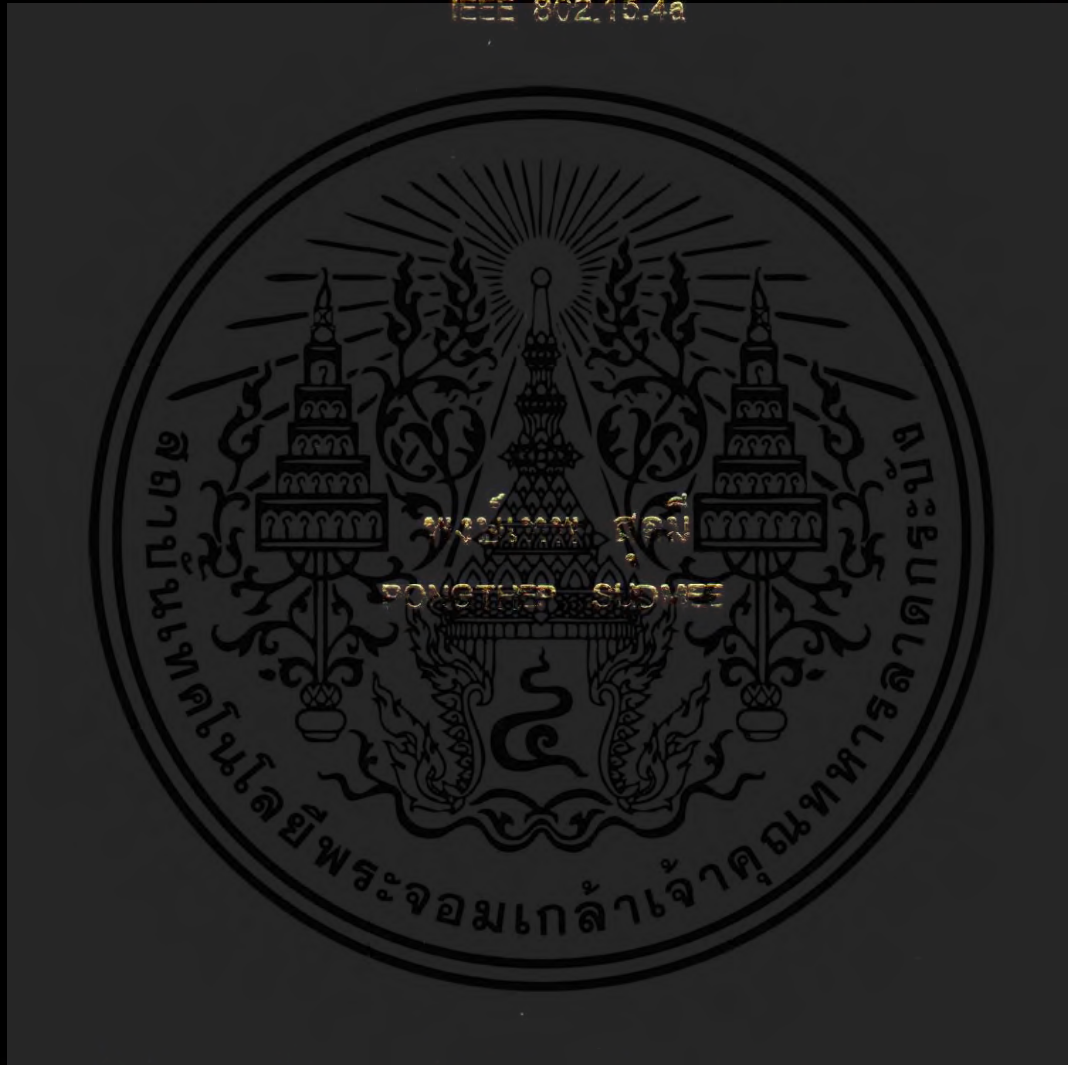


# การหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคไตรแลตเทรชันร่วมกับมาตรฐาน

IEEE 802.15.4a

INDOOR POSITIONING USING TRIANGULATION TECHNIQUE WITH  
IEEE 802.15.4a



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-010-152

การหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคไตรลาเตอร์เรชันด้วยมาตรฐาน  
IEEE 802.15.4a

INDOOR POSITIONING USING TRILATERATION TECHNIQUE WITH  
IEEE 802.15.4a



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
พ.ศ.2559  
KMITL-2016-EN-M-010-152  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INDOOR POSITIONING USING TRILATERATION TECHNIQUE WITH  
IEEE 802.15.4a



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KMUTL-2016-EN-M-010-152  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้








COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคไตรลาเตอร์เรชันด้วยมาตรฐาน IEEE 802.15.4a  
Thesis Title Indoor Positioning using Trilateration Technique with IEEE 802.15.4a  
นักศึกษา นายพงษ์เทพ สุดมี้  
รหัสประจำตัว 57601145  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-010-152

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวกภาค	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาดีพงษ์	
ศ.ดร.ประยุทธ์	อัครเอกมาลิน	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกุล	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 15.00-17.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-302

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 โดยขึ้นต่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคไตรลาเตอร์เรชั่นด้วยมาตรฐาน IEEE 802.15.4a
นักศึกษา	นายพงษ์เทพ สุคมี
รหัสนักศึกษา	57601145
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สถาพร พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบการระบุตำแหน่งได้มีการใช้กันกว้างขวาง ระบบการหาตำแหน่งที่กำลังนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม อย่างไรก็ตามระบบระบุตำแหน่งด้วยความเทียมไม่สามารถใช้ภายในอาคารได้ เพราะในบางครั้งคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับได้มีคุณภาพแย่หรือต่ำซึ่งไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน ระบบการระบุตำแหน่งภายในอาคารจึงถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการหาตำแหน่ง ซึ่งมีหลายเทคนิคที่ใช้ในการประเมินตำแหน่ง ซึ่งเทคนิคไตรเลเตอร์เรชั่นเป็นเทคนิคทางเรขาคณิต เทคนิคนี้สามารถประเมินตำแหน่งเป้าหมายโดยใช้จุดตัดของวงกลมที่สามารถที่รับรู้จากชุดของตำแหน่งอ้างอิง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการหาตำแหน่งภายในอาคารในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตา โดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งยบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4a ร่วมกับเทคนิคไตรเลเตอร์เรชั่นในการประเมินตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับและพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง สำหรับตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ ทำการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวคเตอร์ที่ช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz ความแม่นยำจะแสดงในรูปแบบของค่าความผิดพลาดของระยะทาง ซึ่งแต่ละกรณีจะแสดงเป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทาง จากผลลัพธ์ ในกรณีของพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ ช่วงความถี่ 5-11 GHz มีความถูกต้องที่สุดเมื่อเทียบกับช่วงความถี่ 3-5 GHz และ 3-11 GHz แต่สำหรับในกรณีของพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณที่มาถึงใน 3 ช่วงความถี่ จะมีค่าความผิดพลาดของระยะทางแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกเหนือจากนั้น พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณที่มาถึงมีความถูกต้องและแม่นยำมากกว่าพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับในทุกกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Indoor Positioning Using Trilateration Technique with IEEE 802.15.4a
<b>Student</b>	Mr. Pongthep Sudmee
<b>Student ID.</b>	57601145
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Sathaporn Promwong

## ABSTRACT

Nowadays, the localization systems had been widely utilized. The popular use of localization system is the global position system (GPS). However, the system fails in particular environments such as indoors because low received signal power. It is not appropriate to take a position. The indoor localization system was used to assist in finding a position in an indoor environment. There are several techniques used to evaluate. Trilateration technique is a technique of geometric. This technique can estimate the target position by using the intersection of circle that can be obtained from a set of reference positions. This thesis studies on indoor positioning in line of sight (LOS) using by IEEE 802.15.4a standard in ultra wideband signal option which Trilateration technique will be used to estimate position related parameter received signal strength and time of arrival. The biconical antennas were used as both transmitter and receiver antennas. The vector network analyzer (VNA) was used to measure at the frequency ranging from 3-5 GHz, 5-11 GHz and 3-11 GHz. The accuracy will be displayed in the term of distance error. The cumulative distribution function (CDF) of distance error of each case is shown. From the results, frequency ranged 5-11 GHz is better accuracy than 3-5 GHz and 3-11 GHz in RSS case but small difference and distance errors are equal in TOA case. Besides that, TOA has the better accuracy than RSS case.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจากอาจารย์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ ช่วยเหลืออบรมสั่งสอน และคอยชี้แนะแนวทางเกี่ยวกับการศึกษาวิจัยอย่างดีมาโดยตลอด ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในห้องวิจัย UWBR (Ultra Wideband Radio System) ทุกท่านที่ให้คำแนะนำความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆด้านมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านและทุกท่านที่สนใจ

พงษ์เทพ สุตมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐาน.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	7
2.2.1 ประวัติของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	7
2.2.2 นิยามของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	8
2.2.3 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง.....	9
2.2.4 มาตรฐานของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง.....	15
2.2.5 จุดเด่นของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง.....	17
2.3 ทฤษฎีการหาตำแหน่ง.....	18
2.3.1 เทคโนโลยีที่ใช้ในการหาตำแหน่งภายในอาคาร.....	18
2.3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่ง.....	19
2.3.3 เทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง.....	21
2.4 สรุป.....	22
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง.....	23
3.1 บทนำ.....	23
3.2 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง.....	24
3.3 สัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่ง.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	26
3.4.1 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้.....	27
3.4.2 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง.....	27
3.5 เทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง.....	28
3.5.1 เทคนิคการหาตำแหน่งแบบไตรเลเตอร์เรชัน.....	28
3.6 วิเคราะห์ความแม่นยำในการหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	30
3.6 สรุป.....	30
<b>บทที่ 4 การทดลองวัดและการหาตำแหน่ง.....</b>	<b>31</b>
4.1 บทนำ.....	31
4.2 ขั้นตอนในการเตรียมการทดลอง.....	32
4.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์.....	32
4.2.2 สายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical Antenna).....	33
4.3 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร.....	35
4.3.1 แบบจำลองการวัดและการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร.....	35
4.4 สรุป.....	38
<b>บทที่ 5 ผลการทดลองวัดและวิเคราะห์.....</b>	<b>39</b>
5.1 บทนำ.....	39
5.2 การทดลองวิจัยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองวัด.....	39
5.2.1 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้.....	40
5.2.2 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง.....	42
5.3 ผลการทดลองวิจัยแสดงค่าความผิดพลาดของระยะทางและฟังก์ชัน การแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทาง.....	45
5.3.1 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบไตรเลเตอร์เรชัน โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้.....	46
5.3.1 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบไตรเลเตอร์เรชัน โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองวิจัย.....	49
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	49
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	54
ประวัติผู้เขียน .....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร ..... 10
2.2	ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร ..... 11
2.3	ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานที่แก้ไขใหม่โดย ETSI สำหรับการใช้งานของระบบการสื่อสารภายในอาคาร ..... 12
2.4	ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แพร่กระจายออกมาสำหรับการสื่อสารภายในอาคารเท่านั้นที่กำหนดโดย MIC ..... 13
2.5	ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แพร่กระจายออกมาสำหรับการสื่อสารแลบความถี่ร่วม ..... 14
4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ..... 36
4.1	เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทาง ..... 50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ในการส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ต่างๆ.....	6
2.2 การเปรียบเทียบแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนของระบบการสื่อสารแถบแคบและระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง .....	8
2.3 การเปรียบเทียบระดับความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง การสื่อสารแถบแคบอื่นๆ .....	9
2.4 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมตามข้อกำหนด FCC สำหรับระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคาร .....	10
2.5 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมตามข้อกำหนด ETSI สำหรับระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคาร .....	11
2.6 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมตามข้อกำหนด ETSI ที่แก้ไขใหม่ สำหรับระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง ภายในอาคาร .....	12
2.7 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมสำหรับการสื่อสารภายในอาคารที่กำหนดโดย MIC	13
2.8 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมสำหรับการสื่อสารภายในอาคารที่กำหนดร่วมกันโดย FCC, ETSI และ MIC .....	14
2.9 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ประเภทต่าง ๆ สำหรับระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง	16
2.10 การหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึง .....	20
2.11 การหาตำแหน่งโดยการใช้พารามิเตอร์ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง .....	21
2.12 การหาตำแหน่งด้วยเทคนิค Trilateration .....	22
3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	24
3.2 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา.....	25
3.3 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่.....	25
3.4 รูปคลื่นของสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่ง.....	26
3.5 เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration .....	28
4.1 ขั้นตอนการทดลองวัดและการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	31
4.2 เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer) .....	32
4.3 สายอากาศกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัด .....	33
4.4 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S11) ของสายอากาศแบบกรวยคู่ .....	34
4.5 อัตราขยายและเฟสของสายอากาศแบบกรวยคู่ .....	34
4.6 แบบจำลองการทดลองวัดในมุมมองด้านบน .....	36
4.7 แบบจำลองการทดลองวัดในมุมมองด้านข้าง.....	37
4.8 สถานที่จริงใช้ในการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง.....	37
4.9 ลักษณะการจัดวางสายอากาศด้านส่ง.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง.....	40
5.2 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 3-5 GHz .....	40
5.3 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 5-11 GHz .....	41
5.4 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 3-11 GHz .....	42
5.5 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 3-5 GHz .....	43
5.6 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 5-11 GHz .....	44
5.7 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 3-11 GHz .....	44
5.8 ขั้นตอนการแสดงค่าความผิดพลาดของระยะทาง.....	45
5.9 ค่าความผิดพลาดของระยะทางในการหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz.....	46
5.10 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางการหาตำแหน่งของเทคนิคไตรลาเตอร์เรชั่น โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz .....	47
5.11 ค่าความผิดพลาดของระยะทางในการหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงในช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz.....	48
5.12 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางการหาตำแหน่งของเทคนิคไตรลาเตอร์เรชั่น โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงในช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz .....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการสื่อสารมีความจำเป็นต่อมนุษย์อย่างมาก ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารทำให้มนุษย์มีความสะดวกสบายในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น การทำงาน การเรียน การเดินทาง เป็นต้น ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายนิยมนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากข้อดีของเทคโนโลยีแบบไร้สายคือ ลดต้นทุนในการใช้สายเป็นตัวกลางในการสื่อสาร และมีความสะดวกในการใช้งาน ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เช่น การสื่อสารในเครือข่ายเซลลูลาร์ การสื่อสารผ่านดาวเทียม และการสื่อสารโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ และยังนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น การสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในเครือข่ายเซลลูลาร์ การแพร่ภาพและเสียงผ่านดาวเทียม การรับส่งข้อมูลไร้สายผ่านอุปกรณ์บลูทูธ การใช้นาฬิกา และการหาตำแหน่งแบบไร้สาย เป็นต้น จึงกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเป็นส่วนหนึ่งในการดำรงชีวิตของมนุษย์แล้ว

ด้วยความต้องการเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีความเร็วสูง จึงทำให้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นโครงข่ายพื้นที่ท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) และโครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network: WPAN) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามก็ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนมีการกล่าวกันมากขึ้นถึงแถบกว้างไร้สาย (Wireless broadband) และมีแนวโน้มว่าจะนำมาใช้ในสถานศึกษา ในโรงพยาบาล บ้านพักอาศัย และสำนักงาน มีเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับการศึกษาวิจัยกันมากในขณะนี้ นั่นก็คือเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง เพราะเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองความต้องการผู้ใช้ได้ดีมาก โดยมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก สามารถส่งข้อมูลได้สูงมาก มีความจุสูงและใช้กำลังงานการส่งข้อมูลต่ำ จะเห็นว่าการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งจะนำไปใช้ภายในอาคารเป็นหลักเช่น (Wireless Personal Area Network: WPAN) ซึ่งในการใช้งานจริงนั้น อาจมีการใช้งานในรูปแบบอื่นที่ไม่ใช่เพียงแคภายในอาคารเท่านั้น มีการใช้งานในรูปแบบอื่น ๆ

การหาตำแหน่งเป็นการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย ในปัจจุบันการหาตำแหน่งได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ทำให้สามารถทราบถึงตำแหน่งของสิ่งที่ต้องการหาสามารถติดตามตำแหน่งหรือทราบตำแหน่งของสิ่งที่ต้องการได้ตลอดเวลา การประยุกต์ใช้งานการหาตำแหน่ง เช่น การหาตำแหน่งของรถยนต์ จะช่วยในเรื่องของการจราจรรถยนต์ การหาตำแหน่งของสินค้า การหาตำแหน่งของสัตว์เลี้ยง การหาติดตามและหาตำแหน่งของผู้ป่วยช่วยในด้าน การแพทย์ และการชี้เป้าของศัตรูช่วยในทางการทหาร เป็นต้น เมื่อแบ่งการหาตำแหน่งตามลักษณะสถานะแวดล้อม จะแบ่งได้เป็นการหาตำแหน่งภายในอาคารและการหาตำแหน่งภายนอกอาคาร

การหาตำแหน่งภายนอกอาคารโดยทั่วไปจะใช้การหาตำแหน่งด้วยดาวเทียม (Global Position System: GPS) ซึ่งระบบนี้ถูกหยิบยกเอามาใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น เนื่องด้วยเป็นเทคโนโลยีระบุตำแหน่งที่ตั้งที่มีความแม่นยำสูงมาก อีกทั้งค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ยังมีค่าน้อยกว่า 10 เมตร (ในพิกัด 2 มิติ) อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีดาวเทียมที่ใช้ดังกล่าวยังมีขีดจำกัดในบางสภาพแวดล้อม อาทิเช่น ในตึกหรือบริเวณหุบเหวลึก อีกทั้งสถานที่เหล่านี้ในบางครั้งก็ไม่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้ หรือในบางครั้งคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับได้มีคุณภาพแย่มากหรือไม่เหมาะสมต่อการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้งาน [1] ภายในอาคาร เนื่องจากภายในอาคารมีปัญหาเรื่องการรับสัญญาณดาวเทียม จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายอื่น ๆ มาใช้ เช่น เทคโนโลยีซิกบี เทคโนโลยีบลูทูธ เทคโนโลยีการระบุตัวตนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Identification: RFID) และเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีที่ได้กล่าวข้างต้นล้วนเป็นเทคโนโลยีแบบแถบแคบ ซึ่งมีแบนด์วิดท์ที่แคบ จึงให้ความแม่นยำในการหาตำแหน่งในระดับหนึ่ง [2], [3] เนื่องจากพื้นที่ภายในอาคารมีขนาดที่จำกัด การหาตำแหน่งภายในอาคารจึงต้องการความแม่นยำเป็นอย่างมาก ดังนั้นเทคโนโลยีแถบกว้างจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ เพราะเทคโนโลยีแถบกว้างยังมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ทำให้พัลส์แคบมากหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ามีความละเอียดทางเวลาสูงมาก ซึ่งเมื่อนำมาใช้งานในการหาตำแหน่งจะทำให้มีความแม่นยำสูง

เทคโนโลยีแถบกว้างยังเป็นการสื่อสารระยะใกล้ความเร็วสูง โดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission: FCC) [4] ได้อนุญาตให้อุปกรณ์สื่อสารใช้เทคโนโลยีแถบกว้างได้ในปี ค.ศ. 2002 มีการนำมาใช้งานในเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Networks: WPANs) โดยสัญญาณแถบกว้างยังมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ในโดเมนทางความถี่ และมีพัลส์ที่แคบมากในโดเมนทางเวลา ทำให้มีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงมาก สามารถคาดคะเนเวลาที่สัญญาณมาถึงของวิถีแรกได้อย่างแม่นยำ ซึ่งทำให้การหาตำแหน่งมีความแม่นยำเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังขจัดปัญหาที่เกิดจากองค์ประกอบของคลื่นหลายวิถี (Multipath Component: MPC) และอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยังใช้พลังงานต่ำอีกด้วย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีแถบกว้างมีความเหมาะสมกับการหาตำแหน่งภายในอาคาร

ปัจจุบันมีเทคนิคที่ประเมินตำแหน่งอยู่หลายเทคนิค เช่น การพิจารณาแบบรูปของตำแหน่ง, ไตรลาเตอร์เรชัน, Weight Centroid และ Min-Max เป็นต้น ซึ่งเทคนิคการประเมินตำแหน่งเหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับ ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณ อาทิเช่น ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength), มุมของการมาถึง (Angle of Arrival) เวลาที่มาถึง (Time of Arrival) และความแตกต่างของเวลาที่มาถึง (Time Difference of Arrival) [5, 6] เทคนิคไตรลาเตอร์เรชัน เป็นเทคนิคหนึ่งของเทคนิคในด้านเรขาคณิต เทคนิคนี้สามารถประเมินตำแหน่งเป้าหมายโดยใช้จุดตัดของวงกลมที่ได้รับจากชุดของตำแหน่งอ้างอิง เมื่อนำเทคโนโลยีแถบกว้างมาใช้กับเทคนิคและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่งเหล่านี้ จะทำให้การหาตำแหน่งมีความแม่นยำมากขึ้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้าง ซึ่งได้นำเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคไตรลาเตอร์เรชัน ร่วมกับพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4a สำหรับการทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer) โดยทดลองวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านแบบสองพอร์ต โดยพอร์ตที่หนึ่งคือพอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (Transmitted) และพอร์ตที่สองจะใช้ในการรับสัญญาณ (Received) สายอากาศที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองวัดนี้คือสายอากาศแบบกรวยคู่ ซึ่งได้นำมาใช้ทั้งด้านส่งและด้านรับ ซึ่งสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัดนี้จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficient)  $|S_{11}|$  ในช่วงความถี่ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งต่ำกว่า  $-10$  dB สามารถนำมาใช้ในย่านความถี่ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งได้เป็นอย่างดี สำหรับการวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการหาตำแหน่งของพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสัญญาณแถบกว้างยิ่งในสภาวะที่มองเห็นระดับสายตา (Line of sight: LOS) และเปรียบเทียบความผิดพลาดในการหาตำแหน่งของสัญญาณแถบกว้างยิ่งใน 3 ช่วงความถี่ คือ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz โดยได้ออกแบบจำลองการวัด และทดลองวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งเพื่อนำมาใช้ในการหาตำแหน่งบุคคลหรือสัตว์เลี้ยงภายในอาคาร นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการวิเคราะห์ผล และประเมินผลความแม่นยำในการหาตำแหน่งด้วย

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การหาตำแหน่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารนั้นต้องการความแม่นยำในการหาตำแหน่งสูง งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประเมินผลของการหาตำแหน่งภายในอาคารในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตา โดยใช้เทคนิคไตรลาเตอร์เรชันเพื่อหาความผิดพลาดในการหาตำแหน่งภายในอาคารระหว่างการพิจารณาพารามิเตอร์ความแรงสัญญาณที่ได้รับ (RSS) และพารามิเตอร์เวลาที่มาถึง (TOA) โดยใช้เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดตำแหน่งในระบบพิกัด แกน  $x$  และ แกน  $y$  ของแต่ละโหนดอ้างอิง เนื่องจากสัญญาณแถบกว้างยิ่งมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก และมีพัลส์ที่แคบมากจึงทำให้สัญญาณแถบกว้างยิ่งมีความละเอียดทางเวลามาก สามารถแยกกำลัง และเวลาของสัญญาณได้ง่าย จึงทำให้การหาตำแหน่งมีความแม่นยำมากด้วย

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาการหาตำแหน่งภายในอาคารแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตาในงานวิจัยนี้ได้ใช้สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งเป็นคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม โดยทำการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz แล้วนำมาหาสัญญาณที่รับได้ เพื่อใช้วิเคราะห์หาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง แล้วนำพารามิเตอร์ทั้งสองมาคำนวณหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ จากนั้นจะคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิคไตรลาเตอร์เรชัน ซึ่งจะวิเคราะห์ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งในรูปแบบของค่าความผิดพลาดของระยะทาง

### 1.5 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเป็นการประเมินผลของด้วยเทคนิคไตรลาเตอร์เรชัน โดยเปรียบเทียบการค่าความผิดพลาดของระยะทางระหว่างพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสัญญาณแถบกว้างยิ่งในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตา ได้ทำการออกแบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคาร ซึ่งได้กำหนดให้มีสายอากาศส่ง 3 อัน กำหนดสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม โดยเปรียบเทียบ 3 ช่วงความถี่ คือ 3-5 GHz, 5 -

