

การออกแบบการทดลองและหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

ปานทิพย์ จันทร์สมุด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



A DESIGN OF EXPERIMENT AND OPTIMAL PARAMETERS TO
IMPROVE LOCALIZATION ERROR FOR INDOOR POSITIONING
SYSTEM

PANTHIP CHANSAMOOD

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2017
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความกรุณาจาก ดร.อิทธิพงศ์ สุริยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ คำปรึกษาและแนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกท่านสำหรับข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ไปด้วยดี

ขอขอบคุณคุณศุภสส วิเศษสุด ผู้ช่วยวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนอุปกรณ์และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ขอขอบคุณน้องชายที่คอยช่วยเหลือในการทำการทดลอง ขอขอบคุณพี่ ๆ และเพื่อน ๆ ที่คอยเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอดและสุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้เสมอมาจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ปานทิพย์ จันทรสมุทร

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การออกแบบการทดลองและหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

ผู้วิจัย : ปานทิพย์ จันทรสมุทร

ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา: ดร. อธิพงศ์ สุริยา

คำสำคัญ : การระบุตำแหน่งภายในอาคาร, อัลตราไวด์แบนด์, พูเยเร็นจิงแบบสมมาตร, สามเหลี่ยมระยะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และทำการออกแบบการทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในระบบ ระบบประกอบด้วยโมดูลอัลตราไวด์แบนด์จำนวน 5 ตัว ได้แก่ ตัวส่งสัญญาณหรือแองเคอร์ จำนวน 4 ตัว และตัวรับสัญญาณหรือแท็ก จำนวน 1 ตัว คอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผล ระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณคำนวณโดยวิธีพูเยเร็นจิงแบบสมมาตร จากนั้นใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะในการระบุตำแหน่ง ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะมีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ ผลการทดลองในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง พบว่าความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งที่น้อยที่สุดคือ 0.10152 เมตร และยังพบว่าลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ผลการทดลองในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น ให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งที่น้อยที่สุดคือ 0.12147 เมตร ผลการทดลองในสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง ให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งที่น้อยที่สุดคือ 0.16922 เมตร ส่วนผลการทดลองโดยการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานจริงโดยผู้ใช้งานพกตัวรับสัญญาณติดตัวไว้ พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งที่น้อยที่สุดคือ 0.18968 เมตร

ABSTRACT

TITLE : A DESIGN OF EXPERIMENT AND OPTIMAL PARAMETERS TO IMPROVE
LOCALIZATION ERROR FOR INDOOR POSITIONING SYSTEM

AUTHOR : PANTHIP CHANSAMOOD

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : ELECTRICAL ENGINEERING

ADVISOR : ATIPONG SURIYA, Ph.D.

KEYWORDS : INDOOR POSITIONING, ULTRA WIDEBAND, SYMMETRICAL DOUBLE-SIDE
TWO WAY RANGING, TRILATERATION

This thesis presents a design and implementation of an indoor positioning system using ultra wideband technology. In addition, a design of experiments was conducted to find optimal parameters to improve localization errors in the system. The system consists of five ultra wide band modules, i.e., four transmitters (anchors) and one receiver (tag). The computer and a developed program were used as a processing unit. The distances between anchors and a tag were calculated using Symmetrical Double-Side Two Way Ranging (SDS-TWR) and Trilateration was then used to find the location of a tag. The experiments were conducted by changing the parameters expected to affect the localization errors. These parameters include heights of anchors, orientations of anchors, layouts of anchors, and numbers of anchors. The experimental results in line-of-sight environment (free-space) showed that four anchors with the height of 0.5 meter, square layout and vertical orientation, resulting in the least mean square of localization error of 0.10152 meter. It was also found that the orientation of anchors has a statistically significant effect on the localization error at an alpha level of 0.05. Moreover, the experimental results in a larger area and those in a real environment with obstacles gave the least mean square of localization errors of 0.12147 meter and 0.16922 meter, respectively. Finally, the experimental results with optimal parameters setting in real situation, that the tag was attached to a user; showed the least mean square of localization error of 0.18968 meter.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	4
1.3 สมมติฐานของวิทยานิพนธ์	4
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 อัลตราไวต์แบนด์	6
2.2 บริเวณสนามของสายอากาศ	8
2.3 กระบวนการระบุตำแหน่ง	9
2.4 การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง	16
2.5 การออกแบบการทดลอง	17
2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 แนวคิดและวิธีการดำเนินงาน	
3.1 กรอบแนวคิด	25
3.2 ขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์	26
3.3 การออกแบบอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ	26
3.4 การออกแบบการทำงานของโปรแกรม	29
3.5 ภาพรวมของระบบ	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	31
3.7 สถานที่ทำการทดลอง	39
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 การทดลองหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศและระยะการทำงานของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์	40
4.2 การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ	44
4.3 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง	49
4.4 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง	63
4.5 การทดลองการใช้งานจริง	65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก	
ก ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง	77
ข ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับต่าง ๆ	120
ค ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น	130
ง ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง	135
จ ผลการทดลองการใช้งานจริง	138
ฉ การเผยแพร่วิทยานิพนธ์	150
ประวัติผู้วิจัย	152

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 พารามิเตอร์ในการศึกษาการระบุตำแหน่งภายในอาคาร	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
3.1 การติดต่อสื่อสารแบบ Serial peripheral interface ของโมดูล DWM1000	28
4.1 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายนอกอาคาร	45
4.2 ผลการทดลองการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนภายนอกอาคารที่ระยะทาง 1 เมตร และ 90 เมตร	46
4.3 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายในอาคาร	48
4.4 ผลการทดลองการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนภายในอาคารที่ระยะทาง 1 เมตร และ 11 เมตร	49
4.5 รูปแบบการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง	50
4.6 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในแต่ละวิธีของการทดลองการระบุตำแหน่ง ภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง	57
4.7 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายใน อาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง	59
4.8 ผลการวิเคราะห์ความสูงที่ระดับต่าง ๆ	60
4.9 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ ขนาดใหญ่ขึ้น วิธีการทดลองที่ 2	62
4.10 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างการทดลองในขนาดพื้นที่ 7×7 เมตร และ 7×14 เมตร	63
4.11 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวางของวิธีการทดลองที่ 2 และวิธีการทดลองที่ 10	65
4.12 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในแต่ละวิธีของการทดลองการใช้งานจริง	67
ก.1 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 1	78
ก.2 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 2	80
ก.3 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 3	81
ก.4 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 4	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

[illegible]

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
จ.1	การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณที่ปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋าสื่อ	139
จ.2	การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณที่ปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋ากางเกง	140
จ.3	การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋าสื่อ	142
จ.4	การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋ากางเกง	144
จ.5	การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศใส่ในกระเป๋าสื่อ	146
จ.6	การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศใส่ในกระเป๋ากางเกง	147

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โมดูล DWM1000	7
2.2 พัลส์ที่ส่งออกมา	7
2.3 วิธีทวนเวียนจิ้งแบบด้านเดียว	11
2.4 วิธีทวนเวียนจิ้งแบบสมมาตร	12
2.5 วิธีทวนเวียนจิ้งแบบไม่สมมาตร	13
2.6 การคำนวณหาตำแหน่งด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะ	14
2.7 การพิจารณาระยะทางในระนาบ 2 มิติ	16
3.1 กรอบแนวคิด	25
3.2 บล็อกไดอะแกรมของโมดูล DWM1000	26
3.3 วงจรของโมดูล DWM1000	28
3.4 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ	29
3.5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	30
3.6 ภาพรวมของระบบ	31
3.7 อุปกรณ์ของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์	32
3.8 หน้าต่างคอมพิวเตอร์	32
3.9 อุปกรณ์วัดการแพร่กระจายคลื่น	33
3.10 เครื่องวิเคราะห์เครือข่าย	33
3.11 โปรแกรมโคค็อกซ์ โคไอดีอี	34
3.12 หน้าต่างเขียนโปรแกรมของโปรแกรมโคค็อกซ์ โคไอดีอี	35
3.13 โปรแกรมคิวท์	35
3.14 หน้าต่างแสดงผลผ่านส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน	36
3.15 โปรแกรม LVDAM-ANT	37
3.16 หน้าต่างการใช้งานของโปรแกรม LVDAM-ANT	37
3.17 โปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัส	38
3.18 หน้าต่างการใช้งานจริงของโปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัสแบบออนไลน์	38
3.19 ขนาดพื้นที่ทำการทดลอง	39
4.1 การทดลองการแพร่กระจายคลื่นของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์	41
4.2 ผลการทดลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอัลตราไวด์แบนด์ในรูปแบบ 2 มิติ	42

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
4.3	การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	42
4.4	ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ต 1	43
4.5	การทดลองระยะการทำงานของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์	43
4.6	การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายนอกอาคาร	44
4.7	การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายในอาคาร	47
4.8	ลักษณะการวางความสูงของตัวส่งสัญญาณ	51
4.9	ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้งและลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ ในแนวนอน	52
4.10	รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณกรณีวางที่มุมและรูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณ กรณีไม่วางที่มุม	53
4.11	จำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว และจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว	54
4.12	ลักษณะการวางของตัวรับสัญญาณ	54
4.13	รูปแบบทั้งหมดที่สามารถวางตัวส่งสัญญาณได้ รูปแบบตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว และรูปแบบตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว	56
4.14	การวางตัวส่งสัญญาณและจุดทดสอบในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น	61
4.15	การวางตัวส่งสัญญาณและจุดทดสอบในสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง	64
4.16	กล่องบรรจุตัวรับสัญญาณ	66

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
UWB	อัลตราไวด์แบนด์
BLE	บลูทูธพลังงานต่ำ
WLAN	เครือข่ายไร้สาย
WPAN	เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล
RSSI	ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ
AOA	มุมที่มาถึง
TOA	ค่าเวลาของการมาถึง
TDOA	ความแตกต่างของเวลาที่มาถึง
TOF	เวลาในการเดินทาง
OWR	วิธีวันเวย์เร็นจ์จิง
TWR	วิธีทูเวย์เร็นจ์จิง
SS-TWR	วิธีทูเวย์เร็นจ์จิงแบบด้านเดียว
SDS-TWR	วิธีทูเวย์เร็นจ์จิงแบบสมมาตร
ASDS-TWR	วิธีทูเวย์เร็นจ์จิงแบบไม่สมมาตร
LOS	เส้นทางที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง
NLOS	เส้นทางที่มีสิ่งกีดขวาง
RMSE	ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน
DOE	การออกแบบการทดลอง
ANOVA	การวิเคราะห์ความแปรปรวน
P-Value	ความน่าจะเป็น
Anchor0	ตัวส่งสัญญาณที่ 0
Anchor1	ตัวส่งสัญญาณที่ 1
Anchor2	ตัวส่งสัญญาณที่ 2
Anchor3	ตัวส่งสัญญาณที่ 3
Tag	ตัวรับสัญญาณ
GUI	ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน
<i>D</i>	ระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ
<i>S</i>	ความเร็วแสง

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
T	ระยะเวลาจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ
R	ระยะของบริเวณสนาม
λ	ความยาวคลื่นของสายอากาศ
P_1	จุดอ้างอิง P_1
P_2	จุดอ้างอิง P_2
P_3	จุดอ้างอิง P_3
P_4	จุดที่ต้องการทราบตำแหน่ง
T_{prop}	เวลาที่แพร่กระจายจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ
T_{prop1}	เวลาที่แพร่กระจายจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ รอบที่ 1
T_{prop2}	เวลาที่แพร่กระจายจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ รอบที่ 2
T_r	เวลาที่ตัวรับสัญญาณได้รับ
T_t	เวลาที่เริ่มส่งสัญญาณ
T_{round}	เวลาที่ตัวส่งสัญญาณเริ่มส่งสัญญาณออกไปจนกระทั่งได้รับการตอบกลับ
T_{round1}	เวลาที่ตัวส่งสัญญาณเริ่มส่งสัญญาณออกไปจนกระทั่งได้รับการตอบกลับ รอบที่ 1
T_{round2}	เวลาที่ตัวส่งสัญญาณเริ่มส่งสัญญาณออกไปจนกระทั่งได้รับการตอบกลับ รอบที่ 2
T_{reply}	เวลาระหว่างตัวรับสัญญาณที่ได้รับสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณจนกระทั่งมีการส่งสัญญาณกลับไปยังตัวส่งสัญญาณ
T_{reply1}	เวลาระหว่างตัวรับสัญญาณที่ได้รับสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณจนกระทั่งมีการส่งสัญญาณกลับไปยังตัวส่งสัญญาณ รอบที่ 1
T_{reply2}	เวลาระหว่างตัวรับสัญญาณที่ได้รับสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณจนกระทั่งมีการส่งสัญญาณกลับไปยังตัวส่งสัญญาณ รอบที่ 2
r_1	รัศมีของจุดอ้างอิง P_1
r_2	รัศมีของจุดอ้างอิง P_2
r_3	รัศมีของจุดอ้างอิง P_3

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
i	ระยะห่างแนวแกน x ระหว่างจุดอ้างอิงที่ P_1 กับ P_3
j	ระยะห่างแนวแกน y ระหว่างจุดอ้างอิงที่ P_1 กับ P_3
x	ขนาดของแกน x
y	ขนาดของแกน y
$\bar{e}_x$	ทิศทางในแนวแกน x
$\bar{e}_y$	ทิศทางในแนวแกน y
n	จำนวนครั้งที่ทำการทดลองในแต่ละจุด
x_i	พิกัดจริงของจุด x ครั้งที่ i
y_i	พิกัดจริงของจุด y ครั้งที่ i
$\hat{x}_i$	พิกัดที่ได้จากการประมาณของจุด x ครั้งที่ i
$\hat{y}_i$	พิกัดที่ได้จากการประมาณของจุด y ครั้งที่ i
γ	สัมประสิทธิ์การสะท้อน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบระบุตำแหน่งมีความสำคัญอย่างมากในการระบุพิกัดหรือตัวตนของวัตถุที่ต้องการทราบเพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้ชีวิตประจำวันด้านต่าง ๆ เช่น การระบุตำแหน่งของผู้ป่วยในโรงพยาบาล การระบุตำแหน่งของสินค้าประเภทต่าง ๆ ในร้านค้า เป็นต้น เทคโนโลยีที่ใช้ในการระบุตำแหน่งที่รู้จักกันเป็นส่วนมาก ได้แก่ ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global positioning system: GPS) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการค้นหาเส้นทาง ระบุพิกัดตำแหน่งบนพื้นโลก การระบุตำแหน่งบนพื้นโลกคำนวณได้จากตำแหน่งของดาวเทียมที่โคจรรอบโลกโดยบอกค่าพิกัดเป็นละติจูดและลองจิจูด เทคโนโลยีนี้ใช้งานได้ดีในสภาพแวดล้อมที่โล่งไม่มีสิ่งกีดขวาง (Line of sight: LOS) แต่เทคโนโลยีนี้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ดีในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง (Non-line of sight: NLOS) หรือภายในอาคารบ้านเรือน เนื่องจากสัญญาณดาวเทียมไม่สามารถทะลุกำแพงหรือสิ่งกีดขวางได้ทำให้มีการลดทอนของสัญญาณและไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ดีภายในอาคาร [1]

ระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร (Indoor positioning system) มีหลากหลายเทคโนโลยีที่มีความสามารถในการระบุตำแหน่ง ได้แก่ เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี (Radio frequency identification: RFID) เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย (Wireless local area network: WLAN) เทคโนโลยีซิกบี (Zigbee) เทคโนโลยีบลูทูธ (Bluetooth) และเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra wideband) เป็นต้น ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีมีข้อดีและข้อเสียต่างกัันดังนี้ [2]

เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีเป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นวิทยุในการระบุตำแหน่งและบอกตัวตนของสิ่งต่าง ๆ ปัจจุบันอาร์เอฟไอดีมีลักษณะเป็นแผ่นป้ายอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถอ่านค่าได้โดยอาศัยคลื่นวิทยุเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ เพื่อตรวจติดตามและบันทึกข้อมูล อาร์เอฟไอดีแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ พาสซีฟ อาร์เอฟไอดี แท็ก (Passive RFID tags) เป็นแท็กที่ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟใด ๆ เพราะภายในแท็กจะมีแหล่งกำเนิดวงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็กเป็นแหล่งจ่ายไฟอยู่ภายในทำให้มีข้อจำกัดในด้านของระยะทาง ซึ่งสามารถส่งสัญญาณได้ประมาณ 1 เมตร และแอคทีฟ อาร์เอฟไอดี แท็ก (Active RFID tags) เป็นแท็กที่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอกเพื่อจ่ายไฟให้กับวงจรภายใน มีระยะการส่งสัญญาณสูงสุดประมาณ 10 เมตร ดังนั้นเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีมีข้อจำกัดในด้านระยะทางของการรับส่งสัญญาณ

เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายเป็นเทคโนโลยีที่ทำงานในย่านความถี่วิทยุ ภายใต้มาตรฐาน IEEE802.11 ซึ่งมีหน้าที่ช่วยให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ สามารถติดต่อสื่อสารกันแบบไร้สาย สร้างเป็นโครงข่ายในการทำงานและเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้โดยอาศัยอุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Access point) มีระยะการทำงานภายในอาคารประมาณ 20 เมตร เทคโนโลยีนี้มีข้อจำกัดในด้านระยะทางของการรับส่งข้อมูล อีกทั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณมีขนาดใหญ่และใช้พลังงานค่อนข้างสูง

เทคโนโลยีซิกบีเป็นเทคโนโลยีไร้สายที่สื่อสารข้อมูลผ่านเซนเซอร์ขนาดเล็กหลาย ๆ ตัว สามารถสร้างเป็นระบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้ มีอัตราการรับส่งข้อมูลต่ำ สามารถทำงานได้ในทุกสภาพแวดล้อม ใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็กทำให้ประหยัดพลังงาน เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจจับสิ่งต่าง ๆ แต่สำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านการระบุตำแหน่งภายในอาคารยังมีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงและมีระยะทางในการทำงานค่อนข้างจำกัดประมาณ 5 – 500 เมตร

เทคโนโลยีบลูทูธเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุระยะสั้น อุปกรณ์มีขนาดเล็ก ใช้พลังงานค่อนข้างต่ำ ระยะการทำงานภายในอาคารประมาณ 50 - 60 เมตร เป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัยและได้รับความสนใจอย่างมากในการประยุกต์ใช้งานด้านการระบุตำแหน่ง แต่ยังมีข้อจำกัดคือค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารค่อนข้างสูงประมาณ 5 เมตร

เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์เป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นความถี่สูงในการส่งผ่านข้อมูลโดยมีค่าความถี่ระหว่าง 3.1 - 10.6 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) มีการส่งสัญญาณและสะท้อนวัตถุกลับมาที่เครื่องรับสัญญาณสำหรับตรวจจับวัตถุในระบบเรดาร์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการค้นหา ตรวจจับและระบุตำแหน่งของวัตถุ เทคโนโลยีนี้มีความสามารถในการระบุตำแหน่งของวัตถุด้วยความแม่นยำในระดับเซนติเมตร ระยะการทำงานภายในอาคารประมาณ 100 เมตร อุปกรณ์มีขนาดเล็ก ใช้พลังงานค่อนข้างต่ำ มีความซับซ้อนในการทำงานต่ำ ทนต่อการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ระบบมีความปลอดภัยในการตรวจจับวัตถุสัญญาณและมีความสามารถในการทะลุผ่านวัสดุต่าง ๆ ภายในอาคารได้

กระบวนการระบุตำแหน่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การประมาณระยะทาง (Distance estimation) และการระบุตำแหน่ง (Localization process)

ขั้นตอนการประมาณระยะทางเป็นการประมาณระยะทางระหว่างพิกัดที่รู้ตำแหน่งไปยังพิกัดที่ต้องการทราบตำแหน่ง สามารถหาได้หลายวิธี เช่น การใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Receive signal strength indicator: RSSI) การใช้ค่าของมุมที่มาถึง (Angle of arrival: AOA) การใช้ค่าเวลาของการมาถึง (Time of arrival: TOA) การใช้ค่าความแตกต่างของเวลาที่มาถึง (Time difference of arrival: TDOA) และการใช้ค่าเวลาในการเดินทาง (Time of flight: TOF) เป็นต้น [2-3]

การใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ คือ การวัดระดับกำลังไฟฟ้าของสัญญาณวิทยุ ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิวัตต์ (milliwatts: mW) เป็นค่าที่ใช้บอกความแรงของสัญญาณวิทยุที่ได้รับ จึงใช้การแปลงหน่วยของกำลังไฟฟ้าจากหน่วยมิลลิวัตต์ให้เป็นหน่วยเดซิเบลมิลลิวัตต์ (Decibel-milliwatts: dBm)

เพื่อความสะดวกต่อการคำนวณ ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับของแต่ละตำแหน่ง สามารถหาได้จากสมการการแพร่กระจายคลื่นของฟรีอิส (Friis's free space propagation model) ความแม่นยำในการหาระยะทางด้วยวิธีการใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับค่อนข้างต่ำ

การใช้ค่าของมุมที่มาถึง คือ วิธีการหาระยะทางโดยพิจารณาจากมุมที่ตัวส่งสัญญาณส่งไปยังตัวรับสัญญาณ ตัวส่งสัญญาณจะเริ่มส่งสัญญาณพัลส์ (Pulse) สั้น ๆ ไปยังตัวรับสัญญาณก่อน (Initial pulse) หลังจากนั้นตัวส่งสัญญาณจะหมุนลำคลื่นทุก ๆ 1 องศา แล้วส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ คือความถี่เชิงมุม เพื่อจะหาความแตกต่างของเวลาที่ตัวรับสัญญาณได้รับ จากนั้นนำไปคูณกับค่าความถี่เชิงมุมเพื่อจะหาพิคัดที่ต้องการทราบตำแหน่งต่อไป

การใช้ค่าเวลาของการมาถึง คือ ข้อมูลข่าวสารที่ได้รับมาจากตัวส่งสัญญาณ โดยวัดจากเวลาของสัญญาณที่แพร่กระจายมาจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ วิธีนี้ให้ความถูกต้องในการประมาณระยะทางภายใต้เงื่อนไขที่เส้นทางปราศจากสิ่งกีดขวาง แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปค่อนข้างได้ยาก เนื่องจากตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณจำเป็นที่จะต้องมีการเข้าจังหวะ (Synchronous) กัน ดังนั้นอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้จึงมีราคาค่อนข้างสูง

การใช้ค่าความแตกต่างของเวลาที่มาถึง คือ การหาค่าความแตกต่างของเวลาที่ได้รับมาจากตัวส่งสัญญาณ วิธีนี้จะมีกระบวนการคล้ายกับการหาระยะทางที่ใช้ค่าเวลาของการมาถึง แต่จะแตกต่างกัน โดยวิธีนี้จะใช้ค่าความแตกต่างของเวลาที่มาถึงในการคำนวณหาระยะทาง

การใช้ค่าเวลาในการเดินทาง คือ การใช้เวลาในการเดินทางจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณและส่งกลับมายังตัวส่งสัญญาณ จากนั้นนำเวลาที่ตัวส่งสัญญาณได้รับไปคำนวณหาระยะทาง โดยการคูณกับความเร็วแสงมีค่าประมาณ 2.997×10^8 เมตรต่อวินาที (m/s)

ขั้นตอนการระบุตำแหน่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีสามเหลี่ยมมุม (Triangulation) และวิธีสามเหลี่ยมระยะ (Trilateration) เป็นต้น [2-3]

วิธีสามเหลี่ยมมุมเป็นวิธีการหาพิคัดตำแหน่งของจุดที่ได้มาจากการหาระยะทางโดยใช้ค่าของมุมที่มาถึงระหว่างคู่ของจุดอ้างอิงไปยังจุดที่ต้องการทราบตำแหน่งที่แตกต่างกัน 3 จุด วิธีนี้เหมาะสำหรับการประมาณระยะทางโดยใช้ค่าของมุมที่มาถึงแล้วจึงใช้วิธีการระบุตำแหน่งโดยวิธีสามเหลี่ยมมุม

วิธีสามเหลี่ยมระยะเป็นวิธีการหาตำแหน่งของวัตถุที่ได้มาจากการหาระยะทางระหว่างจุดอ้างอิงและจุดที่ต้องการทราบตำแหน่ง ซึ่งอ้างอิงได้จากรูปสามเหลี่ยมเรขาคณิต วิธีการนี้ต้องใช้จุดอ้างอิงอย่างน้อย 3 จุดที่รู้ตำแหน่ง โดยค่ารัศมีของจุดอ้างอิงทั้ง 3 จุด สามารถหาได้จากการใช้ค่าเวลาของการมาถึง การใช้ค่าความแตกต่างของเวลาที่มาถึง การใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับหรือการใช้ค่าเวลาในการเดินทาง หลังจากนั้นสามารถคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุในบริเวณที่ตัดกัน (Intersection) ได้

จากข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมาประกอบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้มีการเลือกใช้เทคโนโลยีและกระบวนการระบุตำแหน่งที่แตกต่างกันตามความเหมาะสมที่เลือกใช้งาน ซึ่งจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองและหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นความถี่สูงในการส่งผ่านข้อมูลทำให้มีอำนาจในการทะลุทะลวงสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ภายในอาคารได้ อีกทั้งยังสามารถระบุตำแหน่งด้วยความแม่นยำในระดับเซนติเมตร อุปกรณ์มีขนาดเล็กและใช้พลังงานต่ำ การประมาณระยะทางเลือกใช้ค่าเวลาในการเดินทาง วิธีทวี่เวย์เร้นจ์จิงแบบสมมาตร (Symmetrical double-side two way ranging: SDS-TWR) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการคำนวณและความแม่นยำในการประมาณระยะทาง การระบุตำแหน่งเลือกใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะ เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีสามเหลี่ยมมุมและสามารถนำค่าเวลาในการเดินทางมาประยุกต์ใช้ได้เหมาะสม พารามิเตอร์ที่สนใจมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ ซึ่งความสูงของตัวส่งสัญญาณมีจำนวน 3 ระดับ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณมีจำนวน 2 ระดับ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณมีจำนวน 2 ระดับ และจำนวนของตัวส่งสัญญาณมีจำนวน 2 ระดับ ดังนั้นการทดลองทั้งหมดจะมี 24 วิธีการทดลอง หาค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดจาก 24 วิธีการทดลองและนำค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติเพื่อหาวิธีการที่ดีที่สุดในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 สามารถพัฒนาเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร
- 1.2.2 สามารถเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างการคำนวณตำแหน่งด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะ
- 1.2.3 สามารถเพิ่มความถูกต้อง (Accuracy) และความแม่นยำ (Precision) ในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

1.3 สมมติฐานของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 ความสูงของตัวส่งสัญญาณ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ น่าจะมีผลต่อความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.4.1 ศึกษาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์
- 1.4.2 ศึกษาและเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดจากความสูงของตัวส่งสัญญาณ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ
- 1.4.3 นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกาทดลอง
- 1.4.4 ทำการทดลองภายในอาคารที่ตึก EN7 ชั้น 3 ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ตารางที่ 1.1 พารามิเตอร์ในการศึกษาการระบุตำแหน่งภายในอาคาร

พารามิเตอร์ในการทดลอง	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3
ความสูงของตัวส่งสัญญาณ	0.5 เมตร	1 เมตร	1.5 เมตร
ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ	แนวตั้ง	แนวนอน	-
รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณ	วางที่มุม	ไม่วางที่มุม	-
จำนวนของตัวส่งสัญญาณ	3 ตัว	4 ตัว	-

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้รับความรู้เกี่ยวกับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร
- 1.5.2 สร้างอุปกรณ์ในการระบุตำแหน่งที่สามารถใช้งานได้จริง
- 1.5.3 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานในด้านสาขาอื่น ๆ เช่น ทางด้านการแพทย์ ทางด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ อัลตราไวด์แบนด์ บริเวณสนามของสายอากาศ กระบวนการระบุตำแหน่ง การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง (Localization error) การออกแบบการทดลอง (Design of experiment) การวิเคราะห์ทางสถิติและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำความรู้ที่ได้มาใช้ในการแก้ปัญหาและหาแนวทางแก้ไข โดยรายละเอียดของทฤษฎีต่าง ๆ มีดังนี้

2.1 อัลตราไวด์แบนด์

อัลตราไวด์แบนด์ถูกพัฒนามาจากระบบเรดาร์ทางการทหาร เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุในการส่งสัญญาณ มีการใช้งานความถี่หรือสเปกตรัมแถบกว้างในการส่งสัญญาณ ความกว้างแบนด์วิดท์ (Bandwidth) เท่ากับ 7.5 กิกะเฮิรตซ์ ทำงานที่ความถี่ตั้งแต่ 3.1 - 10.6 กิกะเฮิรตซ์ เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์อยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.3a เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless personal area network: WPAN) เป็นเครือข่ายไร้สายที่มีความเร็วสูงในการส่งข้อมูลระยะสั้น สำหรับระยะทางที่น้อยกว่า 10 เมตร มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 110 เมกะบิตต่อวินาที (Mb/s) สำหรับระยะทางที่มากกว่า 10 เมตรขึ้นไป มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 200 - 400 เมกะบิตต่อวินาที สำหรับระยะการทำงานภายในอาคารประมาณ 100 เมตร มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 480 เมกะบิตต่อวินาที อุปกรณ์อัลตราไวด์แบนด์มีขนาดเล็ก ใช้พลังงานต่ำอย่างมีประสิทธิภาพ มีความซับซ้อนในการใช้งานต่ำ ทนต่อการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ระบบมีความปลอดภัยในการตรวจจับและดักสัญญาณ มีความสามารถในการทะลุผ่านวัสดุต่าง ๆ ภายในอาคารหรือพื้นดินได้ ดังนั้นเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์จึงได้รับความสนใจในการประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น การตรวจสอบโครงสร้างสะพานและอาคาร การตรวจหาตำแหน่งบริเวณในการขุดเจาะบ่อน้ำ การประยุกต์ใช้งานการส่งข้อมูลไร้สายภายในอาคาร การประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์ การประยุกต์ใช้งานในการหาตำแหน่ง เป็นต้น [4-6]

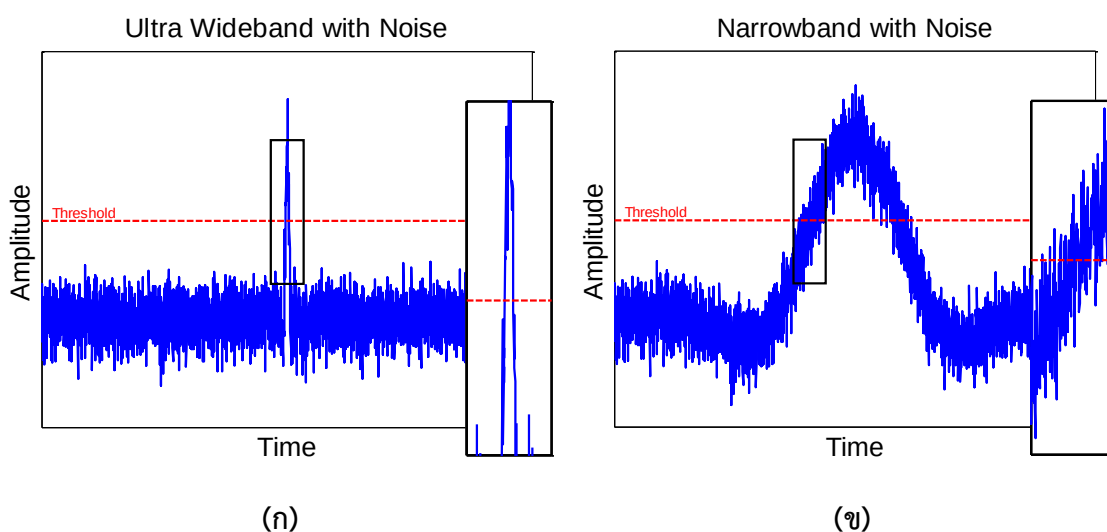
อุปกรณ์อัลตราไวด์แบนด์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ โมดูล DWM1000 [7] เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตโดยบริษัท Decawave มีย่านความถี่ที่ใช้งานตั้งแต่ 3.5 - 6.5 กิกะเฮิรตซ์ มีคุณลักษณะพิเศษคือเป็นได้ทั้งตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ (Transceiver) ซึ่งถูกออกแบบมาสำหรับระบบระบุตำแหน่งขนาดเล็ก ส่งข้อมูลเป็นพัลส์ (Impulse radio) สั้น ๆ ให้แพร่กระจายไปในแบนด์วิดท์ที่กว้าง สามารถ

ระบุตำแหน่งได้ในระดับเซนติเมตรและอัตราการรับส่งข้อมูล (Data rate) มากกว่า 6.8 เมกะบิตต่อวินาที ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้งานในย่านความถี่ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ต่ำของโมดูล DWM1000 และมีแพ็กเก็ตของการสูญเสีย (Packet loss) ต่ำ โมดูล DWM1000 แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โมดูล DWM1000 [8]

