



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การหาตำแหน่งของเป้าหมายในโครงข่าย
เซนเซอร์ไร้สายบนพื้นฐานเทคโนโลยี ZigBee

โดย

ดร. พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์

พฤษภาคม 2555

สัญญาเลขที่ TRG5380022

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การหาตำแหน่งของเป้าหมายในโครงข่าย
เซนเซอร์ไร้สายบนพื้นฐานเทคโนโลยี ZigBee

ดร. พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

และมูลนิธิศูนย์สารสนเทศเครือข่ายไทย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณความสำเร็จนี้ให้แก่บิดา มารดา อันเป็นที่รักยิ่ง ผู้ซึ่งคอยให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยในทุกเรื่อง ขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้มอบความรู้ คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งกำลังใจให้กับผู้วิจัย

งานวิจัยนี้จะสำเร็จลงไม่ได้หากไม่ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และมูลนิธิศูนย์สารสนเทศเครือข่ายไทย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณที่ปรึกษางานวิจัยทั้งสองท่านคือ Prof. Jun-ichi TAKADA และ รศ. ดร. ปิติ เขต สุริรักษา ผู้ซึ่งได้เสียสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษา แนะนำ อภิปราย อันนำมาซึ่งผลของงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคุณณัฐพล นาคราช คุณธนเศรษฐ์ บ่อคำ คุณกนกวรรณ โจมพรม คุณธนพงษ์ ชื่นอุระจิตร และ Mr. Dwi Joko Suroso ที่ให้ความช่วยเหลืองานวิจัยสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ หลักสูตรวิศวกรรมสารสนเทศ ที่ได้เอื้อเพื่ออุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์

รหัสโครงการ: TRG5380022

ชื่อโครงการ: การหาตำแหน่งของเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายบนพื้นฐานเทคโนโลยี ZigBee

ชื่อนักวิจัย: นางพนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail Address : krpanara@kmitl.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 31 พฤษภาคม 2553 – 31 พฤษภาคม 2555

เนื่องจากการประยุกต์ใช้งานกันอย่างมากมาสำหรับการหาตำแหน่งและการติดตามเป้าหมายในระบบการสื่อสารไร้สาย อัลกอริทึมในการหาตำแหน่งของเป้าหมายด้วยระบบคลื่นวิทยุจึงได้รับการค้นคว้าวิจัยอย่างกว้างขวาง โดยความถูกต้องในการประมาณหาตำแหน่งและความน่าเชื่อถือของระบบการหาตำแหน่งถือเป็นปัจจัยหลักๆที่ต้องการ อย่างไรก็ตามระบบที่ใช้การลงทุนต่ำและสามารถถูกนำมาใช้งานได้ง่าย ถือเป็นที่ต้องการมากกว่าระบบอื่นๆ เพื่อที่จะรับมือกับความต้องการเหล่านี้ เทคนิคการหาตำแหน่งเป็นจำนวนมากซึ่งใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยได้ถูกนำเสนอขึ้น

โครงข่ายเซนเซอร์แบบไร้สายเป็นโครงข่ายที่ประกอบด้วยโหนดที่มีขนาดเล็ก เป็นอิสระ มีทุกสิ่งที่เป็นจำเป็นโดยไม่ต้องพึ่งพาอุปกรณ์อื่น ทั้งยังสามารถชาร์ตแบตเตอรี่ได้ด้วยตัวเอง การหาตำแหน่งในโครงข่ายเซนเซอร์แบบไร้สาย มักนิยมใช้ตัวบ่งชี้ความเข้มของระดับสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) ZigBee เป็นโมดูลหนึ่งของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายซึ่งอยู่ในมาตรฐานของ IEEE 802.15.4 และมี RSSI เพื่อใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของเป้าหมายได้ นอกจากนี้ ZigBee ยังมีข้อดีมากมาย เช่นราคาถูก อัตราการถ่ายโอนข้อมูลต่ำ ครอบคลุมพื้นที่ได้ในขอบเขตที่กว้าง ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาการหาตำแหน่งของเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายบนพื้นฐานเทคโนโลยี ZigBee โดยพิจารณาภาวะแวดล้อมภายในอาคารเพื่อความสะดวกในการทดลอง แม้ว่าเทคนิคการหาตำแหน่งจะมีหลากหลายเทคนิค ในงานวิจัยนี้ได้เน้นเฉพาะเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ เนื่องจากสามารถจัดการกับผลกระทบจากคลื่นหลายวิถีได้ ซึ่งทำให้สามารถหาตำแหน่งได้ถูกต้องมากกว่าเทคนิคอื่นๆ อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าและมีความซับซ้อนมากกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอแนวทางในการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคการจัดกลุ่มของข้อมูล เทคนิคการจัดกลุ่มข้อมูลที่ได้รับความนิยมเทคนิคหนึ่งคือ Fuzzy C-Means หรือเรียกย่อๆ ว่า FCM ในงานวิจัยนี้ จึงได้นำเทคนิค FCM มาใช้ ซึ่งมีผลให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณเร็วขึ้น

ความถูกต้องในการหาตำแหน่ง จะแสดงในเทอมของค่าความผิดพลาดในการประมาณหาตำแหน่งของเป้าหมาย จากผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร พบว่าเทคนิค FCM สามารถจัดกลุ่มโดยมีโนดเป้าหมายอยู่ในกลุ่มที่เหมาะสมได้สำเร็จ จึงสรุปได้ว่าเทคนิค FCM สามารถนำมาใช้เพื่อสนับสนุนระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยวิธีฟิงเกอร์ปริ้นท์ สำหรับข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต สามารถทำการตรวจสอบถึงผลกระทบของแบตเตอรี่สำหรับโนดเซนเซอร์ไร้สาย รวมถึงการพัฒนาคุณภาพของฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์ให้ดียิ่งขึ้น

Keywords : การหาตำแหน่ง ฟิงเกอร์ปริ้นท์ โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย fuzzy C-means

Abstract

Project Code : TRG5380022

Project Title : Localization in wireless sensor networks based on ZigBee technology

Investigator : Panarat Cherntanomwong,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

E-mail Address : krpanara@kmitl.ac.th

Project Period : 31 May 2553 – 31 May 2555

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.

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. Localization in WSN often uses the Received Signal Strength Indicator (RSSI)-based localization system. ZigBee is a well-known WSN module in IEEE 802.15.4 standard which provides RSSI and has a good number of advantages such as originally lower cost than other wireless technologies, low data transfer, and easily covers wide range. Therefore, in this research, localization in wireless sensor networks based on ZigBee technology is studied and developed and indoor environment is considered because of simplicity. Although there are a variety of localization techniques, the fingerprint-based technique is focused on this research since it can deal with the multipath effect. This gives higher localization accuracy than other techniques. However, the main limitation of the fingerprint-based technique is time consuming and complicated. This research proposes a solution to these problems using clustering data technique. Fuzzy C-Means (FCM) is known as one of the clustering algorithm that can handle the uncertainty data and its robust application for the complicated data. In this research, the implementation of the FCM in the fingerprint database helps the faster calculation.

The accuracy of the localization system is shown as the estimated target location error. From the indoor experiment results, the FCM can cluster the target node in an appropriate cluster successfully. Therefore, it can be concluded that the FCM can be implemented as supporting algorithm in the fingerprint-based indoor localization system. For the future research, the investigation of the effect of the battery component for wireless sensor nodes and the improvement of the fingerprint database quality can be considered.

Keywords : localization, fingerprint technique, wireless sensor network, fuzzy C-means

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	I
บทคัดย่อ.....	II
Abstract.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Networks)	4
2.1.1 ความหมายของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย	4
2.1.2 วิวัฒนาการของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย	4
2.1.3 องค์ประกอบของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย	5
2.1.4 ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย	6
2.1.5 การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย	8
2.2 เทคโนโลยี ZigBee	9
2.2.1 ลักษณะของ ZigBee	10
2.2.2 การรับส่งข้อมูลเบื้องต้น.....	10
2.2.4 NETWORK TOPOLOGIES	11
2.2.5 ZigBee Architecture.....	13
2.3 XBee	14
2.3.1 XBee Topology.....	13
2.3.2 Feature Summary ของ XBee	16
2.3.3 กำลังส่งสายอากาศและสัญญาณรบกวนของ XBee	17
2.3.4 XBee Association	18
2.3.5 XBee Addressing	18
2.3.6 XBee Operation Mode	19
2.3.7 Data Throughput ของ XBee.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 เทคนิคพื้นฐานของการหาตำแหน่งของเป้าหมาย (Classical Localization Techniques).....	20
2.4.1 เทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง (Range-based Localization Technique)	20
2.4.2 เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรีนต (Fingerprint-based Localization Technique)	29
2.5 การหาตำแหน่งของเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายบนพื้นฐานเทคโนโลยี ZigBee	30
2.5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่งเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย	30
2.5.2 เทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่งเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย.....	31
2.6 บทสรุป.....	33
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	34
3.1 แนวคิด	34
3.2 การสร้างและออกแบบระบบ	34
3.2.1 รูปแบบเฟรมที่ใช้ในการสื่อสารในระดับชั้นเน็ตเวิร์กเลเยอร์.....	35
3.2.2 ประเภทของเฟรม.....	36
3.2.3 ส่วนของซอฟต์แวร์.....	38
3.3 แนวทางการศึกษาและการทดลอง.....	43
3.3.1 การทดลองเกี่ยวกับ Receive Signal Strength Indicator	43
3.3.2 การทดลองการระบุตำแหน่ง	44
3.4 บทสรุป	45
4. การทดลองและผลการทดลอง.....	46
4.1 การทดลองเรื่องการวัดค่า RSSI	46
4.2 การทดลองการหาค่าตัวแปรของสมการเพื่อใช้ในการหาระยะทางและหาตำแหน่งของวัตถุ.....	50
4.3 การทดลองหาตำแหน่งของวัตถุด้วยค่า RSSI.....	56
4.4 การทดลองเก็บค่า RSSI เพื่อเป็นฐานข้อมูลของเทคนิคฟิงเกอร์ปรีนต ในสภาวะแวดล้อมภายใน อาคาร.....	58
4.5 การทดลองเก็บค่า RSSI ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในอาคาร	62
4.6 การทดลองหาตำแหน่งของวัตถุ และเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของแต่ละเทคนิค เมื่อวัตถุหยุดนิ่ง	65
4.7 การทดลองหาตำแหน่งของวัตถุของแต่ละอัลกอริทึม แบบเคลื่อนที่ในอาคาร	71

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.8 การทดลองหาตำแหน่งของวัตถุ ด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริงต์เมื่อใช้วิธีการแบ่งกลุ่ม FCM.....	78
4.9 บทสรุป	83
5. บทวิจารณ์และสรุปผลงานวิจัย.....	84
5.1 บทวิจารณ์ผลงานวิจัย.....	84
5.2 สรุปผลงานวิจัย	87
5.3 แนวทางการดำเนินงานวิจัยในอนาคต.....	88
บรรณานุกรม.....	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงคุณลักษณะของมาตรฐาน XBee	18
4.1 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของค่าตัวแปร A	53
4.2 ตารางแสดงค่า RSSI ของแต่ละตำแหน่งที่ใช้ตัวรับ 4 ตัว	59
4.3 ตารางแสดงค่า RSSI ของแต่ละตำแหน่งที่ใช้ตัวรับ 6 ตัว	61
5.1 แสดงการเปรียบเทียบความผิดพลาดในการหาตำแหน่งของเป้าหมายแบบหยุดนิ่งจากเทคนิคMaximum Likelihood เทคนิค Min-Max และเทคนิคฟิงเกอร์ปรีนซ์.....	86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สถาปัตยกรรมของระบบการหาตำแหน่งของเป้าหมายในโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายบนพื้นฐานเทคโนโลยี ZigBee	2
2.1 องค์ประกอบของโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	5
2.2 สถาปัตยกรรมของเซ็นเซอร์โนด	6
2.3 ระดับชั้นโปรโตคอลของเครือข่ายสื่อสารไร้สาย	6
2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	9
2.5 Operating Frequency Bands.....	10
2.6 การเชื่อมต่อแบบดาว (Star) ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	12
2.7 การเชื่อมต่อแบบ Peer-to-Peer ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	12
2.8 การเชื่อมต่อแบบ Cluster tree ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	13
2.9 ZigBee และ IEEE 802.15.4 Protocol Stack.....	13
2.10 Star (Broadcast) Network	15
2.11 Cluster Tree (Tree) Network.....	16
2.12 Mesh Network	16
2.13 XBee.....	17
2.14 รูปสายอากาศแบบ Wire (Whip) และแบบ Chip ตามลำดับ.....	18
2.15 Internal Data Flow Diagram.....	19
2.16 แสดงการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางโดยใช้พารามิเตอร์ RSSI	21
2.17 แสดงการหาค่า Min-Max ระหว่างโนดอ้างอิง.....	24
2.18 แสดงการหาตำแหน่งของวัตถุโดยใช้ Min-Max Algorithm	25
2.19 แสดงการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางโดยใช้พารามิเตอร์ TDOA	28
2.20 ภาพรวมของระบบการหาตำแหน่งโดยเทคโนโลยี RFID บนพื้นฐานวิธีฟิงเกอร์ปรีนต.....	30
3.1 แผนภาพการทำงานของระบบ.....	34
3.2 แสดงภาพรวมการทำงานของระบบ	35
3.3 แสดงรายละเอียดของของแพ็คเก็ตขนาด 8 Byte.....	35
3.4 แพ็คเก็ต Remote AT Command Request (0x17)	36
3.5 แพ็คเก็ต Explicit Addressing ZigBee Command Frame (0x11)	37
3.6 แพ็คเก็ต ZigBee Transmit Request (0x10)	38

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ภาพรวมการออกแบบซอฟต์แวร์.....	39
3.8 หน้าของโปรแกรมก่อนการเชื่อมต่อ.....	39
3.9 ส่วนของการตั้งค่าการเชื่อมต่อแบบ Serial Port.....	40
3.10 ส่วนของการใส่เฟรมข้อมูลที่ต้องการส่ง.....	40
3.11 มุมมองการแสดงตำแหน่งของวัตถุ.....	41
3.12 ตัวอย่างข้อมูลที่โปรแกรมได้ทำการเก็บไว้.....	42
3.13 ส่วนของการแสดงวิธีการใช้งานของโปรแกรม	42
3.14 ส่วนการตั้งค่าเพิ่มเติมเมื่อมีการเชื่อมต่อ Serial Port แล้ว	43
3.15 การทดลองวัดค่า RSSI ในระยะต่างๆ.....	42
3.16 การทดลองหาตำแหน่งโดยใช้ Maximum Likelihood Algorithm.....	44
4.1 บอร์ด XBee Module	46
4.2 ภาพจำลองแบบการทดลองการจัดวางตำแหน่งของ XBee Module เพื่อหาค่า RSSI	47
4.3 สถานที่ในการทดลองภายในอาคาร	47
4.4 สถานที่ในการทดลองภายนอกอาคาร	48
4.5 กราฟแสดงค่า RSSI ทุกๆช่วง 1 เมตร ในระยะทาง 10 เมตร ภายในอาคาร.....	48
4.6 กราฟแสดงค่า RSSI ทุกๆช่วง 1 เมตร ในระยะทาง 10 เมตร ภายนอกอาคาร.....	49
4.7 กราฟเปรียบเทียบค่า RSSI ทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....	49
4.8 แสดงการจัดวางตำแหน่งของ XBee Module เพื่อทำการหาค่า A	52
4.9 การทดลองหาค่า A และ n ทุกๆช่วง 1 เมตร	52
4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RSSI จากการคำนวณกับการวัดจริง ของ Node 1.....	53
4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RSSI จากการคำนวณกับการวัดจริง ของ Node 2.....	54
4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RSSI จากการคำนวณกับการวัดจริง ของ Node 3.....	54
4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RSSI จากการคำนวณกับการวัดจริง ของ Node 4.....	55
4.14 กราฟแสดงค่า RMSE ของ Node 1-4 โดยที่ค่ามีค่า n แตกต่างกัน.....	55
4.15 ภาพจำลองการจัดพื้นที่เพื่อที่จะคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุ.....	56
4.16 แสดงการทดลองหาตำแหน่งของวัตถุ	57
4.17 แสดงผลตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้.....	57
4.18 ภาพจำลองการจัดพื้นที่เพื่อทำการเก็บค่า RSSI.....	58
4.19 สถานที่ในการทดลองภายในอาคาร	59
4.20 ภาพจำลองการเก็บค่า RSSI ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างซ้ายมือถึง มุมด้านบนขวามือ	63

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ภาพจำลองการเก็บค่า RSSI ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างขวามือถึง มุมด้านบนซ้ายมือ.....	63
4.22 ภาพจำลองการเก็บค่า RSSI ตามแนวนอนกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง	64
4.23 ภาพจำลองการเก็บค่า RSSI ตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง	64
4.24 ภาพจำลองการเก็บค่า RSSI ทั้งหมด 36 ตำแหน่ง ของพื้นที่ทดลอง	65
4.25 ตำแหน่งฟังก์ชันปริพันธ์ 36 ตำแหน่ง	66
4.26 ตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 16 ตำแหน่งทดสอบ ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างซ้ายมือถึงมุมด้านบนขวามือ	66
4.27 ผลการประมาณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 16 ตำแหน่งทดสอบ ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างซ้ายมือถึงมุมด้านบนขวามือ โดยใช้เทคนิค Maximum Likelihood โดยเปรียบเทียบผลจากกรณีใช้โนดอ้างอิง 4 โหนด และ 6 โหนด	67
4.28 ผลการประมาณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 16 ตำแหน่งทดสอบ ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างซ้ายมือถึงมุมด้านบนขวามือ โดยใช้เทคนิค Min-Max โดยเปรียบเทียบผลจากกรณีใช้โนดอ้างอิง 4 โหนด และ 6 โหนด	68
4.29 ผลการประมาณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 16 ตำแหน่งทดสอบ ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างซ้ายมือถึงมุมด้านบนขวามือ โดยใช้เทคนิคฟังก์ชันปริพันธ์ โดยเปรียบเทียบผลจากกรณีใช้โนดอ้างอิง 4 โหนด และ 6 โหนด.....	68
4.30 ผลการประมาณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 16 ตำแหน่งทดสอบตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่ทดลองโดยใช้เทคนิค Maximum Likelihood โดยเปรียบเทียบผลจากกรณีใช้โนดอ้างอิง 4 โหนดและ 6 โหนด..	69
4.31 ผลการประมาณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 21 ตำแหน่งทดสอบ ตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง โดยใช้เทคนิค Min-Max โดยเปรียบเทียบผลจาก กรณีใช้โนดอ้างอิง 4 โหนด และ 6 โหนด.....	70
4.32 ผลการประมาณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 21 ตำแหน่งทดสอบ ตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง โดยใช้เทคนิคฟังก์ชันปริพันธ์ โดยเปรียบเทียบผลจาก กรณีใช้โนดอ้างอิง 4 โหนด และ 6 โหนด.....	70
4.33 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้เทคนิค Maximum Likelihood ตามแนว มุมด้านล่างซ้ายมือ ถึง มุมด้านบนขวามือ ของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 4 ตัว	72
4.34 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้เทคนิค Maximum Likelihood ตามแนว มุมด้านล่างซ้ายมือ ถึง มุมด้านบนขวามือ ของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 6 ตัว	72

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้เทคนิค Maximum Likelihood ตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 4 ตัว	73
4.36 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้เทคนิค Maximum Likelihood ตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 6 ตัว	64
4.37 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้เทคนิค Min-Max ตามแนวมุมด้านล่างซ้ายมือถึงมุมด้านบนขวามือ ของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 4 ตัว	74
4.38 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้เทคนิค Min-Max ตามแนวมุมด้านล่างซ้ายมือถึงมุมด้านบนขวามือ ของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 6 ตัว	74
4.39 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้เทคนิค Min-Max ตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 4 ตัว	75
4.40 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้เทคนิค Min-Max ตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 6 ตัว	75
4.41 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้ Fingerprint Algorithm แบบ Nearest ตามแนวมุมด้านล่างซ้ายมือ ถึง มุมด้านบนขวามือ ของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 4 ตัว	76
4.42 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้ Fingerprint Algorithm แบบ Nearest ตามแนวมุมด้านล่างซ้ายมือ ถึง มุมด้านบนขวามือ ของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 6 ตัว	76
4.43 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้ Fingerprint Algorithm ตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 4 ตัว	77
4.44 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้ Fingerprint Algorithm ตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 6 ตัว	77
4.45 ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนต์และตำแหน่งของโนดอ้างอิง (รูปซ้าย สำหรับกรณี 4 โหนด และรูปขวา กรณี 6 โหนด)	79
4.46 ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนต์และตำแหน่งของโนดอ้างอิง (สองรูปด้านบน สำหรับกรณี แนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างซ้ายมือถึง มุมด้านบนขวามือ และสองรูปด้านล่าง สำหรับกรณีแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างขวามือถึง มุมด้านบนซ้ายมือ)	79
4.47 ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนต์และตำแหน่งของโนดอ้างอิง (สองรูปด้านบน สำหรับกรณี แนวอนกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง และสองรูปด้านล่าง สำหรับกรณีแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง)	80
4.48 ผลการประมาณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 16 ตำแหน่งทดสอบ ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างซ้ายมือถึงมุมด้านบนขวามือ โดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนต์ ร่วมกับวิธี FCM โดยเปรียบเทียบผลจากกรณีใช้โนดอ้างอิง 4 โหนด และ 6 โหนด	81

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49 ผลการประมาณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 16 ตำแหน่งทดสอบ ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างขวามือถึงมุมด้านบนซ้ายมือ โดยใช้เทคนิคฟังก์ชันเกอริปรีนตส์ ร่วมกับวิธี FCM โดยเปรียบเทียบ ผลจากกรณีใช้โนดอ้างอิง 4 โหนด และ 6 โหนด.....	81
4.50 ผลการประมาณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 16 ตำแหน่งทดสอบ ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างขวามือถึงมุมด้านบนซ้ายมือ โดยใช้เทคนิคฟังก์ชันเกอริปรีนตส์ ร่วมกับวิธี FCM โดยเปรียบเทียบ ผลจากกรณีใช้โนดอ้างอิง 4 โหนด และ 6 โหนด.....	82
4.51 ผลการประมาณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 16 ตำแหน่งทดสอบ ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างขวามือถึงมุมด้านบนซ้ายมือ โดยใช้เทคนิคฟังก์ชันเกอริปรีนตส์ ร่วมกับวิธี FCM โดยเปรียบเทียบ ผลจากกรณีใช้โนดอ้างอิง 4 โหนด และ 6 โหนด.....	82
5.1 หน้าของโปรแกรมก่อนการเชื่อมต่อ	84
5.2 กราฟเปรียบเทียบค่า RSSI ทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....	85
5.3 การเคลื่อนที่ของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้เทคนิค Maximum Likelihood ตามแนวมุมด้านล่าง ซ้ายมือถึงมุมด้านบนขวามือของพื้นที่การทดลอง โดยใช้ตัวรับ 6 ตัว.....	87

1. บทนำ

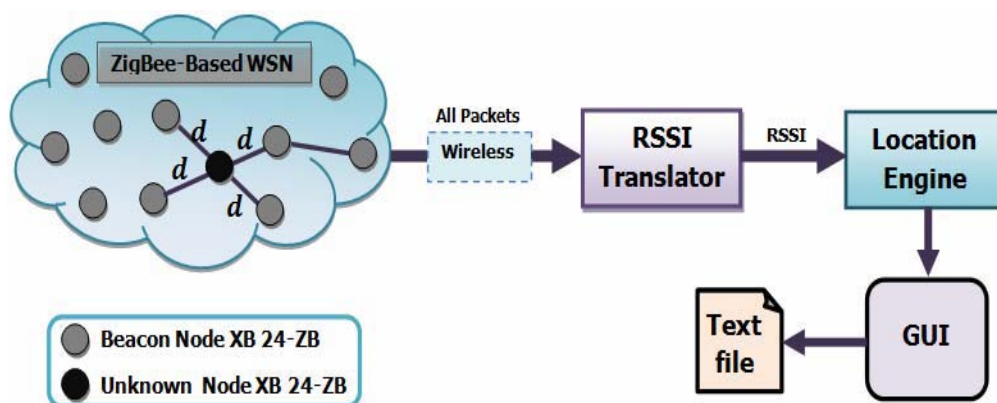
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้ ระบบการสื่อสารไร้สายแทบจะทุกระบบ มีฟังก์ชันการใช้งานสำหรับการหาตำแหน่ง (Positioning) และการติดตาม (Monitoring/tracking) อุปกรณ์ไร้สาย ซึ่งจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง แม้ว่าจะมีเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายมากมาย ที่มีฟังก์ชันในการหาตำแหน่ง เช่นเทคโนโลยี GPS (Global Positioning System) เทคโนโลยีระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ เทคโนโลยี WLAN (Wireless Local Area Network) เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultrawideband) เทคโนโลยีการระบุข้อมูลด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Identification: RFID) และเทคโนโลยีโครงข่ายเซนเซอร์แบบไร้สาย (Wireless Sensor Network: WSN) แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่นเทคโนโลยี GPS และ เทคโนโลยีระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ มีข้อดีคือมีระบบที่ติดตั้งไว้อยู่แล้วเพื่อใช้งานอื่นๆ จึงประหยัดงบประมาณเรื่องการติดตั้งอุปกรณ์เมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในการหาตำแหน่ง แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถทำงานได้ดีภายในอาคาร สำหรับเทคโนโลยี WLAN เทคโนโลยี RFID และเทคโนโลยี WSN นั้น เหมาะสมสำหรับการใช้ฟังก์ชันในการหาตำแหน่งทั้งภายในและภายนอกอาคาร นอกจากนี้อุปกรณ์ยังมีราคาถูก แต่ก็มีข้อเสียคือต้องติดตั้งอุปกรณ์จำนวนมาก เพื่อให้สามารถหาตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง

จากการประยุกต์ใช้งานกันอย่างมากมายสำหรับการหาตำแหน่งและการติดตามเป้าหมาย ระบบและอัลกอริทึมในการหาตำแหน่งของเป้าหมายด้วยระบบคลื่นวิทยุจึงได้รับการค้นคว้าวิจัยอย่างกว้างขวาง โดยความถูกต้องในการประมาณหาตำแหน่งและความน่าเชื่อถือของระบบการหาตำแหน่งถือเป็นปัจจัยหลักๆที่ต้องการ อย่างไรก็ตามระบบที่ใช้การลงทุนต่ำและสามารถถูกนำมาใช้งานได้ง่าย ถือเป็นที่ต้องการมากกว่าระบบอื่นๆ เพื่อที่จะรับมือกับความต้องการเหล่านี้ เทคนิคการหาตำแหน่งเป็นจำนวนมากซึ่งใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยได้ถูกนำเสนอขึ้น เทคนิคการหาตำแหน่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิคหลัก คือเทคนิคการหาตำแหน่งบนพื้นฐานของการหาระยะทาง (range-based) และเทคนิคการหาตำแหน่งบนพื้นฐานของความใกล้เคียง (proximity-based) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของฟingerprint (Fingerprint-based) และเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง (Range-based) โดยเทคนิคแรก เป็นการหาตำแหน่งของเป้าหมาย จากการใช้ข้อมูลของระยะทางระหว่างอุปกรณ์อ้างอิงที่รู้ตำแหน่งกับเป้าหมาย ซึ่งการคำนวณหาระยะทางนี้ สามารถหาได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของสัญญาณที่นำมาพิจารณา เช่นเวลาที่สัญญาณเดินทางมาถึงเครื่องรับ (Time Of Arrival: TOA) มุมของสัญญาณที่เดินทางมาถึงเครื่องรับ (Angle Of Arrival: AOA) หรือ ตัวบ่งชี้ความเข้มของระดับสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) เป็นต้น ส่วนเทคนิคที่สอง เป็นการหาตำแหน่งของเป้าหมาย จากการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับได้จากเป้าหมายกับพารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับได้จากอุปกรณ์อ้างอิงที่รู้ตำแหน่งที่อยู่ใกล้เคียง ตำแหน่งของเป้าหมายสามารถประมาณได้จากตำแหน่งของอุปกรณ์อ้างอิง ที่มีพารามิเตอร์ของสัญญาณใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งในการหาตำแหน่งของเป้าหมาย จะมีความถูกต้องมากกว่าการใช้เทคนิคแรก แต่จะมีกระบวนการที่ซับซ้อนและใช้เวลามากกว่า

โครงข่ายเซนเซอร์แบบไร้สายเป็นโครงข่ายที่ประกอบด้วยโหนดที่มีขนาดเล็ก เป็นอิสระ มีทุกสิ่งที่เป็นโดยไม่ต้องพึ่งพาอุปกรณ์อื่น ทั้งยังสามารถชาร์ตแบตเตอรี่ได้ด้วยตัวเอง การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ทันสมัยที่สุด จะเป็นการประยุกต์ใช้งานสำหรับการหาตำแหน่งของเป้าหมาย เช่นการตรวจติดตามและเฝ้าสังเกตเป้าหมาย การควบคุมที่อยู่อาศัย การติดตามตรวจสอบของสินค้าในระบบขนส่งสินค้า รวมถึงการดูแลเครื่องจักรที่ใช้ภายในสำนักงานและโรงงานอุตสาหกรรม การหาตำแหน่งในโครงข่ายเซนเซอร์แบบไร้สาย มักนิยมใช้ RSSI โดยโหนดกลุ่มหนึ่งจะถูกวางไว้ ณ จุดที่รู้ตำแหน่ง โดยจะทำหน้าที่เป็นโหนดอ้างอิง (ซึ่งมักจะถูกเรียกว่าโหนดบีคอน (beacon node)) โดยการวัดความแรงของระดับสัญญาณระหว่างโหนดบีคอน กับโหนดเป้าหมาย (โหนดที่ต้องการหาตำแหน่ง) ระบบสามารถคำนวณหาตำแหน่งของโหนดเป้าหมายได้บนพื้นฐานของ 2 เทคนิค ดังได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น ZigBee คือมาตรฐานที่เป็นไปตามกฎของ IEEE 802.15.4 และมี RSSI ที่สามารถถูกนำมาใช้เพื่อประมาณหาตำแหน่งของโหนดเป้าหมายได้ ยิ่งกว่านั้นเทคโนโลยี ZigBee ยังมีข้อได้เปรียบอีกมากมาย เช่นราคาถูก อัตราการถ่ายโอนข้อมูลต่ำ ครอบคลุมพื้นที่ได้ในขอบเขตที่กว้าง ทั้งยังสามารถจัดโครงสร้างของโครงข่ายได้หลายประเภท ได้แก่การจัดโครงข่ายแบบรูปดาว แบบเมช แบบ ad-hoc และแบบผสม

ดังนั้นผู้เสนอโครงการวิจัยจึงต้องการนำเสนอระบบและวิธีการใหม่ในการหาตำแหน่งของเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย บนพื้นฐานเทคโนโลยี ZigBee โดยมีเป้าหมายหลักคือพัฒนาระบบและวิธีการในการหาตำแหน่งของเป้าหมาย ที่สามารถหาตำแหน่งได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ โดยอยู่บนพื้นฐานของความง่ายในการพัฒนาระบบ ความไม่ซับซ้อนของอัลกอริทึมในการหาตำแหน่ง และต้นทุน (ทั้งด้านค่าใช้จ่าย และเวลา) ต่ำ ซึ่งผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ สามารถเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาระบบและวิธีการที่ซับซ้อนขึ้น เพื่อนำไปสู่ประสิทธิภาพในการหาตำแหน่งที่ดีขึ้นได้ นอกจากนี้ยังเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัยเพื่อนำไปสู่การพัฒนาต่อยอดในเชิงพาณิชย์ อันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย มีการผลิตซึ่งมีต้นทุนต่ำลงและมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ โดยรูปที่ 1.1 แสดงภาพรวมของระบบการหาตำแหน่งของเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายบนพื้นฐานเทคโนโลยี ZigBee



รูปที่ 1.1 สถาปัตยกรรมของระบบการหาตำแหน่งของเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายบนพื้นฐานเทคโนโลยี ZigBee

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาเทคนิคที่เหมาะสมในการหาตำแหน่งของเป้าหมาย โดยใช้พารามิเตอร์ RSSI สำหรับการประยุกต์ใช้งานทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร
2. ออกแบบระบบให้มีต้นทุนต่ำ โดยเลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่เหมาะสม
3. สามารถที่จะนำไปติดตั้ง และใช้งานได้จริง
4. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการวิจัยเพื่อการพาณิชย์มากขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Networks: WSN)

2.1.1 ความหมายของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Networks (WSN)) คือการใช้อุปกรณ์เซนเซอร์เล็กๆ จำนวนมากเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆ ของสิ่งแวดล้อมที่เราสนใจและประมวลผลข้อมูลเหล่านั้นเพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวเรา หรือตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้โดยอัตโนมัติ WSN เกิดขึ้นจากการผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีระบบสมองกลฝังตัวและการสื่อสารไร้สาย ที่ส่งผ่านข้อมูลระหว่างเซนเซอร์โหนดด้วยรูปแบบเครือข่ายแบบ ad-hoc จุดเด่นของเครือข่ายเซนเซอร์ที่อาศัยโปรโตคอลแบบ ad-hoc คือ ไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับเครือข่ายเช่นเดียวกับเครือข่ายแบบ WLAN หรือ GSM นอกจากนี้การออกแบบเซนเซอร์โหนดให้มีขนาดเล็กและใช้พลังงานน้อยทำให้สามารถติดตั้งได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เทคโนโลยีเครือข่ายเซนเซอร์จึงได้ถูกคาดการณ์ว่าจะเป็นเทคโนโลยีหลักในการขับเคลื่อนสู่ยุคของคอมพิวเตอร์ทุกแห่งหน (ubiquitous computing, pervasive computing) ด้วยการสร้างสภาพแวดล้อมประดิษฐ์ในรอบๆ ตัวของเราทุกคน

2.1.2 วิวัฒนาการของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซนเซอร์ในยุคแรกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการสงคราม ในช่วงสงครามเย็น Sound Surveillance System (SOSUS) ใช้ไมมหาสมุทรเพื่อตรวจจับเรือดำน้ำของสหภาพโซเวียต โดยใช้ระบบแถวเซนเซอร์ไฮโดรโฟน (hydrophone array) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้าใต้น้ำและส่งข้อมูลด้วยสายเคเบิลใต้น้ำ ในช่วงเวลาเดียวกัน ระบบเครือข่ายเรดาร์ทางอากาศ (networks of air defense radars) ได้รับการพัฒนาเพื่อป้องกันภาคพื้นสหรัฐอเมริกาและแคนาดา ในยุคแรกระบบเครือข่ายมีรูปแบบเป็นลำดับชั้น (hierarchical) การประมวลผลจะทำตามลำดับชั้นและใช้มนุษย์เป็นหลักในการประมวลผลและทำงาน

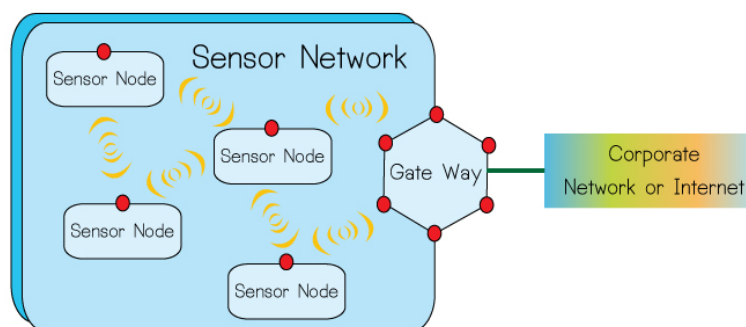
ยุคที่สองเกิดขึ้นหลังจากการพัฒนาอินเทอร์เน็ตประมาณ พ.ศ.2523 เป็นยุคของการพัฒนาเครือข่ายเซนเซอร์แบบกระจายตัว (Distributed Sensor Network) เป็นโครงการวิจัยของ Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) โดยเน้นที่การพัฒนาการประมวลผลข้อมูลแบบกระจายตัว การประมวลผลสัญญาณ (signal processing) การติดตามวัตถุ เครือข่ายใช้โปรโตคอลสื่อสารระดับสูง แต่ด้วยเทคโนโลยีในยุคนั้นทำให้หน่วยรวมเซนเซอร์มีขนาดใหญ่และถูกออกแบบให้เป็นรถเซนเซอร์เพื่อให้เป็นหน่วยรวมเซนเซอร์แบบเคลื่อนที่ได้

เครือข่ายเซนเซอร์ยุค ปี พ.ศ.2550 เทคโนโลยีการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาถึงระดับที่สามารถผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก ราคาถูก และประหยัดพลังงาน ซึ่งเหมาะสำหรับสร้างหน่วยประมวลผล และหน่วยส่งข้อมูลของเซนเซอร์ไร้สาย และด้วยเทคโนโลยีระบบเครื่องกลจุลภาค การสร้างเซนเซอร์ขนาดเล็กและวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ขนาดเล็กเกิดขึ้นได้จริง ทำให้

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายยุคนี้เข้าใกล้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ในจินตนาการของนักวิจัยยุคก่อนๆ อย่างไรก็ตามเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายนี้ยังมีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง

2.1.3 องค์ประกอบของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

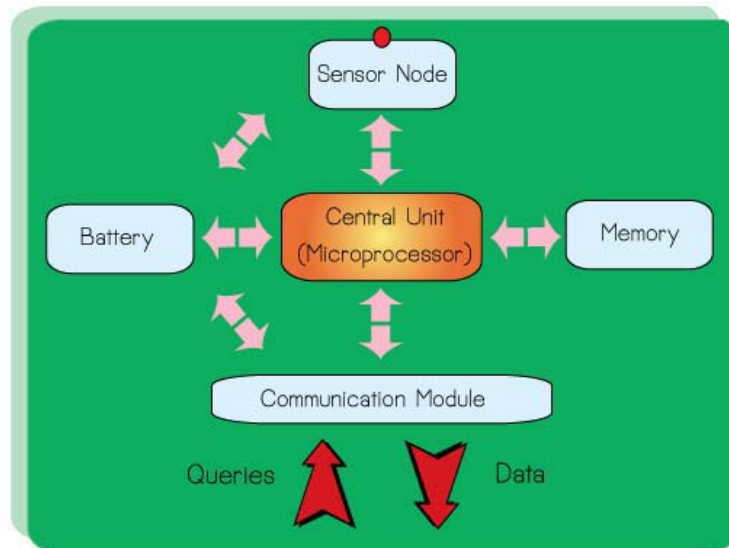
เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ประกอบไปด้วยกลุ่มของโหนดจำนวนหนึ่ง ซึ่งติดต่อสื่อสารกันผ่านช่องสัญญาณไร้สาย แต่ละโหนดนั้นสามารถเคลื่อนที่หรือหยุดนิ่งก็ได้ ข้อมูลจะถูกส่งจากโหนดไปเรื่อยๆ จนถึงโหนดๆหนึ่งที่ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูล และทำการประมวลผลข้อมูล เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในแอปพลิเคชันประเภทต่างๆ ต่อไป เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายนั้น สามารถติดต่อกับเครือข่ายอื่นๆ เช่นเครือข่ายอินเทอร์เน็ตหรืออินทราเน็ตได้ โดยผ่านตัวกลางระหว่างเครือข่ายที่เรียกว่า เกตเวย์ (Gateway) การเชื่อมต่อระหว่างเกตเวย์กับเครือข่ายอื่นภายนอกนั้น อาจเป็นการสื่อสารแบบใช้สายส่งสัญญาณ หรือแบบไร้สายก็ได้ องค์ประกอบของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย [1]

สำหรับสถาปัตยกรรมของโหนด แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 โดยประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก คือ

1. หน่วยประมวลผลกลาง (Central Unit: Microprocessor) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมอุปกรณ์ทั้งหมดภายในโหนด โดยทำการเชื่อมต่อส่วนอื่นๆ เข้าด้วยกันและมีหน้าที่ในการจัดการโหนด รวมถึงการควบคุมการทำงานของแอปพลิเคชัน
2. เซนเซอร์ (Sensor) ประกอบด้วยกลุ่มของเซนเซอร์ที่ติดตั้งไว้กับโหนด
3. อุปกรณ์สื่อสาร (Communication module) ประกอบด้วยเครื่องรับ-ส่งสัญญาณ
4. หน่วยความจำ (Memory) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลชั่วคราวหรือข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นมาจากการประมวลผล
5. แบตเตอรี่ (Battery) ทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับทุกส่วนในโหนด



รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมของเซนเซอร์โนด [1]

2.1.4 ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

เนื่องจากข้อจำกัดในหลายๆ ด้าน เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจึงมีระบบเครือข่ายที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น ในระบบเตือนภัย ระบบเครือข่ายต้องการความเร็วสูงในการส่งข้อมูล และจะส่งข้อมูลเมื่อเกิดอุบัติเหตุขึ้นเท่านั้นเพื่อประหยัดพลังงาน ในระบบวัดและควบคุมทาง การเกษตร ระบบเครือข่ายไม่ต้องการความเร็วสูงในการส่งข้อมูล แต่จะส่งข้อมูลตลอดเวลาโดยอาจมีการรวมข้อมูล (data fusion) ในระหว่างเส้นทางการเดินทางของข้อมูลเพื่อลดจำนวนครั้งของการสื่อสารและประหยัดพลังงาน ดังนั้นการเลือกชนิดและออกแบบเครือข่ายจะต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับการใช้งาน



รูปที่ 2.3 ระดับชั้นโปรโตคอลของเครือข่ายสื่อสารไร้สาย [2]

2.1.4.1 โปรโตคอลสแตก (protocol stack) หรือระดับชั้น

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายให้ความสำคัญกับพลังงานมาก เพราะเซนเซอร์ไร้สายมักมีแหล่งพลังงานที่จำกัด ทำให้พลังงานมีผลมากกับเซนเซอร์ไร้สายและเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ในด้านการออกแบบจึงปรับปรุงโปรโตคอลสแตกของ Open Systems Interconnection (OSI) model โดยแบ่งเป็นสามชั้นและหนึ่งระนาบดังรูปที่ 2.3 แต่ละชั้นจะทำหน้าที่เฉพาะของตัวเอง คอยให้ความ

ช่วยเหลือชั้นบนและขอความช่วยเหลือจากชั้นล่างที่ติดกับชั้นตัวเอง ส่วนระนาบซึ่งเชื่อมโยงกับทุกชั้นจะควบคุมบริหารจัดการในทุกๆ ชั้นให้ทำงานตามวัตถุประสงค์ของระนาบนั้นๆ อย่างไรก็ตามการใช้งานที่แตกต่างกันก็ส่งผลถึงรูปแบบโปรโตคอลที่แตกต่างกัน

- **ชั้นกายภาพ (physical layer)** รับผิดชอบการรับ-ส่งสัญญาณไร้สายในด้านกายภาพ เช่น ช่วงความถี่สัญญาณ การมอดูเลต(modulation) การเข้ารหัสระดับช่องสัญญาณ(channel coding) ชั้นกายภาพในประเทศไทยจะใช้ช่วงความถี่สาธารณะและกำลังส่งตามกฎหมายกำหนด
- **ชั้นเชื่อมต่อข้อมูล (data link layer)** รับผิดชอบการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์ข้างเคียง การเข้าใช้ช่องสัญญาณ (medium access control (MAC)) การควบคุมข้อผิดพลาด (error control) ของข้อมูล เพื่อให้การสื่อสารระหว่างหน่วยร่วมเซนเซอร์ถูกต้องและเชื่อถือได้ ปัจจุบันการเข้าใช้ช่องสัญญาณของหน่วยร่วมเซนเซอร์จะเป็นแบบสุ่มเข้าใช้งาน(random access) ที่เป็นเช่นนี้เพราะการใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบไปด้วยหน่วยร่วมเซนเซอร์อยู่เป็นจำนวนมากและไม่มีโครงสร้างที่แน่นอนทำให้การควบคุมแบบรวมศูนย์ทำได้ยาก และการใช้ช่องสัญญาณแบบสุ่มทำให้เกิดความเท่าเทียมกันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ
- **ชั้นเครือข่าย (network layer)** รับผิดชอบการรับ-ส่งข้อมูลระดับเครือข่าย เนื่องจากเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายใช้การส่งข้อมูลแบบมัลติฮอปเพื่อส่งข้อมูลจากหน่วยร่วมเซนเซอร์ไปยังสถานีฐาน การคำนวณหาเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลเป็นหน้าที่หลักของชั้นนี้
- **ระนาบพลังงาน(power plane)** รับผิดชอบควบคุมการใช้พลังงานในชั้นต่างๆ ของหน่วยร่วมเซนเซอร์ และเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายให้มีประสิทธิภาพ โดยอาจประสานงานข้ามชั้น (cross layer) เช่น หน่วยร่วมเซนเซอร์ที่เหลือนพลังงานน้อย อาจจะลดพลังงานในการส่งข้อมูลในชั้นกายภาพ โดยประสานงานกับชั้นเครือข่าย เพื่อเลือกเส้นทางที่ควรส่งข้อมูลในกรณีที่ระยะส่งข้อมูลลดลงเนื่องจากการลดพลังงานในการส่งข้อมูล

2.1.4.2 การพิจารณาระบบเครือข่าย

- การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากหน่วยร่วมเซนเซอร์มีพลังงานอยู่จำกัด ซึ่งพลังงานที่มีเก็บสะสมอยู่เป็นตัวแปรหนึ่งของอายุการใช้งานหน่วยร่วมเซนเซอร์และอายุของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย
- ความล่าช้าของข้อมูล การใช้งานเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในบางประเภทต้องการให้ได้ข้อมูลเร็วที่สุดหรือมีระดับความล่าช้าของข้อมูลไม่เกินค่าที่กำหนดหลังจากหน่วยร่วมเซนเซอร์เก็บข้อมูลได้ เช่น ในงานสัญญาณเตือนภัยสึนามิ ไฟป่า หรือในงานควบคุมที่

ความล่าช้าของข้อมูล(delay-sensitive) มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุม เป็นต้น

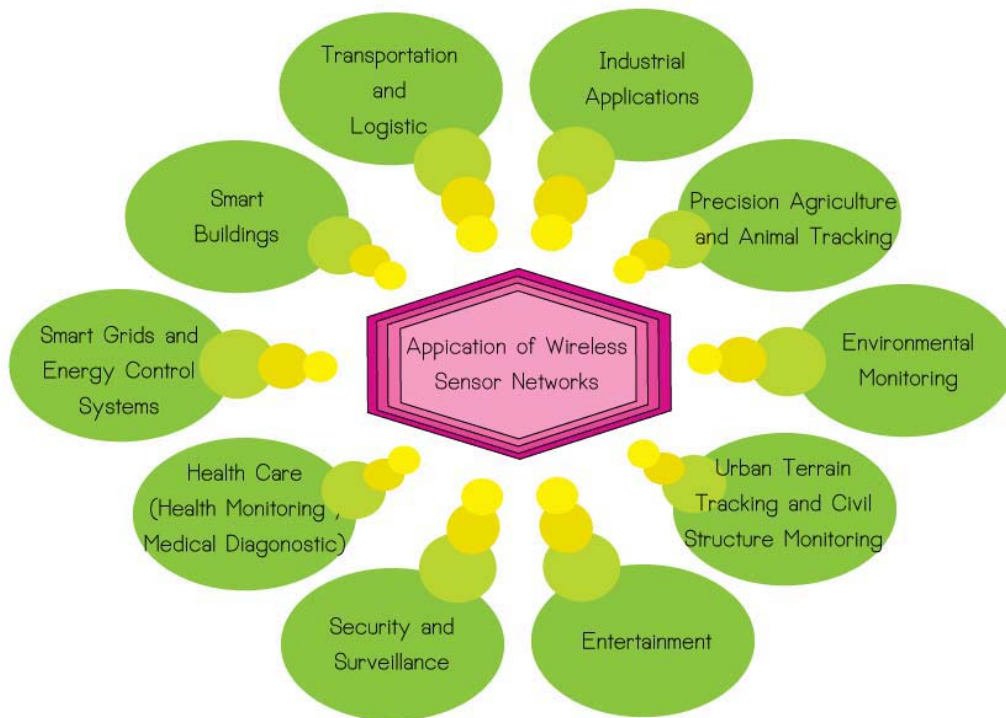
- ความถูกต้องของข้อมูล เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายควรจะให้ข้อมูลที่ถูกต้องสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับความแม่นยำของเซนเซอร์และการประมวลผลข้อมูลในหน่วยร่วม เช่น เซอร์หรือในเครือข่ายเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องที่สุด
- ความทนทานต่อความเสียหาย เหตุการณ์ที่หน่วยร่วมเซนเซอร์ไม่สามารถทำงานได้มีโอกาสดังนั้นเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อให้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายยังคงทำงานต่อไปได้ เช่น การมีเส้นทางสำรองในการเชื่อมต่อเครือข่ายและในการส่งข้อมูล
- ความสามารถในการส่งข้อมูล แบ่งออกเป็น ความสามารถในการส่งข้อมูลของแต่ละหน่วยร่วมเซนเซอร์ และความสามารถในการส่งข้อมูลของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในกรณีที่ส่งข้อมูลไม่พร้อมกัน ความสามารถในการส่งข้อมูลของแต่ละหน่วยร่วมเซนเซอร์เป็นสิ่งสำคัญ แต่ในกรณีที่ส่งข้อมูลพร้อมๆ กันจำนวนมาก ความสามารถในการส่งข้อมูลของเครือข่ายเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย
- จำนวนหน่วยร่วมเซนเซอร์ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเป็นปัจจัยหลักกับค่าใช้จ่ายและความคุ้มค่าในการเลือกใช้ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

2.1.5 การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

แนวคิดของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายนั้นอยู่บนพื้นฐานสมการง่ายๆ คือ

การรับรู้ (Sensing) + หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) + คลื่นวิทยุ (Radio wave) = หลากหลายการใช้งานแอปพลิเคชัน

ลักษณะงานที่ใช้โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย มีหลากหลายสาขา ซึ่งตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งานของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย [1]

2.2 เทคโนโลยี ZigBee

เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้เทคโนโลยี ZigBee เป็นการสื่อสารที่ออกแบบขึ้นสำหรับการสื่อสารในเครือข่ายเซนเซอร์แบบไร้สาย โดยเริ่มจากการกำหนดมาตรฐานการรับ-ส่งข้อมูลแบบ IEEE 802.15.4 ที่เน้นการสื่อสารแบบประหยัดพลังงาน ความเร็วการรับส่งข้อมูลต่ำและมีราคาถูก การสื่อสารลักษณะนี้ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการสื่อสารระหว่างเครื่องตรวจวัดหรือเซนเซอร์ที่ต้องการสื่อสารแบบไร้สาย เพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนสำหรับการติดตั้ง เช่น บริเวณโรงงานหนึ่งๆ อาจจะต้องใช้จำนวนเซนเซอร์ปริมาณมากๆ และเครื่องรับส่งที่มีราคาถูก และประหยัดพลังงาน

2.2.1 คุณสมบัติ ZigBee

คุณสมบัติ ZigBee แบบการสื่อสารระยะใกล้ มีดังนี้

- มีการเชื่อมต่ออย่างซับซ้อนเพื่อรองรับการเชื่อมต่อสำหรับเครือข่ายขนาดใหญ่
- การใช้งานแบบประหยัดพลังงานเพื่อการใช้งานได้ยาวนานจากพลังงานแบตเตอรี่
- การสื่อสารระยะใกล้ในระยะ 10 – 100 เมตร
- เหมาะสำหรับการเฝ้าระวัง (Monitor) และการควบคุม (Control) ใช้งานอุตสาหกรรม งานสิ่งแวดล้อม งานก่อสร้างและงานทางการแพทย์
- เน้นการสื่อสารข้อมูลที่มีความเร็วประมาณ 125 – 250 กิโลบิตต่อวินาที (kbps)

2.2.2 ลักษณะของ ZigBee

ZigBee มุ่งเน้นการใช้งานภายใต้เครือข่าย IEEE 802.15.4 รวมถึงคุณสมบัติของการใช้พลังงานต่ำ ที่จำเป็นสำหรับใช้งานใน 2 โหมดหลัก (Tx / Rx หรือ Sleep) ความหนาแน่นของโหนดสูง มีต้นทุนต่ำ และการใช้งานง่าย

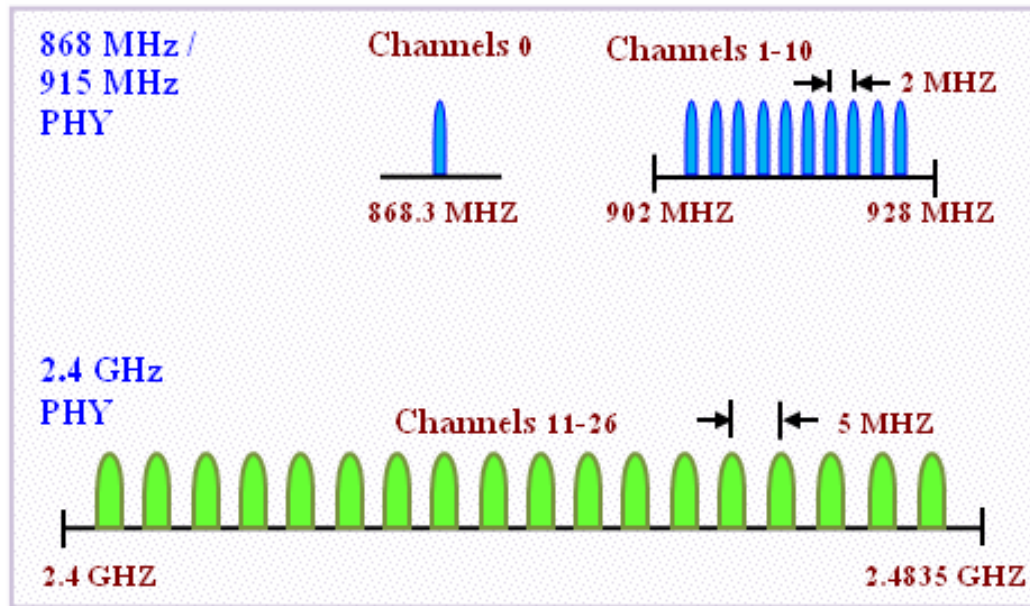
ZigBee มีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