11 GHz และ 3-11 GHz ทำการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งตามแบบจำลองการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ จากนั้นนำมาหาสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่งมาคำนวณหาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง แล้วนำพารามิเตอร์ทั้งสองมาคำนวณหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ จากนั้นจะนำระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับมาคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคไตรลาเตอร์เรชัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งจะวิเคราะห์ประสิทธิภาพความแม่นยำ ในการหาตำแหน่งในรูปแบบของค่าความผิดพลาดของระยะทาง ซึ่งจะแสดงผลการทดลองเป็นค่าความผิดพลาดของระยะทางในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ตามแบบจำลองการวัด และแสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ของค่าความผิดพลาดของระยะทาง และสุดท้ายจะสรุปผลการทดลองวิจัย

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเนื้อหาการศึกษาอยู่ทั้งหมด 6 บท ซึ่งรายละเอียดแต่ละบทมีดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษาสมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขต และขั้นตอนการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

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

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง สัญญาณส่ง และสัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่ง พารามิเตอร์ และเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง และสุดท้ายจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความแม่นยำในการหาตำแหน่ง

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองวัดและการหาตำแหน่ง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัด และแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองวิจัย ซึ่งจะแสดงพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองวัด และแสดงผลการทดลองในรูปแบบของค่าความผิดพลาดของระยะทาง

บทที่ 6 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# ระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

### 2.1 บทนำ

ปัจจุบัน เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra-wideband: UWB) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สายประเภทต่าง ๆ มากขึ้น เนื่องจากเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งมีความแตกต่างจากเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายแบบอื่น ๆ เป็นระบบที่มีการส่งสัญญาณในลักษณะเป็นพัลส์สั้น ๆ มีช่วงเวลาของพัลส์แคบมากและใช้กำลังงานในการส่งสัญญาณมีค่าต่ำ ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับการสื่อสารไร้สายเพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้งาน เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีความละเอียดทางโดเมนเวลาสูงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เทคโนโลยีนี้มีความเที่ยงตรงสูงมากเช่นกัน ด้วยสาเหตุอันเนื่องมาจากแบนด์วิดท์ของระบบแถบกว้างยิ่งกว้างมาก อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการทะลุทะลวงสิ่งกีดขวางได้ดี ยกตัวอย่างเช่น กำแพง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่ง มีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz หรือมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อแบนด์วิดท์กว้างจะทำให้มีค่าความจุของช่องสัญญาณมาก ทำให้ส่งข้อมูลได้ในปริมาณที่มากขึ้น สามารถรองรับผู้ใช้งานได้จำนวนมากตามไปด้วย จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นการส่งสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่ง นั้นจะทำการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณคลื่นวิทยุในลักษณะที่เป็นอิมพัลส์ โดยไม่มีการนำเอาสัญญาณข้อมูลไปมอดูเลตกับสัญญาณพาห้ ฉะนั้นเทคนิคของระบบนี้จึงไม่จำเป็นต้องใช้มิกเซอร์ ทำให้สร้างระบบได้ง่าย ซึ่งหมายความว่า สามารถสร้างระบบทั้งภาคส่งและภาครับให้มีราคาถูก ต้นทุนต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารแบบดั้งเดิมที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency : RF)

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra-wideband: UWB) เป็นอีกเทคโนโลยีที่มีความสามารถในการสื่อสารผ่านแบนด์วิดท์ที่กว้างจึงทำให้สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่งข้อมูลสูงได้อย่างรวดเร็วและเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการส่งข้อมูลด้วยสัญญาณไร้สายอย่างบลูทูธ (bluetooth) อัลตราไวด์แบนด์สามารถส่งได้มากกว่าหนึ่งร้อยเท่าในเวลาเท่ากัน เนื่องด้วยศักยภาพที่สามารถส่งข้อมูลได้ปริมาณที่มากทำให้การสร้างระบบการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์บางประเภทถูกจัดไว้เพื่อการสื่อสารข้อมูลแบบสื่อประสม (multimedia communications) ซึ่งต้องการอัตราการส่งข้อมูลสูง และเทคโนโลยีนี้ได้รับการพิจารณาโดยคณะกรรมการกำหนดมาตรฐานของ ไอทริปเปิ้ลอี (IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers) โดยจัดให้อยู่ในการสื่อสารในเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPAN: Wireless Personal Area Network) โดยการใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.3a และในขณะเดียวกันก็ได้กำหนดสัญญาณเพื่อการระบุตำแหน่ง (positioning) และหาระยะทาง (distancing) ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4a แสดงดังรูปที่ 2.1 เป็นการเปลี่ยนการส่งข้อมูลแบบสายมาเป็นการส่งข้อมูลแบบไร้สายด้วยการใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์แทนการส่งข้อมูลในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์แบบพกพา



รูปที่ 2.1 การเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในการส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ต่าง ๆ [8]

เมื่อปี พ.ศ. 2545 (ค.ศ. 2002) คณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสารของประเทศสหรัฐอเมริกา (FCC: Federal Communications Commission) หรือเรียกกันว่า เอฟซีซี ได้ออกข้อกำหนดการใช้สัญญาณชนิดหนึ่งที่มีชื่อว่า “อัลตราไวด์แบนด์” (UWB: Ultra Wide Band) เนื่องจากคุณสมบัติของสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์มีคุณลักษณะที่โดดเด่น คือ เป็นสัญญาณไร้สายที่มีรูปคลื่นพัลส์ซึ่งปรากฏเพียงชั่วขณะ หรือเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณในทางเวลาที่แคบมากที่สุด (F. Nekoogar, 2005) ซึ่งอยู่ในระดับนาโนวินาที (ns: nanosecond, 10<sup>-9</sup>) หรือที่ระดับพิโควินาที (ps: picosecond, 10<sup>-12</sup>) เนื่องด้วยความกว้างของพัลส์ทางเวลาที่อยู่ในระดับนี้เมื่อทำการวิเคราะห์แถบความถี่ หรือสเปกตรัม (Spectrum) พบว่าเกิดการแผ่สเปกตรัมที่กว้างมาที่สุด (Ultra-Wide Bandwidth) ในการส่งสัญญาณและเป็นที่มาของชื่อที่ว่าอัลตราไวด์แบนด์

หลังจากที่ปี พ.ศ. 2545 จนถึงปัจจุบัน อัลตราไวด์แบนด์ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องและถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างหลากหลายเช่น การทหาร, การแพทย์, การสื่อสาร, และการเกษตร แต่ในงานวิจัยนี้จะชี้ให้เห็นถึงประโยชน์ของเทคโนโลยีดังกล่าวว่ามีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศชาติและการนำไปประยุกต์ใช้งานในสาขาต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมา เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์เพื่อการสื่อสาร ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วทั้งนี้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะในยุคปัจจุบัน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

### 2.2.1 ประวัติของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง มีประวัติความเป็นมาที่ยาวนานตั้งแต่สมัยที่ Marconi ได้สาธิตการทดลอง โดยใช้ Spark gap ในการรับ-ส่งสัญญาณส่งสัญญาณวิทยุอิมพัลส์ (Impulse radio) ข้ามมหาสมุทรแอตแลนติก ในปี 1901 ต่อมาในปี ค.ศ. 1962 ได้ประดิษฐ์เครื่องส่งวิทยุแถบกว้างยิ่งโดยใช้หลักการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบในโดเมนทางเวลา และได้ถูกนำไปใช้ในการส่งสัญญาณในโครงข่ายไมโครเวฟในปี ค.ศ. 1963-1966 ซึ่งมีการแนวทางในการพัฒนาว่าต้องมีรูปแบบที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยใช้คุณลักษณะของการตอบสนองของคลื่น เช่น ขนาดของสัญญาณและเฟส ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความแตกต่างของผลตอบสนองของสัญญาณจากฟังก์ชันในการส่งผ่านสัญญาณของช่องสัญญาณได้

อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์สัญญาณนั้นได้ใช้เครื่อง ออสซิลโลสโคปในการสุ่มค่าของสัญญาณ เพื่อมาทำการวิเคราะห์และพัฒนาโครงข่ายในระบบไมโครเวฟ และรูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการส่งผ่าน โดยการวิเคราะห์และการวัดสัญญาณ เทคนิคในการวัดสัญญาณนั้นแรกเริ่มได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับแถบความถี่กว้างในปี ค.ศ. 1968 ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาสัญญาณที่มีขนาดแคบได้อย่างรวดเร็ว และได้ถูกนำไปใช้ในการส่งสัญญาณติดต่อสื่อสารแบบ เรดาร์ ในปี ค.ศ. 1972 และในปีต่อมาเครื่องออสซิลโลสโคป ที่ใช้การวิเคราะห์ ความถี่ที่สูงขึ้นก็ได้ถูกสร้างขึ้น จึงทำให้มีการกำหนดแถบความถี่กว้างยิ่งในปี ค.ศ. 1973 ต่อมาในปี ค.ศ. 1980 นั้นก็ได้มีการกำหนดให้ เทคโนโลยี แถบความถี่กว้างยิ่งนี้ไม่จำเป็นต้องใช้คลื่นพาหะ ในการส่งสัญญาณเหมือนอย่างแถบความถี่กว้างยิ่งต่อไป และเป็นจุดที่แตกต่างจากการส่งคลื่นวิทยุแบบอื่นที่มีมาก่อนหน้านั้น และต่อมาได้ถูกพัฒนาในประเทศสหรัฐอเมริกาต่อในปี ค.ศ. 1989

ในช่วงเวลาเกือบ 30 ปี ทฤษฎีของแถบความถี่กว้างยิ่งได้ถูกพัฒนาทั้งด้านเทคนิคและอุปกรณ์ ตัวอย่าง เช่น ในปี ค.ศ. 1989 ได้มีการจดสิทธิบัตรมากกว่า 50 ชิ้น เกี่ยวกับการสร้างสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งและวิธีในการรับส่งสัญญาณ และการนำแถบความถี่กว้างยิ่งได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานหลากหลายรูปแบบ เช่น ในการติดต่อสื่อสารในระบบเรดาร์การป้องกันการชนกันของคลื่นมือถือ, ระบบบอกพิกัด และตรวจวัดระดับของเหลว โดยใช้คุณลักษณะของแถบถี่กว้างยิ่ง

โดยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1994 เทคโนโลยี แถบความถี่กว้างยิ่งได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในระบบการติดต่อสื่อสารอย่างรวดเร็วโดยรัฐบาลสหรัฐอเมริกา และในปี ค.ศ. 2002 ได้มีการประกาศใช้ข้อกำหนดแถบความถี่กว้างยิ่ง และได้จัดการประชุมวิชาการระดับนานาชาติครั้งแรก

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งได้มีการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์มากขึ้น ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลได้เป็นจำนวนมาก ใช้กำลังงานต่ำ ราคาถูก และทนทานต่อสัญญาณรบกวน โดยในปี ค.ศ. 1998 ได้ริเริ่มมีการพิจารณามาตรฐาน และข้อกำหนดของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง ในปี ค.ศ. 2002 คณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา ได้มีการประกาศมาตรฐาน และข้อกำหนดสำหรับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งโดยได้กำหนดช่วงความถี่ และกำลังงานที่ใช้สำหรับแพร่กระจายคลื่นสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

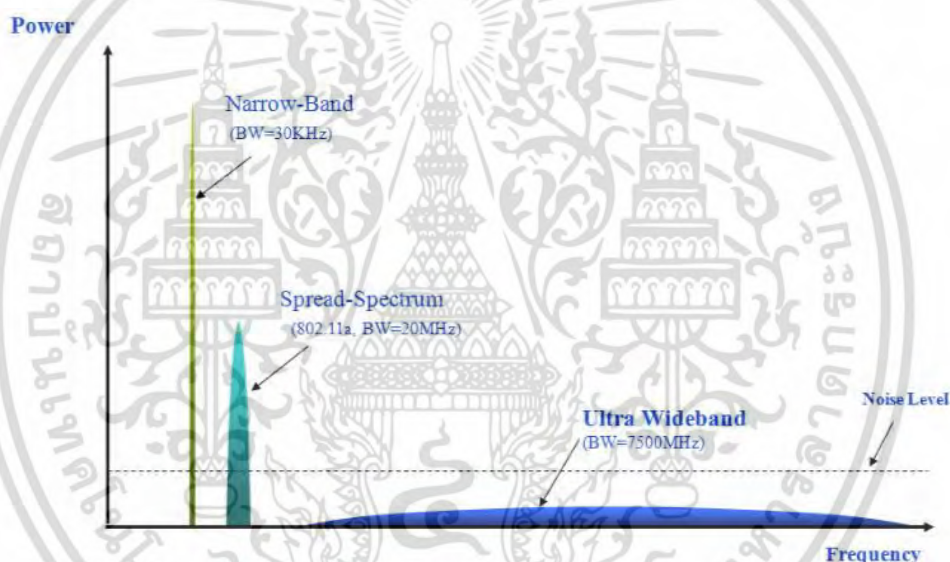
## 2.2.2 นิยามของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

จากคำจำกัดความของ FCC ได้กำหนดไว้ว่า การส่งผ่านสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่ง คือ สัญญาณใด ๆ ที่มีแบนด์วิธเชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิธมากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz แสดงได้ดังสมการ 2.1

$$\begin{aligned} B_f &\geq 0.2, \\ BW &> 500 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (2.1)$$

ซึ่งแบนด์วิธเชิงเศษส่วนได้นิยามไว้ คือ อัตราส่วนของแบนด์วิธสัญญาณต่อความถี่กลาง [7]

$$B_f = \frac{BW}{f_c} = \frac{(f_H - f_L)}{(f_H + f_L)/2} \quad (2.2)$$

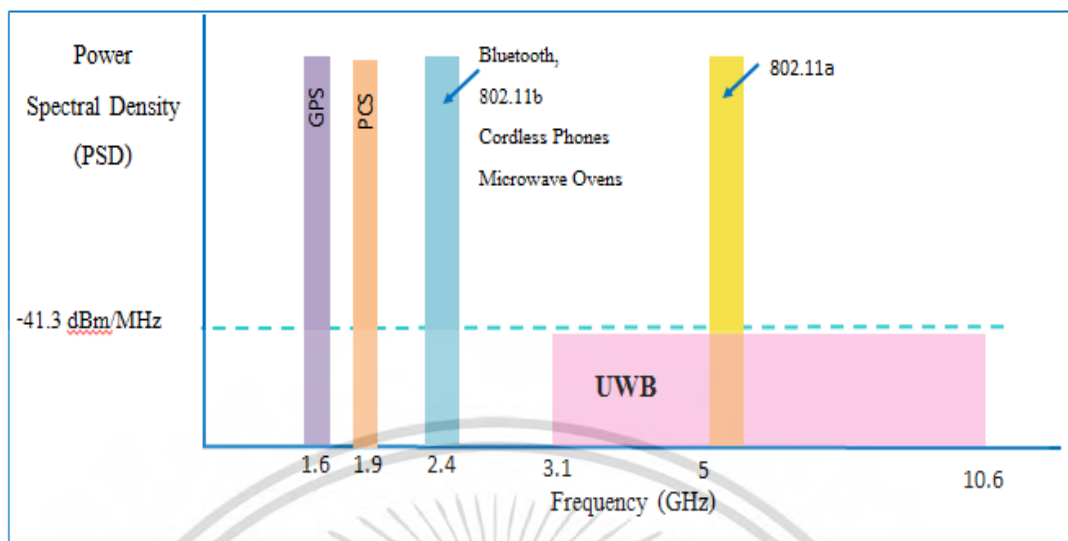


รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบแบนด์วิธเชิงเศษส่วนของระบบการสื่อสารแถบแคบและระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง [8]

โดยที่  $f_H$  และ  $f_L$  คือ ความถี่สูงสุดที่ใช้ส่งและความถี่ต่ำสุดที่ใช้ส่ง เมื่อวัดระดับจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (PSD masks) Part 15 limit ลงมา 10 dB ตามลำดับ  $BW$  คือแบนด์วิธของสัญญาณ และ  $f_c$  คือ ความถี่กลาง

จากรูปที่ 2.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบระบบการสื่อสารทั้งสองระบบ จะเห็นว่าระบบการสื่อสารแบบดั้งเดิม (แถบแคบ) จะมีแบนด์วิธเชิงเศษส่วนน้อยกว่าระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง ยกตัวอย่างเช่น กรณีของระบบ UMTS (Universal Mobile Telephone System) ที่ทำงานบนช่วงแถบความถี่ประมาณ 2 GHz และมีแบนด์วิธประมาณ 5 MHz ซึ่งมักจะเรียกระบบนี้ว่าแบนด์กว้าง แต่ถ้าหากเราพิจารณาจากสมการที่ 2.2 ค่าแบนด์วิธเชิงเศษส่วนที่คำนวณออกมาจะได้เท่ากับ 0.0025 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.2 ของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง (เกือบ 80 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบระดับความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง และระบบการสื่อสารแถบแคบอื่น ๆ [8]

### 2.2.3 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ได้ถูกกำหนดขึ้นในระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง นั่นก็คือการจัดสรรความถี่ในการใช้งาน ซึ่งได้มีกลุ่มทำงานในสหรัฐอเมริกาได้พยายามทำการถอดถอนการจำกัดของข้อกำหนดในการใช้งานช่วงความถี่ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง จากกฎข้อบังคับเดิมของ FCC โดยกลุ่มทำงานนี้ได้ก่อตั้งขึ้นอย่างเป็นทางการโดยใช้ชื่อว่า Ultra-Wideband Working Group (UWBWG) เพื่อทำการเจรจาทหาข้อตกลงร่วมกับ FCC เช่นเดียวกันกับในยุโรปก็ได้มีการหาข้อตกลงการจัดสรรคลื่นความถี่และการแทรกสอดของคลื่นวิทยุซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีการกำหนดแถบความถี่สำหรับการใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่ง ในสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standards Institute: ETSI) หรือ สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU) [10]

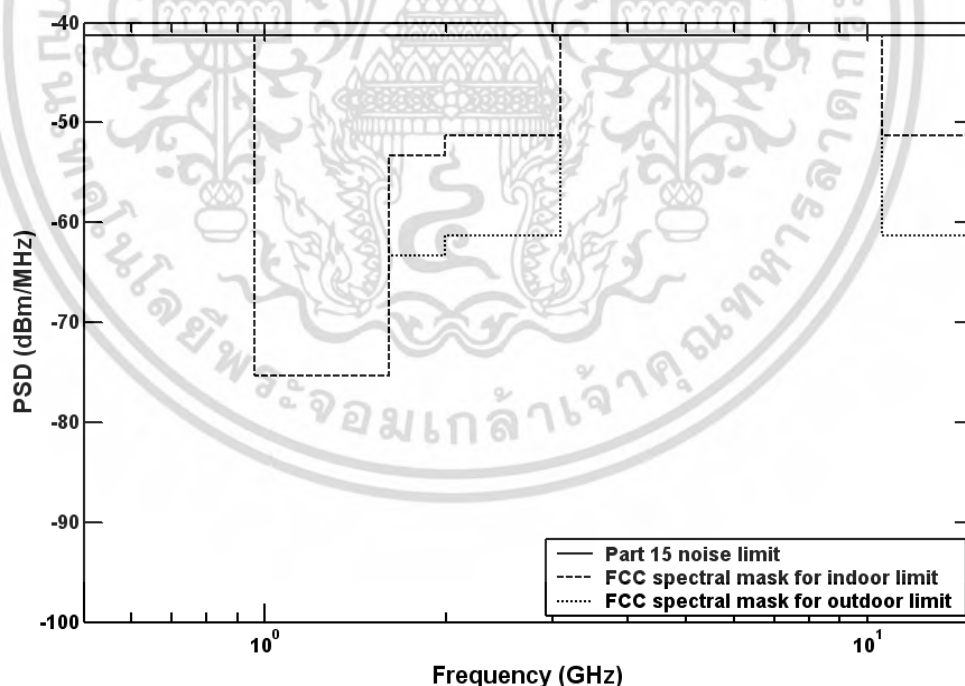
#### 2.2.3.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่ง ในสหรัฐอเมริกา

ในปี ค.ศ. 1998 FCC ได้ออกประกาศเกี่ยวกับการตรวจสอบ (Notice of Inquiry: NOI) เนื่องจากเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีการแทรกสอดกับสัญญาณระบบที่มีอยู่เดิมและระบบความปลอดภัยในกิจการการบินและทิศทางในการค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องส่งในระบบแถบกว้างยิ่ง ด้วยเช่นกัน ในวันที่ 14 กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 FCC ได้ออกกฎสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง และยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของคำประกาศและระเบียบการฉบับที่หนึ่งได้เผยแพร่ต่อสาธารณชนในวันที่ 22 เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งในเอกสารได้กล่าวถึงการอนุญาตใช้งานในระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง และการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายพลังงานสำหรับการใช้ในประเภทต่าง ๆ [9] โดยจากนิยามข้างต้นได้ทำการกำหนดค่าแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

( $B_f$ ) ให้มากกว่าหรือเท่ากับ 0.20 ของความถี่กลาง ( $f_c$ ) เมื่อวัดระดับจากหน้าฉากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม Part 15 limit (-41.3 dBm/MHz) ลงมา 10 dB สำหรับข้อจำกัดการสื่อสารภายในอาคาร (Indoor Limit) และ 20 dB สำหรับข้อจำกัดการสื่อสารภายนอกอาคาร (Outdoor Limit) ตามสมการที่ 2.2 และข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 สำหรับใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร [10]

ตารางที่ 2.1 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC สำหรับการใช้งานในระบบการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร [10]

ความถี่ (MHz)	PSD (dBm/MHz)	
	สำหรับการสื่อสารภายในอาคาร	สำหรับการสื่อสารภายนอกอาคาร
น้อยกว่า 960	-41.3	-41.3
960-1610	-75.3	-75.3
1610-1990	-53.3	-63.3
1990-3100	-51.3	-61.3
3100-10600	-41.3	-41.3
มากกว่า 10600	-51.3	-61.3



รูปที่ 2.4 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมตามข้อกำหนด FCC สำหรับระบบการสื่อสารแบบกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคาร [10]

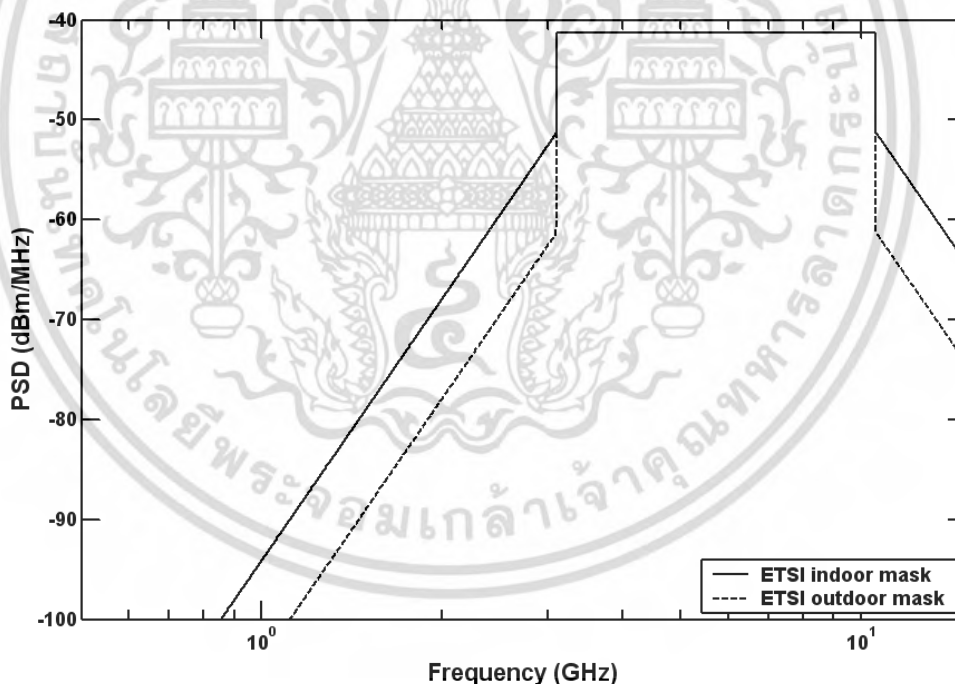
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่ง ในยุโรป