การเปรียบเทียบพัลส์ที่ส่งออกมาในแถบความถี่กว้างและแถบความถี่แคบ แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 พัลส์ที่ส่งออกมา (ก) ในแถบความถี่กว้าง (ข) ในแถบความถี่แคบ [9]

จากภาพที่ 2.2 (ก) พัลส์ที่ส่งออกมาในแถบความถี่กว้าง สัญญาณที่ส่งออกมามีแอมพลิจูดสูงกว่าสัญญาณรบกวน (Noise) ขอบของพัลส์มีลักษณะเรียบโดยปราศจากสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงทำให้ระยะเวลาที่มาถึงได้อย่างแม่นยำ ภาพที่ 2.2 (ข) พัลส์ที่ส่งออกมาในแถบความถี่แคบ สัญญาณที่ได้มีการปะปนกับสัญญาณรบกวน ทำให้ไม่สามารถแยกสัญญาณที่ถูกส่งออกมาได้และไม่สามารถระบุเวลาที่มาถึงได้อย่างชัดเจน

2.2 บริเวณสนามของสายอากาศ

บริเวณสนามของสายอากาศแบ่งเป็น 2 บริเวณหลัก ๆ ได้แก่ บริเวณสนามใกล้ (Near-field region) และบริเวณสนามไกล (Far-field region) [10-11]

2.2.1 บริเวณสนามใกล้

บริเวณสนามใกล้ เป็นบริเวณที่เกิดขึ้นใกล้กับสายอากาศและล้อมรอบสายอากาศมากที่สุด ซึ่งบริเวณนี้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไม่มีความเป็นคลื่นระนาบ (Plane wave) อย่างเพียงพอ บริเวณสนามใกล้สามารถแบ่งได้เป็น 2 บริเวณย่อย ได้แก่ บริเวณสนามใกล้ชนิดรีแอกทีฟ (Reactive near field region) และบริเวณแผ่พลังงานสนามใกล้ (Radiating near field region)

2.2.1.1 บริเวณสนามใกล้ชนิดรีแอกทีฟ เป็นบริเวณที่มีโครงสร้างการแผ่พลังงานมากที่สุด สามารถคำนวณระยะของบริเวณสนามใกล้ชนิดรีแอกทีฟได้จากสมการที่ (2.1)

$$R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (2.1)$$

เมื่อ R คือ ระยะของบริเวณสนามใกล้ชนิดรีแอกทีฟ

D คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ (เมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ (เมตร)

2.2.1.2 บริเวณแผ่พลังงานสนามใกล้ เป็นบริเวณที่มีการแผ่พลังงานอยู่ระหว่างบริเวณสนามใกล้ชนิดรีแอกทีฟและบริเวณสนามไกล แต่ไม่มีความเป็นคลื่นระนาบอย่างเพียงพอและโครงสร้างการทำงานมีความซับซ้อน สามารถคำนวณระยะของบริเวณแผ่พลังงานสนามใกล้ได้จากสมการที่ (2.2)

$$0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R \leq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.2)$$

เมื่อ R คือ ระยะของบริเวณแผ่พลังงานสนามใกล้

D คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ (เมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ (เมตร)

2.2.2 บริเวณสนามไกล

บริเวณสนามไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ โดยไม่ขึ้นกับระยะทาง บริเวณสนามไกลมีลักษณะความเป็นคลื่นระยะอย่างโดดเด่น กล่าวคือ ระบายในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอยู่ในแนวขวางกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยทั่วไปการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะวัดในบริเวณสนามไกล เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี สามารถคำนวณระยะของบริเวณสนามไกลได้จากสมการที่ (2.3)

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.3)$$

เมื่อ R คือ ระยะของบริเวณสนามไกล

D คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ (เมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ (เมตร)

2.3 กระบวนการระบุตำแหน่ง

กระบวนการระบุตำแหน่งเป็นการหาตำแหน่งที่ต้องการทราบ ซึ่งมี 2 ขั้นตอน คือ การประมาณระยะทางและการระบุตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การประมาณระยะทาง

การประมาณระยะทางเป็นการประมาณระยะทางจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ การใช้ค่าของมุมที่มาถึง การใช้ค่าเวลาของการมาถึง การใช้ค่าความแตกต่างของเวลาที่มาถึงและการใช้ค่าเวลาในการเดินทาง เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้วิธีการใช้ค่าเวลาในการเดินทางเพื่อคำนวณหาระยะทาง เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการคำนวณ อุปกรณ์สามารถจัดหาได้ง่ายและให้ความแม่นยำในการประมาณระยะทาง

ระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณหาได้จากสมการที่ 2.4 [4]

$$Distance (D) = Speed (S) \times Time (T) \quad (2.4)$$

เมื่อ $Distance (D)$ คือ ระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ

$Speed (S)$ คือ ความเร็วแสง มีค่าประมาณ 2.997×10^8 เมตรต่อวินาที

Time (T) คือ ระยะเวลาจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ

การคำนวณหาเวลาระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณสามารถหาได้หลากหลายวิธี ได้แก่ วิธีวันเวย์เร้นจ์จิง (One way ranging: OWR) และวิธีทูเวย์เร้นจ์จิง (Two way ranging: TWR)

2.3.1.1 วิธีวันเวย์เร้นจ์จิง

วิธีวันเวย์เร้นจ์จิงเป็นการคำนวณหาเวลาระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ โดยใช้วิธีการใช้ค่าเวลาของการมาถึง ซึ่งต้องมีตัวส่งสัญญาณที่รู้ตำแหน่งอย่างน้อย 3 ตัว (P_1, P_2, P_3) ก่อนการส่งสัญญาณตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณต้องมีการเข้าจังหวะกัน ตัวรับสัญญาณต้องรู้เวลาที่ตัวส่งสัญญาณเริ่มส่งสัญญาณออกมา (T_t) ตัวส่งสัญญาณทำการส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณที่ต้องการทราบตำแหน่ง (P_4) จากนั้นนำเวลาที่มาถึงแปลงเป็นระยะทาง เพื่อที่จะนำไปหาพิกัดที่ต้องการทราบ วิธีนี้ให้ความถูกต้องในการประมาณระยะทางภายใต้เงื่อนไขที่เส้นทางปราศจากสิ่งกีดขวาง เวลาที่แพร่กระจายจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5 [4]

$$T_{prop} = (T_r - T_t) \quad (2.5)$$

เมื่อ T_{prop} คือ เวลาที่แพร่กระจายจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ

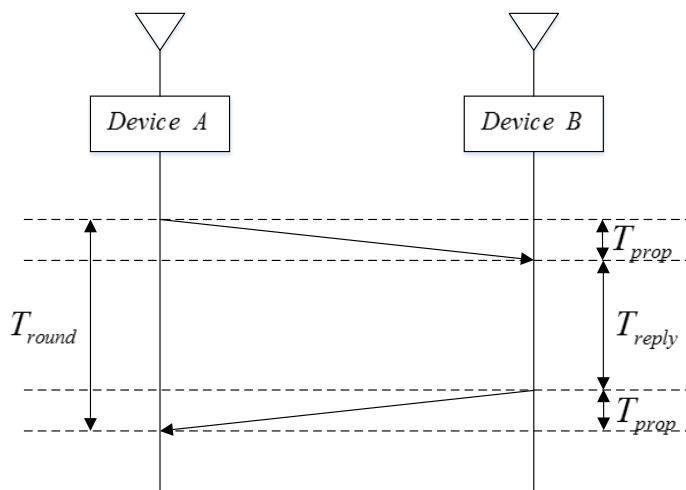
T_r คือ เวลาที่ตัวรับสัญญาณรับได้

T_t คือ เวลาที่เริ่มส่งสัญญาณ

2.3.1.2 วิธีทูเวย์เร้นจ์จิง

วิธีทูเวย์เร้นจ์จิงเป็นวิธีการคำนวณหาเวลาระหว่างอุปกรณ์ 2 ตัว ที่สามารถเป็นได้ทั้งตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ โดยใช้วิธีการใช้ค่าเวลาในการเดินทาง วิธีนี้ไม่ต้องการเข้าจังหวะของสัญญาณเนื่องจากเวลาที่ได้รับสามารถคำนวณได้จากไทม์แสตมป์ (Timestamp) ของอุปกรณ์ วิธีทูเวย์เร้นจ์จิงสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี ได้แก่ วิธีทูเวย์เร้นจ์จิงแบบด้านเดียว (Single-side two way ranging: SS-TWR) วิธีทูเวย์เร้นจ์จิงแบบสมมาตรและวิธีทูเวย์เร้นจ์จิงแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical double-side two way ranging: ASDS-TWR) ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

(1) วิธีหุเวย์เร้นจิจิงแบบด้านเดียว



ภาพที่ 2.3 วิธีหุเวย์เร้นจิจิงแบบด้านเดียว

จากภาพที่ 2.3 วิธีหุเวย์เร้นจิจิงแบบด้านเดียว อุปกรณ์ A ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ B และอุปกรณ์ B ส่งสัญญาณกลับไปยังอุปกรณ์ A เวลาทั้งหมดนี้เรียกว่า Round trip time (T_{round}) เวลาระหว่างอุปกรณ์ B ได้รับสัญญาณจากอุปกรณ์ A จนกระทั่งมีการส่งสัญญาณกลับไปยังอุปกรณ์ A เวลาช่วงนี้เรียกว่า Reply time (T_{reply}) เวลาในการแพร่กระจายของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ (T_{prop}) หาได้จากสมการที่ 2.6 [12]

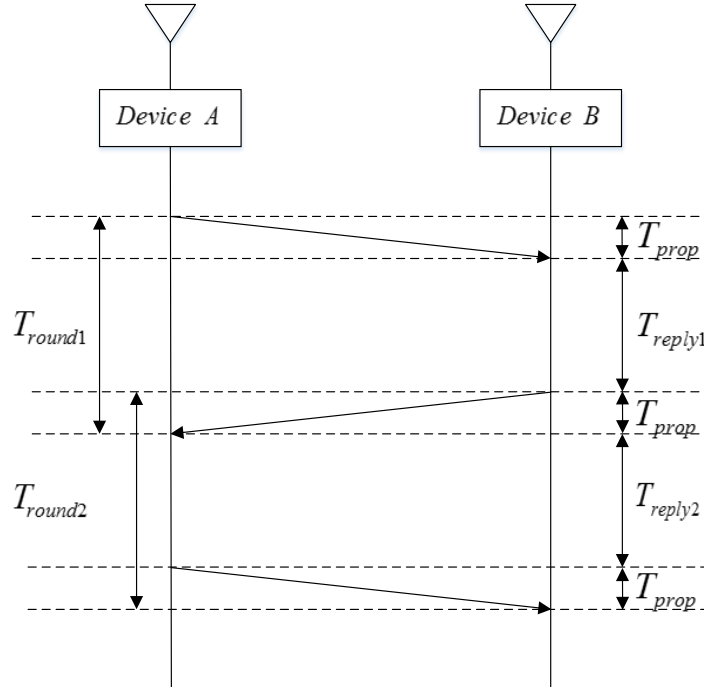
$$T_{prop} = \left(\frac{T_{round} - T_{reply}}{2} \right) \quad (2.6)$$

เมื่อ T_{prop} คือ เวลาในการแพร่กระจายของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ

T_{round} คือ เวลาที่ตัวส่งสัญญาณเริ่มส่งสัญญาณออกไปจนกระทั่งได้รับการตอบกลับ

T_{reply} คือ เวลาระหว่างตัวรับสัญญาณที่ได้รับสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณจนกระทั่งมีการส่งสัญญาณกลับไปยังตัวส่งสัญญาณ

(2) วิธีทูลเวร้ร้นจ้จิงแบบสมมาตร



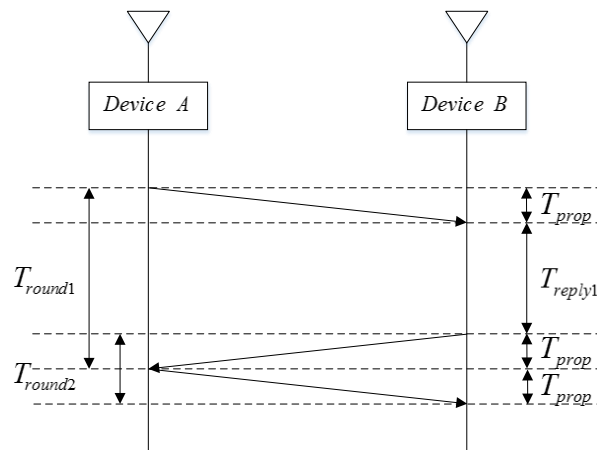
ภาพที่ 2.4 วิธีทูลเวร้ร้นจ้จิงแบบสมมาตร

จากภาพที่ 2.4 วิธีทูลเวร้ร้นจ้จิงแบบสมมาตร อุปกรณ์ A ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ B และอุปกรณ์ B ส่งสัญญาณกลับไปยังอุปกรณ์ A เวลาช่วงนี้เรียกว่า Round trip time 1 (T_{round1}) เวลาระหว่างอุปกรณ์ B ได้รับสัญญาณจากอุปกรณ์ A จนกระทั่งมีการส่งสัญญาณกลับไปยังอุปกรณ์ A เวลาช่วงนี้เรียกว่า Reply time 1 (T_{reply1}) จากนั้นเวลาที่อุปกรณ์ B ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ A และอุปกรณ์ A ส่งสัญญาณกลับมายังอุปกรณ์ B เวลาช่วงนี้เรียกว่า Round trip time 2 (T_{round2}) เวลาระหว่างอุปกรณ์ A ได้รับสัญญาณจากอุปกรณ์ B จนกระทั่งมีการส่งสัญญาณกลับไปยังอุปกรณ์ B เวลาช่วงนี้เรียกว่า Reply time 2 (T_{reply2}) วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ T_{reply1} และ T_{reply2} ต้องมีค่าเท่ากันและให้ผลลัพธ์ดีกว่าวิธีทูลเวร้ร้นจ้จิงแบบด้านเดียว เนื่องจากการคำนวณเวลาที่แพร่กระจายของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ (T_{prop}) ใช้ค่าเฉลี่ยของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ในขณะที่วิธีทูลเวร้ร้นจ้จิงแบบด้านเดียว ใช้ค่าเฉลี่ยของตัวส่งสัญญาณเพียง 2 ตัวเท่านั้น เวลาในการแพร่กระจายของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ หาได้จากสมการที่ 2.7 [12]

$$T_{prop} = \left(\frac{T_{round1} - T_{reply1} + T_{round2} - T_{reply2}}{4} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อ T_{prop} คือ เวลาในการแพร่กระจายของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ
 T_{round1} และ T_{round2} คือ เวลาที่ตัวส่งสัญญาณเริ่มส่งสัญญาณ
 ออกไปจนกระทั่งได้รับการตอบกลับ
 T_{reply1} และ T_{reply2} คือ เวลาระหว่างตัวรับสัญญาณที่ได้รับ
 สัญญาณจากตัวส่งสัญญาณจนกระทั่งมี
 การส่งสัญญาณกลับไปยังตัวส่งสัญญาณ

(3) วิธีทวี่เวร้นจจิงแบบไม่สมมาตร



ภาพที่ 2.5 วิธีทวี่เวร้นจจิงแบบไม่สมมาตร

จากภาพที่ 2.5 วิธีทวี่เวร้นจจิงแบบไม่สมมาตร อุปกรณ์ A ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ B และอุปกรณ์ B ส่งสัญญาณกลับไปยังอุปกรณ์ A เวลาช่วงนี้เรียกว่า Round trip time 1 (T_{round1}) เวลาระหว่างอุปกรณ์ B ได้รับสัญญาณจากอุปกรณ์ A จนกระทั่งมีการส่งสัญญาณกลับไปยังอุปกรณ์ A เวลาช่วงนี้เรียกว่า Reply time 1 (T_{reply1}) หลังจากที่อุปกรณ์ A ได้รับสัญญาณจากอุปกรณ์ B มีการส่งสัญญาณกลับไปยังอุปกรณ์ B ทันที เวลาช่วงนี้เรียกว่า Round trip time 2 (T_{round2}) เนื่องจากอุปกรณ์ A ส่งสัญญาณกลับไปที่อุปกรณ์ B ทันที ทำให้ไม่มีเวลาของ Reply time 2 (T_{reply2}) เวลาในการแพร่กระจายของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ หาได้จากสมการที่ 2.8 [12]

$$T_{prop} = \left(\frac{T_{round1} + T_{round2} - T_{reply1}}{4} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ T_{prop} คือ เวลาในการแพร่กระจายของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ

T_{round1} และ T_{round2} คือ เวลาที่ตัวส่งสัญญาณเริ่มส่งสัญญาณ
ออกไปจนกระทั่งได้รับการตอบกลับ

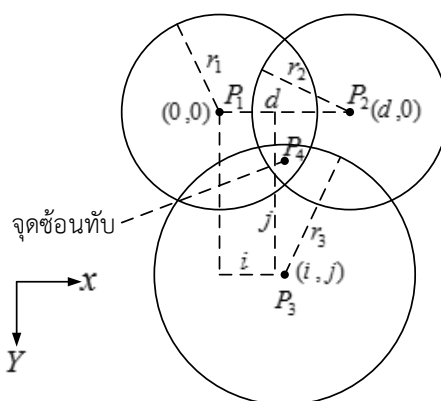
T_{reply1} และ T_{reply2} คือ เวลาระหว่างตัวรับสัญญาณที่ได้รับ
สัญญาณจากตัวส่งสัญญาณจนกระทั่งมี
การส่งสัญญาณกลับไปยังตัวส่งสัญญาณ

2.3.2 การระบุตำแหน่ง

การระบุตำแหน่งเป็นการระบุตำแหน่งของจุดที่ต้องการทราบตำแหน่ง เมื่อได้ระยะทางระหว่างพิกัดที่รู้ตำแหน่งกับจุดที่ต้องการทราบตำแหน่งโดยใช้วิธีทิวเวร้นจึงแบบสมมาตร จากนั้นทำการระบุตำแหน่ง ซึ่งการระบุตำแหน่งหาได้หลายวิธี เช่น วิธีสามเหลี่ยมมุมและวิธีสามเหลี่ยมระยะ เป็นต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการคำนวณมากกว่าวิธีสามเหลี่ยมมุมและยังสามารถนำระยะทางที่ได้จากวิธีทิวเวร้นจึงแบบสมมาตรมาประยุกต์ใช้ได้เหมาะสม วิธีสามเหลี่ยมระยะมีรายละเอียดดังนี้

2.3.2.1 วิธีสามเหลี่ยมระยะ

วิธีสามเหลี่ยมระยะเป็นวิธีการหาตำแหน่งของวัตถุที่ได้มาจากการหาระยะทางระหว่างจุดอ้างอิงและจุดที่ต้องการทราบตำแหน่ง ซึ่งอ้างอิงได้จากรูปสามเหลี่ยม วิธีการนี้ต้องรู้จุดอ้างอิงอย่างน้อย 3 จุด ได้แก่ P_1 , P_2 และ P_3 ส่วน P_4 เป็นพิกัดที่ต้องการทราบตำแหน่ง r_1 , r_2 และ r_3 เป็นระยะทางจากจุดอ้างอิงแต่ละจุดไปยังจุดที่ต้องการทราบตำแหน่งตามลำดับ ซึ่งหาได้จากขั้นตอนการประมาณระยะทาง d คือระยะห่างระหว่างจุดอ้างอิง P_1 และ P_2 i คือระยะห่างในแนวแกน x ระหว่างจุดอ้างอิง P_1 และ P_3 j คือระยะห่างในแนวแกน y ระหว่างจุดอ้างอิง P_1 และ P_3 [3] การคำนวณหาตำแหน่งด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะ แสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การคำนวณหาตำแหน่งด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะ

การคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุในบริเวณจุดทับซ้อน โดยใช้จุดอ้างอิง 3 จุด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.9 – 2.11)

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (2.9)$$

$$r_2^2 = (x - d)^2 + y^2 + z^2 \quad (2.10)$$

$$r_3^2 = (x - i)^2 + (x - j)^2 + z^2 \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.9 – 2.11) พิจารณาในระนาบ 2 มิติ (2D) โดยพิจารณาในแกน x และแกน y จะสามารถคำนวณหาขนาดของ x และขนาดของ y ได้จากสมการที่ (2.12 – 2.13)

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 - d^2}{2d} \quad (2.12)$$

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j}x \quad (2.13)$$

เมื่อ r_1 คือ รัศมีของจุดอ้างอิง P_1

r_2 คือ รัศมีของจุดอ้างอิง P_2

r_3 คือ รัศมีของจุดอ้างอิง P_3

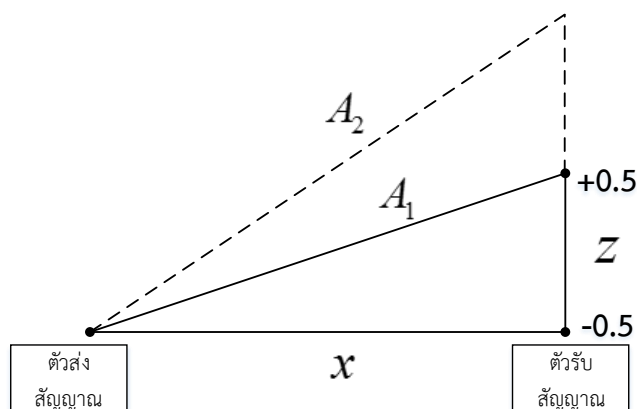
i คือ ระยะห่างแนวแกน x ระหว่างจุดอ้างอิงที่ P_1 กับ P_3

j คือ ระยะห่างแนวแกน y ระหว่างจุดอ้างอิงที่ P_1 กับ P_3

จากนั้นนำค่าขนาดของ x และขนาดของ y ไปคูณกับทิศทางในแนวแกน x ($\vec{e}_x$) และทิศทางในแนวแกน y ($\vec{e}_y$) ดังนั้นสามารถคำนวณพิกัดที่ต้องการทราบตำแหน่งได้จากสมการที่ 2.14

$$P_4 = P_1 + x\vec{e}_x + y\vec{e}_y \quad (2.14)$$

ในการระบุตำแหน่งโดยใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะพิจารณาในระนาบ 2 มิติ (แกน x และแกน y) ซึ่งจะไม่พิจารณาแกน z การพิจารณาระยะทางในระนาบ 2 มิติ แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การพิจารณาระยะทางในระนาบ 2 มิติ

จากภาพที่ 2.7 การพิจารณาระยะทางในระนาบ 2 มิติ ในการคำนวณหาระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ คำนวณระยะทางตามแนวระนาบ (x) เพื่อนำระยะทางที่ได้ไปคำนวณการระบุตำแหน่งในขั้นตอนถัดไป แต่ในการทดลองได้มีการปรับความสูงที่ระดับต่าง ๆ ตามแนวแกน z ซึ่งระยะทางจริงระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณที่ต้องนำมาคำนวณคือระยะ A_1 หรือ A_2 ซึ่งจะทำให้เกิดความซับซ้อนและยุ่งยากในขั้นตอนการเขียนโปรแกรมการระบุตำแหน่งพิกัดที่ต้องการทราบ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงคำนวณระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณตามแนวระนาบ พบว่าถ้าระดับความสูงของตัวรับส่งสัญญาณมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน ± 0.5 เมตร ค่า x และ A_1 มีค่าแตกต่างกันไม่มากนักและส่งผลให้มีผลกระทบที่ไม่แตกต่างกันในทางสถิติ แต่ถ้าระดับความสูงของตัวรับส่งสัญญาณมากกว่า 1 เมตร ค่า x และ A_2 มีค่าแตกต่างกันค่อนข้างเยอะและส่งผลให้มีผลกระทบที่แตกต่างกันในทางสถิติ

2.4 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง

การคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง (Root mean square error: RMSE) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.15 [13]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2]} \quad (2.15)$$

เมื่อ $RMSE$ คือ Root mean square error

n คือ จำนวนครั้งที่ทำการทดลองในแต่ละจุด

(x_i, y_i) คือ พิกัดจริง

$(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ คือ พิกัดที่ได้จากการระบุตำแหน่ง

2.5 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of experiment: DOE) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหากระบวนการที่เหมาะสมในการทดลองโดยดำเนินการทดลองอย่างมีระบบเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ การออกแบบการทดลองช่วยให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน อีกทั้งผลลัพธ์ที่ได้ยังมีความน่าเชื่อถือสูง [14] การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเป็นการออกแบบการทดลองประเภทหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) ในการทดลองที่มีตัวแปรที่สนใจมากกว่า 1 ตัวแปร จะเรียกตัวแปรที่สนใจนั้นว่าการทดลองปัจจัย (Factors) การทดลองที่มีตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปเรียกว่าการทดลองแฟกทอเรียล การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเป็นการทดลองที่มีปัจจัยหลายปัจจัย เพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น ซึ่งการทดลองแฟกทอเรียลเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่จะดูผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกัน [15]

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีหลายรูปแบบ ได้แก่

(1) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล A ปัจจัย เป็นการออกแบบที่ง่ายที่สุดซึ่งประกอบด้วย A ปัจจัย สมมติให้มีทั้งหมด 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย M และปัจจัย N โดยที่ปัจจัย M มี m ระดับ และปัจจัย N มี n ระดับ ดังนั้นการทดลองทั้งหมดจะมี $m \times n$ การทดลอง

(2) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับหรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบที่มี k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ โดยปกติแล้วจะกำหนดเป็นระดับต่ำ (Low) กับระดับสูง (High) การทดลองนี้จะมีทั้งหมด 2^k การทดลอง

(3) การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ ในกรณีที่มีปัจจัยมาก ๆ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k จะทำให้มีการทดลองมีมากขึ้นและทรัพยากรที่มีอยู่อาจไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้นการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ เป็นการออกแบบเพื่อศึกษาผลของปัจจัยได้ครบทุกกรณี ส่วนมากการทดลองนี้จะถูกใช้ในตอนเริ่มต้นของการทดลองที่มีปัจจัยมาก ๆ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบ หลังจากนั้นนำปัจจัยที่มีผลกระทบเหล่านั้นไปทำการทดลองอย่างละเอียด

(4) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับหรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^k เป็นการออกแบบที่มี k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ โดยปกติแล้วจะกำหนดเป็นระดับต่ำ ระดับปานกลางและระดับสูง การทดลองนี้จะมีทั้งหมด 3^k การทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล A ปัจจัย โดยมีปัจจัยหรือพารามิเตอร์ที่สนใจทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ 3 ระดับ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ 2 ระดับ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณ 2 ระดับและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 2 ระดับ ดังนั้นจะมีการทดลองทั้งหมด $3 \times 2 \times 2 \times 2$ เท่ากับ 24 การทดลอง

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

สถิติ (Statistic) เป็นวิธีการทางสถิติที่กล่าวถึงการเก็บรวบรวม วิเคราะห์ ตีความและนำเสนอข้อมูล [16] ประเภทของข้อมูลสามารถแบ่งได้เป็น ข้อมูลเชิงขนาดและข้อมูลเชิงคุณภาพ ดังนี้

- (1) ข้อมูลเชิงขนาด เป็นข้อมูลที่สามารถบ่งบอกได้เป็นจำนวนของตัวเลข
- (2) ข้อมูลเชิงคุณภาพ เป็นข้อมูลที่ไม่สามารถบ่งบอกได้เป็นจำนวนของตัวเลขได้โดยตรงแต่

สามารถบ่งบอกได้เป็นคำพูด

การวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของค่ากลางโดยวิเคราะห์จากการใช้ค่าความแปรปรวน (Variance) หรือเรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) [17] เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อทดสอบสมมติฐานของตัวแปรที่มีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยมากกว่า 2 กลุ่ม การวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี ได้แก่

(1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่มีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียว

(2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two way ANOVA) เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่มี 2 ตัวแปร

(3) การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบหลายทิศทาง (Muti-way ANOVA) เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่มีตัวแปรมากกว่า 2 ตัวแปรขึ้นไป

ค่าความน่าจะเป็น (Probability value) หรือ P-Value คือความน่าจะเป็นที่แสดงให้เห็นว่ามีผลลัพธ์มากกว่าหรือเท่ากับสิ่งที่สังเกตได้ภายใต้สมมติฐานหลัก (Null hypothesis) [18]

ค่านัยสำคัญทางสถิติ (Statistical significance) คือ ค่าความเชื่อมั่นที่กำหนดขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจะมีค่าแอลฟา (Alpha: α) เท่ากับ 0.05 ถ้าค่าความน่าจะเป็นน้อยกว่าค่าแอลฟา สามารถสรุปได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แต่ถ้าค่าความน่าจะเป็นมากกว่าค่าแอลฟา สามารถสรุปได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เราสามารถกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ระดับต่าง ๆ ได้ เช่น ค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์

จะมีค่าแอลฟาเท่ากับ 0.01 ค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าแอลฟาเท่ากับ 0.1 เป็นต้น ถ้าค่าความเชื่อมั่นสูง จะทำให้โอกาสของค่าความน่าจะเป็นน้อยกว่าค่าแอลฟาเกิดได้ยากขึ้น [19]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การวิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งนั้นเป็นจำนวนของตัวเลข จึงกล่าวได้ว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ข้อมูลเชิงขนาดในการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ พารามิเตอร์มีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจึงเลือกใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบหลายทิศทางและใช้ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีทั้งหมด 5 งานวิจัย เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนและเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง งานวิจัยทั้งหมดทำการทดลองภายในอาคาร ใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์แต่มีบางงานวิจัยใช้เทคโนโลยีผสม คือ ใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ทำงานร่วมกับเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำ ขั้นตอนในการประมาณระยะทางของแต่ละงานวิจัยใช้วิธีแตกต่างกัน เช่น การใช้ค่าเวลาของการมาถึง การใช้ค่าเวลาในการเดินทางและการใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ เป็นต้น งานวิจัยส่วนใหญ่ทำการทดลองในสถานที่จริงแต่มีบางงานวิจัยทำการจำลองผ่านโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา รายละเอียดของแต่ละงานวิจัยแสดงได้ดังนี้

Fofana N. I., et al. (2016) [20] ได้นำเสนอการใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยใช้วิธีการใช้ค่าเวลาในการเดินทาง เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการระบุตำแหน่ง 2 วิธี คือ วิธีทิวเวย์เรนจ์จิงและวิธีทิวเวย์เรนจ์จิงแบบสมมาตร ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยการวางอุปกรณ์ตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณสูงจากพื้น 15 เซนติเมตร วางห่างกัน 5 เมตร ตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณสามารถมองเห็นกันได้โดยปราศจากสิ่งกีดขวางและทำการทดลองเก็บผลตัวอย่างทุก ๆ 0.5 เมตร ผลที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นของวิธีทิวเวย์เรนจ์จิงและวิธีทิวเวย์เรนจ์จิงแบบสมมาตร ปรากฏว่าระยะทางที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับระยะทางจริงและมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 15 เซนติเมตร จากนั้นทำการทดลองโดยเพิ่มการหน่วงเวลา (Delay) ระหว่างช่วงเวลาที่ตัวรับสัญญาณได้รับสัญญาณและส่งสัญญาณกลับไปยังตัวส่งสัญญาณ โดยใช้วิธีทิวเวย์เรนจ์จิงเพื่อทำให้การสื่อสารนี้เสมือนจริงยิ่งขึ้น ทำการทดลองโดยการวางตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณห่างกัน 5 เมตร มีการหน่วงเวลาทั้งหมด 11 ตำแหน่ง ในแต่ละจุดของการหน่วงเวลาจะทำการวัด 30 ครั้ง เก็บผลการทดลองทุก ๆ 1 เมตร ผลการทดลองที่ได้ปรากฏว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 เมตร จะเห็นได้ว่าเมื่อการหน่วงเวลาเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพของการทำงานจะลดลง จากนั้นมีการนำเสนอวิธีการเพื่อ

ลดค่าความคลาดเคลื่อน การทำงานทั่วไปตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณต้องมีการเข้าจังหวะกัน แต่ในทางปฏิบัติทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงมีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ k ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างทางเวลาของตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณในสมการการคำนวณหาระยะทางแบบวิธีทูเวย์เร็นจ์จิง จากนั้นทำการทดลองเหมือนกับการทดลองข้างต้นทุกประการ ผลปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนลดลง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 20 เซนติเมตร

