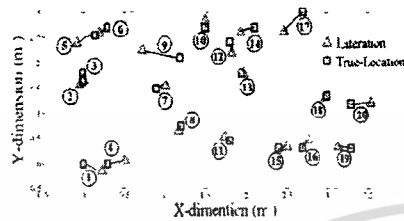


Figure 15 Comparison between the true location and estimated location using lateration technique.

TABLE II LOCALIZATION ERROR STATISTIC TABLE FOR RANGE-BASE

Node	Min-Max (m)	Lateration (m)
3 Reference Nodes	0.597	0.263
4 Reference Nodes	0.464	0.162
5 Reference Nodes	0.298	0.120

Table II summarizes the average location estimation error for range-based technique. The results show that the lateration method gives the better accuracy of location estimation. Moreover, it is found that the more number of the reference sensor nodes, the better accuracy of location estimation.

TABLE III LOCALIZATION ERROR STATISTIC TABLE FOR FINGERPRINT

Node	Nearest Neighbor (m)	Average K-Nearest Neighbor (m)		
		K=3	K=4	K=5
3 Reference Nodes	0.549	0.504	0.478	0.459
4 Reference Nodes	0.434	0.427	0.391	0.328
5 Reference Nodes	0.410	0.403	0.359	0.312

Table III summarizes the average location estimation error for fingerprinting-based technique. As mentioned, two pattern matching methods are used: nearest neighbor and k-nearest

neighbor techniques. For k-nearest neighbor techniques, three cases for k of 3, 4 and 5 are considered. It is found that the 5-nearest neighbor gives the best results among the pattern matching algorithms.

## V. CONCLUSIONS

This paper presents a method of calculating the location of the target sensor using range-based and fingerprinting-based techniques. The performance of all presented methods is evaluated using the experimental data. The results show that for the range-based technique, the performance of lateration provides better accuracy of location estimation than min-max method. For the fingerprinting-based technique, the 5-nearest neighbor give the best result. However, to compare between the range-based and the fingerprinting-based techniques, the lateration of the range-based gives the best result of location estimation. Moreover, it is found that the more number of the reference nodes, the better accuracy of the location estimation.

For all techniques, it is found that the average location estimation (error) is less than 60 cm which is an applicable range in practice. Therefore, the proposed method using in the indoor environment can be practically used in the real location estimation system.

## ACKNOWLEDGMENT

This research work is financial supported by the Thailand Research Fund and Thai Network Information Center Foundation.

## REFERENCES

- [1] H. Liu, H. Darabi, P. Chaojoo, and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, pp. 1067-1080, Vol. 37, No. 6, November 2007.
- [2] F. Sottile, R. Guamanonzo, M. A. Spirito, and F. L. Bellifemine, "Design, Deployment and Performance of a Complete Real-time ZigBee Localization System," *Wireless Days, 2008. WD'08. 1st IFIP*, pp. 1-5, November 2008. S. Jacobs and C. P. Bean, "Fine particles, thin films and exchange anisotropy," in *Magnetism*, vol. III, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271-350.
- [3] A. Noh, W. Lee and J. Ye, "Comparison of the mechanisms of the Zigbee's indoor Localization algorithm," *Ninth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing*, pp.13-18, August 2008.
- [4] K. Langendoen and N. Reijers, "Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison", *Computer Network* 43, pp. 499-518, 2005.
- [5] W. Murphy and W. Hereman, "Determination of a Position in Three Dimensional Using Trilateration and Approximate Distances", 1995, *tech. report MCS-95-07*, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- [6] R. Pruegharn, K. Srivilas and P. Chertanontwong, "Indoor Localization System using RSSI Measurement in Wireless Sensor Network Base On Zigbee Standard," *The 3<sup>rd</sup> National Conference on Information Technology (NCIT 2010)*, pp. 225-228, October 2010.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายรัตนะ ศิวงาม  
 วัน เดือน ปีเกิด 30 ธันวาคม 2525  
 ที่อยู่ 32/78 หมู่ 10 ซอย นวมินทร์ 135 ถนน นวมินทร์ แขวงคลองกุ่ม เขตบึงกุ่ม  
 กทม. 10230

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2544 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-โทรคมนาคม  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

### ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2548-ปัจจุบัน Senior Engineer บริษัท แอดวานซ์ อินโฟ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน)

### ผลงานวิจัย

พ.ศ.2553 **R. Priwgharm, K. Srivilas and P. Chertanomwong**, "Indoor Localization System using RSSI Measurement in Wireless Sensor Network Base On Zigbee Standard," The 3<sup>rd</sup> National Conference on Information Technology (NCIT 2010), pp. 225-228, October 2010

พ.ศ.2552 **R. Priwgharm and P. Chertanomwong**, "A Comparative Study on Indoor Localization based on RSSI Measurement in Wireless Sensor Network" The 8<sup>th</sup> International Joint Conference on Computer Science and Software Engineer, pp. 1-6 , Nakhon Pathom, Thailand, 11-13 May 2011.