ปัจจุบันโครงสร้างของข้อกำหนดระบบแถบกว้างยิ่ง ในทวีปยุโรปอยู่ในช่วงรอข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวกับผลกระทบของระบบแถบกว้างยิ่ง บนระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่ โดยทางยุโรปนั้นบางส่วนของข้อกำหนดจะรอบคอบกว่าของทางสหรัฐอเมริกา เพราะทางด้านยุโรปนั้นในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ต้องแสดงให้เห็นว่า ส่งผลกระทบมากน้อยหรือไม่กับระบบเดิมที่มีอยู่โดยข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย ITU หรือ ETSI แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2 [11]

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร [11]

ความถี่ (GHz)	PSD (dBm/MHz) ภายในอาคาร	PSD (dBm/MHz) ภายนอกอาคาร
น้อยกว่า 3.1	$-51.3+87 \log ( f /3.1)$	$-61.3+87 \log ( f /3.1)$
3.1-10.6	-41.3	-41.3
มากกว่า 10.6	$-51.3+87 \log (10.6/ f )$	$-61.3+87 \log (10.6/ f )$



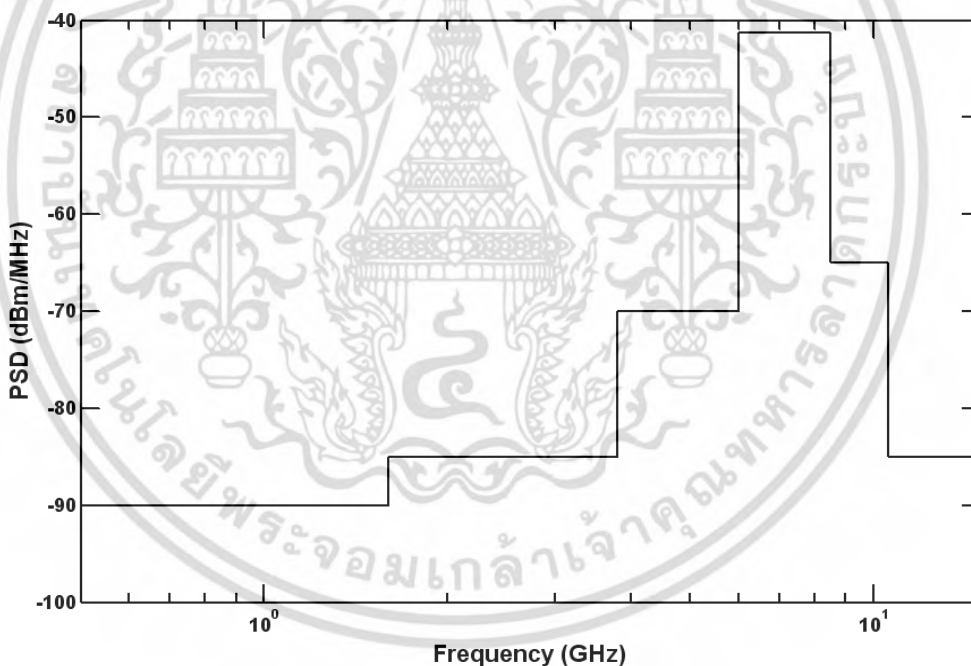
รูปที่ 2.5 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมตามข้อกำหนด ETSI สำหรับระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคาร [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันนี้ ETSI ได้กำหนดการแพร่กระจายกำลังงานและหน้ากาสเปกตรัมอย่างชัดเจน กฎข้อบังคับของการแพร่กระจายของ PSD ที่ได้จัดทำขึ้นนี้อนุญาตให้ระบบการสื่อสารแถบกว้างยังสามารถใช้งานได้เฉพาะภายในอาคารเท่านั้น โดยมีช่วงแถบความถี่ใช้งานลดลงเป็น 6.0 GHz ถึง 8.5 GHz ดังแสดงในตารางที่ 2.3 [12]

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานที่แก้ไขใหม่โดย ETSI สำหรับการใช้งานในของระบบการสื่อสารภายในอาคาร [12]

ความถี่ (GHz)	PSD (dBm/MHz)
น้อยกว่า 1.6	-90
1.6-3.8	-85
3.8-6.0	-70
6.0-8.5	-41.3
8.5-10.6	-65
มากกว่า 10.6	-85



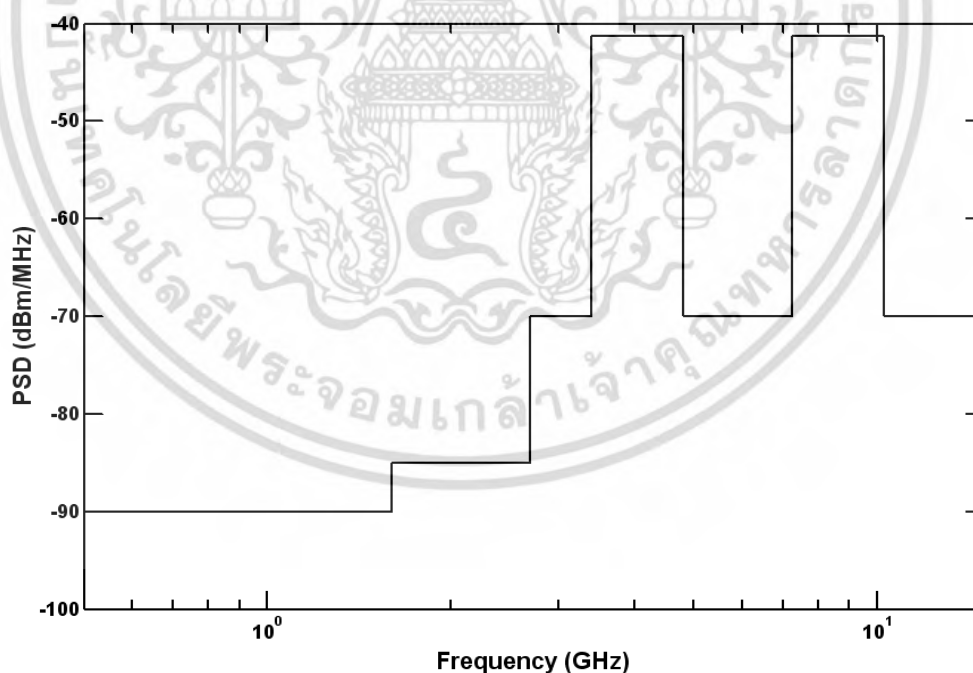
รูปที่ 2.6 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมตามข้อกำหนด ETS ที่แก้ไขใหม่สำหรับระบบการสื่อสารแถบกว้างภายในอาคาร [12]

### 2.2.3.3 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่ง ในญี่ปุ่น

ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาที่กำหนดโดย MIC เป็นข้อกำหนดสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง ที่ใช้ในประเทศญี่ปุ่น โดยเป็นข้อกำหนดที่อนุญาตให้ใช้ระบบแถบกว้างยิ่ง ได้ภายในอาคารเท่านั้นเหมือนกับที่กำหนดโดย ETSI ที่ได้แก้ไขใหม่ โดยมีช่วงแถบความถี่ใช้งานสองแถบ คือ แถบความถี่ต่ำตั้งแต่ 3.4-4.8 GHz และแถบความถี่สูงตั้งแต่ 7.25-10.25 GHz ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 และกราฟสเปกตรัมมาร์คได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 [13]

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาสำหรับการสื่อสารภายในอาคารเท่านั้นที่กำหนดโดย MIC [13]

ความถี่ (GHz)	PSD (dBm/MHz)
น้อยกว่า 1.6	-90
1.6-2.7	-85
2.7-3.4	-70
3.4-4.8	-41.3
4.8-7.25	-70
7.25-10.25	-41.3
มากกว่า 10.25	-70



รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมสำหรับการสื่อสารภายในอาคารที่กำหนดโดย MIC [13]

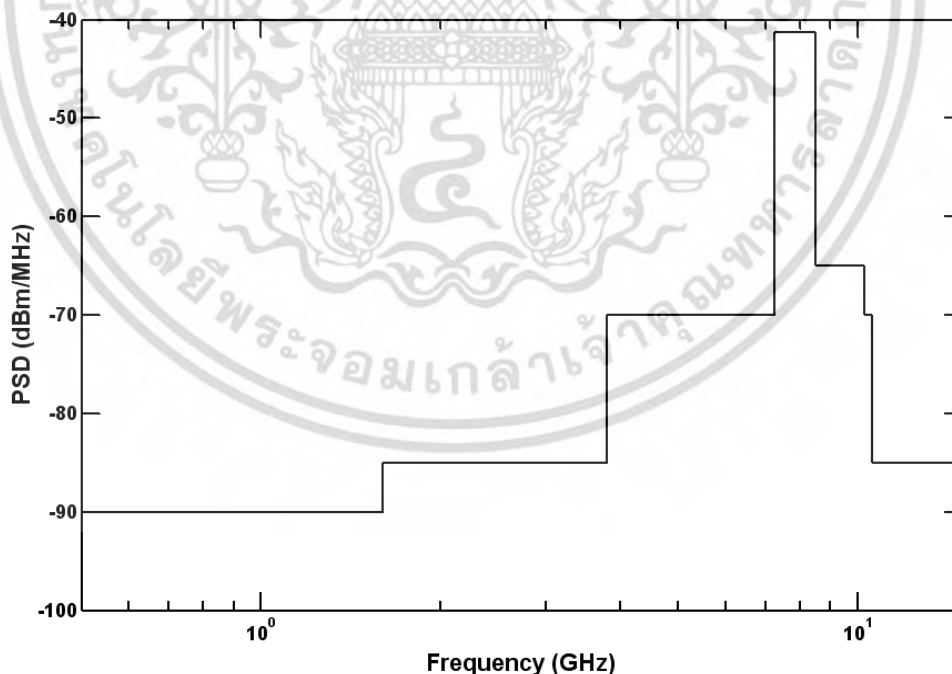
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.2.3.4 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่ง ที่ใช้ร่วมกัน

ปัจจุบันได้มีการร่วมมือกันระหว่างประเทศสหรัฐอเมริกา กลุ่มประเทศในยุโรป และประเทศญี่ปุ่น โดยมีการกำหนดให้ใช้ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมารวมกัน โดยยึดให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ FCC, ETSI และ MIC พร้อมกัน เป็นข้อกำหนดที่อนุญาตให้ใช้ระบบแถบกว้างยิ่ง ได้ภายในอาคารเท่านั้น มีช่วงแถบความถี่ใช้งานเป็น 7.25-8.5 GHz โดยที่ความถี่ต่ำ 7.25 GHz เป็นข้อกำหนดของ MIC และความถี่สูง 8.5 GHz เป็นข้อกำหนดของ ETSI ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 และกราฟสเปกตรัมมาร์คได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 [14]

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาสำหรับการสื่อสารภายในอาคารเท่านั้น ที่กำหนดโดย MIC [14]

ความถี่ (GHz)	PSD (dBm/MHz)
น้อยกว่า 1.6	-90
1.6-3.8	-85
3.8-7.25	-70
7.25-8.5	-41.3
8.5-10.25	-65
10.25-10.6	-70
มากกว่า 10.6	-85



รูปที่ 2.8 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมสำหรับการสื่อสารภายในอาคาร ที่กำหนดร่วมกัน โดย FCC, ETSI และ MIC [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 มาตรฐานของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

มาตรฐานของระบบแถบกว้างยิ่ง-IR มีอยู่ 3 มาตรฐาน คือ IEEE 802.15.3a ใช้สำหรับโครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network: WPAN) ระยะทางไกลอัตราการส่งข้อมูลสูง IEEE 802.15.4a ใช้สำหรับ WPAN ระยะทางไกลอัตราการส่งข้อมูลต่ำ และ IEEE 802.15.6 ใช้สำหรับระบบโครงข่ายพื้นที่ร่างกายไร้สาย (Wireless Body Area Network: WBAN)

### 2.2.4.1 มาตรฐาน IEEE 802.15.3a

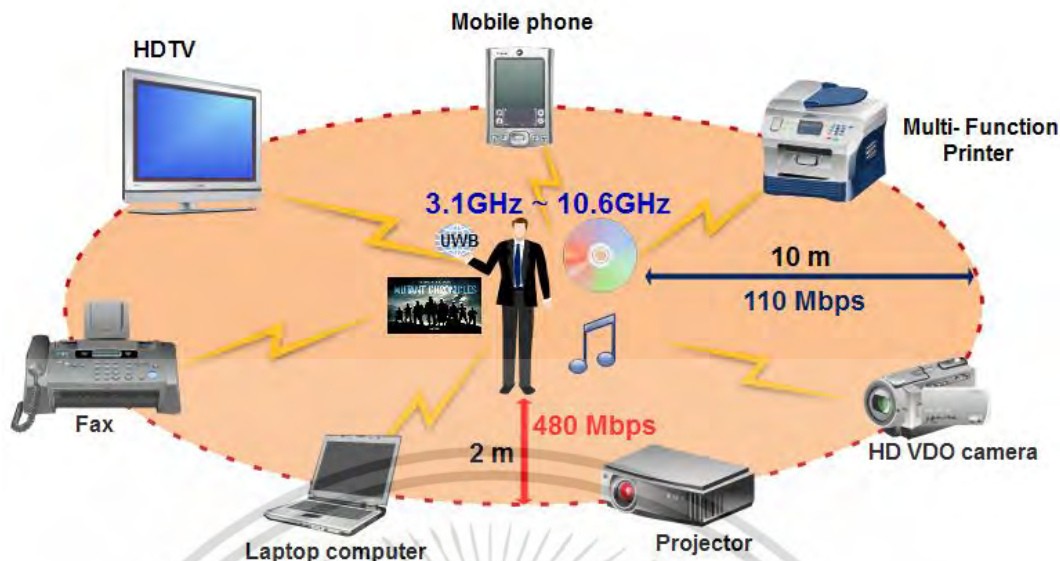
มาตรฐาน IEEE 802.15.3a ได้พยายามปรับปรุงอัตราการส่งของมาตรฐาน IEEE 802.15.3 ให้สูงขึ้นโดยการนำเอาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง มาใช้ ซึ่งมีจุดประสงค์จะนำมาใช้กับ WPAN โดยมีระยะทางการใช้งานถึง 10 m. ที่อัตราการส่งข้อมูล 110 Mbps และที่ระยะทางไกลคือประมาณ 2 m สามารถมีอัตราส่งข้อมูลได้สูงถึง 480 Mbps [15] แต่เกิดปัญหาเนื่องจากไม่สามารถตกลงกันได้ว่าจะเลือกใช้เทคโนโลยีไหนระหว่างการใช้การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉากหลายแถบ (Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing: MB-OFDM) กับแถบกว้างยิ่งลำดับตรง (Direct Sequence Ultra Wideband: DS-UWB) ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากสองบริษัทพันธมิตร และในเดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2006 มาตรฐานนี้ได้ถูกยกเลิกไป

### 2.2.4.2 มาตรฐาน IEEE 802.15.4a

มาตรฐาน IEEE 802.15.4a ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง มาประยุกต์ใช้สำหรับ WPAN โดยปรับปรุงให้มีระยะทางการใช้งานที่ไกลขึ้นได้ถึงประมาณ 100 m โดยลดอัตราการส่งข้อมูลลง มีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่นาน รวมทั้งมีราคาถูก สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบโครงข่ายการตรวจจับไร้สาย และระบบการหาตำแหน่งที่มีความเที่ยงตรงสูง การส่งสัญญาณมีพื้นฐานอยู่บนเทคนิคการส่งพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์แคบมากประมาณได้เป็นอิมพัลส์ จึงเป็นที่มาของชื่อแถบกว้างยิ่ง-IR [16]

### 2.2.4.3 มาตรฐาน IEEE 802.15.6

มาตรฐาน IEEE 802.15.6 เป็นมาตรฐานที่ตั้งขึ้นมาใหม่สำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับ WBAN โดยมีการใช้งานสำคัญคือตรวจสอบสุขภาพร่างกายของผู้ป่วย วินิจฉัยโรค รวมทั้งควบคุมเชื้อโรค WBAN ทำงานบริเวณใกล้กับ ติดอยู่กับ หรือภายในร่างกายของมนุษย์ โดยมีการใช้งานส่งข้อมูลระหว่างโนดภายในร่างกาย และส่งข้อมูลจากร่างกายไปยังอุปกรณ์ การประยุกต์ใช้ทั้งทางด้านการแพทย์หรือด้านอื่น [17]



รูปที่ 2.9 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ประเภทต่าง ๆ สำหรับระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง [18]

จากรูปที่ 2.9 แสดงถึงการประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจ และใช้งานเพื่อเชื่อมต่อและถ่ายโอนข้อมูลในปริมาณมาก ๆ สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสาร 4G (4 Generation) รูปแบบหนึ่งของระบบแถบกว้างยิ่ง ที่ถูกนำมาใช้งาน คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ไร้สายและใช้ถ่ายโอนข้อมูล ระหว่าง Host และอุปกรณ์ต่อพ่วงที่เกี่ยวข้อง เช่น คีย์บอร์ด เมาส์ เครื่องพิมพ์ สแกนเนอร์ และอื่น ๆ เป็นต้น ซึ่งต่อไปในอนาคตข้างหน้าเทคโนโลยีระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง จะนำเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีระบบการสื่อสารแบบใช้สาย โดยสามารถถ่ายโอนข้อมูลในปริมาณมาก และรองรับผู้ใช้งานได้มาก อีกทั้งยังสามารถส่งข้อมูลที่อัตราความเร็ว 1000 Kbps สำหรับเมาส์แบบไร้สาย และส่งข้อมูลที่อัตราความเร็ว 100 Mbps สำหรับการถ่ายโอนไฟล์ด้วยความรวดเร็ว เช่น ดาวน์โหลดภาพหรือไฟล์กราฟิก เป็นต้น และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเพิ่มเติมกับระบบที่เกี่ยวข้องกับสตรีมมิ่งของไฟล์สื่อดิจิทัลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น โทรทัศน์ดิจิทัล เครื่องเล่น CD/DVD เครื่องเล่น MP3 และอื่น ๆ เป็นต้น โดยสรุปแล้ว ระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง ถูกมองว่าเป็นเทคโนโลยีที่กำลังเจริญเติบโตและมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการนำไปใช้งานร่วมกับระบบการสื่อสาร WPAN ระยะสั้นที่กำลังมีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน อาทิเช่น ระบบการสื่อสาร 802.11 LANs หรือ บลูทูธ เป็นต้น

ในขณะเดียวกัน หนึ่งในเทคโนโลยีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานโดยอาศัยข้อได้เปรียบของระบบแถบกว้างยิ่ง นั่นก็คืออุปกรณ์ USB แบบไร้สาย หรือ WUSB (Wireless Universal Serial Bus) WUSB ได้ทำการพัฒนาเป็นเทคโนโลยีไร้สายแบบใหม่ของอุปกรณ์ USB แบบดั้งเดิม โดยทำการผสมผสานระหว่างความเร็วและความปลอดภัยของเทคโนโลยีแบบมีสาย เพื่ออำนวยความสะดวกและง่ายต่อการใช้งานสำหรับเทคโนโลยีไร้สาย WUSB ที่ใช้งานสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง ได้ถูกกำหนดโดย WiMedia ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.3a ซึ่งทำงานบนช่วงแถบความถี่ 3.1-10.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WUSB รองรับอัตราการส่งข้อมูลที่ 480 Mbps ภายในระยะทาง 2 เมตร และความเร็วในการส่งข้อมูลจะเริ่มลดลง เหลือประมาณ 110 Mbps เมื่อระยะทางของการส่งข้อมูลไกลมากขึ้น และยังสามารถส่งข้อมูลได้อีกเมื่อระยะทางไกลขึ้น (ไม่เกิน 10 เมตร) WUSB ยังเป็นอุปกรณ์ที่สนับสนุนการทำงานสองหน้าที่ (Dual-role device) คือ สามารถทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ Client และ Host โดยสามารถควบคุมความเร็วในการถ่ายโอนข้อมูลได้ ยกตัวอย่างเช่น กล้องดิจิทัลทำหน้าที่เป็น Client แล้วเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการถ่ายโอนไฟล์ภาพไปยังเครื่องพิมพ์ที่ทำหน้าที่เป็น Host เป็นต้น

### 2.2.5 จุดเด่นของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะมีลักษณะการรับส่งสัญญาณแบบพัลส์ในช่วงเวลาที่แคบมาก ซึ่งแตกต่างจากเทคโนโลยีแถบแคบ ซึ่งถ้านำมาเปรียบเทียบกับกันจะพบว่าเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะมีจุดเด่นหลายประการ ดังนั้นถ้าจะกล่าวถึงระบบแถบกว้างยิ่งหรือรวมถึงอิมพัลส์ (Impulse) พัลส์แคบ (Short-pulse) สัญญาณที่ไม่ใช่ไซน์ซอว์ดัล (Non-sinusoidal) สัญญาณที่ปราศจากคลื่นพาห้ (Carrier less) แถบกว้างยวดยิ่ง (Super Wideband) การอัดพัลส์แบบเฟอเอ็มอย่างรวดเร็ว (Fast Frequency Chirp) และ พัลส์แบบโมน (Mono-pulse) ซึ่งเป็นระบบที่มีจุดเด่นที่น่าสนใจสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารอาทิ เช่น

- เป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อยและมีต้นทุนต่ำ

ความซับซ้อนน้อยและมีต้นทุนที่ต่ำของระบบแถบกว้างยิ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยทางลักษณะเบสแบนด์ (Baseband) ของการส่งสัญญาณซึ่งไม่เหมือนกับระบบการส่งสัญญาณวิทยุแบบอื่น ๆ โดยที่เครื่องส่งจะทำการสร้างสัญญาณพัลส์ในโดเมนทางเวลาที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมาก ๆ ซึ่งสามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นออกไปโดยปราศจากการเพิ่มความถี่วิทยุหรือคลื่นพาห้รวมเข้าไปและในส่วนของการรวมสัญญาณวิทยุนั้นจะเป็นการนำเอาสัญญาณเบสแบนด์รวมเข้าไปกับคลื่นพาห้เพื่อย้ายสัญญาณไปยังแถบความถี่ที่มีคุณลักษณะในการแพร่กระจายคลื่นตามต้องการซึ่งสัญญาณจะถูกแพร่กระจายได้ดีโดยไม่ต้องอาศัยการแปลงความถี่ให้สูงขึ้น (Up-conversion) และการเพิ่มกำลังให้สูงขึ้น (Amplification) โดยในการแปลงความถี่ลง (Down-conversion) และตัวผลิตความถี่ (Local Oscillator) จึงไม่จำเป็นในเครื่องรับแบบแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกันทำให้ลดความซับซ้อนของระบบและต้นทุนในการผลิตลงไปมาก

- มีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน (Noise)

เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานต่ำและลักษณะเฉพาะในการสุ่มเทียม (Pseudo-random) ของสัญญาณส่งจึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนี้มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณรบกวน ซึ่งทำให้การตรวจหาสัญญาณทำได้ยากและยังปรากฏในเอกสารทางการวิจัยว่าการส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นไม่ก่อให้เกิดผลการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบคลื่นความถี่วิทยุอื่น ๆ เนื่องจากสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งนั้น มีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับต่ำประมาณระดับของสัญญาณรบกวน (Noise floor) จึงทำให้ระบบอื่นมองว่าสัญญาณแถบกว้างยิ่งนี้ คือ สัญญาณรบกวนเลยถูกกำจัดออกจากการพิจารณาของระบบ

- มีความต้านทานต่อคลื่นหลายวิถีและการรบกวนของสัญญาณใกล้เคียง

ในระบบการมอดูเลตทางเวลา (Time Modulation) แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะทำการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงในระดับหลักร้อยเมกะบิตต่อวินาทีอีกทั้งยังได้ถูกประเมินในส่วนของจำนวนของผู้ใช้งานในระบบการสื่อสารแบบคลื่นวิทยุแบบอิมพัลส์ว่าได้จำนวนที่มากกว่าระบบทั่วไป และเนื่องด้วยมีแบนด์วิดท์ของสัญญาณส่งที่กว้างจึงทำให้ได้รับผลจากคลื่นหลายวิถีอย่างมาก เมื่อระบบมีแบนด์วิดท์ที่กว้างนั้นทำให้เกิดความแตกต่างทางความถี่อย่างมาก ซึ่งเมื่อรวมเข้ากับการส่งสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องจึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่มีการมอดูเลตทางเวลานั้นมีความต้านทานต่อการแพร่กระจายของคลื่นหลายวิถีที่รุนแรง และการรบกวนหรือแทรกสอดจากสัญญาณความถี่ใกล้เคียงได้

- มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลาสำหรับการกำหนดตำแหน่ง

ด้วยพัลส์ที่มีลักษณะทางโดเมนเวลาที่แคบมาก ๆ หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมาก ๆ นั้นหมายถึง ระบบคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมจังหวะและค่านวนเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่าระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global positioning system: GPS) และระบบคลื่นวิทยุแบบอื่น ๆ อีกทั้งด้วยคุณสมบัติในการแพร่กระจายผ่านวัสดุได้ดี จึงทำให้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง ที่มีการมอดูเลตทางเวลาถูกนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ระยะสั้น เช่นในการช่วยเหลือชีวิตและปฏิบัติการป้องกันอาชญากรรม เช่นเดียวกับการใช้งานสำรวจและในอุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมี การร่วมมือกันขององค์กรกลุ่มประเทศสหรัฐอเมริกา กลุ่มประเทศในยุโรป และประเทศญี่ปุ่น ออกกฎข้อบังคับเพื่อเป็นหลักฐานในการพิสูจน์ว่าสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ที่นำมาใช้งานไม่ไปรบกวนหรือแทรกสอดระบบการสื่อสารแถบแคบอื่น ๆ ในส่วนสุดท้ายของเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงมาตรฐานของระบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 มาตรฐานด้วยกันดังนี้ มาตรฐาน IEEE 802.15.3a สำหรับอัตราการส่งข้อมูลที่สูง มาตรฐาน IEEE 802.15.4a สำหรับอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำ และมาตรฐาน IEEE 802.15.6 สำหรับระบบ WBAN

## 2.3 ทฤษฎีการหาตำแหน่ง

ในปัจจุบันมีการใช้งานการหาตำแหน่งกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการหาตำแหน่งมีประโยชน์ในระบุพิกัด หรือติดตามสิ่งที่เราต้องการทราบ เมื่อก้าวถึงการหาตำแหน่งภายในอาคารก็พบว่ามีการนำเอาเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้งานมากมาย ยกตัวอย่างการใช้งานเช่น การระบุพิกัดของรถยนต์ การหาตำแหน่งของสินค้าภายในโกดัง และการหาตำแหน่งของนักผจญเพลิง เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยี พารามิเตอร์ และเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง

### 2.3.1 เทคโนโลยีที่ใช้ในการหาตำแหน่งภายในอาคาร

การหาตำแหน่งภายในอาคารนั้น จำเป็นต้องมีความแม่นยำสูง ดังนั้นระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารสามารถแบ่งประเภทตามเทคโนโลยีที่ใช้งานได้ 3 ประเภท คือ อินฟราเรด [19], ความถี่วิทยุ และอัลตราซาวด์ โดยแต่ละประเภทจะมีรายละเอียด ดังนี้

### 2.3.1.1 อินฟราเรด (Infrared) [20]

สัญญาณอินฟราเรดมีคุณสมบัติเหมือนกับแสงทั่วไปคือไม่สามารถเดินทางผ่านกำแพงหรือสิ่งกีดขวางได้ ดังนั้นจึงค่อนข้างมีข้อจำกัดของระยะการใช้งานในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร แต่อย่างไรก็ตามความเร็วในการแพร่สัญญาณสูง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระบบนี้ต้องการอุปกรณ์ที่มากกว่าระบบอัลตราซาวด์ และการรบกวนของแสงภายในอาคารจะมีผลต่อความถูกต้องของการตรวจจับสัญญาณ โดยทั่วไปแล้วอินฟราเรดจะมีระยะการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 5 เมตร และโดยปกติอุปกรณ์อินฟราเรดจะมีขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์อัลตราซาวด์

### 2.3.1.2 ความถี่คลื่นวิทยุ (Radio Frequency : RF) [20]

สัญญาณความถี่วิทยุสามารถเดินทางผ่านวัสดุภายในอาคารได้มาก ดังนั้นระบบนี้จึงมีระยะการใช้งานที่ดีภายในสภาพแวดล้อมภายในอาคารซึ่งความเร็วในการแพร่สัญญาณก็สูงเช่นเดียวกัน คือประมาณ  $3 \times 10^8$  m/s และเป็นระบบที่ใช้ความถี่สาธารณะ โดยระบบนี้มีระยะการใช้งานที่กว้างกว่าระบบที่ใช้อินฟราเรด และอัลตราซาวด์

### 2.3.1.3 อัลตราซาวด์ (Ultrasound) [20]

แม้ว่าอัลตราซาวด์จะทำงานที่ย่านความถี่ต่ำ (40 kHz) เมื่อเปรียบเทียบกับสองระบบก่อนหน้านี้ โดยระบบนี้มีความแม่นยำที่ดีสำหรับตำแหน่งที่ตรวจจับที่มีความเร็วของการแพร่สัญญาณต่ำ (343 m/s) ส่วนข้อดีของระบบนี้คือ ง่ายและราคาไม่แพง แต่อย่างไรก็ตามอัลตราซาวด์ไม่สามารถเดินทางผ่านกำแพงได้แต่จะสะท้อนกับสิ่งกีดขวางภายในอาคารมาก โดยระบบนี้มีระยะการใช้งานประมาณ 3 เมตรถึง 10 เมตร และมีความละเอียด 1 เซนติเมตร ของการวัดระยะ ซึ่งอุณหภูมิ การใช้งานมีผลต่อประสิทธิภาพของอัลตราซาวด์

## 2.3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่ง

ในการหาตำแหน่งนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจะขึ้นอยู่กับความต้องการด้านความเที่ยงตรง และข้อจำกัดของเครื่องรับส่งสัญญาณด้วย โดยทั่วไปจะมีการพิจารณาพารามิเตอร์ 4 แบบคือ ค่าความแรงของสัญญาณรับได้ เวลาที่สัญญาณมาถึง ทิศทางที่สัญญาณมาถึง และความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.2.1 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ (Received signal strength: RSS) [21]

เป็นพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้งานในการหาตำแหน่งโดยการพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ซึ่งถูกลดทอนเนื่องจากการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss attenuation) โดยการหาตำแหน่งจะนำค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ไปแปลงเป็นกำลังงานที่รับได้และแปลงเป็นระยะทางระหว่างสายอากาศรับ และสายอากาศส่ง จากนั้นจะนำไปใช้คำนวณโดยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบต่าง ๆ อย่างไรก็ตามการหาตำแหน่งโดยอาศัยพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์การจางหายหลายวิถี (Multipath fading) และการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากสิ่งกีดขวาง (Shadowing) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ทำให้การหาตำแหน่งโดยวิธีนี้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

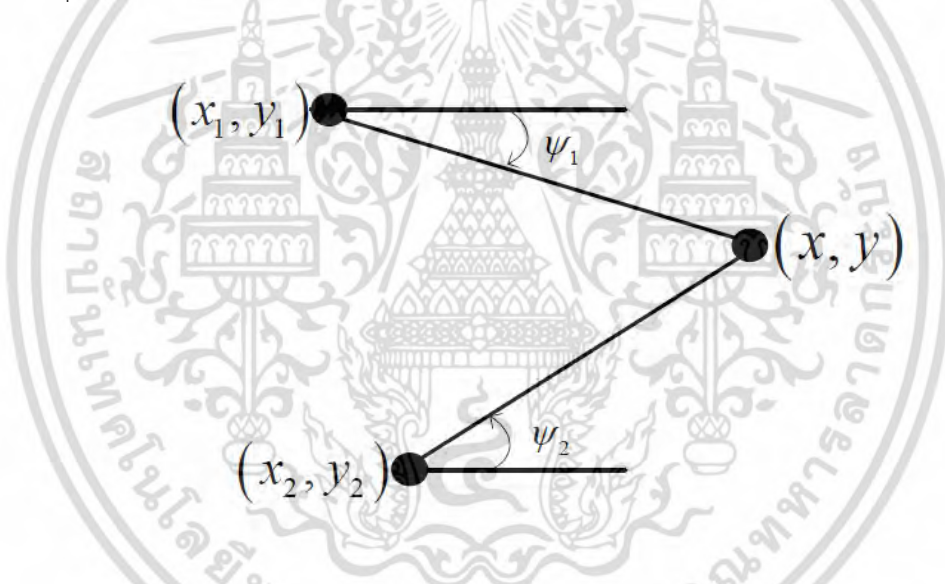
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.2 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง (Time of arrival: TOA) [21]

พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจะเป็นการพิจารณาเวลาที่สัญญาณจากภาคส่งเดินทางมาถึงภาครับ การหาตำแหน่งด้วยพารามิเตอร์นี้จะนำเวลาไปคำนวณหาระยะทางระหว่างภาคส่ง และภาครับเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งต่อไป ซึ่งหากสามารถวัดเวลาที่สัญญาณเดินทางได้อย่างแม่นยำก็จะทำให้การหาตำแหน่งมีความแม่นยำด้วย

### 2.3.2.3 พารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึง (Direction of arrival: DOA) [21]

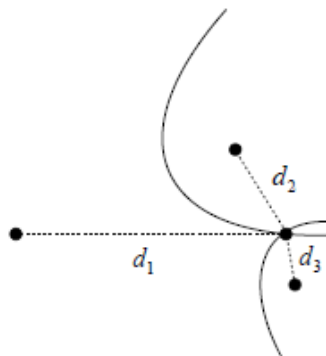
พารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึงจะเป็นการพิจารณาทิศทางที่สัญญาณจากภาคส่งเดินทางมาถึงภาครับ โดยการคำนวณความแตกต่างเฟสของสัญญาณที่ไปถึงสายอากาศแต่ละตัวที่ใช้ อยู่ในชุดรับสัญญาณ การหาตำแหน่งโดยการพิจารณาพารามิเตอร์นี้จะต้องมีชุดสายอากาศที่ทำงานเหมือนกันทุกประการจำนวนหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า Phase array antenna ซึ่งต้องมีอย่างน้อย 2 อัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 จะพบว่า การหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึงทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูง และมีปัญหาความผิดพลาดจากปรากฏการณ์การกระจัดกระจาย (Scattering) ของคลื่นวิทยุอีกด้วย พารามิเตอร์นี้จึงไม่ค่อยนิยมนำมาใช้ในการหาตำแหน่ง



รูปที่ 2.10 การหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึง [21]

### 2.3.2.4 พารามิเตอร์ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง (Time difference of arrival: TDOA) [21]

พารามิเตอร์ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึงจะคล้ายกับพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง โดยพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง จะพิจารณาเวลาที่สัญญาณมาถึงจากแต่ละด้านส่ง ส่วนพารามิเตอร์ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึงจะวัดความต่างของเวลาในแต่ละคู่สถานีฐานแล้วนำไปเขียนเป็นกราฟไฮเพอร์โบลิก ซึ่งบอกถึงระยะห่างระหว่างคู่ของด้านส่ง ดังนั้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการจึงต้องใช้เส้นกราฟอย่างน้อย 2 เส้นมาตัดกัน ซึ่งเกิดจากด้านส่งอย่างน้อย 3 อัน แสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อนำพารามิเตอร์นี้มาใช้ภายในอาคารที่มีระยะทางที่สั้น ความต่างของเวลาที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณจะน้อยมากทำให้ยากต่อการหาตำแหน่ง



รูปที่ 2.11 การหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง [21]

### 2.3.3 เทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง

เมื่อได้พารามิเตอร์จากการวัดแล้ว การหาตำแหน่งจำเป็นจะต้องนำพารามิเตอร์เหล่านี้มาคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่ง ซึ่งเทคนิคการหาตำแหน่งจะมีรูปแบบ หรือขั้นตอนในการคำนวณหาตำแหน่งที่แน่นอนตั้งแต่ขั้นตอนแรกจนถึงขั้นตอนสุดท้ายที่จะได้ผลเป็นตำแหน่งที่ต้องการหา ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการหาตำแหน่ง 4 แบบ คือ เทคนิคการพิจารณาแบบรูปตำแหน่ง, เทคนิค Triangulation, เทคนิค Trilateration และเทคนิค Min-Max มีรายละเอียดดังนี้

#### 2.3.3.1 เทคนิคการพิจารณาแบบรูปตำแหน่ง [22]

วิธีการพิจารณาแบบรูปตำแหน่ง จะมีลักษณะคล้ายกับวิธีการสแกนลายนิ้วมือของมนุษย์โดยที่จะเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการนำมาพิจารณา และนำมาเปรียบเทียบความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งนั้น ๆ ที่ได้ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์นั้น ๆ ไว้ในฐานข้อมูลก่อนหน้าแล้วหลังจากนั้นทำการแสดงตำแหน่งที่เปรียบเทียบแล้วใกล้เคียงที่สุดโดยวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สถานีฐานมากเหมือนวิธีอื่น ๆ เพียงแค่มีสถานีฐานอย่างน้อย 1 ตัวก็สามารถหาตำแหน่งได้ ข้อดีของการใช้วิธีนี้ในการหาตำแหน่งคือต้องใช้เวลาในการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการพิจารณาไว้ในฐานข้อมูล กรณีที่บริเวณที่ต้องการหาตำแหน่งมีขนาดใหญ่ ดังนั้นวิธีการนี้จึงนิยมนำมาใช้ในระบบหาตำแหน่งภายในอาคารมากกว่าระบบหาตำแหน่งภายนอกอาคาร

#### 2.3.3.2 เทคนิค Triangulation [23]

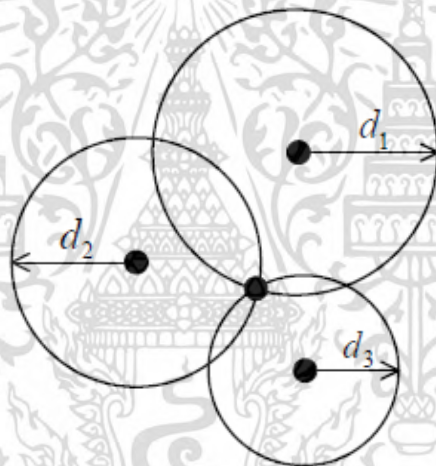
Triangulation เป็นเทคนิคในการตำแหน่งที่พิจารณาพารามิเตอร์ทิศทางที่สัญญาณมาถึง ซึ่งเทคนิคนี้จำเป็นต้องใช้สายอากาศส่งอย่างน้อย 3 อัน มาทำการคำนวณหาความต่างของเฟสของแต่ละสายอากาศส่ง ซึ่งสายอากาศส่งที่ใช้จะต้องมีการทำงานที่เหมือนกันทุกประการ โดยเทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมมากนักเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงและมีความยุ่งยากในการคำนวณหาตำแหน่งด้วย

### 2.3.3.3 เทคนิค Min-Max [24-25]

Min-Max เป็นเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้หลักการซ้อนทับกันของกล่องหรือขอบเขตที่ต่ำที่สุด (Minimum) และขอบเขตที่สูงที่สุด (Maximum) ในแกน  $x$  และแกน  $y$  ซึ่งเทคนิคนี้จำเป็นต้องใช้สายอากาศส่งอย่างน้อย 3 อัน การคำนวณหาตำแหน่งจะนำพารามิเตอร์ทั้งสองมาคำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ จากนั้นจะทำการวาดกล่อง หรือขอบเขตที่เกิดจากสายอากาศส่งแต่ละอัน โดยตำแหน่งที่ต้องการจะหาได้จากค่าเฉลี่ยในแกน  $x$  และแกน  $y$  ของส่วนที่ซ้อนทับกันของกล่อง หรือขอบเขตทั้งสาม

### 2.3.3.4 เทคนิค Trilateration [24, 26]

Trilateration เป็นเทคนิคการหาตำแหน่งที่อาศัยหลักการตัดกันของวงกลม จะคำนวณหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ ซึ่งเทคนิคนี้จำเป็นต้องมีสายอากาศอย่างน้อย 3 อัน โดยการคำนวณหาตำแหน่งจะนำระยะทางของสายอากาศแต่ละอันมาวาดเป็นวงกลมตำแหน่งที่ได้จะเกิดจากการซ้อนทับกันของวงกลมทั้ง 3 วง ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การหาตำแหน่งด้วยเทคนิค Trilateration [24]

## 2.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ทฤษฎีในการหาตำแหน่ง โดยในส่วนของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะกล่าวถึง ประวัติ ความเป็นมา หลักการพื้นฐาน ข้อกำหนด จุดเด่น และการประยุกต์ใช้งาน โดยในส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง ซึ่งจะกล่าวถึงประเภทของพารามิเตอร์ และเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง

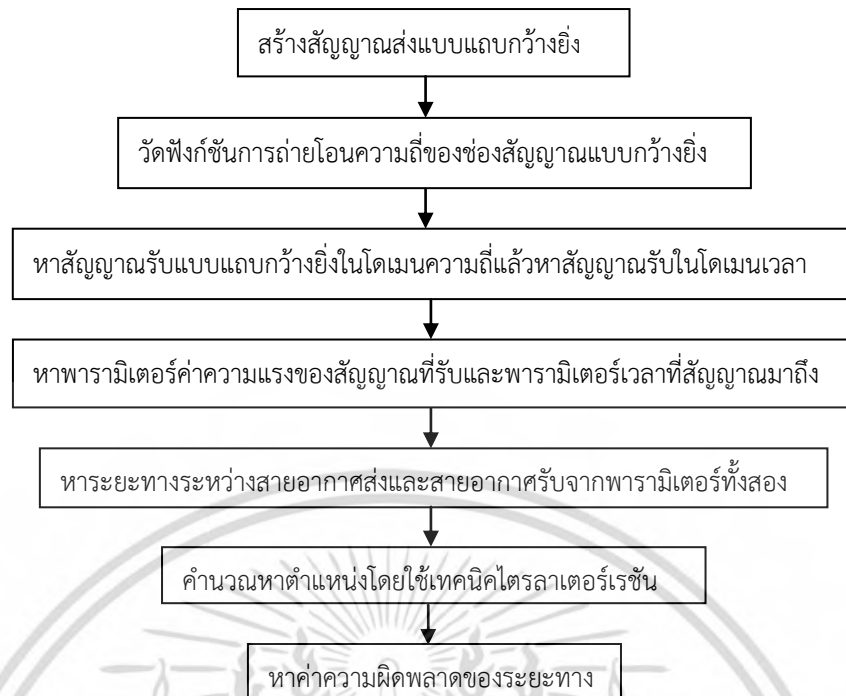
## บทที่ 3

# ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง

### 3.1 บทนำ

ระบบการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการสื่อสารต่าง ๆ ได้ การสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง เป็นระบบที่มีการส่งสัญญาณในลักษณะเป็นพัลส์สั้น ๆ มีช่วงเวลาของพัลส์แคบมากและใช้กำลังงานในการส่งสัญญาณมีค่าต่ำ ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับการสื่อสารไร้สายเพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีความละเอียดทางโดเมนเวลาสูงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เทคโนโลยีนี้มีความเที่ยงตรงสูงมากเช่นกัน ด้วยสาเหตุอันเนื่องมาจากแบนด์วิดท์ของระบบแถบกว้างยิ่งกว้างมาก อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการทะลุทะลวงสิ่งกีดขวางได้ดี ยกตัวอย่างเช่น กำแพง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่ง มีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz หรือมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 มีความคาดหวังว่ามาใช้กับสถานะแวดล้อมภายในอาคารเป็นหลัก

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งด้วยเทคนิค Trilateration ซึ่งได้ใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงมาวิเคราะห์โดยใช้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ในหัวข้อแรกจะกล่าวถึงสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์หาสัญญาณที่รับได้ หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในวิเคราะห์ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงมาวิเคราะห์ จากนั้นจะอธิบายถึงเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง คือ เทคนิค Trilateration ในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงในการตำแหน่ง ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์หาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 มีขั้นตอนดังนี้ ทำการสร้างสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง จากนั้นจะทำการทดลองวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณตามแบบจำลองการวัด แล้วจะหาสัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่ ซึ่งจะเกิดจากสัญญาณส่งในโดเมนความถี่คูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ แล้วหาสัญญาณรับในโดเมนเวลา จากนั้นจะหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับที่เกิดจากพารามิเตอร์ทั้งสอง ต่อมาจะคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Trilateration สุดท้ายจะทำการหาความผิดพลาดของระยะทางของแต่ละตำแหน่งตามแบบจำลองการวัด



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง

### 3.2 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง ใช้ความถี่ช่วง 3.1-10.6 GHz โดยได้กำหนดให้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมในโดเมนความถี่ (Frequency domain) แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ส่วนรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา (Time domain) หรือรูปคลื่นแบบอิมพัลส์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และความหนาแน่นสเปกตรัมในโดเมนความถี่ สามารถแสดงได้ดังสมการนี้

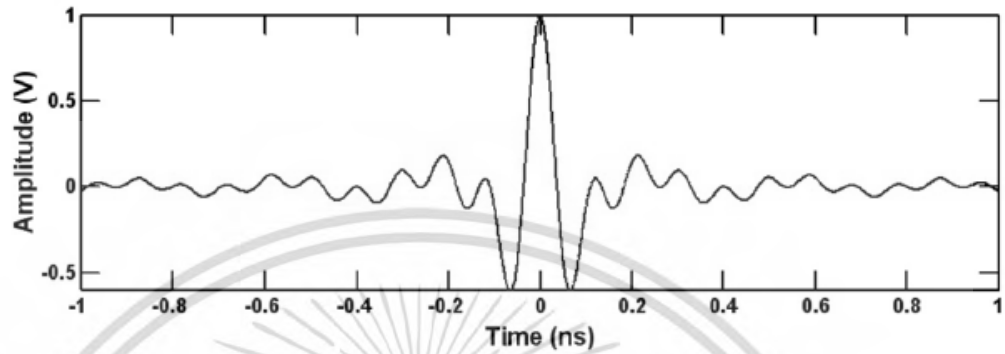
$$v_t(t) = \frac{A}{f_b} [f_H \text{sinc}(2f_H t) - f_L \text{sinc}(2f_L t)] \quad (1)$$

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

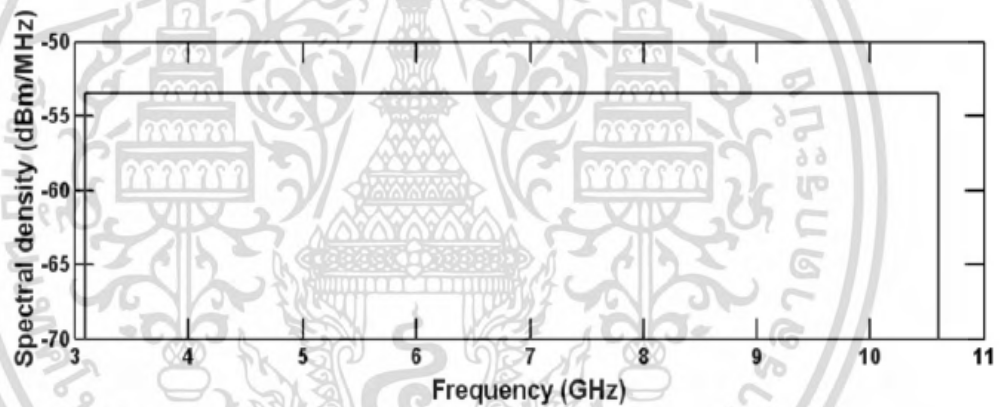
เมื่อ	$A$	คือ	แอมพลิจูดสูงสุด
	$f_b$	คือ	แบนด์วิดท์
	$f_c$	คือ	ความถี่กลาง
	$f_L = f_c - f_b / 2$	คือ	ความถี่ต่ำสุด
	$f_H = f_c + f_b / 2$	คือ	ความถี่สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.2 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา [8]



รูปที่ 3.3 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่ [8]

### 3.3 สัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่ง

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ หรือสัญญาณที่รับได้ในโดเมนความถี่จะวิเคราะห์ได้จากการนำฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งมาคูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ ซึ่งฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณจะหาได้จากการทดลองวัด โดยความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ หรือสัญญาณที่รับได้ในโดเมนความถี่ คือ  $V_r(f)$  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