Utter M. (2015) [4] เพื่อศึกษาความถูกต้องในการระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และเพื่อศึกษาผลกระทบของเทคโนโลยีนี้เมื่อสัญญาณมีการถูกรบกวน ออกแบบการจำลองการทำงานของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ ผ่านโปรแกรม Cooja ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบเครือข่าย โดยทำการจำลองเก็บค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับตั้งแต่ระยะทาง 1 - 10 เมตร เพื่อทำการหาโพลีโนเมียลฟังก์ชันอันดับ 3 (Third polynomial function) จากนั้นใช้โปรแกรมแม็ตแลป (MATLAB) คำนวณหาระยะทางในสภาพแวดล้อมภายในอาคารของการจำลอง โดยมีตำแหน่งอ้างอิงทั้งหมด 3 ตำแหน่ง และตำแหน่งที่ต้องการทราบ 1 ตำแหน่ง เก็บค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่ได้รับ แปลงค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับเป็นระยะทางและคำนวณหาฟังก์ชันที่ต้องการทราบตำแหน่งจากโปรแกรมการจำลองข้างต้นที่ได้พัฒนาขึ้นและอัปโหลดลงในโมดูล Tmote Sky เพื่อนำไปทดลองในสภาพแวดล้อมจริง โดยการเชื่อมต่อโมดูล Tmote Sky กับชิป CC2420 เพื่อเป็นตัวกลางเชื่อมไปยังโมดูล DWM1000 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์ที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท Decawave โมดูล DWM1000 ให้ค่าความถูกต้องในการระบุตำแหน่งค่อนข้างสูงโดยใช้วิธีทูเวย์เร็นจ์จิง ผลการทดลองในกรณีที่ใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับในการระบุตำแหน่ง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง จึงไม่เหมาะที่จะใช้วิธีนี้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร กรณีที่ใช้วิธีทูเวย์เร็นจ์จิงของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์แบ่งได้ 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ และกรณีที่มีสิ่งกีดขวางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ กรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางทำการทดลองที่ระยะทางแตกต่างกันตั้งแต่ 1 - 16 เมตร แต่ละระยะทางทำการวัด 100 ครั้ง เก็บผลการทดลองโดยใช้ค่าเฉลี่ยของระยะทาง เพราะฉะนั้นค่าระยะทางที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของระยะทางที่ทำการทดลองทั้งหมด ผลการทดลองพบว่าระยะทางที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับระยะทางจริง ความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งสามารถบอกได้ในหน่วยเซนติเมตร โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ กรณีที่มีสิ่งกีดขวางทำการทดลองโดยวางตัวส่งสัญญาณไว้รอบ ๆ ผนังที่เป็นคอนกรีต ทำการวัด 100 ครั้งเหมือนการทดลองข้างต้น พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียง 2 เมตร ถึงแม้ว่าจะมีสิ่งกีดขวางในการระบุตำแหน่งแต่ผลลัพธ์ที่ได้ยังค่อนข้างดี จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์สามารถระบุตำแหน่งภายในอาคารได้ในหน่วยเซนติเมตรที่ระยะทาง 1- 16 เมตร และการถูกรบกวนจากสิ่งแวดล้อมไม่ค่อยมีผลกระทบต่อการรับส่งสัญญาณมากนัก

Jiménez A.R. and Seco F. (2017) [21] ได้ทำการศึกษาเทคโนโลยี 2 เทคโนโลยี คือ เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth low energy: BLE) ในการหาวัตถุที่สนใจในพิพิธภัณฑ์ โดยใช้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับในการประมาณระยะทางและใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะในการระบุตำแหน่ง เพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการระบุตำแหน่งและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้ง 2 เทคโนโลยี ทำการทดลองในพิพิธภัณฑ์ที่บริเวณทางเดิน มีรูปภาพ 6 รูปติดอยู่ที่ฝาผนังฝั่งละ 3 รูป การทดลองมี 2 กรณี กรณีที่ 1 ติดอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่รูปภาพแต่ละรูปจะมี Bespoon-UWB tag สำหรับการวัดระยะทางด้วยเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และ Estimote-BLE tag สำหรับการวัดระยะทางด้วยเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำและตัวรับสัญญาณใช้โทรศัพท์ SpoonPhone สำหรับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และโทรศัพท์ Samsung Galaxy S4 ที่มีบลูทูธพลังงานต่ำ สำหรับเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำ โดยที่ตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน ประสิทธิภาพของการประมาณตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ดีกว่าเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 2 - 3 เซนติเมตร ส่วนเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10 เมตร กรณีที่ 2 ทำการประมาณตำแหน่งของตัวรับสัญญาณโดยใช้มือถือโทรศัพท์ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับสัญญาณสำหรับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และบลูทูธพลังงานต่ำและมีการเพิ่ม Pedestrian Dead-reckoning (PDR) เข้าไปในการทดลองนี้ด้วย ประสิทธิภาพสำหรับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ช่วยให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดลง 80 เปอร์เซ็นต์ และ PDR ไม่ค่อยมีผลที่จะช่วยให้ประสิทธิภาพดีขึ้นมากนัก เนื่องจากเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์สามารถระบุตำแหน่งได้แม่นยำด้วยตัวของเทคโนโลยีเองอยู่แล้ว ประสิทธิภาพของเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 3 เมตร หลังจากนั้นใช้ PDR เข้ามาช่วยในการทดลอง จะช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อนและได้ผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้น แต่ยังไม่ดีเทียบเท่าเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์

Yang G., et al. (2017) [22] เป็นการเปรียบเทียบวิธีการระบุตำแหน่งโดยการใช้ค่าเวลาของการมาถึงแบบธรรมดากับวิธี Kalman Filtering and Linearized TOA (KFL-TOA) เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนและปรับปรุงความถูกต้องในการระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ อุปกรณ์ที่รับส่งสัญญาณคือโมดูล DWM1000 มีตัวส่งสัญญาณที่รู้ตำแหน่งทั้งหมด 3 ตัว และตัวรับสัญญาณที่ต้องการระบุตำแหน่ง 1 ตัว การทดลองมีทั้งหมด 3 กรณี กรณีที่ 1 ทำการทดลองหาตำแหน่งของตัวรับสัญญาณภายใต้เงื่อนไขที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง พบว่าวิธี KFL-TOA ลดค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 31.7 เปอร์เซ็นต์ และลดค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งโดยใช้วิธี Circular Error Probable (CEP) เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ กรณีที่ 2 ทำการทดลองหาตำแหน่งของตัวรับสัญญาณภายใต้เงื่อนไขที่มีสัญญาณมาจากหลาย ๆ ทิศทาง พบว่าวิธี KFL-TOA ลดค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 13.7 เปอร์เซ็นต์ และลดค่าความคลาดเคลื่อนใน

การระบุตำแหน่งโดยใช้วิธี CEP เท่ากับ 9.7 เปอร์เซ็นต์ กรณีที่ 3 ทำการทดลองหาตำแหน่งของตัวรับสัญญาณภายใต้เงื่อนไขที่มีสิ่งกีดขวาง พบว่าวิธี KFL-TOA ลดค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 32.9 เปอร์เซ็นต์ และลดค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งโดยใช้วิธี CEP เท่ากับ 36.1 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองทั้งหมดจะเห็นได้ว่าวิธี KFL-TOA ให้ผลลัพธ์ในการระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ดีกว่าวิธีการใช้ค่าเวลาของการมาถึงแบบธรรมดา

Meghani S. K., Asif M. and Amir S. (2012) [23] เป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรมแมตแลบ เพื่อคำนวณหาระยะทางระหว่างโนด 2 โหนดในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายโดยใช้ย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ในการคำนวณหาระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณใช้วิธีการใช้ค่าเวลาของการมาถึง ตัวส่งสัญญาณจะส่งสัญญาณพัลส์ 3 ตัวแรกไปยังตัวรับสัญญาณ ที่เวลา 2.5 นาโนวินาที 5 นาโนวินาที และ 7.5 นาโนวินาที ตามลำดับ เพื่อทำการเข้าจังหวะระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ จากนั้นตัวส่งสัญญาณจะเริ่มส่งสัญญาณพัลส์ที่ 4 ที่เพิ่มความล่าช้าจากพัลส์ 3 ตัวแรกไปยังตัวรับสัญญาณ ที่เวลา 12.5 นาโนวินาที เพื่อนำไปคำนวณหาระยะทางระหว่างโนด มีทั้งหมด 2 การจำลอง การจำลองที่ 1 ใช้ความถี่ 3.6 กิกะเฮิรตซ์ ความกว้างพัลส์ 10 นาโนวินาที โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดน้อยกว่า 0.35 เมตร การจำลองที่ 2 ทำการจำลองในย่านความถี่ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความถี่ 3.6 กิกะเฮิรตซ์ 6 กิกะเฮิรตซ์ และ 8 กิกะเฮิรตซ์ พบว่าเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ความกว้างพัลส์จะลดลงและค่าความคลาดเคลื่อนจะถูกลดลงด้วย โดยที่ความถี่ 8 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าความถี่ 3.6 กิกะเฮิรตซ์ และ 6 กิกะเฮิรตซ์ ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของความถี่ 8 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.2 เมตร

ตารางเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	1 [20]	2 [4]	3 [21]	4 [22]	5 [23]	วิทยานิพนธ์
การระบุตำแหน่ง	ภายในอาคาร	ภายในอาคาร	ภายในอาคาร	ภายในอาคาร	ภายในอาคาร	ภายในอาคาร
เทคโนโลยีที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง	UWB	UWB	UWB, BLE	UWB	UWB	UWB
การหาพารามิเตอร์ในการทดลอง	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	การออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัย	1 [20]	2 [4]	3 [21]	4 [22]	5 [23]	วิทยานิพนธ์
วิธีที่ใช้ในการประมาณระยะทาง	TOF (TWR, SDS-TWR)	RSSI, TWR	RSSI	TOA, KFL-TOA	TOA	TOF (SDS-TWR)
วิธีที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง	N/A	Trilateration	Trilateration	Trilateration	N/A	Trilateration
การทดลอง/การจำลอง	การทดลอง	การทดลอง	การทดลอง	การทดลอง	การจำลอง	การทดลอง
ตัวส่งสัญญาณ	N/A	Tmote sky, DWM1000	Estimote BLE tag, Bespoon UWB tag	DWM1000	N/A	DWM1000
ตัวรับสัญญาณ	N/A	Tmote sky, DWM1000	Sumsung, Spoon phone	DWM1000	N/A	DWM1000
จำนวนตัวส่งสัญญาณ	1 ตัว	3 ตัว	3 ตัว	3 ตัว	1 ตัว	3 ตัว และ 4 ตัว
จำนวนตัวรับสัญญาณ	1 ตัว	1 ตัว	1 ตัว	1 ตัว	1 ตัว	1 ตัว
ค่าความคลาดเคลื่อน	- ในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางมีค่าความคลาดเคลื่อน 15 เซนติเมตร - วิธี TWR มีการเพิ่มค่าหน่วยเวลา ค่าความคลาดเคลื่อน 2 เมตร - วิธี TWR มีการเพิ่มค่า k ค่าความคลาดเคลื่อน 20 เซนติเมตร	- วิธี RSSI มีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง - วิธี TWR กรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 5 % - วิธี TWR กรณีที่มีสิ่งกีดขวาง มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 2 เมตร	- กรณีที่ 1 ใช้ UWB มีค่าความคลาดเคลื่อน 2 - 3 เซนติเมตร และใช้ BLE มีค่าความคลาดเคลื่อน 10 เมตร - กรณีที่ 2 ใช้ UWB ลดค่าความคลาดเคลื่อนลง 80 % และใช้ BLE มีค่าความคลาดเคลื่อน 3 เมตร	31.7 % และ CEP 30% - กรณีที่ 2 สัญญาณที่มาจากหลาย ๆ ทิศทาง ลดค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้ RMSE 13.7 % และ CEP 9.7% - กรณี 3 มีสิ่งกีดขวาง ลดค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้ RMSE 32.9 % และ CEP 36.1%	- การจำลองที่ 1. ความถี่ 3.6 GHz ค่าความคลาดเคลื่อน 0.35 เมตร - การจำลองที่ 2. ใช้ความถี่ต่างกัน ที่ความถี่ 8 GHz ค่าความคลาดเคลื่อน 0.2 เมตร	- การทดลองในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.10 เมตร - การทดลองในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.12 เมตร - การทดลองในสถานที่ใช้งานจริง มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.16 เมตร - การทดลองใช้งานจริง มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.18 เมตร

จากตารางที่ 2.1 และงานวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ทำให้ทราบว่า การระบุตำแหน่งภายในอาคารมีความซับซ้อนมากกว่าการระบุตำแหน่งภายนอกอาคารและยังต้องมีการปรับปรุงค่าความแม่นยำให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการระบุตำแหน่งภายในอาคารมีข้อจำกัดค่อนข้างเยอะ เช่น อุปกรณ์เพอร์นิเจอร์ ผนัง คน สิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ที่อยู่ภายในอาคาร เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ทำให้มีผลการรบกวนต่อการส่งสัญญาณ เช่น มีทิศทางของการส่งสัญญาณที่มาจากหลาย ๆ ทิศทาง (Multi-path) และการจางหายของสัญญาณ (Fading) เป็นต้น งานวิจัยที่ 1 – 4 เป็นการระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยวิธีการทดลอง งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีในย่านความถี่สูงและให้ค่าความแม่นยำในการระบุตำแหน่งดีกว่าเทคโนโลยีในย่านที่ความถี่ต่ำ ส่วนงานวิจัยที่ 5 เป็นการจำลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งแต่ละงานวิจัยใช้เทคนิคการประมาณระยะทางที่แตกต่างกันออกไปและพบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่ได้ทำการออกแบบการทดลองเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะมีผลต่อการส่งสัญญาณและการระบุตำแหน่งเพื่อศึกษาผลกระทบที่ได้จากพารามิเตอร์นั้น

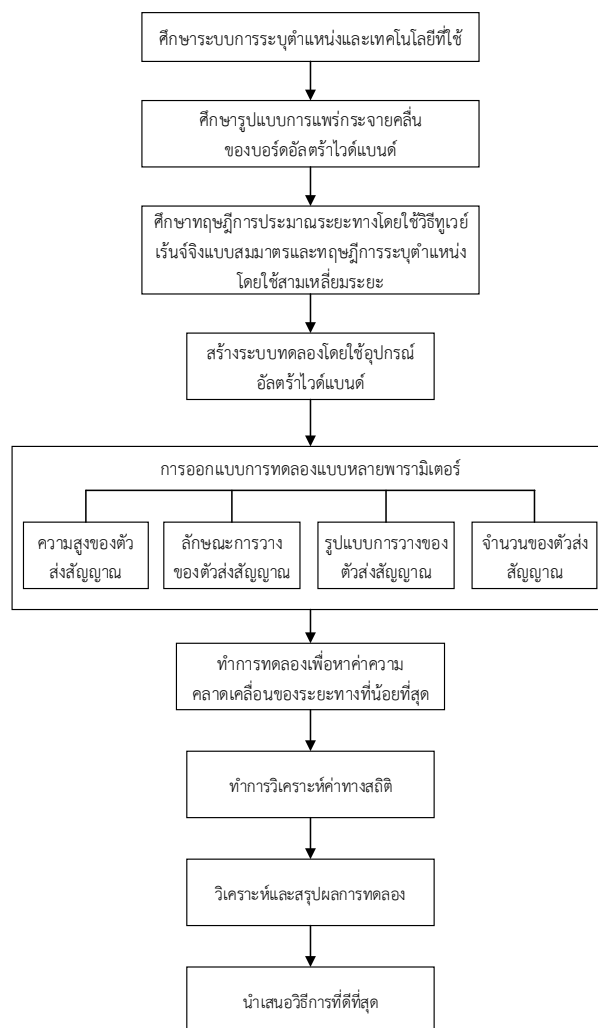
ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการออกแบบการทดลองโดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะมีผลต่อการส่งสัญญาณและการระบุตำแหน่งเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนและเพิ่มความถูกต้อง ความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง โดยการประมาณระยะทางใช้ค่าเวลาในการเดินทาง วิธีทิวเวย์ เร็นจ์จิงแบบสมมาตร การระบุตำแหน่งใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะ ทำการทดลองโดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อหาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อการระบุตำแหน่งและวิธีที่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดเพื่อนำเสนอวิธีการที่ดีที่สุดในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร

บทที่ 3

แนวคิดและวิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้กล่าวถึงแนวคิดและวิธีการดำเนินงาน ซึ่งประกอบด้วย กรอบแนวคิด ขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์ การออกแบบอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ การออกแบบการทำงานของโปรแกรม ภาพรวมของระบบ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและสถานที่ทำการทดลอง รายละเอียดของแต่ละหัวข้อ แสดงได้ดังนี้

3.1 กรอบแนวคิด

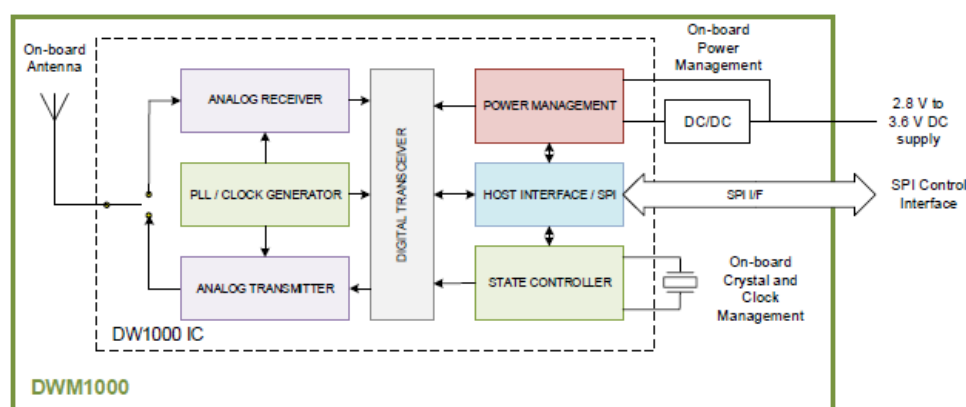


ภาพที่ 3.1 กรอบแนวคิด

3.2 ขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการออกแบบการทดลองและหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร เพื่อปรับปรุงค่าความแม่นยำให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ในขั้นตอนแรกได้ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งและเทคโนโลยีที่ใช้ในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และศึกษารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์ ศึกษาทฤษฎีในการประมาณระยะทางโดยใช้ค่าเวลาในการเดินทาง วิธีทิวเวย์เร้นจ์จึงแบบสมมาตรและทฤษฎีการระบุตำแหน่งโดยใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะ หลังจากนั้นสร้างระบบทดลองด้วยอุปกรณ์อัลตราไวด์แบนด์และออกแบบการทดลองแบบหลายพารามิเตอร์ตามตารางที่ 1.1 ซึ่งมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ 3 ระดับ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ 2 ระดับ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณ 2 ระดับ และจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 2 ระดับ ดังนั้นการทดลองทั้งหมดมี 24 วิธีการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบหาค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดและทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ สรุปผลการทดลองเพื่อนำเสนอวิธีการที่ดีที่สุดในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร

3.3 การออกแบบอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ

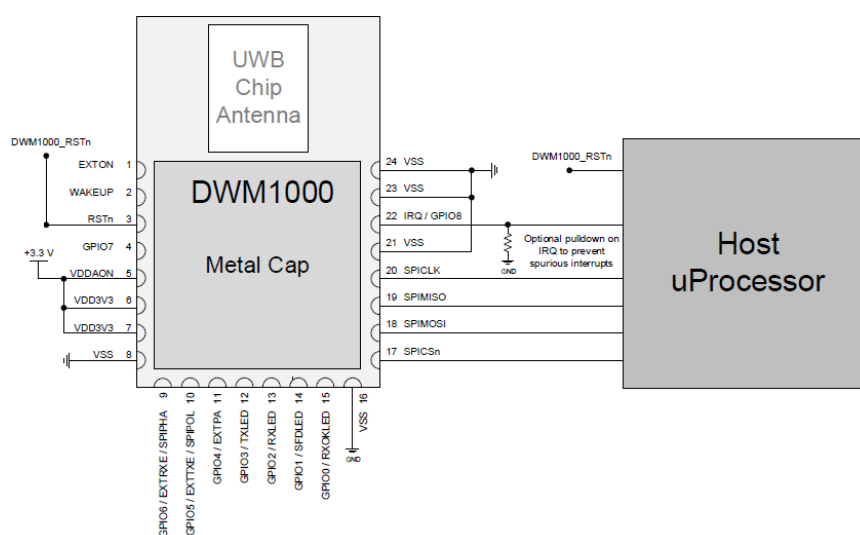


ภาพที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของโมดูล DWM1000 [7]

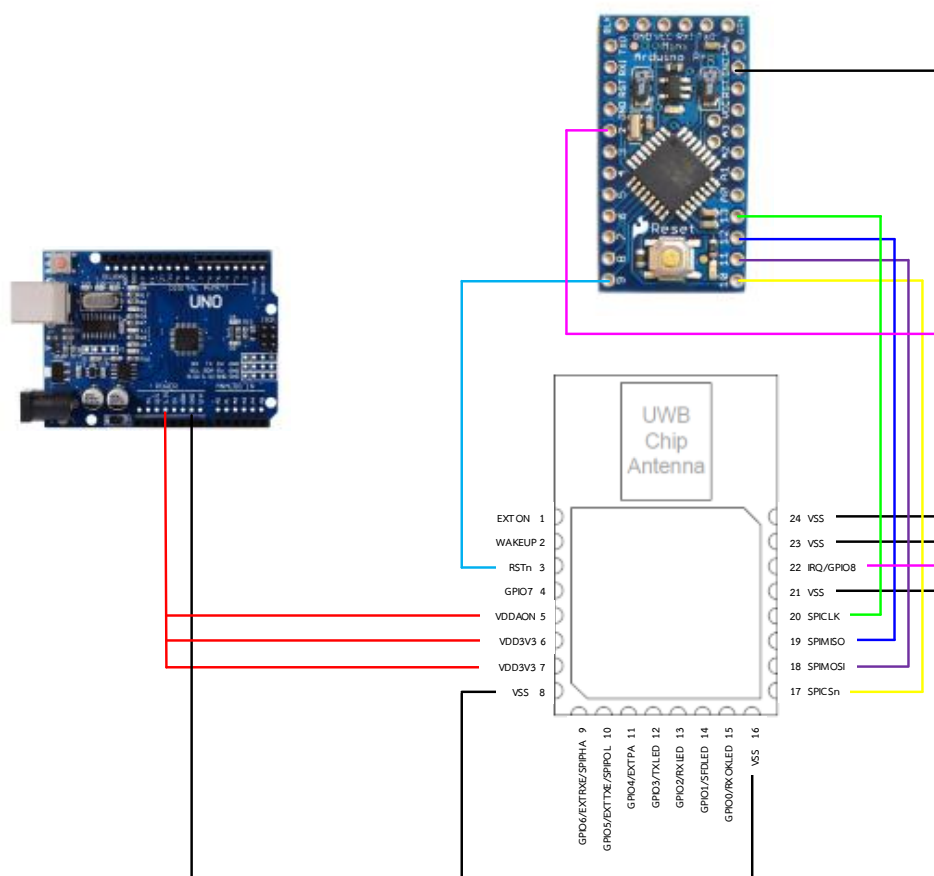
จากภาพที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของโมดูล DWM1000 ประกอบด้วย Host interface หรือ Serial Peripheral Interface (SPI) เป็นวิธีการสื่อสารแบบอนุกรมที่มีการเข้าจังหวะซึ่งสามารถทำให้อุปกรณ์เป็นได้ทั้งตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณและสามารถส่งข้อมูลได้แบบ 2 ทิศทาง (Full duplex) โดยที่ SPI จะเชื่อมต่อกับอินเตอร์เฟซที่ควบคุมการส่ง SPI SPI เชื่อมต่อไปยังการจัดการของกำลังงาน (Power management) ที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจาก 2.8 โวลต์ เป็น 3.6 โวลต์ และเชื่อม

ต่อไปยัง State controller ที่ควบคุมการทำงานของสัญญาณนาฬิกา (Clock) ทั้ง SPI Power management และ State controller จะส่งสัญญาณไปยังตัวรับส่งสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital transceiver) จากนั้นตัวรับส่งสัญญาณแบบดิจิทัลจะส่งสัญญาณไปยังตัวส่งสัญญาณแบบแอนะล็อก (Analog transmitter) ตัวส่งสัญญาณแบบแอนะล็อกจะส่งข้อมูลผ่านทางสายอากาศไปยังตัวรับสัญญาณแบบแอนะล็อก (Analog receiver) โดยทั้งตัวส่งสัญญาณแบบแอนะล็อกและตัวรับสัญญาณแบบแอนะล็อกต้องมี Phase locked loop (PLL) หรือ Clock generator เพื่อควบคุมให้เฟสของตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณตรงกัน จากนั้นตัวรับสัญญาณแบบแอนะล็อกและ PLL จะส่งข้อมูลกลับไปยังตัวรับส่งสัญญาณแบบดิจิทัล ตัวรับส่งสัญญาณแบบดิจิทัลทำการส่งข้อมูลกลับไปยัง SPI เพื่อเชื่อมต่อกับอินเตอร์เฟซ

วงจรของตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณประกอบด้วยโมดูลอัลตราไวด์แบนด์ DWM1000 และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จ่ายไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์ ให้กับโมดูล DWM1000 ผ่านทางพอร์ต VDDAON และ VDD3V3 ต่อกราวด์ (Common ground) ผ่านทางพอร์ต VSS ต่อพอร์ต RsTn (Reset pin) เพื่อใช้ในกรณีต้องการรีเซ็ตค่าที่ติดตอสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับโมดูล DWM1000 ต่อพอร์ต IRQ (Interrupt request) เพื่อการขัดจังหวะของการติดตอสื่อสารเมื่อต้องการควบคุมการส่งข้อมูลของโมดูล DWM1000 การติดตอสื่อสารข้อมูลของโมดูล DWM1000 เป็นแบบ Serial peripheral interface (SPI) ผ่านพอร์ต SPICLK SPIMISO SPIMOSI และ SPICSn วงจรของโมดูล DWM1000 แสดงดังภาพที่ 3.3 (ก) และ 3.3 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.3 วงจรของโมดูล DWM1000 [7] , [24]

การติดต่อสื่อสารแบบ Serial peripheral interface ของโมดูล DWM1000 แสดงดังตารางที่ 3.1

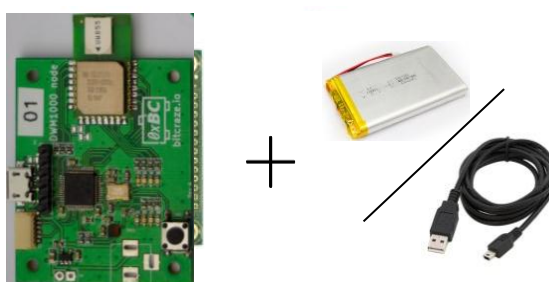
ตารางที่ 3.1 การติดต่อสื่อสารแบบ Serial peripheral interface ของโมดูล DWM1000

ชื่อพอร์ต	คำอธิบาย
SPICLK	Serial peripheral Interface clock ใช้ส่งสัญญาณนาฬิกาเพื่อกำหนดจังหวะของการรับส่งข้อมูล
SPIMISO	Serial peripheral Interface Master in slave out ใช้ในการรับข้อมูลจากอุปกรณ์ Slave

ตารางที่ 3.1 การติดต่อสื่อสารแบบ Serial peripheral interface ของโมดูล DWM1000 (ต่อ)

ชื่อพอร์ต	คำอธิบาย
SPIMOSI	Serial peripheral Interface Master out slave in ใช้ในการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ Master (ไมโครคอนโทรลเลอร์) ไปยังอุปกรณ์ Slave (โมดูล DWM1000)
SPICSn	Serial peripheral Interface Chip select ใช้ในการส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ Slave ที่ต้องการรับส่งข้อมูล

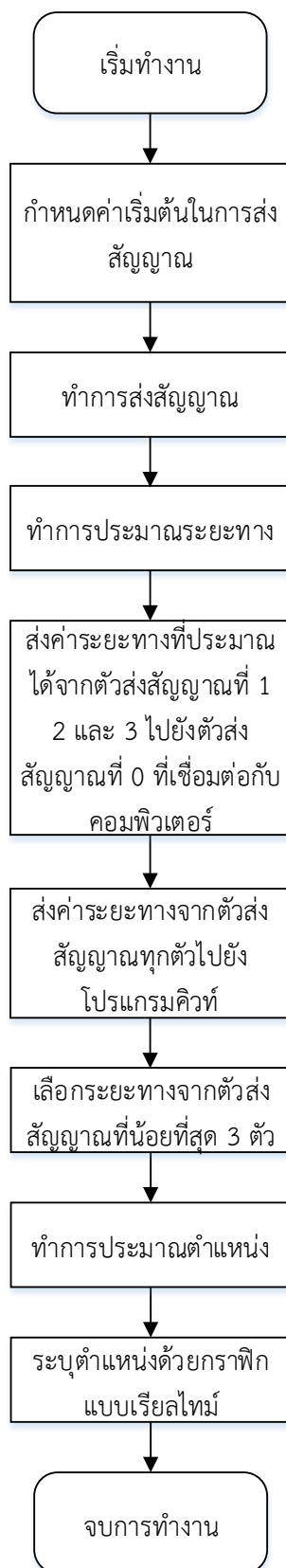
จากนั้นได้ทำการพัฒนาบอร์ดโดยรวมส่วนต่าง ๆ เข้าไว้ด้วยกันเพื่อให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กและสะดวกในการใช้งานและทำการติดตั้งแบตเตอรี่ภายในตัวอุปกรณ์หรือใช้แหล่งจ่ายไฟจากภายนอกโดยผ่านสายอนุกรมแบบยูเอสบี (Serial USB) อุปกรณ์รับส่งสัญญาณแสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ

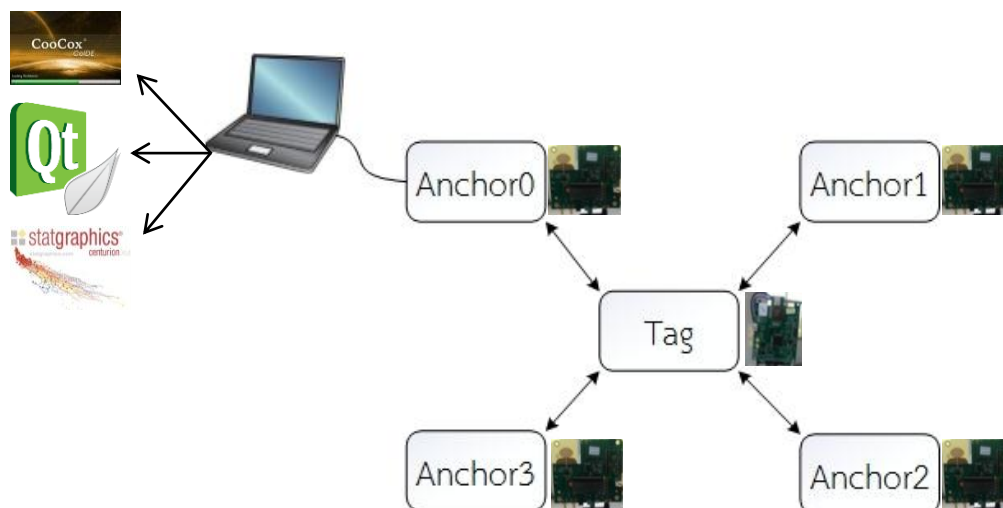
3.4 การออกแบบการทำงานของโปรแกรม

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมมีรายละเอียดดังนี้ กำหนดค่าเริ่มต้นในการส่งสัญญาณของตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ ทำการส่งสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ ทำการประมาณระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ โดยใช้ค่าเวลาในการเดินทาง วิธีทวิเวย์ เร็นจ์จิงแบบสมมาตร จากนั้นตัวส่งสัญญาณที่ 1 2 และ 3 ส่งระยะทางที่ได้ไปยังตัวส่งสัญญาณที่ 0 ซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ตัวส่งสัญญาณที่ 0 ทำการส่งระยะทางทั้งหมดไปยังโปรแกรมคิวท์ (Qt) เพื่อเลือกระยะทางจากตัวส่งสัญญาณที่น้อยที่สุด 3 ตัว จากนั้นทำการประมาณตำแหน่งด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะและแสดงผลการระบุตำแหน่งผ่านส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (Graphic user interface: GUI) ด้วยกราฟิกแบบเรียลไทม์ ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม แสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

3.5 ภาพรวมของระบบ



ภาพที่ 3.6 ภาพรวมของระบบ

ภาพที่ 3.6 ภาพรวมของระบบมีตัวส่งสัญญาณที่รู้ตำแหน่ง 4 ตัว ได้แก่ ตัวส่งสัญญาณที่ 0 1 2 และ 3 (Anchor0, Anchor1, Anchor2, Anchor3) ตามลำดับ ส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ (Tag) เพื่อหาระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวและตัวรับสัญญาณ โดยใช้ค่าเวลาในการเดินทาง วิธีทูลเวย์เรนจ์จึงแบบสมมาตร จากนั้นตัวส่งสัญญาณที่ 1 2 และ 3 จะส่งข้อมูลระยะทางที่ได้ไปยังตัวส่งสัญญาณที่ 0 ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผล เพื่อประมวลผลหาพิกัดที่ต้องการทราบตำแหน่งด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะผ่านโปรแกรมคิวท์ที่ถูกพัฒนาด้วยภาษาซี พลัส พลัส ซึ่งจะแสดงผลผ่านส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติผ่านโปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัสเพื่อหาวิธีการที่ดีที่สุดในการระบุตำแหน่ง

3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software)

3.6.1 ฮาร์ดแวร์

ฮาร์ดแวร์เป็นส่วนของอุปกรณ์ที่สามารถมองเห็นด้วยตาและจับต้องได้ ประกอบด้วยบอร์ดอัลตราไวต์แบนด์ คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์วัดการแพร่กระจายคลื่นและเครื่องวิเคราะห์เครือข่าย (Network analyzer)

