

เทคนิคการปรับเทียบการหาตำแหน่งแถบกว้างยิ่งโดยการปรับ
ความละเอียดทางความถี่ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

CALIBRATION TECHNIQUES OF UWB LOCALIZATION
BY USING FREQUENCY SWEEP OF VNA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559
KMITL-2016-EN-M-010-194

เทคนิคการปรับเทียบการหาตำแหน่งแถบกว้างยิ่ง โดยการปรับ
ความละเอียดทางความถี่ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

CALIBRATION TECHNIQUES OF UWB LOCALIZATION
BY USING FREQUENCY SWEEP OF VNA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559
KMITL-2016-EN-M-010-194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CALIBRATION TECHNIQUES OF UWB LOCALIZATION
BY USING FREQUENCY SWEEP OF VNA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-010-194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการปรับเทียบการหาตำแหน่งแถบกว้างยิ่งโดยการปรับความละเอียดทางความถี่ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

Thesis Title Calibration Techniques of UWB Localization by Using Frequency Sweep of VNA

นักศึกษา จำสืบเอกศุภชัย มณฑา

รหัสประจำตัว 55611956

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-010-194

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.ประยูทธ	อัครเอกมาลิน	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกุล	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาศิพงษ์	
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวภาค	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการปรับเทียบการหาตำแหน่งแถบกว้างยิ่งโดยการใช้ ความละเอียดทางความถี่ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ เวกเตอร์
นักศึกษา	จำสืบเอก ศุภชัย มณฑา
รหัสนักศึกษา	55611956
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สถาพร พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

เทคนิคการปรับเทียบการหาตำแหน่งระบบแถบกว้างยิ่งมีความสำคัญมาก และการนำมาใช้งานทั้งในสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคารและภายในอาคาร สำหรับสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคาร ระบบการหาตำแหน่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม อย่างไรก็ตาม การหาตำแหน่งภายในอาคารได้มีการวิจัยกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายด้าน เช่น การหาตำแหน่งของนักผจญเพลิง การขนส่ง และทางการแพทย์ เป็นต้น ระบบนี้ต้องการความแม่นยำสูงในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ดังนั้นเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจึงเข้ามามีความสำคัญสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร เนื่องจากมีข้อดีอยู่มากมาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาเทคนิคการปรับเทียบการหาตำแหน่งภายในอาคารในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตาโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งโดยใช้การปรับความละเอียดทางความถี่ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ และได้ทำการประเมินผลการเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration และ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และเวลาที่สัญญาณมาถึงจากสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ทำการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz ความแม่นยำและความเที่ยงตรงจะแสดงในรูปแบบของค่าความผิดพลาดของระยะทาง ซึ่งแต่ละกรณีจะแสดงเป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทาง.

Thesis	Calibration Techniques of UWB Localization By Using Frequency Sweep of VNA
Student	Suppachai Monta
Student ID.	55611956
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Dr. Sathaporn Promwong

ABSTRACT

The calibration techniques of UWB localization systems are used both outdoor and indoor environments. For outdoor environment, the popular use of localization system is the global position system (GPS). However, the indoor localization is widely researched because of its various applications such as firefighters tracking, logistics and military service. This system requires high accuracy in an indoor environment. Therefore, ultra wideband (UWB) technology has become an important for indoor localization because of its advantages. This thesis studies on UWB localization in line of sight (LOS) using ultra wideband signal which evaluated the comparison between trilateration and min-max techniques by using received signal strength (RSS) and time of arrival (TOA) parameters from ultra wideband signal. The vector network analyzer (VNA) was used to measure at the frequency ranging from 3 GHz to 11 GHz. The accuracy and precision are also shown in the term of distance error. The cumulative distribution function (CDF) of distance error.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้คำปรึกษาในเรื่องงานวิจัย จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ยังให้คำแนะนำในอีกหลายๆเรื่อง ข้าพเจ้าซาบซึ้งในพระคุณของอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำอบรมสั่งสอนด้านวิชาการ ทำให้ข้าพเจ้ามีความรู้ จนสามารถทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ทำให้การสอบวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ในห้องวิจัย UWBR5 ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำให้ความช่วยเหลือ มอบไมตรีจิตและมิตรภาพที่ดีแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ รวมถึงญาติพี่น้องของข้าพเจ้าทุกท่าน ที่เป็นคอยสนับสนุนการศึกษา และให้คำปรึกษาในทุก ๆ เรื่อง และป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ประโยชน์และคุณความดีที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้ามีความมุ่งหวังที่มอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จำสืบเอกศุภชัย มณฑา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตและขั้นตอนการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย.....	4
บทที่ 2 การหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่ง.....	6
2.2.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	6
2.2.2 การสื่อสารแถบกว้างยิ่ง.....	6
2.2.3 ข้อกำหนดของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	7
2.2.4 การประยุกต์เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	11
2.3 ขบวนการหาตำแหน่ง.....	13
2.3.1 เทคโนโลยีที่ใช้ในการหาตำแหน่งภายในอาคาร.....	13
2.3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่ง.....	14
2.3.3 เทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง.....	16
2.3 สรุป.....	18
บทที่ 3 หลักการวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง.....	19
3.1 กล่าวนำ.....	19
3.2 สัญญาณรูปคลื่นส่งของระบบแถบกว้างยิ่ง.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 สัญญาณรูปคลื่นที่รับได้แถบกว้างยิ่ง.....	21
3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง.....	22
3.4.1 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้.....	23
3.4.2 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง.....	23
3.5 หลักที่ใช้ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง.....	24
3.5.1 หลักการหาตำแหน่งด้วย Trilateration.....	24
3.5.2 หลักการหาตำแหน่งด้วย Min-Max.....	26
3.6 การวิเคราะห์ความผิดพลาดในการหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	27
3.7 สรุป.....	27
บทที่ 4 การหาตำแหน่งด้วยช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง.....	28
4.1 กล่าวนำ.....	28
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัด.....	29
4.2.1 เครื่องวิเคราะห์โคจรข่ายแบบเวกเตอร์.....	29
4.2.2 สายอากาศกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลอง.....	30
4.3 การวัดช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร.....	32
4.3.1 แบบจำลองการวัดและการทดลองวัดช่องสัญญาณสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร.....	32
4.4 สรุป.....	35
บทที่ 5 ผลการทดลองวิจัยและการประเมินผล.....	36
5.1 กล่าวนำ.....	36
5.2 การประเมินผลการทดลองวิจัยที่ได้จากการทดลองวัด.....	36
5.2.1 ความแรงของสัญญาณที่รับได้.....	37
5.2.2 เวลาที่สัญญาณมาถึง.....	39
5.3 ผลการทดลองวิจัยความผิดพลาดของระยะทางและฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดของระยะทาง.....	41
5.3.1 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งด้วย Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์ความแรงของสัญญาณที่รับได้.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.2 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งด้วย Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง.....	44
5.3.3 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งด้วย Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้.....	45
5.3.4 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งด้วย Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง.....	47
5.4 สรุป	47
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	49
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	49
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก.....	53
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	54
ประวัติผู้เขียน.....	55

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC [6].....	9
2.2 การจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคารที่ใช้ในยุโรป [8].....	10
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด.....	33
6.1 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทาง.....	50



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ขั้นตอนการวิจัย..... 4
2.1	การเปรียบเทียบช่วงความถี่และระดับความหนาแน่นกำลังงานของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งกับการสื่อสารแบบแถบแคบอื่นๆ [4]..... 7
2.2	ข้อกำหนดการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดในสหรัฐอเมริกา [7]..... 9
2.3	ข้อกำหนดการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งที่ในยุโรป [8].....10
2.4	การเปรียบเทียบโครงสร้างของระหว่างเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งกับเทคโนโลยีแถบแคบ [6] (ก) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบแคบ..... 12 (ข) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง..... 12
2.5	การเกิดคลื่นหลายวิถีในการสื่อสารไร้สาย [6] 13
2.6	การหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึง [3]..... 15
2.7	การหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง [3] 16
2.8	การหาตำแหน่งด้วยเทคนิค Trilateration [14].....18
3.1	ขบวนการวิจัยการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง..... 20
3.2	สัญญาณรูปคลื่นส่งแบบแถบกว้างยิ่ง..... 21
3.3	สเปกตรัมสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง..... 21
3.4	รูปคลื่นของสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่ง..... 22
3.5	หลักการหาตำแหน่งแบบ Trilateration..... 24
3.6	หลักการหาตำแหน่งแบบ Min-Max [14]..... 27
4.1	ขั้นตอนการทดลองวัดและการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง..... 29
4.2	เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (VNA) 30
4.3	โครงสร้างและขนาดสายอากาศกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัด [20-21] 31
4.4	S11 คุณสมบัติของสายอากาศกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัด [20-21]..... 31
4.5	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัด [20-21]... 32
4.6	แบบจำลองการทดลองวัดในมุมมองด้านบน..... 34
4.7	รูปแบบการทดลองวัดในมุมมองด้านข้าง..... 34
4.8	สถานที่ทำการทดลองวัดของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง..... 35
4.9	การวางสายอากาศรับ-ส่ง..... 35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	ขบวนการประเมินผลด้วยการเปรียบเทียบในการหาตำแหน่งที่ผิดพลาดของระยะทาง..... 37
5.2	ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 1..... 37
5.3	ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 2..... 38
5.4	ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 3..... 39
5.5	เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 1..... 40
5.6	เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 2..... 40
5.7	ที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 3..... 41
5.8	ขบวนการการแสดงความผิดพลาดของระยะทาง..... 42
5.9	ความผิดพลาดของระยะทางตามแบบจำลองการวัดของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้..... 43
5.10	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้..... 43
5.11	ความผิดพลาดของระยะทางตามแบบจำลองการวัดของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง..... 44
5.12	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง..... 45
5.13	ความผิดพลาดของระยะทางตามแบบจำลองการวัดของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้..... 46
5.14	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความของสัญญาณที่รับได้..... 46
5.15	ความผิดพลาดของระยะทางตามแบบจำลองการวัดของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง..... 47
5.16	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง..... 48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีความจำเป็นที่ต้องรู้ตำแหน่งสถานที่โดยการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ทางการสื่อสารระหว่างกันได้รับความสนใจอย่างมาก และได้มีการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย อีกประการหนึ่งจะเห็นได้เทคโนโลยีการสื่อสารทำให้มนุษย์มีความสะดวกสบาย และดำรงชีวิตได้ง่ายขึ้น โดยเทคโนโลยีการสื่อสารมีทั้งแบบมีสาย (Wire) และแบบไร้สาย (Wireless) และการประยุกต์ใช้งานในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้มีการนำมาใช้งานกันอย่างมากมาย เนื่องจากข้อดีของเทคโนโลยีแบบไร้สาย คือ ลดต้นทุนในการใช้สายเป็นตัวกลางในการสื่อสาร และมีความสะดวกในการใช้งาน ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เช่น การสื่อสารในเครือข่ายเซลลูลาร์ การสื่อสารผ่านดาวเทียม และการสื่อสารโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ เป็นต้น เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น การสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในเครือข่ายเซลลูลาร์ การแพร่ภาพและเสียงผ่านดาวเทียม การรับส่งข้อมูลไร้สายผ่านอุปกรณ์บลูทูธ และการหาตำแหน่งแบบไร้สาย เป็นต้น จึงกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเป็นส่วนหนึ่งในการดำรงชีวิตของมนุษย์แล้ว

การหาตำแหน่งเป็นการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย ในปัจจุบันการหาตำแหน่งได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากประโยชน์ของการหาตำแหน่ง คือ สามารถทราบถึงตำแหน่งของสิ่งที่ต้องการหาตำแหน่ง ทำให้สามารถติดตามตำแหน่งหรือทราบตำแหน่งของสิ่งที่ต้องการได้ตลอดเวลา การประยุกต์ใช้งานการหาตำแหน่ง เช่น การหาตำแหน่งของรถยนต์ จะช่วยในเรื่องของการจราจรรถยนต์ การหาตำแหน่งของสินค้า การหาตำแหน่งของสัตว์เลี้ยง เป็นต้น เมื่อแบ่งการหาตำแหน่งตามลักษณะพื้นที่ที่ใช้งานหรือภาวะแวดล้อม จะแบ่งได้เป็น การหาตำแหน่งภายในอาคาร และการหาตำแหน่งภายนอกอาคาร การหาตำแหน่งโดยทั่วไปจะใช้การหาตำแหน่งด้วยดาวเทียม (Global Position System: GPS) ซึ่งสามารถใช้สำหรับการหาตำแหน่งภายนอกอาคารได้ แต่เมื่อพิจารณาการหาตำแหน่งภายในอาคารจะไม่สามารถใช้การหาตำแหน่งด้วยดาวเทียมได้ เนื่องจากภายในอาคารมีปัญหาเรื่องการรับสัญญาณดาวเทียม จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายอื่น ๆ มาใช้ เช่น เทคโนโลยีซิกบี เทคโนโลยีบลูทูธ เทคโนโลยีการระบุตัวตนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Identification: RFID) และเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีที่ได้กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นเทคโนโลยีแบบแถบแคบ ซึ่งมีแบนด์วิดท์ที่แคบ จึงให้ความแม่นยำในการหาตำแหน่งในระดับหนึ่ง [1], [2] เนื่องจากพื้นที่ภายในอาคารมีขนาดที่จำกัด การหาตำแหน่งภายในอาคารจึงต้องการความแม่นยำเป็นอย่างมาก ดังนั้นเทคโนโลยีแถบกว้างจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ เพราะเทคโนโลยีแถบกว้างยังมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ทำให้พัลส์แคบมากหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ามีความละเอียดทางเวลาสูงมาก ซึ่งเมื่อนำมาใช้งานในการหาตำแหน่งจะทำให้มีความแม่นยำเป็นอย่างมาก

เทคโนโลยีแถบกว้างยังเป็นการสื่อสารระยะใกล้ความเร็วสูง โดยคณะกรรมการกิจการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission: FCC) [3] ได้อนุญาตให้อุปกรณ์สื่อสารใช้เทคโนโลยีแถบกว้างได้ในปี ค.ศ. 2002 มีการนำมาใช้งานในเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Wireless Personal Area Networks: WPANs) และประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น ใช้ในทางการแพทย์ ใช้ในระบบเรดาร์ระยะใกล้ และใช้ในการรับส่งข้อมูล เป็นต้น โดยสัญญาณแถบกว้างยังมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากในโดเมนทางความถี่ และมีพัลส์ที่แคบมากในโดเมนทางเวลา ทำให้มีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงมาก สามารถคาดคะเนเวลาที่สัญญาณมาถึงของวิถีแรกได้อย่างแม่นยำ ซึ่งทำให้การหาตำแหน่งมีความแม่นยำเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังขจัดปัญหาที่เกิดจากองค์ประกอบของคลื่นหลายวิถี (Multipath Component: MPC) และอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยังใช้พลังงานต่ำอีกด้วย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีแถบกว้างยังมีความเหมาะสมสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารเป็นอย่างยิ่ง

การหาตำแหน่งจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่ง ซึ่งเทคนิคการหาตำแหน่งมีอยู่หลายแบบ คือ การพิจารณาแบบรูปของตำแหน่ง, Trilateration, Weight Centroid, Trilateration และ Min-Max เช่นเดียวกับพารามิเตอร์ก็มีอยู่หลายแบบ คือ ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง (Time difference of arrival: TDOA), มุมที่สัญญาณมาถึง (Angle of arrival: AOA), ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Received signal strength: RSS) และเวลาที่สัญญาณมาถึง (Time of arrival) [3] โดยพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นการพิจารณาความต่างของเวลา มุม กำลัง และเวลาที่มาถึงของสัญญาณ ตามลำดับ ซึ่งเทคนิค เมื่อนำเทคโนโลยีแถบกว้างมาใช้กับเทคนิคและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่งเหล่านี้ จะทำให้การหาตำแหน่งมีความแม่นยำมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้าง มีการศึกษาวิจัยในการหาตำแหน่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารเป็นที่น่าสนใจยิ่ง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคโนโลยีสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่ง ศึกษาการประเมินผลโดยการเปรียบเทียบการหาตำแหน่งโดยใช้หลักการหรือเทคนิค Trilateration และ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสัญญาณแถบกว้างยิ่งในสภาวะที่มองเห็นระดับสายตา (Line of sight: LOS) โดยได้ออกแบบจำลองการวัด และทดลองวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งเพื่อนำมาใช้ในการหาตำแหน่ง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการวิเคราะห์ผล และประเมินผลความผิดพลาดโดยการเปรียบเทียบตามวิธีการที่เหมาะสมในการหาตำแหน่งด้วย Trilateration และ Min-Max

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การหาตำแหน่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารมีความต้องการความแม่นยำในการหาตำแหน่งเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประเมินผลของการหาตำแหน่งภายในอาคารในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตาโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเป็นประเมินผลประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งโดยการเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration และเทคนิค Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสัญญาณแถบกว้างยิ่งในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตา เนื่องจากสัญญาณแถบกว้างยิ่งมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก และมีพัลส์ที่แคบมากจึงทำให้สัญญาณแถบกว้างยิ่งมีความละเอียดทางเวลามาก สามารถแยกกำลัง และเวลาของสัญญาณได้ง่าย จึงทำให้การหาตำแหน่งมีความแม่นยำมากด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

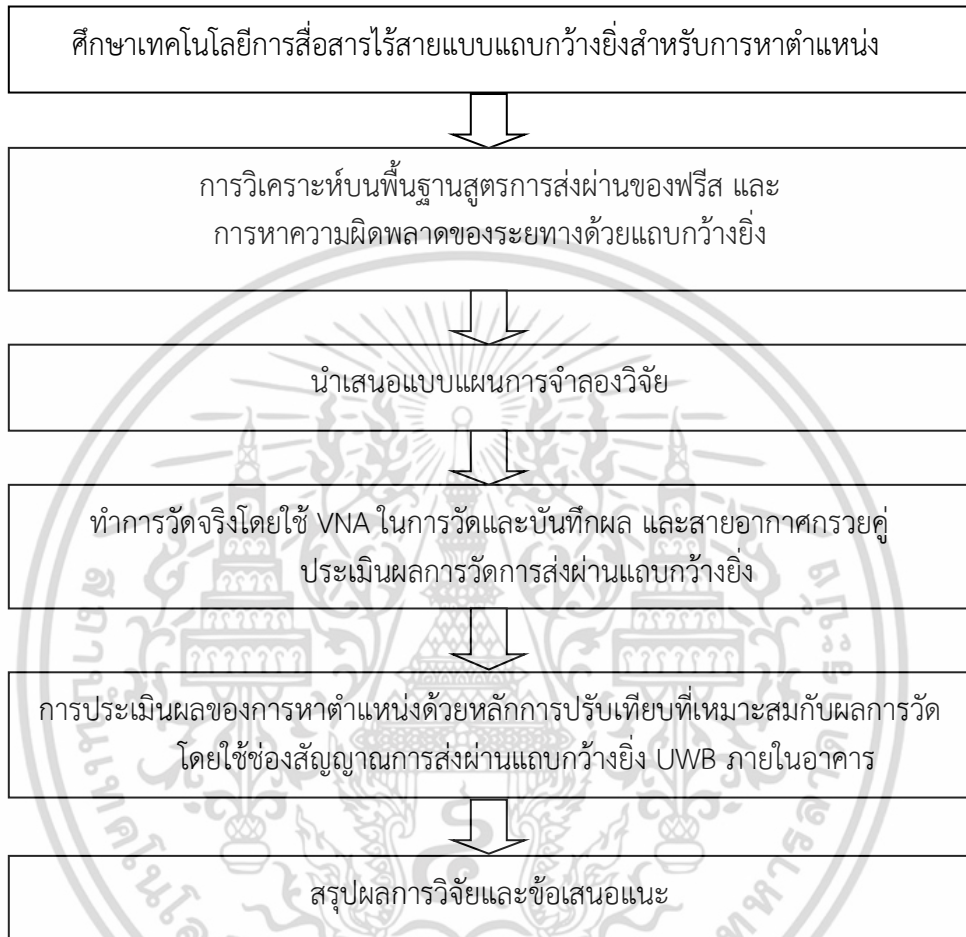
1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