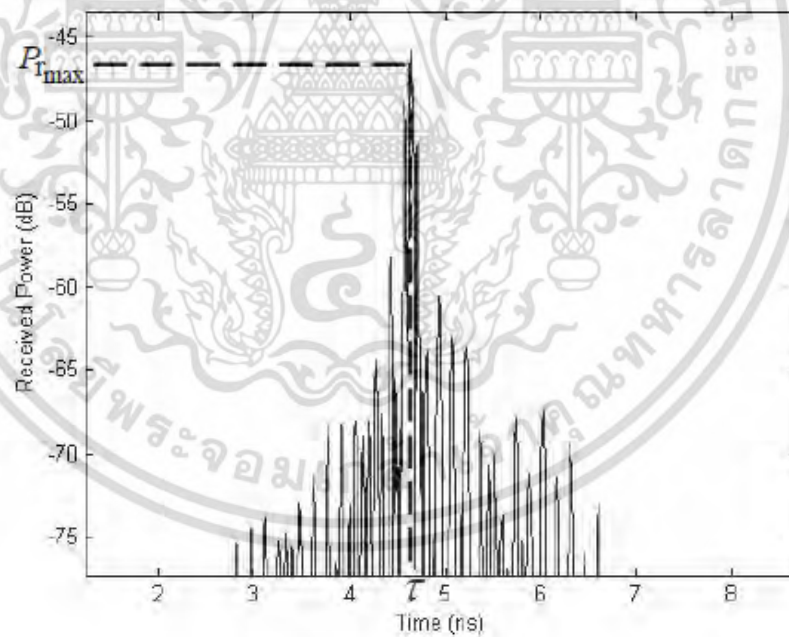
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพิจารณาสัญญาณที่รับได้ในโดเมนเวลา จะสามารถวิเคราะห์ได้โดยการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับ (Inverse fourier transform) 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 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาค่าแอมพลิจูดโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง

งานวิจัยนี้จะพิจารณาพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาค่าแอมพลิจูด 2 แบบ คือ พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง โดยจะนำสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่งมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ทั้งสองแบบ โดยจากบทที่ 2 สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งเป็นสัญญาณที่มีความละเอียดทางเวลามาก ทำให้สามารถสังเกตเห็นกำลังงานที่รับได้มากที่สุด และเวลาที่สัญญาณมาถึงได้ ซึ่งรูปคลื่นของสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่งจะแสดงในรูปที่ 3.4 โดยจะนำไปหาพารามิเตอร์ทั้ง 2 แบบเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแอมพลิจูดโดยใช้เทคนิคการหาค่าแอมพลิจูดต่อไป



รูปที่ 3.4 รูปคลื่นของสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่ง [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้

ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength) จะเป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของสัญญาณตามระยะทาง ซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลต่อพลังงานของสัญญาณ คือ การสูญเสียตามระยะทาง รูปแบบการสูญเสียตามระยะทางสามารถแสดงดังสมการที่ 3.5

$$\bar{P}(r) = P_0 - 10n \log_{10} \left( \frac{r}{r_0} \right) \quad (3.5)$$

จากนั้นจะหาระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับเมื่อวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้  $r_{RSS}$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.6

$$r_{RSS} = r_0 \cdot 10^{\left[ \frac{P_0 - \bar{P}}{10n} \right]} \quad (3.6)$$

- เมื่อ  $\bar{P}$  คือ ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ได้รับในระยะทาง  $r$   
 $P_0$  คือ กำลังงานที่ได้รับที่ระยะจุดอ้างอิง คือที่ระยะ 1 เมตร (วิทยานิพนธ์นี้ได้ทดลองวัดกำลังงานที่รับได้ที่ระยะ 1 เมตร จากสายอากาศส่ง ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ -44.0928 เดซิเบล)  
 $n$  คือ ค่าการสูญเสีย เลขยกกำลังการสูญเสียเชิงวิถี (path loss exponent) (วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ค่าเท่ากับ 1.85 [27])  
 $r_0$  คือ ระยะทางอ้างอิง (วิทยานิพนธ์นี้กำหนดเป็น 1 เมตร จากสายอากาศส่ง)

### 3.4.2 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง

จะพิจารณาการประวิงเวลา (Delay time) โดยจะสามารถวิเคราะห์ได้จากเวลาที่มาถึงของสัญญาณที่เดินจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปคลื่นของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งแล้ว โดยจะพิจารณาเวลาที่สัญญาณมีค่าความแรงของสัญญาณไฟรับได้มากที่สุด โดยเวลาที่สัญญาณมาถึง  $\tau$  สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.7

$$\tau = \arg_{\tau} \max P(\tau) \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ เวลาที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้มากที่สุด

ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับเมื่อวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง  $r_{TOA}$  สามารถคำนวณได้ดังสมการนี้

$$r_{TOA} = c \cdot \tau \quad (3.8)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วของคลื่นวิทยุ ( $3 \times 10^8$  m/s)

### 3.5 เทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เทคนิคในการหาตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยีสัญญาณแถบกว้างยิ่ง คือ เทคนิคไตรเลเตอร์เรชั่น โดยเมื่อได้ระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับจากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และเวลาที่สัญญาณมาถึงแล้ว ก็จะนำไปคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งต่อไป

#### 3.5.1 เทคนิคการหาตำแหน่งแบบไตรเลเตอร์เรชั่น (Trilateration)

เทคนิคการหาตำแหน่งแบบไตรเลเตอร์เรชั่น เป็นเทคนิคการหาตำแหน่งที่พิจารณาหาตำแหน่งจากส่วนที่ซ้อนทับกันของวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งอย่างน้อย 3 อันโดยรัศมีของวงกลมที่เกิดสายอากาศส่งแต่ละอันสามารถหาได้จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง โดยรูปที่ 3.5 แสดงการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Trilateration



รูปที่ 3.5 เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาตำแหน่ง โดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบไตรลาเตอร์เรชัน เป็นการหาตำแหน่งใน แกน  $x$  และแกน  $y$  จำเป็นต้องใช้สายอากาศส่งอย่างน้อย 3 อัน โดยจะวาดวงกลมที่เกิดจาก สายอากาศส่ง ทั้ง 3 อัน ซึ่งรัศมีของวงกลมแต่ละอันจะเกิดจากระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และ สายอากาศรับ โดยวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.9), (3.10) และ (3.11) ตามลำดับ

$$(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = r_1^2 \quad (3.9)$$

$$(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = r_2^2 \quad (3.10)$$

$$(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 = r_3^2 \quad (3.11)$$

เมื่อ  $(x_1, y_1)$  คือ จุดศูนย์กลางของวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1  
 $(x_2, y_2)$  คือ จุดศูนย์กลางของวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 2  
 $(x_3, y_3)$  คือ จุดศูนย์กลางของวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 3  
 $r_1$  คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งที่ 1  
 $r_2$  คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งที่ 2  
 $r_3$  คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งที่ 3

จากนั้นจะหาเส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันของวงกลมทั้งสาม โดยเส้นตรง 1 เส้นจะเกิดจาก การตัดกันของวงกลม 2 วง ดังนั้นเมื่อมีวงกลมทั้งหมด 3 วงก็จะเกิดเส้นตรงทั้งหมด 3 เส้น ซึ่งเส้นตรง ที่เกิดจากวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1 และสายอากาศส่งที่ 2 แสดงได้ดังสมการที่ (3.12) เส้นตรงที่เกิดจากวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 2 และสายอากาศส่งที่ 3 แสดงได้ดังสมการที่ (3.13) และเส้นตรงที่เกิดจากวงกลมที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1 และสายอากาศส่งที่ 3 แสดงได้ดัง สมการที่ (3.14) ดังนั้นตำแหน่งที่ต้องการหาหรือตำแหน่งของสายอากาศรับก็คือตำแหน่งที่เส้นตรงทั้ง สามเส้นตัดกัน ซึ่งจะได้เป็นพิกัด  $(x_e, y_e)$

$$2x(x_1 - x_2) + 2y(y_1 - y_2) = (r_2^2 - r_1^2) + (x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) \quad (3.12)$$

$$2x(x_2 - x_3) + 2y(y_2 - y_3) = (r_3^2 - r_2^2) + (x_2^2 - x_3^2) + (y_2^2 - y_3^2) \quad (3.13)$$

$$2x(x_1 - x_3) + 2y(y_1 - y_3) = (r_3^2 - r_1^2) + (x_1^2 - x_3^2) + (y_1^2 - y_3^2) \quad (3.14)$$

### 3.6 วิเคราะห์ความแม่นยำในการหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งภายในอาคารในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตาโดยใช้เทคนิคไตรลาเตอร์เรชัน ซึ่งนำพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงที่ได้จากสัญญาณแถบกว้างยิ่งมาใช้ในการวิเคราะห์ความแม่นยำของค่าความผิดพลาดของระยะทาง ซึ่งการหาตำแหน่งที่มีความแม่นยำมากเมื่อค่าความผิดพลาดของระยะทางมีค่าน้อย ซึ่งได้กำหนดให้  $(x_c, y_c)$  คือ ตำแหน่งที่หาได้จากการใช้เทคนิค ไตรลาเตอร์เรชัน และกำหนดให้  $(x_e, y_e)$  คือ ตำแหน่งที่ถูกต้อง ดังนั้นค่าความผิดพลาดของระยะทางจะสามารถได้ดังสมการนี้

$$E_D = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2} \quad (3.15)$$

เมื่อ  $E_D$  คือ ค่าความผิดพลาดของระยะทาง

### 3.7 สรุป

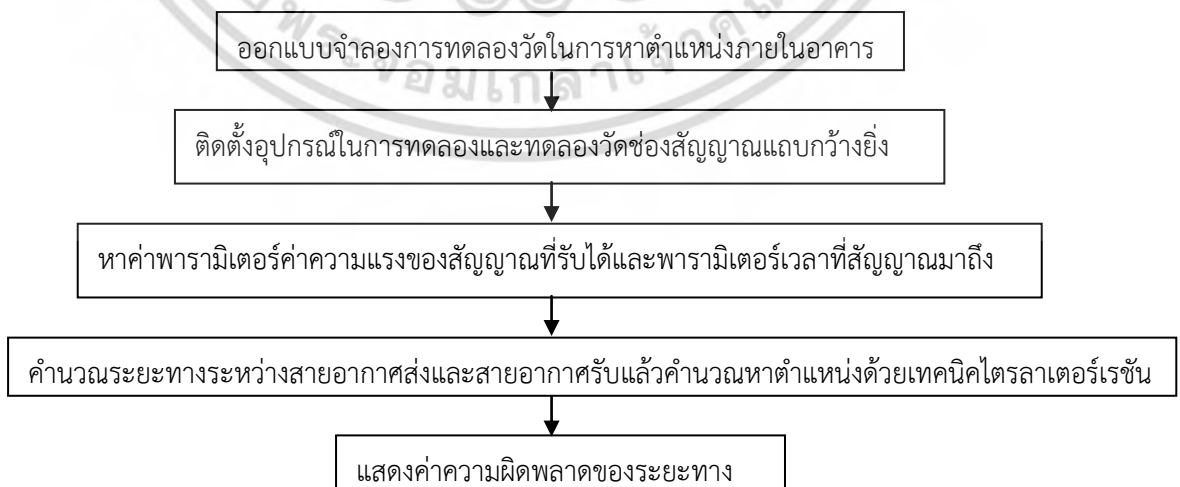
ในบทนี้ได้กล่าวถึงสัญญาณส่ง และสัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่ง คือ พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง จากนั้นได้กล่าวถึงเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคไตรลาเตอร์เรชัน และสุดท้ายได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ความแม่นยำในการหาตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

## บทที่ 4

# การทดลองวัดและการหาตำแหน่ง

### 4.1 บทนำ

การประเมินผลของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งของงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่งแล้วนำมาวิเคราะห์ในการหาตำแหน่ง ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอน และรายละเอียดในการทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง โดยคุณสมบัติ หรือคุณลักษณะของช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่งจะหาได้จากการทดลองวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ หรือพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ทำการทดลองวัดในโดเมนความถี่ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคไตรลาเตอร์เรชัน ซึ่งได้ทำการหาตำแหน่งโดยออกแบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเป็นแบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง เพื่อศึกษาการหาตำแหน่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ในแบบจำลองนี้จะมีสายอากาศส่ง 3 อัน ซึ่งขั้นตอนการทดลองวัดและการหาตำแหน่งจะมีอยู่ 6 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็นการออกแบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ขั้นตอนที่สองจะเป็นการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด ขั้นตอนที่สามจะทำการทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งความถี่ที่วัดจะวัดทั้งหมด 3 ช่วง คือ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz ขั้นตอนที่จะทำการหาสัญญาณที่รับแบบแถบกว้างยิ่งเพื่อนำไปใช้หาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง โดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (MATLAB Program) จากนั้นขั้นตอนที่ห้าจะเป็นการนำพารามิเตอร์ที่ได้มาทำการคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Trilateration ซึ่งจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และขั้นตอนสุดท้ายจะแสดงผลการทดลองซึ่งจะแสดงเป็นค่าความผิดพลาดของระยะทางและสรุปผล ซึ่งขั้นตอนการทดลองวัดและการหาตำแหน่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทดลองวัดและการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ขั้นตอนในการเตรียมการทดลอง

### 4.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

การทดลองวัดช่องสัญญาณของสัญญาณแถบกว้างยิ่งจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือเฉพาะทาง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือวัดดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะประกอบไปด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์รุ่น HP-8510C ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-Parameter test set) รุ่น HP-8514B และตัวสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesized sweeper) รุ่น HP-83620A ซึ่งจะถูกรับควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (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 (Vector Network Analyzer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

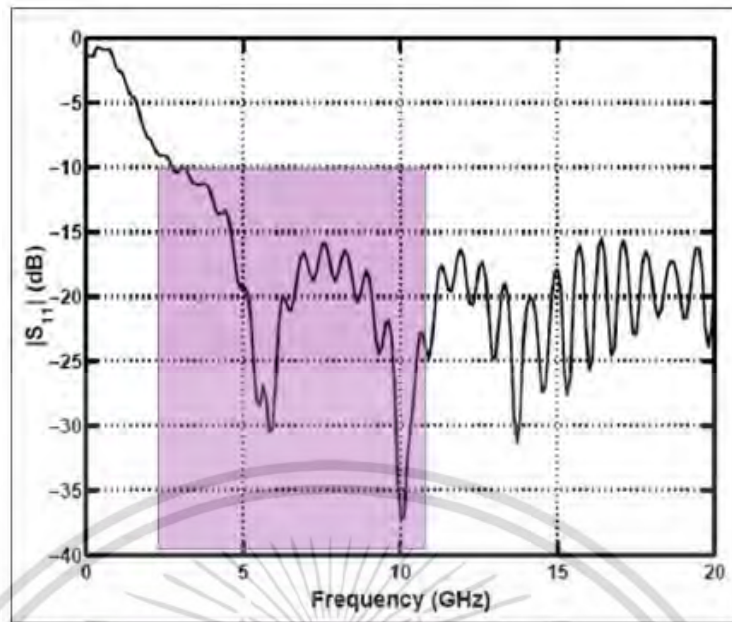
#### 4.2.2 สายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical antenna)

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



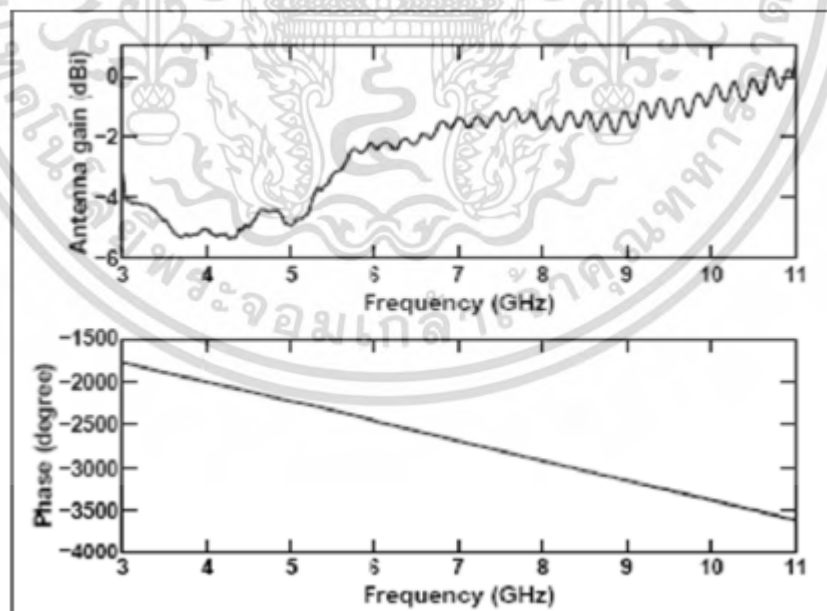
รูปที่ 4.3 สายอากาศกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัด

ในการทดลองวัดนี้ได้ใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งมีช่วงความถี่ของการวัดทั้งหมด 3 ช่วง คือ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz ซึ่งสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัดนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficient)  $|S_{11}|$  ในช่วงความถี่ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งต่ำกว่า -10 dB ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศแบบกรวยคู่สามารถนำมาใช้ในช่วงความถี่ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบกรวยคู่

ในการพิจารณาสายอากาศที่ใช้ในการทดลองวัด คุณสมบัติอีกอย่างที่สำคัญ คือขนาด และเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศ ซึ่งขนาด และเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัดนี้จะแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 อัตราขยายและเฟสของสายอากาศแบบกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร

การทดลองวัดสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ซึ่งเป็นการทดลองช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งเพื่อนำมาใช้หาสัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่งเพื่อนำมาใช้ในการหาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงในการคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Trilateration ซึ่งแบบจำลองจะมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองวัด และวิธีการทดลองวัด ดังนี้

#### 4.3.1 แบบจำลองการวัดและการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร

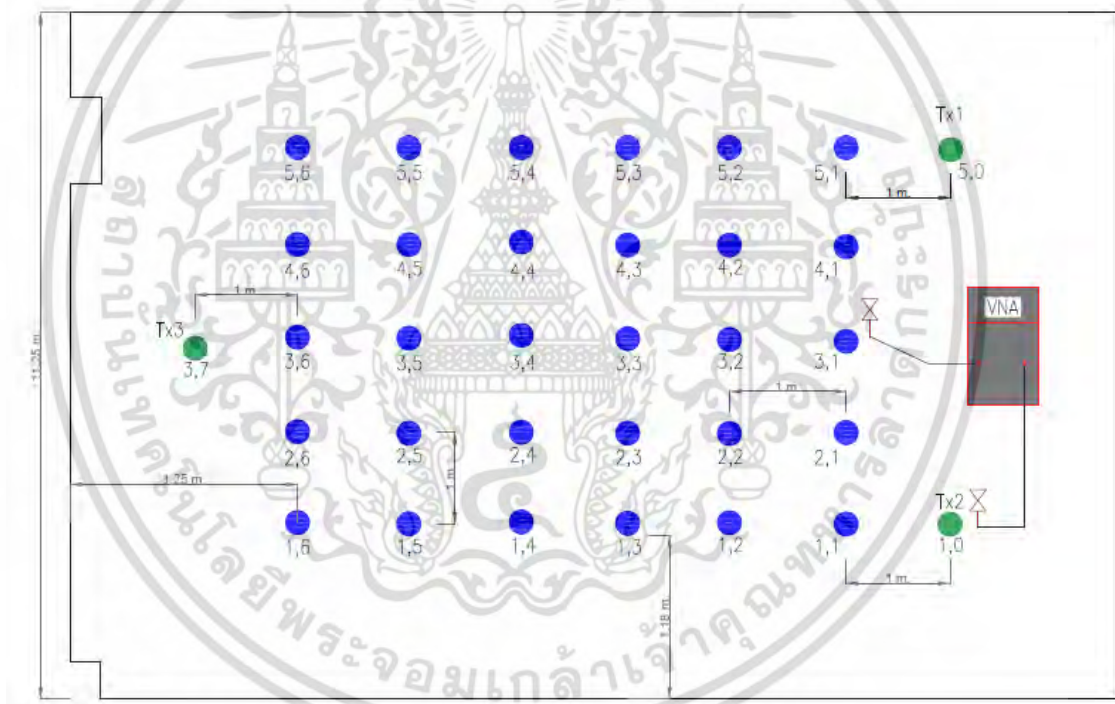
งานวิจัยนี้ได้ออกแบบจำลองการทดลองวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารซึ่งทำการทดลองวัดที่อาคารเรียนรวม E-12 ชั้นที่ 12 ห้อง 1207 ได้ทำการทดลองวัดช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งในช่วงความถี่ 3-11 GHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่แถบกว้างยิ่งทั้งหมดตามมาตรฐานที่ทางคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกากำหนดโดยแบ่งการวัด 3 ช่วงซึ่งในการทดลองจะวัดทั้งหมด 3 ช่วงความถี่ คือ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz ในการทดลองวัดนี้ได้ใช้จำนวนจุดความถี่ 801 จุด ได้นำสายอากาศแบบกรวยคูมาใช้ทั้งด้านส่ง และด้านรับ ทำการวางในแนวตั้ง (Vertical) ได้กำหนดความสูงของสายอากาศเป็น 1 เมตร ทั้งด้านส่ง และด้านรับ โดยในแบบจำลองได้กำหนดให้มีสายอากาศส่ง 3 อัน วางตั้งไว้ในพิกัดที่แน่นอน คือ สายอากาศส่งที่ 1 วางไว้ในพิกัด (5,0) สายอากาศส่งที่ 2 วางไว้ในพิกัด (1,0) และสายอากาศส่งที่ 3 วางไว้ในพิกัด (3,7) และมีสายอากาศรับ 1 อัน มีจำนวนจุดที่ใช้ในการทดลองวัดช่องสัญญาณหรือจุดที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 30 จุด โดยแต่ละจุดห่างกันในแนวแกน x และแกน y เป็นระยะทาง 1 เมตร

เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 พอร์ต คือ ด้านส่งและด้านรับ งานวิจัยนี้มีสายอากาศส่ง 3 อัน จึงจำเป็นที่จะต้องวัดสายอากาศส่งที่ละอัน ดังนั้นจะทำการทดลองวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณโดยการวางสายอากาศรับไว้ที่จุดที่ทำการทดสอบ จากนั้นจะทำการทดลองวัดโดยการเคลื่อนที่สายอากาศส่งให้ครบทั้ง 3 อัน จากนั้นจะค่อยเคลื่อนที่สายอากาศรับไปจุดที่ทำการทดสอบอื่น ๆ 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 จุดใน 3 ช่วงความถี่

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

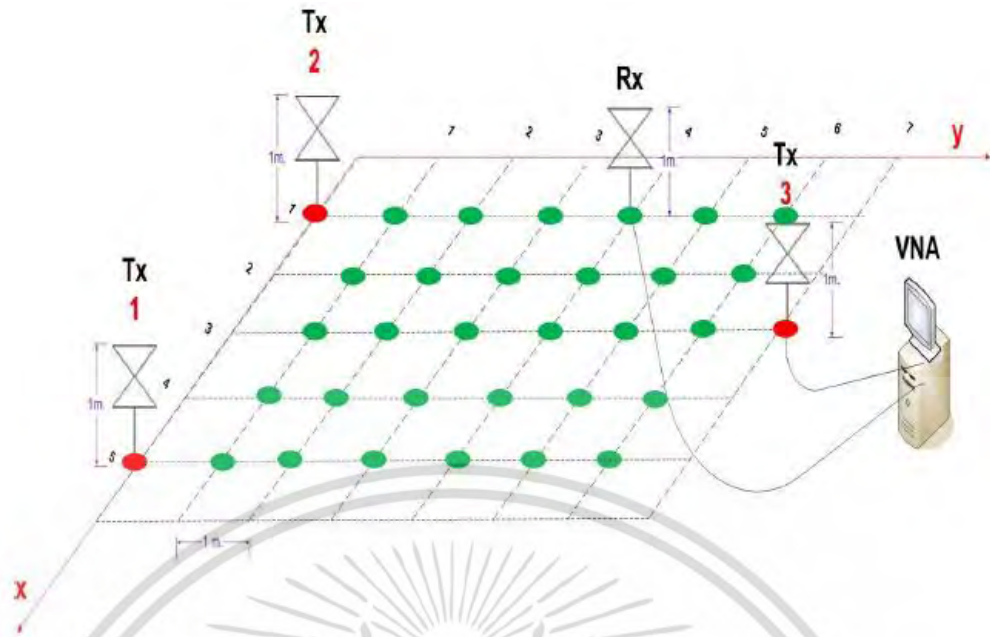
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	3-5 GHz
	5-11 GHz
	3-11 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
ชนิดของสายอากาศด้านส่งและด้านรับ	กรวยคู่
การวางสายอากาศด้านส่งและด้านรับ	แนวตั้ง
ความสูงของสายอากาศด้านส่งและด้านรับ	1 เมตร
จำนวนสายอากาศส่ง	3 ต้น
จำนวนจุดที่ใช้ในการทดสอบ	30 จุด