3.6.1.1 บอร์ดอัลตราไวด์แบนด์

บอร์ดอัลตราไวด์แบนด์เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งเป็นที่ตั้งตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ ประกอบด้วยโมดูล DWM1000 และสายอากาศที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณ แสดงดังภาพที่ 3.7 (ก) และ 3.7 (ข)



(ก)

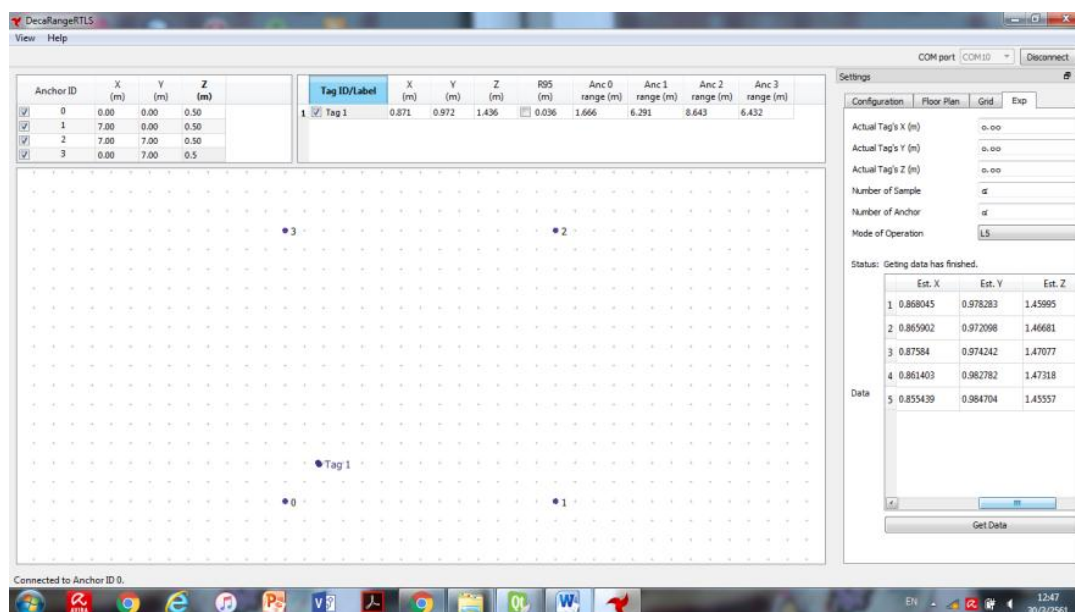


(ข)

ภาพที่ 3.7 อุปกรณ์ของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์ (ก) โมดูล DWM1000 [25] (ข) สายอากาศ

3.6.1.2 คอมพิวเตอร์

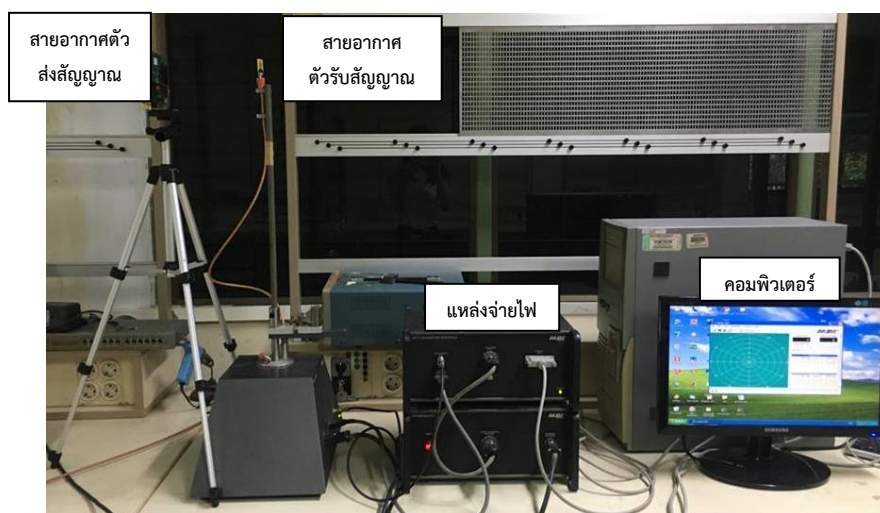
คอมพิวเตอร์ (Computer) ทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลของข้อมูลและแสดงข้อมูลผ่านทางโปรแกรมที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมา แสดงดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 หน้าต่างคอมพิวเตอร์

3.6.1.3 อุปกรณ์วัดการแพร่กระจายคลื่น

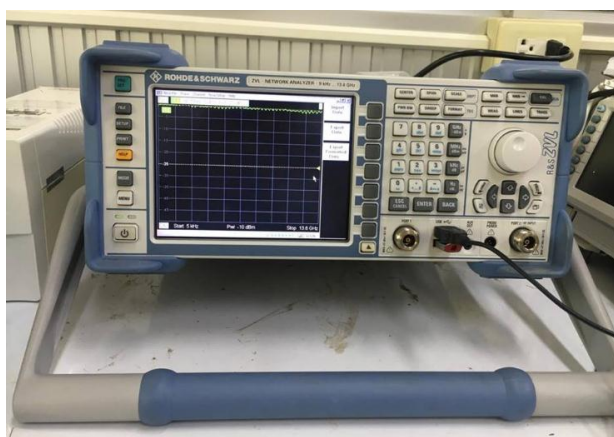
อุปกรณ์วัดการแพร่กระจายคลื่นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดการแพร่กระจายคลื่น เพื่อศึกษารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์ ประกอบด้วย สายอากาศของตัวส่ง สัญญาณ สายอากาศของตัวรับสัญญาณ แหล่งจ่ายไฟและคอมพิวเตอร์ แสดงภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 อุปกรณ์วัดการแพร่กระจายคลื่น

3.6.1.4 เครื่องวิเคราะห์เครือข่าย

เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient: γ) ของสายอากาศของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์ เครื่องวิเคราะห์เครือข่าย แสดงดังภาพที่ 3.10



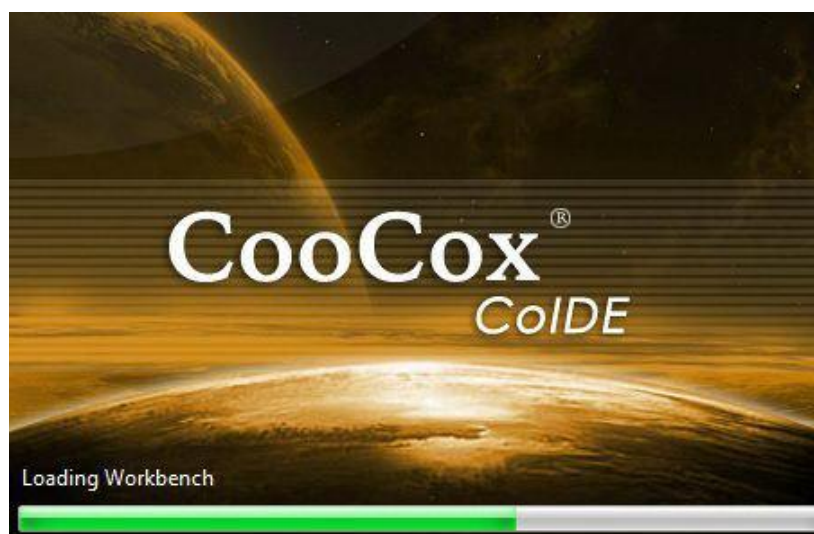
ภาพที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์เครือข่าย

3.6.2 ซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์เป็นโปรแกรมต่าง ๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นมารวมไปถึงโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย โปรแกรมโคค็อกซ์ โคไอดี (CooCox CoIDE) โปรแกรมคิวท์ โปรแกรม LVDAM-ANT และโปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัส (Statgraphics stratus)

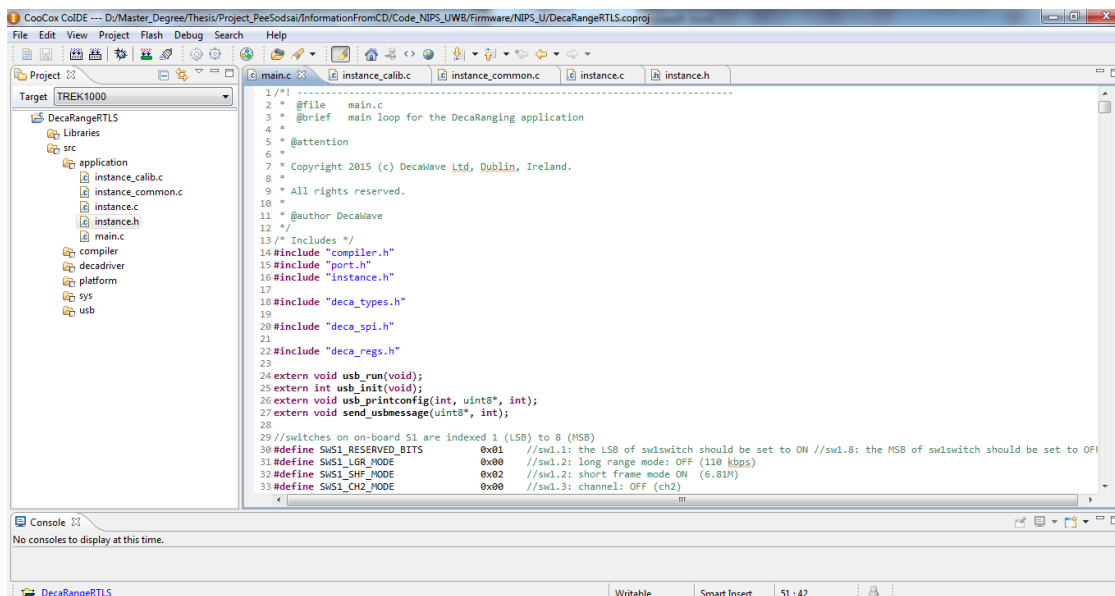
3.6.2.1 โปรแกรมโคค็อกซ์ โคไอดี

โปรแกรมโคค็อกซ์ โคไอดี เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาบนพื้นฐานของเครื่องมือ Eclipse และ GCC ซึ่งได้รับการปรับแต่งและทำให้ง่ายขึ้นเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึง ARM และ Cortex ได้ง่าย คุณสมบัติของโปรแกรมโคค็อกซ์ โคไอดี คือ รองรับการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 บอร์ด STM32 Nucleo เช่นเดียวกับซอฟต์แวร์ไลบรารีของ STM32Cube สามารถพัฒนาด้วยภาษาซี (C language) หรือภาษาซี พลัส พลัส (C++ language) รองรับได้หลายภาษา เช่น ภาษาอังกฤษและภาษาจีน เป็นต้น [26] ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรมโคค็อกซ์ โคไอดี ในการเรียกใช้งานเฟิร์มแวร์ของตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โปรแกรมโคค็อกซ์ โคไอดี แสดงดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 โปรแกรมโคค็อกซ์ โคไอดี [27]

หน้าตาการใช้งานของโปรแกรมโคค็อกซ์ โคไอดี แสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 หน้าตาเขียนโปรแกรมของโปรแกรมโคค็อกซ์ โคไอดี

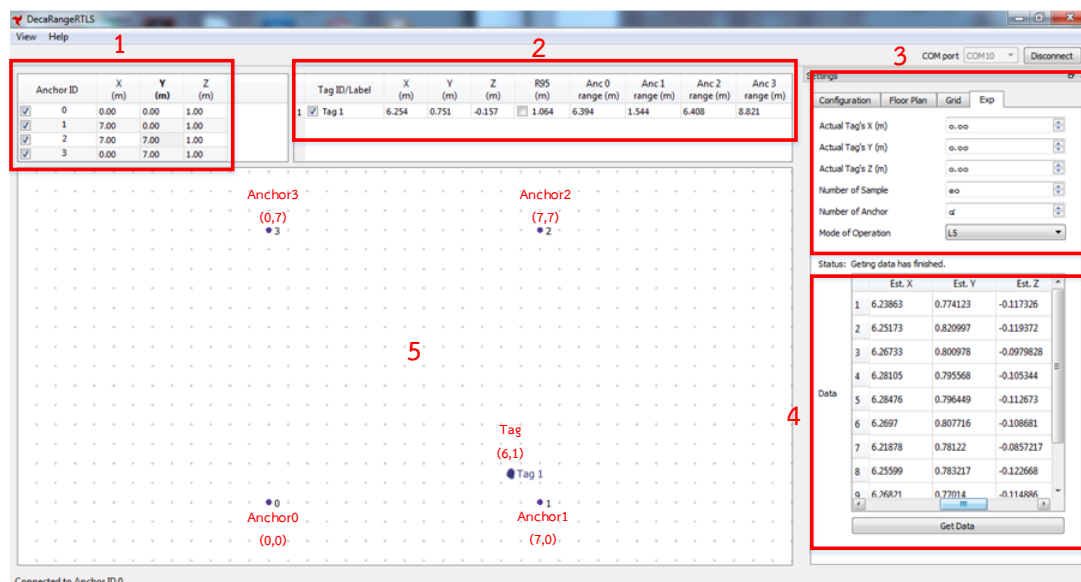
3.6.2.2 โปรแกรมคิวท์

โปรแกรมคิวท์เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแอปพลิเคชัน (Application) และส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานให้แสดงผลการทำงานผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์และโทรศัพท์มือถือได้ โปรแกรมคิวท์รองรับได้หลากหลายภาษาในการพัฒนาโค้ด เช่น ภาษาซี พลัส พลัส ภาษาจาวา (Java) ภาษาจาวาสคริปต์ (JavaScript) ภาษาไพทอน (Python) ภาษาเพิร์ล (Perl) ภาษาพี เอช พี (PHP) เป็นต้น [28] ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรมคิวท์ ในการระบุตำแหน่งและออกแบบหน้าตาการแสดงผลผ่านส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน โปรแกรมคิวท์ แสดงดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 โปรแกรมคิวท์ [29]

หน้าต่างแสดงผลผ่านส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน แสดงดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 หน้าต่างแสดงผลผ่านส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน

จากภาพที่ 3.14 หน้าต่างแสดงผลผ่านส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน ประกอบด้วย หมายเลข 1 เป็นส่วนกำหนดพิกัดของตัวส่งสัญญาณที่รู้ตำแหน่ง หมายเลข 2 เป็นส่วนแสดงผลระยะทางจากตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวไปยังตัวรับสัญญาณ หมายเลข 3 เป็นส่วนกำหนดจำนวนของข้อมูลที่ต้องการเก็บผลการทดลอง กำหนดจำนวนของตัวส่งสัญญาณ หมายเลข 4 เป็นส่วนจำนวนของข้อมูลซึ่งแสดงพิกัดที่ระบุได้จากการทดลองและหมายเลข 5 เป็นพื้นที่การทดลองที่แสดงตำแหน่งการวางของตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ จากรูปมีตัวส่งสัญญาณทั้งหมด 4 ตัววางที่มุม ตัวส่งสัญญาณที่ 0 วางที่พิกัด (0,0) ตัวส่งสัญญาณที่ 1 วางที่พิกัด (7,0) ตัวส่งสัญญาณที่ 2 วางที่พิกัด (7,7) และตัวส่งสัญญาณที่ 3 วางที่พิกัด (0,7) ตัวรับสัญญาณวางที่พิกัด (6,1)

3.6.2.3 โปรแกรม LVDAM-ANT

โปรแกรม LVDAM-ANT เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งในรูปแบบ 2 มิติและ 3 มิติ โปรแกรม LVDAM-ANT แสดงดังภาพที่ 3.15 และหน้าตาการใช้งานของโปรแกรม LVDAM-ANT ในแบบ 2 มิติและ 3 มิติ แสดงดังภาพที่ 3.16 (ก) และ 3.16 (ข) ตามลำดับ

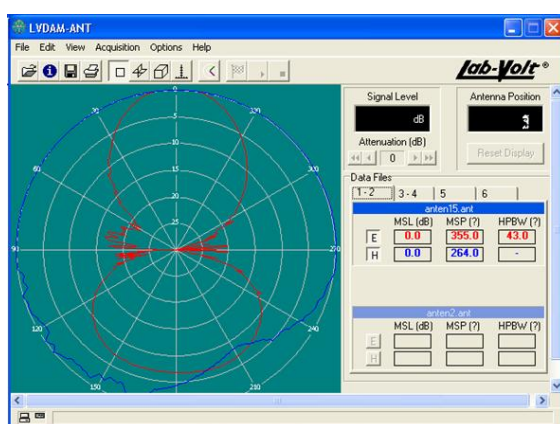
LVDAM-ANT

Data Acquisition and Control for Antenna

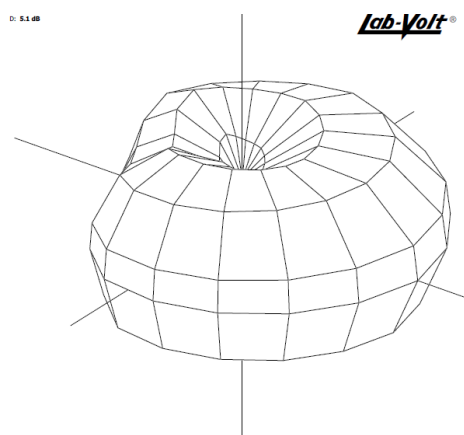
FESTO

Festo Didactic

ภาพที่ 3.15 โปรแกรม LVDAM-ANT



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.16 หน้าต่างการใช้งานของโปรแกรม LVDAM-ANT (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

3.6.2.4 โปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัส

โปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัสเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ เพื่อเก็บรวบรวม วิเคราะห์ ตีความและนำเสนอข้อมูลในการวิเคราะห์และประเมินผลทางสถิติ โปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัส แสดงดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 โปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัส [30]

ผู้ใช้งานสามารถป้อนข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์ลงในโปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัสแบบออนไลน์ได้โดยตรง จากนั้นโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผล ภาพที่ 3.17 มีตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด 5 ตัวแปร ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ (Height) ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ (Orientation) รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณ (Layout) จำนวนของตัวส่งสัญญาณ (Number) และค่าความคลาดเคลื่อน (Error) โดยกำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นตัวแปรตาม ส่วนความสูงของตัวส่งสัญญาณ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณเป็นตัวแปรต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล หน้าต่างการใช้งานจริงของโปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัสแบบออนไลน์ แสดงดังภาพที่ 3.18

statgraphics stratus

Welcome **Panthip!** | [Log Out](#)

Home

File

Edit

Plot

Describe

Compare

Relate

Forecast

SPC

DOE

Statlets

Help

Current data file: Panthip_24experiments.sgd

Display Data

Edit Data

Variable	Comment	Nonmissing Values	Numeric Values	Minimum	Maximum
Height		24	24	0.5	1.5
Orientation		24	0	horizontal	vertical
Layout		24	0	corner	no corner
Number		24	24	3	4
Error		24	24	0.10152	0.32304
Col_6		0	0		
Col_7		0	0		
Col_8		0	0		
Col_9		0	0		
Col_10		0	0		

ภาพที่ 3.18 หน้าต่างการใช้งานจริงของโปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัสแบบออนไลน์

3.7 สถานที่ทำการทดลอง



ภาพที่ 3.19 ขนาดพื้นที่ทำการทดลอง

จากภาพที่ 3.19 ขนาดพื้นที่ทำการทดลอง ทำการทดลองการออกแบบการระบุตำแหน่งภายในอาคาร ที่ตึก EN 7 ชั้น 3 ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ขนาดพื้นที่ทำการทดลองเท่ากับ 7×7 เมตร

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการทดลองและผลการทดลอง ประกอบด้วย การทดลองหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศและระยะการทำงานบอร์ตของอัลตราไวต์แบนด์ การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวางและการทดลองการใช้งานจริง ซึ่งรายละเอียดของแต่ละการทดลองแสดงได้ดังนี้

4.1 การทดลองหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศและระยะการทำงานของบอร์ตอัลตราไวต์แบนด์

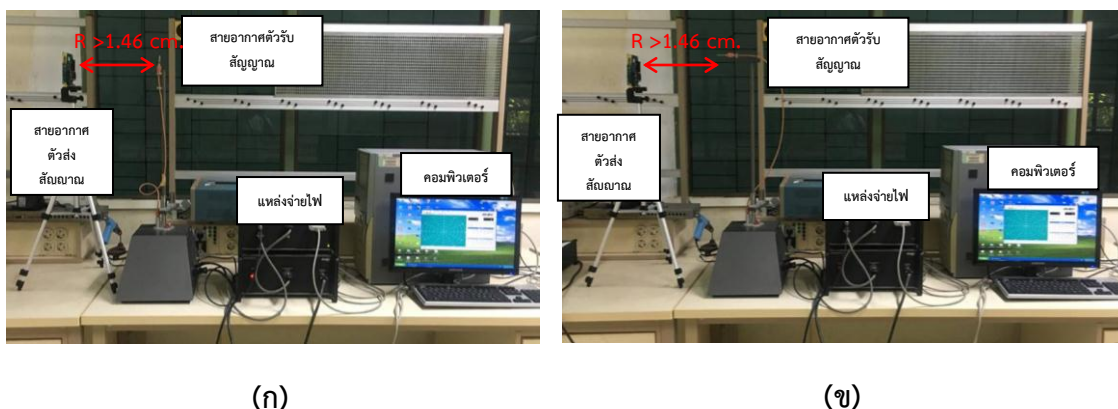
การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศของบอร์ตอัลตราไวต์แบนด์และทดลองระยะการทำงานของบอร์ตอัลตราไวต์แบนด์

4.1.1 การทดลองการหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของบอร์ตอัลตราไวต์แบนด์

หาระยะของบริเวณสนามไกลระหว่างสายอากาศของตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ

จากสมการที่ 2.3 เท่ากับ $R > \frac{2D^2}{\lambda}$ เมื่อความยาวสูงสุดของสายอากาศของบอร์ตอัลตราไวต์แบนด์ (D) มีค่าเท่ากับ 0.025 เมตร ความถี่ที่ใช้งานเท่ากับ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ ดังนั้นความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 0.0857 เมตร จะได้ระยะของบริเวณสนามไกล (R) เท่ากับ 0.0146 เมตร หรือ 1.46 เซนติเมตร

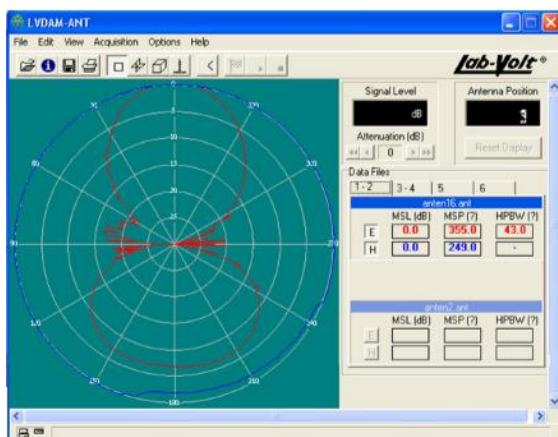
จากนั้นทำการทดลองโดยวางสายอากาศของตัวส่งสัญญาณและสายอากาศของตัวรับสัญญาณให้ตรงกันที่ระยะห่างมากกว่า 1.46 เซนติเมตร โดยให้สายอากาศของตัวรับสัญญาณต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลผ่านโปรแกรม LVDAM-ANT สายอากาศของตัวรับสัญญาณจะหมุนรอบทิศทางเพื่อรับสัญญาณที่ส่งมาจากตัวส่งสัญญาณ การทดลองการแพร่กระจายคลื่นของบอร์ตอัลตราไวต์แบนด์ในแนวตั้ง แสดงดังภาพที่ 4.1 (ก) โดยวางตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณให้ขนานกัน การทดลองการแพร่กระจายคลื่นของบอร์ตอัลตราไวต์แบนด์ในแนวนอน แสดงดังภาพที่ 4.1 (ข) โดยวางตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณให้ตั้งฉากกัน



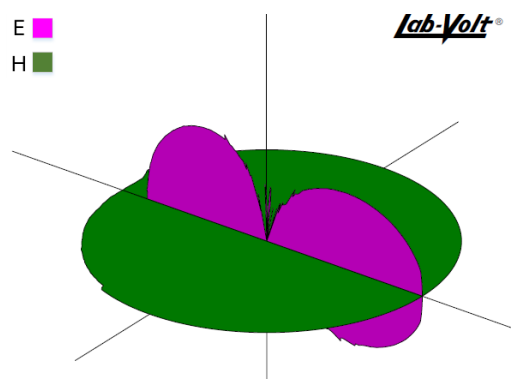
ภาพที่ 4.1 การทดลองการแพร่กระจายคลื่นของบอร์ดอัลตราไวต์แบนด์ (ก) แนวตั้ง
(ข) แนวนอน

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของบอร์ดอัลตราไวต์แบนด์ในอุดมคติมีการแพร่กระจายแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional) ซึ่งมีลักษณะคล้ายโดนัทในระนาบ 3 มิติ หากพิจารณาในระนาบ 2 มิติ พบว่าระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) หรือระนาบแนวตั้งฉาก (Elevation plane) มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นคล้ายรูปเลขแปดและในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) หรือระนาบแนวนอน (Horizontal plane) มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นเป็นวงกลม

ผลการทดลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศของบอร์ดอัลตราไวต์แบนด์ในระนาบ 2 มิติ มีรายละเอียดดังนี้ เส้นสีแดงในภาพที่ 4.2 (ก) และพื้นที่สีชมพูในภาพที่ 4.2 (ข) คือ ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า เส้นสีน้ำเงินในภาพที่ 4.2 (ก) และพื้นที่สีเขียวในภาพที่ 4.2 (ข) คือ ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก พบว่าลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายเลขแปด ที่มีการแพร่กระจายคลื่นซึ่งมีทิศทางที่มุม 0 องศา และ 180 องศา และลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กมีลักษณะคล้ายวงกลม ซึ่งมีการแพร่กระจายคลื่นทุกทิศทางเท่ากันรอบมุม 360 องศา ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในอุดมคติ ผลการทดลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของบอร์ดอัลตราไวต์แบนด์ในรูปแบบ 2 มิติ แสดงดังภาพที่ 4.2 (ก) และ 4.2 (ข)



(ก)



(ข)

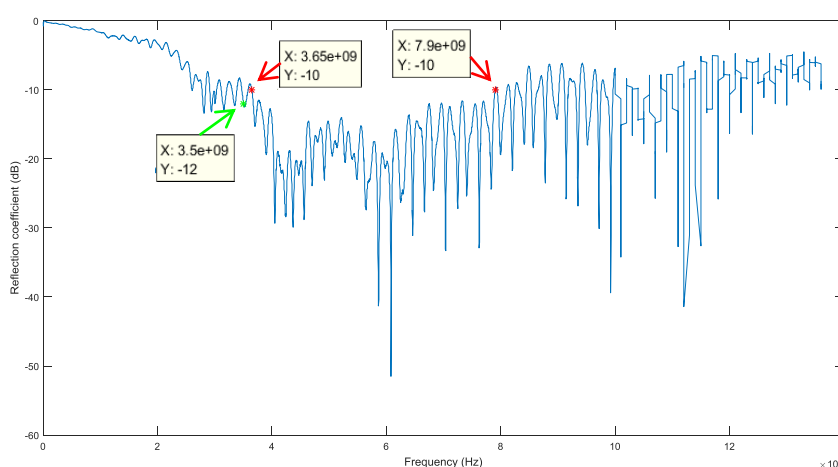
ภาพที่ 4.2 ผลการทดลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอัลตราไวด์แบนด์ในรูปแบบ 2 มิติ

จากนั้นทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (γ) หรือเขียนแทนด้วย S เมื่อ S11 คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ต 1 คำนวณได้จากอัตราส่วนแรงดันของคลื่นที่สะท้อนออกมาจากพอร์ต 1 เทียบกับแรงดันของคลื่นที่ป้อนเข้าไปที่พอร์ต 1 อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายและสายอากาศของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์ โดยต่อสายอากาศของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์เข้าที่พอร์ต 1 ของเครื่องวิเคราะห์เครือข่าย เพื่อเก็บผลการทดลองของ S11 การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ต 1 จะส่งสัญญาณได้ดีที่การสะท้อนต่ำกว่า -10 เดซิเบล (Decibel: dB) พบว่าที่ความถี่ตั้งแต่ 3.65 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 7.90 กิกะเฮิรตซ์ มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำกว่า -10 เดซิเบล ฉะนั้นสายอากาศของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์จะทำงานได้ดีที่ความถี่ตั้งแต่ 3.65 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 7.9 กิกะเฮิรตซ์ สำหรับความถี่ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ พบว่าที่ความถี่ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -12 เดซิเบล ซึ่งต่ำกว่า -10 เดซิเบล ดังนั้นสายอากาศของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์ยังสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ต 1 แสดงดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ต 1

4.1.2 การทดลองระยะการทำงานของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์

ทำการทดลองวัดระยะทางของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์ที่สามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง แสดงได้ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 การทดลองระยะการทำงานของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์

จากภาพที่ 4.5 การทดลองระยะการทำงานของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์ ทำการทดลองหาระยะทางของบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์ที่สามารถทำงานได้จริงในบริเวณที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง วางตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณโดยหันสายอากาศให้ตรงกันและมีความสูงจากพื้น 1 เมตร ผลการทดลองพบว่าบอร์ดอัลตราไวด์แบนด์สามารถรับส่งสัญญาณได้ประมาณ 105 เมตร

4.2 การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ

การทดลองนี้เป็นการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายนอกอาคารและการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายในอาคาร

4.2.1 การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ

ภายนอกอาคาร

ทำการทดลองโดยมีตัวส่งสัญญาณทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ ตัวส่งสัญญาณที่ 0 ตัวส่งสัญญาณที่ 1 ตัวส่งสัญญาณที่ 2 และตัวส่งสัญญาณที่ 3 ความสูงของตัวรับส่งสัญญาณวางสูงจากพื้น 1 เมตร ทำการทดลองโดยวัดระยะทางจากตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวไปยังตัวรับสัญญาณห่างกันทีละ 1 เมตร ระยะทางตั้งแต่ 1 – 10 เมตร จากนั้นวัดที่ระยะทาง 20 – 100 เมตร ห่างกันทีละ 10 เมตรและที่ระยะทาง 105 เมตร เนื่องจากตัวรับส่งสัญญาณสามารถรับส่งสัญญาณได้ประมาณ 105 เมตร แต่ละระยะทางที่ทำการทดสอบเก็บข้อมูล 10 ค่า เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยและนำไปเปรียบเทียบกับระยะทางจริง การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายนอกอาคารแสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ

ภายนอกอาคาร

ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ
ภายนอกอาคาร แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ
ภายนอกอาคาร

ระยะทาง จริง (เมตร)	ระยะทางที่วัดได้ (เมตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)			
	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 0	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 1	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 2	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 3	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 0	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 1	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 2	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 3
1	1.12	1.03	1.05	1.10	0.12	0.03	0.05	0.10
2	2.18	2.05	2.11	2.13	0.18	0.05	0.11	0.13
3	3.16	3.01	3.13	3.14	0.16	0.01	0.13	0.14
4	4.20	4.09	4.09	4.03	0.20	0.09	0.09	0.03
5	5.19	5.11	5.19	5.15	0.19	0.11	0.19	0.15
6	6.16	6.02	6.15	6.10	0.16	0.02	0.15	0.10
7	7.20	7.05	7.01	7.15	0.20	0.05	0.01	0.15
8	8.18	8.04	8.04	8.14	0.18	0.04	0.04	0.14
9	9.17	9.01	9.04	9.12	0.17	0.01	0.04	0.12
10	10.14	10.03	10.10	10.02	0.14	0.03	0.10	0.02
20	20.15	20.07	20.03	20.09	0.15	0.07	0.03	0.09
30	30.15	30.09	30.12	30.13	0.15	0.09	0.12	0.13
40	40.16	40.09	40.02	40.01	0.16	0.09	0.02	0.01
50	50.20	50.14	50.09	50.11	0.20	0.14	0.09	0.11
60	60.01	60.08	60.12	60.07	0.01	0.08	0.12	0.07
70	69.83	70.12	70.01	70.14	0.17	0.12	0.01	0.14
80	80.02	80.11	79.95	80.05	0.02	0.11	0.05	0.05
90	89.70	90.09	90.12	90.15	0.30	0.09	0.12	0.15
100	100.17	100.04	99.93	100.10	0.17	0.04	0.07	0.10
105	105.05	105.12	104.89	105.06	0.05	0.12	0.11	0.06
Average					0.15	0.07	0.08	0.10

จากตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายนอกอาคาร พบว่าที่ระยะทางเท่ากันของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวมีค่าระยะทางที่วัดได้แตกต่างกัน ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนนี้จะส่งผลไปยังการระบุตำแหน่งและยังพบว่าตัวส่งสัญญาณทุกตัวมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจากระยะทางจริงเท่ากับ 0.01 เมตร และตัวส่งสัญญาณที่ 0 มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดจากระยะทางจริงเท่ากับ 0.3 เมตร อีกทั้งยังพบว่าตัวส่งสัญญาณที่ 0 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 0.15 เมตร ดังนั้นจะทำการทดลองโดยการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนที่ระยะทาง 1 เมตร และ 90 เมตร เพื่อให้การระบุตำแหน่งแม่นยำยิ่งขึ้น

การทดลองการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนภายนอกอาคารที่ระยะทาง 1 เมตร และ 90 เมตร สำหรับระยะทาง 1 เมตร ทำการทดลองโดยวางตัวรับสัญญาณคั่นเข้ามาทางตัวส่งสัญญาณโดยห่างจากระยะทางจริง 12 เซนติเมตร เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณที่ 0 ที่ระยะทาง 1 เมตร เท่ากับ 0.12 เมตร เก็บผลการทดลอง 10 ค่า เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย สำหรับระยะทาง 90 เมตร ทำการทดลองเหมือนกับระยะทาง 1 เมตร ทุกประการแต่วางตัวรับสัญญาณให้ไกลจากตัวส่งสัญญาณโดยห่างจากระยะทางจริง 30 เซนติเมตร ผลการทดลองการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนภายนอกอาคารที่ระยะทาง 1 เมตร และ 90 เมตร แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนภายนอกอาคารที่ระยะทาง 1 เมตร และ 90 เมตร

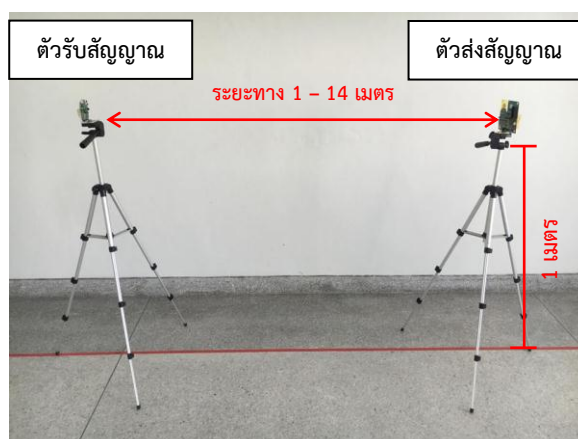
ตัวส่งสัญญาณที่ 0				
ระยะทางจริง (เมตร)	ระยะทางที่วัดได้ (เมตร)	ค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)	ระยะทางที่วัดได้หลังจากมีการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)	ค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)
1	1.12	0.12	1.01	0.01
90	89.70	0.3	90.02	0.02

จากตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนภายนอกอาคารที่ระยะทาง 1 เมตร และ 90 เมตร พบว่าหลังจากที่มีการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทาง ที่ระยะทาง 1 เมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง 0.01 เมตร และที่ระยะทาง 90 เมตร มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.02 เมตร จากการทดลองนี้ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดลงมีค่าใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากยิ่งขึ้น

4.2.2 การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ

ภายในอาคาร

ทำการทดลองโดยมีตัวส่งสัญญาณทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ ตัวส่งสัญญาณที่ 0 ตัวส่งสัญญาณที่ 1 ตัวส่งสัญญาณที่ 2 และตัวส่งสัญญาณที่ 3 ความสูงของตัวรับสัญญาณวางสูงจากพื้น 1 เมตร ทำการทดลองโดยวัดระยะทางจากตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวไปยังตัวรับสัญญาณห่างกันทีละ 1 เมตร ระยะทางตั้งแต่ 1 - 14 เมตร เนื่องจากขนาดพื้นที่ห้องในการทดลองมีระยะทางสูงสุดเท่ากับ 14 เมตร โดยแต่ละระยะทางที่ทำการทดสอบเก็บข้อมูล 10 ค่า เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยและนำไปเปรียบเทียบกับระยะทางจริง การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายในอาคารแสดงดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 การทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ

ภายในอาคาร

ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายในอาคาร แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายในอาคาร

ระยะทาง จริง (เมตร)	ระยะทางที่วัดได้ (เมตร)				ค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)			
	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 0	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 1	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 2	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 3	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 0	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 1	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 2	ตัวส่ง สัญญาณ ที่ 3
1	1.13	1.08	1.11	1.19	0.13	0.08	0.11	0.19
2	2.19	2.12	2.15	2.19	0.19	0.12	0.15	0.19
3	3.20	3.18	3.20	3.21	0.20	0.18	0.20	0.21
4	4.24	4.15	4.19	4.21	0.24	0.15	0.19	0.21
5	5.26	5.17	5.16	5.24	0.26	0.17	0.16	0.24
6	6.19	6.16	6.22	6.19	0.19	0.16	0.22	0.19
7	7.27	7.09	7.11	7.19	0.27	0.09	0.11	0.19
8	8.26	8.11	8.16	8.15	0.26	0.11	0.16	0.15
9	9.27	9.12	9.16	9.23	0.27	0.12	0.16	0.23
10	10.21	10.16	10.23	10.22	0.21	0.16	0.23	0.22
11	11.30	11.12	11.14	11.21	0.30	0.12	0.14	0.21
12	12.11	12.12	12.12	12.25	0.11	0.12	0.12	0.25
13	13.14	13.12	13.21	13.25	0.14	0.12	0.21	0.25
14	14.17	14.12	14.14	14.23	0.17	0.12	0.14	0.23
Average					0.21	0.13	0.16	0.21

จากตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะทางต่าง ๆ ภายในอาคาร พบว่าตัวส่งสัญญาณที่ 1 ที่ระยะทาง 1 เมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจากระยะทางจริงเท่ากับ 0.08 เมตร และตัวส่งสัญญาณที่ 0 ที่ระยะทาง 11 เมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดจากระยะทางจริงเท่ากับ 0.3 เมตร ตัวส่งสัญญาณที่ 0 และตัวส่งสัญญาณที่ 4 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 0.21 เมตร

จากนั้นทำการทดลองการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อน โดยเลือกตัวส่งสัญญาณที่ 0 เนื่องจากที่ระยะทาง 11 เมตร ของตัวส่งสัญญาณที่ 0 มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด ทำการทดลองที่ระยะทาง 1 เมตร และ 11 เมตร สำหรับระยะทาง 1 เมตร ทำการทดลองโดยวางตัวรับสัญญาณก่อนเข้ามาทางตัวส่งสัญญาณโดยห่างจากระยะทางจริง 13 เซนติเมตร เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อน

ของตัวส่งสัญญาณที่ 0 ที่ระยะทาง 1 เมตร เท่ากับ 0.13 เมตร เก็บผลการทดลอง 10 ค่า เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย สำหรับระยะทาง 11 เมตร ทำการทดลองเหมือนกับระยะทาง 1 เมตร ทุกประการแต่วางตัวรับสัญญาณก่อนเข้ามาทางตัวส่งสัญญาณโดยห่างจากระยะทางจริง 30 เซนติเมตร ผลการทดลองการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนภายในอาคารที่ระยะทาง 1 เมตร และ 11 เมตร แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนภายในอาคารที่ระยะทาง 1 เมตร และ 11 เมตร

ตัวส่งสัญญาณที่ 0				
ระยะทางจริง (เมตร)	ระยะทางที่วัดได้ (เมตร)	ค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)	ระยะทางที่วัดได้หลังจากมีการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)	ค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)
1	1.13	0.13	1.02	0.02
11	11.30	0.3	11.02	0.02

จากตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนภายนอกอาคารที่ระยะทาง 1 เมตร และ 11 เมตร พบว่าหลังจากที่มีการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทาง ที่ระยะทาง 1 เมตร มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.02 เมตร และที่ระยะทาง 11 เมตร มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.02 เมตร จากการทดลองนี้ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดลงมีค่าใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากยิ่งขึ้น

ในการทดลองการระบุตำแหน่งควรทำการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวให้มีค่าใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุดเพื่อความถูกต้องในการระบุตำแหน่งและพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ระยะทางต่าง ๆ ภายในอาคารมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าภายนอกอาคาร เนื่องจากสภาพแวดล้อมภายในอาคารมีข้อจำกัดมากกว่าสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร เช่น ผนังห้องอาคาร ที่อาจส่งผลต่อการส่งสัญญาณ เป็นต้น

4.3 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาค่าความถูกต้องในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ ตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณถูกสร้างมาจากอุปกรณ์อัลตราไวด์แบนด์ ใช้โปรแกรมคิวทีในการประมวลผลหาพิกัดที่ต้องการทราบตำแหน่งและแสดงผลในรูปแบบกราฟิกผ่านส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน การทดลองนี้เป็นการทดลองเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่คาด

ว่าจะมีผลต่อความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง รูปแบบการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 รูปแบบการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง

วิธีการทดลอง	ความสูงของตัวส่งสัญญาณ (เมตร)			ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ		รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณ		จำนวนของตัวส่งสัญญาณ (ตัว)	
	0.5	1	1.5	แนวตั้ง	แนวนอน	วางที่มุม	ไม่วางที่มุม	3	4
1	✓			✓		✓		✓	
2	✓			✓		✓			✓
3	✓			✓			✓	✓	
4	✓			✓			✓		✓
5	✓				✓	✓		✓	
6	✓				✓	✓			✓
7	✓				✓		✓	✓	
8	✓				✓		✓		✓
9		✓		✓		✓		✓	
10		✓		✓		✓			✓
11		✓		✓			✓	✓	
12		✓		✓			✓		✓
13		✓			✓	✓		✓	
14		✓			✓	✓			✓
15		✓			✓		✓	✓	
16		✓			✓		✓		✓
17			✓	✓		✓		✓	
18			✓	✓		✓			✓
19			✓	✓			✓	✓	
20			✓	✓			✓		✓
21			✓		✓	✓		✓	
22			✓		✓	✓			✓
23			✓		✓		✓	✓	
24			✓		✓		✓		✓

ตารางที่ 4.5 รูปแบบการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง มีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ โดยที่ความสูงของตัวส่งสัญญาณมี 3 ระดับ ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร และ

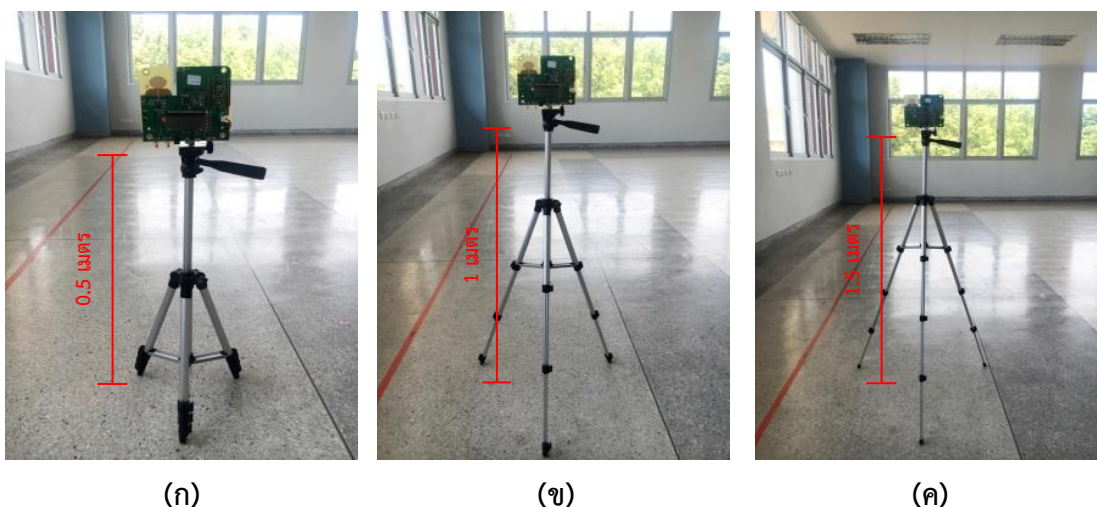
ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณมี 2 ระดับ ได้แก่ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้งและลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณมี 2 ระดับ ได้แก่ ตัวส่งสัญญาณวางไว้ที่มุมและตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุม จำนวนของตัวส่งสัญญาณมี 2 ระดับ ได้แก่ จำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว และจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ดังนั้นการทดลองทั้งหมดมี 24 วิธีการทดลอง

4.3.1 ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ

พารามิเตอร์ในการทดลองมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ ซึ่งลักษณะการวางพารามิเตอร์รูปแบบต่าง ๆ แสดงได้ดังนี้

4.3.1.1 ความสูงของตัวส่งสัญญาณ

พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณมีทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร และความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1.5 เมตร แสดงดังภาพที่ 4.8 (ก) 4.8 (ข) และ 4.8 (ค) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.8 ลักษณะการวางความสูงของตัวส่งสัญญาณ (ก) ที่ระดับ 0.5 เมตร (ข) ที่ระดับ 1 เมตร (ค) ที่ระดับ 1.5 เมตร

4.3.1.2 ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ

พารามิเตอร์ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณมีทั้งหมด 2 ระดับ ได้แก่ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้งและลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน ในกรณีตัวส่งสัญญาณวางไว้ที่มุมของพื้นที่การทดลองให้หันด้านหน้าสายอากาศเข้าในพื้นที่การทดลอง

โดยทำมุม 45 องศา ในกรณีตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมของพื้นที่การทดลองให้หันหน้าสายอากาศเข้าใน พื้นที่การทดลองโดยทำมุม 0 องศาหรือวางตัวส่งสัญญาณโดยหันหน้าของสายอากาศเข้าจุดกึ่งกลาง ของพื้นที่การทดลอง ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้งกรณีวางที่มุมและไม่วางที่มุม แสดง ดังภาพที่ 4.9 (ก) และ 4.9 (ข) ตามลำดับ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอนกรณีวางที่มุม และ ไม่วางที่มุม แสดงดังภาพที่ 4.9 (ค) และ 4.9 (ง) ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)



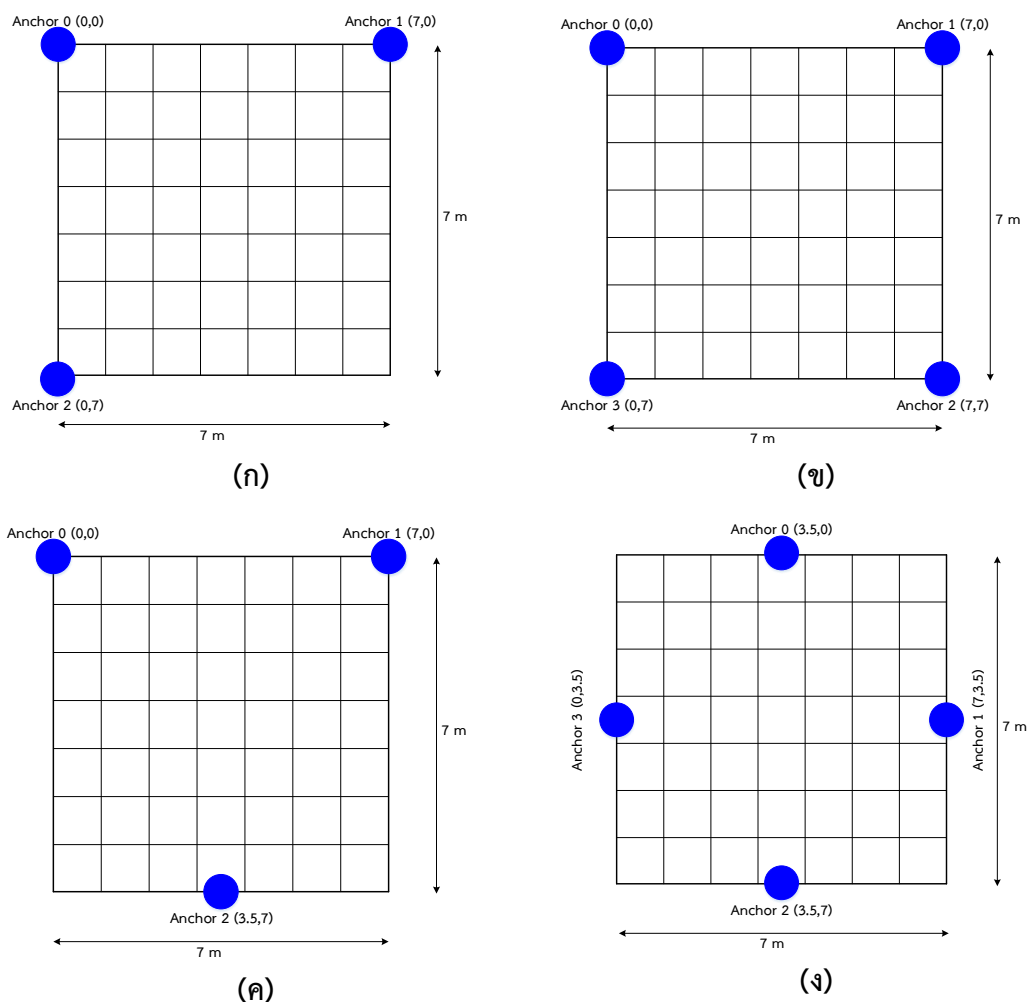
(ง)

ภาพที่ 4.9 ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง (ก) วางที่มุม (ข) ไม่วางที่มุม และ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน (ค) วางที่มุม (ง) ไม่วางที่มุม

4.3.1.3 รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณ

พารามิเตอร์รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณมีทั้งหมด 2 ระดับ ได้แก่ ตัวส่ง สัญญาณวางที่มุมและตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุม ในขนาดพื้นที่การทดลองเบื้องต้นเท่ากับ 7×7 เมตร รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณกรณีวางที่มุม 3 ตัว และ 4 ตัว แสดงดังภาพที่ 4.10 (ก) และ

4.10 (ข) ตามลำดับ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณกรณีไม่วางที่มุม 3 ตัวและ 4 ตัว แสดงดังภาพที่ 4.10 (ค) และ 4.10 (ง) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.10 รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณกรณีวางที่มุม (ก) 3 ตัว (ข) 4 ตัว และรูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณกรณีไม่วางที่มุม (ค) 3 ตัว (ง) 4 ตัว

4.3.1.4 จำนวนของตัวส่งสัญญาณ

พารามิเตอร์จำนวนของตัวส่งสัญญาณมีทั้งหมด 2 ระดับ ได้แก่ จำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว และจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ในขนาดพื้นที่การทดลองเบื้องต้นเท่ากับ 7×7 เมตร กรณีมีตัวส่งสัญญาณ 3 ตัววางที่มุมและไม่วางที่มุม แสดงดังภาพที่ 4.11 (ก) และ 4.11 (ข) ตามลำดับ กรณีมีตัวส่งสัญญาณ 4 ตัววางที่มุมและไม่วางที่มุม แสดงดังภาพที่ 4.11 (ค) และ 4.11 (ง) ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 4.11 จำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว (ก) วางที่มุม (ข) ไม่วางที่มุม และจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว (ค) วางที่มุม (ง) ไม่วางที่มุม

4.3.2 ลักษณะการวางของตัวรับสัญญาณ



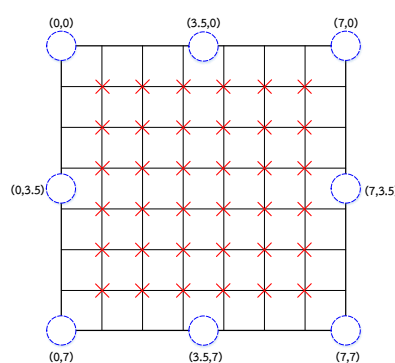
ภาพที่ 4.12 ลักษณะการวางของตัวรับสัญญาณ

จากภาพที่ 4.12 ลักษณะการของตัวรับสัญญาณ วางตัวรับสัญญาณสูงจากพื้น 1 เมตร ลักษณะของสายอากาศของตัวรับสัญญาณอยู่ในแนวตั้งและหันหน้าของสายอากาศขนานกับเส้นขอบของพื้นที่การทดลองโดยอ้างอิงจากตัวส่งสัญญาณที่ 0

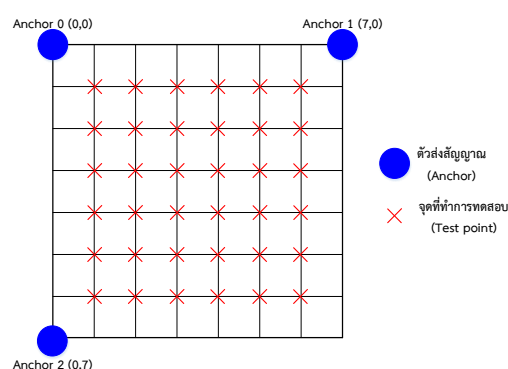
4.3.3 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง มีทั้งหมด 24 วิธี แสดงดังตารางที่ 4.5 ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ ขนาดพื้นที่การทดลอง เท่ากับ 7×7 เมตร ทำการทดลองภายในพื้นที่การทดลองทั้งหมด 36 จุด

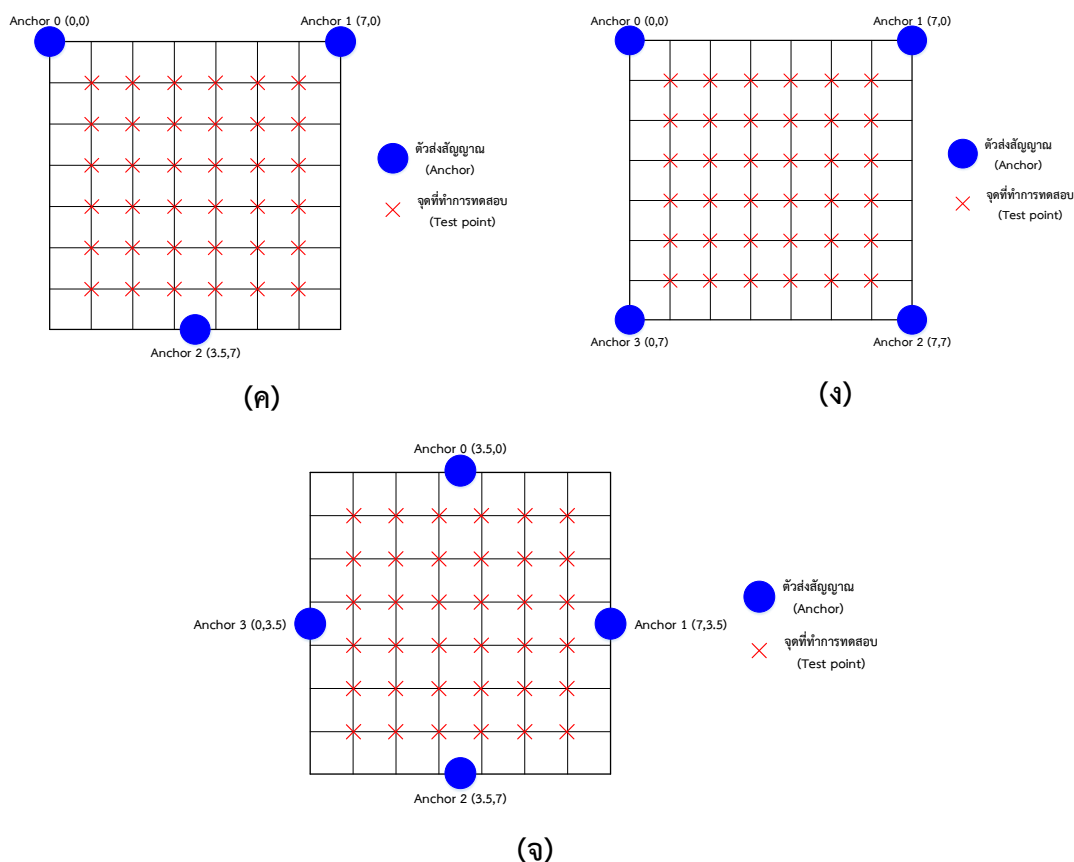
ภาพที่ 4.13 (ก) รูปแบบที่สามารถวางตัวส่งสัญญาณได้มีทั้งหมด 8 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่ง (0,0) (3.5,0) (7,0) (0,3.5) (7,3.5) (0,7) (3.5,7) และ (7,7) โดยแบ่งการวางตำแหน่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ ภาพที่ 4.13 (ข) รูปแบบตัวส่งสัญญาณ 3 ตัววางที่มุม ตัวส่งสัญญาณที่ 0 วางที่พิกัด (0,0) ตัวส่งสัญญาณที่ 1 วางที่พิกัด (7,0) และตัวส่งสัญญาณที่ 2 วางที่พิกัด (0,7) ภาพที่ 4.13 (ค) จำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัวไม่วางที่มุม ทำการวางตัวส่งสัญญาณที่ 0 และตัวส่งสัญญาณที่ 1 ไว้ที่มุมขอบด้านใดด้านหนึ่งของขนาดพื้นที่การทดลองแต่วางตัวส่งสัญญาณที่ 2 ไว้กึ่งกลางของขอบอีกด้านหนึ่ง ดังนั้นตัวส่งสัญญาณที่ 0 วางที่พิกัด (0,0) ตัวส่งสัญญาณที่ 1 วางที่พิกัด (7,0) และตัวส่งสัญญาณที่ 2 วางที่พิกัด (3.5,7) ภาพที่ 4.13 (ง) จำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัววางที่มุม ตัวส่งสัญญาณที่ 0 วางที่พิกัด (0,0) ตัวส่งสัญญาณที่ 1 วางที่พิกัด (7,0) ตัวส่งสัญญาณที่ 2 วางที่พิกัด (7,7) และตัวส่งสัญญาณที่ 3 วางที่พิกัด (0,7) ภาพที่ 4.13 (จ) จำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัวไม่วางที่มุม ตัวส่งสัญญาณที่ 0 วางที่พิกัด (3.5,0) ตัวส่งสัญญาณที่ 1 วางที่พิกัด (7,3.5) ตัวส่งสัญญาณที่ 2 วางที่พิกัด (3.5,7) และตัวส่งสัญญาณที่ 3 วางที่พิกัด (0,3.5)



(ก)



(ข)



ภาพที่ 4.13 (ก) รูปแบบทั้งหมดที่สามารถวางตัวส่งสัญญาณได้ รูปแบบตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว
(ข) วางที่มุม (ค) ไม่วางที่มุม และรูปแบบตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว (ง) วางที่มุม
(จ) ไม่วางที่มุม

วางตัวรับสัญญาณตามจุดทดสอบต่าง ๆ ภายในโครงข่ายที่ทำการทดลองซึ่งแต่ละจุดทดสอบห่างกัน 1 เมตร ดังนั้นมีจุดทดสอบทั้งหมด 36 จุด ตั้งแต่พิกัด (1,1), (2,1), (3,1), ... , (6,6) ในแต่ละจุดทดสอบเก็บพิกัดที่ได้จากการประมาณตำแหน่งโดยโปรแกรมคิวท์ จำนวน 10 ค่า หาค่าเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งและคำนวณหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งตามสมการที่ 2.15 จากนั้นนำค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนทั้งหมดในแต่ละวิธีไปวิเคราะห์หาค่าทางสถิติเพื่อหาวิธีการที่ดีที่สุดในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร

ผลการทดลองทั้ง 24 วิธี แสดงในภาคผนวก ก ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง ซึ่งทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะมีผลต่อความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในแต่ละวิธีของการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในแต่ละวิธีการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง

วิธีการทดลอง	ความสูงของตัวส่งสัญญาณ (เมตร)			ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ		รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณ		จำนวนของตัวส่งสัญญาณ (ตัว)		ค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)
	0.5	1	1.5	แนวตั้ง	แนวนอน	วางที่มุม	ไม่วางที่มุม	3	4	
1	✓			✓		✓		✓		0.13150
2	✓			✓		✓			✓	0.10152
3	✓			✓			✓	✓		0.18550
4	✓			✓			✓		✓	0.15834
5	✓				✓	✓		✓		0.30040
6	✓				✓	✓			✓	0.21167
7	✓				✓		✓	✓		0.22141
8	✓				✓		✓		✓	0.28244
9		✓		✓		✓		✓		0.12273
10		✓		✓		✓			✓	0.14553
11		✓		✓			✓	✓		0.18605
12		✓		✓			✓		✓	0.15338
13		✓			✓	✓		✓		0.28668
14		✓			✓	✓			✓	0.30131
15		✓			✓		✓	✓		0.30684
16		✓			✓		✓		✓	0.30815
17			✓	✓		✓		✓		0.14083
18			✓	✓		✓			✓	0.19869
19			✓	✓			✓	✓		0.18526
20			✓	✓			✓		✓	0.17263
21			✓		✓	✓		✓		0.32304
22			✓		✓	✓			✓	0.29460
23			✓		✓		✓	✓		0.25230
24			✓		✓		✓		✓	0.32287

จากตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในแต่ละวิธีการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งมีค่าไม่เกิน 0.32304 เมตร และวิธีการทดลองที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.10152 เมตร

4.3.4 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง

หลังจากได้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในแต่ละวิธี จากนั้นนำค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสแตทกราฟิก สตราตัส ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบหลายทิศทาง โดยกำหนดค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซนต์ พบว่าลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณมีผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ($P\text{-Value} < 0.05$) เนื่องจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวส่งสัญญาณเป็นแบบรอบทิศทางที่มีการแพร่กระจายรอบตัวเมื่อสายอากาศอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณที่วางในลักษณะแนวตั้งดีกว่าตัวส่งสัญญาณที่วางในลักษณะแนวนอนอย่างมีนัยสำคัญ ความสูงของตัวส่งสัญญาณไม่มีผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 กล่าวได้ว่าตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณสามารถทำงานได้ดีโดยที่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ความสูงต่างกันไม่เกิน ± 0.5 เมตร รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่มีผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ผู้ใช้งานสามารถเลือกวางตัวส่งสัญญาณไว้ที่มุมของพื้นที่การทดลองหรือไม่วางที่มุมของพื้นที่การทดลองก็ได้ตามความเหมาะสมของพื้นที่การทดลอง เช่น บริเวณมุมของพื้นที่การทดลองอาจมีสิ่งกีดขวางซึ่งทำให้ไม่สามารถวางตัวส่งสัญญาณได้ ผู้ใช้งานสามารถเลือกวางตัวส่งสัญญาณไว้บริเวณอื่นได้ ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนในทางสถิติไม่แตกต่างกัน จำนวนของตัวส่งสัญญาณไม่มีผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 เนื่องจากจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว และ 4 ตัว ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติถึงแม้ว่าจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว มีค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งน้อยกว่าจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว แต่ในทางสถิติไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนตัวส่งสัญญาณจาก 3 ตัว เป็น 4 ตัว ก็สามารถระบุตำแหน่งได้ดีพอสมควร ซึ่งทำให้ประหยัดงบประมาณในการติดตั้งระบบการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Height	0.00592812	2	0.00296406	2.65	0.12430
B:Orientation	0.0975056	1	0.0975056	87.27	0.00000*
C:Layout	0.00130051	1	0.00130051	1.16	0.30870
D:Number	3.07E-06	1	3.07E-06	0	0.95930
INTERACTIONS					
AB	0.001565	2	0.0007825	0.7	0.5216
AC	0.0012926	2	0.0006463	0.58	0.5803
AD	0.00185523	2	0.00092762	0.83	0.4668
BC	0.0020916	1	0.0020916	1.87	0.2044
BD	0.00011332	1	0.00011332	0.1	0.7574
CD	0.00052556	1	0.00052556	0.47	0.5101
RESIDUAL	0.0100557	9	0.00111731		
TOTAL (CORRECTED)	0.122236	23			

หมายเหตุ: * หมายถึง ค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 (มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05)

4.3.5 การทดลองวัดความสูงที่ระดับต่าง ๆ

จากการทดลองและการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง ขนาดพื้นที่การทดลอง 7×7 เมตร พบว่าวิธีการทดลองที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.10152 เมตร ในการทดลองนี้ต้องการศึกษาความแตกต่างความสูงของตัวส่งสัญญาณในระดับต่าง ๆ ที่มีความสูงแตกต่างกันมากกว่า 1 เมตร แบ่งได้เป็น 2 ระดับ ได้แก่ ความสูงระดับที่ 1 (ระดับต่ำ) ประกอบด้วยความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตรและ 1 เมตร ความสูงระดับที่ 2 (ระดับสูง) ประกอบด้วยความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1.5 เมตร 2 เมตร และ 2.5 เมตร ทำการทดลองวัดความสูงที่ระดับต่าง ๆ โดย

กำหนดพารามิเตอร์ที่เหลือให้คงที่ ได้แก่ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ทดลองในขนาดพื้นที่ 7×7 เมตร ดังนั้นจุดที่ทำการทดสอบมีทั้งหมด 36 จุด เก็บผลการทดลองจุดละ 10 ค่า เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละตำแหน่ง ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับต่าง ๆ แสดงดังภาคผนวก ข

เมื่อได้ค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละตำแหน่งของทุกวิธีการทดลอง จากนั้นนำข้อมูลแต่ละวิธีไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติแบบ T-test ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของชุดข้อมูลหรือกลุ่มตัวอย่างจำนวน 2 กลุ่มที่เป็นอิสระจากกัน กำหนดค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซนต์ ผลการวิเคราะห์ความสูงที่ระดับต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.8

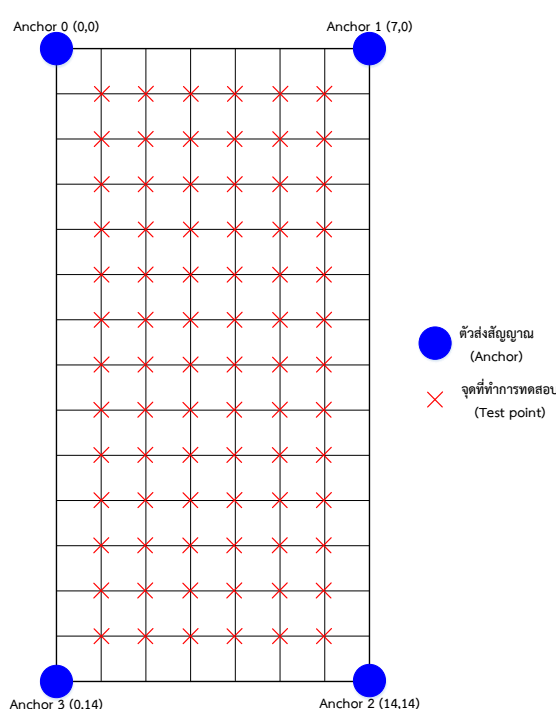
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความสูงที่ระดับต่าง ๆ