การศึกษาการหาตำแหน่งภายในอาคารแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตา ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งเป็นคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม โดยทำการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง แล้วนำมาหาสัญญาณที่รับได้เพื่อใช้วิเคราะห์หาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง แล้วนำพารามิเตอร์ทั้งสองมาคำนวณหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ จากนั้นจะคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max ซึ่งจะวิเคราะห์ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งในรูปแบบของค่าความผิดพลาดในทางระยะทาง ข้อมูลที่ได้จากราวัดจริง

1.5 ขอบเขตและขั้นตอนการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปรียบเทียบการวัดของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้ช่องการส่งผ่านสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งได้ทำการประเมินผลของการหาตำแหน่งโดยการเปรียบเทียบระหว่างเทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสัญญาณแถบกว้างยิ่งในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตา ได้ทำการออกแบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคาร ซึ่งได้กำหนดให้มีสายอากาศส่ง 3 อัน กำหนดสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม โดยใช้ช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz ทำการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งตามแบบจำลองการวัด โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ จากนั้นนำมาหาสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่งมาคำนวณหาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง แล้วนำพารามิเตอร์ทั้งสองมาคำนวณหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ จากนั้นจะนำระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับมาคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้หลักการหรือเทคนิค Trilateration และ Min-Max โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งจะวิเคราะห์ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งในรูปแบบของค่าความผิดพลาดของระยะทาง ซึ่งจะแสดงผลการทดลองเป็นค่าความผิดพลาดของระยะทางในแนวแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด และแสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function: CDF) ของค่าความผิดพลาดของระยะทาง และสุดท้ายจะสรุปผลการทดลองวิจัย ซึ่งขั้นตอนการวิจัยแสดงได้รูปที่ 1.1

แบบแผนการศึกษาของงานวิจัย



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการวิจัย

1.6 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเนื้อหาการศึกษาอยู่ทั้งหมด 6 บท ซึ่งรายละเอียดแต่ละบทมีดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นมา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขต และขั้นตอนการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง และทฤษฎีการหาตำแหน่ง ในส่วนของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะกล่าวถึงประวัติ หลักการพื้นฐาน ข้อกำหนด รูปแบบของสัญญาณ และจุดเด่น ในส่วนของทฤษฎีการหาตำแหน่ง จะกล่าวถึงเทคโนโลยี พารามิเตอร์ และเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง สัญญาณส่ง และสัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่ง พารามิเตอร์ และเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง และสุดท้ายจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความแม่นยำในการหาตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 แบบแผนการทดลองวิจัยการหาตำแหน่ง และทำตามวิธีเปรียบเทียบเทคนิคที่นำเสนอ และการหาตำแหน่ง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัด และแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณการส่งผ่าน แถบกว้างยิ่ง

บทที่ 5 ผลการทดลองวิจัยและการประเมินผล ซึ่งจะแสดงในรูปแบบพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองวัดจริง และแสดงผลการทดลองในรูปแบบของความผิดพลาดของระยะทางโดยใช้การเปรียบเทียบด้วยวิธีการของ Trilateration และค่า Min-Max

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

2.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra-wideband: UWB) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สายประเภทต่างๆ มากขึ้น เนื่องจากเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งมีความแตกต่างจากเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบอื่นๆ ซึ่งเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งใช้สัญญาณพัลส์ในการรับส่งข้อมูลที่มีช่วงเวลาแคบมากๆ ในระดับนาโนวินาที (Nano second: ns) หรือพิโควินาที (Pico second: ps) สัญญาณจะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ทำให้ความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูง สามารถส่งข้อมูลได้เป็นปริมาณมาก และสัญญาณถูกรบกวนได้ยาก ใช้ช่วงความถี่ความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz มีแบนด์วิดท์ เท่ากับ 7.5 GHz [4] โดยมีอัตราการรับส่งข้อมูลที่ 480 Mb/s ในระยะ 2 เมตร และ 110Mb/s ในระยะ 10 เมตร ซึ่งอุปกรณ์ของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีแบบแถบแคบจะมีราคาถูก ขนาดเล็กและใช้กำลังงานต่ำ เนื่องจากสัญญาณแถบกว้างยิ่งไม่จำเป็นต้องอาศัยคลื่นพาห้ในการมอดูเลต จึงทำให้อุปกรณ์รับส่งข้อมูลของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์มอดูเลตและดีมอดูเลต โดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา [5] ได้กำหนดระดับความหนาแน่นของกำลังงานต่อความถี่ของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งไว้ไม่เกิน -41.3 dBm/MHz

จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระยะใกล้ความเร็วสูง อุปกรณ์ในการรับส่งข้อมูลมีขนาดเล็ก ใช้กำลังงานต่ำ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล ซึ่งเป็นการสื่อสารระยะใกล้ จะทำให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นจะพบว่าปัจจุบันเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งมีการนำมาประยุกต์ใช้งานมากมายหลากหลายด้าน

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง และทฤษฎีในการหาตำแหน่ง โดยในส่วนของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งจะกล่าวถึง ประวัติ และความเป็นมาของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง ข้อกำหนดของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง จุดเด่นของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง และการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง ในส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง ซึ่งจะกล่าวถึงประเภทของระบบการหาตำแหน่ง พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่ง และเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง

2.2 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่ง

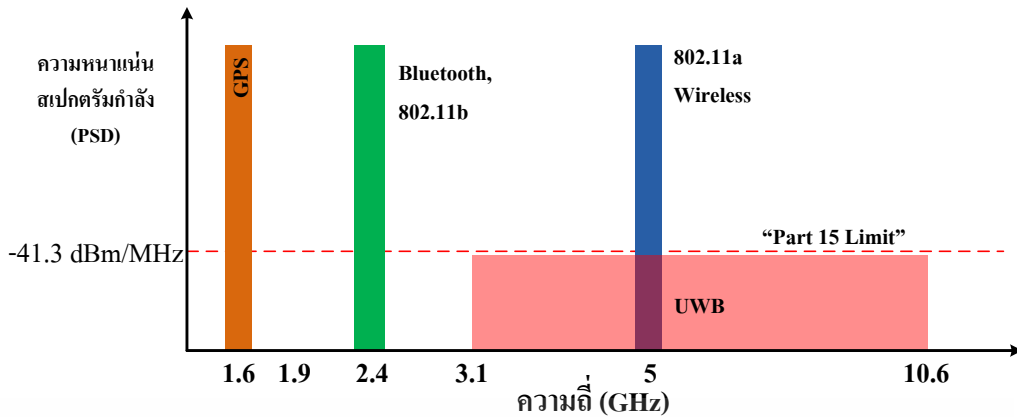
2.2.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

ในอดีตการสื่อสารโดยทั่วไปจะใช้สายเป็นตัวกลางในการสื่อสาร ซึ่งหากมีระยะทางในการสื่อสารไกลย่อมมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น จึงได้มีการคิดค้นตัวกลางในการสื่อสารโดยปราศจากสายขึ้นมา หากจะย้อนไปสู่ศตวรรษที่ผ่านมา มีนักวิทยาศาสตร์มากมายได้พยายามคิดค้นการสื่อสารไร้สายขึ้นมา เริ่มจากปี ค.ศ. 1873 แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) ได้ค้นพบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วเท่ากับคลื่นแสงและสามารถส่งสัญญาณผ่านอากาศได้โดยปราศจากสาย จากนั้นในปี ค.ศ. 1886 เฮิร์ตซ์ (Heinrich Rudolf Hertz) ได้พิสูจน์ทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ว่าเป็นความจริง โดยเทคนิคการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งได้ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1901 โดยมาโคนี (Guglielmo Marconi) ได้ทำการทดลองส่งสัญญาณวิทยุอิมพัลส์ (Impulse radio) เพื่อสื่อสารโดยใช้รหัสมอร์ส (Morse code) ข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกโดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณสปาร์คแกป (Spark gap generator) [6] จากนั้นทางทหารได้พัฒนา และมีการนำเครื่องส่งสัญญาณที่ส่งสัญญาณแบบพัลส์มาใช้สำหรับอุปกรณ์เรดาร์เพื่อตรวจหาวัตถุหรือศัตรูทางการทหาร โดยในปี ค.ศ. 1962 ได้มีการสร้างเครื่องส่งวิทยุแถบกว้างยิ่งและได้ถูกนำไปใช้งานในการส่งสัญญาณในโครงข่ายไมโครเวฟในปี ค.ศ. 1963-1966 เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งได้มีการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์มากขึ้น ด้วยความสามารถในการรับส่งข้อมูลได้เป็นปริมาณมาก ใช้กำลังงานต่ำ ราคาถูก และทนทานต่อสัญญาณรบกวน โดยในปี ค.ศ. 1998 ได้เพิ่มมีการพิจารณามาตรฐาน และข้อกำหนดของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง ในปี ค.ศ. 2002 คณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา ได้มีการประกาศมาตรฐาน และข้อกำหนดสำหรับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งโดยได้กำหนดช่วงความถี่ และกำลังงานที่ใช้สำหรับแพร่กระจายคลื่นสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

2.2.2 การสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

แถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้าง (Wide band communication) จะมีลักษณะที่แตกต่างจากการสื่อสารไร้สายแบบแถบแคบ (Narrow band Communication) คือ การรับส่งสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งจะไม่ใช้คลื่นพาห์ (Carrier less) ในการผสมสัญญาณเหมือนกับการสื่อสารไร้สายแบบแถบแคบ นอกจากนี้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะใช้สัญญาณส่งที่มีรูปคลื่นเป็นพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากในระดับนาโนวินาทีหรือพิโควินาทีในการรับส่งสัญญาณ ซึ่งในสัญญาณในอุดมคติ คือสัญญาณแบบอิมพัลส์ (Impulse signal) [4] โดยอัตราการส่งพัลส์ในระดับหลายร้อยล้านพัลส์ต่อวินาที สัญญาณจะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก จึงทำให้มีความหนาแน่นแถบกำลังงาน (Power spectral density: PSD) กว้างมาก แผ่กระจายครอบคลุมช่วงความถี่ในระดับกิกะเฮิร์ต (GHz) ซึ่งแถบความถี่จะไปซ้อนทับกับการสื่อสารไร้สายแบบอื่นๆ ด้วยเหตุนี้จึงมีข้อกำหนดของคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาข้อที่ 15 กำหนดให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งใช้ช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดยได้อนุญาตให้การแพร่กระจายกำลังงานไม่เกิน -41.3dBm/MHz ด้วยเหตุนี้ระบบนี้จะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงทำให้การรับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงแต่เนื่องจากมีข้อกำหนดให้ใช้กำลังงานที่ใช้ในการส่งที่ต่ำ ทำให้ระยะทางในการสื่อสารถูกจำกัดในระยะไม่เกิน 10 เมตร ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานในโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล ในรูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบช่วงความถี่และระดับความหนาแน่นกำลังงานของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งที่ใช้แถบความถี่กว้างมากกับการสื่อสารแบบแถบแคบอื่นๆ โดยแกน x คือช่วงความถี่ที่ใช้งานของการสื่อสารแบบแถบกว้าง และแกน y แสดงระดับความหนาแน่นกำลังงาน



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบแถบกำลังงานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งและเทคโนโลยีอื่นๆ [4]

จะเห็นได้ว่าการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งและการสื่อสารแบบแถบอื่น ๆ มีความแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น การสื่อสารแบบแถบกว้างตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ซึ่งสามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็ว 480 Mb/s ในระยะ 2 เมตร และ 110 Mb/s ในระยะ 10 เมตร ในขณะที่การสื่อสารแบบแถบแคบแบบ WiFi ตามมาตรฐาน IEEE 802.11a สามารถรับส่งข้อมูลได้สูงสุดที่ 54 Mb/s จะพบว่า การสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งจะให้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลมากกว่า และยังใช้กำลังงานในการส่งต่ำกว่าการสื่อสารแบบแถบแคบอีกด้วย

2.2.3 ข้อกำหนดของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

การสื่อสารไร้สายมีการใช้ความถี่หลายแบบ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องจัดสรรคลื่นความถี่ในการใช้งานเพื่อจะได้ไม่รบกวนกัน โดยการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งได้มีการจำกัดข้อกำหนดในการใช้งานช่วงความถี่ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งโดยสหรัฐอเมริกาจะมีคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐเป็นผู้กำหนด เช่นเดียวกับยุโรปจะมีสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European telecommunications standards institute: ETSI) ที่มีการกำหนดช่วงความถี่ในการใช้งานเช่นเดียวกัน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงข้อกำหนดของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกาและยุโรป

2.2.3.1 ข้อกำหนดของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา

ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีองค์กรที่มีหน้าที่ในการจัดสรรคลื่นความถี่ในการสื่อสารคือคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา ซึ่งคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกามีหน้าที่กำหนดต่างๆเกี่ยวกับการใช้งานการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งด้วย โดยได้ออกประกาศเกี่ยวกับการตรวจสอบ (Notice of Inquiry: NOI) ในปี ค.ศ. 1998 ซึ่งมีกลุ่มผู้สนับสนุนในระบบเดิมได้ต่อต้านการนำระบบแถบกว้างยิ่งมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากผลกระทบจากการแทรกสอดในแถบความถี่อื่นๆ ในขณะที่องค์กรบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal aviation administration: FAA) ก็ได้แสดงถึงความเป็นห่วงต่อการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบความปลอดภัยในกิจการการบิน ในวันที่ 14 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2002 คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้ออกข้อกำหนดสำหรับเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง เป็นการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ด้วย ในวันที่ 22 เมษายน ค.ศ. 2002 รายงานล่าสุดของคำประกาศและระเบียบการฉบับที่หนึ่งได้เผยแพร่ต่อสาธารณชน ซึ่งในเอกสารได้กล่าวถึงการอนุญาตให้ใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่ง 3 ประเภท คือ ระบบตรวจจับภาพระบบเรดาร์ในยานพาหนะ ระบบการวัด และการสื่อสาร ซึ่งกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการใช้งานประเภทต่างๆ โดยคณะกรรมการกิจการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดระดับความหนาแน่นของกำลังส่งต่อความถี่ในการส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งไว้ไม่เกิน -41.3dBm/MHz ซึ่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งต้องมีแบนด์วิดท์ไม่น้อยกว่า 500 MHz หรือมีอัตราส่วนของแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth) ไม่น้อยกว่า 0.2 โดยแบนด์วิดท์ f_b และอัตราส่วนแบนด์วิดท์ BW_f นิยามได้ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) [7]

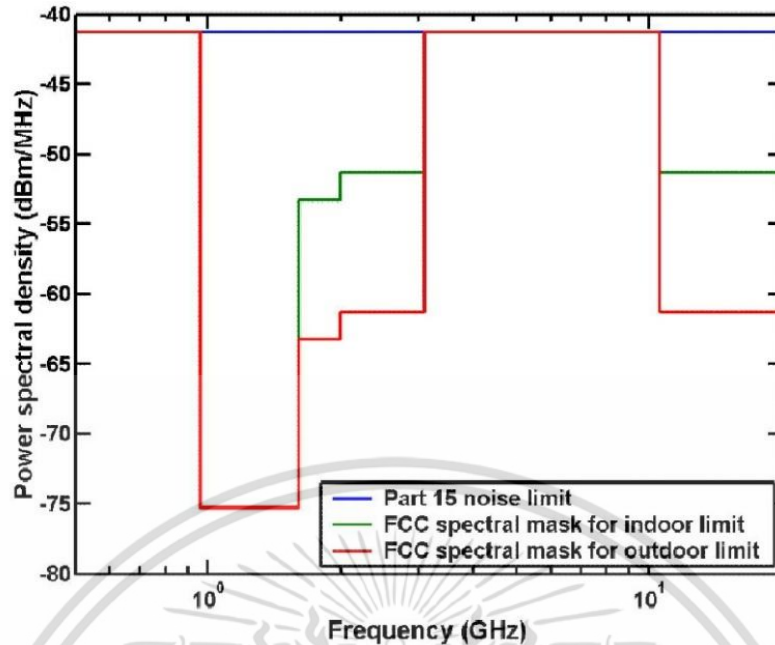
$$f_b = f_H - f_L \quad (2.1)$$

$$BW_f = 2 \left(\frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \right) \times 100\% \quad (2.2)$$

ข้อจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในแต่ละช่วงความถี่ในการใช้งานภายใน และภายนอกอาคารที่กำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา จะแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 การจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งภายใน และภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC [6]

ความถี่ (MHz)	ภายในอาคาร	ภายนอกอาคาร
	EIRP in dBm	EIRP in dBm
960 – 1610	-75.3	-75.3
1610 – 1990	-53.3	-63.3
1990 - 3100	-51.3	-61.3
3100 - 10600	-41.3	-41.3
สูงกว่า 10600	-51.3	-61.3



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับภายใน และภายนอกอาคาร [7]

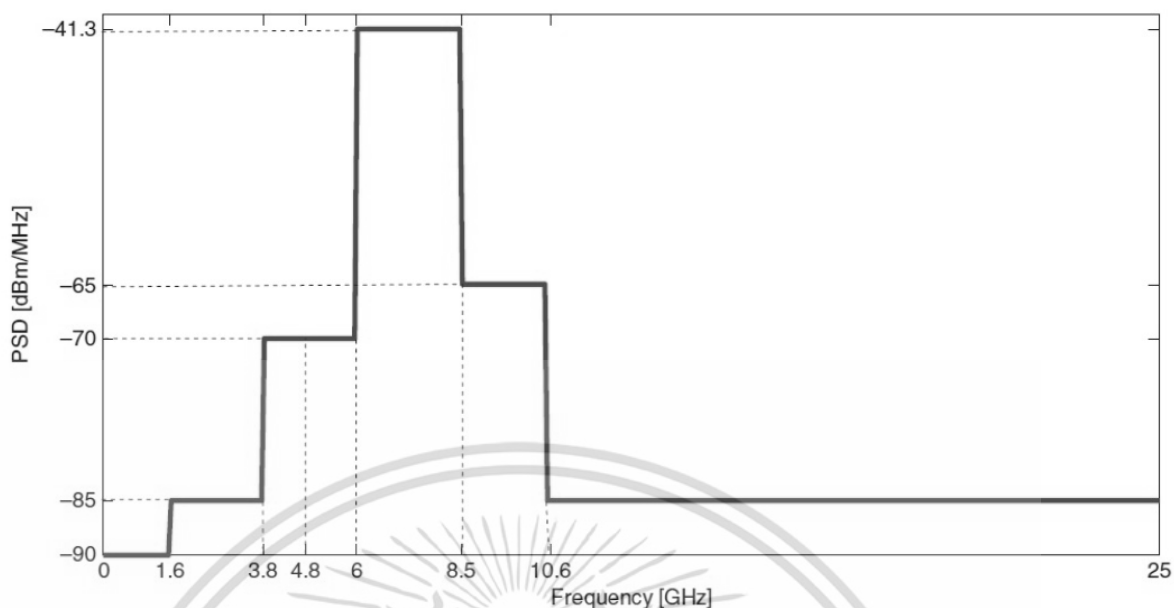
2.2.3.2 ข้อกำหนดของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป

ในยุโรปองค์กรที่มีหน้าที่ในการจัดสรรคลื่นความถี่ รวมถึงออกกฎข้อบังคับสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งคือ สถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป โดยในปี ค.ศ. 2003 สหภาพยุโรปได้มอบหมายให้สถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป กำหนดมาตรฐานให้ครอบคลุมการใช้งานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ซึ่งผลสรุปก็คือคณะกรรมการการสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ (ECC) มีข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งภายในอาคารเท่านั้น ซึ่งข้อจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในแต่ละช่วงความถี่ ในการใช้งานภายในอาคารที่กำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ จะแสดงในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 การจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคารที่ใช้ในยุโรป [8]

ความถี่	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น EISR
ต่ำกว่า 1.6 GHz	-90 dBm/MHz
1.6 GHz -3.8 GHz	-85 dBm/MHz
3.8 GHz -4.8 GHz	-70 dBm/MHz
4.8 GHz – 6 GHz	-70 dBm/MHz
6 GHz – 8.5 GHz	-41.3 dBm/MHz
8.5 GHz -10.6 GHz	-65 dBm/MHz
สูงกว่า 10.6 GHz	-85 dBm/MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ข้อกำหนดการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป [8]