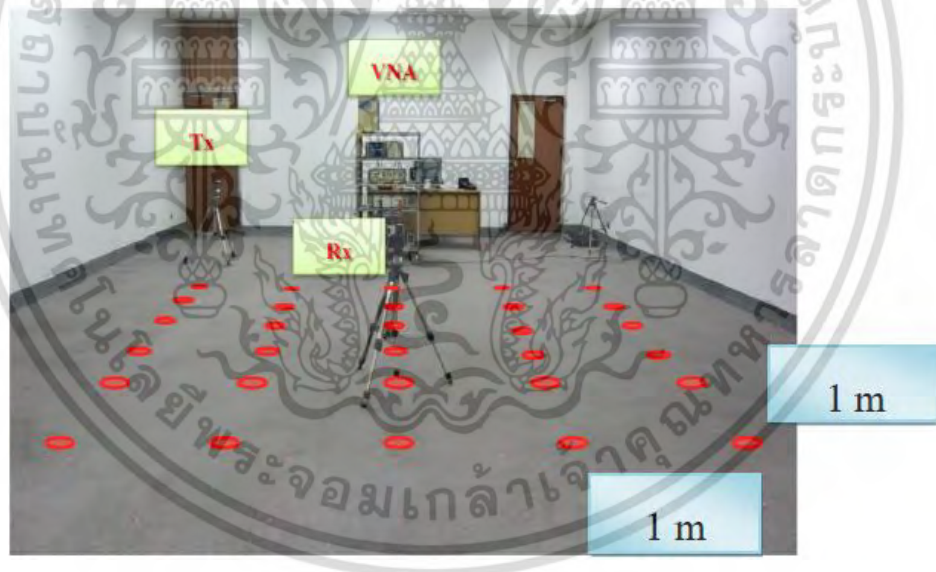


รูปที่ 4.6 แบบจำลองการทดลองวัดในมุมมองด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แบบจำลองการทดลองวัดในมุมมองด้านข้าง



รูปที่ 4.8 สถานที่จริงใช้ในการทดลองวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ลักษณะการจัดวางสายอากาศด้านส่ง

#### 4.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัด คือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ การทดลองวัดนี้จะเป็นการทดลองวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านแบบสองพอร์ต โดยพอร์ตที่หนึ่งคือ พอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณและพอร์ตที่สองจะใช้ในการรับสัญญาณ จากนั้นปลายของทั้งสองพอร์ต จะต่อเข้ากับสายอากาศ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศ รับ ซึ่งผลการทดลองวัดช่องสัญญาณที่ได้จะอยู่ในโดเมนความถี่ โครงสร้างของสายอากาศจะมีเส้น ผ่านศูนย์กลางที่ฐานของกรวย คือ 65.34 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างฐานกรวยทั้งสอง คือ 37 มิลลิเมตร ซึ่งสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวัดนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficient)  $|S_{11}|$  ในช่วงความถี่ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งต่ำกว่า -10 dB ในการทดลองวัดนี้ได้ใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งมีช่วงความถี่ของการวัด 3 ช่วง คือ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz และสุดท้ายได้กล่าวถึงแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ สำหรับการหาตำแหน่งภายใน อาคารซึ่งจะแสดงแบบจำลองการทดลองวัด สถานที่ที่ใช้ในการทดลองวัด และลักษณะการจัดวาง สายอากาศ โดยการวางตำแหน่งของสายอากาศจะวางในแนวตั้ง (Vertical) ได้กำหนดความสูงของ สายอากาศเป็น 1 เมตร ทั้งด้านส่งและด้านรับ โดยในแบบจำลองได้กำหนดให้มีสายอากาศส่ง 3 อัน วางตั้งไว้ในพิกัดที่แน่นอน คือ สายอากาศส่งที่ 1 วางไว้ในพิกัด (5,0) สายอากาศส่งที่ 2 วางไว้ในพิกัด (1,0) และสายอากาศส่งที่ 3 วางไว้ในพิกัด (3,7) และมีสายอากาศรับ 1 อัน มีจำนวนจุดที่ใช้ในการ ทดลองวัดช่องสัญญาณหรือจุดที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 30 จุด โดยแต่ละจุดห่างกันในแนวแกน x และแกน y เป็นระยะทาง 1 เมตร

## บทที่ 5

# ผลการทดลองวัดและวิเคราะห์

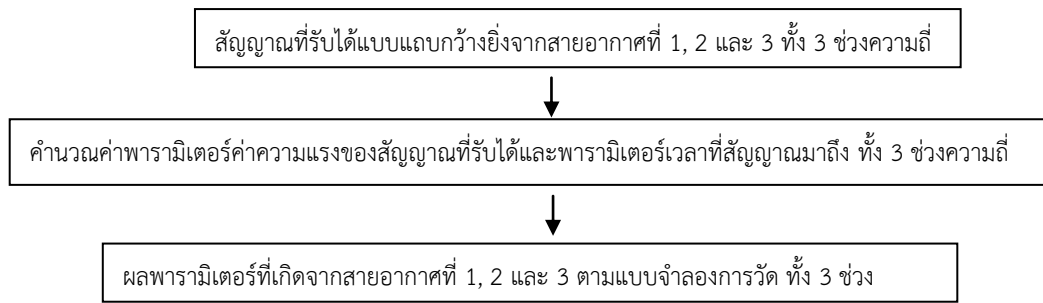
### 5.1 บทนำ

ในการทดลองวิจัยนี้เป็นการหาตำแหน่งภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารโดยใช้เทคนิค Trilateration ซึ่งได้ใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งยวดมาตรฐาน IEEE 802.15.4a ได้กำหนดให้สัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม ใน 3 ช่วงความถี่ คือ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz โดยแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 1 โวลต์ ซึ่งได้แสดงในบทที่ 3 การหาตำแหน่งในงานวิจัยนี้ได้ทดลองวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณตามแบบจำลองที่ได้แสดงในบทที่ 4 แล้วนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และเวลาที่สัญญาณมาถึง จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Trilateration ที่ได้ใช้วิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองวิจัยของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งยวดที่ได้ทดลองวัดตามแบบจำลองการวัด โดยทำการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงซึ่งจะนำมาใช้ในการหาตำแหน่ง ซึ่งทำการวัดช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 เพื่อนำไปหาสัญญาณรับแบบแถบกว้างยิ่งยวด จากนั้นจะแสดงผลความแม่นยำในการหาตำแหน่งในรูปของค่าความผิดพลาดของระยะทางในรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ซึ่งฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางจะบอกถึงความน่าจะเป็นที่ค่าความผิดพลาดของระยะทางค่าหนึ่งจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความผิดพลาดของระยะทางค่านั้น

### 5.2 การทดลองวิจัยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองวัด

เมื่อทำการทดลองวัดช่องสัญญาณตามแบบจำลองการวัดแล้ว จากนั้นจะทำการหาสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่งยวด แล้วนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการหาตำแหน่ง คือ พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้หาได้ดังสมการที่ (3.6) และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงหาได้ดังสมการที่ (3.7, 3.8) ที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 ในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ตามแบบจำลองการวัด ซึ่งขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในหน่วยเดซิเบลและพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจะแสดงเวลาที่สัญญาณเดินทางจากด้านส่งมาถึงด้านรับในหน่วยนาโนวินาที จะแสดงในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ตามแบบจำลองการวัด

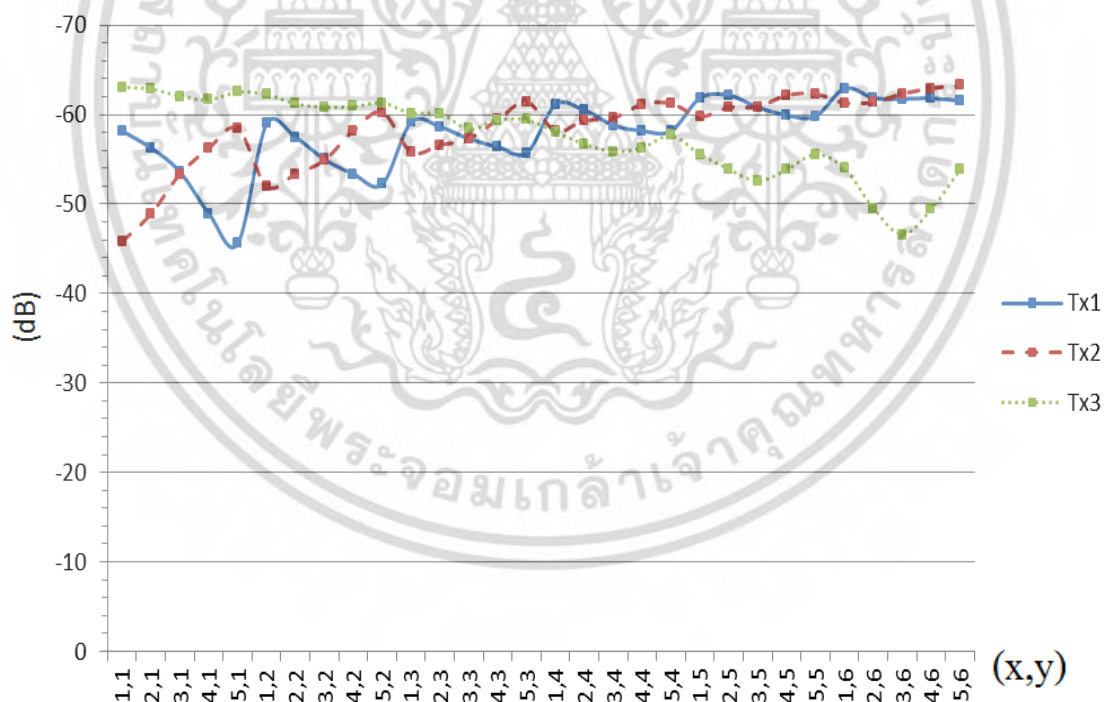


**รูปที่ 5.1** ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์ของเวลาที่สัญญาณมาถึง

### 5.2.1 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้

พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในหน่วยเดซิเบล ซึ่งจะแสดงในแนวแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด

ช่วงความถี่ 3-5 GHz พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (5,0), (1,0) และ (3,7) ตามลำดับ ตามแบบจำลองการวัดจะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ดังรูปที่ 5.2

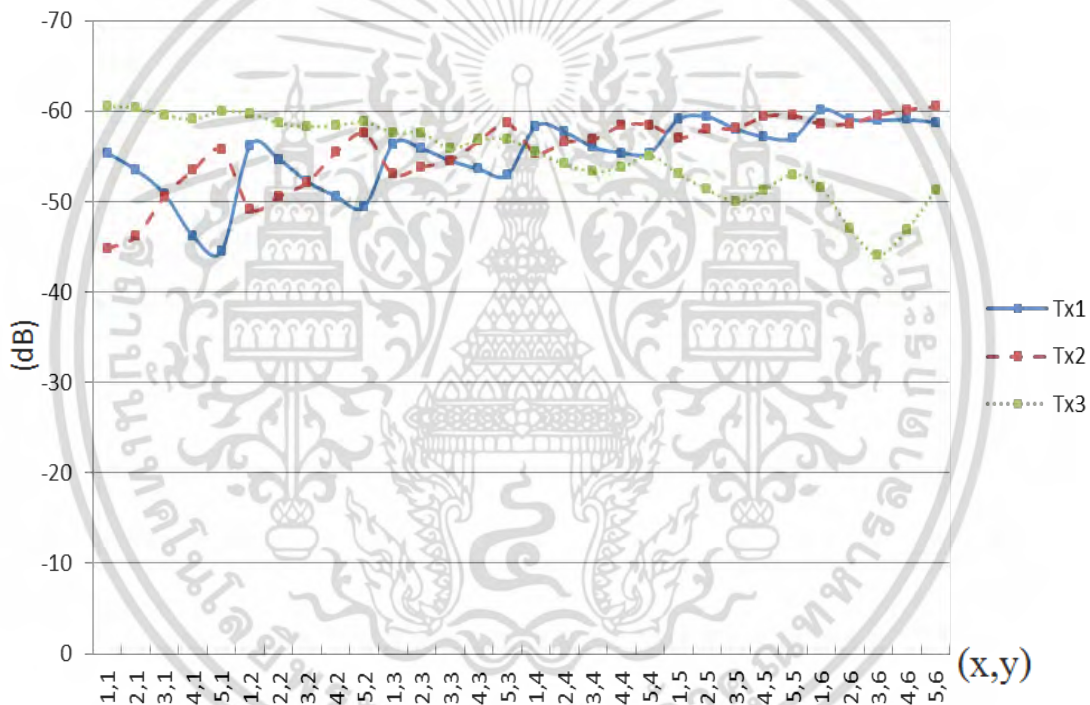


**รูปที่ 5.2** พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 3-5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในช่วงความถี่ 3-5 GHz พบว่า ค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงสุดของสายอากาศส่งที่ 1 มีค่าเป็น -45.8165 เดซิเบล ที่พิกัด (5,1) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -62.9300 เดซิเบล ที่พิกัด (1,6) ค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงสุดของสายอากาศส่งที่ 2 มีค่าเป็น -45.5745 เดซิเบล ที่พิกัด (1,1) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -62.2899 เดซิเบล ที่พิกัด (5,6) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงสุดของสายอากาศส่งที่ 3 มีค่าเป็น -46.5919 เดซิเบล ที่พิกัด (3,6) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -63.0442 เดซิเบล ที่พิกัด (1,1)

ช่วงความถี่ 5-11 GHz พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (5,0), (1,0) และ (3,7) ตามลำดับ ตามแบบจำลองการวัดจะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ดังรูปที่ 5.3

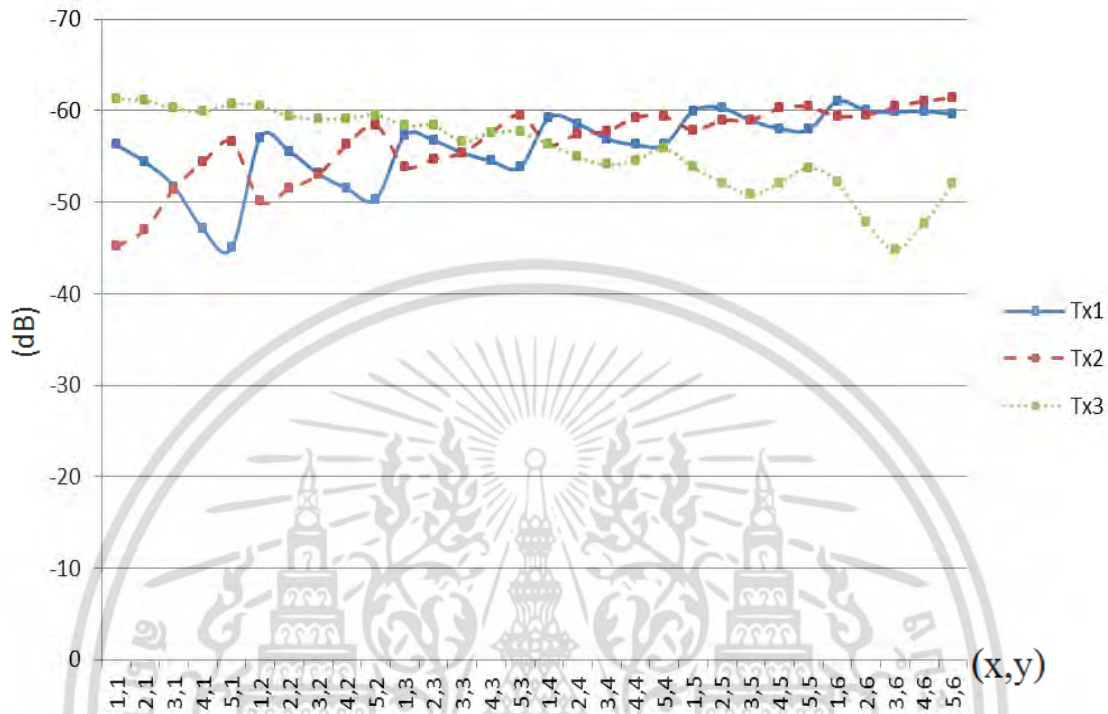


รูปที่ 5.3 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 5-11 GHz

จากผลการทดลองในช่วงความถี่ 5-11 GHz พบว่า ค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงสุดของสายอากาศส่งที่ 1 มีค่าเป็น -44.550 เดซิเบล ที่พิกัด (5,1) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -60.1500 เดซิเบล ที่พิกัด (1,6) ค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงสุดของสายอากาศส่งที่ 2 มีค่าเป็น -44.81655 เดซิเบล ที่พิกัด (1,1) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -60.5099 เดซิเบล ที่พิกัด (5,6) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงสุดของสายอากาศส่งที่ 3 มีค่าเป็น -44.0519 เดซิเบล ที่พิกัด (3,6) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -60.5042 เดซิเบล ที่พิกัด (1,1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงความถี่ 3-11 GHz พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (5,0), (1,0) และ (3,7) ตามลำดับ ตามแบบจำลองการวัดจะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ดังรูปที่ 5.4



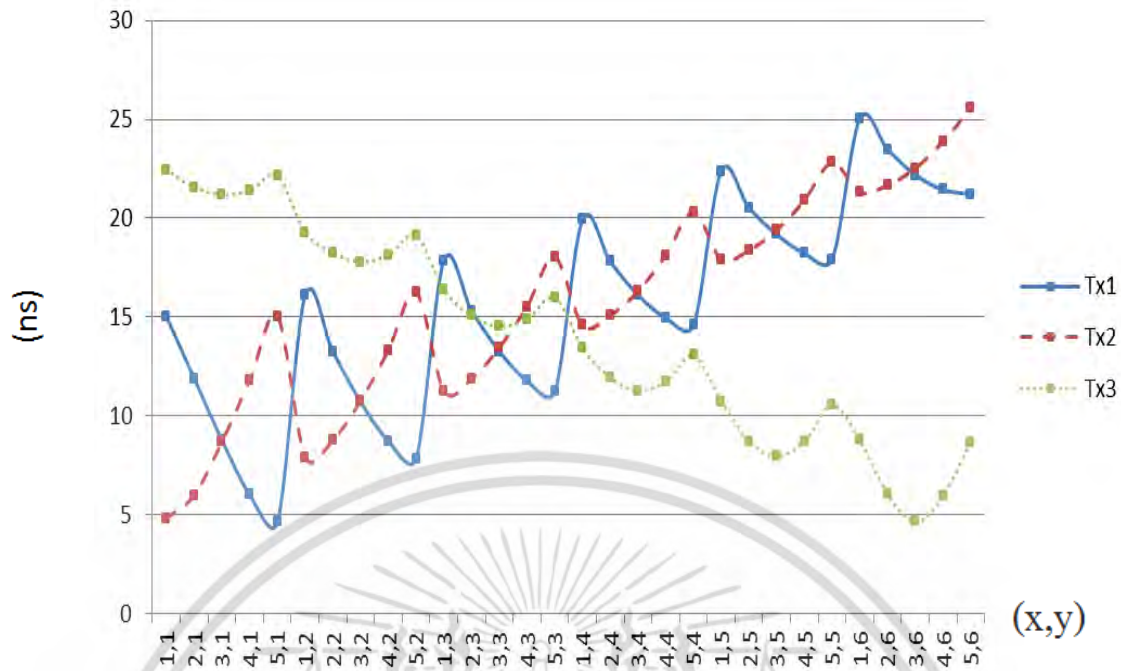
รูปที่ 5.4 พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 3-11 GHz

จากผลการทดลองในช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz พบว่า ค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงสุดของสายอากาศส่งที่ 1 มีค่าเป็น -45.0100 เดซิเบล ที่พิกัด (5,1) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -61.0400 เดซิเบล ที่พิกัด (1,6) ค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงสุดของสายอากาศส่งที่ 2 มีค่าเป็น -45.1465 เดซิเบล ที่พิกัด (1,1) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -61.3999 เดซิเบล ที่พิกัด (5,6) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงสุดของสายอากาศส่งที่ 3 มีค่าเป็น -44.8219 เดซิเบล ที่พิกัด (3,6) และค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่ำที่สุดมีค่าเป็น -61.2742 เดซิเบล ที่พิกัด (1,1)

### 5.2.2 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง

พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจะแสดงเวลาที่สัญญาณเดินทางจากสายอากาศส่งมาถึงสายอากาศรับในหน่วยนาโนวินาที ซึ่งจะแสดงในแนวแกน x และแกน y ตามแบบจำลองการวัด

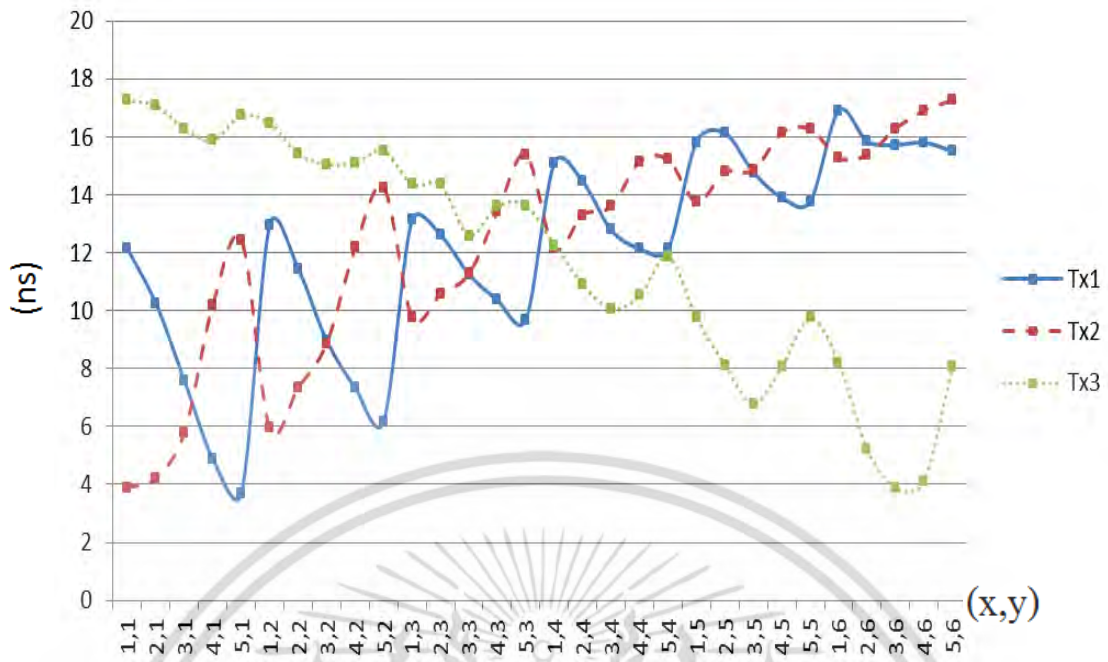
ช่วงความถี่ 3-5 GHz พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (5,0), (1,0) และ (3,7) ตามลำดับ ตามแบบจำลองการวัดจะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 3-5 GHz