ความสูงระดับที่ 2 (ระดับสูง) ความสูง ระดับที่ 1 (ระดับต่ำ)	1.5 เมตร	2 เมตร	2.5 เมตร
	P-Value	P-Value	P-Value
0.5 เมตร	0.00653	2.94617×10^{-5}	9.27913×10^{-6}
1 เมตร		0.01581	0.00443

จากตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความสูงที่ระดับต่าง ๆ โดยใช้การวิเคราะห์แบบ T-test การเปรียบเทียบความสูงที่ระดับ 0.5 เมตร กับ 1.5 เมตรมีค่า P-Value เท่ากับ 0.00653 การเปรียบเทียบความสูงที่ระดับ 0.5 เมตร กับ 2 เมตรมีค่า P-Value เท่ากับ 2.94617×10^{-5} การเปรียบเทียบความสูงที่ระดับ 0.5 เมตร กับ 2.5 เมตรมีค่า P-Value เท่ากับ 9.27913×10^{-6} การเปรียบเทียบความสูงที่ระดับ 1 เมตร กับ 2 เมตรมีค่า P-Value เท่ากับ 0.01581 และการเปรียบเทียบความสูงที่ระดับ 1 เมตร กับ 2.5 เมตรมีค่า P-Value เท่ากับ 0.00443 พบว่าการเปรียบเทียบความแตกต่างของกลุ่มข้อมูลแต่ละกลุ่มมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 หมายถึงความแตกต่างของกลุ่มข้อมูลแต่ละกลุ่มมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ดังนั้นตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณควรวางในระยะความสูงที่แตกต่างกันไม่เกิน ± 0.5 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่ตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณสามารถทำงานได้ดีโดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.3.6 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น

จากการทดลองการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง พบว่าวิธีการทดลองที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.10152 เมตร นำวิธีการทดลองดังกล่าวทดลองในพื้นที่การทดลองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเท่ากับ 7×14 เมตร ดังนั้นมีจุดสอบทั้งหมด 78 จุด แสดงดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 การวางตัวส่งสัญญาณและจุดทดสอบในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น

จากภาพที่ 4.14 การวางตัวส่งสัญญาณและจุดทดสอบในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น วางตัวส่งสัญญาณที่ 0 1 2 และ 3 ที่พิกัด (0,0), (0,7), (14,14) และ (0,14) ตามลำดับ ตัวรับสัญญาณวางที่จุดทดสอบในแต่ละจุดห่างกัน 1 เมตร ดังนั้นมีจุดทดสอบทั้งหมด 78 จุด ตั้งแต่ (1,1), (2,1), (3,1), ... , (13,13) ในแต่ละจุดทดสอบเก็บพิกัดที่ได้จากการประมาณตำแหน่งจำนวน 10 ค่า จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง

ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น แสดงในภาคผนวก ค ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น วิธีการทดลองที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น วิธีการทดลองที่ 2

วิธีการทดลอง	ความสูงของตัวส่งสัญญาณ (เมตร)			ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ		รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณ		จำนวนของตัวส่งสัญญาณ (ตัว)		ค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)
	0.5	1	1.5	แนวตั้ง	แนวนอน	วางที่มุม	ไม่วางที่มุม	3	4	
2*	✓			✓		✓			✓	0.12147

หมายเหตุ: 2* หมายถึง วิธีการทดลองที่ 2 ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว

4.3.7 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างการทดลองในขนาดพื้นที่ 7×7 เมตรและ 7×14 เมตร

จากการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง ขนาดพื้นที่การทดลองเท่ากับ 7×7 เมตร โดยทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์ ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ ทั้งหมด 24 วิธี พบว่าวิธีการทดลองที่ 2 ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.10152 เมตร จากนั้นนำวิธีที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังกล่าวไปทำการทดลองในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้นเท่ากับ 7×14 เมตร พบว่ามีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.12147 เมตร จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มขนาดพื้นที่การทดลองให้ใหญ่ขึ้นเป็น 2 เท่า แต่ค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งเท่ากับ 0.01995 เมตร ดังนั้นการเพิ่มขนาดพื้นที่การทดลองจึงไม่มีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งและระบบยังสามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำในขนาดพื้นที่การทดลองที่ใหญ่ขึ้น การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างการทดลองในขนาดพื้นที่ 7×7 เมตร และ 7×14 เมตร แสดงดังตารางที่ 4.10

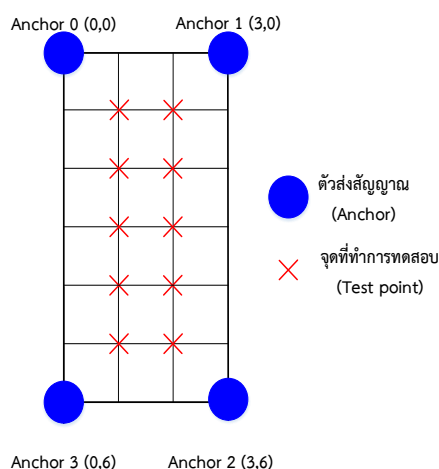
ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างการทดลองในขนาดพื้นที่ 7×7 เมตร และ 7×14 เมตร

วิธีการทดลองที่ 2*	ขนาดพื้นที่ทำการทดลอง		ค่าความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง
	7×7 เมตร	7×14 เมตร	
ความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง (เมตร)	0.10152	0.12147	0.01995

หมายเหตุ: วิธีการทดลองที่ 2* หมายถึง วิธีที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว

4.4 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง

จากการทดลองการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง พบว่าวิธีการทดลองที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.10152 เมตร ดังนั้นจึงนำวิธีการทดลองดังกล่าวไปทดลองในสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง ทำการทดลองที่ตึก CLB ชั้น 2 ห้องพักนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ขนาดพื้นที่ทำการทดลองเท่ากับ 3×6 เมตร ตัวส่งสัญญาณที่ 0 1 2 และ 3 วางที่พิกัด (0,0), (0,3), (3,6) และ (0,6) ตามลำดับ ทำการทดลองการระบุตำแหน่งภายในพื้นที่ทำการทดลอง โดยแต่ละจุดทำการทดสอบห่างกัน 1 เมตร ดังนั้นมีจุดทดสอบทั้งหมด 10 จุด ตั้งแต่ตำแหน่ง (1,1), (1,2), (1,3), ..., (2,5) เก็บผลการทดลองจุดละ 10 ค่า จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งการวางตัวส่งสัญญาณและจุดทดสอบในขนาดพื้นที่ 3×6 เมตร แสดงภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 การวางตัวส่งสัญญาณและจุดทดสอบในสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง

4.4.1 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวางของวิธีการทดลองที่ 2 และวิธีการทดลองที่ 10

ทำการทดลองตามวิธีการทดลองที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว เนื่องจากเป็นวิธีการที่ได้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในการระบุตำแหน่งภายในอาคารในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง จากนั้นทำการทดลองตามวิธีการทดลองที่ 10 ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว เพื่อต้องการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณเหมือนกับวิธีการทดลองที่ 2 แต่พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณแตกต่างกัน ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวางของวิธีการทดลองที่ 2 และวิธีการทดลองที่ 10 แสดงในภาคผนวก ง

การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวางของวิธีการทดลองที่ 2 และวิธีการทดลองที่ 10 พบว่าวิธีการทดลองที่ 2 มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.25771 เมตร และวิธีการทดลองที่ 10 มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.16922 เมตร ความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งของ 2 วิธี มีค่าเท่ากับ 0.08849 เมตร เนื่องจากสถานที่ทำการทดลองเป็นสถานที่ที่มีสิ่งกีดขวาง เช่น โต๊ะ เก้าอี้ ชั้นวางหนังสือ เป็นต้น ในวิธีการทดลองที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ตัวส่งสัญญาณไม่สามารถส่งสัญญาณไปที่ตัวรับสัญญาณได้

โดยตรง ซึ่งตัวรับสัญญาณมีความสูงอยู่ที่ระดับ 1 เมตร ดังนั้นการส่งสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณอาจมีการชนกับสิ่งกีดขวางเหล่านั้นทำให้เกิดการสะท้อน หักเห หรือการเลี้ยวเบนของสัญญาณและอาจเกิดสัญญาณที่มาจากหลายทิศทาง แต่ในวิธีการทดลองที่ 10 ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ดังนั้นตัวส่งสัญญาณจึงสามารถส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณได้โดยตรงหรือสัญญาณอาจมีการชนกับสิ่งกีดขวางเหล่านั้นแต่มีผลกระทบน้อยกว่าวิธีการทดลองที่ 2 ดังนั้นในการวางความสูงของตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณต้องศึกษาสภาพแวดล้อมของพื้นที่ที่ทำการทดลองนั้น ๆ โดยการวางอุปกรณ์รับส่งสัญญาณให้พ้นจากสิ่งกีดขวางให้มากที่สุด เพื่อให้การรับส่งสัญญาณมีความแม่นยำมากขึ้น การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวางของวิธีการทดลองที่ 2 และวิธีการทดลองที่ 10 แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวางของวิธีการทดลองที่ 2 และวิธีการทดลองที่ 10

	วิธีการทดลองที่		ค่าความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง (เมตร)
	2*	10**	
ความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง (เมตร)	0.25771	0.16922	0.08849

หมายเหตุ: 2* หมายถึง วิธีการทดลองที่ 2 ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว

10** หมายถึง วิธีการทดลองที่ 10 ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว

4.5 การทดลองการใช้งานจริง

การทดลองนี้เป็นการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยการนำตัวรับสัญญาณใส่ไว้ในกระเป๋าเสื้อและกระเป๋ากางเกงของผู้ใช้งาน ความสูงของผู้ใช้งานเท่ากับ 1.66 เมตร ความสูงของตัวรับสัญญาณที่ถูกใส่ไว้ในกระเป๋าเสื้อเท่ากับ 1.25 เมตร และความสูงของตัวรับสัญญาณที่ถูกใส่ไว้ในกระเป๋ากางเกงเท่ากับ 0.85 เมตร ดังนั้นความสูงของตัวรับสัญญาณอยู่ในช่วง 0.85 -

1.25 เมตร จึงเลือกวางตัวส่งสัญญาณที่ระดับความสูง 1 เมตร เนื่องจากอยู่ในระยะทำงาน ± 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณวางในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ทำการทดลองในขนาดพื้นที่การทดลองเท่ากับ 7×7 เมตร จุดที่ทำการทดสอบทั้งหมด 36 จุด เก็บผลการทดลอง 10 ค่า ในแต่ละจุด เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 6 กรณี ได้แก่ ตัวรับสัญญาณปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋าเสื้อ ตัวรับสัญญาณปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋ากางเกง ตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋าเสื้อ ตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋ากางเกง ตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศใส่ในกระเป๋าเสื้อและตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศใส่ในกระเป๋ากางเกง รูปแบบของกล่องบรรจุตัวรับสัญญาณ แบ่งได้ 2 กรณี ได้แก่ กล่องบรรจุตัวรับสัญญาณที่ปิดสนิท แสดงดังภาพที่ 4.16 (ก) และกล่องบรรจุตัวรับสัญญาณที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศ แสดงดังภาพที่ 4.16 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.16 กล่องบรรจุตัวรับสัญญาณ (ก) ที่ปิดสนิท (ข) ที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศ

ผลการทดลองการใช้งานจริงทั้ง 6 กรณี แสดงในภาคผนวก จ

4.5.1 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในแต่ละวิธีของการทดลองการใช้งานจริง

จากการทดลองการใช้งานจริง ขนาดพื้นที่การทดลองเท่ากับ 7×7 เมตร มีจุดทดสอบทั้งหมด 36 จุด การทดสอบมีทั้งหมด 6 กรณี พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.24441 เมตร และวิธีที่ให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดคือวิธีการทดลองที่ตัวรับสัญญาณอยู่ในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋ากางเกงมีค่าเท่ากับ 0.18968 เมตร เนื่องจากร่างกายของมนุษย์มีน้ำเป็นองค์ประกอบซึ่งมีความเป็นค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric) ถ้าค่าไดอิเล็กทริกสูงจะบ่งบอกถึงสภาพความเป็นขั้ว (Polarity) หรือมีความ

เป็นฉนวน ในกรณีที่ตัวรับสัญญาณปราศจากกล่องบรรจุ สายอากาศของตัวรับสัญญาณมีการสัมผัสกับร่างกายของมนุษย์ได้โดยตรง ดังนั้นการแพร่กระจายคลื่นของการรับส่งสัญญาณจึงไม่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดี ในทางตรงกันข้ามกรณีที่ตัวรับสัญญาณถูกบรรจุในกล่องบรรจุภัณฑ์ สายอากาศของตัวรับสัญญาณไม่สามารถสัมผัสกับร่างกายของมนุษย์ได้โดยตรง จึงทำให้สัญญาณแพร่กระจายได้ดีกว่าและส่งผลไปยังการระบุตำแหน่งที่ดีกว่าด้วย อีกทั้งกล่องบรรจุที่ใช้เป็นกล่องพลาสติก คลื่นที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศจึงสามารถแพร่กระจายได้โดยไม่มีผลกระทบใด ๆ สำหรับการนำไปใช้งานจริงจึงควรเลือกใช้อุปกรณ์ที่บรรจุในกล่องที่ปิดสนิท เพื่อความสะดวกในการใช้งานและพกพา ส่วนตำแหน่งในการวางอุปกรณ์สามารถวางได้ทั้งในกระเป๋าเสื้อ กระเป๋ากางเกงหรืออุปกรณ์บรรจุต่าง ๆ ที่อยู่ในระดับความสูง ± 0.5 เมตร จากตัวส่งสัญญาณเพื่อประสิทธิภาพในการทำงานและการรับส่งสัญญาณที่ดี ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในแต่ละวิธีของการทดลองการใช้งานจริง แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในแต่ละวิธีของการทดลองการใช้งานจริง

วิธีการทดลอง		ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (เมตร)
ตัวรับสัญญาณปราศจากกล่องบรรจุ	กระเป๋าเสื้อ	0.24441
	กระเป๋ากางเกง	0.23643
ตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิท	กระเป๋าเสื้อ	0.20593
	กระเป๋ากางเกง	0.18968
ตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศ	กระเป๋าเสื้อ	0.20453
	กระเป๋ากางเกง	0.19501

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีอัลตราไวต์แบนด์และทำการออกแบบการทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในระบบสามารถสรุปผลการทดลองทั้งหมดได้ดังนี้

5.1.1 การออกแบบและสร้างระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีอัลตราไวต์แบนด์

แบนด์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการออกแบบและสร้างระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีอัลตราไวต์แบนด์ โดยใช้โมดูล DWM1000 เป็นทั้งตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ โดยมีตัวส่งสัญญาณทั้งหมด 4 ตัวและตัวรับสัญญาณ 1 ตัว ตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณและทำการประมาณระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณโดยใช้ค่าเวลาในการเดินทาง วิธีทฤษฎีเร็นจ์อิงแบบสมมาตร จากนั้นตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวทำการส่งข้อมูลระยะทางที่ได้ไปยังตัวส่งสัญญาณที่ 0 ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ตัวส่งสัญญาณที่ 0 ส่งข้อมูลระยะทางทั้งหมดไปยังโปรแกรมคิวท์เพื่อทำการเลือกข้อมูลของระยะทางที่ดีที่สุดของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว นำมาประมวลผลเพื่อทำการระบุตำแหน่งโดยวิธีสามเหลี่ยมระยะและแสดงผลผ่านหน้าจอแสดงผลกราฟิกแบบเรียลไทม์สามารถประยุกต์ใช้งานได้จริง เช่น การระบุตำแหน่งของผู้ป่วยในโรงพยาบาล การระบุตำแหน่งของคนในอาคาร การระบุตำแหน่งของผู้ประสบภัยจากเหตุการณ์ภัยพิบัติ เป็นต้น

5.1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศและระยะการทำงานของบอร์ดอัลตราไวต์แบนด์

ไวต์แบนด์

5.1.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศของบอร์ดอัลตราไวต์แบนด์ พบว่าลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายเลขแปด ที่มีการแพร่กระจายคลื่นซึ่งมีทิศทางที่มุม 0 องศา และ 180 องศา ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กมีลักษณะคล้ายวงกลม ซึ่งมีการแพร่กระจายคลื่นทุกทิศทางเท่ากันรอบมุม 360 องศา และมีลักษณะใกล้เคียงกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในอุดมคติที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง

5.1.2.2 ระยะการทำงานของบอร์ดอัลตราไวต์แบนด์สามารถรับส่งสัญญาณได้ประมาณ

105 เมตร

5.1.3 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการระบุตำแหน่งภายในอาคารที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง

จากการทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการระบุตำแหน่งภายในอาคารที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง ขนาดพื้นที่การทดลองเท่ากับ 7×7 เมตร พบว่าวิธีที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในการทดลองประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.10152 เมตร อีกทั้งยังพบว่าลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณมีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ส่วนความสูงของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณไม่มีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

5.1.4 การวัดความสูงที่ระดับต่าง ๆ

จากผลการทดลองการวัดความสูงที่ระดับต่าง ๆ พบว่าการวางตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณควรวางในระยะความสูงแตกต่างกันไม่เกิน ± 0.5 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่ตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณสามารถทำงานได้ดีโดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณคำนวณตามแนวระนาบ (แกน x และแกน y) ตามภาพที่ 2.7

5.1.5 การระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น

จากผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้นเท่ากับ 7×14 เมตร โดยใช้พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งเท่ากับ 0.12147 เมตร มีค่าความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งกับขนาดพื้นที่การทดลอง 7×7 เมตร เพียง 0.01995 เมตร ซึ่งการเพิ่มขนาดพื้นที่การทดลองให้ใหญ่ขึ้นเป็น 2 เท่าของขนาดพื้นที่การทดลองเดิม พบว่าระบบยังสามารถทำงานได้ดีและระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ

5.1.6 การระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง

จากผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง ขนาดพื้นที่การทดลองเท่ากับ 3×6 เมตร โดยใช้พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งเท่ากับ 0.25771 เมตร จากนั้นเปลี่ยนพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณเป็น 1 เมตร พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งเท่ากับ 0.16922 เมตร ซึ่งตัวส่งสัญญาณที่ระดับความสูง 1 เมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าตัวส่งสัญญาณที่ระดับความสูง 0.5 เมตร เท่ากับ 0.08849 เมตร เนื่องจากในพื้นที่การทดลอง

จริงมีสิ่งกีดขวาง เช่น โตะ แก้ว อุปกรณ์เฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ ซึ่งมีความสูงประมาณ 0.8 เมตร ดังนั้นในการวางอุปกรณ์รับส่งสัญญาณควรศึกษาสภาพแวดล้อมของพื้นที่การทดลองและควรวางให้พ้นจากสิ่งกีดขวางให้มากที่สุดเพื่อการรับส่งสัญญาณที่ดี

5.1.7 การใช้งานจริง

จากผลการทดลองการใช้งานจริงพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.18968 เมตร อุปกรณ์รับส่งสัญญาณควรบรรจุในอุปกรณ์บรรจุภัณฑ์เพื่อความสะดวกสบายในการนำไปใช้งานจริงและเพื่อลดการสัมผัสของตัวอุปกรณ์กับร่างกายมนุษย์เนื่องจากร่างกายของมนุษย์มีความร้อนซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เกิดความร้อนและรับสัญญาณได้ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง ส่วนตำแหน่งในการวางอุปกรณ์รับส่งสัญญาณสามารถวางได้ทั้งในกระเป๋าเสื้อและกระเป๋ากางเกงที่อยู่ในระดับความสูง ± 0.5 เมตร จากตัวส่งสัญญาณเพื่อประสิทธิภาพในการทำงานและการรับส่งสัญญาณที่ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้พารามิเตอร์ที่คาดว่าจะมีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณ รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ ผลการทดลองพบว่ามีเพียงลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณที่มีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ซึ่งอาจมีการเพิ่มจำนวนและระดับของพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะมีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งให้มากขึ้น

5.2.2 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง ทำการทดลองในขนาดพื้นที่การทดลองเท่ากับ 3×6 เมตร อาจมีการทำการทดลองในขนาดพื้นที่ที่ใหญ่ขึ้น

5.2.3 การทดลองการใช้งานจริงทำการทดลองในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง ควรทำการทดลองการใช้งานจริงในสถานที่และสภาพแวดล้อมที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง เพื่อศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hardesty, L. (2018). “Location detection when GPS doesn’t work”, **MIT News on campus and around the world**. <http://news.mit.edu/2018/wireless-location-detection-gps-0123>. January 31, 2018.
- [2] Liu, H., Darabi H., Banerjee P. and Liu J. “Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems”, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)**. 37(6): 1067-1080; 22 October, 2007.
- [3] Santos, F. “Localization in Wireless Sensor Networks”, **ACM Journal**. 5: 1-19; November, 2008.
- [4] Utter, M. **Indoor Positioning using Ultra-wideband Technology**. Master’s Thesis: Uppsala Universitet, 2015.
- [5] Nguyen, C. and Miao, M. (2017) “Fundamentals of UWB Impulse Systems”, **Chapter 2**. https://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783319531052-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1603341-p180611673. January 31, 2018.
- [6] UWB. (2006). “เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์”, **Uwb**. <http://suthisavit1512.blogspot.com>. 20 กุมภาพันธ์, 2560.
- [7] decaWave. (2015). “DWM1000 IEEE 802.15.4-2011 UWB Transceiver Module”, **DWM1000 Datasheet**. <https://www.decawave.com/sites/default/files/resources/dwm1000-datasheet-v1.3.pdf>. February 20, 2018.
- [8] Digi-Key. (2018). “Decawave Limited DWM1000”, **All Products**. <https://www.digikey.com/product-detail/en/decawave-limited/DWM1000/1479-1002-1-ND/4805335>. May 18, 2018.
- [9] Electronic Design. (2018). “What’s The Difference Between Measuring Location By UWB, Wi-Fi, and Bluetooth?”, **ELECTRONIC DESIGN**. <http://www.electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-measuring-location-uwbi-fi-and-bluetooth>. May 16, 2018.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียงกิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ. (2554). “คู่มือการตรวจวัดระดับการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสถานีวิทยุคมนาคม (EMF Measurement Procedure for Base Station)”, **EMF Guideline_Final**. <http://standard1.nbt.go.th/getattachment/a2c9541d-9ce6-4c4c-ad15-13477c46d996/b1.aspx>. 4 เมษายน, 2561
- [11] ขวลิต เกตตรา. การออกแบบสายอากาศไดโพลร่วมกับช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับอาร์เอฟไอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557.
- [12] Jiang, Y. and Leung, V. C.M. “An Asymmetric Double Sided Two-Way Ranging for Crystal Offset”, In **International Symposium on Signals, Systems and Electronics**. p.525-528. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2007.
- [13] Chagas, S. H., Martins, J. B. and de Oliveira, L. L. “An Approach to Localization Scheme of Wireless Sensor Network Based on Artificial Neural Network and Genetic Algorithm”, In **IEEE International New Circuits and Systems Conference**. p.137-140. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012.
- [14] สุวดี นำพาเจริญ และชลธิชา จำรัสพร. (2561). “8 เคล็ดลับในการทำ DOE ให้ออกมาดีเลิศ (8 Expert Tips for Excellent Designed Experiments (DOE))”, **SOLUTION CENTER**. <https://www.solutioncenterminitab.com/blog/common-assumptions-about-data-part-3-stability-and-measurement-systems>. 7 พฤษภาคม, 2561.
- [15] สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. “บทที่ 2 การทบทวนความรู้ ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง”, การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวดตอบสนองของกระบวนการติดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์. <http://digi.library.tu.ac.th/thesis/en/0510/03chapter2.pdf>. 10 มีนาคม, 2560.
- [16] มลิวลย์ ผิวคราม. (2550) “ความหมายของสถิติ”, **Research in education วิชาการวิจัยทางการศึกษา**. <https://sites.google.com/site/wichakarwicaythangkarsuksa/home>. 23 เมษายน, 2561.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [17] ฉลอง สีแก้วสัว. (2555) “ความหมายและข้อกำหนดของ ANOVA”, **Statistics**.
<https://sites.google.com/site/mystatistics01/chapter5/anova>. 23 เมษายน, 2561.
- [18] IWCDWAFI. (2559). “p นั้นสำคัญไฉน: ความไม่รู้เท่าทันอัตราพื้นฐาน”, **Medium**.
<https://medium.com/@iwishcognitivedissonance/p-value>. 24 เมษายน, 2561.
- [19] Pasatorn Puratep. (2558). “ระดับนัยสำคัญ (Level of significance)”, **Theory Plaza**
<http://theoryplaza.blogspot.com/2015/04/level-of-significance.html>.
 24 เมษายน, 2561.
- [20] Fofana, N. I., Van Den Bossche, A., Dalce, R. and Val, T. (2016) “An Original Correction Method for Indoor Ultra Wide Band Ranging-based Localisation System”, **CORNELL UNIVERSITY LIBRARY**. <https://arxiv.org/abs/1603.06736>. April 3, 2018.
- [21] Jiménez, A.R. and Seco, F. “Finding objects using UWB or BLE localization technology: A museum-like use case”, In **International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)**. p.1-8, Sapporo, Japan: IEEE, 2017.
- [22] Yang, G., Zhao, L., Dai, Y. and Xu, Y. “A KFL-TOA UWB Indoor Positioning Method for Complex Environment”, In **Chinese Automation Congress (CAC)**. p.3010-3014. Jinan, China: IEEE, 2017.
- [23] Meghani, S. K., Asif, M. and Amir, S. “Localization of WSN node based on Time of Arrival using Ultra Wide Band Spectrum”. In **Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)**. p.1-4, Cocoa Beach, FL, USA: IEEE, 2012.
- [24] Ritesh23, (2017). “DWM1000: Network ID and Device Address”, **thotro/arduino-dw1000**. <https://github.com/thotro/arduino-dw1000/issues/246>. April 25, 2018.
- [25] Decawave, (2018). “ScenSor DW1000”, **Decawave**. <https://www.decawave.com/products/dw1000>. May 31, 2018.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [26] STMICROELECTRONICS (SHANGHAI) CO., LTD. (2018). “CooCox CoIDE, a free and highly-integrated software development environment for ARM Cortex MCUs”, **CoIDE**. <http://www.st.com/en/development-tools/coide.html>. April 25, 2018.
- [27] ScienceProg. (2014). “Setting up CoIDE with GNU tools”, **ScienceProg**. <https://scienceprog.com/setting-up-coide-with-gnu-tools>. April 24, 2018.
- [28] thaieasyelec. (2555). “Qt คืออะไร”, **Qt คืออะไร** <https://www.thaieasyelec.com/article-wiki/embedded-electronics-application/what-is-qt.html>. 25 เมษายน, 2561.
- [29] gg1. (2014). “How to print output into QT Creator Application Output panel”, **xAppSoftware**. <http://www.xappsoftware.com/wordpress/2014/04/03/how-to-print-output-into-qt-creator-application-output-panel>. April 24, 2018.
- [30] Statgraphics Technologies, Inc. (2017). “Statgraphics stratus”, **Statgraphics18**. <http://www.statgraphics.com/stratus>. April 24, 2018.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง

ก.1 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 1

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 1 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 1

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.86900	0.75454	0.27823
1	2	0.87265	1.93756	0.14183
1	3	0.87717	2.96967	0.12652
1	4	0.89139	4.03151	0.11308
1	5	0.99664	5.08814	0.08820
1	6	0.91378	6.14418	0.16799
2	1	1.95373	0.94343	0.07308
2	2	1.94021	1.98108	0.06271
2	3	1.99393	3.01473	0.01593
2	4	2.01573	4.04621	0.04881
2	5	1.97242	5.06329	0.06904
2	6	1.91271	6.12704	0.15414
3	1	2.94517	0.81125	0.19656
3	2	3.00952	1.98766	0.01559
3	3	3.14123	2.97948	0.14271
3	4	3.03733	4.05739	0.06846
3	5	3.03138	5.17215	0.17499
3	6	2.94325	6.15038	0.16073
4	1	4.13740	0.90481	0.16715
4	2	4.14123	2.04311	0.14766
4	3	4.12260	2.96757	0.12682

ตารางที่ ก.1 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 1 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
4	4	4.11473	4.07652	0.13791
4	5	4.07067	5.09595	0.11917
4	6	3.96684	6.08256	0.08897
5	1	5.17465	1.01472	0.17527
5	2	5.16557	1.98596	0.16616
5	3	5.17235	3.00092	0.17235
5	4	5.14101	4.08149	0.16286
5	5	5.04528	5.09445	0.10474
5	6	5.01216	6.11885	0.11947
6	1	6.27557	1.01871	0.27620
6	2	6.22680	1.97641	0.22802
6	3	6.22537	3.02787	0.22709
6	4	6.08270	4.04034	0.09201
6	5	6.03253	5.03258	0.04604
6	6	5.97543	6.07361	0.07760
Average				0.13150

ก.2 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 2

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 2 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 2

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.86805	0.97828	0.13373
1	2	0.90966	2.05860	0.10769
1	3	0.91516	3.01872	0.08688
1	4	0.97371	4.02521	0.03642
1	5	0.95058	5.01910	0.05298
1	6	1.00219	5.95088	0.04917
2	1	1.94887	1.04294	0.06677
2	2	2.01047	2.05866	0.05959
2	3	1.95860	3.08870	0.09789
2	4	2.04045	4.02161	0.04586
2	5	1.97491	5.03227	0.04088
2	6	2.00721	5.98947	0.01276
3	1	2.99996	1.03532	0.03532
3	2	3.03771	1.99404	0.03818
3	3	2.98940	3.03685	0.03834
3	4	3.06822	4.03980	0.07898
3	5	3.05948	5.05600	0.08169
3	6	3.03343	5.99816	0.03348
4	1	4.08266	0.97880	0.08534
4	2	4.04912	2.01117	0.05037
4	3	4.07379	3.00245	0.07383
4	4	4.11466	4.05823	0.12860
4	5	4.07887	5.07851	0.11128
4	6	4.02629	6.06571	0.07077
5	1	5.17023	0.99941	0.17023
5	2	5.16617	1.97975	0.16740
5	3	5.11432	2.96833	0.11863

ตารางที่ ก.2 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 2 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
5	4	5.18985	4.08355	0.20742
5	5	5.07301	5.06056	0.09486
5	6	5.05850	6.10812	0.12293
6	1	6.22437	0.93117	0.23469
6	2	6.27833	1.97766	0.27923
6	3	6.18634	2.96700	0.18924
6	4	6.15592	4.04158	0.16137
6	5	6.08641	5.11534	0.14412
6	6	6.09842	6.11015	0.14771
Average				0.10152

ก.3 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 3

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 3 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้งรูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 3

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.93691	0.84211	0.17003
1	2	0.94716	1.98260	0.05563
1	3	0.95242	2.97653	0.05305
1	4	0.93222	4.09749	0.11874
1	5	0.94538	5.13012	0.14112
1	6	0.96437	6.09368	0.10023
2	1	2.03986	0.96812	0.05104

ตารางที่ ก.3 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 3 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
2	2	2.04431	2.04650	0.06423
2	3	2.07230	3.06270	0.09570
2	4	2.02373	4.08257	0.08591
2	5	2.07436	5.17745	0.19240
2	6	1.97201	6.05899	0.06529
3	1	3.15092	0.95122	0.15861
3	2	3.07800	2.05743	0.09686
3	3	3.13983	3.10547	0.17515
3	4	3.10443	4.14288	0.17698
3	5	3.11076	5.12783	0.16914
3	6	3.06649	6.18278	0.19450
4	1	4.16501	1.00959	0.16529
4	2	4.15647	1.98630	0.15707
4	3	4.19645	3.04907	0.20249
4	4	4.17470	4.17767	0.24917
4	5	4.16388	5.13683	0.21349
4	6	4.07066	6.22946	0.24009
5	1	5.26984	0.99158	0.26997
5	2	5.24080	1.84976	0.28383
5	3	5.24580	3.09788	0.26457
5	4	5.21233	3.98626	0.21277
5	5	5.19266	5.15959	0.25017
5	6	5.15045	6.23775	0.28135
6	1	6.35509	0.98921	0.35525
6	2	6.20712	2.01247	0.20750
6	3	6.34635	3.08504	0.35664
6	4	6.24468	4.13066	0.27738

ตารางที่ ก.3 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 3 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
6	5	6.19534	5.17679	0.26346
6	6	6.12164	6.23313	0.26296
Average				0.18550

ก.4 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 4

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 4 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 4