- 2.4 GHz and 868/915 MHz dual PHY modes
- มี 3 ย่านความถี่ : 2.4-2.4835 GHz, 868-870 MHz และ 902 -928 MHz โดยแต่ละย่านจะมีช่องสัญญาณ 16 ช่อง 10 ช่อง และ 1 ช่อง ตามลำดับ
- อัตรารับส่งข้อมูล จะอยู่ที่ 250 Kbps 40 Kbps และ 20 Kbps ตามลำดับเช่นกัน
- มีการจัดสรรการใช้งานที่ 16 บิต หรือ 64 บิต
- การจัดสรรในเรื่องการรับประกันช่วงเวลา (GTSS)
- มีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ Carrier sense multiple access (CSMA - CA) เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกัน
- การเชื่อมต่อโปรโตคอลมีความน่าเชื่อถือ เป็นที่ยอมรับ
- ใช้พลังงานต่ำ
- มีตัวตรวจจับพลังงาน (ED)
- มีตัววัดคุณภาพของการเชื่อมโยง (LQI)

2.2.3 การรับส่งข้อมูลเบื้องต้น

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 กำหนดขึ้นสำหรับการรับส่งข้อมูลเบื้องต้นในวงจรเครื่องรับส่งวิทยุ (Physical Layer) และการควบคุมการรับส่ง (Link Layer) ดังต่อไปนี้ การสื่อสารใช้คลื่นวิทยุ ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) แบ่งออกเป็น 16 ช่องสัญญาณๆ ละ 5 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) สำหรับความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) แบ่งออกเป็น 10 ช่องสัญญาณๆ ละ 2 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) ใช้การผสมสัญญาณ (modulation) แบบ Offset Quadrature Phase Shift Keying (Offset-QPSK) และใช้การแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) ที่มีอัตราการสเปรดดิ้ง (spreading) 2 ล้าน chip/sec ควบคุมการรับส่งข้อมูลโดยใช้โปรโตคอลแบบ Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance (CSMA/CA) และเพื่อให้การสื่อสารเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเป็นมาตรฐานเดียวกัน จึงกำหนดมาตรฐานเพิ่มสำหรับการเชื่อมต่อเป็นเครือข่าย (Network Layer) และการนำไปใช้งาน (Application Layer) ร่วมกับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็นมาตรฐานใหม่ที่กำหนดโดยองค์กร ZigBee Alliance

ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า Zigbee กำหนด ย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐานไว้ 3 ย่านความถี่ คือ ย่าน 2.4 GHz , ย่าน 915 MHz และย่าน 868 MHz โดยแต่ละย่านจะมีช่องสัญญาณ 16 ช่อง, 10 ช่อง และ 1 ช่อง ตามลำดับ ส่วน อัตรารับส่งข้อมูล (ทางอากาศ) จะอยู่ที่ 250 Kbps , 40 Kbps , 20 Kbps ตามลำดับเช่นกัน



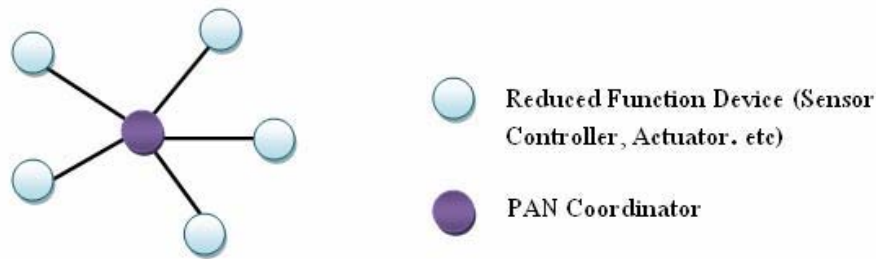
รูปที่ 2.5 Operating Frequency Bands [3]

2.2.4 NETWORK TOPOLOGIES

NETWORK TOPOLOGIES หรือ การเชื่อมต่อเป็นโครงข่ายของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย กำหนดโดยมาตรฐาน ZigBee มีอยู่สองรูปแบบ ได้แก่แบบดาว (Star Topology) และแบบระดับเดียว (Peer-to-Peer Topology)

2.2.4.1 Star Topology

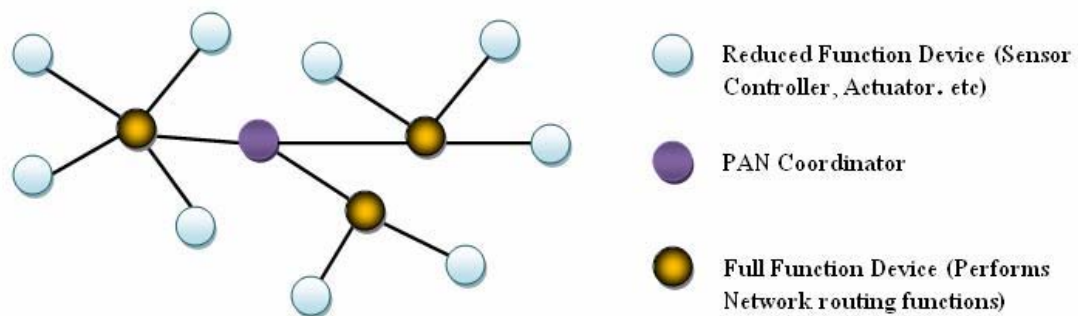
การเชื่อมต่อแบบ Star เหมือนการเชื่อมต่อแบบโครงข่ายจิ้ง (Piconet) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ใน Topology แบบ Star การสื่อสารเป็นที่ยอมรับกันระหว่างอุปกรณ์และการควบคุม ส่วนกลางเดียว (Single Central Controller) ที่เรียกว่า PAN Coordinator ที่เป็นตัวขับเคลื่อนหลัก การใช้ประโยชน์จากเครือข่ายที่มี Topology แบบนี้ เช่น แบบ Home Automation, Personal Computer(PC) Peripherals, Toys และ Games หลังจาก FFD Active สำหรับช่วงเวลาแรกมันอาจ จะสร้างเครือข่ายของมันเองและกลายมาเป็น PAN Coordinator ในแต่ละ Star Network จะเลือก PAN Id ซึ่งปัจจุบันไม่ได้ถูกใช้โดยเครือข่ายอื่นๆภายใน Radio Sphere นี้จะยอมให้แต่ละ Star Network ทำงานอย่างอิสระ



รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อแบบดาว (Star) ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย [4]

2.2.4.2 Peer-to-Peer Topology

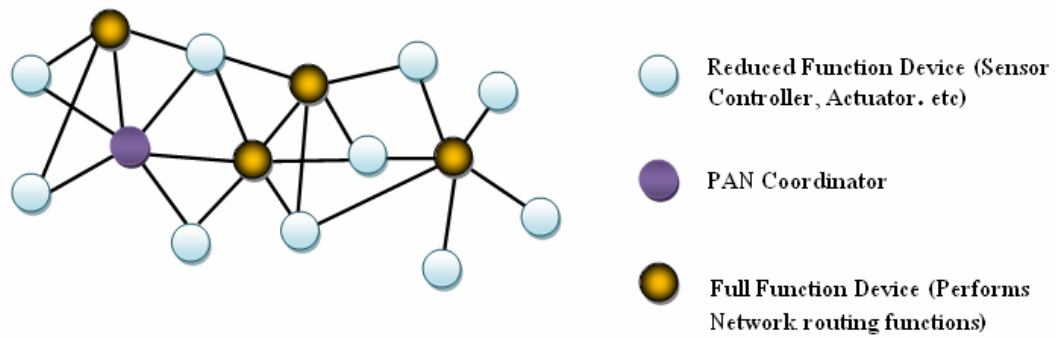
สำหรับการเชื่อมต่อแบบระดับเดียวเป็นการเชื่อมต่อเพื่อขยายโครงข่ายให้กว้างออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยในการเชื่อมต่อนั้นจะต้องมี PAN Coordinator ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับ อุปกรณ์เซนเซอร์ที่มีความสามารถเต็ม (Full-Function Device) ในการหาเส้นทาง (Routing) และอุปกรณ์เซนเซอร์แบบที่มีความสามารถลดลง (Reduced-Function Device) จะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่มีความสามารถเต็มอีกทีหนึ่ง ซึ่งอุปกรณ์ที่มีความสามารถเต็มเทียบเท่า ได้กับอุปกรณ์บลูทูธแบบ Master ที่มีหน้าที่เชื่อมต่อกับ Master ตัวอื่นๆ เพื่อให้เกิดเครือข่ายที่ใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.7 การเชื่อมต่อแบบ Peer-to-Peer ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย [4]

2.2.4.3 Cluster tree Topology

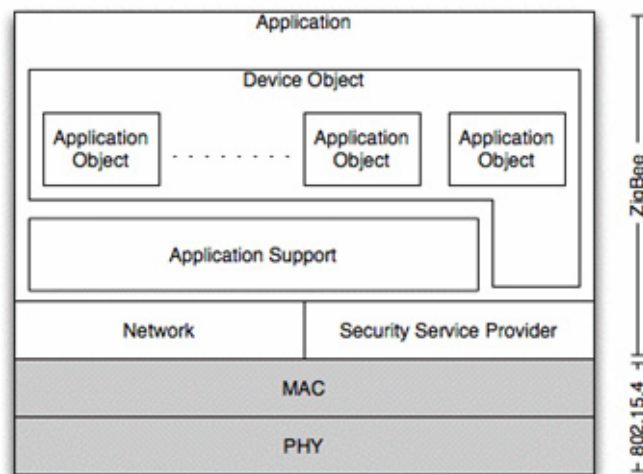
ในการสร้างระบบ Cluster tree PAN Coordinator จะใช้ตัวเองเป็น Cluster แรกเรียกว่า Cluster Head (CLH) และ Cluster Identifier (CID) เป็นศูนย์ หลังจากนั้นทำการเลือก PAN Identifier และทำการ Broadcasting Beacon Frame ไปยังอุปกรณ์ข้างเคียง และเมื่ออุปกรณ์ตัวอื่นได้รับก็จะส่ง Request ไปที่ CLH จากนั้น CLH ทำการยอมรับและเพิ่มชื่ออุปกรณ์ใน Neighbor List แบบเป็นลูกข่าย (child) ในขณะที่อุปกรณ์ที่เข้ามาใหม่จะเพิ่มชื่อ CLH ตัวนั้นใน Neighbor List ว่าเป็นแม่ข่าย (parent) หลังจากนั้นก็ทำการส่ง Beacon ไปยังอุปกรณ์ตัวอื่นๆ ต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเชื่อมต่อแบบ Cluster tree ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย [4]

2.2.5 ZigBee Architecture

สถาปัตยกรรมของ ZigBee แสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ZigBee และ IEEE 802.15.4 Protocol Stack [3]

ZigBee นำ Physical Layer และ MAC Layer ของ IEEE 802.15.4 ซึ่งเป็นมาตรฐานการกำหนดการสื่อสารไร้สายแบบ WPAN (Wireless Personal Area Network) มาทำงานใน Layer ที่ต่ำกว่า เช่น เรื่องของ ระดับกำลังสัญญาณ , Link Quality , Access control , Security และ Application Layers

ส่วนลักษณะของ ZigBee คือมีทางเข้าช่องสัญญาณโดยการใช้ Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA - CA) หรือมีทางเข้าช่องสัญญาณหลายๆ ทาง เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันชนิดอุปกรณ์ของ ZigBee มีอยู่ 2 ชนิดคือ แบบ Physical Device และ Logical Device และแบบ Physical Device สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

- **Full Function Device : FFD** เป็นเราเตอร์ที่เป็นสื่อกลางในการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆ ใช้พลังงานจาก Power Line ทำงานได้ในทุก Topology และสามารถทำเป็นจุด

เชื่อมต่อกันได้ โดย FFD สามารถที่จะทำงานได้สาม mode คือ PAN coordinator, Coordinator หรือ Device ซึ่งใน ZigBee Network ต้องมี FFD อย่างน้อยหนึ่งตัวซึ่งจะทำหน้าที่เป็น PAN coordinator โดย FFD สามารถที่จะติดต่อได้ทั้ง FFD และ RFD แต่ RFD จะสามารถติดต่อได้เพียง FFD เท่านั้น

- **Reduced Function Device : RFD** เหมาะแก่การเชื่อมต่อภายในเครือข่ายในพลังงานจากแบตเตอรี่ ไม่สามารถถ่ายทอดข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆได้ ทำได้ง่ายในเครือข่ายที่เป็นแบบ Star แบบ Logical Device มี 3 ประเภท คือ ZigBee Coordinators เป็นจุดที่ประสานเชื่อมต่อ ทำหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลในเครือข่าย ZigBee Routers ทำหน้าที่จัดการเส้นทางของข้อความที่ส่งผ่านภายใน โครงข่ายระหว่างคู่ของโหนดใดๆ และ ZigBee และ Devices เป็นโหนดที่อยู่ในส่วนของผู้ใช้งานโดยสามารถเป็นได้ทั้งแบบ RFD และ FFD

ดังนั้น ZigBee แบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 3 แบบ คือ

1. Coordinator มีหน้าที่สร้างการสื่อสาร เชื่อมโยงเครือข่าย ระหว่าง End Device กับ Router หรือ Coordinator กับ Coordinator ด้วยกัน หรือ Coordinator กับ Router กำหนด address ให้กับ device ที่อยู่ในวงเครือข่าย ไม่ให้ซ้ำกัน ดูแลจัดการเรื่องการ Routing เส้นทาง ซึ่งเทียบได้กับ FFD

2. End Device เป็นอุปกรณ์ปลายทางสุด ซึ่งจะรับสัญญาณจาก Sensor ที่ปลายทาง โดยที่ใช้พลังงานต่ำในการทำงาน เทียบได้กับ RFD หรือ FFD บางกรณี ขึ้นอยู่กับ sensor ที่ใช้

3. Router มีหน้าที่ รับส่งข้อมูล ในเส้นทางต่าง ๆ ของเครือข่าย ซึ่งเทียบได้กับ FFD

ส่วนสำคัญสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย คือกลไกการประหยัดพลังงานซึ่งตัวอุปกรณ์เซนเซอร์สามารถกำหนดระยะเวลาในการเข้าสู่การหลับหรือพักการทำงาน (Sleep Mode) โดยตัวอุปกรณ์จะทำหน้าที่ลดการใช้พลังงานให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน การกำหนดการหลับนี้ทำได้โดยการร้องขอไปที่อุปกรณ์ Full Function Device เพื่อบอกระยะเวลาที่จะทำการหลับและเมื่อมีการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ตัวอื่นมายังอุปกรณ์ที่หลับอยู่ อุปกรณ์ Full Function Device จะเก็บข้อมูลไว้ให้ชั่วคราว และถามหาอุปกรณ์ตัวนั้นเป็นระยะเมื่ออุปกรณ์ตัวนั้นตื่นหรือพร้อมทำงานต่อจะได้รับการถามหา อุปกรณ์ตัวนั้นจึงส่งการร้องขอข้อมูลที่ได้เก็บไว้ให้ และจึงทำการรับส่งข้อมูลจนได้รับข้อมูลครบสมบูรณ์ต่อไป

2.3 XBee

XBee เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รับส่งข้อมูลแบบไร้สาย และสามารถสร้างระบบเครือข่ายขึ้นมาได้โดย ZigBee ได้อ้างอิง มาตรฐานตาม IEEE 802.15.4 โดยสามารถแบ่ง หน้าที่การทำงานของ XBee ตามรูปแบบการสื่อสารในลักษณะต่างๆ ได้ อาทิ Coordinator, Router หรือ End Device

XBee เป็นอุปกรณ์ที่มี Microcontroller และ RF IC อยู่ภายใน ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ transceiver (อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ) แบบ Half Duplex ย่านความถี่ 2.4 GHz มีการจัดการโดยใช้พลังงานต่ำ ใช้งานง่าย มี interface ที่ใช้รับและส่งข้อมูลกับ XBee เป็น UART (TTL) ซึ่งสำหรับทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถนำขาที่ใช้ติดต่อสื่อสาร UART ของ XBee ต่อเข้ากับ UART ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เลย

2.3.1 XBee Topology

ในการสร้างโครงข่ายไร้สายของ XBee นั้น จะต้องประกอบด้วยโหนด จำนวนอย่างน้อยที่สุด 2 ชนิด คือ Coordinator node และ node ลูกข่าย ชนิดใดชนิดหนึ่ง (Router/End device) จึงจะสามารถสื่อสารและทำงานในรูปแบบของ PAN (Personal area network) ได้โดย ZigBee สามารถแบ่งรูปแบบโครงข่ายได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

2.3.1.1 Star (Broadcast)

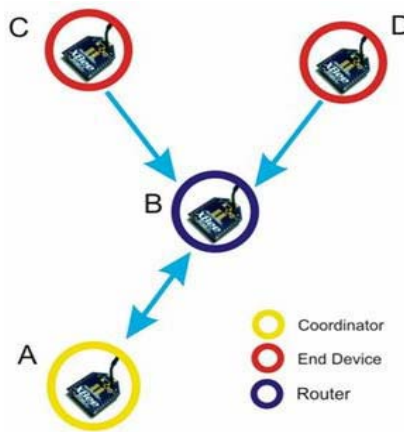
การเชื่อมต่อแบบ Star หรือ แบบ Broadcast เป็นการรับส่งข้อมูลแบบไม่เฉพาะเจาะจง จุดหมายปลายทาง หรือ XBee ทุกตัวที่อยู่ในระบบโครงข่ายเดียวกัน สามารถรับข้อมูลทุกข้อมูลได้ทุกตัว



รูปที่ 2.10 Star (Broadcast) Network [5]

2.3.1.2 Cluster Tree (Tree) Network

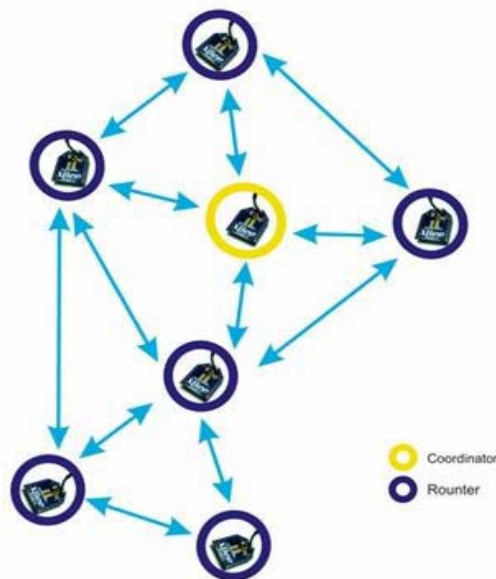
เป็นการรับส่งข้อมูลแบบส่งผ่าน เช่น A ต้องการติดต่อกับ C แต่ C อยู่ไกลจาก A จน A ไม่สามารถติดต่อกับ C ได้ แต่พอดีมี B ที่อยู่ระหว่าง A กับ C ดังนั้น Cluster Tree จะใช้ B เป็นเหมือนตัวกลางเชื่อมการติดต่อ (Repeater) ระหว่าง A กับ C



รูปที่ 2.11 Cluster Tree (Tree) Network [5]

2.3.1.3 Mesh

การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Mesh เป็นโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจาก ข้อมูลสามารถส่งไปถึงเป้าหมายได้หลายทาง ทำให้ระบบนี้สามารถรับส่งข้อมูลไปยังจุดหมายปลายทางได้ แม้จะเกิดความเสียหายของระบบในบางส่วนก็ตาม (ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบของผู้ใช้ด้วย) ระบบนี้ จึงเป็นระบบที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก



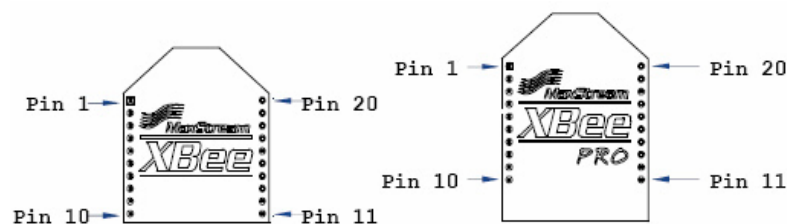
รูปที่ 2.12 Mesh Network [5]

2.3.2 Feature Summary ของ XBee

- Operating Frequency ISM Band 2.4 GHz
(ISM Band หมายถึงย่านความถี่ใช้งานเพื่อการวิจัยซึ่งจะอนุญาตให้ใช้กับอุตสาหกรรม)

(Industrial) วิทยาศาสตร์ (Scientific) และ ทางการแพทย์ (Medical) รวม เป็น ISM)

- มีสายอากาศให้เลือกใช้หลายแบบ คือ แบบ Chip Ant, Whip Ant, UFL con, RPSMA con โดย 2 แบบหลังเราต้องไปหาเสาอากาศย่าน 2.4 GHz ที่เป็น connector แบบ UFL หรือ SMA
- Supply Voltage อยู่ที่ 2.8-3.4 V
- Power Down Current < 10 uA
- มี RF data rate อยู่ที่ 250 Kbps (เป็นส่วนของสัญญาณที่ส่งผ่านอากาศ)
- มี Serial interface data rate อยู่ระหว่าง 1200–115200 Bps (เป็นส่วนที่ติดต่อสื่อสารกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์)
- เป็น Spread Spectrum ชนิด DSSS (Direct Sequence)
- การกำหนด addressing มีลำดับลักษณะคือ กำหนด PAN ID สำหรับเครือข่ายหนึ่ง ๆ , กำหนด Channel และ กำหนด address ของแต่ละตัว



รูปที่ 2.13 XBee [6]

2.3.3 กำลังส่งสายอากาศและสัญญาณรบกวนของ XBee

XBee นั้นใช้ย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านเดียวกันกับ Bluetooth หรือ Wireless LAN (WLAN) สัญญาณมันจะเกิดการรบกวนกัน เช่น มี WLAN ใช้ Access Point 1 ตัว และเราก็ก็นำเครื่องโทรศัพท์แบบถือได้ (2.4 GHz cordless telephones) ซึ่งก็ใช้ย่าน 2.4 GHz เช่นกัน แล้วเราก็ก็นทดสอบใช้งาน XBee ผลปรากฏว่า การรับส่งสัญญาณก็ขาดหายไปบ้าง แต่บางครั้งก็ครบถ้วนนั้นอาจเป็นเพราะกำลังส่งของ XBee และระยะทางของ node ที่เราก็นทดสอบใกล้กันมาก

ช่องสัญญาณย่านความถี่ 2.4 GHz นี้เรียกว่าเป็นย่านไมโครเวฟ หลักสำคัญของย่านไมโครเวฟอย่างหนึ่งคือ การวางตำแหน่งตัวรับส่งสัญญาณนั้น ต้องตั้งแบบ line of sight (ไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ) ถึงจะได้กำลังส่งสูงสุด สำหรับกำลังส่งของ XBee ในรุ่น Pro จะใช้ 50-60 mW ใน datasheet บอกว่าได้ไกลถึง 1.5 km. แต่ก็ต้องเป็นลักษณะของ line of sight หากไม่ใช่เงื่อนไขนี้ เราจะได้ระยะการรับส่งสัญญาณที่ลดลง นอกเหนือจากเรื่อง line of sight แล้ว ยังมีเรื่องสัญญาณรบกวนต่างๆ (Interference)

สายอากาศตัว XBee มีให้เลือกที่เป็นแบบสำเร็จรูปพร้อมใช้ ไม่ต้องหาสายอากาศมาต่อเพิ่ม คือ สายอากาศแบบ chip และแบบ whip

สายอากาศแบบ chip นั้น ก็มีข้อดีตรงที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด แต่มีอัตราการขยายน้อยกว่า สายอากาศแบบ whip สายอากาศแบบ chip จึงมีระยะรับส่งข้อมูลที่ลดลงจากรายละเอียดที่ระบุไว้ ยกตัวอย่างเช่น รุ่น Pro ที่กล่าวว่าสามารถส่งได้ไกลสูงสุด 1.5 กิโลเมตรในทิศทางแบบ line of sight แต่ถ้าหากเลือกใช้สายอากาศแบบ chip แล้ว จะได้ระยะสูงสุดอยู่ที่ 500 กว่าเมตร



รูปที่ 2.14 รูปสายอากาศแบบ Wire (Whip) และแบบ Chip ตามลำดับ [6]

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณลักษณะของมาตรฐาน XBee [6]

Module	Antenna Type	Outdoor Distance (Visual Line of sight)	Indoor Distance (Office Building)	Indoor Distance (Warehouse)
XBee	Chip	470 ft. (143 m)	80 ft. (24 m)	-
	Whip	845 ft. (258 m)	80 ft. (24 m)	84 ft. (26 m)
XBee-PRO	Chip	1690 ft. (515 m)	140 ft. (43 m)	-
	Whip	4382 ft. (1335 m)	140 ft. (43 m)	355 ft. (106 m)

2.3.4 XBee Association

ในเครือข่าย ZigBee ต้องมีการทำงานในโหมดประหยัดพลังงาน ในช่วงเวลาที่ไม่มีการทำงาน รับส่งข้อมูล ดังนั้นตัว XBee จึงมี Parameter ที่จะกำหนดการทำงานสำหรับ Sleep mode (Parameter A1, A2, SP, ST)

2.3.5 XBee Addressing

ตัว XBee จะสามารถกำหนดค่าประจำตัวอ้างอิงของมัน (Address) 2 แบบ คือ แบบ 16 bit address และ 64 bit address ปกติแล้ว XBee ทุกตัวจะถูกกำหนดค่ามาจากโรงงานเป็น Address 64 bit อยู่แล้ว ซึ่งจะสามารถอ่านค่าได้จาก parameter SH+SL การใช้งาน Address 64 bit สามารถทำได้โดยกำหนด parameter MY ให้มีค่า 0xFFFF หรือ 0xFFFE ส่วนการกำหนด 16 bit address นั้นทำได้โดยกำหนด parameter MY ให้มีค่าน้อยกว่า 0xFFFE โดยจะเรียกเป็น mode การทำงาน 2 ประเภทคือ

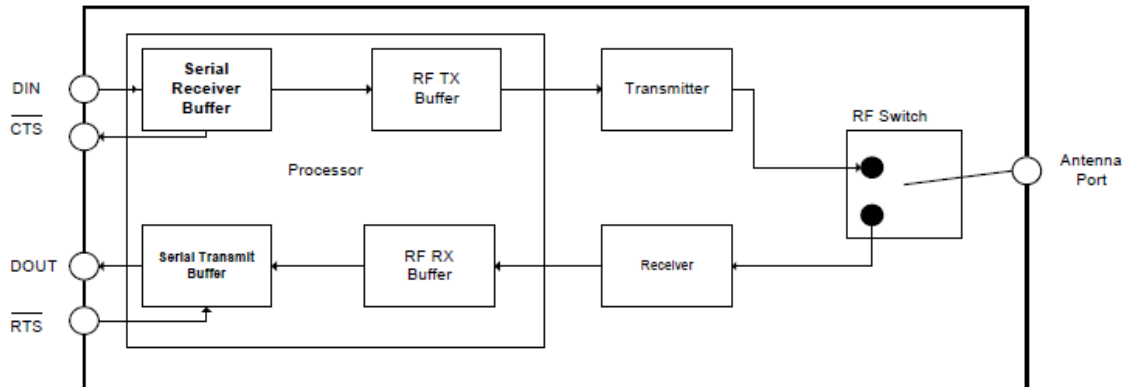
- **Unicast Mode** คือ การรับส่งข้อมูลโดยอาศัยหลักการ Acknowledgement คือหากทางด้านส่งนั้นส่งข้อมูลไป แต่ไม่ได้รับ Ack ตอบกลับจากตัวรับ ก็จะทำให้การส่งข้อมูลใหม่
- **Broadcast Mode** คือการส่งข้อมูลไปยังปลายทางให้ได้รับข้อมูลทุกตัว

2.3.6 XBee Operation Mode

XBee จะสามารถแบ่งช่วงการทำงานได้เป็น 5 แบบ คือ

- **Idle Mode** โหมดนี้จะเป็นโหมดที่ไม่ได้รับส่งข้อมูล ตัว XBee เตรียมที่จะทำงานในโหมดอื่น ๆ ต่อไปทันที หากมีเงื่อนไขบางอย่าง
- **Transmit / Receive Mode** (พุทรวม 2 Mode) คือช่วงที่ XBee มีการรับ หรือส่งข้อมูล โดยจะแบ่งลักษณะการทำงานย่อยออกเป็น Direct กับแบบ Indirect การกำหนด Address ต้นทางและปลายทาง Clear Channel Assessment และการตอบรับ Acknowledgement
- **Sleep Mode** คือช่วงที่ XBee อยู่ในสถานการณ์ทำงานพลังงานต่ำที่สุดเมื่อไม่มีการใช้งาน
- **Command Mode** คือ เป็นส่วนการปรับ parameter ของ XBee ซึ่งจะมีการกำหนด 2 แบบคือแบบ AT command กับแบบ API Command

2.3.7 Data Throughput ของ XBee



รูปที่ 2.15 Internal Data Flow Diagram [6]

โดยทั่วไปการใช้งาน RF Module ควรจะกำหนดให้มี Buffer ด้วย เพื่อการปรับอัตรารับส่งข้อมูลระหว่างตอนที่รับส่งทางอากาศ กับตอนที่รับส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ได้อย่างเหมาะสม

Data ที่รับส่งระหว่าง MCU กับ XBee จะมีข้อจำกัดเรื่อง Packet อาจถูก Drop ได้เนื่องจาก Data Overflow โดยสำหรับด้านการส่งข้อมูลไปที่ XBee เพื่อออกอากาศนั้น ที่ขา DI จะมี

Buffer อยู่ประมาณ 202 Bytes หากส่งเกิน Buffer จะเกิดการ Drop packet ที่ ซึ่งทางฝั่งรับข้อมูล ที่ ขา DO ก็มี Buffer อยู่เช่นกัน โดยจะมี Parameter ที่เกี่ยวข้องกับ Data Throughput คือ RO และ BD ค่า RO คือค่า Packetization Timeout ซึ่งเป็น delay ของข้อมูลที่อยู่ใน DI Buffer ก่อนที่จะถูก encapsulate ไปที่ส่วน RF transmission เพื่อส่งข้อมูลออกอากาศ หากตั้ง RO = 0 Data ที่ รับเข้ามาจาก MCU จะถูก XBee Encapsulate Packet ส่งออกอากาศทันที ดังนั้นเราจะมี Parameter RO และ BD ที่จะช่วยในการปรับ Data รับส่งให้สามารถรับส่งกันได้ทัน ไม่ให้มีการ Drop Packet ได้ ในกรณีที่ส่งข้อมูลเกิน 200 Bytes

นอกจากนี้ยังมี PIN CTS (ขา12) และ RTS(ขา16) ช่วยเตือนเราเวลาที่ Buffer ภายในใกล้ จะเต็ม โดยในฝั่งส่ง DI Buffer จะส่ง Signal มาทาง CTS เมื่อ DI Buffer เหลือพื้นที่จัดเก็บอยู่อีก 17 Bytes และส่ง Clear Signal ที่ CTS เมื่อ DI Buffer เหลือพื้นที่จัดเก็บมากกว่า 34 Bytes

ดังนั้น สำหรับการเขียนโปรแกรม รับส่งข้อมูลกับ XBee ต้องคำนึงเรื่อง Buffer ด้วย แต่ ในทางปฏิบัติสำหรับงาน Sensor Network ก็ไม่ได้รับส่งข้อมูล Stream Data ยาว ๆ เท่าไหร่

2.4 เทคนิคพื้นฐานของการหาตำแหน่งของเป้าหมาย (Classical Localization Techniques)

เทคโนโลยีด้านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย มีการนำมาใช้ในการวัดและการตรวจสอบการ เปลี่ยนแปลงต่าง ๆ มีการนำเทคโนโลยีทางด้านนี้มาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่ง (Localization) โดย เทคโนโลยีนี้เหมาะสมสำหรับการใช้ฟังก์ชันในการหาตำแหน่งทั้งภายในและภายนอกอาคาร จากการ ประยุกต์ใช้งานกันอย่างมากมายสำหรับการหาตำแหน่งและการติดตามเป้าหมาย ระบบและอัลกอริทึม ในการหาตำแหน่งของเป้าหมายได้รับการวิจัยและค้นคว้าอย่างกว้างขวาง โดยความถูกต้องในการหา ตำแหน่งและความน่าเชื่อถือของระบบการหาตำแหน่งถือเป็นปัจจัยหลักที่ต้องพิจารณา

ในการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิคหลัก คือเทคนิคที่ใช้ พื้นฐานของการคาดคะเน (Proximity-based) หรือบางครั้งเรียกว่าเทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิง เเกอร์ปรีนต (Fingerprint-based) และเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง (Range-based)

2.4.1 เทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง

(Range-based Localization Technique)

เทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง เป็นการหาตำแหน่งของเป้าหมาย โดยใช้การคำนวณระยะทางระหว่างโหนดอ้างอิงกับเป้าหมาย ระยะทางดังกล่าวสามารถคำนวณได้ จากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสัญญาณที่ได้รับได้ ความถูกต้อง แม่นยำของการหาตำแหน่งด้วยวิธีนี้ จะ ขึ้นอยู่กับคุณภาพของพารามิเตอร์ของสัญญาณที่ได้รับได้ สำหรับพารามิเตอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการ คำนวณหาระยะทางระหว่างโหนดคือการวัดระดับความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ (Receive Signal Strength Indicator (RSSI)) การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากเวลาของการมาถึง (Time of Arrival (TOA)) และการหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากความแตกต่างของเวลาของสัญญาณที่มาถึง (Time Difference of Arrival (TDOA))

2.4.1.1 การวัดค่าหาความแรงของสัญญาณ (RSSI)

การวัดค่าหาความแรงของสัญญาณเป็นวิธีการวัดค่าความแรงของสัญญาณวิทยุระหว่างเซนเซอร์ไร้สายตัวหนึ่งกับเซนเซอร์ไร้สายอีกตัวหนึ่ง มีความสัมพันธ์กันตามสมการ 2.1

$$RSSI = -10 n \log_{10}(d) + A \quad (2.1)$$

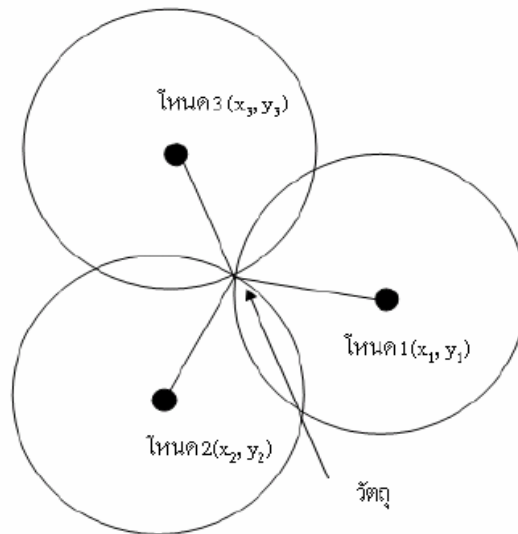
เมื่อ RSSI คือค่าความแรงของสัญญาณวิทยุ มีหน่วยเป็น เดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm)

n คือค่าคงที่การกระจายสัญญาณของสถานที่นั้นๆ

d คือระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ไร้สาย (เมตร)

A คือค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับใน 1 เมตร (dBm)

จากสมการข้างต้น ถ้าค่าระยะทาง (d) เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ค่า RSSI ลดลง ค่า d สามารถหาค่าได้จากการนำค่า RSSI ที่วัดได้เมื่อรับจากเครื่องส่งเครื่องหนึ่งๆ และค่า A ที่วัดได้รวมถึงค่า n ซึ่งเป็นค่าคงที่ ไปแทนในสมการ (2.1) ซึ่งในการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายจาก d นี้จะต้องมีเครื่องส่ง (โหนด) อย่างน้อย 3 ตัว จึงจะทำให้สามารถหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง โดยใช้พารามิเตอร์ RSSI

เทคนิคประยุกต์ของการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางด้วยพารามิเตอร์ RSSI

1) Maximum Likelihood Algorithm

วิธีนี้เป็นหนึ่งในวิธีการคำนวณหาตำแหน่ง บนพื้นฐานของการคำนวณระยะทาง โดยใช้พารามิเตอร์ RSSI เมื่อหาระยะทางระหว่างเครื่องส่ง (หรือโหนดอ้างอิง) และเครื่องรับ (d) ได้แล้ว จะ

นำค่านี้แทนในสมการของ Maximum Likelihood ซึ่งจะทำให้การแปลงให้อยู่ในรูปสมการของพิกัดคาร์ทีเซียนดังสมการ (2.2)

$$\begin{aligned} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 &= d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 &= d_2^2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 &= d_n^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดยในที่นี้ พิจารณาวามีโหนดอ้างอิงทั้งหมด n ตัว จากนั้นสามารถจัดรูปแบบได้ดังสมการ (2.3)

$$\left\{ \begin{aligned} x^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x + y_1^2 \\ - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y &= d_1^2 - d_n^2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 - 2(x_{n-1} - x_n)x + y_{n-1}^2 \\ - y_n^2 - 2(y_{n-1} - y_n)y &= d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{aligned} \right. \quad (2.3)$$

โดยที่ x_n, y_n เป็น ตำแหน่งในแกน x และแกน y ของโหนดอ้างอิงใดๆ และ y เป็นตำแหน่งในแกน x และแกน y ของโหนดเป้าหมาย และทำการจัดรูปให้อยู่ในรูปสมการ (2.4)

$$Xb = a \quad (2.4)$$

เมื่อ

$$X = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$a = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 - d_1^2 + d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 - d_{n-1}^2 + d_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

และ

$$b = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

โดยสามารถหาค่า b ได้จากสมการ (2.8)

$$\hat{b} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T a \quad (2.8)$$

2) Min-Max Algorithm

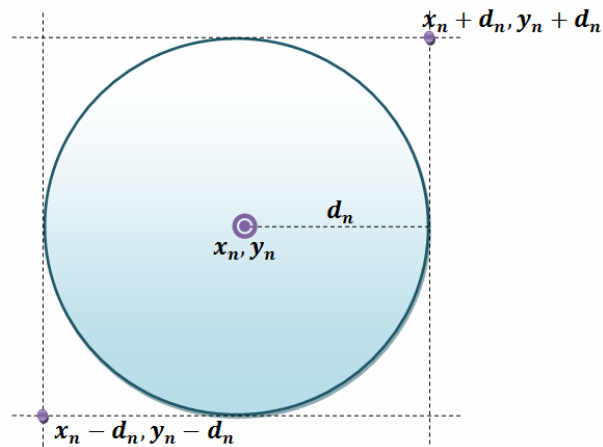
วิธีนี้เป็นอีกหนึ่งในวิธีการคำนวณหาตำแหน่งบนพื้นฐานของการคำนวณระยะทาง โดยใช้พารามิเตอร์ RSSI เมื่อหาระยะทางระหว่างเครื่องส่ง (หรือโหนดอ้างอิง) และเครื่องรับ (d) ได้แล้ว จะนำค่าที่ได้ไปหาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดของทุกๆ โหนดอ้างอิงดังสมการ (2.9), (2.10), (2.11), (2.12) ซึ่งแสดงการหาค่า Min-Max ระหว่างโหนดอ้างอิงดังรูปที่ 2.17

$$x_{\max} = \begin{bmatrix} x_{1 \max} = x_1 + d_1 \\ x_{2 \max} = x_2 + d_2 \\ \vdots \\ x_{n \max} = x_n + d_n \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$y_{\max} = \begin{bmatrix} y_{1 \max} = y_1 + d_1 \\ y_{2 \max} = y_2 + d_2 \\ \vdots \\ y_{n \max} = y_n + d_n \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$x_{\min} = \begin{bmatrix} x_{1\min} = x_1 - d_1 \\ x_{2\min} = x_2 - d_2 \\ \vdots \\ x_{n\min} = x_n - d_n \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$y_{\min} = \begin{bmatrix} y_{1\min} = y_1 - d_1 \\ y_{2\min} = y_2 - d_2 \\ \vdots \\ y_{n\min} = y_n - d_n \end{bmatrix} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.17 แสดงการหาค่า Min-Max ระหว่างโหนดอ้างอิง

ต่อมาจะนำค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดไปหาค่าที่น้อยที่สุดของค่ามากที่สุดของพิกัดและหาค่าที่มากที่สุดของค่าน้อยที่สุดของพิกัด ดังสมการ (2.13), (2.14), (2.15), (2.16) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.18

$$x_{\min - \max} = \min(x_{\max}) \quad (2.13)$$

$$x_{\max - \min} = \max(x_{\min}) \quad (2.14)$$

$$y_{\min - \max} = \min(y_{\max}) \quad (2.15)$$

$$y_{\max - \min} = \max(y_{\min}) \quad (2.16)$$

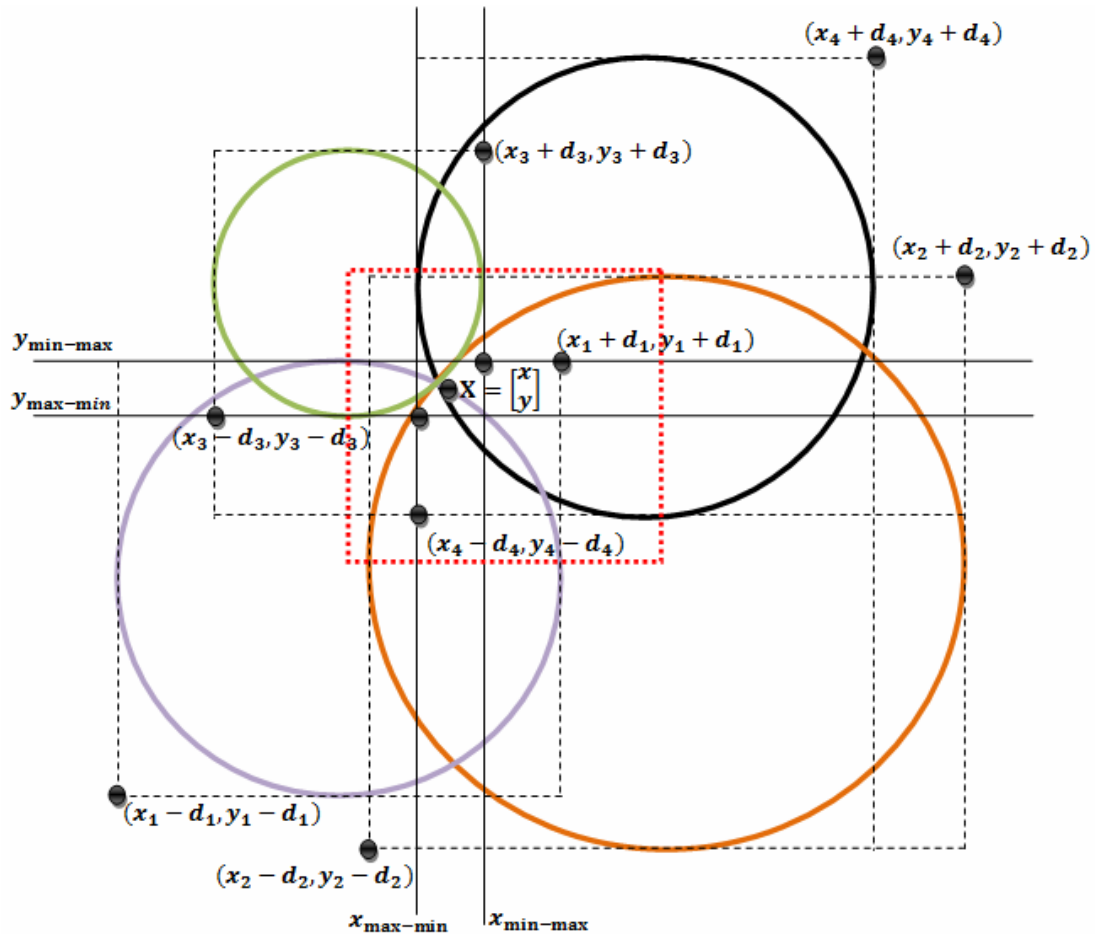
จากนั้น สามารถประมาณค่าพิกัดได้ดังสมการ (2.17)

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

โดยที่มีค่า x และ y ดังสมการ (2.18) และ (2.19)

$$x = (x_{\min - \max} + x_{\max - \min}) / 2 \quad (2.18)$$

$$y = (y_{\min - \max} + y_{\max - \min}) / 2 \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.18 แสดงการหาค่าตำแหน่งของวัตถุโดยใช้ Min-Max Algorithm

2.4.1.2 การหาค่าตำแหน่งโดยอ้างอิงจากเวลาของการมาถึง (Time of Arrival (TOA))

การหาค่าตำแหน่งโดยอ้างอิงจากเวลาของการมาถึง สามารถหาได้ในทำนองเดียวกับการหาค่าตำแหน่งโดยอ้างอิงจาก RSSI ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.16 การหาระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ (วัตถุเป้าหมาย) ทำได้โดยการจับเวลาในการเคลื่อนที่ของสัญญาณทางเดียว (One Way) โดยทั่วไปการหาค่า TOA จะพบปัญหา 2 ข้อคือ

- เครื่องส่งและรับสัญญาณในระบบจะต้องทำให้พร้อมกัน เป็นจังหวะเดียวกัน (Synchronize)

- ไทม์สแตมป์(Timestamp)จะถูกติดไว้ที่สัญญาณที่ถูกส่งออกมา เพื่อหาระยะทางที่สัญญาณเดินทาง

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายนั้นสามารถหาได้จากระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ (วัตถุเป้าหมาย) ซึ่งทำได้โดยการจับเวลาในการเคลื่อนที่ของสัญญาณทางเดียว (One Way) ดังสมการ (2.20) โดย R_i เป็นระยะทางระหว่างวัตถุเป้าหมายกับเครื่องส่ง (หรือ โหนด) ที่ i

$$R_i = ct_i \quad (2.20)$$

เมื่อ c คือค่าความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

และ t_i คือระยะเวลาในการเดินทางสัญญาณ (TOA) ระหว่างวัตถุไปที่โหนด i

แต่วิธีการนี้ต้องมีวงจรในการสร้างความสอดคล้องของสัญญาณนาฬิการะหว่างวัตถุกับโหนด จึงจะทำให้สามารถวัดค่า t_i ได้ พิจารณาจากสมการ (2.21) สมการมาตรฐานของวงกลมที่รัศมี R_i

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} \quad \text{โดย } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.21)$$

เมื่อ (X_i, Y_i, Z_i) เป็นพิกัดของโหนด i

และ (x, y, z) เป็นพิกัดของตำแหน่งของวัตถุที่ต้องการทราบตำแหน่ง

จากที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าการหาตำแหน่งของวัตถุด้วยวิธีนี้มีข้อเสียของวิธีการค้นหาตำแหน่งด้วยวิธีนี้ได้แก่การต้องการความสอดคล้องกันของสัญญาณนาฬิการะหว่างวัตถุและโหนดจะพบว่าเมื่อนับระยะเวลาของสัญญาณจากวัตถุไปที่โหนดผิดพลาด 1 ไมโครวินาทีจะให้วัดระยะทางผิดพลาดถึง 300 เมตร

2.4.1.3 Time Difference of Arrival (TDOA)

การหาตำแหน่งโดยอ้างอิงจากความแตกต่างของเวลาของสัญญาณที่มาถึง (TDOA) ได้แนวคิดมาใช้เพื่อแก้ปัญหาด้านความถูกต้องของความสอดคล้องของสัญญาณนาฬิการะหว่างวัตถุกับโหนด (Synchronize) โดยเนื่องจากสัญญาณเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสงทำให้พบว่าในกรณีที่วัดเวลาผิดพลาดเพียง 1 ไมโครวินาทีทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวัดระยะทางถึง 300 เมตร ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาเรื่องของการสอดคล้องของสัญญาณนาฬิกาทำให้เกิดแนวคิดแทนที่จะทำการนับเวลาที่มาถึงโหนดเราจะทำการนับเวลาที่แตกต่างกันที่รับได้จากโหนดจำนวน 2 คู่เพื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการไฮเปอร์โบลิก เพื่อหาตำแหน่งของวัตถุโดยพิจารณาการหาค่าตำแหน่งของโหนดได้โดยใช้หลักการของการนับเวลา เวลาที่แตกต่างกันที่นับได้จากคู่ของสัญญาณจากวัตถุไปที่โหนดตำแหน่งที่ i และตำแหน่งที่ j เพื่อสร้างของสมการไฮเปอร์โบลิกพิจารณาความสัมพันธ์ของผลต่างของระยะทางระหว่างโหนด ตำแหน่งที่ i และตำแหน่งที่ j ดังสมการ (2.22)

$$R_{i,j} = ct_{i,j} = R_i - R_j \quad (2.22)$$

โดยที่ $R_{i,j}$ เป็นผลต่างของระยะทางระหว่างโหนดตำแหน่งที่ i และตำแหน่งที่ j และ $t_{i,j}$ เป็นความแตกต่างของเวลาของสัญญาณจากวัตถุไปที่ โหนดตำแหน่งที่ i และตำแหน่งที่ j และ c คือค่าความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาทีและ R_i คือระยะห่างระหว่างโหนดที่ตำแหน่งที่พิกัด (x, y) กับวัตถุซึ่งมีพิกัดเป็น (X_i, Y_i) ดังสมการ (2.23) นี้

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 - 2X_i x - 2Y_i y + x^2 + y^2} \quad (2.23)$$

และสามารถหาความสัมพันธ์ของผลต่างของระยะทางได้จากวัตถุไปที่โหนด i, j โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ (2.24)

$$R_{i,j} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} = \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2} \quad (2.24)$$

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 เราสามารถหาคำตอบของสมการได้เมื่อจำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเนื่องจากสมการ (2.24) ทำการแก้สมการค่อนข้างยากทำให้ต้องจัดรูปแบบของสมการใหม่ดังสมการ (2.25)

$$R_i^2 = (R_{i,j} + R_1)^2 \quad (2.25)$$

ทำให้ทำการจัดรูปของสมการได้ดังสมการ (2.26)

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 + R_1^2 = X_i^2 + Y_i^2 - 2X_i x - 2Y_i y + x^2 + y^2 \quad (2.26)$$

ทำการลบค่าของสมการ R_1^2 ที่ $i=1$ ออกจากสมการ ข้างต้น จะได้ดังสมการ (2.27)

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 = X_i^2 + Y_i^2 - 2X_{i,1}x - 2Y_{i,1}y \quad (2.27)$$

เมื่อ $X_{i,1}$ และ $Y_{i,1}$ มีค่าเท่ากับ $(X_i - X_1)$ และ $(Y_i - Y_1)$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาคำตอบของสมการได้ดังสมการ (2.28)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} R_{2,1} \\ R_{3,1} \end{bmatrix} R_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (2.28)$$

เมื่อค่า K มีค่าดังสมการ (2.29)

$$\begin{aligned} K_1 &= X_1^2 + Y_1^2 \\ K_2 &= X_2^2 + Y_2^2 \\ K_3 &= X_3^2 + Y_3^2 \end{aligned} \quad (2.29)$$

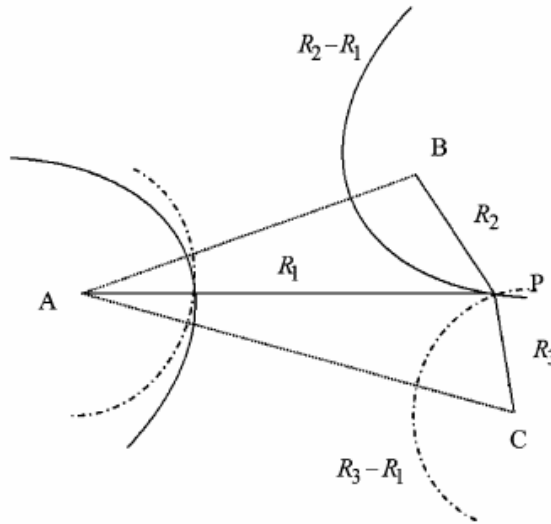
จากนั้นสามารถทำการหาค่า x และ y ได้ในเทอมของ R_1 ได้โดยการแทนค่าของ x และ y ในสมการ (2.29) ไปแทนค่าในสมการ (2.28) และจัดรูปแบบสมการในเทอมของ R_1 ในรูปแบบของสมการ Quadratic ดังสมการ (2.30)

$$aR_1^2 + bR_1 + c = 0 \quad (2.30)$$

สามารถหาคำตอบของสมการ (2.30) ตามสูตรได้เป็นสมการ (2.31)

$$R_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.31)$$

เลือกใช้รากของสมการเพียงค่าเดียวเนื่องจาก R_1 เป็นระยะห่างระหว่างวัตถุและโหนดที่ 1 ทำให้รากของสมการมีค่าเป็นบวกเพียงค่าเดียวแล้วนำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการ (2.28)



รูปที่ 2.19 แสดงการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง โดยใช้พารามิเตอร์ TDOA

2.4.2 เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรีนต

(Fingerprint-based Localization Technique)

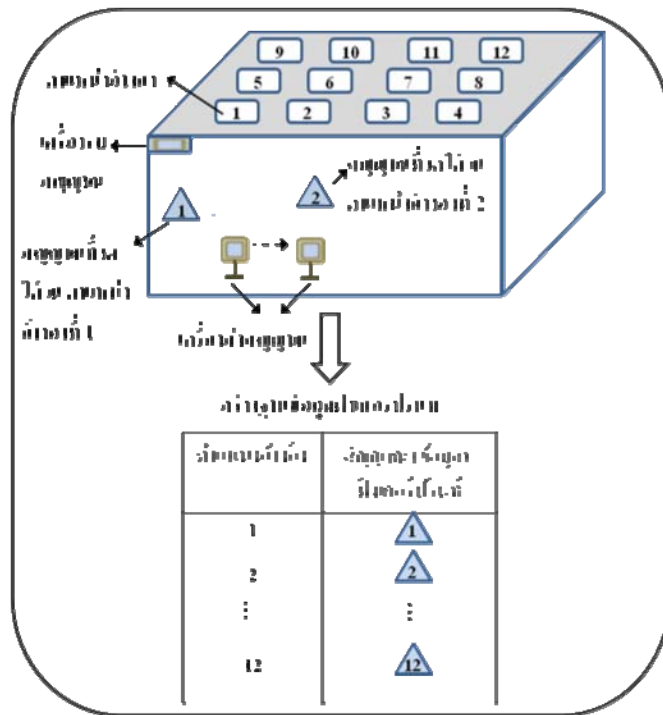
เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรีนต (ในที่นี้จะเรียกสั้นๆ ว่าเทคนิคฟิงเกอร์ปรีนต) เป็นการหาตำแหน่งจากการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับได้จากวัตถุเป้าหมายกับพารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับได้จากโหนดอ้างอิง ตำแหน่งของโหนดอ้างอิงที่มีสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณของวัตถุเป้าหมายมากที่สุด จะถูกประมาณว่าเป็นตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย โดยวิธีการเปรียบเทียบในเทคนิคฟิงเกอร์ปรีนตนี้จะเรียกว่าการจับคู่แพทเทิร์น (Pattern matching) เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนตนี้ จะมีความแม่นยำมากกว่าเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง เนื่องจากสัญญาณที่รับได้จากวัตถุเป้าหมายและจากโหนดอ้างอิงนั้นได้รวมผลกระทบของการแพร่กระจายคลื่นหรือสัญญาณรบกวนไว้แล้ว ดังนั้นการเปรียบเทียบสัญญาณที่อยู่ในสถานะแวดล้อมเดียวกันนี้ จะทำให้การประมาณค่าหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า ในขณะที่เทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางนั้น การจะประมาณค่าหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายได้ถูกต้องแม่นยำ จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของพารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งถ้าหากว่ามีการรบกวนต่อสัญญาณที่รับได้ (สัญญาณที่รับได้เคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็น) จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายตามมา อย่างไรก็ตาม เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนตนี้จะมีกระบวนการในการวิเคราะห์และประมวลผลที่ซับซ้อนกว่าและใช้เวลามากกว่าเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง

เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรีนต มีหลักการในการหาตำแหน่งโดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

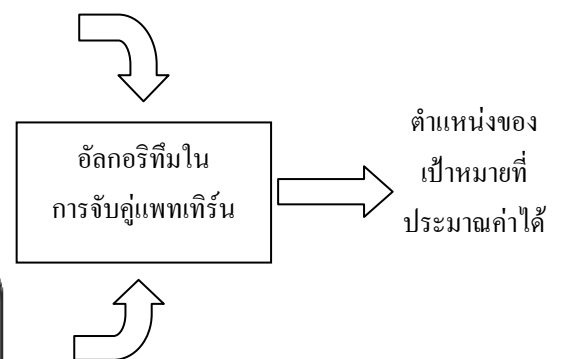
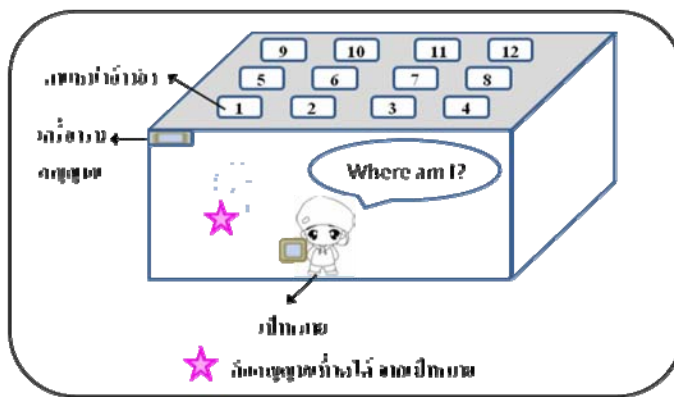
- ขั้นตอนที่ 1 จะทำการทดลองเพื่อเก็บค่าของสัญญาณ (หรือข้อมูล) ณ ตำแหน่งที่ทราบพิกัด โดยจะทำการเก็บค่าของสัญญาณในหลายๆ ตำแหน่ง และจะจัดเรียงเก็บเป็นฐานข้อมูลที่สัมพันธ์กันระหว่างตำแหน่งที่ทราบพิกัดและสัญญาณ (ข้อมูล) ที่วัดได้ ณ ตำแหน่งนั้นๆ สัญญาณ (ข้อมูล) ที่ทำการเก็บในขั้นตอนนี้ จะเรียกว่าฟิงเกอร์ปรีนต (Fingerprint)
- ขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย โดยทำการวัดสัญญาณ (ข้อมูล) จากวัตถุเป้าหมาย แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณ (ข้อมูล) หรือที่เรียกว่าฟิงเกอร์ปรีนต ที่เก็บไว้ในฐานข้อมูลในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้อัลกอริทึมในการจับคู่แพทเทิร์น (Pattern matching algorithm) ถ้าหากสัญญาณ (ข้อมูล) ของวัตถุเป้าหมายใกล้เคียงกับฟิงเกอร์ปรีนตใดมากที่สุด จะประมาณได้ว่าตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายจะเป็นตำแหน่งของฟิงเกอร์ปรีนตนั้นๆ เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรีนตแสดงได้ดังรูปที่ 2.18

โดยทั่วไป ค่าของสัญญาณ (หรือข้อมูล) หรือฟิงเกอร์ปรีนตที่ใช้ในเทคนิคนี้คือค่า RSSI
นั่นเอง

ขั้นตอนที่ 1 การสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นต์



ขั้นตอนที่ 2 หาดำแหน่งของเป้าหมาย



รูปที่ 2.20 ภาพรวมของระบบการหาตำแหน่งโดยเทคโนโลยี RFID บนพื้นฐานวิธีฟิงเกอร์ปริ้นต์ [7]

2.5 การหาตำแหน่งของเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายบนพื้นฐานเทคโนโลยี ZigBee

2.5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่งเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายเซนเซอร์แบบไร้สายในการระบุตำแหน่งนั้นมักนิยมใช้การวัดระดับความเข้มของสัญญาณที่รับได้ (Receive Signal Strength Indicator: RSSI) ในการค้นหาเป้าหมาย โดยกำหนดตำแหน่งที่แน่นอนของกลุ่มโหนดอ้างอิง ซึ่งมักจะถูกเรียกว่า โหนดบีคอน

(beacon node) และใช้งานได้โดยการวัดความแรงของระดับสัญญาณระหว่างโหนดบีคอนกับเป้าหมาย โดยใช้พื้นฐานของ 2 เทคนิคที่ได้กล่าวข้างต้น

Received Signal Strength Indication หรือ RSSI เป็นพารามิเตอร์ในการวัดความแรงของสัญญาณในการส่งสัญญาณวิทยุ ตามความเป็นจริงของสัญญาณโดยทั่วไป เมื่อเครื่องรับมีระยะห่างออกไปจากเครื่องส่ง สัญญาณที่รับได้ก็จะเบาลง ดังนั้นค่า RSSI นั้นจึงจำเป็นต่อการรับส่งสัญญาณเช่นกัน เพราะจะได้รู้ว่าเครื่องรับสัญญาณที่ใช้งานอยู่นั้นจะมีประสิทธิภาพที่ระยะทางเท่าใด หรือกำลังในการส่งเท่าใดจึงจะเหมาะสม โดยค่า RSSI มีหน่วยเป็นเดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm)

เนื่องจากค่า RSSI มีความแปรปรวนของสัญญาณสูงตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป เพราะแต่ละสภาพแวดล้อมมีความแตกต่างกัน การจะทำให้ RSSI มีความน่าเชื่อถือขึ้น จะต้องเก็บ RSSI ไว้หลาย ๆ ครั้งในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน เพื่อนำมาวิเคราะห์ภายหลัง จะทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยลง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะมีสาเหตุมาจากต่าง ๆ ดังนี้

- **Nonline of Sight (NLOS)** คือการสื่อสารแบบไม่เป็นเส้นตรง ทำให้สัญญาณไปตกกระทบกับวัตถุอื่นก่อนที่สัญญาณจะเดินทางมาถึงเครื่องรับ ทำให้สัญญาณที่รับได้มีความผิดพลาดจากที่คาดหมายไว้
- **Multiple Access Interference** คือปัญหาที่มักเกิดในระบบ CDMA กล่าวคือเกิดจากเครื่องส่งที่มีกำลังส่งสูงกว่าทำการส่งสัญญาณไปรบกวนเครื่องส่งที่มีกำลังส่งต่ำกว่า
- **Fluctuation in Signal Propagation Speeds** เกิดกับคลื่นเสียงที่การแพร่ถูกรบกวนจากปัจจัยภายนอก เช่น แรงแม่เหล็กหรืออุณหภูมิ และค่าความชื้นในอากาศ ปัจจัยเหล่านี้จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อระยะทางมากขึ้น

2.5.2 เทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่งเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ทั้งเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทาง และเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นต์ ซึ่งจะได้พารามิเตอร์ RSSI ในการหาตำแหน่งสำหรับทั้งสองวิธี สำหรับเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางนั้น จะพิจารณาใช้ทั้งอัลกอริทึมแบบ Maximum likelihood และอัลกอริทึมแบบ Min-Max สำหรับเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นต์ ได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการแบ่งกลุ่มฟิงเกอร์ปริ้นต์โดยประยุกต์ใช้วิธี Fuzzy C-Means

2.5.2.1 เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นต์และการแบ่งกลุ่มด้วยวิธี Fuzzy C-Means

ในหัวข้อย่อยนี้ จึงได้นำเสนอเน้นไปที่เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นต์ ร่วมกับวิธี Fuzzy C-Means

1) การกำหนดพารามิเตอร์เพื่อใช้ในเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นต์

กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ พร้อมทั้งสัญลักษณ์ดังนี้

- จำนวนของโหนดเซนเซอร์อ้างอิงเท่ากับ N
- จำนวนตำแหน่งของฟิงเกอร์ปริ้นต์เท่ากับ M
- กำหนดให้ D_m คือเซตของฟิงเกอร์ปริ้นต์ ณ ตำแหน่งของฟิงเกอร์ปริ้นต์ F_m ($m=1,2,\dots,M$) กล่าวคือ

$$\mathbf{D}_m = [r_{(1,m)}, r_{(2,m)}, \dots, r_{(N,m)}] \quad (2.32)$$

เมื่อ r คือค่า RSSI ที่ได้รับจากโหนดเซนเซอร์ โดย

และ

$$\mathbf{F}_m = [x_m, y_m] \quad (2.33)$$

เมื่อ $\mathbf{F}_m$ คือตำแหน่งฟังก์ชันพิกัดลำดับที่ m โดย x_m, y_m คือพิกัดในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ

2) การแบ่งกลุ่ม (Clustering) ด้วยวิธี Fuzzy C-Means

การแบ่งกลุ่ม คือกระบวนการที่ออกแบบมาเพื่อระบุกลุ่มของสิ่งที่เราสนใจซึ่งมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน หรือกล่าวได้ว่าสมาชิกที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน จะมีคุณสมบัติหรือลักษณะที่ใกล้เคียงกัน

ในงานวิจัยนี้ เราใช้การแบ่งกลุ่มด้วยวิธี Fuzzy C-Means ซึ่งในลำดับต่อไปจะเรียกว่าวิธี FCM เพื่อความกระชับ ข้อดีของวิธี FCM คือสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบที่มีชุดของข้อมูลหลากหลาย และมีจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้ชุด (เซต) ของข้อมูลที่มีการแบ่งกลุ่มคือ RSSI นั่นเอง

กระบวนการของการแบ่งกลุ่มด้วยวิธี FCM คือจะทำการทำให้ค่า objective function ที่ใช้ในการแบ่งกลุ่มของข้อมูล $\mathbf{P} = [\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \mathbf{D}_3, \dots, \mathbf{D}_m]^T$ และกลุ่มของศูนย์กลางของกลุ่ม $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \dots, \mathbf{v}_m]^T$ ให้มีค่าน้อยที่สุด โดย Objective function แสดงได้ดังนี้

$$J_w(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M u_{c,m}^w \|\mathbf{D}_m - \mathbf{v}_c\|^2 \quad (2.34)$$

เมื่อ J_w คือ Objective function

M คือ จำนวนแถวของเมตริกซ์ โดยที่

C คือ จำนวนกลุ่ม (cluster number) ซึ่งต้องมีค่าอยู่ในช่วง $1 \leq C \leq M$

$u_{c,m}$ คือ สมาชิกของ Partition matrix $\mathbf{U}$ ซึ่งมีขนาดเมตริกซ์คือ $C \times M$

นอกจากนี้ $u_{c,m}$ ประกอบด้วย membership function

$\mathbf{v}_c$ คือ ศูนย์กลางของกลุ่ม (Center of cluster) และ

w คือ แฟคเตอร์น้ำหนัก (Weighting factor) ที่ใช้ความคมชัดของ membership function

สมาชิกของ $\mathbf{U}$ จะอยู่ในช่วง $[0, 1]$ กล่าวคือ $\sum_{m=1}^M u_{c,m} = 1$ สำหรับทุกๆ $u_{c,m}$ ($1 \leq C \leq M$) และ norm $\|\mathbf{D}_m - \mathbf{v}_c\|$ คือระยะยูคลิดีน (Euclidean distance) ระหว่าง $\mathbf{D}_m$ และ $\mathbf{v}_c$

3) อัลกอริทึมในการจับคู่แพทเทิร์น (Pattern matching algorithm)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อัลกอริทึม nearest neighbor ในการจับคู่แพทเทิร์นโดยมีหลักการง่ายๆ คือ หาค่าความแตกต่างที่น้อยที่สุดระหว่าง RSSI ที่เป็นฟังก์ชันพิกัดกับ RSSI ของวัตถุเป้าหมาย โดยใช้สมการยูคลิดีนแสดงได้ดังสมการ

$$e = \sqrt{\sum_{n=1}^N (r_{(n,t)} - r_{(n,g_n)})^2} \quad (2.35)$$

โดยที่ N คือจำนวนของโหนดอ้างอิง

$r_{(n,t)}$ คือ ค่า RSSI ที่วัตถุเป้าหมายรับได้จากโหนดอ้างอิงที่ n และ

$r_{(n,g_n)}$ คือ ค่า RSSI ของตำแหน่งฟิงเกอร์ปริงต์หลังจากจัดกลุ่มอยู่ในกลุ่ม g_n โดยค่า RSSI นี้
รับได้จากโหนดอ้างอิงที่ n

2.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงโครงสร้างการทำงานของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย รวมไปถึงการทำงานของ XBee และเทคนิคที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง ซึ่งประกอบไปด้วยเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางและเทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปริงต์ และได้กล่าวถึงเทคนิคการหาตำแหน่งของเป้าหมายที่ได้เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ และเทคนิคใหม่ที่น่าสนใจ

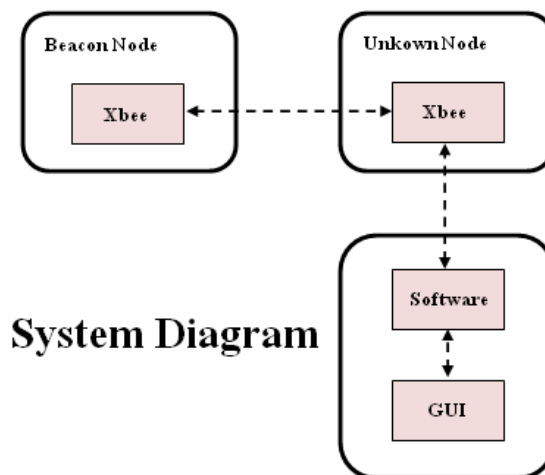
3. การออกแบบและวิธีการทดลอง

3.1 แนวคิด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิจัยเรื่องการหาตำแหน่งของเป้าหมายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายบนพื้นฐานเทคโนโลยี ZigBee โดยทางผู้วิจัยได้สนใจเทคนิคการหาตำแหน่งทั้งสองวิธีหลักคือเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางและเทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปริ้นต์ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบและวิธีการทดลองการหาพารามิเตอร์ของสัญญาณซึ่งก็คือคือ RSSI ซึ่งจะเป็นค่าที่นำไปใช้ต่อไปในการหาตำแหน่ง จากนั้นจะทำการทดลองหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายด้วยแต่ละเทคนิค

3.2 การสร้างและออกแบบระบบ

การออกแบบระบบนั้นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบที่สำคัญของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ได้แก่ การทำงานแบบเวลาจริง และส่วนติดต่อผู้ใช้ที่ง่ายต่อการใช้งาน โดยในการออกแบบระบบนี้ได้แยกการออกแบบเป็น 4 ส่วน คือ ในส่วนของ Beacon, Unknown, Gateway และ Software ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 3.1

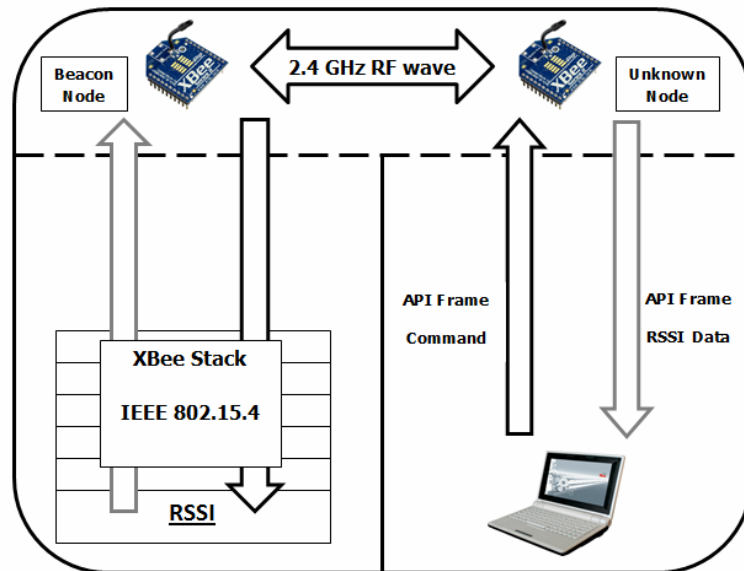


รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของระบบ

จากแผนภาพการทำงานของระบบ จะเริ่มต้นจากการเลือกฮาร์ดแวร์ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบ ได้แก่

- **ตัวรับส่งสัญญาณวิทยุ (Transceiver)** ได้เลือกใช้โมดูล XBEE-24ZB ของบริษัท DIGI ซึ่งมีจุดเด่นอยู่ที่ มีข้อมูลรีจิสเตอร์ในมาตรฐานของ ZigBee และสามารถสร้าง Routing Topology ได้หลายแบบ และง่ายต่อการใช้งานและการกำหนดค่า โดยทำการเชื่อมต่อ กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านโมดูล USART และสามารถทำการกำหนดค่าได้โดยโปรแกรม X-CTU ของทางบริษัทผู้ผลิต

ต่อมาทำการออกแบบระบบ ในการทดลอง GUI จะสั่งให้ Unknown Node จะทำการร้องขอข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ จาก Beacon Node ทุกตัว ผ่านทาง Serial Port เมื่อได้รับข้อมูลกลับมา แล้ว จะทำการประมวลผลและระบุตำแหน่งต่อไป ซึ่งสามารถแสดงภาพรวมการทำงานของระบบดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงภาพรวมการทำงานของระบบ

3.2.1 รูปแบบเฟรมที่ใช้ในการสื่อสารในระดับชั้นเน็ตเวิร์กเลเยอร์

Header	Frame Length	Frame ID	Data	Checksum
1 Bytes	2 Bytes	1 Bytes	Depend on Frame type	1 Bytes

รูปที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของของแพ็คเก็ตขนาด 8 Byte

รูปแบบเฟรมที่ใช้ในการสื่อสารในระดับชั้นเน็ตเวิร์กเลเยอร์มีรายละเอียดดังนี้

- Header ขนาด 1 Byte ใช้สำหรับการทำ Byte Stuffing
- Frame length ขนาด 2 Byte ใช้สำหรับระบุขนาดของเฟรม
- Frame type ขนาด 1 Byte ใช้สำหรับระบุประเภทของเฟรม
- Frame ID ขนาด 1 Byte ระบุหมายเลขของเฟรม
- DATA ขึ้นอยู่กับประเภทของเฟรม
- Checksum ขนาด 1 Byte เป็นข้อมูลของผล Checksum ตั้งแต่ Byte ที่ 4

3.2.2 ประเภทของเฟรม

ประเภทของเฟรมที่ใช้นั้น ประกอบไปด้วย

- Remote AT Command Request (0x17)
(แสดงดังรูปที่ 3.4 แพ็คเกจ Remote AT Command Request (0x17))
- Explicit Addressing ZigBee Command Frame (0x11)
(แสดงดังรูปที่ 3.5 แพ็คเกจ Explicit Addressing ZigBee Command Frame (0x11))
- ZigBee Transmit Request (0x10)
(แสดงดังรูปที่ 3.6 แพ็คเกจ ZigBee Transmit Request (0x10))

A P I P a c k e t	Frame Fields		Offset	Example	Description
	Start Delimiter		0	0x7E	
	Length		MSB 1	0x00	Number of bytes between the length and the checksum
			LSB 2	0x10	
	Frame-specific Data	Frame Type	3	0x17	
		Frame ID	4	0x01	Identifies the UART data frame for the host to correlate with a subsequent ACK (acknowledgement). If set to 0, no response is sent.
		64-bit Destination Address	MSB 5	0x00	Set to the 64-bit address of the destination device. The following addresses are also supported: 0x0000000000000000 - Reserved 64-bit address for the coordinator 0x000000000000FFFF - Broadcast address
			6	0x13	
			7	0xA2	
			8	0x00	
			9	0x40	
			10	0x40	
			11	0x11	
			LSB 12	0x22	
		16-bit Destination Network Address	MSB 13	0xFF	Set to the 16-bit address of the destination device, if known. Set to 0xFFFE if the address is unknown, or if sending a broadcast.
			LSB 14	0xFE	
		Remote Command Options	15	0x02 (apply changes)	Bitfield to enable various remote command options. Supported values include: 0x01 - Disable ACK 0x02 - Apply changes on remote. (If not set, AC command must be sent before changes will take effect.) 0x40 - Use the extended transmission timeout for this destination. Setting the extended timeout bit causes the stack to set the extended transmission timeout for the destination address (see chapter 4). All unused and unsupported bits must be set to 0.
		AT Command	16	0x42 (B)	Name of the command
			17	0x48 (H)	
		Command Parameter	18	0x01	If present, indicates the requested parameter value to set the given register. If no characters present, the register is queried.
	Checksum		19	0xF5	0xFF - the 8 bit sum of bytes from offset 3 to this byte.

รูปที่ 3.4 แพ็คเกจ Remote AT Command Request (0x17) [8]

Frame Fields		Offset	Example	Description
Start Delimiter		0	0x7E	
Length		MSB 1	0x00	Number of bytes between the length and the checksum
		LSB 2	0x1A	
Frame-specific Data	Frame Type	3	0x11	
	Frame ID	4	0x01	Identifies the UART data frame for the host to correlate with a subsequent ACK (acknowledgement). If set to 0, no response is sent.
	64-bit Destination Address	MSB 5	0x00	Set to the 64-bit address of the destination device. The following addresses are also supported: 0x0000000000000000 - Reserved 64-bit address for the coordinator 0x000000000000FFFF - Broadcast address
		6	0x00	
		7	0x00	
		8	0x00	
		9	0x00	
		10	0x00	
		11	0x00	
		12	0x00	
	16-bit Destination Network Address	MSB 13	0xFF	Set to the 16-bit address of the destination device, if known. Set to 0xFFFE if the address is unknown, or if sending a broadcast.
		LSB 14	0xFE	
	Source Endpoint	15	0xA0	Source endpoint for the transmission.
	Destination Endpoint	16	0xA1	Destination endpoint for the transmission.
	Cluster ID	17	0x15	Cluster ID used in the transmission
		18	0x54	
Profile ID	19	0xC1	Profile ID used in the transmission	
	20	0x05		
	Broadcast Radius	21	0x00	Sets the maximum number of hops a broadcast transmission can traverse. If set to 0, the transmission radius will be set to the network maximum hops value.
	Transmit Options	22	0x00	Bitfield of supported transmission options. Supported values include the following: 0x01 - Disable ACK 0x20 - Enable APS encryption (if EE=1) 0x40 - Use the extended transmission timeout for this destination Enabling APS encryption decreases the maximum number of RF payload bytes by 4 (below the value reported by NP). Setting the extended timeout bit causes the stack to set the extended transmission timeout for the destination address. (See chapter 4.) All unused and unsupported bits must be set to 0.
	Data Payload	23	0x54	Data that is sent to the destination device
		24	0x78	
		25	0x44	
		26	0x61	
		27	0x74	
		28	0x61	
Checksum		29	0x3A	0xFF - the 8 bit sum of bytes from offset 3 to this byte.

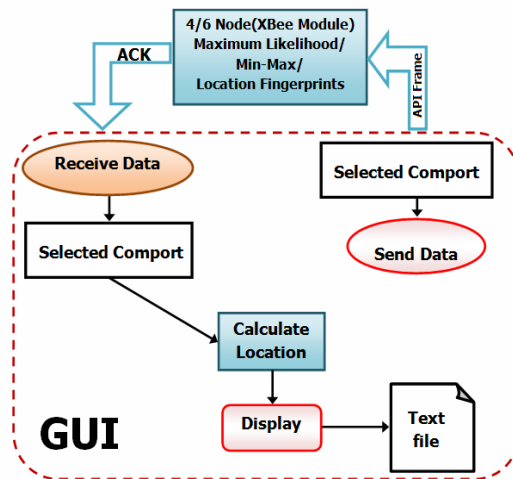
รูปที่ 3.5 แพ็กเกจ Explicit Addressing ZigBee Command Frame (0x11) [8]

Frame Fields		Offset	Example	Description
A P I P a c k e t	Start Delimiter	0	0x7E	
	Length	MSB 1	0x00	Number of bytes between the length and the checksum
		LSB 2	0x16	
	Frame-specific Data	3	0x10	
	Frame Type	4	0x01	Identifies the UART data frame for the host to correlate with a subsequent ACK (acknowledgement). If set to 0, no response is sent.
	64-bit Destination Address	MSB 5	0x00	Set to the 64-bit address of the destination device. The following addresses are also supported: 0x0000000000000000 - Reserved 64-bit address for the coordinator 0x000000000000FFFF - Broadcast address
		6	0x13	
		7	0xA2	
		8	0x00	
		9	0x40	
		10	0x0A	
		11	0x01	
		LSB 12	0x27	
	16-bit Destination Network Address	MSB 13	0xFF	Set to the 16-bit address of the destination device, if known. Set to 0xFFFE if the address is unknown, or if sending a broadcast.
		LSB 14	0xFE	
	Broadcast Radius	15	0x00	Sets maximum number of hops a broadcast transmission can occur. If set to 0, the broadcast radius will be set to the maximum hops value.
	Options	16	0x00	Bitfield of supported transmission options. Supported values include the following: 0x01 - Disable ACK 0x20 - Enable APS encryption (if EE=1) 0x40 - Use the extended transmission timeout for this destination Enabling APS encryption decreases the maximum number of RF payload bytes by 4 (below the value reported by NP). Setting the extended timeout bit causes the stack to set the extended transmission timeout for the destination address. (See chapter 4.) All unused and unsupported bits must be set to 0.
	RF Data	17	0x54	Data that is sent to the destination device
		18	0x78	
		19	0x44	
		20	0x61	
		21	0x74	
		22	0x61	
		23	0x30	
		24	0x41	
	Checksum	25	0x13	0xFF - the 8 bit sum of bytes from offset 3 to this byte.

รูปที่ 3.6 แพ็กเกจ ZigBee Transmit Request (0x10) [8]

3.2.3 ส่วนซอฟต์แวร์

ในส่วนซอฟต์แวร์นั้นได้มีการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยเน้นการใช้งานและการจัดการข้อมูลอย่างง่าย และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการประมวลผลในขั้นสูง



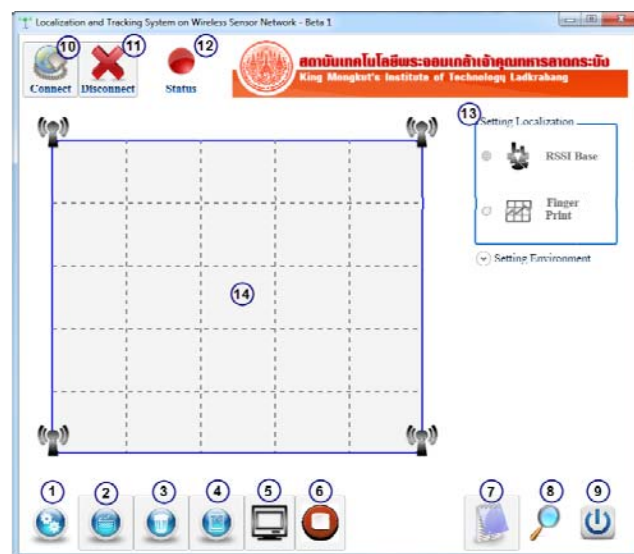
รูปที่ 3.7 ภาพรวมการออกแบบซอฟต์แวร์

จากภาพรวมการออกแบบซอฟต์แวร์ จะเริ่มต้นที่การส่งข้อมูลไปยังฮาร์ดแวร์ ผ่านคอมพอร์ตที่เลือกไว้ (Selected Comport) จากนั้นฮาร์ดแวร์จะทำการส่งข้อมูลกลับมาเข้ามาในส่วนติดต่อผู้ใช้ผ่านคอมพอร์ตที่เลือกไว้ (Selected Comport) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้รับมาทำการคำนวณ หาค่าตำแหน่ง และทำการแสดงผล ในส่วนของการแสดงผลนั้นสามารถที่จะทำการเก็บข้อมูลที่แสดงผลเป็น Text file ได้

การออกแบบซอฟต์แวร์นั้นมีการออกแบบในส่วนหลักๆ คือ

3.2.2.1 ซอฟต์แวร์ส่วนติดต่อผู้ใช้

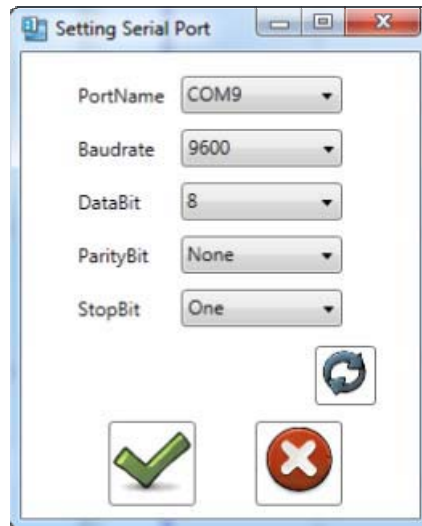
ในส่วนซอฟต์แวร์ส่วนติดต่อผู้ใช้ได้มีการสร้างหน้าโปรแกรมรับส่งข้อมูลกับโน้ต การทำงาน 4 โน้ต และ 6 โน้ต เพื่อทำการรับส่งข้อมูลระหว่างเกตเวย์และคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.8 หน้าของโปรแกรมก่อนการเชื่อมต่อ

จากรูปที่ 3.8 โปรแกรมมีการทำงานในส่วนต่างๆดังนี้

- หมายเลข 1 เป็นส่วนการตั้งค่าการเชื่อมต่อ เช่น PortName , BaudRate เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 3.9



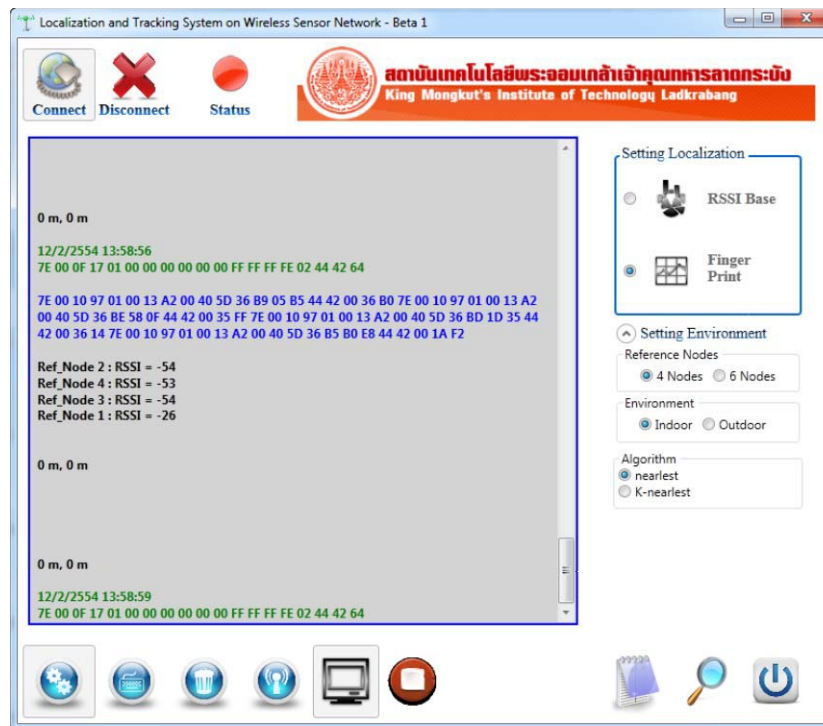
รูปที่ 3.9 ส่วนของการตั้งค่าการเชื่อมต่อแบบ Serial Port

- หมายเลข 2 เป็นส่วนของการใส่เฟรมข้อมูลที่ต้องการส่ง แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ส่วนของการใส่เฟรมข้อมูลที่ต้องการส่ง

- หมายเลข 3 จะทำการลบค่าที่ทางโปรแกรมได้แสดงออกมาในรูปของข้อความ (Text)
- หมายเลข 4 เป็นส่วนของมุมมองของการแสดงตำแหน่งของวัตถุ ระหว่างมุมมองแบบกราฟิก หรือ มุมมองแบบข้อความ แสดงดังรูปที่ 3.11



(a) มุมมองแบบข้อความ



(b) มุมมองแบบกราฟฟิก

รูปที่ 3.11 มุมมองการแสดงตำแหน่งของวัตถุ

- หมายเลข 5 เป็นส่วนของการเริ่มการหาตำแหน่งของวัตถุ เมื่อกดปุ่มนี้โปรแกรมจะทำการคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุเองอัตโนมัติ ตามการตั้งค่าต่างๆที่ได้เลือกไว้
- หมายเลข 6 เป็นส่วนของการหยุดการหาตำแหน่งของวัตถุ
- หมายเลข 7 เป็นส่วนของการแสดงข้อมูลต่างๆที่โปรแกรมได้เก็บได้อยู่ในรูปของ Text file แสดงดังรูปที่ 3.12

```

12/2/2554 13:58:357E 00 0F 17 01 00 00 00 00 00 00 FF FF FF FE 02 44 42 64
7E 00 10 97 01 00 13 A2 00 40 5D 36 BE 58 0F 44 42 00 37 FD 7E 00 10 97 01 0
Ref_Node 4 : RSSI = -55Ref_Node 2 : RSSI = -58Ref_Node 3 : RSSI = -54Ref_Nod
0 m, 1 m

0 m, 1 m
12/2/2554 13:58:387E 00 0F 17 01 00 00 00 00 00 00 FF FF FF FE 02 44 42 64
7E 00 10 97 01 00 13 A2 00 40 5D 36 BE 58 0F 44 42 00 39 FB 7E 00 10 97 01 0
Ref_Node 4 : RSSI = -57Ref_Node 3 : RSSI = -55Ref_Node 2 : RSSI = -53Ref_Nod
0 m, 0 m

0 m, 0 m
12/2/2554 13:58:407E 00 0F 17 01 00 00 00 00 00 00 FF FF FF FE 02 44 42 64
7E 00 10 97 01 00 13 A2 00 40 5D 36 B9 05 B5 44 42 00 3D A9 7E 00 10 97 01 0
Ref_Node 2 : RSSI = -61Ref_Node 4 : RSSI = -58Ref_Node 3 : RSSI = -57Ref_Nod
0 m, 1 m

0 m, 1 m
12/2/2554 13:58:437E 00 0F 17 01 00 00 00 00 00 00 FF FF FF FE 02 44 42 64
7E 00 10 97 01 00 13 A2 00 40 5D 36 BD 1D 35 44 42 00 37 13 7E 00 10 97 01 0
Ref_Node 3 : RSSI = -55Ref_Node 2 : RSSI = -52Ref_Node 4 : RSSI = -56Ref_Nod
0 m, 0 m

```

รูปที่ 3.12 ตัวอย่างข้อมูลที่โปรแกรมได้ทำการเก็บไว้

- หมายเลข 8 เป็นส่วนของการแสดงวิธีการใช้งานของโปรแกรม แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ส่วนของการแสดงวิธีการใช้งานของโปรแกรม

- หมายเลข 9 เมื่อกดปุ่มนี้จะเป็นการออกจากโปรแกรม
- หมายเลข 10 ทำการเชื่อมต่อ Serial Port ตามค่าที่ได้เลือกจากหมายเลข 1
- หมายเลข 11 ทำการยกเลิกการเชื่อมต่อ Serial Port
- หมายเลข 12 แสดงสถานะการเชื่อมต่อของ Serial Port
- หมายเลข 13 เป็นส่วนการตั้งค่าของวิธีการหาตำแหน่งของวัตถุ เมื่อทำการเชื่อมต่อตามหมายเลข 10 แล้ว ส่วนนี้ถึงจะใช้งานได้ และสามารถตั้งค่าอื่นๆเพิ่มเติมได้ เช่น สภาพแวดล้อม อัลกอริทึมที่จะใช้ เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 3.14

รูปที่ 3.14 ส่วนการตั้งค่าเพิ่มเติมเมื่อมีการเชื่อมต่อ Serial Port แล้ว

- หมายเลข 14 เป็นส่วนพื้นที่ของการแสดงตำแหน่งของวัตถุที่โปรแกรมคำนวณได้

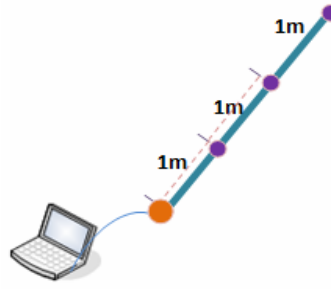
3.3 แนวทางการศึกษาและการทดลอง

การศึกษาและการทดลองนั้น แบ่งออกเป็น สองส่วน คือ การศึกษาเกี่ยวกับค่า Receive Signal Strength Indicator (RSSI) และ การทดลองการระบุตำแหน่ง

3.3.1 การทดลองเกี่ยวกับ Receive Signal Strength Indicator

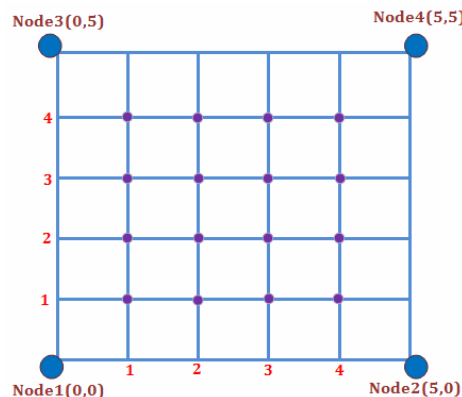
แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. การศึกษาดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า RSSI โดยจะทำการวัดค่า RSSI จาก XBee ในระยะต่างๆ โดยทำการเพิ่มระยะขึ้นไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การทดลองวัดค่า RSSI ในระยะต่างๆ

2. การทดลองคำนวณระยะทางโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ จากค่า RSSI โดยทำการทดลองเหมือนในข้อที่แล้วนำค่า RSSI ที่ได้ มาคำนวณเป็นระยะทาง โดยใช้สมการที่ได้ทำการศึกษามาเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
3. การทดลองการระบุตำแหน่ง โดยใช้เทคนิคจากข้อ 2 ร่วมกับ Maximum Likelihood Algorithm เพื่อใช้ในการหาพิกัดของโนดเป้าหมายในพื้นที่ที่ได้กำหนดไว้ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการระบุตำแหน่งแบบเคลื่อนที่ต่อไป ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การทดลองหาตำแหน่งโดยใช้ Maximum Likelihood Algorithm

3.3.2 การทดลองการระบุตำแหน่ง

ในส่วนนี้ได้ทำการทดลองการระบุตำแหน่ง ทั้งหมด 3 วิธี คือวิธี Maximum Likelihood วิธี Min-Max และวิธีฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Nearest / 3-Nearest) ตามลำดับซึ่งแบ่งเป็นการทดลองดังต่อไปนี้

1. การทดลองเก็บค่า RSSI เพื่อเป็นฐานข้อมูลของวิธีการหาตำแหน่งด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ โดยจะทำการเก็บค่า RSSI เฉลี่ย ทั้งหมด 10 ครั้ง ระหว่างโนดอ้างอิงกับโนดเป้าหมาย ในทุกๆ ตำแหน่งบนพื้นที่ที่ได้กำหนดไว้
2. ทำการเก็บค่า RSSI เพื่อใช้ในการทดลองระบุตำแหน่งทั้ง 3 วิธี โดยจะทำการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง ครั้งละ 5 เส้นทาง

- 2.1 ตามแนวมุมด้านล่างซ้ายมือถึงมุมด้านบนขวามือของพื้นที่ทดลองตั้งแต่ (0,0) โดยเลื่อนตำแหน่งทีละ (0.33,0.33) เมตร
 - 2.2 ตามแนวมุมด้านล่างขวามือถึงมุมด้านบนซ้ายมือของพื้นที่ทดลองตั้งแต่ (5,0) โดยเลื่อนตำแหน่งทีละ (-0.33,0.33) เมตร
 - 2.3 ตามแนวนอนของพื้นที่ ตั้งแต่ (0,2.50) จนถึง (5,2.50) โดยเลื่อนตำแหน่งทีละ (0.25,0) เมตร
 - 2.4 ตามแนวตั้งของพื้นที่ ตั้งแต่ (2.50,0) จนถึง (2.50,5) โดยเลื่อนตำแหน่งทีละ (0,0.25) เมตร
 - 2.5 ตามตำแหน่ง 36 ตำแหน่ง ตั้งแต่ (0,0),(1,0) จนถึง (5,5)
3. การทดลองระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายในแต่ละวิธี และทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาด โดยจะนำค่าที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 2 มาทำการคำนวณหาตำแหน่ง ในแต่ละวิธี แล้วนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาประสิทธิภาพของแต่ละวิธี

3.4 บทสรุป

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงโครงสร้างของระบบ ทั้งในส่วนฮาร์ดแวร์ การเชื่อมต่อและการใช้งาน Graphic User Interface รวมไปถึงแนวทางและวิธีการทดลองการระบุตำแหน่งทั้งในแบบหยุดนิ่งและแบบเคลื่อนที่ โดยใช้วิธีการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางและเทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปρίนต

4. การทดลองและผลการทดลอง

หัวข้อนี้นำเสนอการทดลองและแสดงผลการทดลองในการหาพารามิเตอร์ RSSI ที่สำคัญต่อการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย และนำเสนอการทดลองและแสดงผลการทดลองในการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย ด้วยเทคนิคที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางและเทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปริ้นต์ โดยประยุกต์ใช้วิธี FCM ร่วมด้วย

4.1 การทดลองเรื่องการวัดค่า RSSI

จุดประสงค์

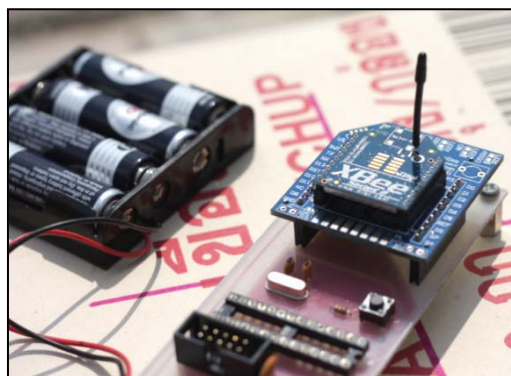
- เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า RSSI ทุกๆระยะ 1 เมตร รวมทั้งสิ้น 10 เมตร ว่าเป็นไปตามผลทางทฤษฎีหรือไม่ ทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร

สมมุติฐาน

- ผลการเปลี่ยนแปลงค่า RSSI คาดว่าจะต้องลดลง(ค่าเป็นลบมากขึ้น) เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น

อุปกรณ์

- XBee Module 2 ตัว (ตัวส่ง 1 ตัว , ตัวรับ 1 ตัว) แสดงดังรูปที่ 4.1
- คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
- กล่อง ขนาด 21x29.7 ซม. 2 กล่อง
- โปรแกรมใช้ในการหาค่า RSSI

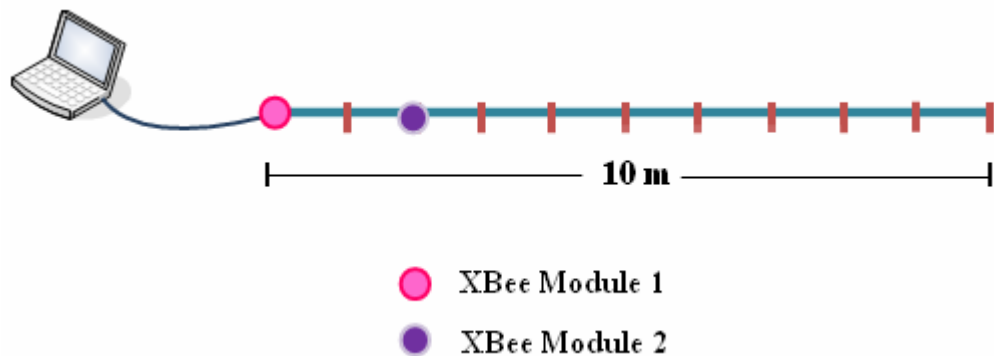


รูปที่ 4.1 บอร์ด XBee Module

วิธีการทดลอง

- ทำการจัดวาง XBee Module 2 ตัว ให้ห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.2

- หาค่า RSSI จากโปรแกรมที่ได้เตรียมไว้ เก็บค่าทั้งหมด 50 ครั้ง และทำการหาค่าเฉลี่ย และบันทึกผลค่าที่ได้
- เมื่อเสร็จสิ้นข้อ 2 ให้ทำตามข้อที่ 1 และ 2 โดยจัดวาง XBee Module ให้ห่างกันทุกๆระยะ 1 เมตร จนกระทั่งระยะห่างระหว่าง XBee Module เป็น 10 เมตร และบันทึกผลที่ได้ทุกๆระยะ 1 เมตร
- ทำตามขั้นตอนที่ 1-3 ทั้งภายในอาคารและนอกอาคาร และทำการบันทึกผล



รูปที่ 4.2 ภาพจำลองแบบการทดลองการจัดวางตำแหน่งของ XBee Module เพื่อหาค่า RSSI

สภาพแวดล้อม

- ภายในอาคาร ช่วงทางเดินหน้าห้อง ชั้น 12 ตึก E12 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แสดงดังรูปที่ 4.3



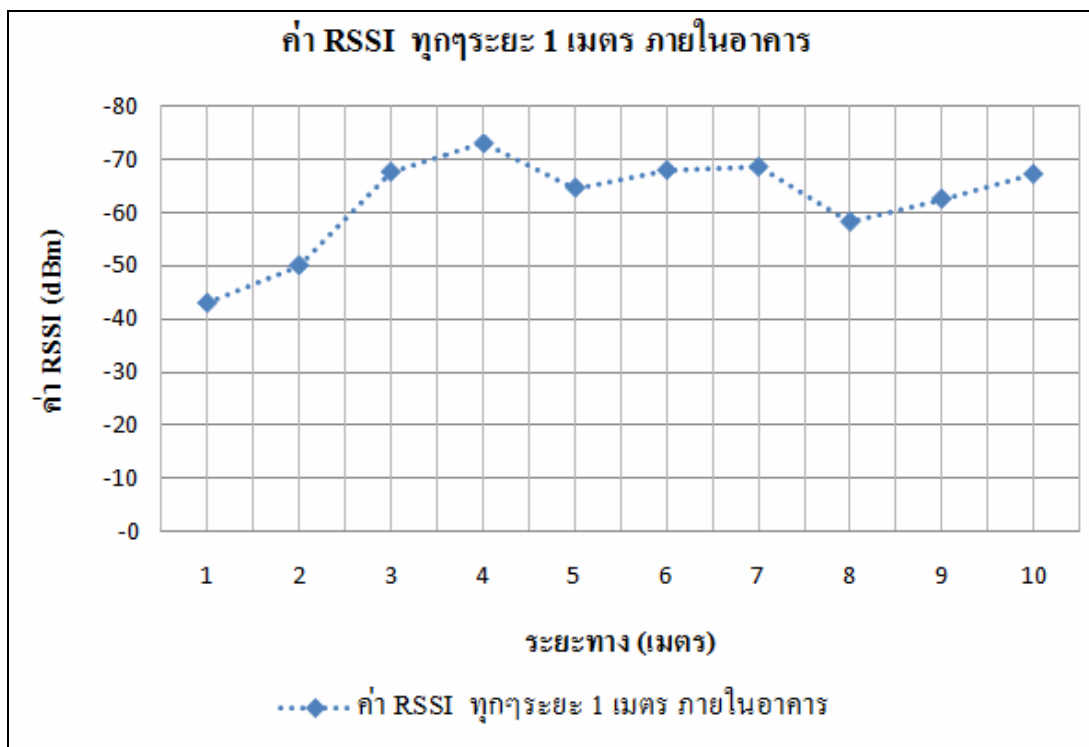
รูปที่ 4.3 สถานที่ในการทดลองภายในอาคาร

- ภายนอกอาคาร ลานกิจกรรมบริเวณลานกิจกรรมด้านข้างสนามเบดมินตัน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แสดงดังรูปที่ 4.4

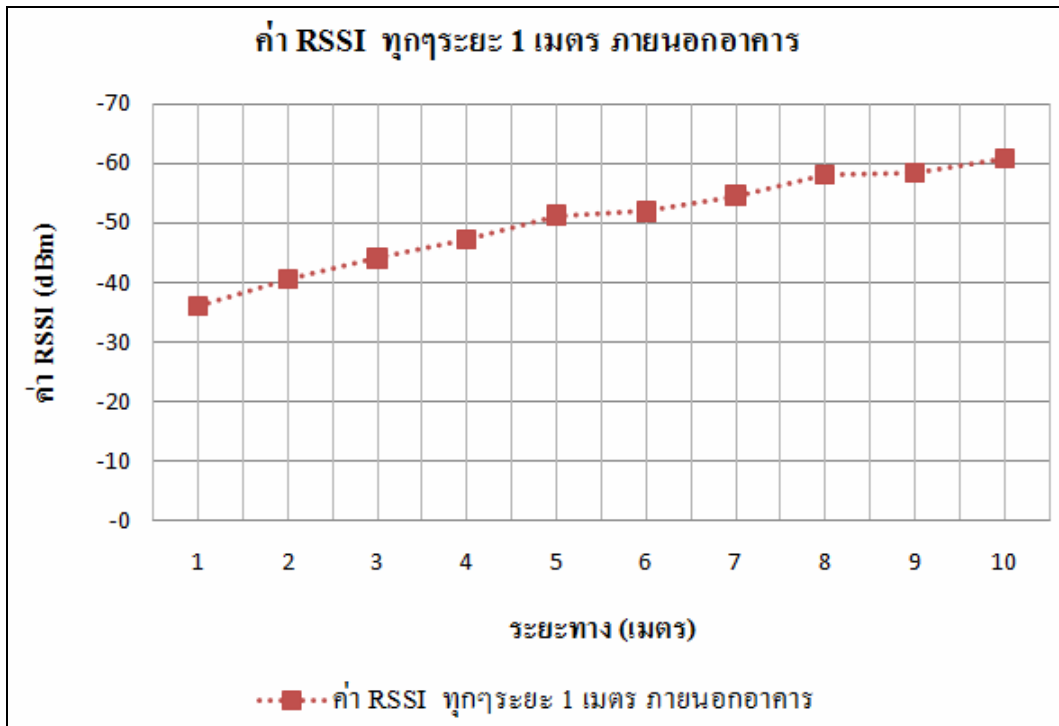


รูปที่ 4.4 สถานที่ในการทดลองภายนอกอาคาร

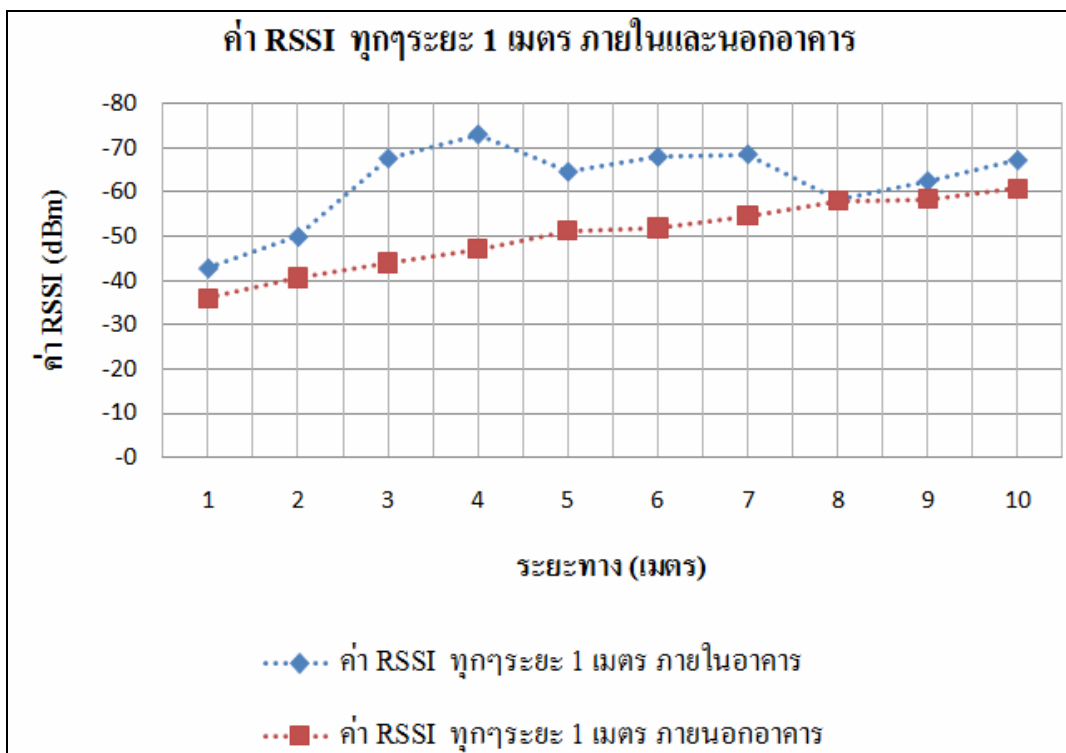
ผลการทดลอง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า RSSI ทุกๆช่วง 1 เมตร ในระยะทาง 10 เมตร ภายในอาคาร



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า RSSI ทุกๆช่วง 1 เมตร ในระยะทาง 10 เมตร ภายนอกอาคาร



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบค่า RSSI ทั้งภายในและภายนอกอาคาร

สรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.5 ค่า RSSI ที่วัดได้จากภายในอาคาร มีค่าที่ไม่เพิ่มขึ้นตามระยะทาง ค่า RSSI มีค่าขึ้นลงไม่แน่นอน เนื่องมาจาก เกิดการสะท้อน การหักเห การจางหายของสัญญาณ ภายในอาคาร ส่วนรูปที่ 4.6 ค่า RSSI ที่วัดได้จากภายนอกอาคาร มีค่าลดลง (ค่าลบมากขึ้น) เรื่อยๆตามระยะทางที่มากขึ้น เนื่องจากภายนอกอาคารไม่มีสิ่งกีดขวาง เพราะฉะนั้น ค่า RSSI ที่ได้จากการทดลองภายนอกอาคาร มีความน่าเชื่อถือมากกว่า สภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร จึงเหมาะสมที่จะนำมาคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุต่อไป

4.2 การทดลองการหาค่าตัวแปรของสมการเพื่อใช้ในการหาระยะทางและหาตำแหน่งของวัตถุ

จุดประสงค์

- เพื่อหาค่าตัวแปร A และ n ภายนอกอาคาร จากสมการ (2.1)

เมื่อ RS_{si} คือค่าความแรงของสัญญาณวิทยุ มีหน่วยเป็น เดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm)

n คือค่าคงที่การกระจายสัญญาณของสถานที่นั้นๆ

d คือระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ไร้สาย (เมตร)

A คือค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับใน 1 เมตร (dBm)

จากสมการข้างต้น ถ้าค่าระยะทาง (d) เพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ค่า RS_{si} ลดลง ซึ่งบอกค่าความแรงของสัญญาณ สามารถนำผลนี้ไปใช้เพื่อหาระยะทางและปริมาณตำแหน่งวัตถุ

สมมุติฐาน

- ค่าของตัวแปร A และ n ที่ได้มา ทำให้ค่าระยะทางที่ได้จากการคำนวณเท่ากับกับระยะทางจริง

อุปกรณ์

- XBee Module 5 ตัว (ตัวส่ง 1 ตัว , ตัวรับ 4 ตัว)
- คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
- กล่อง ขนาด 21x29.7 ซม. 2 กล่อง
- โปรแกรมใช้ในการหาค่า RS_{si}

วิธีการทดลอง

- ทำการหาค่า A โดยการวัดค่า RSSI โดยรอบตัวรับทั้งหมด 4 ตัว เป็นระยะรัศมี 1 เมตร โดยวัดทุกๆ 45° เก็บค่าครั้งละ 50 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย และบันทึกผล ดังรูปที่ 4.8
- ทำตามข้อ 1 จนครบจำนวนของตัวรับ แล้วนำค่า $RSSI$ ที่ทำการเฉลี่ยแล้วของแต่ละตัว มาทำการหาค่าเฉลี่ยรวม ค่าที่ได้จะเป็น ค่า A ที่ต้องการ
- ทำการหาค่า n ดังนี้
 - ตัวรับทุกตัว ทำการวัดค่า $RSSI$ ทุกๆระยะ 1 เมตร เป็นระยะทั้งสิ้น 10 เมตร (เหมือนการทดลองที่ 1) ค่า $RSSI$ ที่ได้นี้จะเป็นค่าที่ได้จากการวัดจริง เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่า $RSSI$ ที่ได้จากการคำนวณ
 - ค่า $RSSI$ ที่ได้จากการคำนวณ หาได้จากสมการ (2.1)

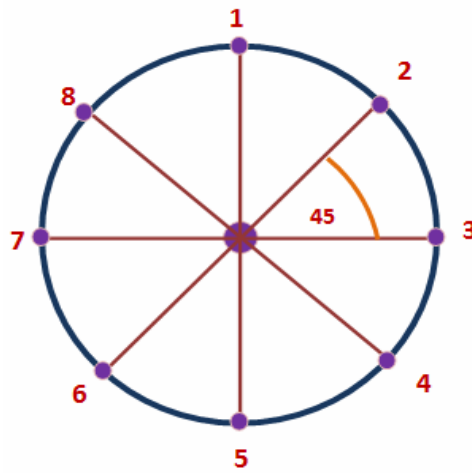
โดยการแทนค่า A ที่ได้จากข้อที่ 1 และทำการแทนค่า d (ระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ไร้สาย ในหน่วยเมตร) เป็น 1,2,3,...,10 ตามลำดับ ส่วนค่า n ให้แทนค่าตั้งแต่ 1 ถึง 4 เมื่อทำการคำนวณแล้วจะได้ ค่า $RSSI$ จากการคำนวณ ทุกๆระยะ 1 เมตร จนถึง 10 เมตร ที่มีค่า n เป็น 1 ถึง 4

- นำค่านี้ไปเปรียบเทียบกับข้อ 3.2 ว่า ค่า $RSSI$ ที่ได้จากการวัดจริงใกล้เคียงกับค่า $RSSI$ ที่ได้จากการคำนวณ ที่ค่า n ต่างๆกัน มากที่สุด ค่าที่ใกล้เคียงที่สุดจะมีค่า n ที่ต้องการ ในการหาค่า $RSSI$ ที่ใกล้เคียงที่สุดหาได้จาก **Root Mean Square Error (RMSE)** ซึ่งแสดงดังสมการ (4.1)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\text{ค่า } RSSI \text{ ที่วัดจริง} - \text{ค่า } RSSI \text{ จากการคำนวณ})^2}{\text{จำนวนค่า } RSSI \text{ ที่ทำการเปรียบเทียบ}}}$$

(4.1)

ค่า RMSE ที่น้อยที่สุดแสดงว่ามีค่า $RSSI$ จากการวัดจริงกับการคำนวณใกล้เคียงกันที่สุด เพราะฉะนั้นจะได้ค่า n ที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.8 แสดงการจัดวางตำแหน่งของ XBee Module เพื่อทำการหาค่า A



รูปที่ 4.9 การทดลองหาค่า A และ n ทุกๆช่วง 1 เมตร

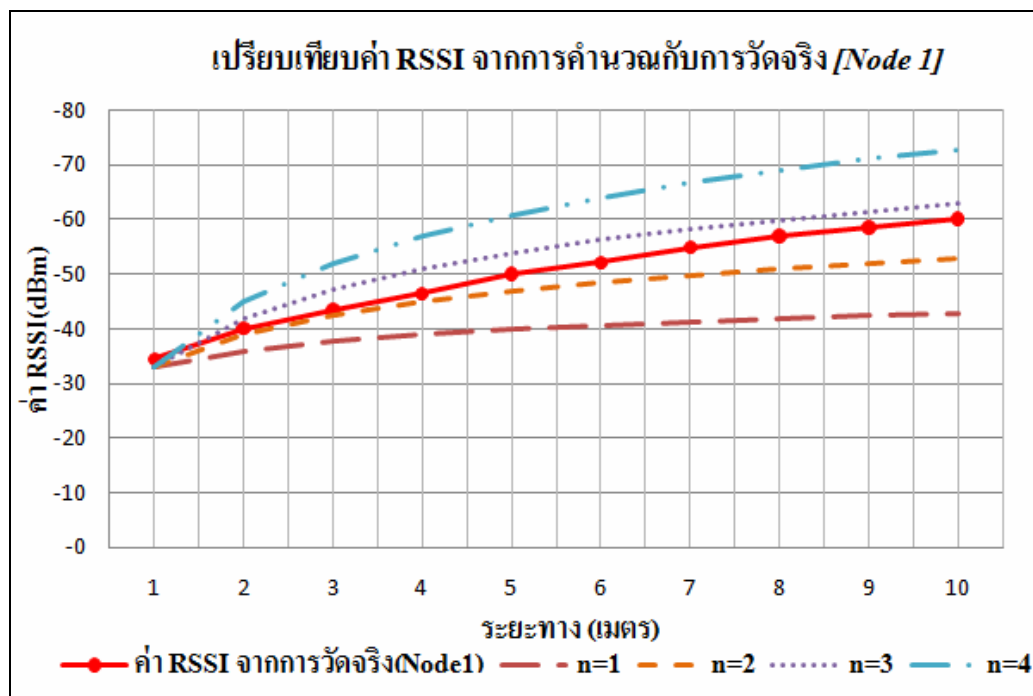
สภาพแวดล้อม

- ภายนอกอาคาร ลานกิจกรรมบริเวณลานกิจกรรมด้านข้างสนามแบดมินตัน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (เหมือนการทดลองที่ 4.1)

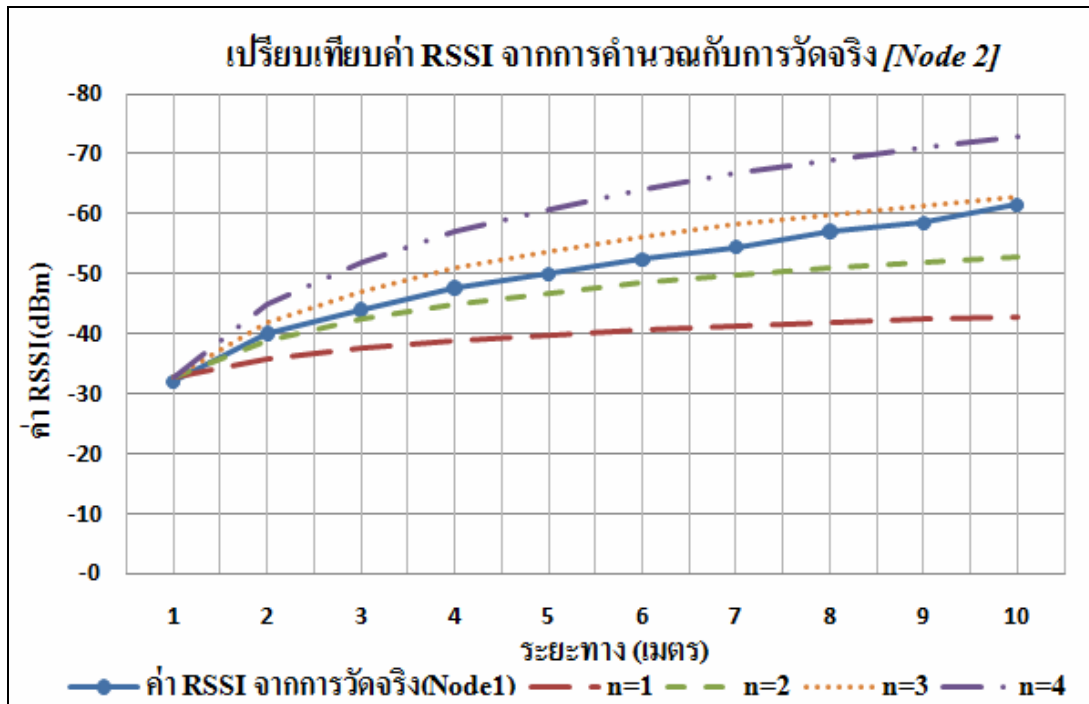
ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของค่าตัวแปร A

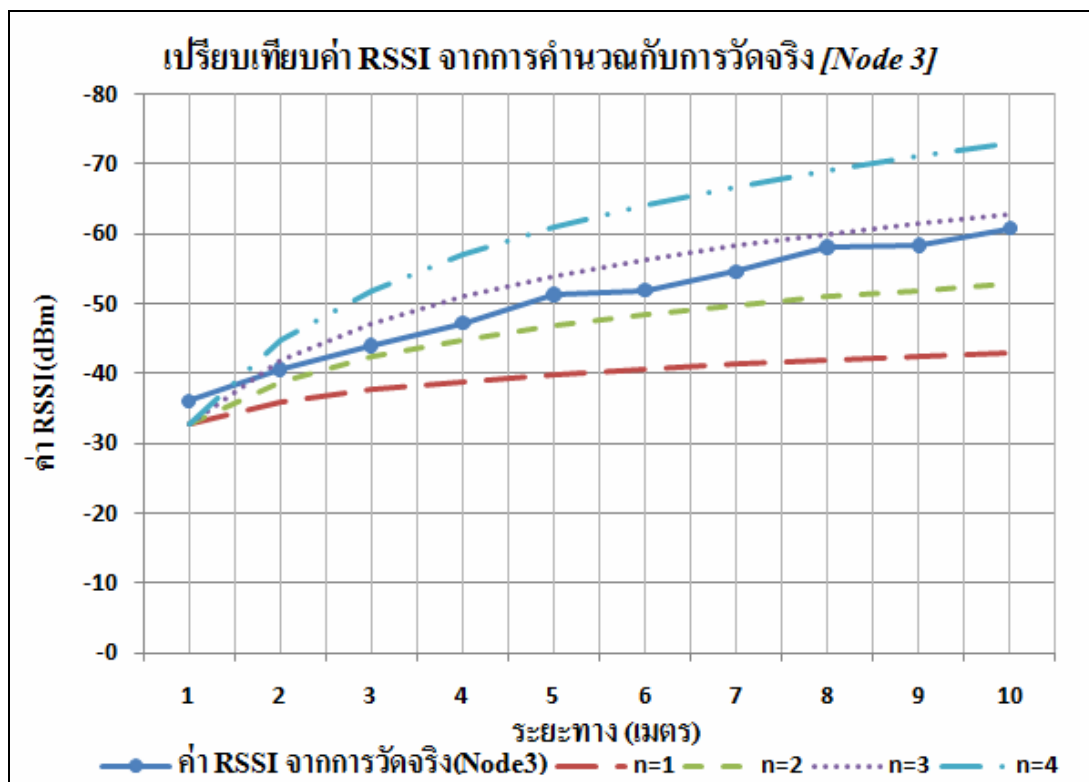
Node	ค่าเฉลี่ยของค่า A แต่ละ Node
1	33.0325
2	32.1825
3	32.7450
4	33.4625
ค่าเฉลี่ยของค่า A ทั้งหมด 4 Node	32.855625



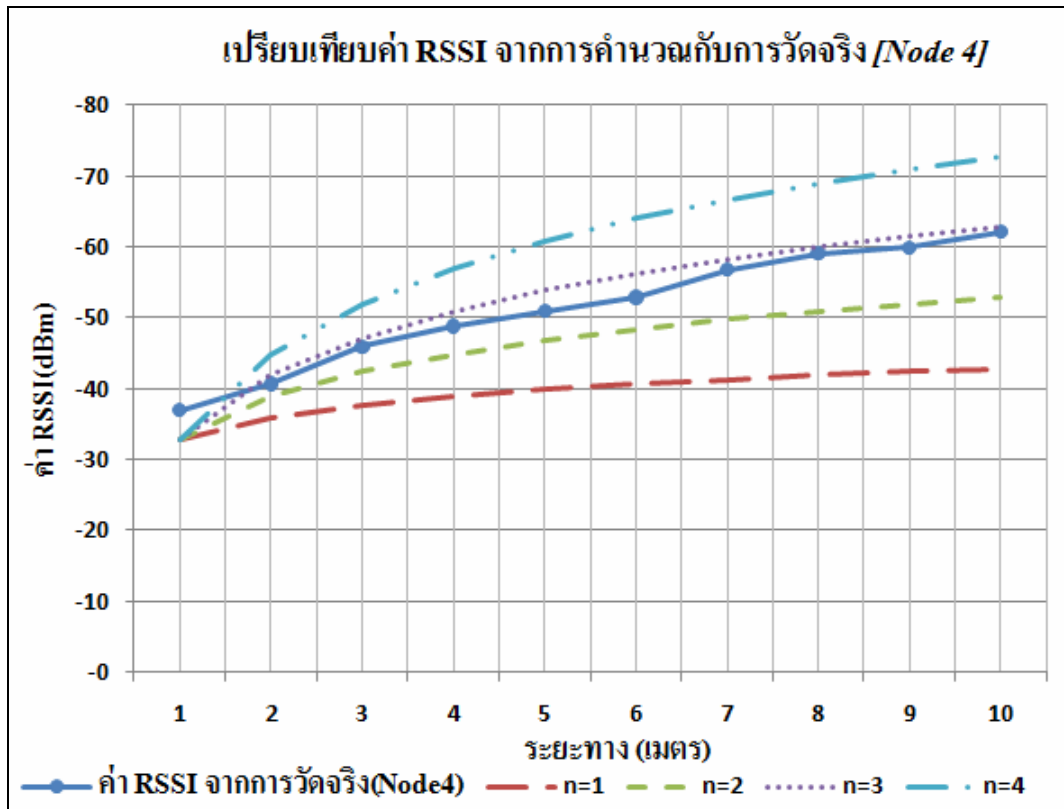
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RSSI จากการคำนวณกับการวัดจริง ของ Node 1



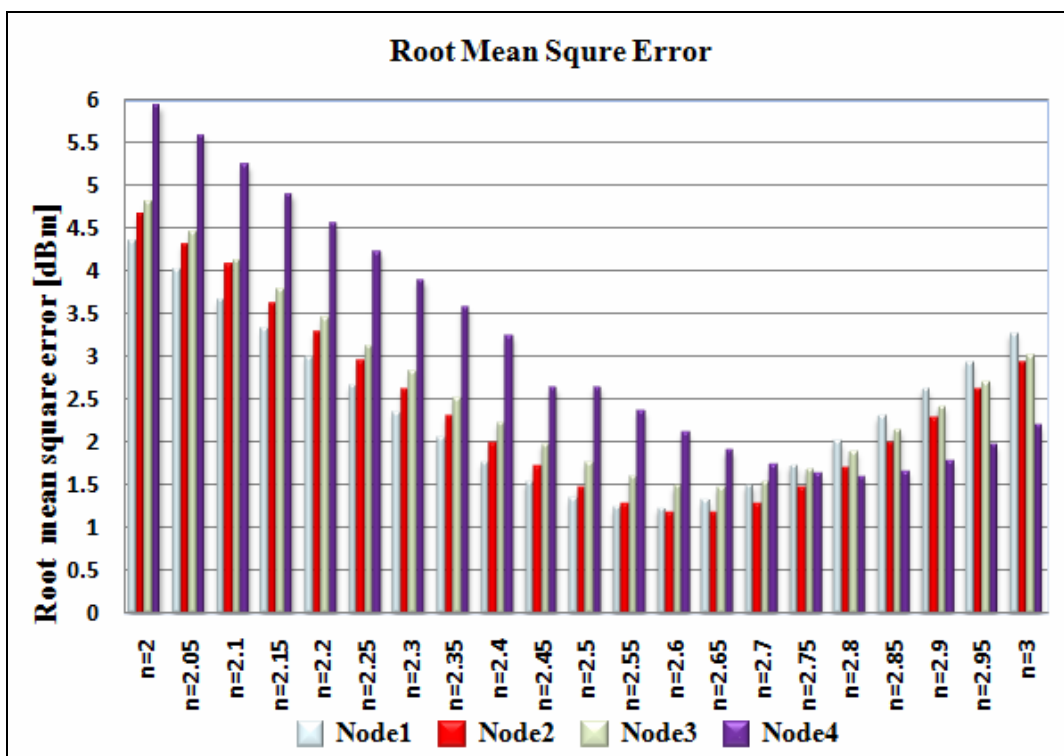
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RSSI จากการคำนวณกับการวัดจริง ของ Node 2



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RSSI จากการคำนวณกับการวัดจริง ของ Node 3



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า RSSI จากการคำนวณกับการวัดจริง ของ Node 4



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่า RMSE ของ Node 1-4 โดยที่ค่ามีค่า n แตกต่างกัน

สรุปผลการทดลอง

ค่าตัวแปร A และ n จากการทดลองภายนอกอาคาร ได้ว่า ค่า $A = 32.855625$ จากรูปที่ 4.10-4.13 จะเห็นได้ว่าค่า RSSI ที่ได้จากการคำนวณที่มีค่า n ระหว่าง 2-3 มีค่า RSSI ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงมากที่สุด และจากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าค่า RMSE ที่น้อยที่สุดจะอยู่ที่ค่า n ประมาณ 2.65 เพราะฉะนั้นในการทดลองหาตำแหน่งของวัตถุภายนอกอาคารจะใช้ค่า $A = 32.855625$ และ ค่า $n = 2.65$

4.3 การทดลองหาตำแหน่งของวัตถุด้วยค่า RSSI

จุดประสงค์

- เพื่อหาหรือระบุตำแหน่งของวัตถุภายในพื้นที่ 5×5 เมตร ภายนอกอาคาร

สมมุติฐาน

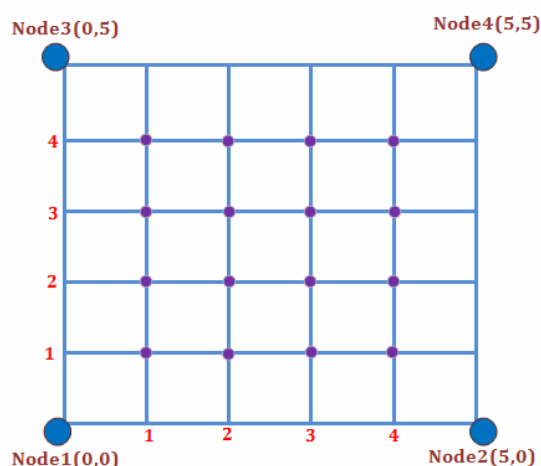
- ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณมาได้ตรงตามตำแหน่งจริงที่วัตถุอยู่ในขณะนั้น

อุปกรณ์

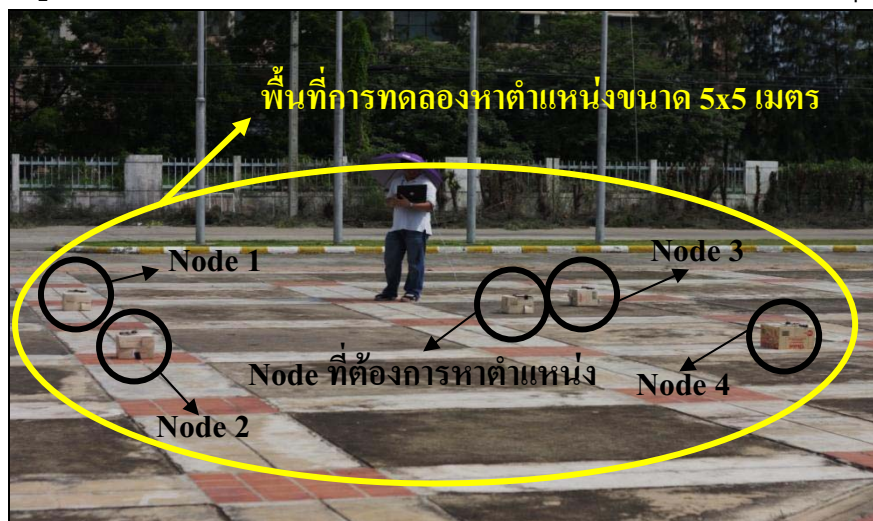
- XBee Module 5 ตัว (ตัวส่ง 1 ตัว , ตัวรับ 4 ตัว)
- คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
- กล่อง ขนาด 21×29.7 ซม. 5 กล่อง
- โปรแกรมใช้ในการหาค่า RSSI และ หาตำแหน่งของวัตถุ

วิธีการทดลอง

- จัดเตรียมพื้นที่ขนาด 5×5 เมตร โดยตัวรับทั้ง 4 ตัว จะอยู่ที่แต่ละมุมของพื้นที่ แสดงดังรูปที่ 4.15
- นำตัวส่ง ไปไว้ในพื้นที่ ตรงตำแหน่งที่ต้องการ และทำการส่งค่าเพื่อให้โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่ง
- ทำตามขั้นตอนที่ 1-2 ทั้งภายในอาคารและนอกอาคาร และทำการบันทึกผล



รูปที่ 4.15 ภาพจำลองการจัดพื้นที่เพื่อที่จะคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุ

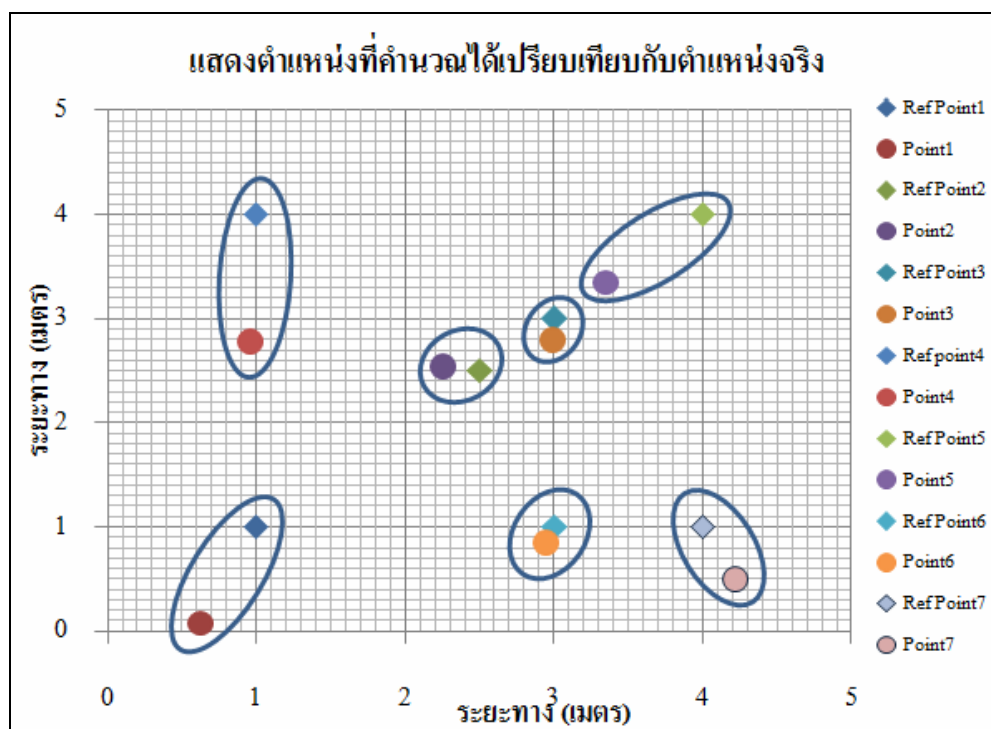


รูปที่ 4.16 แสดงการทดลองหาตำแหน่งของวัตถุ

สภาพแวดล้อม

- ภายนอกอาคาร ลานกิจกรรมบริเวณด้านข้างสนามเบตมินตัน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (เหมือนการทดลองที่ 4.1)

ผลการทดลอง



รูปที่ 4.17 แสดงผลตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้

สรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าตำแหน่งที่ได้คำนวณกับตำแหน่งจริงมีความคลาดเคลื่อนพอสมควร แต่ตรงช่วงบริเวณตรงกลางของพื้นที่ตำแหน่งที่คำนวณได้กับกับตำแหน่งจริงมีความใกล้เคียงมาก

4.4 การทดลองเก็บค่า RSSI เพื่อเป็นฐานข้อมูลของเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นต์ ในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร

จุดประสงค์

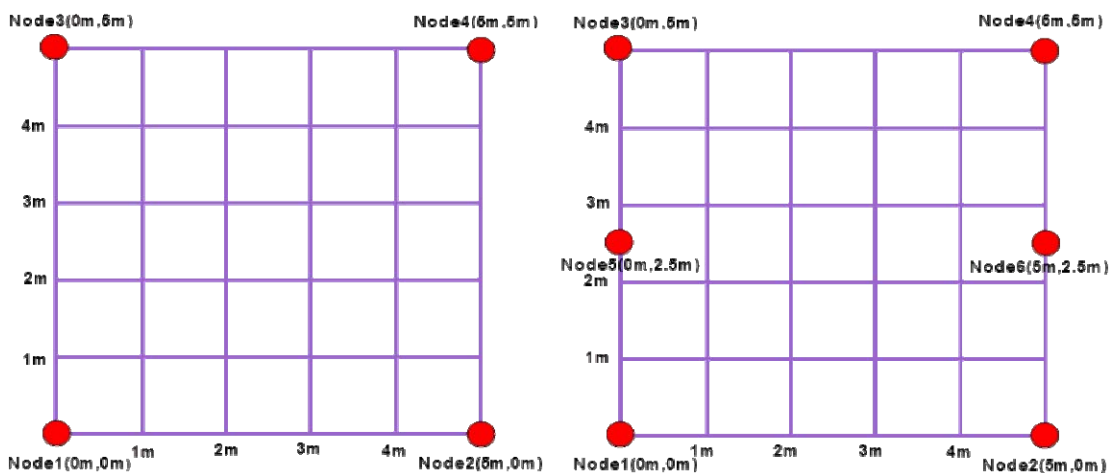
- เก็บค่า RSSI ไว้ใช้เป็นฐานข้อมูลของเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นต์เพื่อนำไปหาดำแหน่งของวัตถุ

อุปกรณ์

- XBee Module 7 ตัว (ตัวส่ง 1 ตัว , ตัวรับ 6 ตัว)
- คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
- กล่อง ขนาด 21x29.7 ซม. 7 กล่อง
- โปรแกรมใช้ในการหาค่า RSSI

วิธีการทดลอง

- จัดเตรียมพื้นที่ขนาด 5x5 เมตร โดยใช้ตัวรับทั้ง 4 ตัว และตัวรับ 6 ตัว ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.18
- ทำการเก็บค่า RSSI ของตำแหน่งที่ (0,0),(1,0),(2,0),..., (5,5) รวมทั้งหมด 36 ตำแหน่ง โดยเก็บค่า RSSI ทั้งที่ใช้โนดอ้างอิง 4 ตัว และ 6 ตัว ตามลำดับ
- ทำตามข้อ 2 จำนวน 10 รอบ แต่ละรอบห่างกัน 10 นาที และนำค่า RSSI ทั้ง 10 รอบของแต่ละตำแหน่งมาหาค่าเฉลี่ย แล้วทำการเก็บค่าลงในฐานข้อมูล



รูปที่ 4.18 ภาพจำลองการจัดพื้นที่เพื่อทำการเก็บค่า RSSI

สภาพแวดล้อม

- ภายในอาคาร บริเวณหน้าลิฟต์ ชั้น 12 ตึก E12 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 สถานที่ในการทดลองภายในอาคาร

ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองแล้วจะได้ค่า RSSI ของแต่ละตำแหน่งที่ใช้ตัวรับ 4 ตัว แสดงดังตารางที่ 4.2 และได้ค่า RSSI ของแต่ละตำแหน่งที่ใช้ตัวรับ 6 ตัว แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่า RSSI ของแต่ละตำแหน่งที่ใช้ตัวรับ 4 ตัว

ตำแหน่ง	ตัวรับที่ 1 (-dBm)	ตัวรับที่ 2 (-dBm)	ตัวรับที่ 3 (-dBm)	ตัวรับที่ 4 (-dBm)
(0m,0m)	26.0	44.9	47.0	52.0
(1m,0m)	32.5	42.8	47.7	49.9
(2m,0m)	38.3	41.0	48.5	49.7
(3m,0m)	41.3	36.9	48.3	46.8
(4m,0m)	44.3	31.4	50.9	48.9
(5m,0m)	44.2	26.0	26.0	53.2
(0m,1m)	31.2	46.6	45.5	53.2
(1m,1m)	32.3	45.8	45.4	49.3

(2m,1m)	37.0	39.0	47.9	47.6
---------	------	------	------	------

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงค่า RSSI ของแต่ละตำแหน่งที่ใช้ตัวรับ 4 ตัว

ตำแหน่ง	ตัวรับที่ 1 (-dBm)	ตัวรับที่ 2 (-dBm)	ตัวรับที่ 3 (-dBm)	ตัวรับที่ 4 (-dBm)
(3m,1m)	40.4	36.1	49.4	46.8
(4m,1m)	44.9	33.6	48.5	45.3
(5m,1m)	48.9	32.1	51.4	44.8
(0m,2m)	35.1	46.4	42.9	48.8
(1m,2m)	34.4	44.3	42.7	48.1
(2m,2m)	39.6	41.1	45.2	45.9
(3m,2m)	40.8	39.5	46.8	43.0
(4m,2m)	44.8	35.2	44.8	42.0
(5m,2m)	49.2	36.3	51.3	39.2
(0m,3m)	39.3	48.2	37.5	47.4
(1m,3m)	38.6	45.3	38.4	45.2
(2m,3m)	40.2	44.3	41.2	44.1
(3m,3m)	41.5	41.2	43.2	41.1
(4m,3m)	46.4	40.3	45.6	37.5
(5m,3m)	50.3	40.3	48.8	36.5
(0m,4m)	41.2	50.4	32.6	48.8
(1m,4m)	42.0	49.3	35.8	45.1
(2m,4m)	42.0	45.0	37.4	42.7
(3m,4m)	44.8	44.5	40.1	38.3
(4m,4m)	47.4	44.5	44.9	35.2
(5m,4m)	48.9	42.7	47.7	31.7
(0m,5m)	47.4	48.7	26.0	48.3
(1m,5m)	46.0	49.2	31.1	44.2
(2m,5m)	46.7	48.6	36.5	41.7
(3m,5m)	48.5	46.9	41.3	37.5
(4m,5m)	48.6	47.6	41.7	33.5
(5m,5m)	49.4	49.0	45.3	26.7

ตารางที่ 4.3 ค่า RSSI ของแต่ละตำแหน่งที่ใช้ตัวรับ 6 ตัว

ตำแหน่ง	ตัวรับที่ 1 (-dBm)	ตัวรับที่ 2 (-dBm)	ตัวรับที่ 3 (-dBm)	ตัวรับที่ 4 (-dBm)	ตัวรับที่ 5 (-dBm)	ตัวรับที่ 6 (-dBm)
(0m,0m)	26.0	46.1	46.2	55.8	37.3	53.9
(1m,0m)	31.4	41.8	47.6	51.6	40.1	46.9
(2m,0m)	36.4	39.1	48.3	50.1	41.2	43.2
(3m,0m)	40.8	36.3	48.0	47.2	46.0	40.2
(4m,0m)	43.0	31.1	53.5	51.1	49.1	38.6
(5m,0m)	42.7	26.0	53.7	43.9	54.8	34.7
(0m,1m)	31.8	45.7	45.7	53.7	36.8	49.3
(1m,1m)	33.4	45.4	45.0	51	36.9	44.7
(2m,1m)	36.2	39.1	47.7	48.6	40.4	41.1
(3m,1m)	39.9	36.4	48.9	46.2	45.3	37.4
(4m,1m)	45.0	33.6	49.7	45.6	46.9	33.9
(5m,1m)	47.4	31.5	50.6	44.2	50.7	32.2
(0m,2m)	35.1	46.7	41.6	49.6	30.2	46.2
(1m,2m)	34.2	44.8	42.3	48.4	34.9	43.8
(2m,2m)	41.0	42.1	44.2	44.9	38.4	40.4
(3m,2m)	41.2	39.7	46.3	43.0	41.7	35.7
(4m,2m)	44.9	35.1	47.6	41.9	44.8	31.8
(5m,2m)	48.4	34.6	50.6	40.9	47.9	28.1
(0m,3m)	39.6	47.8	37.4	49.1	29.0	46.8
(1m,3m)	39.1	44.6	38.5	45.8	31.8	43.3
(2m,3m)	41.2	44.0	40.7	44.8	35.9	41.4
(3m,3m)	44.1	41.5	43.7	41.8	40.1	36.9
(4m,3m)	46.8	39.5	45.8	38.5	42.5	32.6
(5m,3m)	49.7	39.2	48.4	36.8	44.2	28.8
(0m,4m)	42.4	50.5	32.3	50.4	33.9	48.0
(1m,4m)	43.3	48.1	35.3	45.5	33.9	44.5

(2m,4m)	43.9	45.1	37.2	42.2	38.1	42.5
(3m,4m)	45.4	44.4	40.7	39.0	40.2	39.0

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ค่า RSSI ของแต่ละตำแหน่งที่ใช้ตัวรับ 6 ตัว

ตำแหน่ง	ตัวรับที่ 1 (-dBm)	ตัวรับที่ 2 (-dBm)	ตัวรับที่ 3 (-dBm)	ตัวรับที่ 4 (-dBm)	ตัวรับที่ 5 (-dBm)	ตัวรับที่ 6 (-dBm)
(4m,4m)	48.1	44.0	44.5	36.2	42.4	34.7
(5m,4m)	50.9	44.2	49.0	31.9	47.7	33.6
(0m,5m)	47.2	50.8	26.0	49.0	37.8	49.1
(1m,5m)	47.3	49.9	31.3	44.2	36.6	47.4
(2m,5m)	48.3	49.7	36.9	42.1	40.1	43.1
(3m,5m)	47.5	45.0	41.2	38.8	42.2	41.7
(4m,5m)	49.3	47.1	42.9	33.8	44.7	37.1
(5m,5m)	50.7	46.7	45.8	27.0	47.1	37.5

4.5 การทดลองเก็บค่า RSSI ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในอาคาร

จุดประสงค์

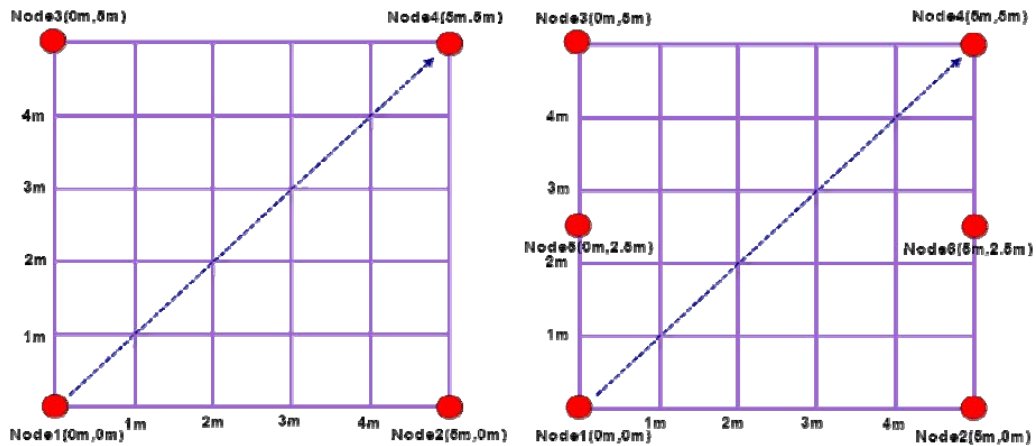
- เก็บค่า RSSI ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในพื้นที่การทดลอง เพื่อนำไปคำนวณหาตำแหน่งของอัลกอริทึมการหาตำแหน่งต่าง ๆ

อุปกรณ์

- XBee Module 7 ตัว (ตัวส่ง 1 ตัว , ตัวรับ 6 ตัว)
- คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
- กล่อง ขนาด 21×29.7 ซม. 7 กล่อง
- โปรแกรมใช้ในการหาค่า RSSI

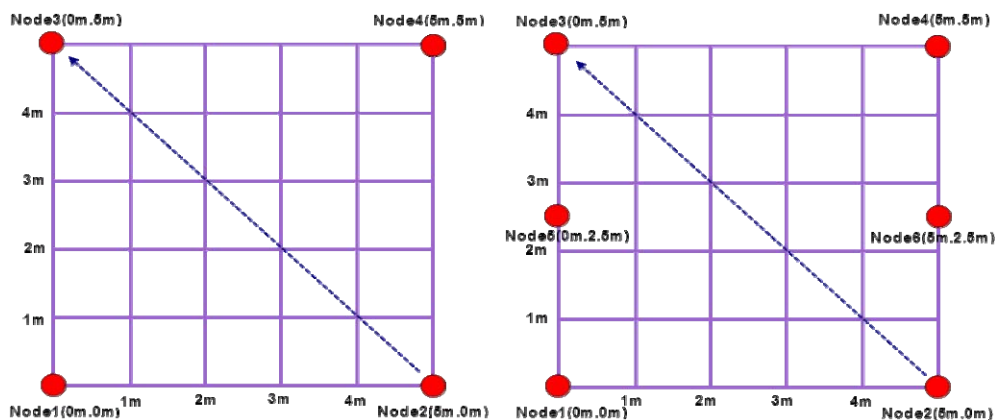
วิธีการทดลอง

- จัดเตรียมพื้นที่ขนาด 5×5 เมตร โดยใช้ตัวรับทั้ง 4 ตัว และ ตัวรับ 6 ตัว ตามลำดับ (เหมือนการทดลองที่ 4.4)
- ทำการเก็บค่า RSSI แต่ละตำแหน่งตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างซ้ายมือ(จุด0m,0m) ถึงมุมด้านบนขวามือ(จุด 5m,5m) แสดงดังรูปที่ 4.20 โดยมีความห่างแต่ละตำแหน่งเป็น (0m,0m), (0.33m,0.33m), (0.66m,0.66m), (1m,1m), ... , (5m,5m) ทำแบบนี้ทั้งสิ้น 5 รอบ แต่ละรอบห่างกัน 10 นาที โดยเก็บค่า RSSI ทั้งที่ใช้ตัวรับ 4 ตัว และ 6 ตัว ตามลำดับ



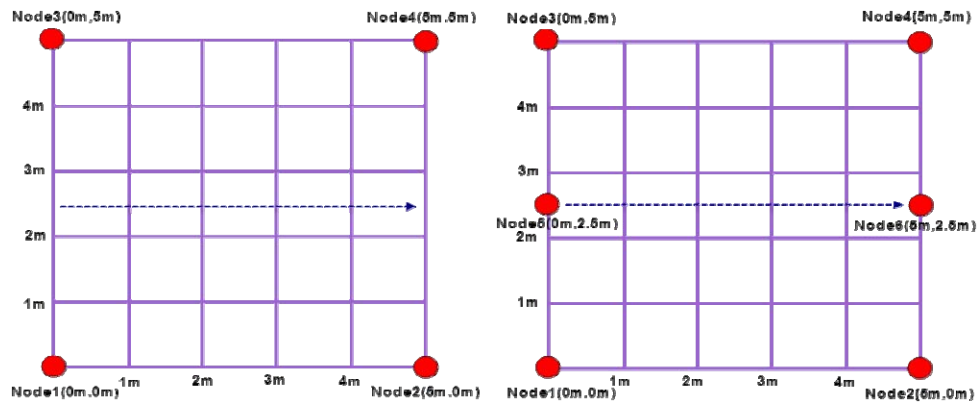
รูปที่ 4.20 ภาพจำลองการเก็บค่า RSSI ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างซ้ายมือถึง มุมด้านบนขวามือ

- ทำการเก็บค่า RSSI แต่ละตำแหน่งตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างขวามือ(จุด5m,0m) ถึงมุมด้านบนซ้ายมือ(จุด 0m,5m) แสดงดังรูปที่ 4.21 โดยมีความห่างแต่ละตำแหน่งเป็น (5m,0m), (4.66m,0.33m), (4.33m,0.66m), (4m,1m), ... , (0m,5m) ทำแบบนี้ทั้งสิ้น 5 รอบ แต่ละรอบห่างกัน 10 นาที โดยเก็บค่า RSSI ทั้งที่ใช้ตัวรับ 4 ตัว และ 6 ตัว ตามลำดับ



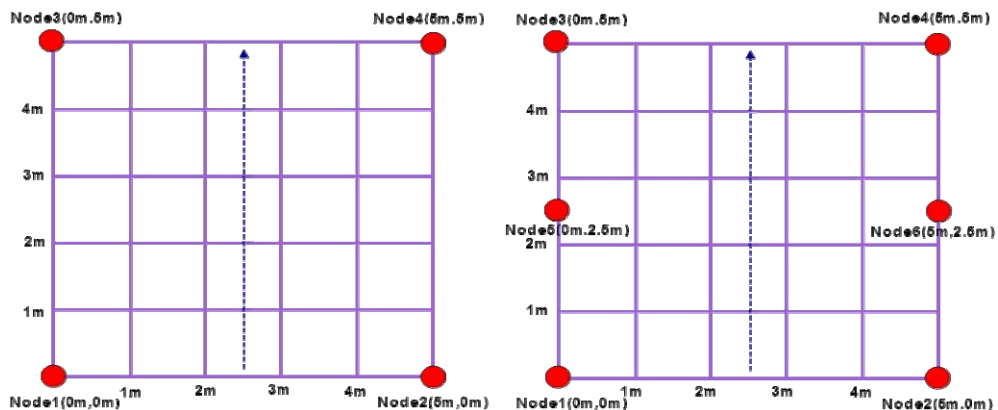
รูปที่ 4.21 ภาพจำลองการเก็บค่า RSSI ตามแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างขวามือถึง มุมด้านบนซ้ายมือ

- ทำการเก็บค่า RSSI แต่ละตำแหน่งตามแนวนอนกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง จากตำแหน่ง (0m,2.5m), (0.25m,2.5m), (0.5m,2.5m), (0.75m,2.5m), (1m,2.5m), ..., (5m,2.5m) แสดงดังรูปที่ 4.22 ทำแบบนี้ทั้งสิ้น 5 รอบ แต่ละรอบห่างกัน 10 นาที โดยเก็บค่า RSSI ทั้งที่ใช้ตัวรับ 4 ตัว และ 6 ตัว ตามลำดับ



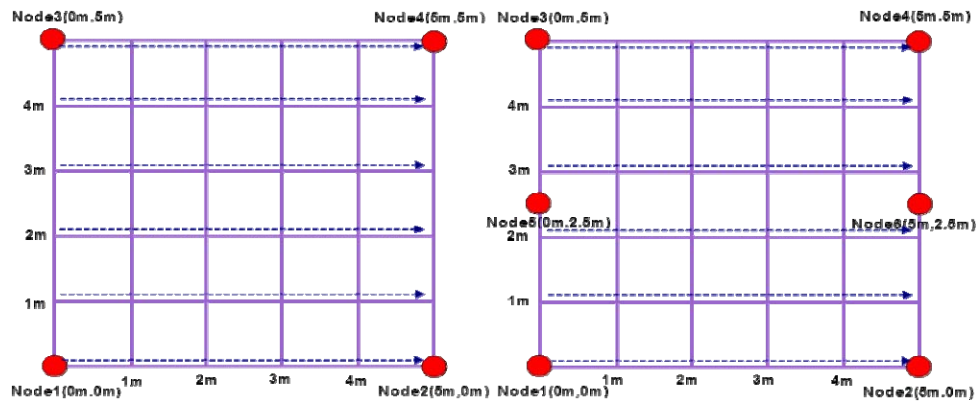
รูปที่ 4.22 ภาพจำลองการเก็บค่า RSSI ตามแนวนอนกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง

- ทำการเก็บค่า RSSI แต่ละตำแหน่งตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง จาก ตำแหน่ง (2.5m,0m), (2.5m,0.25m), (2.5m,0.5m), (2.5m,0.75m), (2.5m,1m), ..., (2.5m,5m) แสดงดังรูปที่ 4.23 ทำแบบนี้ทั้งสิ้น 5 รอบ แต่ละรอบห่างกัน 10 นาที โดยเก็บค่า RSSI ทั้งที่ใช้ตัวรับ 4 ตัว และ 6 ตัว ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ภาพจำลองการเก็บค่า RSSI ตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง

- ทำการเก็บค่า RSSI ของตำแหน่งที่ (0,0), (1,0), (2,0), ..., (5,5) ของพื้นที่ทดลอง รวมทั้งหมด 36 ตำแหน่ง แสดงดังรูป 4.24 ทำแบบนี้ทั้งสิ้น 5 รอบ แต่ละรอบห่างกัน 10 นาที โดยเก็บค่า RSSI ทั้งที่ใช้ตัวรับ 4 ตัว และ 6 ตัว ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 ภาพจำลองการเก็บค่า RSSI ทั้งหมด 36 ตำแหน่ง ของพื้นที่ทดลอง

สภาพแวดล้อม

- ภายในอาคาร บริเวณหน้าลิฟต์ ชั้น 12 ตึก E12 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (เหมือนการทดลองที่ 4.4)

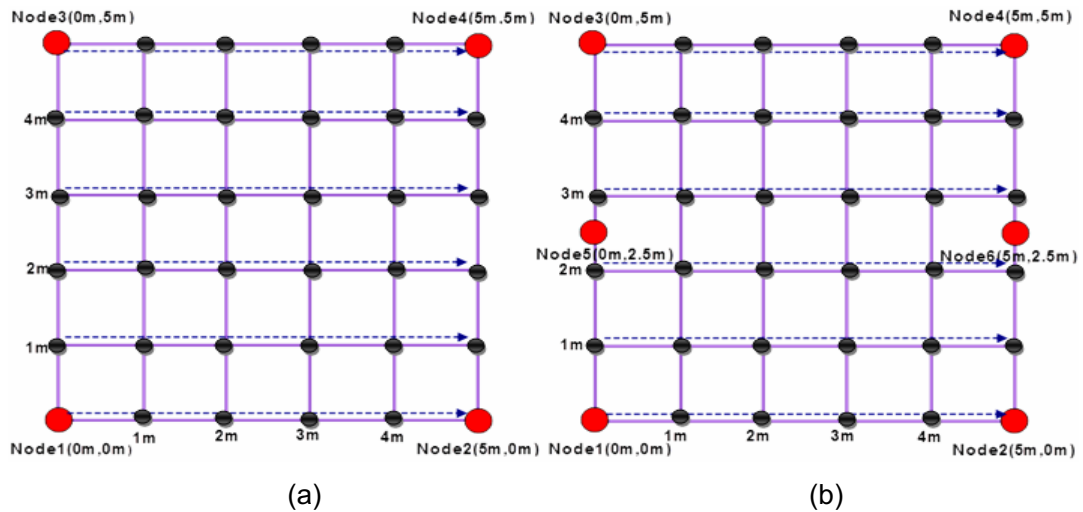
ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองแล้วจะได้ค่า RSSI ของแต่ละตำแหน่งทั้งหมด 5 รูปแบบ แต่ละรูปแบบมีทั้งหมด 5 ครั้ง ที่ใช้ตัวรับ 4 ตัวและ 6 ตัว

4.6 การทดลองหาตำแหน่งของวัตถุ และเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของแต่ละเทคนิค เมื่อวัตถุหยุดนิ่ง

จุดประสงค์

- หาดำแหน่งของวัตถุโดยใช้เทคนิค Maximum Likelihood และเทคนิค Min Max และเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นต์ โดยจะทำการหาดำแหน่งของเป้าหมายแบบหยุดนิ่งจากตำแหน่งทดสอบทั้งหมด 16 ตำแหน่ง โดยในที่นี้ได้ยกตัวอย่างการหาดำแหน่งของวัตถุเมื่อวางตัวในแนวแท่งตามรูปที่ 4.20 และตามแนวตั้งกึ่งกลางของพื้นที่ทดลองดังรูปที่ 4.23 (รูปที่ 4.25 แสดงตำแหน่งของฟิงเกอร์ปริ้นต์ที่เก็บค่า RSSI ทั้งหมด 36 ตำแหน่ง)



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งฟังก์ชันปริพันธ์ 36 ตำแหน่ง (a) กรณีใช้โนดอ้างอิง 4 โหนด และ (b) กรณีใช้โนดอ้างอิง 6 โหนด

- เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของแต่ละเทคนิค

สมมติฐาน

- ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของวัตถุที่ใช้เทคนิคฟังก์ชันปริพันธ์ จะมีค่าน้อยที่สุด รองลงมาคือเทคนิค Min Max และเทคนิค Maximum Likelihood จะมีค่ามากที่สุด

ผลการทดลอง

- กรณีตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย 16 ตำแหน่งทดสอบอยู่ในแนวทแยงของพื้นที่ทดลอง จากมุมด้านล่างซ้ายมือถึงมุมด้านบนขวามือ ดังรูปที่ 4.26