2.2.4 จุดเด่นของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะมีลักษณะการรับส่งสัญญาณแบบพัลส์ในช่วงเวลาที่แคบมาก ซึ่งแตกต่างจากเทคโนโลยีแถบแคบ ซึ่งหากนำมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะมีจุดเด่นหลายประการ [6] ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงจุดเด่นของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.4.1 มีความจุของช่องสัญญาณมาก

ความจุของช่องสัญญาณหรืออัตราการรับส่งข้อมูลจะบอกถึงขนาดของข้อมูลทั้งหมดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณการสื่อสารต่อหนึ่งวินาที สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งมีแบนด์วิดท์ที่กว้างจะทำให้มีจุดเด่น คือการทำให้มีความจุของช่องสัญญาณมากขึ้น ซึ่งขนาดของความจุช่องสัญญาณของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งจะสามารถพิจารณาได้จากสูตรของแฮนนอน (Hartley-Shannon) [6] ดังสมการที่ 2.3

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (2.3)$$

เมื่อ C คือค่าความจุของช่องสัญญาณ

B คือแบนด์วิดท์

SNR คืออัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

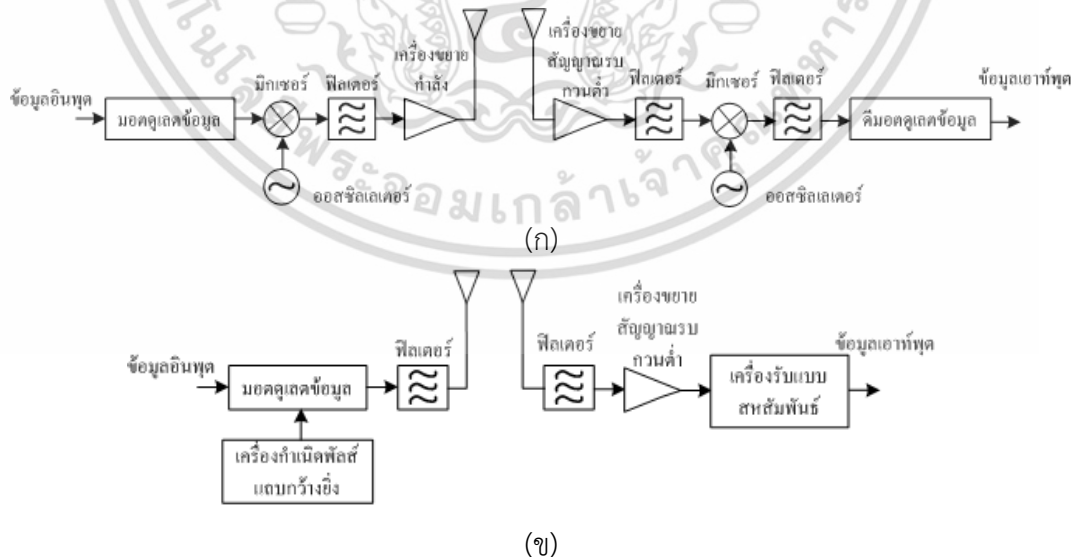
จากสมการจะพบว่าค่าความจุของช่องสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่มีแบนด์วิดท์มากถึง 7.5 GHz จะทำให้ค่าความจุของช่องสัญญาณมาก และมีอัตราการรับส่งข้อมูลในระดับหลายร้อยเมกะบิตต่อวินาที (Mbps) แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้จำกัดกำลังส่งของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไว้ จึงทำให้สามารถส่งข้อมูลได้ในระยะสั้นๆเท่านั้น ซึ่งทำให้เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งเป็นการสื่อสารระยะใกล้ความเร็วสูง

2.2.4.2 ใช้กำลังส่งต่ำ

ข้อกำหนดของคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดให้กำลังงานในการส่งสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไม่เกิน -41.3 dBm/MHz ซึ่งถือว่าเป็นระดับกำลังงานที่ต่ำมาก จะทำให้เทคโนโลยีนี้มีต้นทุนในการสร้างอุปกรณ์ มีขนาดเล็ก และใช้กำลังงานที่ต่ำ

2.2.4.3 เป็นเทคโนโลยีที่ไม่มีความซับซ้อนและต้นทุนต่ำ

ลักษณะเบสแบนด์ (Base band) ในการส่งสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะไม่เหมือนการส่งสัญญาณวิทยุของเทคโนโลยีแบบอื่นๆ โดยจะทำการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีช่วงเวลาน้อยมากๆ ซึ่งการแพร่กระจายสัญญาณไม่จำเป็นต้องอาศัยคลื่นพาห์ ทำให้ไม่ต้องมีการมอดูเลตสัญญาณ ข้อมูลเหมือนกับเทคโนโลยีแถบแคบ ดังนั้นการสื่อสารโดยปราศจากคลื่นพาห์หรือปราศจากการมอดูเลตสัญญาณจะทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีความต้องการอุปกรณ์ในการรับส่งสัญญาณน้อยกว่าการสื่อสารที่ต้องการคลื่นพาห์ ดังเช่น มอดูเลเตอร์ ดิมอดูเลเตอร์ มิกเซอร์ และออสซิลเลเตอร์ จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาจะทำให้โครงสร้างของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่า และมีราคาถูกกว่าเทคโนโลยีแถบแคบ โดยรูปที่ 2.4 จะแสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง และเทคโนโลยีแถบแคบ



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งและเทคโนโลยีแถบแคบ [6]

(ก) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบแคบ

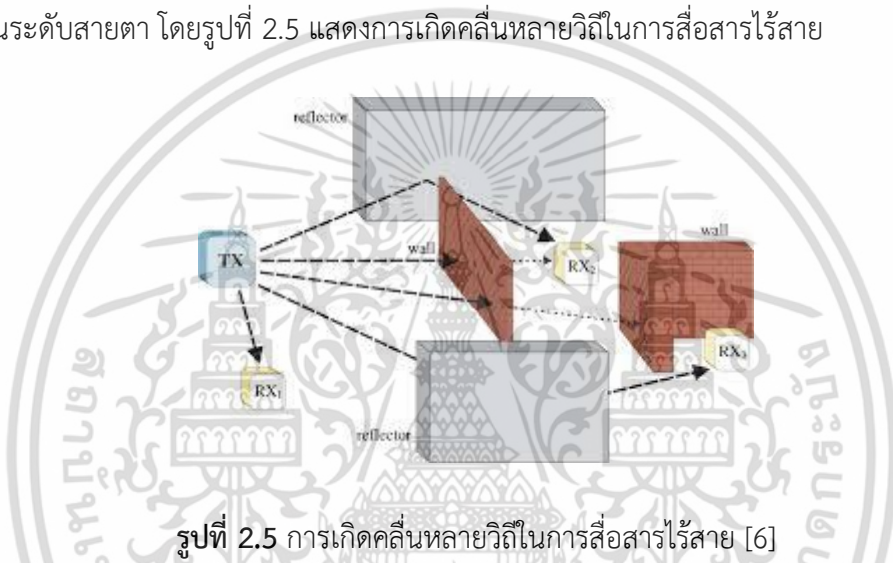
(ข) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4.4 มีความต้านทานต่อคลื่นหลายวิถี (Multipath)

การเกิดคลื่นหลายวิถีเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในระบบการสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะในสถานะแวดล้อมภายในอาคาร ซึ่งเป็นผลมาจากการสะท้อนของสัญญาณจากหลายๆทิศทางจากวัตถุต่างๆ เช่น ตู้ โต๊ะ เพดาน กำแพง เป็นต้น สายอากาศส่งที่แพร่กระจายสัญญาณไปยังสายอากาศรับโดยตรงจะเรียกว่า เส้นระดับสายตา (Line of sight: LOS) และสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนจากวัสดุต่างๆ จะเรียกว่า เส้นไม่เป็นระดับสายตา (Non line of sight: NLOS)

เทคโนโลยีแถบกว้างยังจะมีการส่งพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากๆ ทำให้เทคโนโลยีนี้ได้รับผลกระทบจากคลื่นหลายวิธีน้อยกว่า เนื่องจากช่วงเวลาในการส่งพัลส์มีช่วงเวลาน้อยมากในระดับนาโนวินาที หรือพิโควินาที ทำให้พัลส์ที่เกิดจากการสะท้อนมีโอกาสน้อยมากที่จะไปถึงพร้อมกับพัลส์ที่ส่งไปในระดับสายตา โดยรูปที่ 2.5 แสดงการเกิดคลื่นหลายวิถีในการสื่อสารไร้สาย



2.2.4.5 มีความละเอียดสูงในโดเมนทางเวลา

เนื่องจากเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยังมีลักษณะการส่งพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากๆ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ามีความละเอียดสูงในโดเมนทางเวลา ทำให้เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยังสามารถคำนวณเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อีกทั้งสัญญาณแบบแถบกว้างยังมีคุณสมบัติในการทะลุผ่านวัสดุได้ดี จึงมีความเหมาะสมที่จะมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบกำหนดตำแหน่งหรือระบบติดตาม (Tracking) เพราะจะทำให้ระบบเหล่านี้มีความแม่นยำเป็นอย่างมาก

2.3 ขบวนการหาตำแหน่ง

ในปัจจุบันมีการใช้งานการหาตำแหน่งกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการหาตำแหน่งมีประโยชน์ในระบุพิกัด หรือติดตามสิ่งที่เราต้องการทราบ เมื่อก้าวถึงการหาตำแหน่งภายในอาคารก็จะพบว่ามี การนำเอาเทคโนโลยีใหม่ๆ มาใช้งานมากมาย ยกตัวอย่างการใช้งานเช่น การระบุพิกัดของรถยนต์ การหาตำแหน่งของสินค้าภายในโกดัง และการหาตำแหน่งของนักผจญเพลิง [3] เป็นต้น ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงเทคโนโลยี พารามิเตอร์ และเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง

2.3.1 เทคโนโลยีที่ใช้ในการหาตำแหน่งภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารสามารถแบ่งประเภทตามเทคโนโลยีที่ใช้งานได้ 3 ประเภท คือ อินฟราเรด [9], ความถี่วิทยุ และอัลตราซาวด์ โดยแต่ละประเภทจะมีรายละเอียด ดังนี้

2.3.1.1 อินฟราเรด (Infrared) [10]

สัญญาณอินฟราเรดมีคุณสมบัติเหมือนกับแสงทั่วไปคือไม่สามารถเดินทางผ่านกำแพงหรือสิ่งกีดขวางได้ ดังนั้นจึงค่อนข้างมีข้อจำกัดของระยะการใช้งานในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร แต่อย่างไรก็ตามความเร็วในการแพร่สัญญาณสูง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระบบนี้ต้องการอุปกรณ์ที่มากกว่าระบบอัลตราซาวด์ และการรบกวนของแสงภายในอาคารจะมีผลต่อความถูกต้องของการตรวจจับสัญญาณ โดยทั่วไปแล้วอินฟราเรดจะมีระยะการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 5 เมตร และโดยปกติอุปกรณ์อินฟราเรดจะมีขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์อัลตราซาวด์

2.3.1.2 ความถี่คลื่นวิทยุ (Radio Frequency : RF) [10]

สัญญาณความถี่วิทยุสามารถเดินทางผ่านวัสดุภายในอาคารได้มาก ดังนั้นระบบนี้จึงมีระยะการใช้งานที่ดีภายในสภาพแวดล้อมภายในอาคารซึ่งความเร็วในการแพร่สัญญาณก็สูงเช่นเดียวกัน คือ ประมาณ 3×10^8 m/s และเป็นระบบที่ใช้ความถี่สาธารณะ โดยระบบนี้มีระยะการใช้งานที่กว้างกว่าระบบที่ใช้อินฟราเรด และอัลตราซาวด์

2.3.1.3 อัลตราซาวด์ (Ultrasound) [10]

แม้ว่าอัลตราซาวด์จะทำงานที่ย่านความถี่ต่ำ (40 kHz) เมื่อเปรียบเทียบกับสองระบบก่อนหน้านี้ โดยระบบนี้มีความแม่นยำที่ดีสำหรับตำแหน่งที่ตรวจจับที่มีความเร็วของการแพร่สัญญาณต่ำ (343 m/s) ส่วนข้อดีของระบบนี้ คือ ง่ายและราคาไม่แพง แต่อย่างไรก็ตามอัลตราซาวด์ ไม่สามารถเดินทางผ่านกำแพงได้แต่จะสะท้อนกับสิ่งกีดขวางภายในอาคารมาก โดยระบบนี้มีระยะการใช้งานประมาณ 3 เมตรถึง 10 เมตร และมีความละเอียด 1 เซนติเมตร ของการวัดระยะ ซึ่งอุณหภูมิการใช้งานมีผลต่อประสิทธิภาพของอัลตราซาวด์

2.3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่ง

ในการหาตำแหน่งนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจะขึ้นอยู่กับความต้องการด้านความเที่ยงตรง และข้อจำกัดของเครื่องรับส่งสัญญาณด้วย โดยทั่วไปจะมีการพิจารณาพารามิเตอร์ 4 แบบ คือ ค่าความแรงของสัญญาณรับได้ เวลาที่สัญญาณมาถึง ทิศทางที่สัญญาณมาถึง และความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.3.2.1 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ (Received signal strength: RSS) [3]

เป็นพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้ในการหาตำแหน่งโดยการพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ซึ่งถูกลดทอนเนื่องจากการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss attenuation) โดยการหาตำแหน่งจะนำค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ไปแปลงเป็นกำลังงานที่รับได้ และแปลงเป็นระยะทางระหว่างสายอากาศรับ และสายอากาศส่ง จากนั้นจะนำไปใช้คำนวณโดยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบเอกสาร์นี่เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

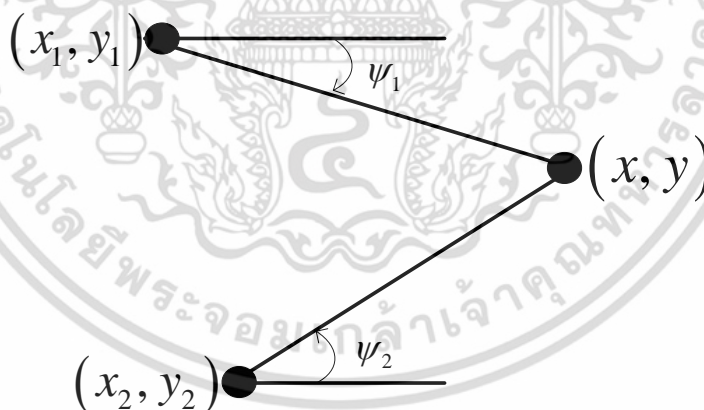
ต่างๆ อย่างไรก็ตามการหาตำแหน่งโดยอาศัยพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์การจางหลายวิถี (Multipath fading) และการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากสิ่งกีดขวาง (Shadowing) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ทำให้การหาตำแหน่งโดยวิธีนี้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

2.3.2.2 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง (Time of arrival: TOA) [3]

พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจะเป็นการพิจารณาเวลาที่สัญญาณจากภาคส่งเดินทางมาถึงภาครับ การหาตำแหน่งด้วยพารามิเตอร์นี้จะนำเวลาไปคำนวณหาระยะทางระหว่างภาคส่ง และภาครับเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งต่อไป ซึ่งหากสามารถวัดเวลาที่สัญญาณเดินทางได้อย่างแม่นยำก็จะทำให้การหาตำแหน่งมีความแม่นยำด้วย

2.3.2.3 พารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึง (Direction of arrival: DOA) [3]

พารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึงจะเป็นการพิจารณาทิศทางที่สัญญาณจากภาคส่งเดินทางมาถึงภาครับ โดยการคำนวณความแตกต่างเฟสของสัญญาณที่ไปถึงสายอากาศแต่ละตัวที่ใช้ อยู่ในชุดรับสัญญาณ การหาตำแหน่งโดยการพิจารณาพารามิเตอร์นี้จะต้องมีชุดสายอากาศที่ทำงานเหมือนกันทุกประการจำนวนหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า Phase array antenna ซึ่งต้องมีอย่างน้อย 2 อัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 จะพบว่า การหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึงทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูง และมีปัญหาความผิดพลาดจากปรากฏการณ์การกระจัดกระจาย (Scattering) ของคลื่นวิทยุอีกด้วย พารามิเตอร์นี้จึงไม่ค่อยนิยมนำมาใช้ในการหาตำแหน่ง

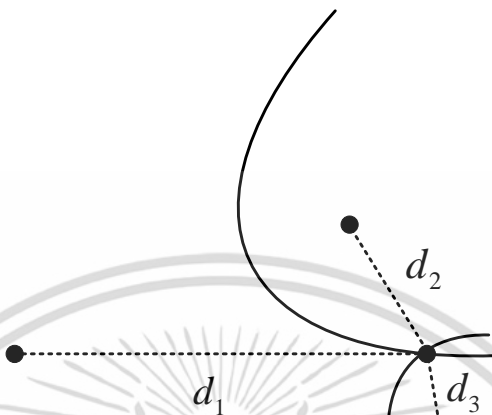


รูปที่ 2.6 หลักการหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึง [3]

2.3.2.4 พารามิเตอร์ของเวลาที่สัญญาณมาถึง (Time difference of arrival: TDOA) [3]

พารามิเตอร์ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึงจะคล้ายกับพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง โดยพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจะพิจารณาเวลาที่สัญญาณมาถึงจากแต่ละด้านส่ง ส่วนพารามิเตอร์ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึงจะวัดความต่างของเวลาในแต่ละคู่สถานีฐานแล้วนำไปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนเป็นกราฟไฮเปอร์โบลิก ซึ่งบอกถึงระยะห่างระหว่างคู่ของด้านส่ง ดังนั้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการจึงต้องใช้เส้นกราฟอย่างน้อย 2 เส้นมาตัดกัน ซึ่งเกิดจากด้านส่งอย่างน้อย 3 อัน แสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อนำพารามิเตอร์นี้มาใช้ภายในอาคารที่มีระยะทางที่สั้น ความต่างของเวลาที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณจะน้อยมากทำให้ยากต่อการหาตำแหน่ง



รูปที่ 2.7 หลักการหาตำแหน่งโดยการใช้พารามิเตอร์ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง [3]

2.3.3 เทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง

เมื่อได้พารามิเตอร์จากการวัดแล้ว การหาตำแหน่งจำเป็นจะต้องนำพารามิเตอร์เหล่านี้มาคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่ง ซึ่งเทคนิคการหาตำแหน่งจะมีรูปแบบ หรือขั้นตอนในการคำนวณหาตำแหน่งที่แน่นอนตั้งแต่ขั้นตอนแรกจนถึงขั้นตอนสุดท้ายที่จะได้ผลเป็นตำแหน่งที่ต้องการหา ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการหาตำแหน่ง 5 แบบ คือ เทคนิคการพิจารณาแบบรูปตำแหน่ง, เทคนิค Triangulation, เทคนิค Weighted centroid, เทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max ซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

2.3.3.1 เทคนิคการพิจารณาแบบรูปตำแหน่ง [11]

วิธีการพิจารณาแบบรูปตำแหน่ง จะมีลักษณะคล้ายกับวิธีการสแกนลายนิ้วมือของมนุษย์ โดยที่จะเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการนำมาพิจารณา และนำมาเปรียบเทียบความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งนั้นๆ ที่ได้ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์นั้นๆ ไว้ในฐานข้อมูลก่อนหน้าแล้ว หลังจากนั้นทำการแสดงตำแหน่งที่เปรียบเทียบแล้วใกล้เคียงที่สุดโดยวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สถานีฐานมากเหมือนวิธีอื่น ๆ เพียงแค่มีสถานีฐานอย่างน้อย 1 ตัวก็สามารถหาตำแหน่งได้ ข้อดีของการใช้วิธีนี้ในการหาตำแหน่งคือต้องใช้เวลามากในการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการพิจารณาไว้ในฐานข้อมูล กรณีที่บริเวณที่ต้องการหาตำแหน่งมีขนาดใหญ่ ดังนั้นวิธีการนี้จึงนิยมนำมาใช้ในระบบหาตำแหน่งภายในอาคารมากกว่าระบบหาตำแหน่งภายนอกอาคาร

2.3.3.2 เทคนิค Triangulation [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Triangulation เป็นเทคนิคในการตำแหน่งที่พิจารณาพารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึง ซึ่งเทคนิคนี้จำเป็นที่ต้องใช้สายอากาศส่งอย่างน้อย 3 อัน มาทำการคำนวณหาความต่างของเฟสของแต่ละสายอากาศส่ง ซึ่งสายอากาศส่งที่ใช้จะต้องมีการทำงานที่เหมือนกันทุกประการ โดยเทคนิคนี้ไม่เป็นที่ยอมรับมากนักเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงและมีความยุ่งยากในการคำนวณหาตำแหน่งด้วย

2.3.3.3 เทคนิค Weighted centroid [13]

Weighted centroid เป็นเทคนิคการหาตำแหน่งที่พิจารณาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้นำมาคำนวณหาระยะทางระหว่างด้านส่ง และด้านรับ การหาตำแหน่งจะเป็นการพิจารณาจุดศูนย์กลาง โดยนำค่าระยะทางระหว่างด้านส่ง และด้านรับ ค่าระดับการถ่วงน้ำหนัก และพิกัดของด้านส่งมาใช้คำนวณดังสมการที่ (2.4) ซึ่งเทคนิคนี้มีความจำเป็นที่จะต้องใส่สายอากาศส่งอย่างน้อย 4 ตัว เพื่อที่จะถ่วงน้ำหนักหาตำแหน่งได้ ซึ่งจะทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงด้วย

$$\hat{p} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{d}_i^{-g} \cdot a_i)}{\sum_{i=1}^n (\hat{d}_i^{-g})} \quad (2.4)$$

เมื่อ n คือ จำนวนของสายอากาศส่ง

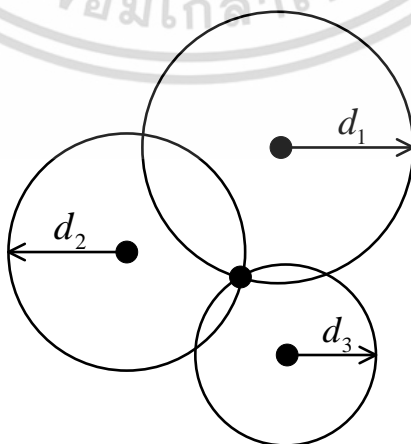
a_i คือ พิกัดของสายอากาศส่ง

d_i คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ

g คือ ระดับของการถ่วงน้ำหนัก

2.3.3.4 เทคนิค Trilateration [14], [15]

Trilateration เป็นเทคนิคการหาตำแหน่งที่อาศัยหลักการตัดกันของวงกลม จะคำนวณหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ ซึ่งเทคนิคนี้จำเป็นที่จะต้องใส่สายอากาศอย่างน้อย 3 อัน โดยการคำนวณหาตำแหน่งจะนำระยะทางของสายอากาศแต่ละอันมาวาดเป็นวงกลม ตำแหน่งที่ได้จะเกิดจากการซ้อนทับกันของวงกลมทั้ง 3 วง ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 หลักการหาตำแหน่งโดยใช้ Trilateration [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.5 หลักการ Min-Max [14], [16]

สำหรับการใช้ค่า Min-Max เป็นเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้หลักการซ้อนทับกันของ กล่องหรือขอบเขตที่ต่ำที่สุด (Minimum) และขอบเขตที่สูงที่สุด (Maximum) ในแกน x และแกน y ซึ่งเทคนิคนี้จำเป็นต้องใช้สายอากาศส่งอย่างน้อย 3 อัน การคำนวณหาตำแหน่งจะนำพารามิเตอร์ ทั้งสองมาคำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ จากนั้นจะทำการวาดกล่อง หรือขอบเขตที่เกิดจากสายอากาศส่งแต่ละอัน โดยตำแหน่งที่ต้องการจะหาได้จากค่าเฉลี่ยในแกน x และแกน y ของส่วนที่ซ้อนทับกันของกล่อง หรือขอบเขตทั้งสาม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สรุป

สำหรับบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาการสื่อสารเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ข้อกำหนดตามมาตรฐานของ FCC และการประยุกต์ใช้งานในการหาตำแหน่ง ในการพิจารณาใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีความจำเป็นต้องรู้ถึง ประวัติความเป็นมา และข้อกำหนด ในส่วนของหลักการพื้นฐาน ข้อกำหนด และการประยุกต์ใช้งาน ในการหาตำแหน่ง ซึ่งจะกล่าวถึงประเภทของพารามิเตอร์ และเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่งด้วยขบวนการปรับเทียบโดยใช้หลักการ Trilateration และ Min-Max เป็นเทคนิคการหาตำแหน่ง



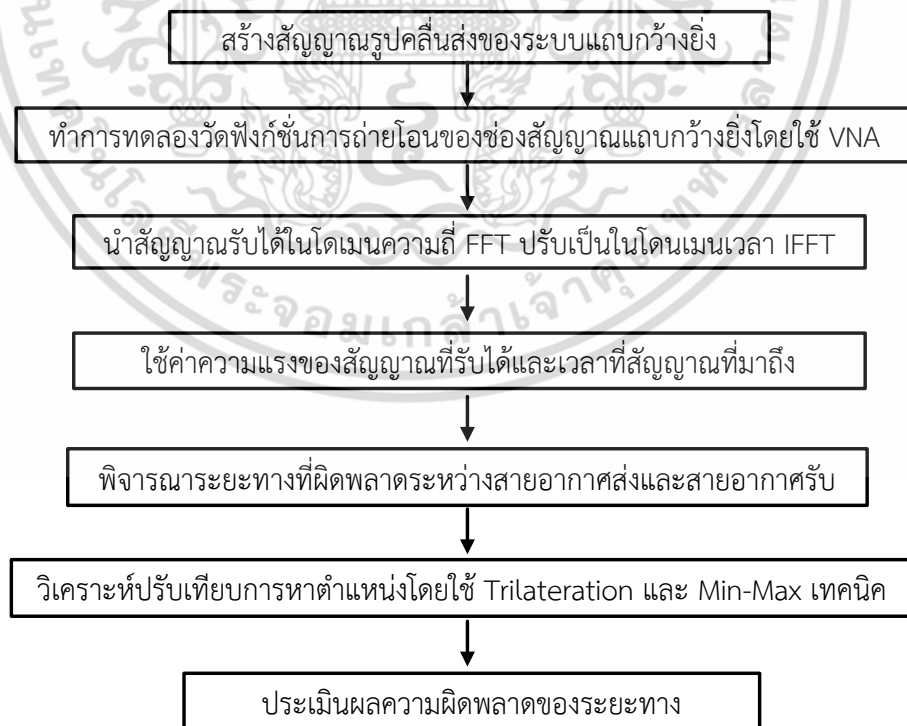
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการวิเคราะห์ของการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งด้วยเทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max ซึ่งได้ใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงมาวิเคราะห์โดยใช้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ในหัวข้อแรกจะกล่าวถึงสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์หาสัญญาณที่รับได้ หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในวิเคราะห์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงมาวิเคราะห์ จากนั้นจะอธิบายถึงเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง คือเทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max ในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงในการหาตำแหน่ง ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์หาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 มีขั้นตอนดังนี้ ทำการสร้างสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง จากนั้นทำการทดลองวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณตามแบบจำลองการวัด แล้วจะหาสัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่ ซึ่งจะเกิดจากสัญญาณส่งในโดเมนความถี่คูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ แล้วหาสัญญาณรับในโดเมนเวลา จากนั้นจะหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่เกิดจากพารามิเตอร์ทั้งสอง ต่อมาจะคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max สุดท้ายจะทำการหาค่าความผิดพลาดของระยะทางของแต่ละตำแหน่งตามแบบจำลองการวัด



รูปที่ 3.1 ขบวนการวิจัยหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้ช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สัญญาณรูปคลื่นส่งของระบบแถบกว้างยิ่ง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง ใช้ความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดยได้กำหนดให้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมในโดเมนความถี่ (Frequency domain) แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ส่วนรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา (Time domain) หรือรูปคลื่นแบบอิมพัลส์แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และความหนาแน่นสเปกตรัมในโดเมนความถี่ สามารถแสดงได้ดังสมการนี้

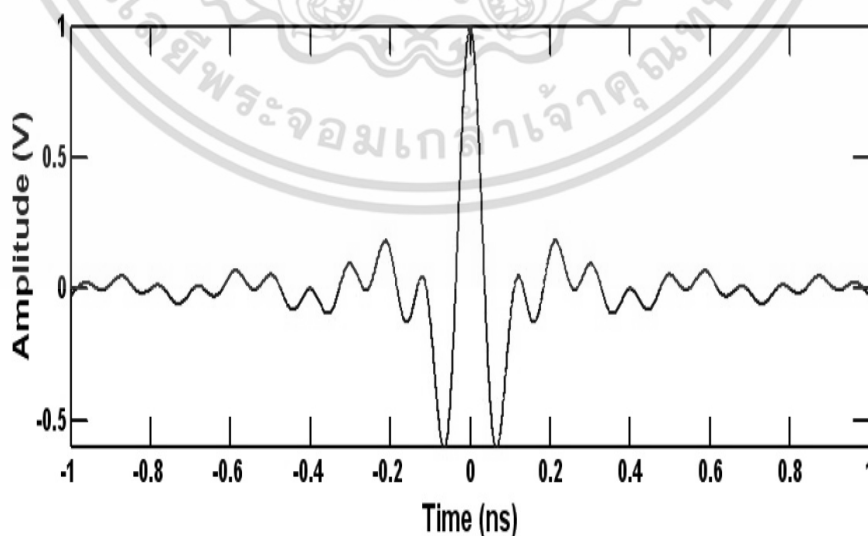
$$v_i(t) = \frac{A}{f_b} [f_H \text{sinc}(2f_H t) - f_L \text{sinc}(2f_L t)] \quad (3.1)$$

$$V_i(f) = \begin{cases} \frac{A}{2f_b} & \|f - f_c\| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & \|f - f_c\| > \frac{f_b}{2} \end{cases} \quad (3.2)$$

เมื่อ

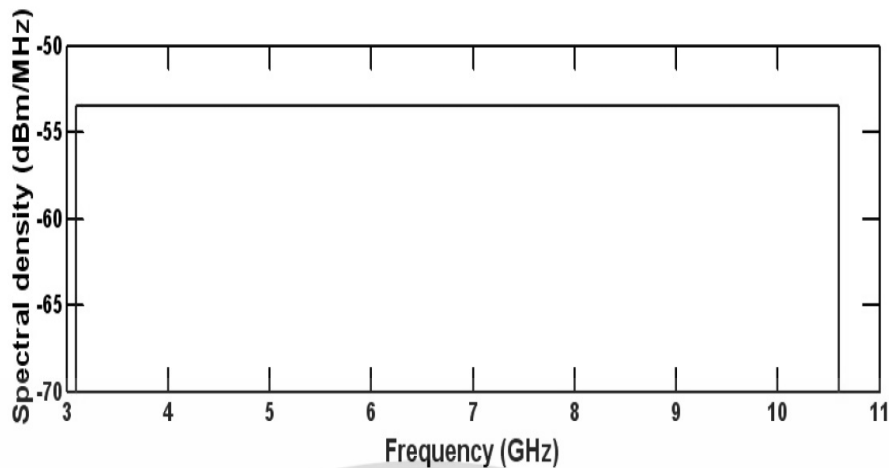
A คือ แอมพลิจูดสูงสุด
 f_b คือ แบนด์วิดท์
 f_c คือ ความถี่กลาง
 $f_L = f_c - f_b/2$ คือ ความถี่ต่ำสุด
 $f_H = f_c + f_b/2$ คือ ความถี่สูงสุด

รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมมีความหนาแน่นสเปกตรัมเป็นรูปสี่เหลี่ยมทั้งในด้านความถี่บวกและความถี่ลบ โดยความหนาแน่นสเปกตรัมจะมีขนาดคงที่เท่ากับ $A/(2f_b)$ อยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ $-f_H$ ถึง $-f_L$ และ f_L ถึง f_H และจะมีเฟสเป็นศูนย์ รูปคลื่นนี้จะมีคุณสมบัติแบบฟังก์ชันคู่ และมีส่วนประกอบลักษณะกระแสตรง (Direct current: DC) เป็นศูนย์



รูปที่ 3.2 สัญญาณรูปคลื่นส่งของระบบแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 สเปกตรัมสัญญาณส่งของระบบแถบกว้างยิ่ง

3.3 สัญญาณรูปคลื่นที่รับได้แถบกว้างยิ่ง

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ หรือสัญญาณที่รับได้ในโดเมนความถี่ จะวิเคราะห์ได้จากการนำฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งมาคูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ ซึ่งฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณจะหาได้จากการทดลองวัด โดยความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ หรือสัญญาณที่รับได้ในโดเมนความถี่ $V_r(f)$ สามารถแสดงได้ดังสมการนี้

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H_c(f) \quad (3.3)$$

เมื่อ $V_t(f)$ คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง

$H_c(f)$ คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ ซึ่งได้จากการทดลองวัด [

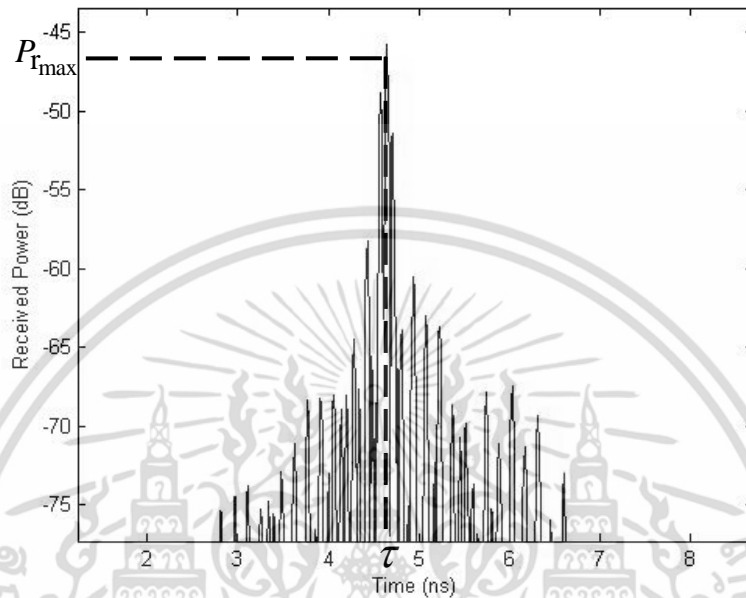
เมื่อทำการพิจารณาสัญญาณที่รับได้ในโดเมนเวลา จะสามารถวิเคราะห์ได้โดยการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับ (Inverse fourier transform; IFFT) ของความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ โดยสัญญาณที่รับได้ในโดเมนเวลา $v_r(t)$ สามารถแสดงได้ดังสมการนี้

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.4)$$

3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง

งานวิจัยนี้จะพิจารณาพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาตำแหน่ง 2 แบบ คือ พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง โดยจะนำสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่งมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ทั้งสองแบบ โดยจากบทที่ 2 สัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแถบกว้างยังเป็นสัญญาณที่มีความละเอียดทางเวลามาก ทำให้สามารถสังเกตเห็นกำลังงานที่รับได้มากที่สุด และเวลาที่สัญญาณมาถึงได้ ซึ่งรูปคลื่นของสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่งจะแสดงในรูปที่ 3.4 โดยจะนำไปหาพารามิเตอร์ทั้ง 2 แบบเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งต่อไป



รูปที่ 3.4 สัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่ง

3.4.1 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้

ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะเป็นการพิจารณาค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ โดยสามารถวิเคราะห์ที่ได้จากกำลังงานของสัญญาณที่รับได้มากที่สุด โดยกำลังงานของสัญญาณที่รับได้มากที่สุด P_{rmax} ในหน่วยเดซิเบล สามารถแสดงได้ดังสมการนี้

$$P_{rmax} = 20 \log \left[\max |v_r(t)| \right] \quad (3.5)$$

จากนั้นจะหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับเมื่อวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ d_{RSS} สามารถคำนวณได้ดังสมการนี้

$$d_{RSS} = d_0 \cdot 10^{\frac{|P_0 - P_{rmax}|}{10n}} \quad (3.6)$$

เมื่อ d_0 คือ ระยะทางอ้างอิง (วิทยานิพนธ์นี้กำหนดเป็น 1 เมตร จากสายอากาศส่ง)

P_0 คือ กำลังงานที่รับได้ที่ระยะทางอ้างอิง คือที่ระยะ 1 เมตร (วิทยานิพนธ์นี้ได้ทดลองวัดกำลังงานที่รับได้ที่ระยะ 1 เมตร จากสายอากาศส่ง ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ -46.0928 เดซิเบล)

n คือ เลขยกกำลังการสูญเสียเชิงวิถี (path loss exponent) (วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ค่าเท่ากับ 1.85 [17])

3.4.2 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง

เวลาที่สัญญาณมาถึงจะพิจารณาการประวิงเวลา (Delay time) โดยจะสามารถวิเคราะห์ได้จากเวลาที่มาถึงของสัญญาณที่เดินจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปคลื่นของสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่งแล้ว โดยจะพิจารณาเวลาที่สัญญาณมาถึงที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้มากที่สุด โดยเวลาที่สัญญาณมาถึง τ สามารถคำนวณได้ดังสมการนี้

$$\tau = \arg \max |v_r(t)| \quad (3.7)$$

เมื่อ $\arg \max |v_r(t)|$ คือ เวลาที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้มากที่สุด

ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับเมื่อวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ d_{TOA} สามารถคำนวณได้ดังสมการนี้

$$d_{\text{TOA}} = c_0 \cdot \tau \quad (3.8)$$

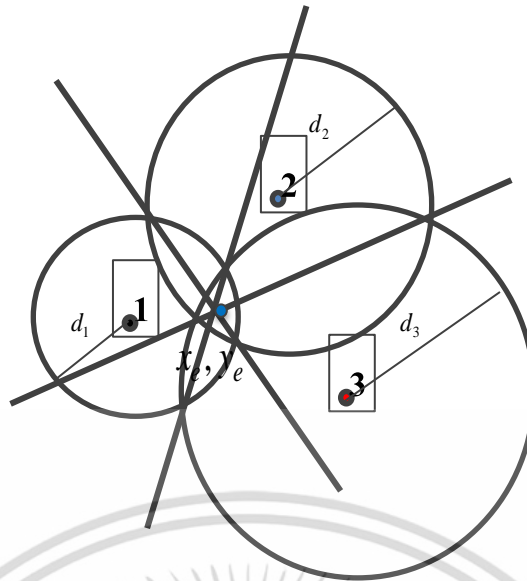
เมื่อ c_0 คือ ความเร็วของคลื่นวิทยุ เท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

3.5 หลักการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เทคนิคในการหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง คือ เทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max โดยเมื่อได้ระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับจากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และเวลาที่สัญญาณมาถึงแล้ว ก็จะไปคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งต่อไป

3.5.1 หลักการหาตำแหน่งโดยใช้ Trilateration

เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration เป็นเทคนิคการหาตำแหน่งที่พิจารณาหาตำแหน่งจากส่วนที่ซ้อนทับกันของวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งอย่างน้อย 3 อัน [15], [18] โดยรัศมีของวงกลมที่เกิดสายอากาศส่งแต่ละอันสามารถหาได้จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง โดยรูปที่ 3.5 แสดงการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Trilateration



รูปที่ 3.5 หลักการหาตำแหน่งโดยใช้ Trilateration

การหาตำแหน่ง โดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration เป็นการหาตำแหน่งในแกน x และแกน y จำเป็นต้องใช้สายอากาศส่งอย่างน้อย 3 อัน โดยจะวาดวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่ง ทั้ง 3 อัน ซึ่งรัศมีของวงกลมแต่ละอันจะเกิดจากระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ โดยวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.9), (3.10) และ (3.11) ตามลำดับ

$$(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = d_1^2 \quad (3.9)$$

$$(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = d_2^2 \quad (3.10)$$

$$(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 = d_3^2 \quad (3.11)$$

- เมื่อ
- (x_1, y_1) คือ จุดศูนย์กลางของวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1
 - (x_2, y_2) คือ จุดศูนย์กลางของวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 2
 - (x_3, y_3) คือ จุดศูนย์กลางของวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 3
 - d_1 คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งที่ 1
 - d_2 คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งที่ 2
 - d_3 คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งที่ 3

จากนั้นจะหาเส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันของวงกลมทั้งสาม โดยเส้นตรง 1 เส้นจะเกิดจากการตัดกันของวงกลม 2 วง ดังนั้นเมื่อมีวงกลมทั้งหมด 3 วงก็จะเกิดเส้นตรงทั้งหมด 3 เส้น ซึ่งเส้นตรงที่เกิดจากวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1 และสายอากาศส่งที่ 2 แสดงได้ดังสมการที่ (3.12) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นตรงที่เกิดจากวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 2 และสายอากาศส่งที่ 3 แสดงได้ตั้งสมการที่ (3.13) และเส้นตรงที่เกิดจากวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1 และสายอากาศส่งที่ 3 แสดงได้ตั้งสมการที่ (3.14)

$$2x(x_2 - x_1) + 2y(y_2 - y_1) = (d_2^2 - d_1^2) + (x_2^2 - x_1^2) + (y_2^2 - y_1^2) \quad (3.12)$$

$$2x(x_2 - x_3) + 2y(y_2 - y_3) = (d_3^2 - d_2^2) + (x_2^2 - x_3^2) + (y_2^2 - y_3^2) \quad (3.13)$$

$$2x(x_1 - x_3) + 2y(y_1 - y_3) = (d_3^2 - d_1^2) + (x_1^2 - x_3^2) + (y_1^2 - y_3^2) \quad (3.14)$$

ดังนั้นตำแหน่งที่ต้องการหาหรือตำแหน่งของสายอากาศรับก็คือตำแหน่งที่เส้นตรงทั้งสามเส้นตัดกัน ซึ่งจะได้เป็นพิกัด (x_e, y_e)

3.5.2 เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max

เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max เป็นเทคนิคการหาตำแหน่งที่พิจารณาหาตำแหน่งจากส่วนที่ซ้อนทับกันของกล่อง หรือการซ้อนทับกันของขอบเขตต่ำที่สุด (Minimum) และขอบเขตที่สูงที่สุด (Minimum) ในแนวแกน x และแกน y ที่เกิดจากสายอากาศส่งอย่างน้อย 3 อัน [14], [19] โดยระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งแต่ละอันสามารถหาได้จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง ซึ่งจะนำมาคำนวณหากล่อง หรือขอบเขตที่เกิดจากสายอากาศส่งแต่ละอัน

การหาตำแหน่งแบบ 2 มิติ โดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max เป็นการหาตำแหน่งในแกน x และแกน y จำเป็นต้องใช้สายอากาศส่งอย่างน้อย 3 อัน โดยจะวาดกล่องหรือขอบเขตต่ำที่สุด และสูงที่สุดในแกน x และแกน y ที่เกิดจากสายอากาศส่งทั้ง 3 อัน ซึ่งกล่อง หรือขอบเขตที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดในแกน x และแกน y ของแต่ละสายอากาศส่ง จะเกิดจากระยะทางระหว่างสายอากาศส่งแต่ละอันและสายอากาศรับ ทำการบวก และลบกับจุดศูนย์กลางของสายอากาศส่งแต่ละอัน

โดยกล่อง หรือขอบเขตที่ต่ำที่สุดในแกน x และแกน y คือ $(x_i - d_i, y_i - d_i)$ และขอบเขตที่สูงที่สุดในแกน x และแกน y คือ $(x_i + d_i, y_i + d_i)$ เมื่อ (x_i, y_i) คือ จุดศูนย์กลางของสายอากาศส่งที่ i โดยที่ i=1, 2 และ 3

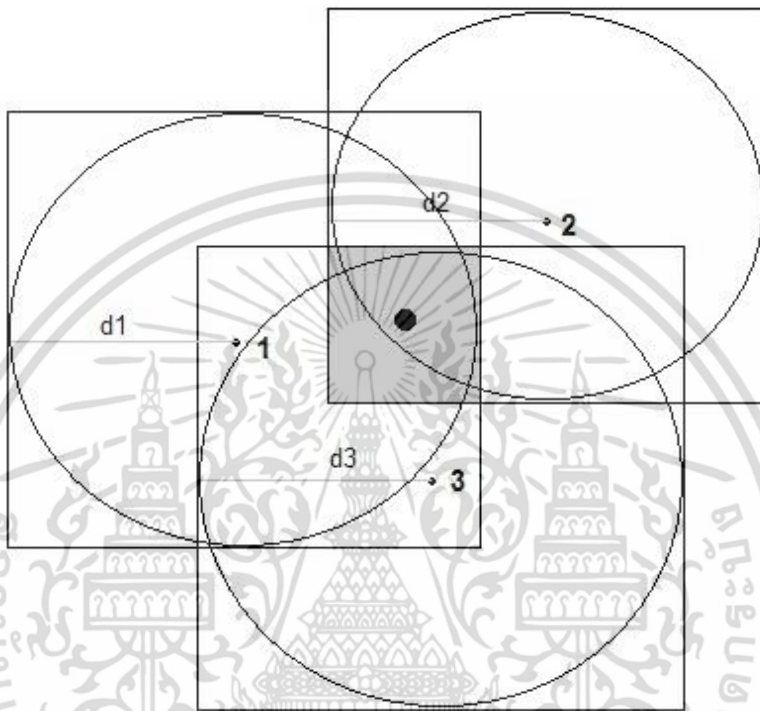
ดังนั้นตำแหน่งที่ต้องการหาหรือตำแหน่งของสายอากาศรับจะสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยที่ซ้อนทับกันของกล่อง หรือขอบเขตที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดในแกน x และแกน y ซึ่งก็คือค่าเฉลี่ยของค่าสูงที่สุดของพิกัดที่ต่ำที่สุด และค่าต่ำที่สุดของพิกัดที่สูงที่สุดในแต่ละแกน x และ แกน y แสดงได้ตั้งสมการนี้ ซึ่งรูปที่ 3.6 แสดงการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Min-Max

$$x = \frac{\max(x_i - d_i) + \min(x_i + d_i)}{2} \quad (3.15)$$

$$y = \frac{\max(y_i - d_i) + \min(y_i + d_i)}{2} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\max(x_i - d_i)$ คือ ค่าสูงที่สุดของพิกัดที่ต่ำที่สุดในแกน x
 $\min(x_i + d_i)$ คือ ค่าต่ำที่สุดของพิกัดที่สูงที่สุดในแกน x
 $\max(y_i - d_i)$ คือ ค่าสูงที่สุดของพิกัดที่ต่ำที่สุดในแกน y
 $\min(y_i + d_i)$ คือ ค่าต่ำที่สุดของพิกัดที่สูงที่สุดในแกน y



รูปที่ 3.6 หลักการหาตำแหน่งแบบใช้ค่า Min-Max [14]

3.6 การวิเคราะห์ความผิดพลาดของตำแหน่งโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งภายในอาคารในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตา ซึ่งใช้เทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max ซึ่งนำพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง ที่ได้จากสัญญาณแถบกว้างยิ่งมาใช้ ได้วิเคราะห์ความแม่นยำในเทอมของค่าความผิดพลาดของระยะทาง ซึ่งการหาตำแหน่งที่มีความแม่นยำมากเมื่อค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อย ซึ่งได้กำหนดให้ (x_e, y_e) คือ ตำแหน่งที่หาได้จากการใช้เทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max ซึ่งได้กำหนดให้ (x_c, y_c) คือ ตำแหน่งที่ถูกต้อง ดังนั้นค่าความผิดพลาดของระยะทาง E_D ในหน่วย เมตร จะสามารถได้ดังสมการนี้

$$E_D = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2} \tag{3.17}$$

3.7 สรุป

สำหรับบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการวิเคราะห์ความผิดพลาดทางตำแหน่งโดยใช้สัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง เป็นผลที่ได้จากการวัด โดยมีสัญญาณส่ง และสัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่ง พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่ง คือ พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง จากนั้นได้กล่าวถึงหลักการที่ใช้ในการเปรียบเทียบในการหาตำแหน่งด้วย Trilateration และ Min-Max เทคนิค สุดท้ายได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ความผิดพลาดในหาตำแหน่งโดยใช้ช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง



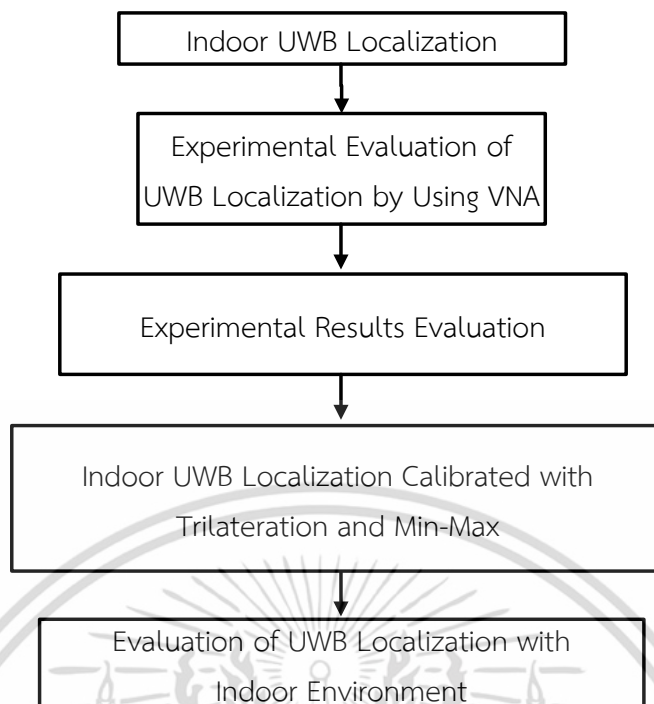
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การหาตำแหน่งด้วยช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง

4.1 กล่าวนำ

การประเมินผลในการเปรียบเทียบของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้ช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งของงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองโดยการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง แล้วนำมาวิเคราะห์ในการหาตำแหน่ง ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอน และรายละเอียดในการทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง โดยคุณสมบัติ หรือคุณลักษณะของช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่งจะหาได้จากการทดลองวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ หรือพารามิเตอร์ $|S_{21}|$ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector network analyzer: VNA) ทำการทดลองวัดในโดเมนความถี่ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Trilateration และ เทคนิค Min-Max ซึ่งได้ทำการหาตำแหน่งโดยได้ทำการออกแบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเป็นแบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่งเพื่อศึกษาการหาตำแหน่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตา ในแบบจำลองนี้จะมีสายอากาศส่ง 3 อัน ซึ่งขั้นตอนการทดลองวัดและการหาตำแหน่งจะมีอยู่ 6 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็นการออกแบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ขั้นตอนที่สองจะเป็นการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด ขั้นตอนที่สามจะทำการทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ขั้นตอนที่สี่จะทำการหาสัญญาณที่รับแบบแถบกว้างยิ่งเพื่อนำไปใช้หาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงโดยการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (MATLAB Program) จากนั้นขั้นตอนที่ห้าจะเป็นการนำพารามิเตอร์ที่ได้มาทำการคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max ซึ่งจะเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกัน และขั้นตอนสุดท้ายจะแสดงผลการทดลองซึ่งจะแสดงเป็นค่าความผิดพลาดของระยะทางและสรุปผล ซึ่งขั้นตอนการทดลองวัด และการหาตำแหน่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

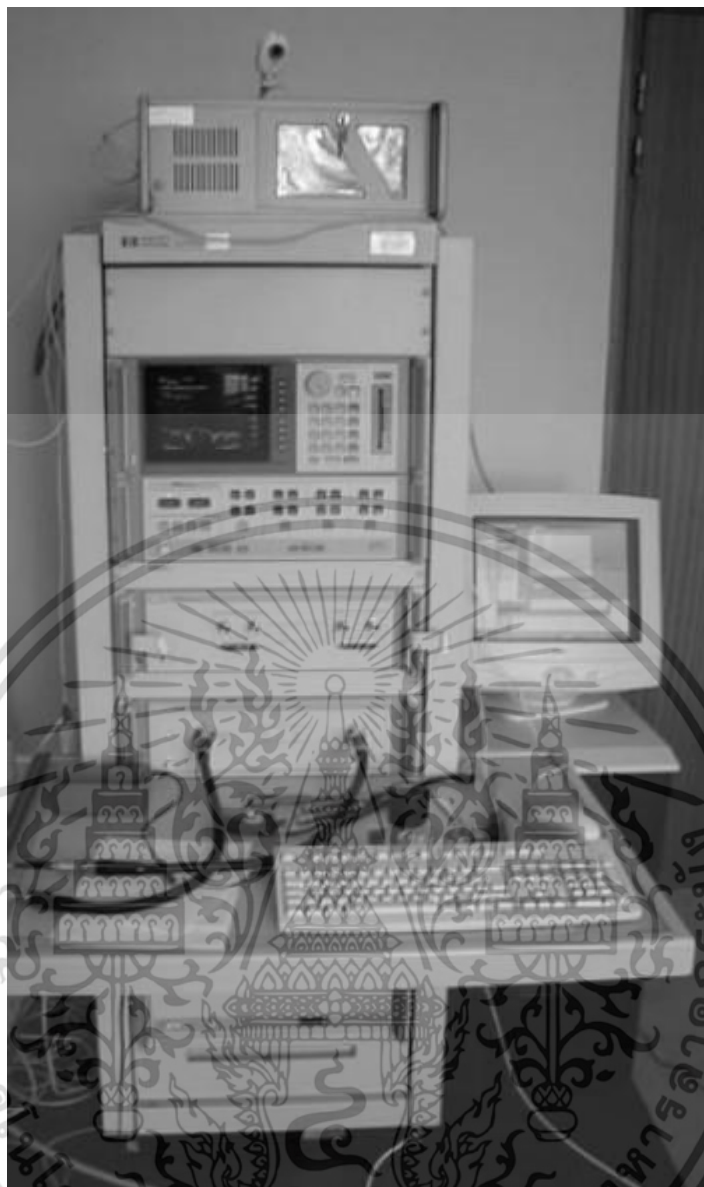


รูปที่ 4.1 ขบวนการทดลองวัดของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้ช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองวัด

4.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

การทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่งจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือเฉพาะทาง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือวัดตั้งแสงในรูปที่ 4.2 จะประกอบไปด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์รุ่น HP-8510C ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-Parameter test set) รุ่น HP-8514B และตัวสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesized sweeper) รุ่น HP-83620A ซึ่งจะถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer) ที่เชื่อมต่อผ่านพอร์ต GPIB (General purpose interface bus) ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีความสามารถในการตรวจวัดช่องสัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตหรือสองพอร์ตก็ได้ ในการทดลองวัดนี้จะเป็นการทดลองวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านแบบสองพอร์ต โดยพอร์ตที่หนึ่งคือพอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (Transmitted) และพอร์ตที่สองจะใช้ในการรับสัญญาณ (Received) จากนั้นปลายของทั้งสองพอร์ตจะต่อเข้ากับสายอากาศ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical antenna) เป็นสายอากาศส่ง (Transmitted antenna) และสายอากาศรับ (Received antenna) ผลการทดลองวัดช่องสัญญาณที่ได้จะอยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งต่อไป

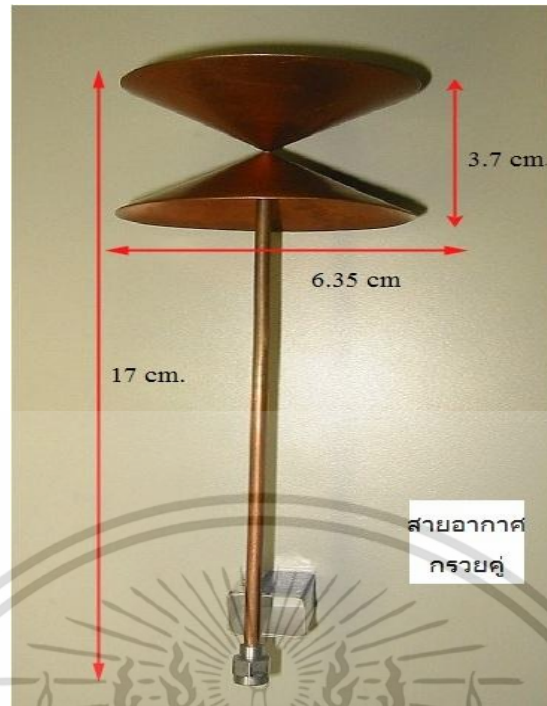


รูปที่ 4.2 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (VNA)

4.2.2 สายอากาศกรวยคู่ใช้ในการทดลองวัด

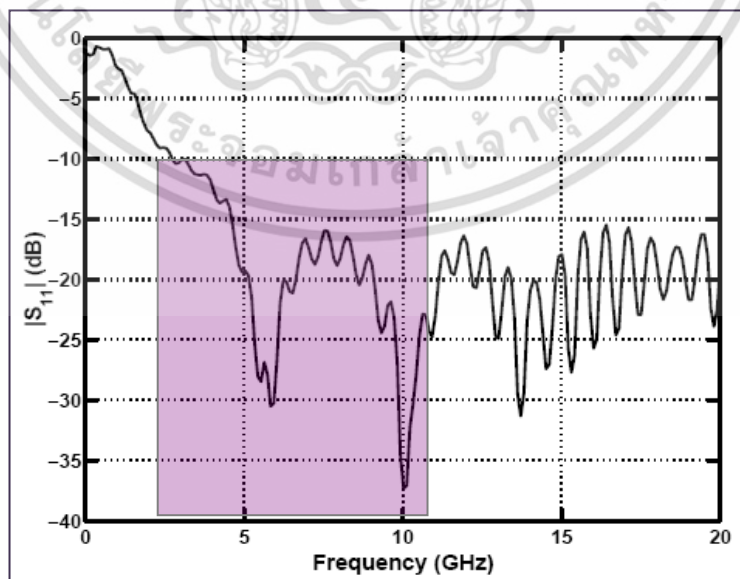
การทดลองวัดช่องสัญญาณจำเป็นที่จะต้องใช้สายอากาศเพื่อใช้ในการรับส่งสัญญาณ โดยสายอากาศที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองวัดนี้คือสายอากาศแบบกรวยคู่ ซึ่งการทดลองนี้ได้นำมาใช้ทั้งด้านส่ง และด้านรับ โดยสายอากาศแบบกรวยคู่มีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในมุมกวาด (Azimuth) ซึ่งสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัดนี้มีอัตราขยาย (Gain) อยู่ระหว่าง 1.5 dBi ถึง 15.0 dBi มีช่วงความถี่การแผ่กระจายครอบคลุมช่วงความถี่ที่ใช้ทดลองวัด คือ ช่วงความถี่แถบกว้างยิ่ง ซึ่งลักษณะของเฟสมีความเป็นเชิงบวกมาก มีสนามระยะไกล (Farfield) ที่ระยะ 0.2578 เมตร โครงสร้างของสายอากาศจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานของกรวย คือ 65.34 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างฐานกรวยทั้งสอง คือ 37 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศกรวยคู่ [20-21]

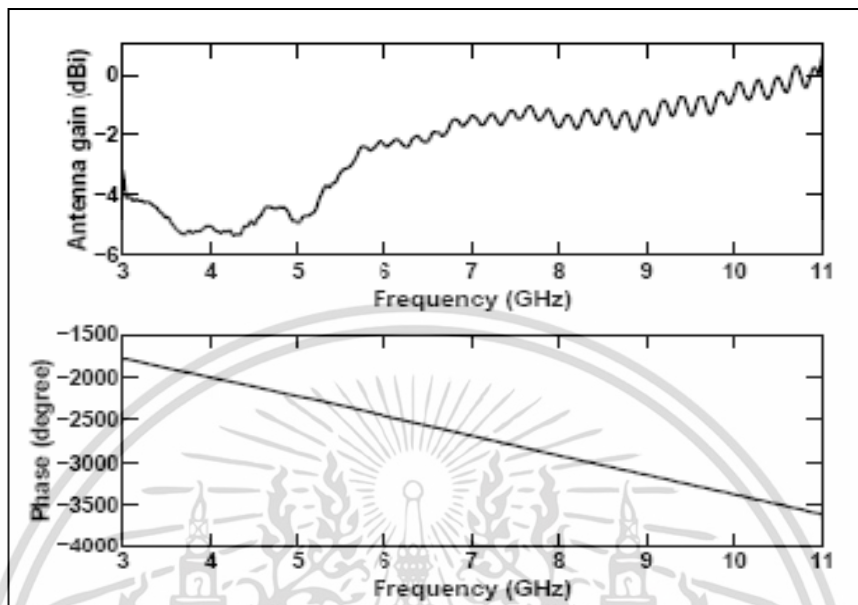
สำหรับการทดลองวัดนี้ได้ใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัดนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficient) $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งต่ำกว่า -10 dB ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศแบบกรวยคู่นี้สามารถนำมาใช้ในช่วงความถี่ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 4.4 $|S_{11}|$ คุณสมบัติของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ [20-21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาสายอากาศที่ใช้ในการทดลองวัด คุณสมบัติอีกอย่างที่สำคัญ คือขนาด และเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศ ซึ่งขนาด และเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัดนี้จะแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศแบบกรวยคู่ [20]

4.3 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร

การทดลองวัดสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ซึ่งเป็นการทดลองช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งเพื่อนำมาใช้หาสัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่งเพื่อนำมาใช้ในการหาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงในการคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max ซึ่งแบบจำลองจะมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองวัด และวิธีการทดลองวัด ดังนี้

4.3.1 แบบจำลองการวัดและการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบจำลองการทดลองวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารซึ่งทำการทดลองวัดที่อาคารเรียนรวม E-12 ชั้นที่ 12 ห้อง 1207 ได้ทำการทดลองวัดช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งในช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่แถบกว้างยิ่งทั้งหมดตามมาตรฐานที่ทางคณะกรรมการกิจการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกากำหนด ในการทดลองวัดนี้ได้ใช้จำนวนจุดความถี่ 801 จุด ได้นำสายอากาศแบบกรวยคู่มาใช้ทั้งด้านส่ง และด้านรับ ทำการวางในแนวตั้ง (Vertical) ได้กำหนดความสูงของสายอากาศเป็น 1 เมตร ทั้งด้านส่ง และด้านรับ โดยในแบบจำลองได้กำหนดให้มีสายอากาศส่ง 3 อัน วางตั้งไว้ในพิคัดที่แน่นอน คือสายอากาศส่งที่ 1 วางไว้ในพิคัด (5,0) สายอากาศส่งที่ 2 วางไว้ในพิคัด (1,0) และสายอากาศส่งที่ 3 วางไว้ในพิคัด (3,7) และมีสายอากาศรับ 1 อัน มีจำนวนจุดที่ใช้ในการทดลองวัดช่องสัญญาณหรือจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

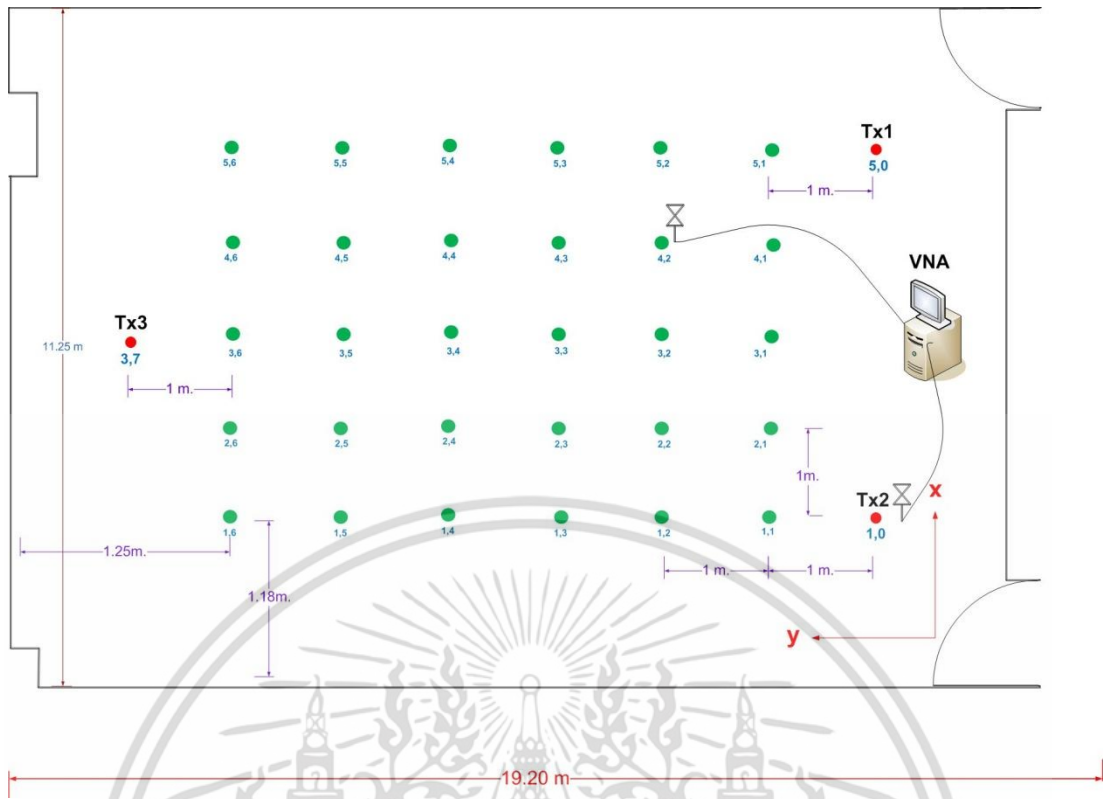
ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 30 จุด โดยแต่ละจุดห่างกันในแนวแกน x และแกน y เป็นระยะทาง 1 เมตร

เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 พอร์ต คือ ด้านส่งและด้านรับ งานวิจัยนี้มีสายอากาศส่ง 3 อัน จึงจำเป็นที่จะต้องวัดสายอากาศส่งทีละอัน ดังนั้นจะทำการทดลองวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณโดยการวางสายอากาศรับไว้ที่จุดที่ทำการทดสอบ จากนั้นจะทำการทดลองวัดโดยการเคลื่อนที่สายอากาศส่งให้ครบทั้ง 3 อัน จากนั้นจะค่อยเคลื่อนที่สายอากาศรับไปจุดที่ทำการทดสอบอื่นๆ แล้วทำการทดลองจนครบทั้งหมด 30 จุด ยกตัวอย่างเช่น เริ่มทำการทดลองที่จุด (1,1) ซึ่งจะทำการวางสายอากาศรับไว้ที่จุด (1,1) จากนั้นจะทำการวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งทั้ง 3 ตัว โดยการเคลื่อนที่สายอากาศส่งไปในตำแหน่งของสายอากาศที่ 1 พิกัด (5,0) เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งของสายอากาศส่งที่ 2 พิกัด (1,0) และเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งของสายอากาศส่งที่ 3 พิกัด (3,7) จากนั้นจะทำการทดสอบที่จุด (2,1) ก็ทำลักษณะเดิม จนครบจำนวนจุดที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 30 จุด

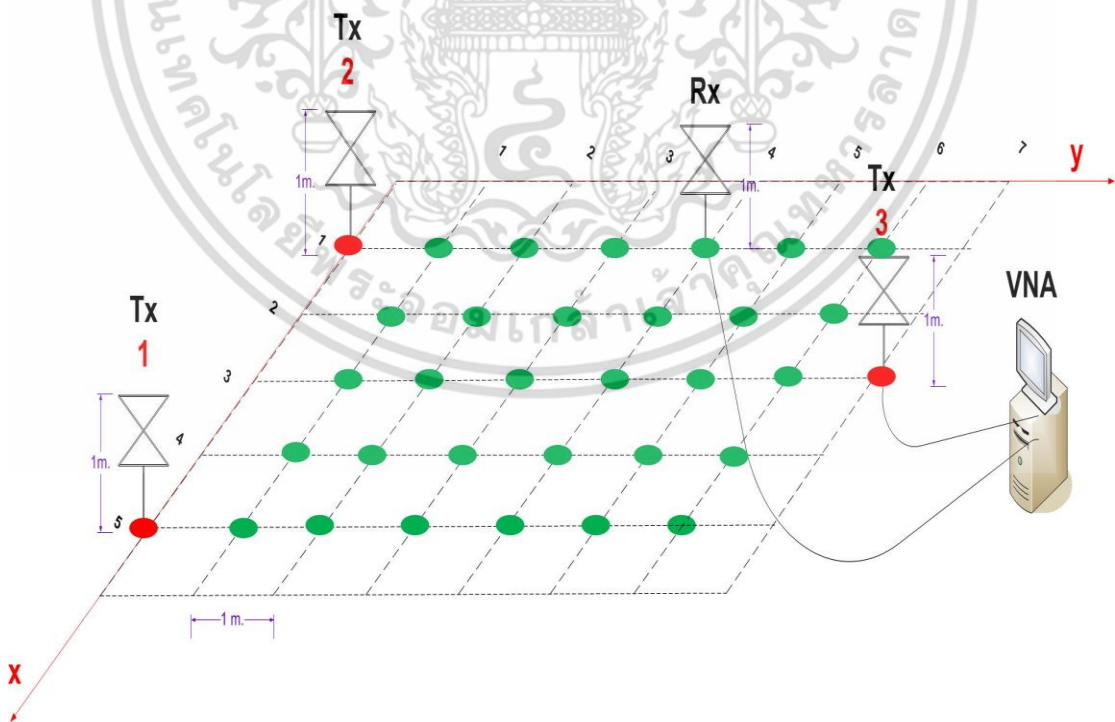
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดแสดงดังตารางที่ 4.1 แบบจำลองการทดลองวัดในมุมมองด้านบน แสดงดังรูปที่ 4.6 แบบจำลองการทดลองวัดในมุมมองด้านข้าง แสดงดังรูปที่ 4.7 สถานที่ที่ใช้ในการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 และลักษณะการจัดวางสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดลองวัด
1.ช่วงความถี่	3 GHz ถึง 11 GHz
2.จำนวนจุดความถี่	801 จุด
3.ชนิดของสายอากาศด้านส่งและด้านรับ	กรวยคู่
4.การวางสายอากาศด้านส่งและด้านรับ	แนวตั้ง
5.ความสูงของสายอากาศด้านส่งและด้านรับ	1 เมตร
6.จำนวนสายอากาศส่ง	3 อัน
7.จำนวนจุดที่ใช้ในการทดสอบ	30 จุด

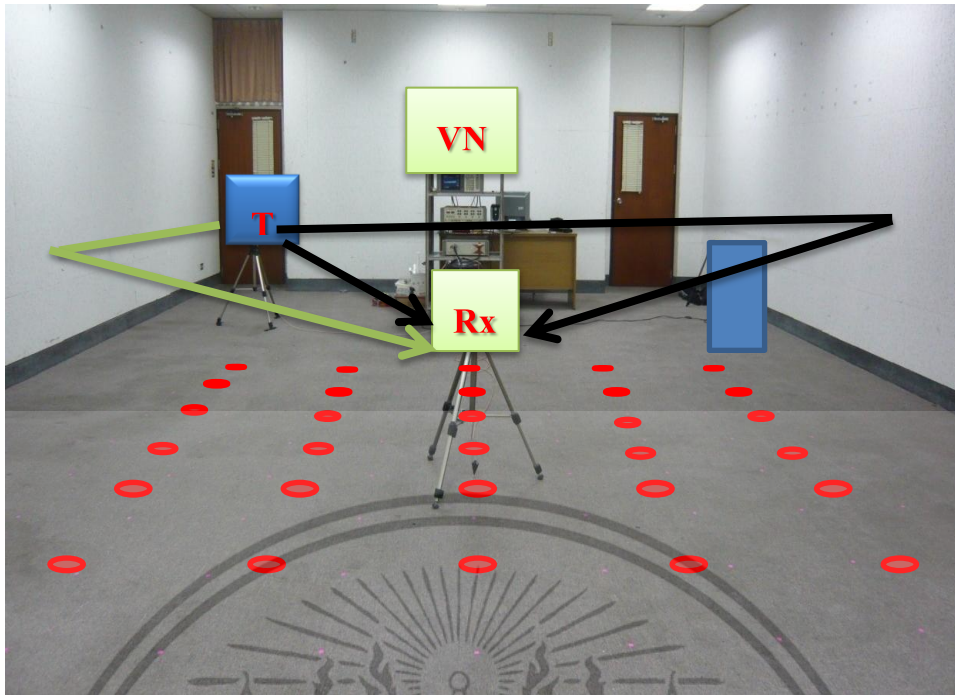


รูปที่ 4.6 แบบจำลองการทดลองวัดในมุมมองด้านบน



รูปที่ 4.7 แบบแผนการทดลองวัดการหาตำแหน่งภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 สถานที่ทำการทดลองวัดจริง



รูปที่ 4.9 การจัดวางสายอากาศรับ-ส่ง

4.4 สรุป

บทนี้ได้บอกถึงเครื่องและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ในการวัดและบันทึกผล และสายอากาศแบบกรวยคู่ใช้ในการประเมินผลการวัด สำหรับแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ในการหาตำแหน่งภายในอาคาร ได้แสดงแบบจำลองการทดลองวัด สถานที่ในการทดลองวัดจริง และการจัดวางสายอากาศรับ-ส่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองวิจัยและการประเมินผล

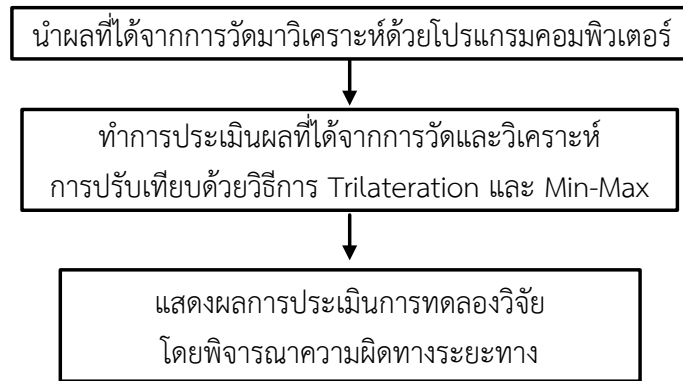
5.1 กล่าวนำ

ผลทดลองวิจัยของการหาตำแหน่งภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารโดยใช้หลักการหรือเทคนิค Trilateration และ Min-Max โดยใช้ช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ได้กำหนดให้สัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม ในช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ตามมาตรฐานที่คณะกรรมการกิจการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC) โดยแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 1 โวลต์ ซึ่งได้แสดงในบทที่ 3 การหาตำแหน่งในงานวิจัยนี้ได้ทดลองวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณตามแบบจำลองที่ได้แสดงในบทที่ 4 แล้วนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และเวลาที่สัญญาณมาถึง จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งทั้งสองแบบที่ได้ใช้วิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองวิจัยของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ได้ทดลองวัดตามแบบจำลองการวัด ในส่วนแรกจะแสดงค่าพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงซึ่งจะนำมาใช้ในการหาตำแหน่ง ที่ได้จากการทดลองวัดช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 เพื่อนำไปหาสัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่ง จากนั้นจะแสดงผลความแม่นยำในการหาตำแหน่งในรูปของค่าความผิดพลาดของระยะทางตามแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด และค่าความผิดพลาดของระยะทางในรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ซึ่งฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางจะบอกถึงความน่าจะเป็นที่ค่าความผิดพลาดของระยะทางค่าหนึ่งจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความผิดพลาดของระยะทางค่านั้น ดังนั้นจะแบ่งตามเทคนิคและพารามิเตอร์ได้เป็น เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง

5.2 การประเมินผลการทดลองวิจัยที่ได้จากการทดลองวัด

เมื่อทำการทดลองวัดช่องสัญญาณตามแบบจำลองการวัดแล้ว จากนั้นจะทำการหาสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่ง แล้วนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการหาตำแหน่ง คือ พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้หาได้ตั้งสมการที่ (3.5) และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงหาได้ตั้งสมการที่ (3.7) โดยจะแสดงพารามิเตอร์ทั้งสองที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 ในแนวแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด ซึ่งขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง แสดงได้ดังรูปที่ 5.1

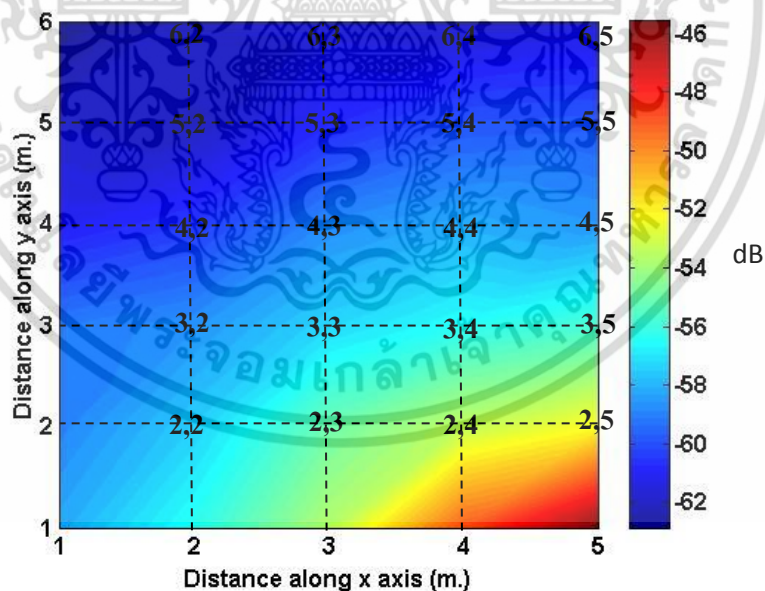


รูปที่ 5.1 ขบวนการประเมินผลด้วยการปรับเทียบในการหาตำแหน่งที่ผิดพลาดของระยะทาง

5.2.1 ความแรงของสัญญาณที่รับได้

พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในหน่วยเดซิเบล ซึ่งจะแสดงในแนวแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด

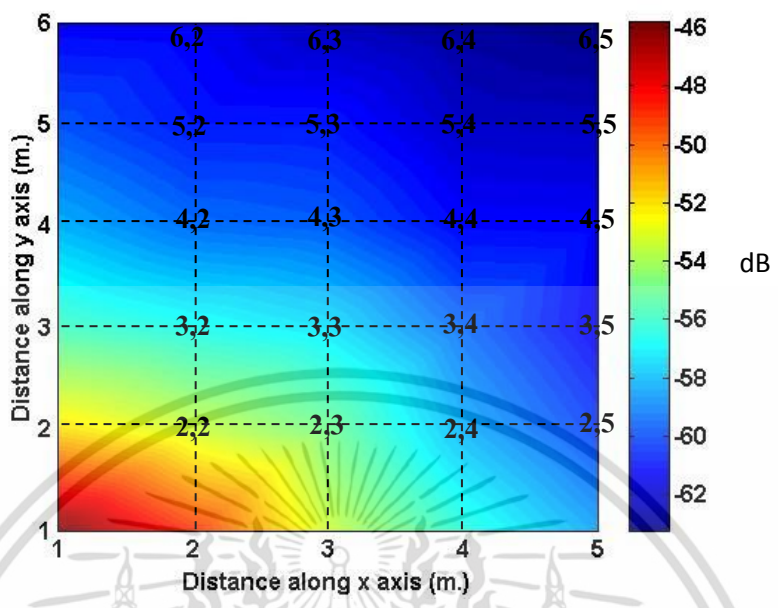
พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (5,0) ตามแบบจำลองการวัด จะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ดังรูปที่ 5.2 จากผลการทดลองวิจัยพบว่า ค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงที่สุดมีค่าเป็น -45.5745 เดซิเบล ที่พิกัด (5,1) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -62.9300 เดซิเบล ที่พิกัด (1,6)



รูปที่ 5.2 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 1

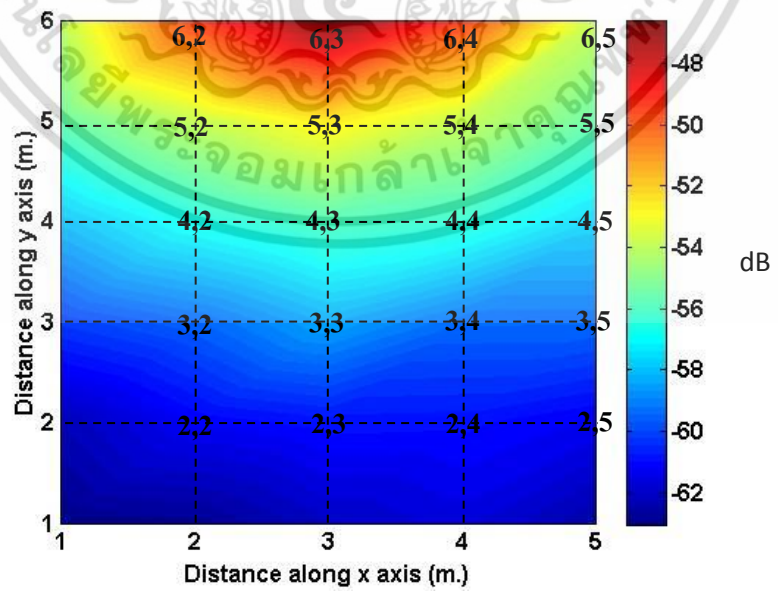
พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 2 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (1,0) ตามแบบจำลองการวัด จะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ดังรูปที่ 5.3 จากผลการ

ทดลองวิจัยพบว่า ค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงที่สุดมีค่าเป็น -45.8165 เดซิเบล ที่พิกัด (1,1) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -62.2899 เดซิเบล ที่พิกัด (5,6)



รูปที่ 5.3 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 2

พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 3 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (3,7) ตามแบบจำลองการวัด จะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ดังรูปที่ 5.4 จากผลการทดลองวิจัยพบว่า ค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงที่สุดมีค่าเป็น -46.5919 เดซิเบล ที่พิกัด (3,6) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -63.0442 เดซิเบล ที่พิกัด (1,1)



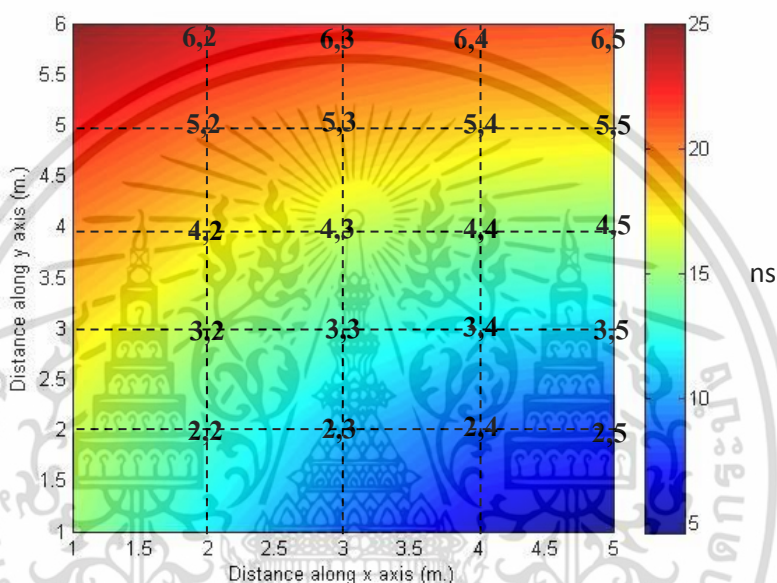
รูปที่ 5.4 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 เวลาที่สัญญาณมาถึง

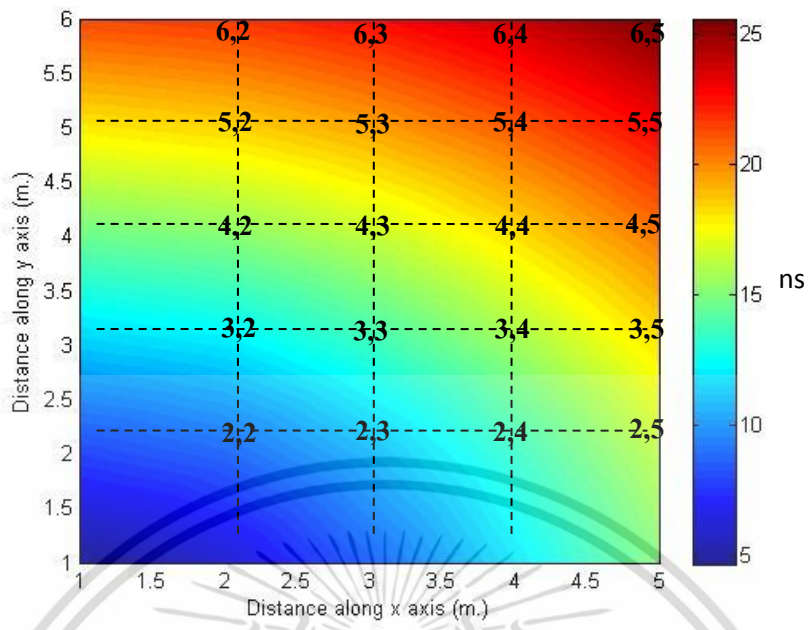
เวลาที่สัญญาณมาถึงจะแสดงเวลาที่สัญญาณเดินทางจากด้านส่งมาถึงด้านรับในหน่วยนาโนวินาที ซึ่งจะแสดงในแนวแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด

เวลาที่สัญญาณมาถึงที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (5,0) ตามแบบจำลองการวัด จะแสดงในรูปของเวลาที่สัญญาณเดินทางจากด้านส่งมาถึงด้านรับในหน่วยนาโนวินาที ดังรูปที่ 5.5 จากผลการทดลองวิจัยพบว่า ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดมีค่าเป็น 4.64 นาโนวินาที ที่พิกัด (5,1) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 25.04 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,6)



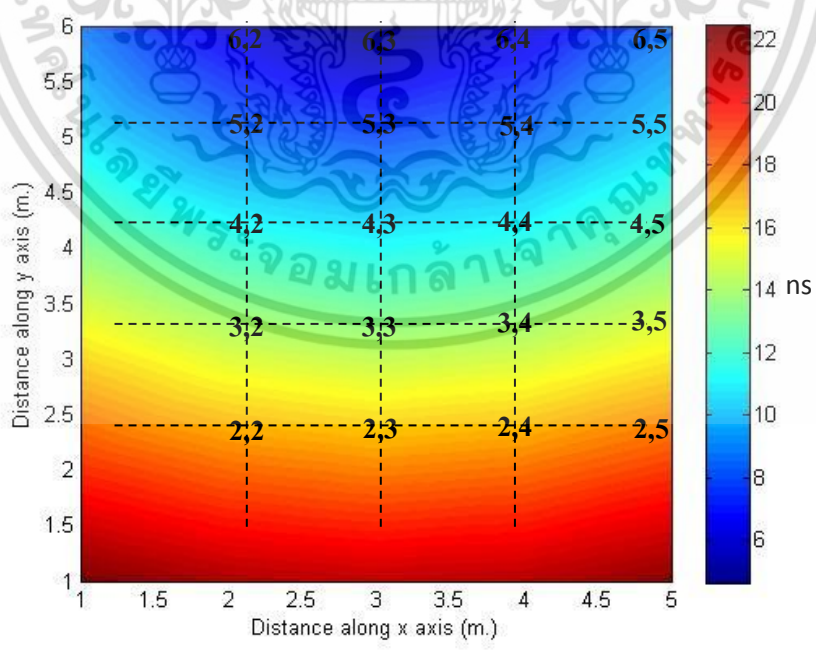
รูปที่ 5.5 เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 1

เวลาที่สัญญาณมาถึงที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 2 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (1,0) ตามแบบจำลองการวัด จะแสดงในรูปของเวลาที่สัญญาณเดินทางจากด้านส่งมาถึงด้านรับในหน่วยนาโนวินาที ดังรูปที่ 5.6 จากผลการทดลองวิจัยพบว่า ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดมีค่าเป็น 4.64 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,1) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 25.59 นาโนวินาที ที่พิกัด (5,6)



รูปที่ 5.6 เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 2

พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 3 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (3,7) ตามแบบจำลองการวัด จะในรูปของเวลาที่สัญญาณเดินทางจากด้านส่งมาถึงด้านรับในหน่วยนาโนวินาที ดังรูปที่ 5.7 จากผลการทดลองวิจัยพบว่า ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดมีค่าเป็น 4.65 นาโนวินาทีที่พิกัด (3,6) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 22.45 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,1)

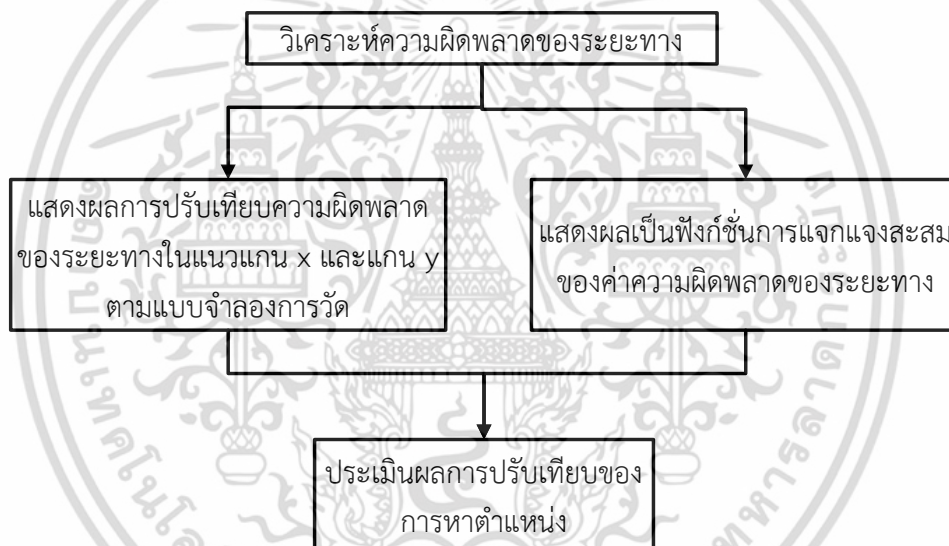


รูปที่ 5.7 เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดลองวิจัยความผิดพลาดของระยะทางและฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดของระยะทาง

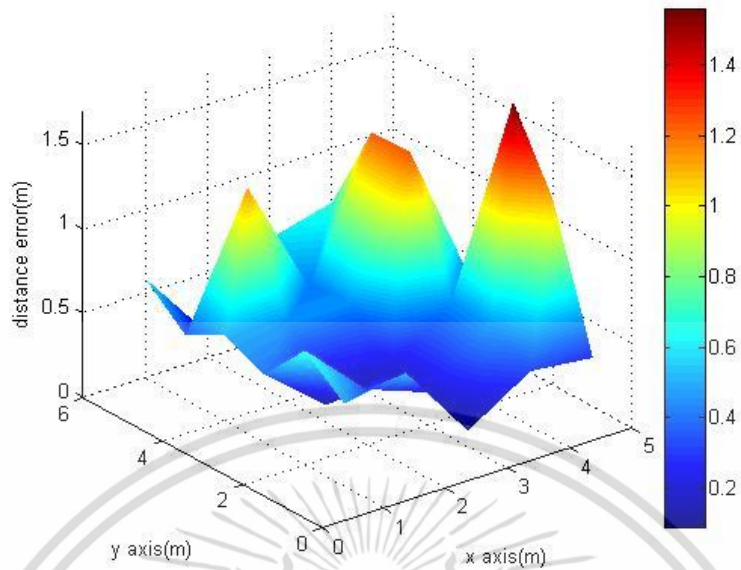
ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาจากค่าความผิดพลาดของระยะทาง ดังสมการที่ (3.17) จะแสดงในรูปแบบของค่าความผิดพลาดของระยะทางในแนวแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด และฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทาง โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง ซึ่งอาศัยเทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max ดังนั้นผลการทดลองวิจัยจะแบ่งออกได้ 4 แบบ ดังนี้ คือ เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง ซึ่งขั้นตอนการแสดงผลค่าความผิดพลาดของระยะทางแสดงได้ดังรูปที่ 5.8



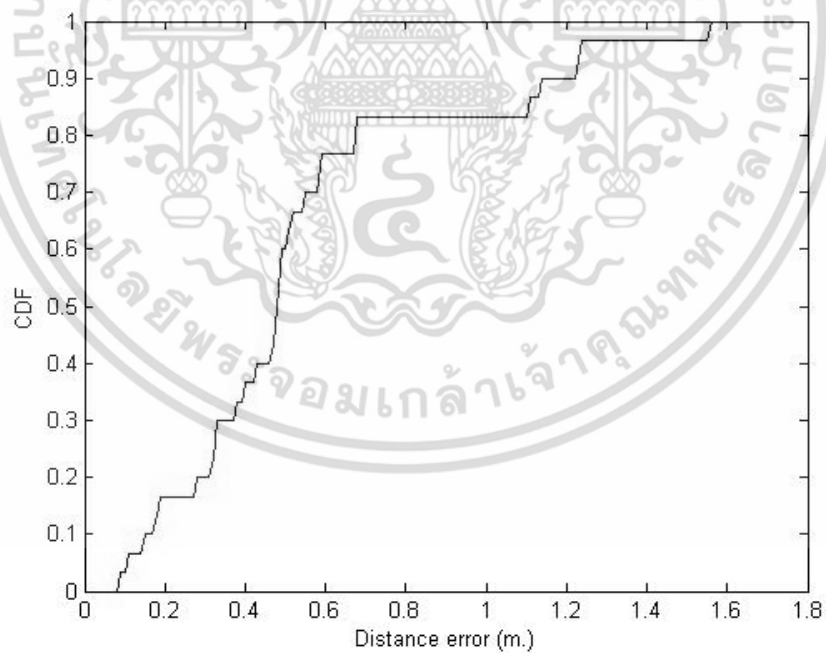
รูปที่ 5.8 ขบวนการประเมินผลความผิดพลาดของระยะทาง

5.3.1 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้

ผลการทดลองจะแสดงค่าความผิดพลาดของระยะทางในแนวแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด ซึ่งแกน z จะเป็นค่าความผิดพลาดของระยะทาง ดังรูปที่ 5.9 ซึ่งจะพบว่าค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด เท่ากับ 1.5567 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (5,3) ค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุด เท่ากับ 0.0900 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (3,1) และจะแสดงเป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางดังรูปที่ 5.10 จะพบว่าผลการทดลองวิจัยนี้มีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.4800 เมตร และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.5496 เมตร



รูปที่ 5.9 ค่าความผิดพลาดของระยะทางตามแบบจำลองการวัด ของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้

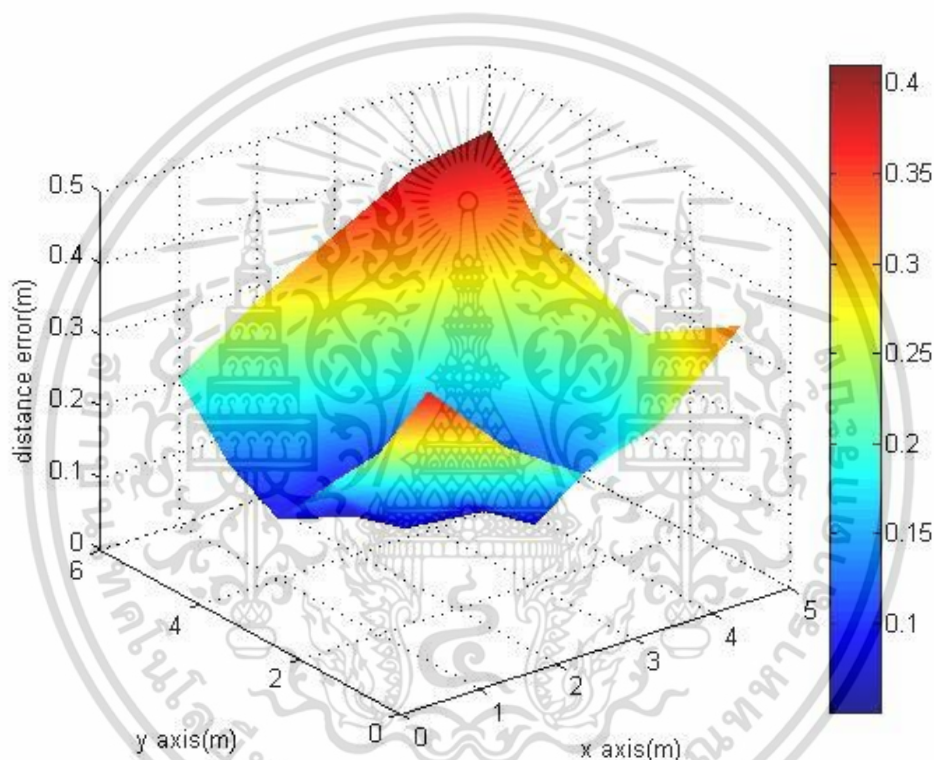


รูปที่ 5.10 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้

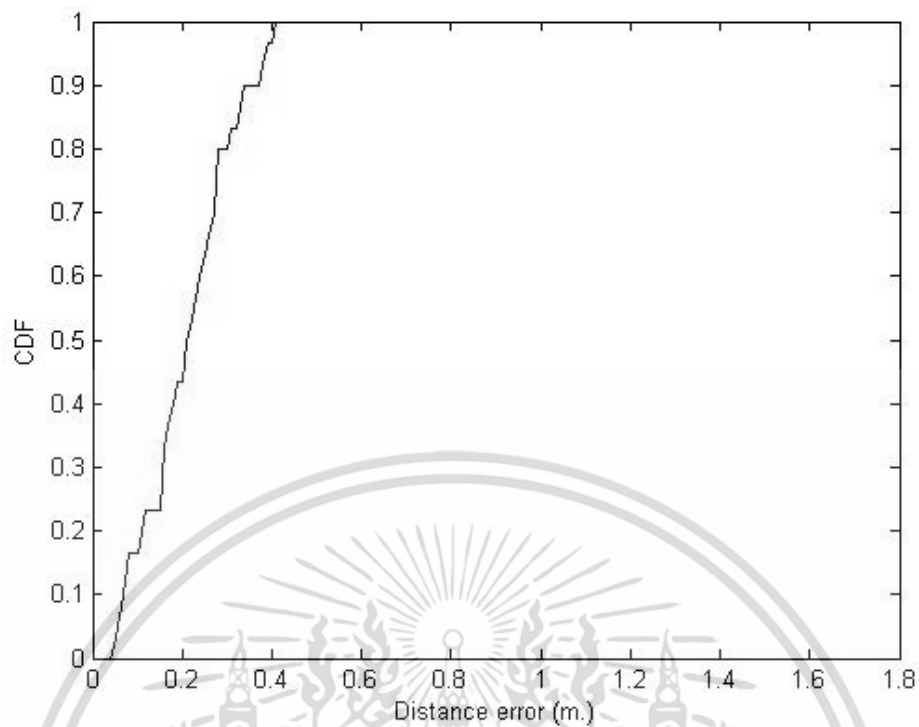
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง

ผลการทดลองจะแสดงค่าความผิดพลาดของระยะทางในแนวแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด ซึ่งแกน z จะเป็นค่าความผิดพลาดของระยะทาง ดังรูปที่ 5.11 ซึ่งจะพบว่าค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด เท่ากับ 0.4104 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (5,6) ค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุด เท่ากับ 0.0510 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (2,4) และจะแสดงเป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางดังรูปที่ 5.12 จะพบว่าผลการทดลองวิจัยนี้มีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.2100 เมตร และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.2164 เมตร



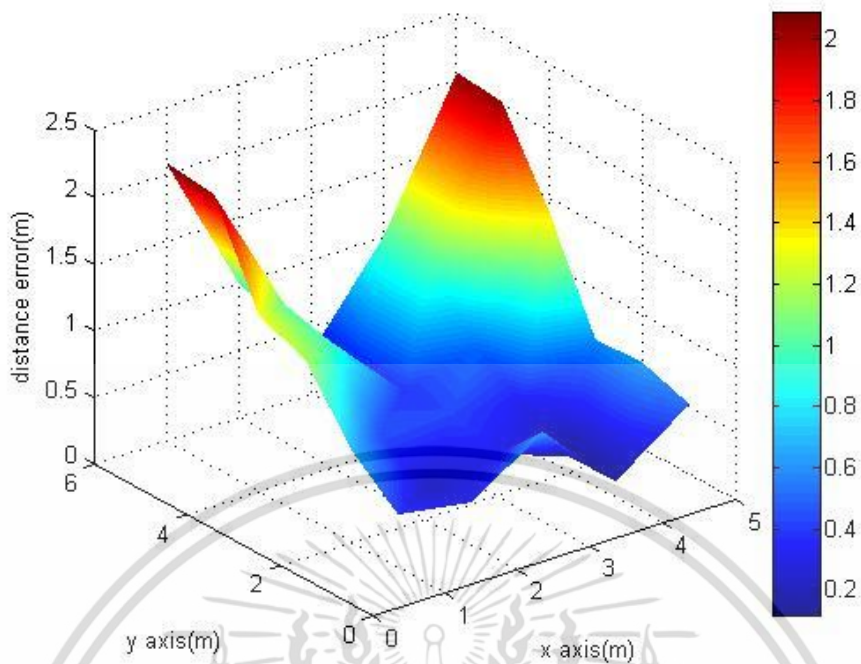
รูปที่ 5.11 ความผิดพลาดของระยะทางตามแบบจำลองการวัด ของเทคนิคการหาตำแหน่งด้วย Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง



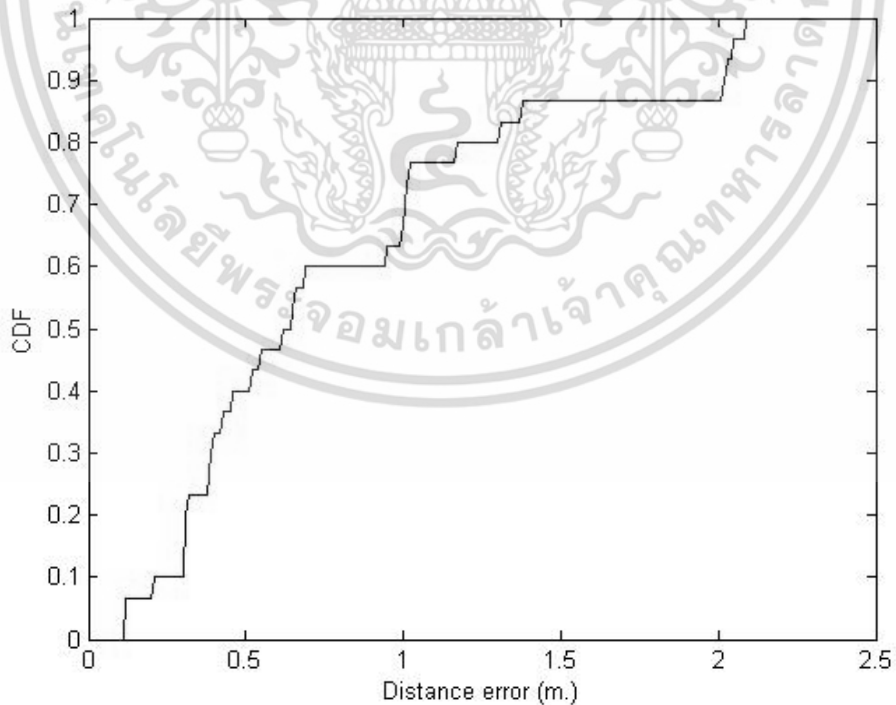
รูปที่ 5.12 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง

5.3.3 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้

ผลการทดลองจะแสดงค่าความผิดพลาดของระยะทางในแนวแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด ซึ่งแกน z จะเป็นค่าความผิดพลาดของระยะทาง ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งจะพบว่าค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด เท่ากับ 2.0910 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (1,6) ค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุด เท่ากับ 0.1181 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (4,2) และจะแสดงเป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางดังรูปที่ 5.14 จะพบว่าผลการทดลองวิจัยนี้มีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.6300 เมตร และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.8323 เมตร



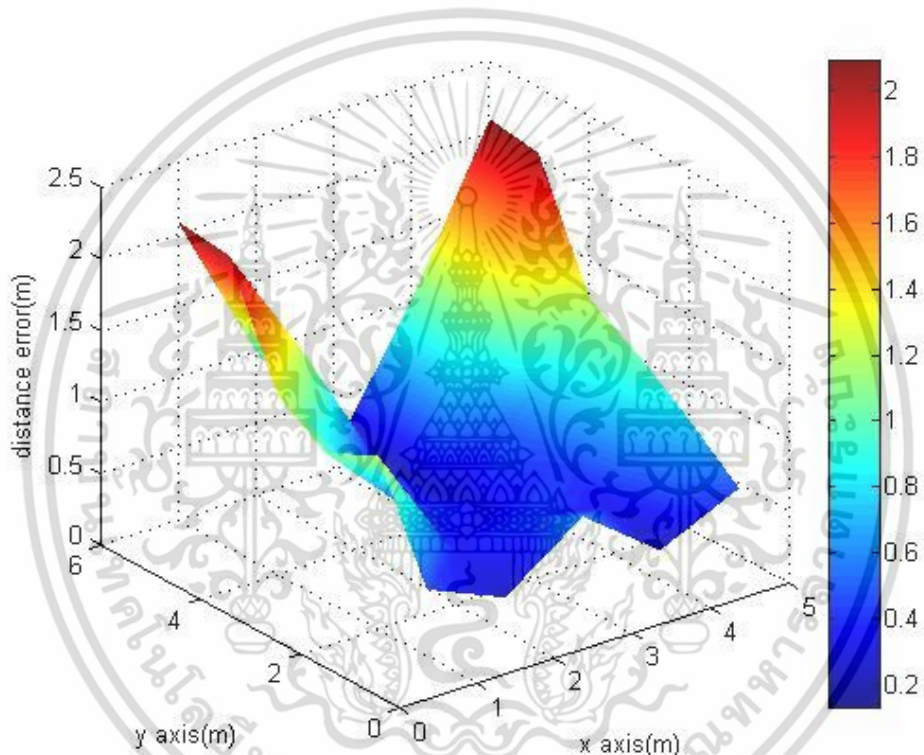
รูปที่ 5.13 ความผิดพลาดของระยะทางตามแบบจำลองการวัด ของเทคนิคการหาตำแหน่งด้วย Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้



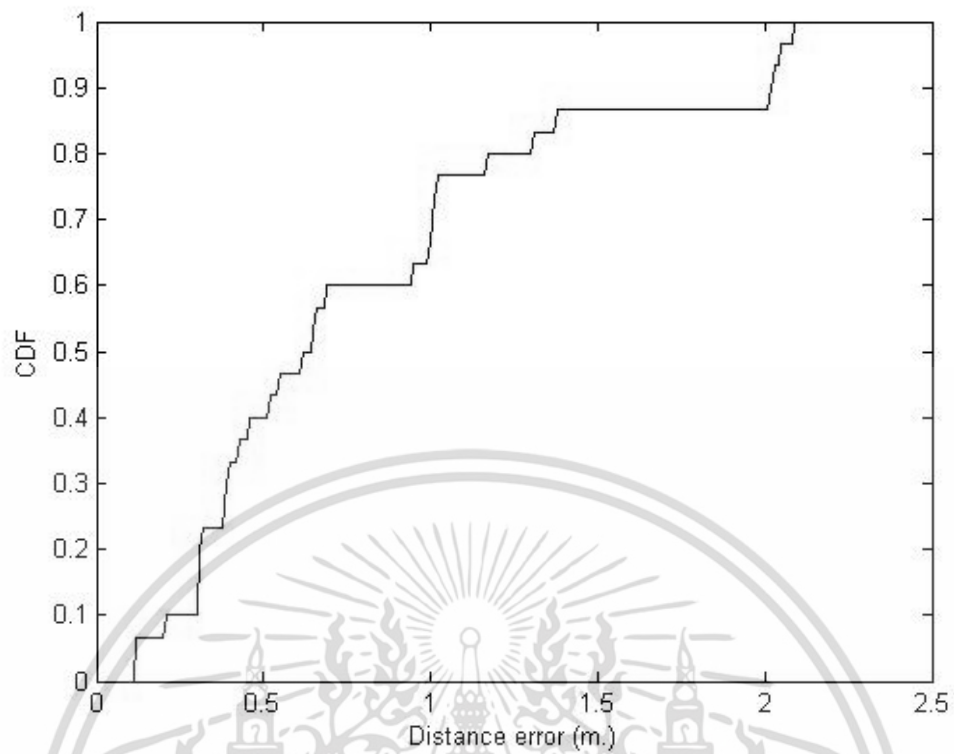
รูปที่ 5.14 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางของเทคนิคการหาตำแหน่งด้วย Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความของสัญญาณที่รับได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งด้วย Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง

ผลการทดลองจะแสดงค่าความผิดพลาดของระยะทางในแนวแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด ซึ่งแกน z จะเป็นค่าความผิดพลาดของระยะทาง ดังรูปที่ 5.15 ซึ่งจะพบว่าค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด เท่ากับ 2.0976 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (5,6) ค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุด เท่ากับ 0.1310 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (3,6) และจะแสดงเป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางดังรูปที่ 5.16 จะพบว่าผลการทดลองวิจัยนี้มีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.6000 เมตร และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.8166 เมตร



รูปที่ 5.15 ความผิดพลาดของระยะทางตามแบบจำลองการวัด ของเทคนิคการหาตำแหน่งด้วย Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง



รูปที่ 5.16 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 สรุป

การประเมินผลของการหาตำแหน่งด้วยการปรับเทียบโดยใช้หลักการของ Trilateration และ Min-Max จากผลการทดลองวิจัยของวิทยานิพนธ์เห็นได้ การพิจารณาความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้หลักการของ Trilateration และ Min-Max ที่แสดงในรูปของการฟังก์กระจายสะสมทำให้ได้ว่าวิธีการของ Trilateration ให้ผลเข้าใกล้กับผลการวัดมากกว่าวิธีการของ Min-Max ในกรณีที่ใช้เสาอากาศส่งสามต้นทั้งสัญญาณที่มาถึงและเวลาที่มาถึงดังที่ได้แสดงไว้ในบทนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการเปรียบเทียบในการหาค่าแห่งด้วยวิธีการหาค่าแห่งภายในสถานะแวดล้อมภายในอาคารที่เหมาะสม โดยใช้ช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งในช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz ตามมาตรฐานที่คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา กำหนด ได้ทำการประเมินผลของการหาค่าแห่งภายในอาคารในสถานะที่มองเห็นด้วยระดับสายตาโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาค่าแห่งโดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิคหรือวิธีการ Trilateration และ Min-Max ซึ่งพิจารณาจากพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสัญญาณแถบกว้างยิ่งมาใช้ในการคำนวณหาค่าแห่ง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบจำลองการวัด และทำการทดลองวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์โดยใช้สายอากาศด้านส่ง และด้านรับแบบกรวยคู่ภายในสถานะแวดล้อมภายในอาคารในสถานะที่มองเห็นด้วยระดับสายตา โดยได้นำฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ได้จากการทดลองวัดมาใช้ในการหาสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่งเพื่อนำไปหาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแห่ง ซึ่งได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาค่าแห่งระหว่างเทคนิคการหาค่าแห่งด้วย Trilateration และ Min-Max

จากผลการทดลองวิจัยเมื่อนำสัญญาณแถบกว้างยิ่งมาใช้ในการหาค่าแห่งภายในอาคาร ซึ่งจะพิจารณาค่ามากที่สุด ค่าน้อยที่สุด ค่ามัธยฐาน และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง ซึ่งจะแสดงได้ดังตารางที่ 6.1 ซึ่งเมื่อพิจารณาตามแบบจำลองที่ได้ทำการทดลองวัด พบว่าตำแหน่งช่วงกลางตามแบบจำลองการวัดให้ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาค่าแห่งมากกว่าตำแหน่งช่วงขอบตามแบบจำลองการวัดเพราะว่าช่วงกลางตามแบบจำลองการวัดสามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุดจากสายอากาศส่งทั้งสามอัน จากผลการทดลองวิจัยพบว่าเมื่อนำสัญญาณแถบกว้างยิ่งมาใช้ในการหาค่าแห่งจะให้ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาค่าแห่งมาก โดยเทคนิคการหาค่าแห่งแบบ Trilateration ให้ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาค่าแห่งมากกว่าเทคนิคการหาค่าแห่งแบบ Min-Max เมื่อนำพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงมาใช้ในการหาค่าแห่งจะให้ความแม่นยำมากกว่าพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ เนื่องจากค่ากำลังงานมีผลกระทบจากการการเกิดคลื่นหลายวิธีมากกว่าเวลาประวิง และเทคนิคการหาค่าแห่งด้วย Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงให้ความแม่นยำในการหาค่าแห่งมากที่สุด

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบความผิดพลาดของระยะทาง

ความผิดพลาดของระยะทาง	น้อยที่สุด (เมตร)	มากที่สุด (เมตร)	มัธยฐาน (เมตร)	เฉลี่ย (เมตร)
วิธีการ Trilateration ใช้พารามิเตอร์ ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้	0.09	1.56	0.48	0.55

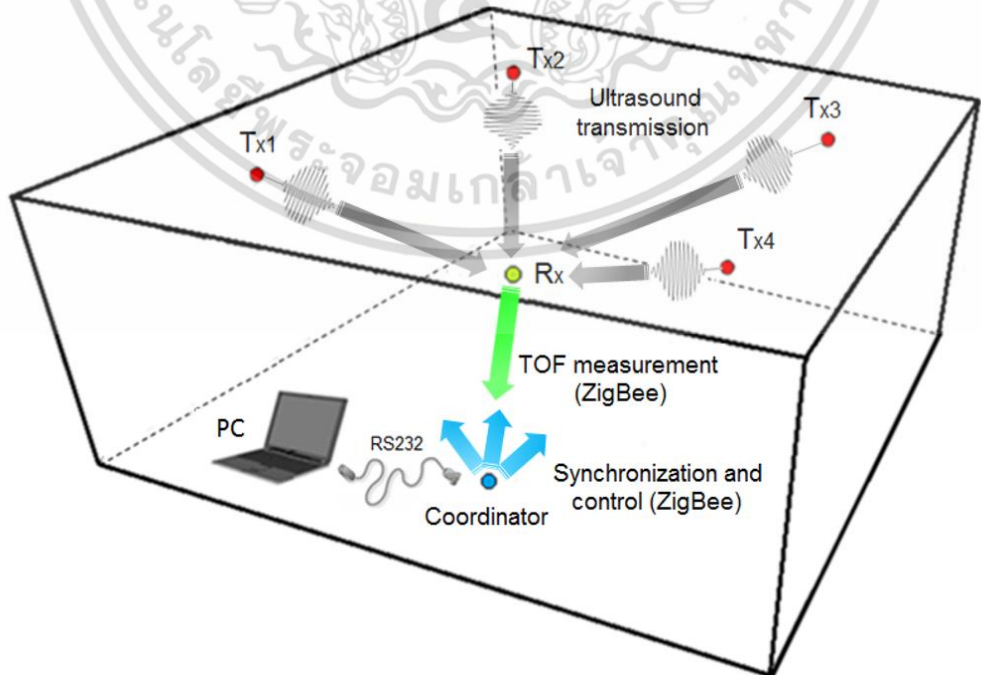
วิธีการ Trilateration ใช้พารามิเตอร์ เวลาที่สัญญาณมาถึง	0.05	0.41	0.21	0.21
วิธีการ Min-Max ใช้พารามิเตอร์ค่า ความแรงของสัญญาณที่รับได้	0.12	2.09	0.63	0.83
วิธีการ Min-Max ใช้พารามิเตอร์เวลา ที่สัญญาณมาถึง	0.13	2.09	0.60	0.81

6.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ประเมินผลการหาตำแหน่งภายในอาคารในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตา และภายในสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีวัตถุหรือสิ่งของใดๆในพื้นที่ที่ทำการทดลอง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการวิจัยที่จะทำการทดลองประเมินผลประสิทธิภาพความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยสภาวะที่มองไม่เห็นด้วยระดับสายตา (Non line of sight) และในสภาวะแวดล้อมที่มีวัตถุหรือสิ่งของอยู่ในพื้นที่ที่ทำการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการประเมินผลของการหาตำแหน่งภายในอาคารเปรียบเทียบกับระหว่างเทคนิคการหาตำแหน่งเพียงสองเทคนิคเท่านั้น ซึ่งยังมีเทคนิคการหาตำแหน่งอื่นๆอีกหลายแบบที่สามารถนำมาเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งได้ ซึ่งเทคนิคการหาตำแหน่งแบบอื่นๆอาจจะให้ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งที่ดีกว่า ซึ่งจะเป็นแนวทางในการศึกษาทดลองเปรียบเทียบกันในอนาคต

วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้สายอากาศส่งสามต้นซึ่งเป็นจำนวนที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ในการหาตำแหน่งด้วยเทคนิคทั้งสองแบบ โดยหากเพิ่มจำนวนสายอากาศส่งจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำและประสิทธิภาพในการหาตำแหน่ง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการศึกษาเปรียบเทียบผลการทดลองในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Yang and Y. Chen, "Indoor Localization Using Improved RSS-Based Lateration Methods," IEEE Communications Society, 2009.
- [2] F. Subhan, A. Rozyyez, H. Hasbullah and S. Bakhsh, "Indoor Positioning in Bluetooth Networks using Fingerprinting and Lateration approach," IEEE, 2011.
- [3] Z. Sahinoglu, S. Gezici and I. Guvenc, "Ultra-wideband Positioning Systems," Cambridge University Press, 2008.
- [4] F. Nekoogar, "Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications," New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- [5] H. Nikookar and R. Prasad, "Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications," Springer, 2009.
- [6] M. Di Benedetto and G. Giancola, "Understanding Ultra Wideband Radio Fundamentals," New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [7] D. A. Gratton, "Developing Practical Wireless Applications," Boston: Elsevier, 2006.
- [8] H. Nikookar and R. Prasad, "Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications," Springer, 2009.
- [9] R. Want, A. Hopper and V. Falcao, "The active badge location system," ACM Transactions on Information Systems, Vol. 40, pp. 91-102, Jan. 1992.
- [10] J. A. Tauber, "Location systems for pervasive computing," Area Exam Report, Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [11] J. Sangthong, P. Supanakoon and S. Promwong, "Study on Indoor Localization Using UWB Fingerprinting," The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference, pp. 1223-1227, March. 2010.
- [12] B. N. Hood and P. Barooah, "Estimating DOA From Radio-Frequency RSSI Measurements Using an Actuated Reflector," IEEE SENSORS JOURNAL, Vol.11, February. 2011.
- [13] P. Pivato, L. Palopoli and D. Petri, "Accuracy of RSS-Based Centroid Localization Algorithm in an Indoor Environment," IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, Vol. 60, October. 2011.
- [14] K. langendoen and N. Reijers, "Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison," Elsevier, 2003.
- [15] F. Izquierdo, M. Ciurana, F. Barcelo, J. Paradells and E. Zola, "Performance evaluation of a TOA-based trilateration method to locate terminals in WLAN," IEEE, 2006.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] A. Migel, J. Alfredo and M. Pedro, "Location-Based Information Systems Developing Real-Time Tracking Applications," Chapman & Hall/CRC Computer and Information Science Series.
- [17] R. Bose, "Ultra Wideband Indoor Channel Modeling for Personal Area Networking," Proc, "EuCAP 2006", November. 2006.
- [18] J. Yang and Y. Chen, "Indoor Localization Using Improved RSS-Based Lateration Methodes." IEEE GLOBECOM, 2009.
- [19] A. de Keijzer, "Localization in Ad Hoc Sensor Networks," Masters Thesis, University of twente, Netherlands, 2003.
- [20] S. Promwong, W. Hachitani, and J. Takada, "Experimental evaluation scheme of UWB antenna performance," Tech. on Instrumentation and Measurements, IEEE Japan, IM-03-35, 2003.
- [21] S. Promwong, J. Takada, "Performance evaluation of UWB Transmission Waveform with Various Antennas," WPMC 2014, Japan, 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [1] S. Monta, S. Promwong and V. Kingsakda, "Evaluation of Ultra Wideband Indoor Localization with Trilateration and Min-Max Techniques," IEEE Communications Society, 2009.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล ศุภชัย มณฑา
วัน เดือน ปีเกิด 24 มิถุนายน 2526 ปราจีนบุรี
ที่อยู่ 113/1 ถนนเทศบาลดารี ตำบลหน้าเมือง
อำเภอเมืองปราจีนบุรี จังหวัดปราจีนบุรี 25000 โทร.037-650-424

ประวัติการศึกษา 2533 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ระบบโทรคมนาคม
2.) ระบบสายอากาศ

ประสบการณ์การทำงาน
พ.ศ.2545-2559 ตำแหน่งพนักงานโทรคมนาคม
ปัจจุบัน กรรมการสื่อสารทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้