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	1.01187	0.85008	0.15039
1	2	1.08697	1.93623	0.10784
1	3	1.09563	2.96457	0.10198
1	4	0.99290	4.06769	0.06806
1	5	0.92617	5.08391	0.11177
1	6	0.92663	6.06366	0.09714
2	1	1.97659	0.93585	0.06829
2	2	2.02506	1.99742	0.02519
2	3	1.93299	3.02035	0.07003
2	4	1.92316	4.02469	0.08071
2	5	1.94704	5.14261	0.15213
2	6	1.81655	6.11909	0.21872
3	1	3.00999	0.87607	0.12434
3	2	3.00102	1.91790	0.08211

ตารางที่ ก.4 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 4 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
3	3	3.02897	2.99569	0.02929
3	4	2.96495	4.10981	0.11527
3	5	2.91563	5.16571	0.18595
3	6	2.76386	6.15760	0.28390
4	1	4.08241	0.84755	0.17330
4	2	4.03050	1.92922	0.07707
4	3	4.05415	2.96733	0.06324
4	4	3.93217	4.03792	0.07771
4	5	4.04523	5.09893	0.10878
4	6	3.78348	6.21238	0.30329
5	1	5.15365	0.93849	0.16551
5	2	5.15480	1.94449	0.16445
5	3	5.20676	2.98084	0.20765
5	4	5.12815	4.11722	0.17367
5	5	5.01863	5.13812	0.13937
5	6	4.91338	6.20711	0.22449
6	1	6.21051	1.07011	0.22188
6	2	6.38286	1.99744	0.38287
6	3	6.35282	3.07115	0.35992
6	4	6.26546	4.13421	0.29746
6	5	6.21887	5.19244	0.29144
6	6	6.04294	6.19030	0.19508
Average				0.15834

ก.5 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 5

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 5 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.5

ตารางที่ ก.5 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 5

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.90148	0.71009	0.30620
1	2	0.65451	1.93324	0.35188
1	3	0.96255	2.86401	0.14105
1	4	1.10472	4.25992	0.28022
1	5	1.33677	5.60273	0.69043
1	6	0.53186	6.48707	0.67557
2	1	1.75519	0.82730	0.29960
2	2	1.87494	1.88635	0.16899
2	3	2.23888	3.23311	0.33377
2	4	1.80040	4.12889	0.23760
2	5	2.00020	5.05364	0.05364
2	6	1.85549	6.30963	0.34169
3	1	3.06316	0.83941	0.17256
3	2	2.97472	1.79133	0.21020
3	3	3.12559	2.94830	0.13582
3	4	3.24460	4.21031	0.32258
3	5	3.21741	5.42280	0.47542
3	6	3.05616	6.27466	0.28034
4	1	3.87804	0.73245	0.29403
4	2	4.10901	1.92156	0.13430
4	3	3.91400	2.73498	0.27862

ตารางที่ ก.5 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 5 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
4	4	3.89855	3.94348	0.11613
4	5	3.94886	4.60394	0.39935
4	6	4.18555	6.22201	0.28934
5	1	5.35895	0.96137	0.36102
5	2	5.27478	1.83544	0.32029
5	3	5.01140	2.95230	0.04904
5	4	5.41518	3.90392	0.42615
5	5	5.23112	5.03703	0.23407
5	6	4.91367	5.84586	0.17667
6	1	6.50571	1.06767	0.51022
6	2	6.44407	2.28458	0.52743
6	3	6.36657	2.81370	0.41119
6	4	6.21363	3.98389	0.21424
6	5	6.24438	4.98814	0.24467
6	6	5.89655	5.66538	0.35025
Average				0.30040

ก.6 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 6

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 6 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.6

ตารางที่ ก.6 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 6

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.92786	1.08898	0.11455
1	2	1.08918	1.68150	0.33075
1	3	1.00367	3.06564	0.06574
1	4	1.23156	4.07378	0.24303
1	5	1.14738	5.12224	0.19148
1	6	0.58156	6.12395	0.43641
2	1	1.96272	0.80705	0.19652
2	2	2.06982	1.91117	0.11298
2	3	2.00380	3.16772	0.16776
2	4	1.83029	4.19311	0.25709
2	5	2.03375	4.99776	0.03382
2	6	2.08210	6.09757	0.12752
3	1	3.06316	0.91772	0.10372
3	2	2.93726	2.09638	0.11500
3	3	2.98474	2.96321	0.03983
3	4	3.01111	3.86919	0.13128
3	5	2.95582	4.99420	0.04456
3	6	2.67314	6.21609	0.39183
4	1	4.30125	0.95352	0.30482
4	2	4.21216	1.80858	0.28575
4	3	4.04561	3.06947	0.08310
4	4	4.00261	4.20397	0.20399
4	5	3.62150	5.31501	0.49244
4	6	3.88158	6.21729	0.24746
5	1	5.41774	0.87984	0.43468
5	2	5.13322	1.94296	0.14492
5	3	5.12891	3.08632	0.15514

ตารางที่ ก.6 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 6 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
5	4	5.50685	4.17761	0.53707
5	5	5.22741	5.10075	0.24873
5	6	5.16616	6.08174	0.18518
6	1	6.35458	0.85543	0.38292
6	2	6.29933	1.91644	0.31077
6	3	5.99463	3.00434	0.00690
6	4	6.15455	4.06759	0.16868
6	5	6.12206	5.05941	0.13575
6	6	6.14842	6.11508	0.18781
Average				0.21167

ก.7 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 7

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 7 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.7

ตารางที่ ก.7 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 7

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.93254	1.10246	0.12268
1	2	0.98316	1.94077	0.06158
1	3	0.95744	3.07857	0.08936
1	4	1.15069	4.24903	0.29107
1	5	1.24578	5.35590	0.43252
1	6	0.78052	6.34054	0.40514
2	1	2.02955	0.96826	0.04337

ตารางที่ ก.7 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 7 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
2	2	2.05732	2.09715	0.11280
2	3	1.98548	2.96946	0.03382
2	4	2.13854	4.12387	0.18584
2	5	2.01797	5.25945	0.26007
2	6	2.13300	6.47409	0.49239
3	1	2.99432	0.84234	0.15776
3	2	2.96936	1.86011	0.14321
3	3	2.97851	2.93102	0.07225
3	4	2.96974	4.00548	0.03075
3	5	2.90652	5.11719	0.14991
3	6	2.66130	6.28835	0.44482
4	1	4.34694	1.07413	0.35477
4	2	4.03654	1.68521	0.31690
4	3	4.26331	2.90268	0.28072
4	4	4.11745	4.27943	0.30311
4	5	3.77048	5.25325	0.34178
4	6	3.92901	6.28578	0.29447
5	1	5.43775	1.10580	0.45035
5	2	5.27281	1.96156	0.27550
5	3	5.08153	2.98437	0.08301
5	4	4.80822	4.09858	0.21563
5	5	5.07794	5.20751	0.22166
5	6	5.09611	6.24564	0.26377
6	1	6.51703	0.94436	0.52002
6	2	5.91240	1.85129	0.17259
6	3	5.96444	2.91460	0.09251
6	4	6.01140	4.09552	0.09620

ตารางที่ ก.7 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 7 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
6	5	5.95369	5.01308	0.04812
6	6	6.05929	6.09311	0.11038
Average				0.22141

ก.8 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 8

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 8 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.8

ตารางที่ ก.8 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 8

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	1.24356	1.07221	0.25404
1	2	0.76551	2.10342	0.25629
1	3	0.73878	3.07236	0.27106
1	4	0.92924	4.11835	0.13789
1	5	1.09513	5.23604	0.25449
1	6	0.98602	6.08727	0.08838
2	1	1.88429	1.03023	0.11959
2	2	1.92489	1.95276	0.08873
2	3	1.93542	2.95431	0.07911
2	4	1.85846	4.11394	0.18170
2	5	1.97626	5.33121	0.33206
2	6	1.79378	6.19442	0.28342
3	1	3.04111	0.74983	0.25352
3	2	3.13865	1.83595	0.21479

ตารางที่ ก.8 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 8 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
3	3	3.10791	3.03873	0.11465
3	4	3.30049	4.06325	0.30707
3	5	3.10828	5.24018	0.26346
3	6	3.18825	6.39820	0.44046
4	1	4.11625	0.72806	0.29575
4	2	4.23976	1.98534	0.24021
4	3	4.29837	3.10346	0.31580
4	4	4.27000	4.14460	0.30628
4	5	4.20290	5.27441	0.34128
4	6	4.23092	6.38227	0.44660
5	1	5.23583	0.75277	0.34167
5	2	5.19126	1.72834	0.33223
5	3	5.23425	3.05374	0.24034
5	4	5.19553	4.47994	0.51824
5	5	5.32133	5.24884	0.40642
5	6	5.24286	6.24816	0.34722
6	1	6.19203	0.78762	0.28633
6	2	6.42629	1.81436	0.46496
6	3	6.32681	2.95268	0.33022
6	4	6.28667	4.05632	0.29215
6	5	6.52520	5.31620	0.61304
6	6	6.07906	5.92605	0.10825
Average				0.28244

ก.9 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 9

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 9 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.9

ตารางที่ ก.9 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 9

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.86781	0.74051	0.29122
1	2	0.88048	1.86641	0.17925
1	3	0.95193	2.95405	0.06650
1	4	1.00438	4.02049	0.02095
1	5	0.91040	5.08566	0.12396
1	6	0.89528	6.11479	0.15538
2	1	1.96052	0.82772	0.17675
2	2	1.91350	1.92545	0.11419
2	3	1.99872	2.96986	0.03017
2	4	2.01940	4.06949	0.07215
2	5	2.00798	5.09183	0.09218
2	6	2.03602	6.11581	0.12128
3	1	3.05705	0.82126	0.18763
3	2	3.04336	1.95237	0.06441
3	3	3.03787	2.99290	0.03853
3	4	3.03525	4.04885	0.06024
3	5	3.02371	4.99752	0.02384
3	6	2.96878	6.11682	0.12092
4	1	4.11709	0.94468	0.12950
4	2	4.04032	1.90798	0.10047
4	3	4.08400	2.98855	0.08478

ตารางที่ ก.9 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 9 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
4	4	4.06462	4.05049	0.08201
4	5	4.03752	5.03509	0.05137
4	6	3.90027	6.00919	0.10015
5	1	5.19671	0.90222	0.21967
5	2	5.16725	1.99171	0.16746
5	3	5.09966	2.92110	0.12711
5	4	5.11207	4.00997	0.11251
5	5	5.06928	4.79571	0.21572
5	6	5.02595	6.09099	0.09462
6	1	6.26536	0.97031	0.26702
6	2	6.19498	1.94082	0.20376
6	3	6.18445	3.02818	0.18659
6	4	6.11789	3.91954	0.14273
6	5	6.08531	5.04204	0.09511
6	6	5.94950	5.91565	0.09831
Average				0.12273

ก.10 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 10

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 10 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.10

ตารางที่ ก.10 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 10

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.87966	1.01919	0.12187
1	2	0.89992	1.98203	0.10168
1	3	0.88039	3.08512	0.14680
1	4	0.89139	4.10703	0.15248
1	5	0.91010	5.08486	0.12363
1	6	0.86000	6.11037	0.17827
2	1	1.90954	0.89726	0.13689
2	2	1.93159	2.04901	0.08415
2	3	1.95697	3.03955	0.05844
2	4	1.91739	4.12514	0.14995
2	5	1.94283	5.10552	0.12001
2	6	1.92082	6.06893	0.10498
3	1	3.01616	0.80552	0.19515
3	2	2.98655	1.97180	0.03124
3	3	2.93902	3.16276	0.17381
3	4	3.02515	4.14124	0.14346
3	5	3.00367	5.10070	0.10077
3	6	3.00001	6.09842	0.09842
4	1	4.01349	0.83103	0.16951
4	2	4.07323	1.99343	0.07352
4	3	4.07486	2.94232	0.09450
4	4	4.01028	4.04368	0.04487
4	5	4.04763	5.07851	0.09183
4	6	3.99963	6.14097	0.14097
5	1	5.16045	0.80010	0.25633
5	2	5.15764	1.86907	0.20492
5	3	5.14585	2.91686	0.16788

ตารางที่ ก.10 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 10 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
5	4	5.10931	4.03224	0.11397
5	5	5.07767	5.09343	0.12150
5	6	5.05120	6.14023	0.14928
6	1	6.23863	0.77412	0.32858
6	2	6.28755	1.76872	0.36902
6	3	6.20400	2.93681	0.21356
6	4	6.17679	4.01000	0.17707
6	5	6.05939	5.09305	0.11039
6	6	6.08172	6.17065	0.18921
Average				0.14553

ก.11 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 11

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 11 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.11

ตารางที่ ก.11 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 11

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.81714	0.77303	0.29147
1	2	0.88565	1.97356	0.11736
1	3	1.91197	2.97384	0.91235
1	4	0.87279	4.08407	0.15248
1	5	0.92761	5.01561	0.07406
1	6	0.90555	6.12663	0.15797
2	1	1.90589	0.88463	0.14888

ตารางที่ ก.11 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 11 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
2	2	1.99471	1.96709	0.03333
2	3	1.91197	2.97384	0.09183
2	4	1.91826	4.09901	0.12839
2	5	1.90531	5.16762	0.19252
2	6	1.92102	6.18376	0.20001
3	1	3.00050	0.84688	0.15312
3	2	3.05986	2.02157	0.06363
3	3	2.91824	3.01651	0.08341
3	4	3.01490	4.11752	0.11846
3	5	2.91072	5.19793	0.21713
3	6	2.95322	6.27604	0.27998
4	1	4.05204	0.89126	0.12055
4	2	4.04101	2.03355	0.05299
4	3	4.05073	2.96955	0.05917
4	4	4.07239	4.12851	0.14750
4	5	3.98708	5.21408	0.21447
4	6	3.98451	6.27690	0.27733
5	1	5.21563	0.91803	0.23068
5	2	5.19460	1.98767	0.19499
5	3	5.01621	3.01399	0.02141
5	4	5.16977	4.10781	0.20111
5	5	5.07003	5.25077	0.26036
5	6	5.13688	6.20732	0.24843
6	1	6.26821	0.85522	0.30479
6	2	6.19330	1.90363	0.21599
6	3	6.22638	3.03077	0.22846
6	4	6.15002	4.05841	0.16099

ตารางที่ ก.11 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 11 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
6	5	6.12481	5.10811	0.16512
6	6	6.13010	6.12003	0.17701
Average				0.18605

ก.12 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 12

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 12 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.12

ตารางที่ ก.12 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 12

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	1.05696	0.86972	0.14219
1	2	1.10692	1.96368	0.11292
1	3	1.03473	2.99784	0.03480
1	4	0.96683	4.05354	0.06298
1	5	0.99144	5.08424	0.08467
1	6	0.99896	5.99331	0.00677
2	1	2.02755	0.92900	0.07616
2	2	1.98283	1.95520	0.04798
2	3	2.02844	3.02354	0.03692
2	4	2.00664	4.08708	0.08733
2	5	1.93907	5.14205	0.15457
2	6	1.89587	6.05616	0.11831
3	1	3.06243	0.90274	0.11557
3	2	3.04104	1.99252	0.04172

ตารางที่ ก.12 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 12 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
3	3	3.01941	3.06412	0.06699
3	4	2.97287	4.14214	0.14471
3	5	2.95997	5.17161	0.17622
3	6	2.84306	6.23301	0.28093
4	1	4.00953	0.93075	0.06990
4	2	4.08249	1.99874	0.08250
4	3	4.14705	3.00660	0.14720
4	4	4.10366	4.11615	0.15568
4	5	3.99825	5.15271	0.15272
4	6	3.89586	6.22353	0.24660
5	1	5.21120	0.95730	0.21547
5	2	5.15116	1.92396	0.16921
5	3	5.18830	3.08286	0.20572
5	4	5.19094	4.12023	0.22564
5	5	5.07326	5.17017	0.18527
5	6	4.89305	6.20042	0.22717
6	1	6.40953	1.03035	0.41065
6	2	6.29767	1.97584	0.29865
6	3	6.30200	3.08890	0.31481
6	4	6.19775	4.08579	0.21556
6	5	6.09486	5.19246	0.21457
6	6	5.97120	6.19058	0.19274
Average				0.15338

ก.13 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 13

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 13 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.13

ตารางที่ ก.13 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 13

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.88015	0.78983	0.24194
1	2	0.76358	1.81360	0.30107
1	3	0.76388	2.90679	0.25385
1	4	1.01497	4.11984	0.12077
1	5	1.14340	5.22815	0.26947
1	6	1.15831	6.49455	0.51927
2	1	1.71877	0.90184	0.29787
2	2	1.61616	1.84556	0.41374
2	3	1.85165	2.95045	0.15641
2	4	1.91917	4.06166	0.10166
2	5	1.82098	5.15450	0.23647
2	6	1.52179	6.26221	0.54538
3	1	3.12834	0.92443	0.14894
3	2	2.74403	1.82864	0.30803
3	3	2.80830	2.93219	0.20334
3	4	2.96874	4.12191	0.12585
3	5	2.77321	5.01027	0.22702
3	6	2.65068	6.10166	0.36381
4	1	4.27654	0.80254	0.33980
4	2	4.43421	2.23227	0.49243
4	3	4.33948	2.90276	0.35313

ตารางที่ ก.13 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 13 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
4	4	4.05361	4.19108	0.19846
4	5	3.90523	5.02849	0.09896
4	6	4.19337	6.10919	0.22207
5	1	5.00708	1.30472	0.30480
5	2	5.43878	2.18510	0.47622
5	3	5.08120	2.67023	0.33962
5	4	5.02050	4.06390	0.06711
5	5	5.19516	4.94708	0.20221
5	6	5.16354	6.07191	0.17865
6	1	6.48194	1.07838	0.48827
6	2	6.25260	1.77398	0.33896
6	3	6.04911	2.58798	0.41494
6	4	6.42261	3.79745	0.46864
6	5	6.16361	4.88105	0.20228
6	6	6.29885	6.00493	0.29889
Average				0.28668

ก.14 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 14

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 14 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.14

ตารางที่ ก.14 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 14

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.78573	0.79290	0.29799
1	2	0.75856	2.03619	0.24414
1	3	1.12146	2.69997	0.32368
1	4	0.94725	3.85474	0.15454
1	5	1.28714	4.74393	0.38474
1	6	0.85553	6.16145	0.21665
2	1	2.12873	0.82776	0.21503
2	2	1.91990	1.82153	0.19562
2	3	2.21239	2.61431	0.44030
2	4	1.98327	4.02754	0.03222
2	5	1.88635	5.11365	0.16073
2	6	1.45213	6.62841	0.83370
3	1	3.23698	0.75777	0.33887
3	2	2.89934	1.93067	0.12223
3	3	3.10844	2.92820	0.13006
3	4	2.93203	4.00729	0.06836
3	5	2.82844	5.22777	0.28515
3	6	2.84082	6.26196	0.30653
4	1	4.33809	0.88879	0.35591
4	2	4.23213	1.98701	0.23249
4	3	4.37859	2.85488	0.40545
4	4	3.95358	3.95700	0.06328
4	5	4.01869	5.26012	0.26079
4	6	3.82466	6.33786	0.38065
5	1	5.39551	0.79475	0.44560
5	2	5.44164	1.88026	0.45758
5	3	5.18681	3.02242	0.18815

ตารางที่ ก.14 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 14 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
5	4	5.12827	4.26819	0.29729
5	5	5.13595	5.01414	0.13668
5	6	5.22262	6.01828	0.22337
6	1	6.49327	0.69431	0.58031
6	2	6.21050	2.01297	0.21090
6	3	6.60629	2.91775	0.61184
6	4	6.51337	3.97624	0.51392
6	5	6.55552	5.03880	0.55687
6	6	5.91769	6.15519	0.17567
Average				0.30131

ก.15 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 15

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 15 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.15

ตารางที่ ก.15 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 15

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.69314	0.92264	0.31646
1	2	0.77511	1.85389	0.26818
1	3	1.05633	2.45109	0.55179
1	4	0.80244	4.06761	0.20881
1	5	0.50428	5.10695	0.50712
1	6	0.80301	6.11257	0.22689
2	1	2.12190	0.97153	0.12518

ตารางที่ ก.15 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 15 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
2	2	1.89844	1.98515	0.10264
2	3	1.99406	3.04758	0.04795
2	4	1.83744	4.07062	0.17724
2	5	1.74866	5.11320	0.27566
2	6	1.55580	6.39184	0.59233
3	1	3.14571	0.97149	0.14847
3	2	3.35274	2.14819	0.38260
3	3	2.96988	2.91406	0.09107
3	4	3.02025	4.15050	0.15186
3	5	2.70388	5.21400	0.36535
3	6	2.68708	6.40072	0.50842
4	1	4.30160	0.85239	0.33579
4	2	4.25248	2.04321	0.25615
4	3	4.31635	3.18507	0.36651
4	4	3.87945	4.13175	0.17858
4	5	3.94170	5.29597	0.30166
4	6	4.12172	6.27936	0.30473
5	1	5.18344	0.82952	0.25043
5	2	5.44356	2.03225	0.44473
5	3	4.77427	2.91675	0.24059
5	4	5.45846	4.15851	0.48509
5	5	4.98246	5.09044	0.09213
5	6	5.03258	6.15263	0.15607
6	1	6.47188	0.62359	0.60362
6	2	6.42332	2.04286	0.42548
6	3	6.32072	2.87870	0.34289
6	4	6.54482	4.06497	0.54868

ตารางที่ ก.15 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 15 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
6	5	6.49025	5.24214	0.54679
6	6	6.07244	6.09374	0.11847
Average				0.30684

ก.16 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 16

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 16 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.16

ตารางที่ ก.16 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 16

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.81971	1.04610	0.18609
1	2	1.10157	1.91357	0.13337
1	3	0.87285	3.02156	0.12897
1	4	0.65840	4.09526	0.35463
1	5	0.84721	5.21393	0.26289
1	6	0.82461	6.20280	0.26812
2	1	2.02802	0.83889	0.16353
2	2	2.08709	1.92604	0.11426
2	3	1.88975	3.02562	0.11319
2	4	1.73198	4.13019	0.29797
2	5	2.02307	5.20353	0.20483
2	6	1.86375	6.34232	0.36844
3	1	2.99911	0.79493	0.20508
3	2	2.99942	1.99659	0.00346

ตารางที่ ก.16 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 16 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
3	3	3.11330	3.01501	0.11429
3	4	3.08966	4.30488	0.31779
3	5	3.25993	5.45339	0.52261
3	6	2.91976	6.25406	0.26643
4	1	4.00407	0.84123	0.15883
4	2	4.09724	1.95052	0.10910
4	3	4.11033	3.02555	0.11325
4	4	4.16808	4.17779	0.24466
4	5	4.25084	5.26789	0.36700
4	6	4.27911	6.52707	0.59641
5	1	4.98288	0.95890	0.04452
5	2	5.12641	1.78031	0.25346
5	3	5.22414	3.06157	0.23244
5	4	5.87943	4.00274	0.87943
5	5	5.29584	5.21850	0.36778
5	6	5.36849	6.37144	0.52321
6	1	6.27548	0.61794	0.47102
6	2	6.43522	1.93102	0.44065
6	3	6.57134	3.28185	0.63708
6	4	6.33867	3.99525	0.33870
6	5	6.46231	5.24137	0.52153
6	6	6.58317	6.50026	0.76834
Average				0.30815

ก.17 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 17

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 17 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดัง ตารางที่ ก.17

ตารางที่ ก.17 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 17

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.73335	0.81017	0.32732
1	2	0.77479	1.97838	0.22625
1	3	0.91599	2.86060	0.16276
1	4	0.88940	4.14682	0.18381
1	5	0.91931	5.21901	0.23340
1	6	0.91800	6.21088	0.22626
2	1	1.85006	0.89550	0.18277
2	2	1.86994	1.95611	0.13727
2	3	1.92393	2.91087	0.11718
2	4	1.90859	4.11166	0.14430
2	5	1.87407	5.17910	0.21894
2	6	1.93386	6.18360	0.19515
3	1	2.96506	0.90394	0.10222
3	2	2.90109	1.97005	0.10335
3	3	3.01836	2.99375	0.01939
3	4	2.95762	4.06721	0.07946
3	5	2.91601	5.14823	0.17037
3	6	2.95109	6.21074	0.21634
4	1	4.05385	0.89483	0.11816
4	2	3.98071	1.93121	0.07144
4	3	4.01853	3.03472	0.03936

ตารางที่ ก.17 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 17 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
4	4	4.01617	4.11056	0.11174
4	5	4.01335	5.12143	0.12216
4	6	4.00519	6.16476	0.16484
5	1	5.14873	0.93575	0.16202
5	2	5.07958	2.00947	0.08014
5	3	5.12708	3.07849	0.14937
5	4	4.98790	4.04326	0.04492
5	5	5.04410	5.07074	0.08336
5	6	4.95224	6.14423	0.15193
6	1	6.24789	1.02163	0.24883
6	2	6.11345	1.98732	0.11416
6	3	6.12150	3.02602	0.12425
6	4	6.02300	4.03330	0.04047
6	5	6.02064	5.06016	0.06360
6	6	6.01324	6.13194	0.13260
Average				0.14083

ก.18 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 18

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 18 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.18

ตารางที่ ก.18 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 18

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.79694	1.11063	0.23125
1	2	0.74219	2.11357	0.28172
1	3	0.75886	3.16221	0.29062
1	4	0.78328	4.09111	0.23509
1	5	0.81563	5.20078	0.27259
1	6	0.92449	5.96837	0.08187
2	1	1.94121	1.05411	0.07990
2	2	1.86625	2.10215	0.16830
2	3	1.84981	3.21137	0.25930
2	4	1.83672	4.25480	0.30263
2	5	1.80727	5.26847	0.33049
2	6	1.88847	6.14034	0.17926
3	1	2.99009	1.04679	0.04783
3	2	2.92404	2.07761	0.10860
3	3	2.97525	3.21802	0.21942
3	4	2.90763	4.25498	0.27120
3	5	2.92511	5.21872	0.23119
3	6	2.96682	6.11466	0.11936
4	1	4.07125	0.97800	0.07457
4	2	4.00295	2.02001	0.02023
4	3	4.07161	3.10585	0.12780
4	4	4.08277	4.19217	0.20924
4	5	4.02834	5.14500	0.14774
4	6	3.98763	6.15820	0.15868
5	1	5.18251	0.96502	0.18583
5	2	5.16912	2.07019	0.18311
5	3	5.21125	3.03989	0.21498

ตารางที่ ก.18 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 18 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
5	4	5.13957	4.11211	0.17902
5	5	5.10717	5.15570	0.18902
5	6	5.06614	6.18048	0.19222
6	1	6.28550	0.93525	0.29275
6	2	6.27589	2.00444	0.27593
6	3	6.26241	3.08639	0.27626
6	4	6.20475	4.12553	0.24017
6	5	6.08504	5.24019	0.25480
6	6	6.02941	6.21783	0.21981
Average				0.19869

ก.19 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 19

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 19 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้งรูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.19

ตารางที่ ก.19 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 19

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.82284	0.91141	0.19807
1	2	0.73864	1.99469	0.26141
1	3	0.79463	3.04581	0.21042
1	4	0.80312	4.11750	0.22928
1	5	0.84436	5.13289	0.20466
1	6	0.83853	6.00857	0.16170
2	1	1.98647	1.00327	0.01392

ตารางที่ ก.19 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 19 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
2	2	1.84451	1.98718	0.15602
2	3	1.86854	3.04737	0.13973
2	4	1.83899	4.20053	0.25717
2	5	1.81403	5.20501	0.27679
2	6	1.88778	6.14413	0.18267
3	1	2.98197	0.93880	0.06380
3	2	2.93750	1.98854	0.06354
3	3	2.96339	3.07462	0.08312
3	4	2.94737	4.15537	0.16404
3	5	2.97766	5.23598	0.23704
3	6	2.96633	6.15100	0.15471
4	1	4.08363	0.95497	0.09498
4	2	4.01682	1.97618	0.02916
4	3	4.08590	3.15230	0.17485
4	4	4.10000	4.16415	0.19221
4	5	3.99215	5.22163	0.22177
4	6	3.92460	6.24038	0.25193
5	1	5.21888	0.96484	0.22169
5	2	5.14801	1.97567	0.15000
5	3	5.19381	3.06684	0.20501
5	4	5.14484	4.07444	0.16285
5	5	5.10593	5.16776	0.19841
5	6	5.02933	6.26361	0.26524
6	1	6.27261	0.92437	0.28291
6	2	6.22746	1.95007	0.23288
6	3	6.24857	3.05284	0.25412
6	4	6.18236	4.10681	0.21134

ตารางที่ ก.19 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 19 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
6	5	6.16017	5.16608	0.23073
6	6	6.05825	6.22361	0.23107
Average				0.18526

ก.20 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 20

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 20 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.20

ตารางที่ ก.20 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 20

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	1.05612	0.89547	0.11865
1	2	1.02298	1.99622	0.02329
1	3	1.13451	2.99378	0.13465
1	4	1.15322	4.02667	0.15552
1	5	0.93812	5.09333	0.11198
1	6	0.89603	6.05951	0.11980
2	1	2.04197	0.94478	0.06936
2	2	2.08576	2.04896	0.09875
2	3	2.10730	3.10721	0.15168
2	4	1.98575	4.11563	0.11650
2	5	1.93784	5.14418	0.15701
2	6	1.88838	6.16724	0.20107
3	1	3.02517	0.91224	0.09130
3	2	3.08665	1.99226	0.08700

ตารางที่ ก.20 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 20 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
3	3	3.05453	3.06521	0.08501
3	4	3.05455	4.03151	0.06300
3	5	2.89558	5.22522	0.24825
3	6	2.84907	6.21306	0.26110
4	1	4.09392	0.89324	0.14219
4	2	3.99923	2.00827	0.00831
4	3	4.13978	3.04329	0.14633
4	4	4.17742	4.05403	0.18546
4	5	4.08672	5.09135	0.12596
4	6	3.84784	6.21664	0.26474
5	1	5.15409	0.94670	0.16305
5	2	5.23400	1.97780	0.23505
5	3	5.29972	3.06588	0.30687
5	4	5.14850	4.11733	0.18926
5	5	5.06212	5.15463	0.16664
5	6	4.86255	6.22764	0.26592
6	1	6.38722	0.96507	0.38879
6	2	6.35771	2.02096	0.35832
6	3	6.34852	3.09097	0.36020
6	4	6.21711	4.08365	0.23267
6	5	6.04384	5.16540	0.17111
6	6	5.93599	6.19999	0.20998
Average				0.17263

ก.21 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 21

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 21 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.21

ตารางที่ ก.21 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 21

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.92196	0.92196	0.11037
1	2	0.44686	2.05713	0.55608
1	3	0.54431	3.07034	0.46109
1	4	0.50585	4.13126	0.51129
1	5	0.23833	5.18015	0.78269
1	6	0.74849	6.07500	0.26246
2	1	2.11223	1.09634	0.14791
2	2	1.74779	1.72002	0.37683
2	3	2.10467	2.75680	0.26477
2	4	1.84761	4.07586	0.17023
2	5	2.02007	5.21674	0.21767
2	6	2.16739	6.43380	0.46498
3	1	3.00857	0.91095	0.08946
3	2	2.95301	1.75063	0.25376
3	3	2.91272	2.83564	0.18610
3	4	2.89035	3.94018	0.12491
3	5	2.87789	5.20280	0.23672
3	6	2.92773	6.06457	0.09691
4	1	3.96350	0.76051	0.24226
4	2	3.93001	1.59611	0.40991
4	3	3.90055	2.86759	0.16560

ตารางที่ ก.21 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 21 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
4	4	4.03404	3.76809	0.23439
4	5	4.13982	5.05391	0.14985
4	6	4.20087	5.83338	0.26098
5	1	5.22371	0.90312	0.24379
5	2	5.22375	2.04849	0.22894
5	3	5.06293	2.54054	0.46375
5	4	5.21500	3.90747	0.23407
5	5	5.22041	4.86031	0.26095
5	6	5.31958	5.98298	0.32003
6	1	6.57620	0.42636	0.81307
6	2	6.65626	2.10351	0.66437
6	3	6.29365	2.87665	0.31851
6	4	6.23445	3.88137	0.26275
6	5	6.25175	4.91462	0.26583
6	6	6.06829	5.22700	0.77601
Average				0.32304

ก.22 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 22

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 22 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.22

ตารางที่ ก.22 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 22

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.77609	0.93506	0.23314
1	2	0.64765	2.14380	0.38056
1	3	0.95507	2.85184	0.15482
1	4	1.88948	4.09621	0.89467
1	5	0.70047	5.17583	0.34732
1	6	0.88029	6.13902	0.18346
2	1	1.86273	1.01026	0.13765
2	2	1.92365	1.80978	0.20497
2	3	1.88079	2.96809	0.12341
2	4	1.88948	4.09621	0.14653
2	5	1.52902	5.54446	0.71990
2	6	1.89949	6.04812	0.11144
3	1	3.11899	0.84147	0.19822
3	2	3.03316	1.86711	0.13696
3	3	3.02755	2.85836	0.14429
3	4	2.89745	4.09498	0.13978
3	5	2.89373	5.24091	0.26331
3	6	2.80858	6.30608	0.36101
4	1	4.19808	0.90508	0.21965
4	2	4.16466	1.87904	0.20431
4	3	4.09849	2.99979	0.09849
4	4	4.04238	4.06721	0.07946
4	5	3.76308	5.37933	0.44724
4	6	3.77972	6.30420	0.37558
5	1	5.33188	0.71858	0.43513
5	2	5.22750	1.91426	0.24312
5	3	5.22128	3.08471	0.23694