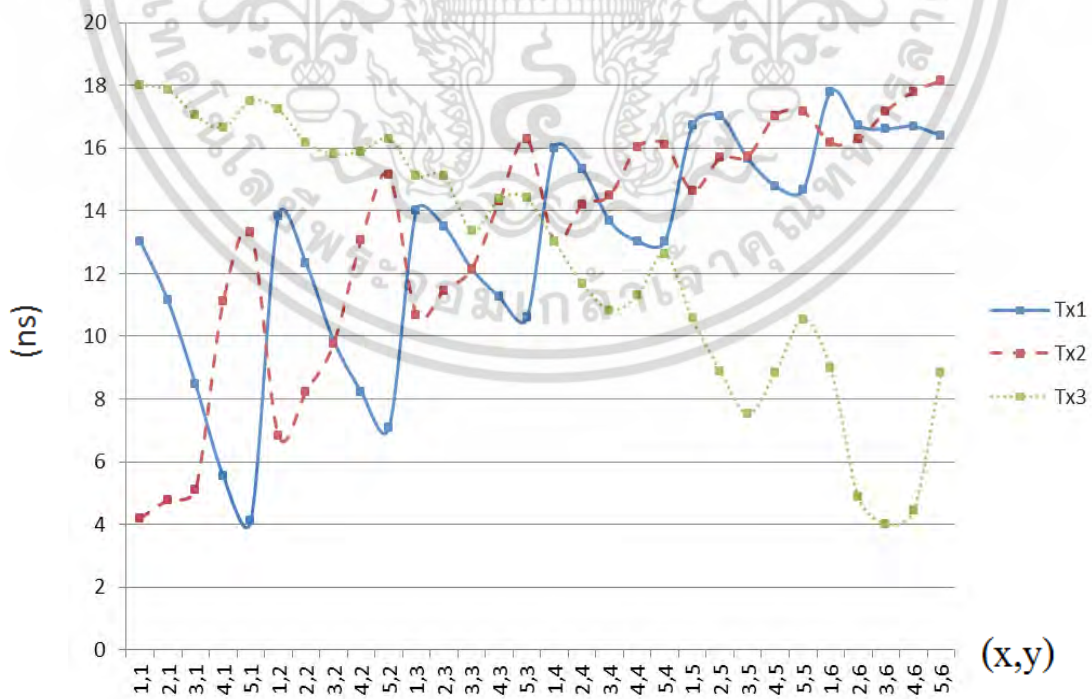
จากผลการทดลองในช่วงความถี่ 3-5 GHz พบว่า ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดของสายอากาศส่งที่ 1 มีค่าเป็น 4.64 นาโนวินาที ที่พิกัด (5,1) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 25.04 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,6) ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดของสายอากาศส่งที่ 2 มีค่าเป็น 4.84 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,1) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 25.59 นาโนวินาที ที่พิกัด (5,6) ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดของสายอากาศส่งที่ 3 มีค่าเป็น 4.65 นาโนวินาที ที่พิกัด (3,6) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 22.45 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,1)

ช่วงความถี่ 5-11 GHz พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (5,0), (1,0) และ (3,7) ตามลำดับ ตามแบบจำลองการวัดจะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ดังรูปที่ 5.6 จากผลการทดลองในช่วงความถี่ 5-11 GHz พบว่า ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดของสายอากาศส่งที่ 1 มีค่าเป็น 3.70 นาโนวินาที ที่พิกัด (5,1) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 16.90 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,6) ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดของสายอากาศส่งที่ 2 มีค่าเป็น 3.90 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,1) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 17.2 นาโนวินาที ที่พิกัด (5,6) ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดของสายอากาศส่งที่ 3 มีค่าเป็น 3.88 นาโนวินาที ที่พิกัด (3,6) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 17.25 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,1)



รูปที่ 5.6 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 5-11 GHz

ช่วงความถี่ 3-11 GHz พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงที่เกิดจากสายอากาศส่งที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งวางไว้ที่พิกัด (5,0), (1,0) และ (3,7) ตามลำดับ ตามแบบจำลองการวัดจะแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ดังรูปที่ 5.7



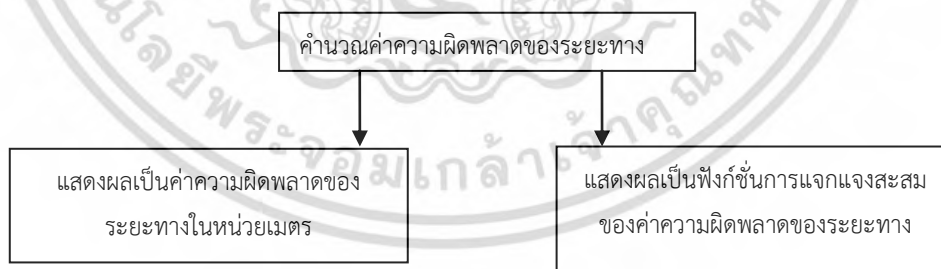
รูปที่ 5.7 พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสายอากาศที่ 1, 2 และ 3 ในช่วงความถี่ 3-11 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในช่วงความถี่ 3-11 GHz พบว่า ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดของสายอากาศส่งที่ 1 มีค่าเป็น 4.11 นาโนวินาที ที่พิกัด (5,1) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 17.79 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,6) ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดของสายอากาศส่งที่ 2 มีค่าเป็น 4.20 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,1) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 18.14 นาโนวินาที ที่พิกัด (5,6) ค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงน้อยที่สุดของสายอากาศส่งที่ 3 มีค่าเป็น 4.01 นาโนวินาที ที่พิกัด (3,6) และค่าเวลาที่สัญญาณมาถึงมากที่สุดมีค่าเป็น 18.02 นาโนวินาที ที่พิกัด (1,1)

### 5.3 ผลการทดลองวิจัยแสดงค่าความผิดพลาดของระยะทางและฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทาง

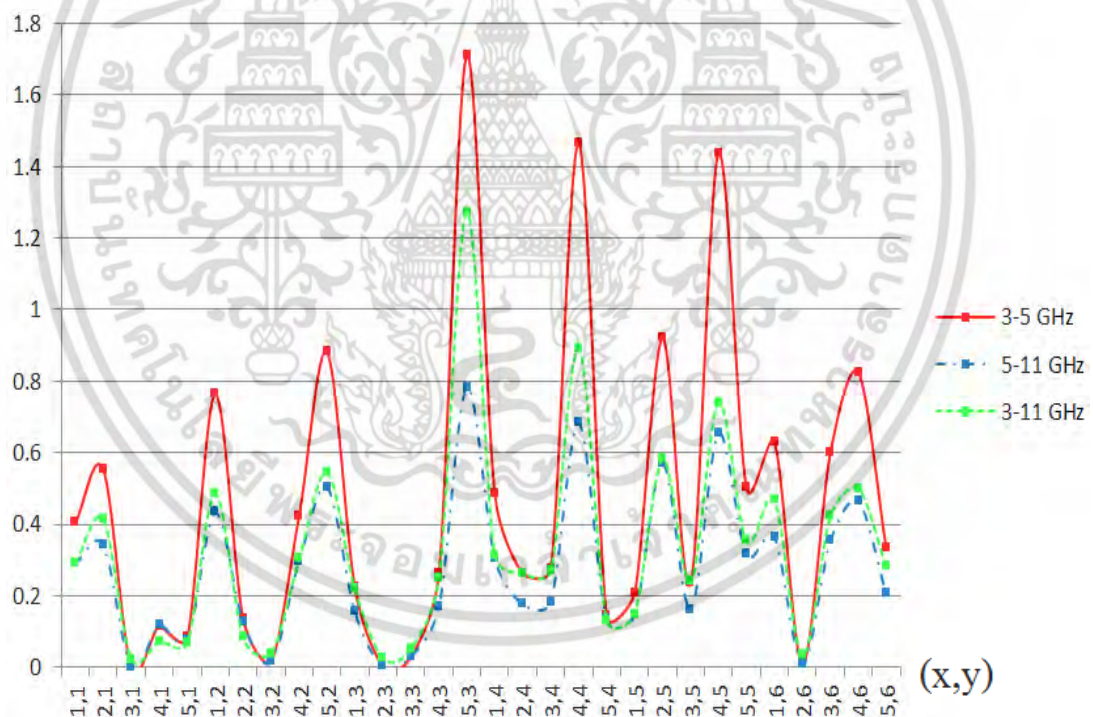
งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้สัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม ใน 3 ช่วงความถี่ คือ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ โดยกำลังงานที่ ได้รับจะถูกคำนวณโดยสมการ (3.5) และคำนวณระยะทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับจะคำนวณโดยสมการ (3.6) จากนั้นสามารถประเมินตำแหน่งได้โดยสมการ (3.9-3.14) ดังนั้นค่าความผิดพลาดของระยะทางจะคำนวณได้โดยสมการที่ (3.15) และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึง เวลาที่สัญญาณมาถึงมีการคำนวณโดยใช้สมการ (3.7) และระยะทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับจะคำนวณโดยสมการ (3.8) จากนั้นตำแหน่งจะถูกประเมินโดยสมการ (3.9-3.14) ดังนั้นค่าความผิดพลาดของระยะทางจะคำนวณได้โดยสมการที่ (3.15) ซึ่งอาศัยเทคนิคไตรลาเตอร์เรชัน ดังนั้นผลการทดลองวิจัยจะแบ่งออกได้ 6 กรณี ดังนี้ คือ เทคนิคการหาตำแหน่งแบบไตรลาเตอร์เรชัน โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz และเทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงในช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz ซึ่งขั้นตอนการแสดงผลค่าความผิดพลาดของระยะทางแสดงได้ดังรูปที่ 5.8



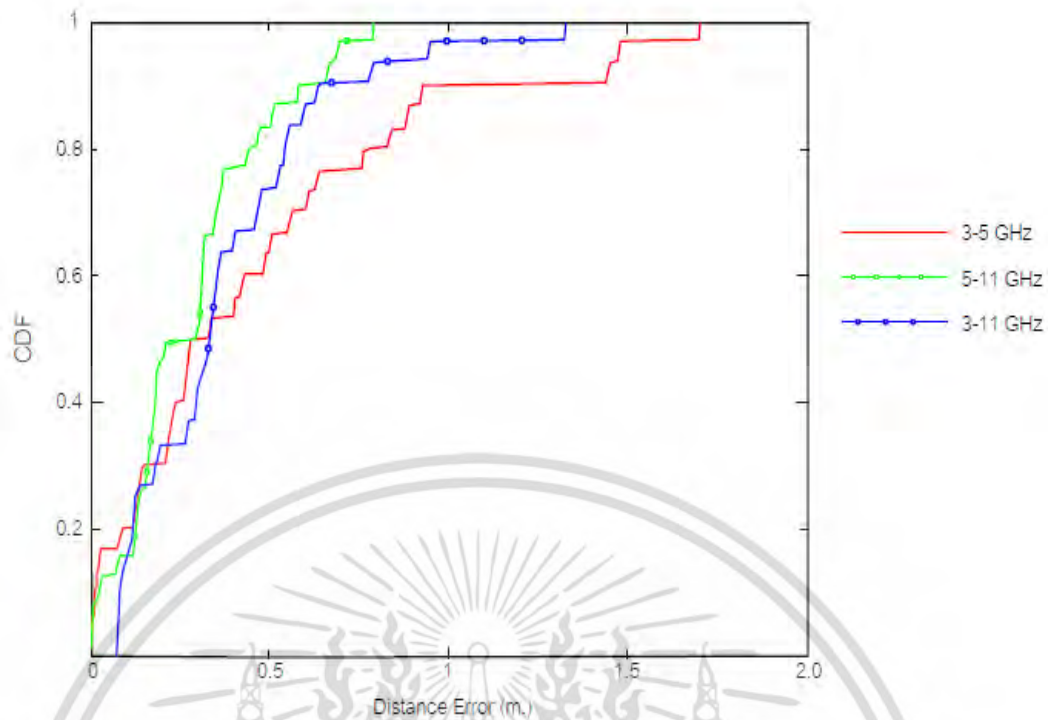
รูปที่ 5.8 ขั้นตอนการแสดงผลค่าความผิดพลาดของระยะทาง

### 5.3.1 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบไตรลาเตอร์เรชั่นโดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้

ผลการทดลองจะแสดงค่าความผิดพลาดของระยะทางในแนวแกน x และแกน y ตามดังรูปที่ 5.9 ซึ่งจะพบว่าในช่วงความถี่ 3-5 GHz ค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด เท่ากับ 1.71 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (5,3) ไม่เกิดค่าความผิดพลาดของระยะทางที่พิกัด (3,1) ในช่วงความถี่ 5-11 GHz ค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด เท่ากับ 0.79 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (5,3) ไม่เกิดค่าความผิดพลาดของระยะทางที่พิกัด (3,1) ในช่วงความถี่ 3-11 GHz ค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด เท่ากับ 1.28 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (5,3) ค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุดเท่ากับ 0.023 เมตร ที่พิกัด (3,1) และจะแสดงเป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางดังรูปที่ 5.10 จะพบว่าผลการทดลองวิจัยในช่วงความถี่ 3-5 GHz มีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.47 เมตร และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.46 เมตร ในช่วงความถี่ 5-11 GHz มีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.28 เมตร และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.26 เมตร และในช่วงความถี่ 3-11 GHz มีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.34 เมตร และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.32 เมตร



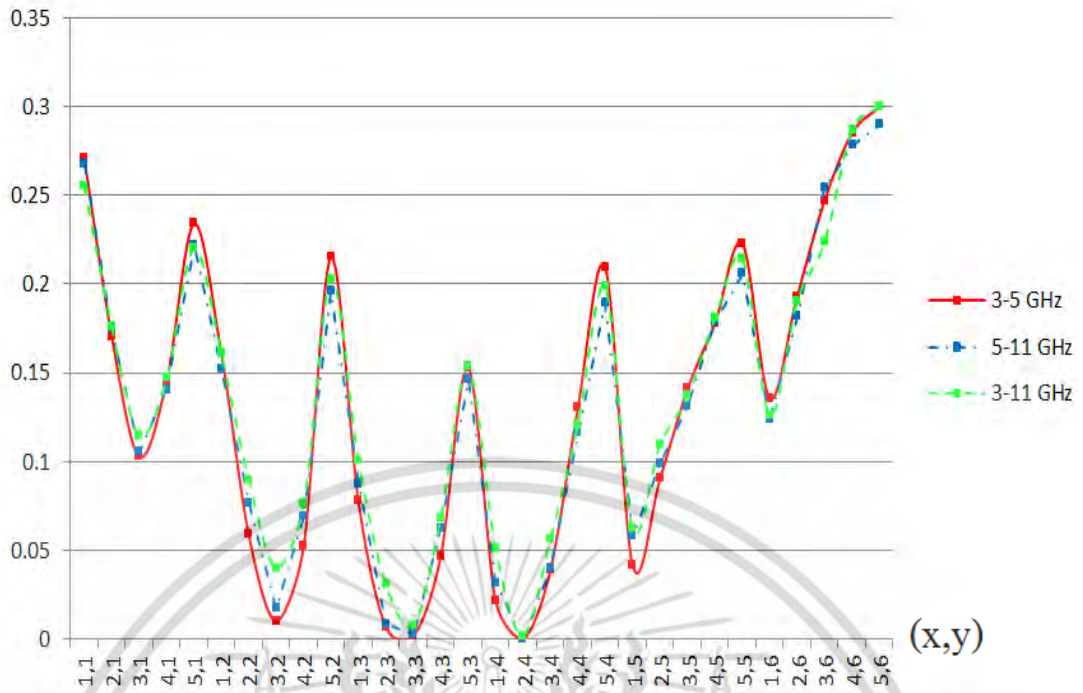
รูปที่ 5.9 ค่าความผิดพลาดของระยะทางในการหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz



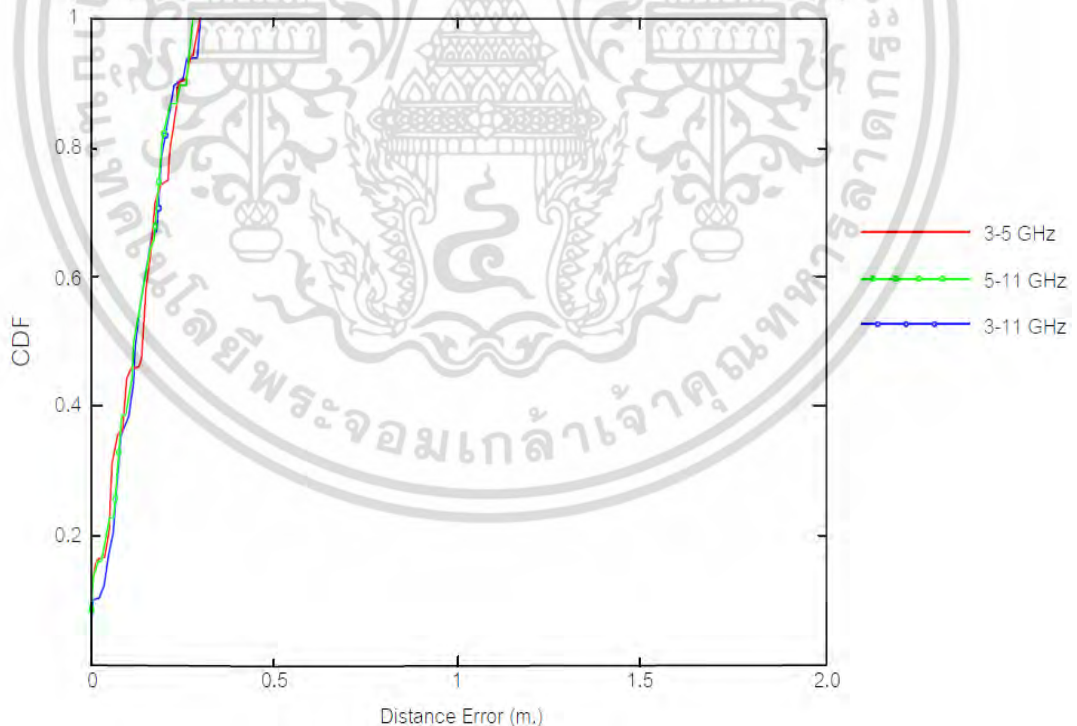
รูปที่ 5.10 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางการหาตำแหน่งของเทคนิค ไตรลาเตอร์เรชั่น โดยใช้พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz

### 5.3.2 ผลการทดลองของเทคนิคการหาตำแหน่งแบบไตรลาเตอร์เรชั่นโดยใช้พารามิเตอร์ เวลาที่สัญญาณมาถึง

ผลการทดลองจะแสดงค่าความผิดพลาดของระยะทางในแนวแกน x และแกน y ตามดังรูปที่ 5.11 ซึ่งจะพบว่าในช่วงความถี่ 3-5 GHz ค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด เท่ากับ 0.30 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (5,6) ไม่เกิดค่าความผิดพลาดของระยะทางที่พิกัด (2,4) ในช่วงความถี่ 5-11 GHz ค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด เท่ากับ 0.29 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (5,6) ไม่เกิดค่าความผิดพลาดของระยะทางที่พิกัด (2,4) ในช่วงความถี่ 3-11 GHz ค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด เท่ากับ 0.30 เมตร เกิดขึ้นที่พิกัด (5,6) ค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุดเท่ากับ 0.002 เมตร ที่พิกัด (2,4) และจะแสดงเป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางดังรูปที่ 5.12 จะพบว่าผลการทดลองวิจัยในช่วงความถี่ 3-5 GHz มีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.14 เมตร และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.13 เมตร ในช่วงความถี่ 5-11 GHz มีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.14 เมตร และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.13 เมตร และในช่วงความถี่ 3-11 GHz มีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.14 เมตร และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง เท่ากับ 0.13 เมตร



รูปที่ 5.11 ค่าความผิดพลาดของระยะทางในการหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงในช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz



รูปที่ 5.12 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าความผิดพลาดของระยะทางการหาตำแหน่งของเทคนิคไตรลาเตอร์เรชั่น โดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงในช่วงความถี่ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและวิจัย

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาตำแหน่งภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งยวดมาตรฐาน IEEE 802.15.4a ได้นำเสนอการประเมินผลของการหาตำแหน่งภายในอาคารในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตาด้วยเทคนิคไตรลาเตอร์เรชั่น โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพค่าความแม่นยำในการหาตำแหน่งของพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจากสัญญาณแถบกว้างยิ่งยวดในการหาตำแหน่งใน 3 ช่วงความถี่ คือ 3-5 GHz, 5-11 GHz และ 3-11 GHz ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบจำลองการวัดและทำการทดลองวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งยวดด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์โดยใช้สายอากาศด้านส่งและด้านรับแบบกรวยคู่ภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารในสภาวะที่มองเห็นด้วยระดับสายตา โดยได้นำฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งยวดที่ได้จากการทดลองวัดมาใช้ในการหาสัญญาณที่รับได้แบบแถบกว้างยิ่งยวดเพื่อนำไปหาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้และพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาตำแหน่ง จะเห็นว่าเมื่อนำสัญญาณแถบกว้างยิ่งยวดมาใช้ในการหาตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งจะพิจารณาค่ามากที่สุดค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของระยะทาง ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 6.1 พบว่าเมื่อนำสัญญาณแถบกว้างยิ่งยวดมาใช้ในการหาตำแหน่งจะให้ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งมาก

จากผลการทดลอง ในกรณีของพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ ช่วงของความถี่ 5-11 GHz จะมีค่าความแม่นยำในการหาตำแหน่งดีที่สุดเมื่อเทียบกับ 2 ช่วงความถี่ คือ 3-5 GHz และ 3-11 GHz แต่ในกรณีของพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงจะเห็นว่าค่าความแม่นยำในการหาตำแหน่งทั้ง 3 ช่วงความถี่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อนำพารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงมาใช้ในการหาตำแหน่งจะให้ความแม่นยำมากกว่าพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ เนื่องจากค่ากำลังงานมีผลกระทบจากการการเกิดคลื่นหลายวิถีมากกว่าเวลาประวิง ดังนั้นเทคนิคการหาตำแหน่งแบบไตรลาเตอร์เรชั่นโดยใช้พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงให้ความแม่นยำในการหาตำแหน่งดีที่สุด

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทาง

ค่าความผิดพลาดของระยะทางของเทคนิค Trilateration	ค่ามัธยฐาน (เมตร)	ค่าเฉลี่ย (เมตร)	ค่ามากที่สุด (เมตร)
พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในช่วงความถี่ 3-5 GHz	0.47	0.46	1.71
พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในช่วงความถี่ 5-11 GHz	0.28	0.26	0.79
พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในช่วงความถี่ 3-11 GHz	0.34	0.32	1.28
พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงในช่วงความถี่ 3-5 GHz	0.14	0.13	0.30
พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงในช่วงความถี่ 5-11 GHz	0.14	0.13	0.29
พารามิเตอร์เวลาที่สัญญาณมาถึงในช่วงความถี่ 3-11 GHz	0.14	0.13	0.30

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาการหาตำแหน่งภายในอาคารในสถานะที่มองเห็นด้วยระดับสายตาภายในสถานะแวดล้อมที่ไม่มีวัตถุหรือสิ่งของใด ๆ ในพื้นที่ที่ทำการทดลอง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการวิจัยที่จะทำการทดลองประเมินผลประสิทธิภาพความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยในสถานะแวดล้อมที่มีวัตถุหรือสิ่งของอยู่ในพื้นที่ที่ทำการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการประเมินผลของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิคไตรลาเตอร์เรชันเพียงเทคนิคเดียวเท่านั้น ซึ่งยังมีเทคนิคการหาตำแหน่งอื่น ๆ อีกหลากหลายที่สามารถนำมาหาความแม่นยำในการหาตำแหน่งได้ ซึ่งเทคนิคการหาตำแหน่งแบบอื่น ๆ จะมีข้อดีและข้อเสียซึ่งแตกต่างกันออกไป ซึ่งจะเป็นแนวทางในการศึกษาทดลองเปรียบเทียบกันในอนาคต

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Raquet and R. K. Martin, "Non-GNSS radio frequency navigation," in Proc. IEEE ICASSP, Las Vegas, NV, USA, 2008, pp. 5308–5311.
- [2] J. Barnes et al., "Locata: A new positioning technology for high precision indoor and outdoor positioning," in Proc. ION Tech. Meeting, Portland, OR, USA, 2003, pp. 1119–1128.
- [3] M. Hazas and A. Hopper, "Broadband ultrasonic location systems for improved indoor positioning," IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 5, no. 5, pp. 536–547, May 2006.
- [4] N. B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, "The Cricket location support system," in Proc. MobiCom, Boston, MA, USA, 2000, pp. 32–43.
- [5] Liu, H., H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part C, Vol. 37, No. 6, 1067–1080, Nov. 2007.
- [6] Gu, Y., A. Lo, and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 11, No. 1, 13–32, Jan.-Mar. 2009.
- [7] FCC, "Revision of Part 15 the Commission's Rules Regarding Ultra-wideband Transmission Systems," ET Docket, 2002.
- [8] J. H. Reed et al. An Introduction to Ultra Wideband Communication System, Prentice Hall, 2005
- [9] S. Hongson et al., "On the spectral and power requirements for UWB transmission," ICC 2003, vol. 1, May 2003, pp. 738–742.
- [10] I. Oppermann, M. Hamalainen and J. Linatti, UWB Theory and Applications, John Wiley & Sons, 2004.
- [11] ETSI, "Harmonised Standards Covering Ultrawide Band (UWB) Applications," Standardisation Mandate: DG ENTR/G/3M/329, Brussels, Feb. 2003.
- [12] ETSI, "ECC Decision of 24 March 2006 on The Harmonised Conditions for Devices Using Ultra-Wideband (UWB) Technology in Bands below 10.6GHz," Doc.ECC/DED (06)04, Mar. 2006.
- [13] MIC, "Japan's UWB emission policy advances," EE Times, Washington, 26 Aug. 2005.
- [14] W. Hirt and M. Weisenhorn, "Overview and implications of the emerging global UWB radio regulatory frameworks," 2006 IEEE International Conference on Ultra Wide band, pp. 581–586, Sept. 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] J. Farserotu, A. Hutter, F. Platbrood, J. Gerrits and A. Pollini, "UWB Transmission and MIMO Antenna Systems for Nomadic User and Mobile PAN," *Wireless Personal Communications*, no. 22, pp. 197-317, 2002.
- [16] L. D. Nardis and M. D. Benedetto, "Overview of the IEEE 802.15.4/4a standards for low data rate wireless personal data networks," *4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC)*, pp. 285-289, 2007.
- [17] K. S. Kwak, S. Ullah and N. Ullah, "An overview of IEEE 802.15.6 standard," *2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL)*, pp. 1-6, 2010.
- [18] Y. Park and F. Adachi, *Enhanced Radio Access Technologies for Next Generation Mobile Communication*, Springer, 2007.
- [19] R. Want, A. Hopper and V. Falcao, "The active badge location system," *ACM Transactions on Information Systems*, Vol. 40, pp. 91-102, Jan. 1992.
- [20] J. A. Tauber, "Location systems for pervasive computing," *Area Exam Report*, Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [21] Z. Sahinoglu, S. Gezici and I. Guvenc, "Ultra-wideband Positioning Systems," Cambridge University Press, 2008.
- [22] J. Sangthong, P. Supanakoon and S. Promwong, "Study on Indoor Localization Using UWB Fingerprinting," *The 3 Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference*, pp. 1223-1227, March. 2010.
- [23] B. N. Hood and P. Barooah, "Estimating DOA From Radio-Frequency RSSI Measurements Using an Actuated Reflector," *IEEE SENSORS JOURNAL*, Vol.11, February. 2011.
- [24] K. langendoen and N. Reijers, "Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison," Elsevier, 2003.
- [25] A. Migel, J. Alfredo and M. Pedro, "Location-Based Information Systems Developing Real-Time Tracking Applications," *Chapman & Hall/CRC Computer and Information Science Series*.
- [26] 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.
- [27] R. Bose, "Ultra Wideband Indoor Channel Modeling for Personal Area Networking," *Proc, "EuCAP 2006"*, November. 2006.
- [28] 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.*



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] Pongthep Sudmee and Sathapron Promwong “IEEE 802.15.4a UWB Technology Application for Indoor Localization,” International Conference on Digital Arts, Media and Technology, pp 431 – 434, February 17-19, 2016, Thailand.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# iCDAMT

International Conference on Digital Arts, Media and Technology

## "Digital Economy for Sustainable Growth"

17-20 February, 2016  
@ The Mantrini Chiang Rai



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่มีการนี้ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IEEE 802.15.4a UWB Technology Application for Indoor Localization

Pongthep Sudmee and Sathapron Promwong

Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Bangkok 10520, Thailand

pongthep.s.wayutech@gmail.com, sathaporn.pr@kmitl.ac.th

**Abstract**— Nowadays, The localization systems had been widely utilized. The popular use of localization system is the global position system (GPS). However, the system fails in particular environments such as indoors because low received signal power. It is not appropriate to take a position. The indoor localization system was used to assist in finding a position in an indoor environment. There are several techniques used to evaluate. Trilateration technique is a technique of geometric. This technique can be estimate the target position by using the intersection of circle that can be obtained from a set of reference positions. This paper studies on indoor positioning in line of sight (LOS) using by IEEE 802.15.4a standard in ultra wideband option which Trilateration technique will be used to estimate position related parameter. The biconical antennas with vertical polarization were used as both transmitter and receiver antennas. The vector network analyzer (VNA) was used to measure at the frequency ranging from 3 GHz to 11 GHz. The accuracy will be displayed in the term of distance error.

**Keywords**—localization, indoor localization, UWB, UWB localization, trilateration technique

## I. INTRODUCTION

In recent years, the positions system has been used extensively. In general, the Global Positioning System (GPS) was used to find the position for outdoor area. However, satellite-based technology fails in particular environments such as indoors or urban canyons. These failures of GPS are mainly due to the low received signal power and low visibility of satellites in urban/indoor area [10]. So, it is necessary to use other technology to find the position in an indoor environment such as wireless local area network (WLAN), ZigBee, Bluetooth, ultrasonic, radio frequency identification (RFID) and ultra wideband (UWB). The Indoor Localization System could provide widely researched because of its variety services [1, 2] including position detection people such as industrial, miner in mine [3, 4], hospital and many others. This system requires high accuracy in an indoor environments which dense multipath [5].

Nowadays, IEEE 802.15.4a is an amendment to IEEE 802.15.4 specifying additional physical layers to the original standard. The principal interest was in providing higher precision ranging and location capability, higher aggregate throughput, adding scalability to data rates, longer range,

and lower power. IEEE 802.15.4a are two forms consisting of a UWB impulse radio and a Chirp Spread Spectrum. The Pulsed UWB Radio is based on Continuous Pulsed UWB and will be able to deliver communications and high precision ranging. The UWB impulse radio have three bands: sub-gigahertz band uses frequencies 250-750 MHz, the low band uses frequencies 3.244-4.742GHz and the high band uses frequencies 5.944-10.234 GHz and Chirp Spread Spectrum use frequencies 2.400-2.4835 GHz [8].

The Indoor Localization System will rely on the techniques and parameters used to determine position. There are several techniques used to evaluate the position such as Weight Centroid, Trilateration, Min-Max, Fingerprinting and many others. This technique is related on signal parameters such as time difference of arrival (TDOA), angle of arrival (AOA), time of arrival (TOA) and received signal strength (RSS) [6, 7]. Trilateration is the one technique of geometric. This technique can be estimate the target position by using the intersection of circle.

This paper will use Trilateration technique to compare the distance error of parameters and received signal strength (RSS) and time of arrival (TOA) using ultra wideband technology. The remainder of this paper as follows. Trilateration technique is described in Section 2. The measurement setup of this paper is explained in Sections 3. The results and conclusion is given in Sections 4 and 5, respectively.

## II. TRILATERATION TECHNIQUE

Trilateration technique uses at least three reference nodes to find positions. The parameter of measurement is specified the range between each reference node and a target node. The position of target node can be estimated by the intersections of a straight line. Consequently, the circle's equation can be evaluated by

$$(x - h_1)^2 + (y - k_1)^2 = r_1^2 \quad (1)$$

$$(x - h_2)^2 + (y - k_2)^2 = r_2^2 \quad (2)$$

$$(x - h_3)^2 + (y - k_3)^2 = r_3^2 \quad (3)$$

Where  $(h_1, k_1)$ ,  $(h_2, k_2)$  and  $(h_3, k_3)$  is center of the circle from first, second and third transmission antenna,

respectively.  $r_1$ ,  $r_2$  and  $r_3$  is distance between the receive antenna and the first, second and third transmission antenna, respectively.

Therefore, equation of a straight line that uses to find the position can be evaluated by

$$2x(h_2 - h_1) + 2y(k_2 - k_1)^2 = (r_2^2 - r_1^2) + (h_2^2 - h_1^2) + (k_2^2 - k_1^2) \quad (4)$$

$$2x(h_2 - h_3) + 2y(k_2 - k_3)^2 = (r_3^2 - r_2^2) + (h_2^2 - h_3^2) + (k_2^2 - k_3^2) \quad (5)$$

$$2x(h_1 - h_3) + 2y(k_1 - k_3)^2 = (r_3^2 - r_1^2) + (h_1^2 - h_3^2) + (k_1^2 - k_3^2) \quad (6)$$

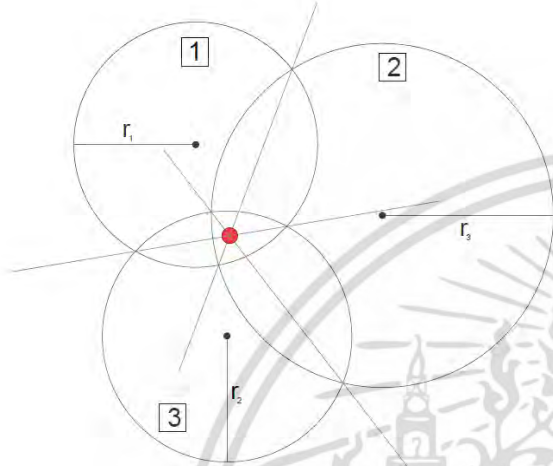


Fig.1. The trilateration technique.

#### a. Received Signal Strength (RSS)

RSS is considered the changed energy of signal along the distance. The main factors of signals energy is pass loss. The path loss model can be represented by

$$P_0 = \bar{P}(r) + 10n \left( \frac{r}{r_0} \right) \quad (7)$$

where  $\bar{P}$  is average received power in at a distance  $r$ ,  $P_0$  is the received power at a reference distance,  $r_0 = 1$  m. (reference distance from the transmission antenna) and  $n = 2$  (path-loss exponent), respectively.

Therefore, the distance from each reference node to target node by considering from RSS parameter can be calculated by

$$r_{RSS} = r_0 \cdot 10^{\left[ \frac{P_0 - \bar{P}}{10n} \right]} \quad (8)$$

#### b. Time of Arrival (TOA)

TOA is considering a delay time that the signal is travelled from one node to another. The delay time of maximum received signal can be represented by

$$\tau = \arg_{\tau} \max P(\tau) \quad (9)$$

where  $\tau$  is the delay time of maximum received power.

So, the distance from each reference node to target node by considering from TOA parameter can be calculated by

$$r_{TOA} = c \cdot \tau \quad (10)$$

where  $c$  is the velocity of radio wave ( $3 \times 10^8$  m/s) and  $\tau$  is delay time, respectively.

### III. MEASUREMENT SETUP

This section is described about measurement scheme that use to study trilateration technique. The Vector Network Analyzer is used to measure the UWB channel measurement in the frequency response mode base on IEEE 802.15.4a standard. The channel frequency transfer functions were measured at the frequency ranged from 3 GHz to 5 GHz, 5 GHz to 11 GHz and 3 GHz to 11 GHz. This experiment will measure Channel two ports. One port is used by the transmitter and the second port is used to receive. The measurements were done to collect the data from three transmitted antennas. A total of 30 positions with one meter space are measured. The biconical antennas [9] with vertical polarization are used as both Tx and Rx antennas. Tx and Rx antennas are set at a height of one meter. The layouts of the room with the measurement setup, The wideband antennas used in the measurement and Reflection coefficient  $|S_{11}|$  are shown in Figs. 2, 3 and 4, respectively.

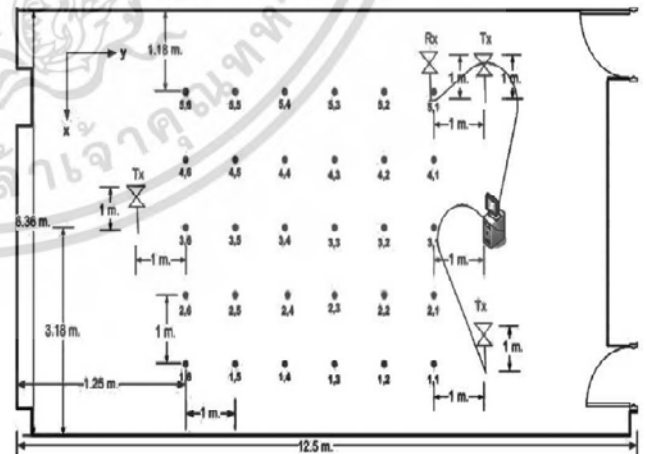


Fig.2. The layouts of the room with measurement setup.

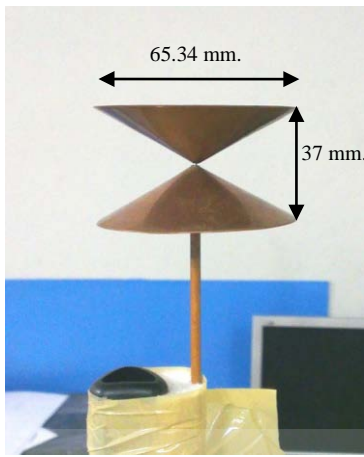


Fig.3. The dimension and structure of biconical antenna.

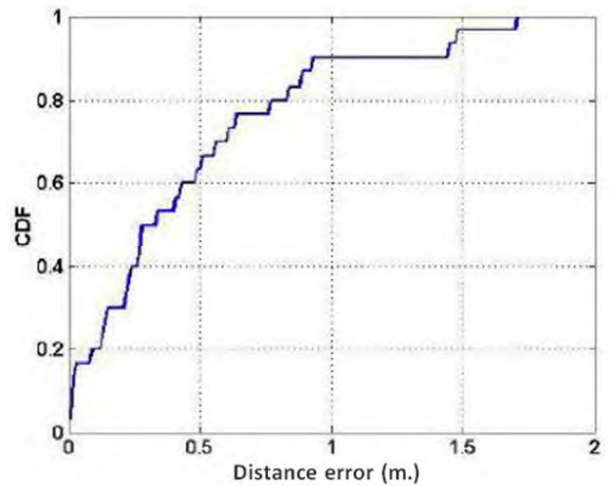


Fig.5. CDF for distance error, RSS, 3-5 GHz

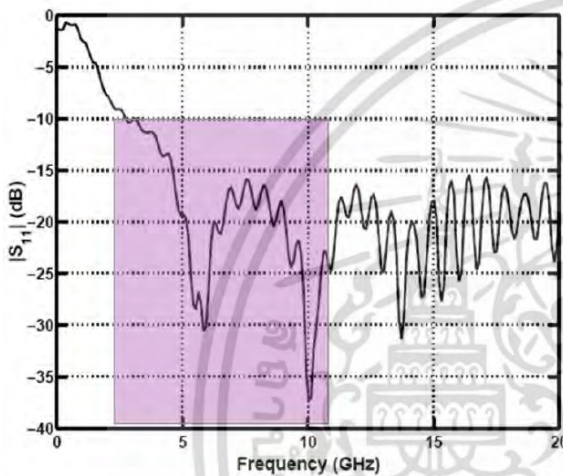


Fig.3. The characteristics of biconical antenna.

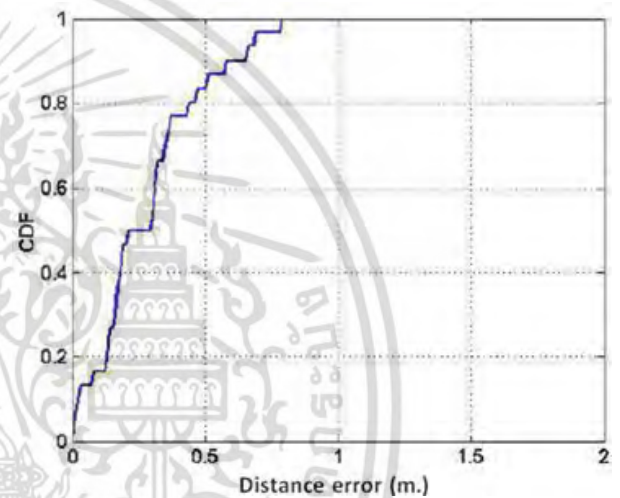


Fig.6. CDF for distance error with RSS at 5 GHz to 11 GHz

#### IV. RESULTS

For received signal strength (RSS), The received power with computed using Equation (7) and calculated the distance from reference node to target node by Equation (8). Then, the position can be estimated by Equation (1-6). For frequency ranged 3 to 5 GHz, 5 to 11 GHz and 3 to 11 GHz, the distance error are shown in Fig.5, 6 and 7, respectively.

From the results, the average of distance error is 0.47m with the maximum of distance error is 1.71 m. for frequency ranged 3 GHz to 5 GHz. The average of distance error is 0.28m. with the maximum of distance error is 0.79 m. for frequency ranged 5 GHz to 11 GHz. The average of distance error is 0.34m. with the maximum of distance error is 1.28 m. for frequency ranged 3 GHz to 11 GHz.

For TOA, The delay time is calculated using Equation (9) and evaluated the distance from reference node to target node by Equation (10). Then, the position can be estimated by equation (1-6). For frequency ranged 3 to 5 GHz, 5 to 11 GHz and 3 to 11 GHz, the distance error are shown in Figs.8, 9 and 10, respectively.

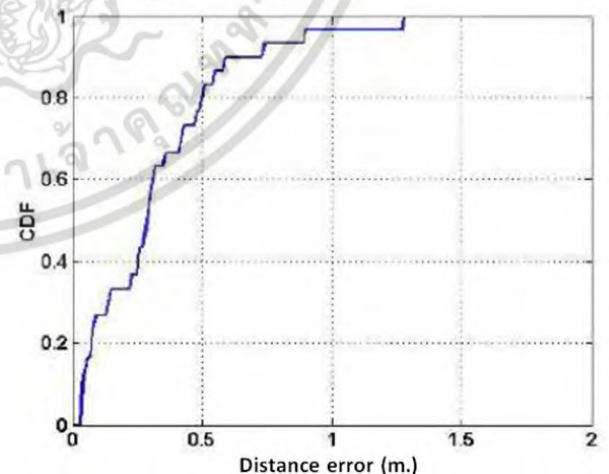


Fig.7. CDF for distance error with RSS at 3 GHz to 11 GHz

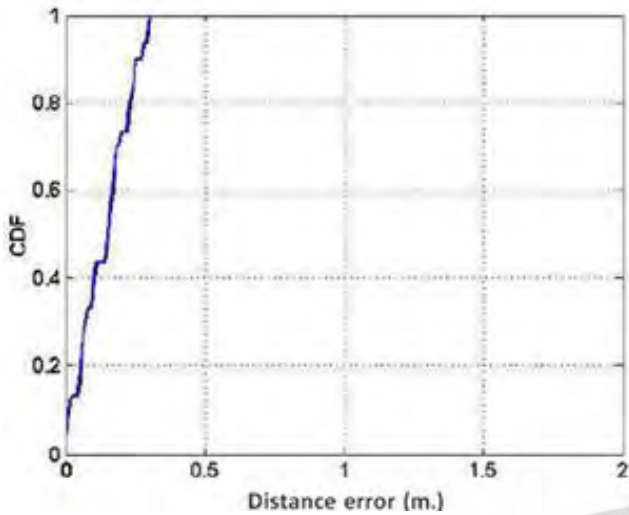


Fig.8. CDF for distance error, TOA, 3-5 GHz.

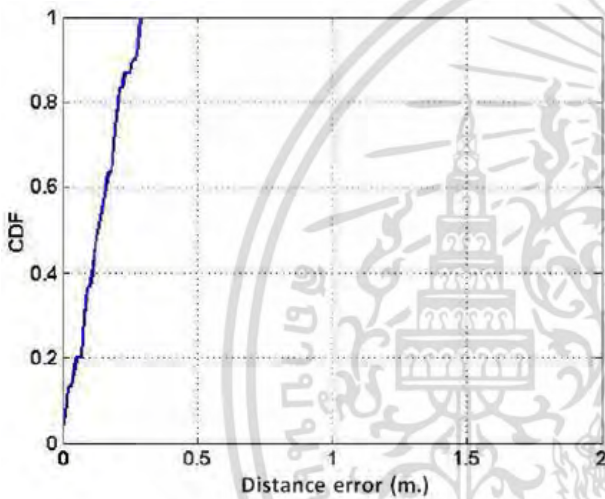


Fig.9. CDF for distance error, TOA, 5-11 GHz.

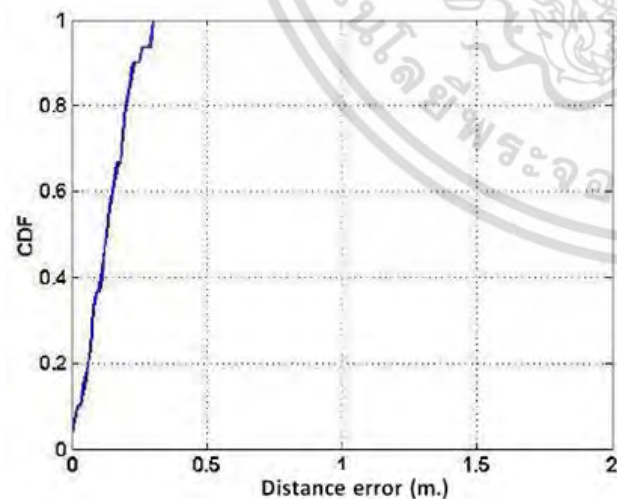


Fig.10. CDF for distance error, TOA, 3GHz to 11 GHz.

From the results, the average of distance error is 0.14m with the maximum of distance error is 0.30 m. for frequency ranged 3 GHz to 5 GHz. The average of distance error is 0.14m with the maximum of distance error is 0.29 m. for frequency ranged 5 GHz to 11 GHz. The average of distance error is 0.14m with the maximum of distance error is 0.30 m. for frequency ranged 3 GHz to 11 GHz.

### V. CONCLUSIONS

This paper has studied on indoor localization based on IEEE 802.15.4a standard is UWB low rate by using trilateration technique by UWB signal. Trilateration technique is used for comparison between RSS and TOA. The channel frequency transfer functions were measured at the frequency ranged from 3 GHz to 5 GHz, 5 GHz to 11 GHz and 3 GHz to 11 GHz. From the results, frequency ranged 5 GHz to 11 GHz is better accuracy than 3 GHz to 5 GHz and 3 GHz to 11 GHz in RSS case but small difference and distance errors are equal in TOA case. The range of frequencies are affected an accuracy of distance in RSS case but not in the TOA case. Besides that, TOA has the better accuracy than RSS case.

For the future work, we will study the possibility of accuracy improvement by using another technique such as statistical technique and mapping technique.

### REFERENCES

- [1] Fontana, R. J., E. Richley, and J. Barney, "Commercialization of an ultra wideband precision asset location system," 2003 IEEE Conference on UWB Systems and Technologies, 369-373, Nov. 2003.
- [2] Pahlavan, K., X. Li, and J. Makela, "Indoor geolocation science and technology," IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 2, 11-118, Feb. 2002.
- [3] Toak, A., N. Kandil, S. Affes, and S. Georges, "Fingerprinting localization using ultra wideband and neural networks," 2007 International Symposium on Signals, Systems and Electronics, 529-532, Jul.-Aug. 2007.
- [4] Toak, A., N. Kandil, and S. Affes, "Neural networks for fingerprinting-based indoor localization using ultra-wideband," Journal of Communications, Vol. 4, No. 4, 267-275, May 2009.
- [5] Mahfouz, M. R., A. E. Fathy, M. J. Kuhn, and Y. Wang, "Recent trends and advances in UWB positioning," 2009 IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning, and RFID, 1-4, Sep. 2009.
- [6] Liu, H., H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part C, Vol. 37, No. 6, 1067-1080, Nov. 2007.
- [7] Gu, Y., A. Lo, and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 11, No. 1, 13-32, Jan.-Mar. 2003.
- [8] Karapistoli, E., F. Pavlidou, I. Gragopoulos, and I. Tsetsinas, "An overview of the IEEE 802.15.4a standard," IEEE Communications Magazine, Vol. 48, No. 1, 47-53, Jan. 2010.
- [9] Promwong, S., W. Hachitani, and J. Takada, "Experimental evaluation scheme of UWB antenna performance," IEE Japan Tech. on Instrumentation and Measurements, IM-03-35, Jun. 2003.
- [10] J. Raquet and R. K. Martin, "Non-GNSS radio frequency navigation," in Proc. IEEE ICASSP, Las Vegas, NV., pp. 5308-5311, USA, 2008.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายพงษ์เทพ สุดมี้
วัน เดือน ปีเกิด	03 พฤศจิกายน 2532 กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	315/101 ซ.ลาดพร้าว 41 ถนนลาดพร้าว แขวงสามเสนนอก เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10310
ประวัติการศึกษา	2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Pongthep Sudmee and Sathapron Promwong “IEEE 802.15.4a UWB Technology Application for Indoor Localization,” International Conference on Digital Arts, Media and Technology, pp 431 – 434, February 17-19, 2016, Thailand.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้