ตารางที่ ก.22 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 22 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
5	4	4.82475	4.39449	0.43167
5	5	4.96795	5.09388	0.09920
5	6	4.87598	6.12714	0.17761
6	1	6.47756	0.84358	0.50252
6	2	6.50052	1.73948	0.56426
6	3	6.87118	2.87380	0.88027
6	4	6.25862	4.02791	0.26012
6	5	6.03762	5.09246	0.09982
6	6	6.30642	6.20526	0.36882
Average				0.29460

ก.23 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 23

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 23 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.23

ตารางที่ ก.23 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 23

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.76607	0.71716	0.36705
1	2	0.69678	1.48318	0.59921
1	3	1.00340	2.93564	0.06445
1	4	0.87308	4.05561	0.13857
1	5	0.79702	5.10501	0.22853
1	6	0.60097	5.96202	0.40084
2	1	1.93284	0.95269	0.08215

ตารางที่ ก.23 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 23 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
2	2	1.89081	1.99509	0.10930
2	3	1.96071	3.04181	0.05737
2	4	1.94443	4.10573	0.11944
2	5	1.84354	5.25336	0.29778
2	6	1.58946	6.28910	0.50212
3	1	3.09072	0.96240	0.09820
3	2	2.99606	1.96907	0.03118
3	3	2.98147	3.02888	0.03431
3	4	2.99223	4.11822	0.11848
3	5	2.74887	5.31712	0.40451
3	6	2.78037	6.40483	0.46057
4	1	4.24033	0.97203	0.24195
4	2	4.10776	1.97816	0.10995
4	3	3.94678	3.15905	0.16772
4	4	4.06424	4.11424	0.13106
4	5	3.57880	5.36169	0.55518
4	6	3.83454	6.34020	0.37830
5	1	5.36485	0.92990	0.37152
5	2	5.33195	2.05694	0.33680
5	3	5.06038	3.05264	0.08010
5	4	4.83655	4.28038	0.32454
5	5	4.96277	5.06935	0.07871
5	6	4.86469	6.05854	0.14743
6	1	6.43911	1.16865	0.47038
6	2	6.57530	1.84729	0.59522
6	3	6.35395	3.08122	0.36315
6	4	6.25885	4.16899	0.30913

ตารางที่ ก.23 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 23 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
6	5	5.97836	4.98937	0.02411
6	6	6.28343	6.00783	0.28354
Average				0.25230

ก.24 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 24

การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 24 ประกอบด้วย พารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวนอน รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณไม่วางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.24

ตารางที่ ก.24 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 24

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.59501	1.05645	0.40891
1	2	0.92150	1.91673	0.11444
1	3	1.04088	1.91336	1.08741
1	4	0.95947	4.11592	0.12280
1	5	0.73984	5.16613	0.30868
1	6	0.85714	6.25289	0.29045
2	1	1.87901	0.82747	0.21072
2	2	1.87015	1.89849	0.16482
2	3	1.79831	3.01966	0.20265
2	4	1.84020	4.12815	0.20484
2	5	1.84984	5.24792	0.28985
2	6	2.01403	6.30582	0.30614
3	1	2.87487	0.78852	0.24572
3	2	3.01089	1.89437	0.10619

ตารางที่ ก.24 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางวิธีที่ 24 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
3	3	2.95849	3.02834	0.05026
3	4	2.94669	4.18578	0.19328
3	5	3.38573	5.60820	0.72020
3	6	3.31043	6.62629	0.69900
4	1	3.86411	0.79444	0.24642
4	2	4.00098	1.93500	0.06501
4	3	4.11836	3.08243	0.14424
4	4	3.92830	3.95048	0.08714
4	5	4.06876	5.20050	0.21196
4	6	4.24001	6.27189	0.36267
5	1	5.02733	0.78257	0.21914
5	2	5.14642	1.88768	0.18454
5	3	5.58400	2.76504	0.62949
5	4	5.48449	3.82197	0.51616
5	5	5.45685	5.29883	0.54590
5	6	5.35961	6.29628	0.46594
6	1	6.36638	0.60029	0.54222
6	2	6.21436	1.86169	0.25511
6	3	6.38735	3.00026	0.38735
6	4	6.15906	4.06078	0.17028
6	5	6.36084	5.03124	0.36219
6	6	6.48129	6.14034	0.50133
Average				0.32287

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับต่าง ๆ

ข.1 การทดลองวัดความสูงที่ระดับ 0.5 เมตร

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่ระดับความสูง 0.5 เมตร โดยที่กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้คงที่ได้แก่ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 0.5 เมตร แสดงดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 0.5 เมตร

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.86805	0.97828	0.13373
1	2	0.90966	2.05860	0.10769
1	3	0.91516	3.01872	0.08688
1	4	0.97371	4.02521	0.03642
1	5	0.95058	5.01910	0.05298
1	6	1.00219	5.95088	0.04917
2	1	1.94887	1.04294	0.06677
2	2	2.01047	2.05866	0.05959
2	3	1.95860	3.08870	0.09789
2	4	2.04045	4.02161	0.04586
2	5	1.97491	5.03227	0.04088
2	6	2.00721	5.98947	0.01276
3	1	2.99996	1.03532	0.03532
3	2	3.03771	1.99404	0.03818
3	3	2.98940	3.03685	0.03834
3	4	3.06822	4.03980	0.07898
3	5	3.05948	5.05600	0.08169
3	6	3.03343	5.99816	0.03348
4	1	4.08266	0.97880	0.08534
4	2	4.04912	2.01117	0.05037
4	3	4.07379	3.00245	0.07383
4	4	4.11466	4.05823	0.12860

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 0.5 เมตร (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
4	5	4.07887	5.07851	0.11128
4	6	4.02629	6.06571	0.07077
5	1	5.17023	0.99941	0.17023
5	2	5.16617	1.97975	0.16740
5	3	5.11432	2.96833	0.11863
5	4	5.18985	4.08355	0.20742
5	5	5.07301	5.06056	0.09486
5	6	5.05850	6.10812	0.12293
6	1	6.22437	0.93117	0.23469
6	2	6.27833	1.97766	0.27923
6	3	6.18634	2.96700	0.18924
6	4	6.15592	4.04158	0.16137
6	5	6.08641	5.11534	0.14412
6	6	6.09842	6.11015	0.14771
Average				0.10152

ข.2 การทดลองวัดความสูงที่ระดับ 1 เมตร

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่ระดับความสูง 1 เมตร โดยที่กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้คงที่ได้แก่ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 1 เมตร แสดงดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 1 เมตร

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.87966	1.01919	0.12187
1	2	0.89992	1.98203	0.10168
1	3	0.88039	3.08512	0.14680

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 1 เมตร (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	4	0.89139	4.10703	0.15248
1	5	0.91010	5.08486	0.12363
1	6	0.86000	6.11037	0.17827
2	1	1.90954	0.89726	0.13689
2	2	1.93159	2.04901	0.08415
2	3	1.95697	3.03955	0.05844
2	4	1.91739	4.12514	0.14995
2	5	1.94283	5.10552	0.12001
2	6	1.92082	6.06893	0.10498
3	1	3.01616	0.80552	0.19515
3	2	2.98655	1.97180	0.03124
3	3	2.93902	3.16276	0.17381
3	4	3.02515	4.14124	0.14346
3	5	3.00367	5.10070	0.10077
3	6	3.00001	6.09842	0.09842
4	1	4.01349	0.83103	0.16951
4	2	4.07323	1.99343	0.07352
4	3	4.07486	2.94232	0.09450
4	4	4.01028	4.04368	0.04487
4	5	4.04763	5.07851	0.09183
4	6	3.99963	6.14097	0.14097
5	1	5.16045	0.80010	0.25633
5	2	5.15764	1.86907	0.20492
5	3	5.14585	2.91686	0.16788
5	4	5.10931	4.03224	0.11397
5	5	5.07767	5.09343	0.12150
5	6	5.05120	6.14023	0.14928

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 1 เมตร (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
6	1	6.23863	0.77412	0.32858
6	2	6.28755	1.76872	0.36902
6	3	6.20400	2.93681	0.21356
6	4	6.17679	4.01000	0.17707
6	5	6.05939	5.09305	0.11039
6	6	6.08172	6.17065	0.18921
Average				0.14553

ข.3 การทดลองวัดความสูงที่ระดับ 1.5 เมตร

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่ระดับความสูง 1.5 เมตร โดยที่กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้คงที่ได้แก่ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 1.5 เมตร แสดงดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 1.5 เมตร

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.81470	0.87677	0.22254
1	2	0.82790	2.02580	0.17402
1	3	0.65013	3.16690	0.38764
1	4	0.95038	3.89420	0.11686
1	5	0.82324	5.04077	0.18140
1	6	0.74905	6.06402	0.25898
2	1	1.88324	0.86498	0.17851
2	2	1.83830	2.04427	0.16765
2	3	1.89097	3.02903	0.11283
2	4	1.88526	4.03774	0.12079
2	5	1.87409	5.07995	0.14915

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 1.5 เมตร (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
2	6	1.88335	6.01680	0.11785
3	1	3.00177	0.80365	0.19636
3	2	2.94981	2.00829	0.05087
3	3	2.97071	3.05506	0.06237
3	4	2.96862	4.02762	0.04180
3	5	2.89432	5.06181	0.12243
3	6	2.88427	6.05899	0.12990
4	1	4.08031	0.88631	0.13919
4	2	4.02128	1.97066	0.03624
4	3	4.01879	3.02297	0.02968
4	4	3.96612	4.08634	0.09275
4	5	4.01544	5.08830	0.08964
4	6	3.92513	6.00830	0.07533
5	1	5.09500	0.80137	0.22018
5	2	5.10651	1.07668	0.92944
5	3	5.08396	3.01234	0.08486
5	4	5.03031	4.11982	0.12359
5	5	4.99731	5.04309	0.04317
5	6	4.93926	6.15984	0.17099
6	1	6.18159	0.83924	0.24252
6	2	6.07095	1.60283	0.40346
6	3	6.17217	2.97209	0.17442
6	4	6.01722	3.84436	0.15659
6	5	5.99098	5.17623	0.17646
6	6	5.96158	6.14350	0.14855
Average				0.17025

ข.4 การทดลองวัดความสูงที่ระดับ 2 เมตร

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่ระดับความสูง 2 เมตร โดยที่กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้คงที่ได้แก่ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 2 เมตร แสดงดังตารางที่ ข.4

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 2 เมตร

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.84581	0.94844	0.16259
1	2	0.76139	1.96482	0.24119
1	3	0.66550	3.07688	0.34322
1	4	0.82450	4.00512	0.17558
1	5	0.72185	5.11320	0.30031
1	6	0.72781	5.97348	0.27348
2	1	1.86663	0.93600	0.14793
2	2	1.81806	2.02741	0.18399
2	3	1.78475	3.11170	0.24251
2	4	1.72264	4.12740	0.30522
2	5	1.78787	5.12122	0.24432
2	6	1.69670	6.08633	0.31535
3	1	2.89383	0.92772	0.12844
3	2	2.91151	2.03601	0.09554
3	3	2.91111	3.08810	0.12515
3	4	2.86551	4.08571	0.15948
3	5	2.82931	5.13451	0.21732
3	6	2.77255	6.06665	0.23701
4	1	4.02625	0.91925	0.08491
4	2	3.99864	1.91271	0.08730
4	3	3.95958	3.07587	0.08597
4	4	3.97391	4.10474	0.10794

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 2 เมตร (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
4	5	3.91941	5.13758	0.15945
4	6	3.73157	6.16997	0.31772
5	1	5.14569	0.86868	0.19614
5	2	5.12166	1.96296	0.12717
5	3	5.11075	3.05649	0.12432
5	4	4.94090	4.12188	0.13545
5	5	4.95892	5.10696	0.11458
5	6	4.89726	6.13871	0.17262
6	1	6.23177	0.82900	0.28802
6	2	6.15883	1.90572	0.18470
6	3	6.15094	3.00843	0.15118
6	4	5.96052	4.07349	0.08342
6	5	5.96259	5.12329	0.12884
6	6	5.87016	6.22390	0.25882
Average				0.18631

ข.5 การทดลองวัดความสูงที่ระดับ 2.5 เมตร

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่ระดับความสูง 2.5 เมตร โดยที่กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้คงที่ได้แก่ ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 2.5 เมตร แสดงดังตารางที่ ข.5

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 2.5 เมตร

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.76480	1.10201	0.25637
1	2	0.72493	2.07681	0.28559
1	3	0.81011	3.11039	0.21965

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 2.5 เมตร (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	4	0.79030	4.05544	0.21691
1	5	0.84179	5.15702	0.22290
1	6	0.78165	6.14450	0.26184
2	1	1.82211	1.04040	0.18242
2	2	1.82934	2.02691	0.17277
2	3	1.82322	3.09932	0.20277
2	4	1.75801	4.14540	0.28231
2	5	1.85050	5.13035	0.19835
2	6	1.79703	6.15371	0.25460
3	1	2.92261	0.72366	0.28697
3	2	2.90439	2.02303	0.09834
3	3	2.88400	3.13461	0.17770
3	4	2.86965	4.10856	0.16964
3	5	2.84159	5.20057	0.25558
3	6	2.80813	6.10721	0.21979
4	1	4.26296	0.85082	0.30233
4	2	4.01189	1.80043	0.19992
4	3	4.02212	2.98182	0.02863
4	4	3.92947	4.11557	0.13539
4	5	3.90468	5.17819	0.20208
4	6	3.79008	6.16587	0.26754
5	1	4.82405	1.01860	0.17693
5	2	4.99549	1.76277	0.23727
5	3	5.04713	3.03888	0.06110
5	4	5.01567	4.10301	0.10420
5	5	4.91000	5.19440	0.21422
5	6	4.85844	6.24341	0.28158

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองวัดความสูงที่ระดับ 2.5 เมตร (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
6	1	6.22822	0.88705	0.25464
6	2	6.03321	1.94360	0.06545
6	3	6.15354	2.99657	0.15358
6	4	6.04272	4.06461	0.07746
6	5	6.00879	5.15078	0.15104
6	6	5.89461	6.14638	0.18037
Average				0.19606

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น

ค.1 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น วิธีที่ 2

ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น วิธีที่ 2 ประกอบด้วยตัวแปรความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในรูปแบบแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น วิธีที่ 2 แสดงดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น วิธีที่ 2

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.88860	0.98734	0.11212
1	2	0.92242	1.98217	0.07961
1	3	0.92488	2.96034	0.08495
1	4	0.90654	3.99790	0.09349
1	5	1.00934	5.00466	0.01044
1	6	0.85640	6.03343	0.14744
1	7	1.01006	7.01275	0.01624
1	8	0.89093	8.06255	0.12573
1	9	1.07816	8.94327	0.09658
1	10	0.97806	10.05730	0.06136
1	11	0.98825	11.02780	0.03018
1	12	0.99373	12.04300	0.04345
1	13	1.04688	12.92840	0.08558
2	1	2.02925	0.92171	0.08357
2	2	1.99919	1.99095	0.00909
2	3	2.03507	2.97344	0.04399
2	4	1.92861	4.01651	0.07327
2	5	1.98113	4.96503	0.03974
2	6	1.90560	6.08115	0.12449
2	7	1.99809	7.01197	0.01212
2	8	1.79829	8.06533	0.21203

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น วิธีที่ 2 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
2	9	2.07571	9.01717	0.07763
2	10	2.00987	10.07020	0.07089
2	11	2.04221	11.07250	0.08389
2	12	1.86851	11.98070	0.13290
2	13	2.10077	12.96790	0.10576
3	1	3.07334	0.83117	0.18408
3	2	3.03349	1.90998	0.09605
3	3	3.08921	2.93623	0.10966
3	4	2.95423	3.99921	0.04578
3	5	3.01767	5.01223	0.02149
3	6	2.99015	5.94585	0.05504
3	7	3.05516	7.01657	0.05760
3	8	3.04401	7.99968	0.04401
3	9	3.13629	8.95793	0.14264
3	10	2.99877	10.05640	0.05641
3	11	3.04253	11.12890	0.13574
3	12	3.06579	11.99320	0.06614
3	13	2.89143	13.18250	0.21235
4	1	4.11726	0.88703	0.16283
4	2	4.09589	1.89496	0.14223
4	3	4.09898	2.63803	0.37526
4	4	4.13071	3.97163	0.13375
4	5	4.10354	5.04383	0.11243
4	6	4.08454	5.98478	0.08590
4	7	4.02007	6.98142	0.02735
4	8	4.09604	7.97509	0.09922
4	9	4.01985	8.96223	0.04267

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น วิธีที่ 2 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
4	10	4.10048	10.03980	0.10808
4	11	4.16400	11.13080	0.20977
4	12	4.19289	12.12000	0.22717
4	13	4.30910	13.09800	0.32426
5	1	5.12922	0.85361	0.19527
5	2	5.18293	1.87924	0.21919
5	3	5.26228	2.85829	0.29811
5	4	5.19038	3.94118	0.19926
5	5	5.12035	4.85446	0.18885
5	6	5.12489	5.89701	0.16188
5	7	5.05831	6.83990	0.17039
5	8	5.06727	8.06288	0.09208
5	9	5.07890	8.97132	0.08395
5	10	5.00671	10.07260	0.07291
5	11	5.10807	11.04340	0.11646
5	12	4.99053	12.04100	0.04208
5	13	4.85120	13.10400	0.18154
6	1	6.23577	0.83356	0.28860
6	2	6.30917	1.93002	0.31699
6	3	6.30472	2.93064	0.31251
6	4	6.19817	3.93288	0.20923
6	5	6.13775	5.01600	0.13868
6	6	6.09473	5.95198	0.10621
6	7	6.07796	7.07574	0.10869
6	8	6.03221	8.07982	0.08607
6	9	6.03046	9.02440	0.03903
6	10	6.10240	10.11670	0.15526

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น วิธีที่ 2 (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
6	11	6.18099	11.08550	0.20017
6	12	5.94894	12.05210	0.07295
6	13	6.05558	13.06280	0.08386
Average				0.12147

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง

ง.1 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง วิธีที่ 2*

การทดลองนี้เป็นการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง วิธีที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง วิธีที่ 2*

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.95229	0.69546	0.30826
1	2	1.01666	1.77048	0.23012
1	3	0.84360	2.96006	0.16142
1	4	0.85458	4.05452	0.15531
1	5	1.18546	5.02473	0.18710
2	1	2.15974	0.54590	0.48137
2	2	2.34762	1.85656	0.37605
2	3	2.38874	2.94083	0.39322
2	4	2.01779	4.12879	0.13001
2	5	2.09082	5.12472	0.15428
Average				0.25771

หมายเหตุ: วิธีที่ 2* หมายถึง วิธีที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 0.5 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว

ง.2 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง วิธีที่ 10*

การทดลองนี้เป็นการทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง วิธีที่ 10 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ง.2

ตารางที่ ง.2 การทดลองการระบุตำแหน่งภายในอาคารสถานที่ใช้งานจริงที่มีสิ่งกีดขวาง วิธีที่ 10*

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.90452	0.90521	0.13454
1	2	0.94632	2.00073	0.05368
1	3	0.85221	3.06878	0.16301
1	4	0.90048	4.08635	0.13176
1	5	0.86227	5.18098	0.22743
2	1	2.09343	0.84703	0.17925
2	2	2.25241	1.79006	0.32831
2	3	2.26705	3.00767	0.26716
2	4	2.11076	4.03126	0.11509
2	5	2.07779	5.04911	0.09199
Average				0.16922

หมายเหตุ: วิธีที่ 10* หมายถึง วิธีที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความสูงของตัวส่งสัญญาณที่ระดับ 1 เมตร ลักษณะการวางของตัวส่งสัญญาณในแนวตั้ง รูปแบบการวางของตัวส่งสัญญาณวางที่มุมและจำนวนของตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว

ภาคผนวก จ
ผลการทดลองการใช้งานจริง

จ.1 ตัวรับสัญญาณปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋าสื่อ

ผลการทดลองของตัวรับสัญญาณปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋าสื่อ แสดงดังตารางที่ จ.1

ตารางที่ จ.1 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณที่ปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋าสื่อ

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.86093	0.61148	0.41265
1	2	0.84740	1.89709	0.18406
1	3	0.89126	1.74467	1.26003
1	4	0.84006	3.89911	0.18910
1	5	0.90722	4.87718	0.15392
1	6	0.89714	5.89356	0.14802
2	1	1.98912	0.68424	0.31594
2	2	1.82840	1.89011	0.20377
2	3	1.59228	3.07576	0.41470
2	4	1.92714	3.98419	0.07456
2	5	1.84728	5.02966	0.15557
2	6	1.92916	5.84756	0.16810
3	1	2.78336	0.86665	0.25439
3	2	2.83383	1.56483	0.46582
3	3	2.84095	2.91186	0.18184
3	4	2.94205	4.01401	0.05962
3	5	2.71942	5.06867	0.28886
3	6	3.07007	5.80709	0.20524
4	1	3.86076	0.91639	0.16242
4	2	4.01288	1.79282	0.20758
4	3	3.89272	2.79630	0.23022
4	4	3.85395	3.91533	0.16882

ตารางที่ จ.1 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณที่ปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋าสื่อ (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
4	5	3.87939	5.03084	0.12449
4	6	3.68872	5.96231	0.31355
5	1	5.00088	0.76580	0.23420
5	2	5.04983	1.75448	0.25053
5	3	5.00160	2.83809	0.16192
5	4	4.84385	3.88506	0.19389
5	5	4.93692	4.92877	0.09515
5	6	4.83989	6.04996	0.16772
6	1	6.31182	0.42266	0.65617
6	2	5.98065	1.82069	0.18035
6	3	6.13291	2.86889	0.18669
6	4	5.98881	3.88366	0.11688
6	5	5.95827	5.03350	0.05351
6	6	6.15748	5.98251	0.15845
Average				0.24441

จ.2 ตัวรับสัญญาณปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋ากางเกง

ผลการทดลองของตัวรับสัญญาณปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋ากางเกง แสดงดังตารางที่ จ.2

ตารางที่ จ.2 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณที่ปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋ากางเกง

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.67718	0.56842	0.53896
1	2	0.69811	1.70619	0.42126

ตารางที่ จ.2 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณที่ปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋ากางเกง (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	3	0.68869	2.83513	0.35227
1	4	0.83718	3.90648	0.18776
1	5	0.77156	4.96424	0.23122
1	6	0.82232	5.88146	0.21359
2	1	1.79774	0.62858	0.42292
2	2	1.94258	1.81067	0.19785
2	3	1.77893	2.80273	0.29629
2	4	1.81334	3.91046	0.20703
2	5	1.78879	4.84313	0.26309
2	6	1.87769	5.93793	0.13716
3	1	2.79257	0.72900	0.34128
3	2	2.85807	1.71271	0.32044
3	3	2.98046	2.83743	0.16374
3	4	2.90229	3.81534	0.20892
3	5	2.86385	4.86564	0.19128
3	6	2.96001	5.94248	0.07006
4	1	4.02555	0.73783	0.26342
4	2	3.99362	1.65273	0.34733
4	3	4.04036	2.76219	0.24121
4	4	4.06373	3.87174	0.14322
4	5	3.98765	4.90806	0.09277
4	6	3.85367	6.00219	0.14635
5	1	5.03546	0.63058	0.37112
5	2	5.16902	1.62394	0.41230
5	3	5.03278	2.84571	0.15773
5	4	5.05081	3.82938	0.17802

ตารางที่ จ.2 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณที่ปราศจากกล่องบรรจุใส่ในกระเป๋ากางเกง (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
5	5	4.93991	4.94383	0.08225
5	6	4.88912	5.80349	0.22563
6	1	6.16265	0.63140	0.40289
6	2	6.13349	1.74633	0.28665
6	3	6.11547	2.82915	0.20621
6	4	6.06492	3.90124	0.11819
6	5	6.02462	5.00463	0.02505
6	6	6.02102	6.04075	0.04585
Average				0.23643

จ.3 ตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋าสีเสื้อ

ผลการทดลองของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋าสีเสื้อ แสดงดังตารางที่ จ.3

ตารางที่ จ.3 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋าสีเสื้อ

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.60361	0.91671	0.40505
1	2	0.68841	1.71931	0.41938
1	3	0.91128	2.81883	0.20173
1	4	0.78759	3.89835	0.23548
1	5	0.78434	4.89109	0.24160
1	6	0.84800	5.84304	0.21850
2	1	1.77604	0.89522	0.24726
2	2	1.89787	1.85756	0.17527
2	3	2.01376	2.80156	0.19892

ตารางที่ จ.3 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋าสื่อ (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
2	4	1.79664	4.04710	0.20874
2	5	1.83374	4.97984	0.16748
2	6	1.83476	5.93224	0.17859
3	1	2.78541	0.77573	0.31040
3	2	2.78625	1.80047	0.29241
3	3	2.75618	2.97788	0.24482
3	4	2.98300	3.92023	0.08156
3	5	2.82784	5.00491	0.17223
3	6	2.84903	5.96868	0.15418
4	1	3.90756	0.69632	0.31744
4	2	3.92568	1.77880	0.23335
4	3	3.81767	2.92358	0.19770
4	4	3.92667	3.87908	0.14142
4	5	3.92844	4.89714	0.12530
4	6	3.86571	6.01923	0.13566
5	1	4.85660	0.71056	0.32302
5	2	5.04088	1.77589	0.22781
5	3	4.92735	2.80880	0.20454
5	4	4.90405	4.01817	0.09766
5	5	4.95760	4.96593	0.05439
5	6	4.90922	6.06759	0.11318
6	1	6.12630	0.64233	0.37932
6	2	6.09253	1.76511	0.25246
6	3	6.04462	2.80912	0.19603
6	4	5.93168	3.97078	0.07431
6	5	6.06744	4.92085	0.10398

ตารางที่ จ.3 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋าสื่อ (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
6	6	5.92120	5.97576	0.08244
Average				0.20593

จ.4 ตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋ากางเกง

ผลการทดลองของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋ากางเกง แสดงดังตารางที่

จ.4

ตารางที่ จ.4 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋ากางเกง

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.80156	0.79557	0.28491
1	2	0.79990	1.87494	0.23596
1	3	0.82218	2.91387	0.19758
1	4	0.95430	3.86571	0.14185
1	5	0.88446	5.00842	0.11584
1	6	0.92756	5.89676	0.12612
2	1	1.91358	0.70446	0.30791
2	2	1.83464	1.71287	0.33134
2	3	1.88185	2.81909	0.21607
2	4	1.81452	4.10008	0.21076
2	5	1.93329	4.95581	0.08002
2	6	1.88343	5.96915	0.12058
3	1	2.98253	0.80162	0.19914
3	2	2.82212	1.86087	0.22583
3	3	2.90747	2.83328	0.19068

ตารางที่ จ.4 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่ปิดสนิทใส่ในกระเป๋ากางเกง (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
3	4	2.97229	4.00644	0.02845
3	5	2.91601	4.86809	0.15638
3	6	3.00471	5.99974	0.00472
4	1	4.22355	0.72195	0.35677
4	2	3.95132	1.66431	0.33920
4	3	4.05412	2.82957	0.17882
4	4	4.02902	3.90771	0.09675
4	5	3.97867	4.89374	0.10838
4	6	3.93478	5.98727	0.06645
5	1	5.04235	0.66067	0.34196
5	2	5.14273	1.45905	0.55946
5	3	5.12307	2.68960	0.33391
5	4	5.01349	4.00295	0.01381
5	5	5.00386	4.81761	0.18243
5	6	4.92923	6.04764	0.08531
6	1	6.14625	0.73929	0.29893
6	2	6.01571	1.83476	0.16599
6	3	6.10199	2.83027	0.19802
6	4	6.02850	3.89118	0.11249
6	5	5.99907	4.95888	0.04113
6	6	5.84655	6.08353	0.17471
Average				0.18968

จ.5 ตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศใส่ในกระเป๋าสีเสื้อ

ผลการทดลองของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศใส่ในกระเป๋าสีเสื้อ แสดงดังตารางที่ จ.5

ตารางที่ จ.5 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับ
สายอากาศใส่ในกระเปาะเสื้อ

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.77495	0.83965	0.27633
1	2	0.86885	1.88399	0.17510
1	3	0.88959	2.84456	0.19066
1	4	0.90037	3.92701	0.12351
1	5	0.98832	4.98177	0.02165
1	6	0.79578	5.86490	0.24487
2	1	1.87334	0.71055	0.31595
2	2	1.84507	1.82804	0.23146
2	3	2.01306	2.86062	0.13999
2	4	1.81015	3.88832	0.22026
2	5	1.78558	4.93530	0.22397
2	6	2.01339	5.90146	0.09945
3	1	2.96567	0.78191	0.22078
3	2	2.65506	1.84270	0.37911
3	3	2.84221	2.82861	0.23296
3	4	2.90952	3.83472	0.18843
3	5	2.83999	4.95259	0.16689
3	6	2.96071	5.98956	0.04065
4	1	3.81200	1.21698	0.28710
4	2	4.01061	1.63248	0.36767
4	3	4.18398	2.67008	0.37775
4	4	4.11200	3.86140	0.17820
4	5	3.86647	5.00793	0.13377
4	6	3.84858	6.02085	0.15285
5	1	5.11186	0.73192	0.29048

ตารางที่ จ.5 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศใส่ในกระเปาะเสื้อ (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
5	2	5.03812	1.62937	0.37259
5	3	4.94049	2.74389	0.26293
5	4	5.18587	3.86841	0.22774
5	5	4.99983	4.92295	0.07705
5	6	4.78303	6.04629	0.22185
6	1	6.05760	0.95045	0.07598
6	2	6.19203	1.80165	0.27608
6	3	6.12041	2.73954	0.28695
6	4	6.05956	3.89145	0.12382
6	5	5.99894	4.86061	0.13939
6	6	5.98521	6.01147	0.01872
Average				0.20453

จ.6 ตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศใส่ในกระเปาะกางเกง

ผลการทดลองของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศใส่ในกระเปาะกางเกง แสดงดังตารางที่ จ.6

ตารางที่ จ.6 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับสายอากาศใส่ในกระเปาะกางเกง

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	1	0.64118	0.94326	0.36328
1	2	0.64389	1.86472	0.38094
1	3	0.78047	3.03679	0.22259
1	4	0.85917	3.94845	0.14997
1	5	0.92558	5.02370	0.07811

ตารางที่ จ.6 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับ
สายอากาศใส่ในกระเป๋ากางเกง (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
1	6	0.92205	5.90697	0.12137
2	1	1.89415	0.77850	0.24549
2	2	1.84064	1.70855	0.33217
2	3	1.92213	2.77062	0.24224
2	4	1.82419	3.92723	0.19028
2	5	1.85213	5.21860	0.26392
2	6	1.86529	5.99099	0.13501
3	1	2.71285	1.06293	0.29396
3	2	2.87879	1.78295	0.24860
3	3	2.82174	2.97098	0.18061
3	4	2.93526	3.85277	0.16084
3	5	2.83766	5.20529	0.26172
3	6	2.94899	6.00017	0.05101
4	1	4.11097	0.72994	0.29197
4	2	3.84531	1.81031	0.24477
4	3	3.94702	2.87153	0.13897
4	4	3.93816	3.87174	0.14239
4	5	3.80987	5.05585	0.19816
4	6	3.97215	5.95944	0.04920
5	1	4.96383	0.82774	0.17602
5	2	5.05384	1.80475	0.20254
5	3	4.98699	2.79783	0.20259
5	4	4.91286	3.92732	0.11347
5	5	4.87831	5.00669	0.12187
5	6	4.89946	6.05509	0.11464
6	1	6.15813	0.75638	0.29044

ตารางที่ จ.6 การทดลองการระบุตำแหน่งของตัวรับสัญญาณในกล่องบรรจุที่มีช่องเปิดสำหรับ
สายอากาศใส่ในกระเป๋ากางเกง (ต่อ)

พิกัดจริง		พิกัดที่ได้จากการประมาณ		ความคลาดเคลื่อน (เมตร)
x	y	$\hat{x}$	$\hat{y}$	
6	2	6.11630	1.82664	0.20876
6	3	6.07108	2.83954	0.17550
6	4	5.98032	3.84339	0.15784
6	5	5.83504	5.02151	0.16636
6	6	5.94725	6.08830	0.10286
Average				0.19501

ภาคผนวก ฉ
การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

ปานทิพย์ จันทร์สมุด, ต້องยศ แซ่มซ้อย และ อธิพงศ์ สุริยา. การศึกษาและพัฒนาระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำ. ใน **การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 44 (NGRC 44) 2017**; 19-20 ตุลาคม; อุบลราชธานี, ประเทศไทย.

ปานทิพย์ จันทร์สมุด, สดใส วิเศษสุด และ อธิพงศ์ สุริยา. การออกแบบการทดลองและหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10 (EENET 2018)**; 1-3 พฤษภาคม; กาญจนบุรี, ประเทศไทย.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวปานทิพย์ จันทร์สมุด
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2554-2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยบูรพา
ประวัติการทำงาน	เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2558 - เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2558 ตำแหน่งวิศวกร แผนกการผลิต (Production) บริษัทนิเด็ค อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดปทุมธานี