

การจำลองสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งโดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  
สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร

UWB TRANSMISSION MODEL BY USING CORRELATION COEFFICIENT FOR  
INDOOR LOCALIZATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-010-007

การจำลองสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งโดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  
สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร

UWB TRANSMISSION MODEL BY USING CORRELATION COEFFICIENT FOR  
INDOOR LOCALIZATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KMITL 2016-EN-M-010-007

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UWB TRANSMISSION MODEL BY USING CORRELATION COEFFICIENT FOR  
INDOOR LOCALIZATION



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
2016  
KMITL 2016-EN-M-010-007



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปจำหน่ายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างโดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร  
Thesis Title UWB Transmission Model by Using Correlation Coefficient for Indoor Localization  
นักศึกษา นางสาวรุจิเรจ ชัยชนะ  
รหัสประจำตัว 54611820  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-010-007

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวกาต	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกุล	
ศ.ดร.ประยูทธ	อัครเอกตมาลิน	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาศิพงษ์	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างโดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร
นักศึกษา	นางสาวรุจิเรจ ชัยชนะ
รหัสนักศึกษา	54611820
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สถาพร พรหมวงศ์

## บทคัดย่อ

สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารสามารถทำได้โดยหลายวิธีได้แก่ เทคนิคการพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ (Received signal strength: RSS), การพิจารณาเวลาในการมาถึงของสัญญาณ (Time of arrival: TOA), การพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ (Time difference of arrival: TDOA) และการพิจารณาทิศทางในการมาถึงของสัญญาณ (Angle of arrival: AOA) อย่างไรก็ตาม วิธีทั้งหมดดังกล่าวสามารถใช้ได้ดีเฉพาะกับสัญญาณในวิถีตรงเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความผิดพลาดมากในการหาตำแหน่งภายในอาคารซึ่งมีการเกิดการจางหายหลายวิถี จึงนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือแบบแถบกว้างยิ่งขึ้นมา การหาตำแหน่งภายในอาคารนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาตำแหน่งของวัตถุและตัวบุคคล ซึ่งต้องการความเที่ยงตรงสูงในสถานะที่มีการเกิดการจางหายหลายวิถี วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาถึงแบบแผนการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เสมือนสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง โดยวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของสัญญาณในช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz กำหนดให้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ทั้งทางด้านรับและด้านส่ง และได้แสดงรูปแบบ CDF เพื่อให้รู้ถึงความผิดพลาดของระยะทางด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	UWB Transmission Model by Using Correlation Coefficient for Indoor Localization
<b>Student</b>	Miss Rujirate Chaichana
<b>Student ID.</b>	54611820
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Sathaporn Promwong

## ABSTRACT

For indoor localization there are several techniques that are used to estimate a location including the received signal strength (RSS), the time of arrival (TOA), the time difference of arrival (TDOA) and the angle of arrival (AOA). However, all above techniques consider only direct path signal. Therefore, they cause more error in dense multipath fading channels such as indoor environments. The ultra wideband (UWB) fingerprinting-like is developed for this purpose. The indoor localization system has entered the realm of consumer applications. The popular application of indoor localization system is used to find location of objects or personnel, which require high accuracy in dense multipath fading environments. This paper studies indoor localization scheme by UWB fingerprinting. The channel frequency transfer functions of corridor environment were measured at the frequency ranging from 3 to 11 GHz. The biconical antennas were used as both transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. Finally, the accuracy of estimated distances is studied and shown in the terms of cumulative distribution function (CDF) of distance errors.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและการให้คำปรึกษาจาก ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง ที่ให้ความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือ รวมถึงแนะนำแนวทางในการทำวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดีเยี่ยมแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอกราบพระคุณ ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านทฤษฎีผลการทดลองวิจัย ตลอดจนท่านคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในแล็บ UWB-RS ทุกคนที่ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆด้านตลอดมา ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้ที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทุกท่าน

รุจิเรจ ชัยชนะ

# 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 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง และการหาตำแหน่ง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	5
2.3 ความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	6
2.3.1 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	7
2.3.2 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	8
2.3.2.1 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา.....	8
2.3.2.2 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป.....	10
2.3.3 จุดเด่นของระบบแถบกว้างยิ่ง.....	11
2.3.4 การประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	13
2.3.4.1 การติดต่อสื่อสารและเซนเซอร์.....	13
2.3.4.2 เรดาร์.....	14
2.3.4.3 การหาตำแหน่งและระบุตำแหน่ง.....	14
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ที่ใช้ในการหาตำแหน่งโดย ใช้ช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง.....	16
3.1 บทนำ.....	16
3.2 ทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง.....	16
3.2.1 ประเภทของระบบหาตำแหน่งภายในอาคาร.....	16
3.2.1.1 อินฟราเรด (Infrared).....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1.2 ความถี่วิทยุ (Radio frequency: RF).....	17
3.2.1.3 อัลตราซาวด์ (Ultrasound).....	17
3.2.2 เทคนิคการวัดที่นำมาใช้ในระบบหาตำแหน่ง.....	17
3.2.2.1 การพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ (RSS).....	18
3.2.2.2 การพิจารณาทิศทางการมาถึงของสัญญาณ (AOA).....	18
3.2.2.3 การพิจารณาเวลาการมาถึงของสัญญาณ (TOA).....	19
3.2.2.4 การพิจารณาความต่างของเวลาการมาถึงของสัญญาณ (TDOA).....	19
3.2.2.5 Location Pattern or Fingerprinting.....	20
3.3 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง.....	20
3.4 สัญญาณที่รับได้.....	21
3.5 วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	22
3.5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	22
3.5.2 การสร้างลายลักษณะต้นแบบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	23
3.5.2.1 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเหมือนพหุนาม (Spline interpolation).....	23
3.5.2.2 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation).....	24
3.5.2.3 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest neighbor interpolation).....	25
3.5.3 วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	25
3.6 การวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของ สัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	26
บทที่ 4 การทดลองวิจัย.....	28
4.1 บทนำ.....	28
4.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัด.....	29
4.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์.....	29
4.2.2 สายอากาศแบบกรวยคู่.....	30
4.3 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ.....	32
บทที่ 5 ผลการทดลองวิจัย.....	35
5.1 บทนำ.....	35
5.2 ผลการทดลองวิจัยแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือ ของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	35
5.2.1 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	36
5.2.1.1 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเหมือนพหุนาม (Spline interpolation).....	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1.2 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation).....	40
5.2.1.3 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest neighbor interpolation).....	44
5.2.2 ผลการทดลองวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	48
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
6.1 บทนำ.....	50
6.2 สรุปผลการวิจัย.....	50
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	54
ประวัติผู้เขียน.....	55



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	9
2.2 ความต้องการทางด้านเทคนิคสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 10.6 GHz ในยุโรป.....	10
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องส่งที่ใช้ในการทดลองส่งสัญญาณแบบไร้สายแถบกว้างยิ่ง.....	6
2.2 สัญญาณแถบกว้างยิ่งซึ่งมีแถบความถี่กว้างมากในทางเวลาและความถี่.....	7
2.3 เปรียบเทียบการใช้งานแถบความถี่ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่งกับการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบอื่นๆ.....	8
2.4 หน้ากากสเปกตรัมสำหรับการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	10
2.5 หน้ากากสเปกตรัมสำหรับการสื่อสารแถบกว้างยิ่งในยุโรป.....	11
2.6 เปรียบเทียบหน้าฉากสเปกตรัมการสื่อสารแถบกว้างยิ่งในยุโรปและสหรัฐอเมริกา.....	11
2.7 เปรียบเทียบโครงสร้างของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งกับระบบสื่อสารแถบแคบ.....	12
(a) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของระบบสื่อสารแถบแคบ	
(b) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของระบบสื่อสารแถบกว้างยิ่ง	
2.8 การหาค่าตำแหน่งและระบุตำแหน่ง.....	14
2.9 การระบุตำแหน่งผู้ป่วยในโรงพยาบาล.....	15
3.1 บล็อกไดอะแกรมของการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งสำหรับระบบการหาตำแหน่ง.....	17
3.2 การหาค่าตำแหน่งโดยวิธี Trilateration.....	18
3.3 การหาค่าตำแหน่งโดยวิธี Angle of arrival (AOA).....	19
3.4 การหาค่าตำแหน่งโดยวิธี Time difference of arrival (TDOA).....	19
3.5 รูปลักษณ์ของสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่ง.....	21
3.6 สเปกตรัมของสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่ง.....	21
3.7 รูปลักษณ์ในการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	23
4.1 บล็อกไดอะแกรมของขั้นตอนการทดลอง.....	28
4.2 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวิจัย.....	29
4.3 โครงสร้างของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวิจัย.....	30
4.4 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficient) $ S_{11} $ ของสายอากาศแบบกรวยคู่.....	31
4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศแบบกรวยคู่.....	31
4.6 การวัดคุณสมบัติช่องสัญญาณเพื่อนำมาสร้างเป็นลายลักษณะต้นแบบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	33
4.7 การวัดคุณสมบัติช่องสัญญาณเพื่อนำมาสร้างเป็นลายลักษณะทดสอบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	34
5.1 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline interpolation).....	37
5.2 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline interpolation).....	37
5.3 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline interpolation).....	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline interpolation).....	38
5.5 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline interpolation).....	39
5.6 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline interpolation).....	39
5.7 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation).....	40
5.8 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation).....	41
5.9 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation).....	41
5.10 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation).....	42
5.11 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation).....	42
5.12 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation).....	43
5.13 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest neighbor interpolation).....	44
5.14 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest neighbor interpolation).....	44
5.15 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest neighbor interpolation).....	45
5.16 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest neighbor interpolation).....	45
5.17 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest neighbor interpolation).....	46

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยั้งที่ทำจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest neighbor interpolation).....	46
5.19 ความผิดพลาดระยะทางโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline interpolation).....	47
5.20 ความผิดพลาดระยะทางโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation).....	47
5.21 ความผิดพลาดระยะทางโดยใช้ทฤษฎี (Nearest neighbor interpolation).....	48
5.22 ฟังก์ชันการกระจายสะสมของความผิดพลาดในระยะทาง.....	49
6.1 การหาตำแหน่งภายในอาคารสำหรับสถานะแวดล้อมจริง.....	51



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสถานการณ์ปัจจุบันนับได้ว่าเป็นยุคของเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารความเร็วสูง ประชาคมโลกล้วนต้องการเข้าถึงข้อมูลข่าวสารได้อย่างรวดเร็วและฉับไว การสื่อสารระบบไร้สายจึงเริ่มเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น เนื่องจากมีความคล่องตัวในการใช้งานสูง สามารถเชื่อมต่อกับโครงข่ายได้ในทุกที่และทุกเวลา เช่นระบบโครงข่ายไร้สายท้องถิ่น (Wireless local area network: WLAN), การสื่อสารผ่านดาวเทียม, เครือข่ายเซลลูลาร์ รวมไปถึงระบบโครงข่ายตรวจสอบไร้สาย (Wireless sensor network: WSN) ล้วนเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีประโยชน์ในชีวิตประจำวันของมนุษย์

ระบบการสื่อสารไร้สายที่ทันสมัยในปัจจุบันมีมากมาย ทำให้อุปกรณ์หลายๆชนิดได้รับการพัฒนาจนสามารถใช้งานร่วมกันได้ และเนื่องจากอุปกรณ์การสื่อสารแบบไร้สายที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีราคาถูกลงกว่าอุปกรณ์อื่น จึงทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเริ่มเป็นที่นิยมและได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย รวมถึงเป็นเทคโนโลยีที่จะถูกนำมาใช้สำหรับระบบไร้สายระยะสั้นจนถึงระยะกลาง เช่น ระบบเครือข่ายตรวจสอบไร้สาย และระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless personal area network: WPAN)

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้มีคุณลักษณะเด่นที่สำคัญคือ สัญญาณแถบกว้างยิ่งเป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์กว้างมาก อีกทั้งยังมีความละเอียดทางเวลาสูงทางด้านรับจึงสามารถปัญหาที่เกิดจากองค์ประกอบของการเกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath component: MPC) ได้ดีขึ้น การหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายอย่างด้วยกัน ระบบการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่งสามารถนำไปใช้ทั้ง ในส่วนของการหาตำแหน่งสำหรับ บริการในสภาวะฉุกเฉิน , การติดตามสิ่งของตัวบุคคล และทรัพย์สินที่มีค่า เพื่อป้องกันและรักษาความปลอดภัย, ความสามารถในการนำทางที่มีความแม่นยำสำหรับยานพาหนะ, ในระบบอุตสาหกรรมและกสิกรรม, การคาดคะเนตำแหน่ง และงานด้านเรดาร์ เป็นต้น

เทคนิคการหาตำแหน่งแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการประมาณหาค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการหาตำแหน่ง (Range estimation) และขั้นตอนการนำค่าตัวแปรจากขั้นตอนแรกมาหาตำแหน่ง (Position estimation) ขั้นตอนการประมาณหาค่าตัวแปรมี 4 วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ เทคนิคการพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ (Received signal strength: RSS), การพิจารณาทิศทางในการมาถึงของสัญญาณ (Angle of arrival: AOA), การพิจารณาเวลาในการมาถึงของสัญญาณ (Time of arrival: TOA) และการพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ (Time difference of arrival: TDOA) โดยจะเป็นการพิจารณากำลัง, ทิศทาง และเวลาของสัญญาณที่รับได้ตามลำดับ แต่เนื่องมาจากวิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้ดีเฉพาะกับสัญญาณในวิถีตรงเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความผิดพลาดมากในการหาตำแหน่งภายในอาคารซึ่งมีการเกิดการจางหายหลายวิถีอย่างรุนแรง จึงนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นการนำสัญญาณแถบกว้างยิ่ง มาใช้ร่วมกับวิธีการสแกนลายนิ้วมือ ซึ่งเทคนิคนี้จะทำให้การคาดคะเนตำแหน่งที่อยู่มีความเที่ยงตรงมากขึ้น เหมาะแก่การใช้หาตำแหน่งภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือด้วยการส่งผ่านของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง (UWB fingerprinting-liked) และใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยได้นำคุณลักษณะของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งมาเป็นพารามิเตอร์ในการพิจารณาหาตำแหน่ง อีกทั้งยังได้ศึกษาถึงความเที่ยงตรงในการหาตำแหน่ง และการเพิ่มความเที่ยงตรงในการหาตำแหน่งของวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งอีกด้วย

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งยวด (Ultra wideband: UWB) เป็นการสื่อสารไร้สายแบบแถบความถี่กว้างมากเป็น GHz จะใช้สัญญาณที่มีรูปคลื่นสัญญาณปรากฏเพียงชั่วขณะหรือเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณในทางเวลาที่แคบมาก ทำให้มีความละเอียดทางเวลาสูง จึงสามารถแยกหากำลังและเวลาของสัญญาณแต่ละวิถีได้โดยง่าย วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง (UWB fingerprinting-liked) นั้น เป็นการนำเอาสัญญาณแบบแถบกว้าง มาประยุกต์ใช้สำหรับระบบการหาตำแหน่ง โดยได้พิจารณาใช้พารามิเตอร์หลายวิถีมาคำนวณหาตำแหน่งด้วย จึงสามารถนำมาใช้กับระบบการหาตำแหน่งในบริเวณที่มีการจางหายหลายวิถีมาก เช่น สภาวะแวดล้อมภายในอาคารได้ อีกทั้งยังมีความเที่ยงตรงสูงอีกด้วย

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การหาตำแหน่งโดยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งให้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม จากนั้นทำการสร้างลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งเพื่อเก็บเป็นฐานข้อมูล โดยทำการวัด เพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถี และการประวิงเวลาของสัญญาณที่รับได้ในบริเวณพื้นที่ที่ต้องการหาตำแหน่งทั้งหมด โดยในการเก็บค่าพารามิเตอร์นั้นจะทำการเก็บทั้งหมด 3 วิถี จากนั้นใช้ทฤษฎีหลักการประมาณค่าซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest neighbor interpolation) และการสหสัมพันธ์ (Correlation) ในการสร้างลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งด้วย ในขั้นตอนสุดท้าย นำพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีและการประวิงเวลาของสัญญาณ และการสหสัมพันธ์รับได้มาทำการเปรียบเทียบประมาณหาตำแหน่งของสัญญาณที่รับได้ และสุดท้ายสามารถแสดงผลของความเที่ยงตรงในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function: CDF)

## 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาด ของการประมาณค่าการหาตำแหน่งภายในอาคาร พบว่า การประมาณค่าการหาตำแหน่งภายในอาคาร โดยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณ แลกกว้างยังมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่ประมาณได้ต่ำกว่า การประมาณค่าการหาตำแหน่ง ภายในอาคารโดยวิธี RSS, AOA, TOA และ TDOA อีกทั้งวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของ สัญญาณแลกกว้างยัง ยังมีความยุ่งยากและซับซ้อนน้อยกว่าวิธีอื่นๆ ที่ได้กล่าวไปอีกด้วย และเมื่อ พิจารณาถึงความเที่ยงตรงในการหาตำแหน่งพบว่า วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแลก กว้างยังมีความเที่ยงตรงในการหาตำแหน่งสูง และสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมภายในอาคารได้ ดีกว่าวิธีอื่นๆ ถึงแม้ว่าวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแลกกว้างยังจะต้องเปลืองทรัพยากร ในด้านหน่วยความจำไปบ้าง แต่ก็นับได้ว่าคุ้มค่าต่อการนำมาใช้งาน

## 1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการหาตำแหน่งด้วยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณ แลกกว้าง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector network analyzer: VNA) ทำ การวัดหาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของช่องสัญญาณ (Transmission coefficient) หรือพารามิเตอร์  $|S_{21}|$  ของสัญญาณแลกกว้างบริเวณทางเดินภายในอาคารโดยใช้ช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการวัดออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกทำการวัดคุณลักษณะของ ช่องสัญญาณในบริเวณที่ต้องการหาตำแหน่งทั้งหมด และทำการเก็บค่าพารามิเตอร์คือค่าการสูญเสีย เชิงวิถีและการประวิงเวลาของสัญญาณที่รับได้จำนวน 3 วิธีนำมาสร้างเป็นลายลักษณะของสัญญาณ แลกกว้างยังเป็นฐานข้อมูลเก็บไว้ และในส่วนที่สองทำการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ต้องการ ทดสอบหาตำแหน่ง และคำนวณหาพารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับได้เพื่อใช้สำหรับวิธีเสมือนการสแกน ลายนิ้วมือของสัญญาณแลกกว้างในการประมาณหาตำแหน่งจากพารามิเตอร์อื่นๆ ทั้งนี้เป็น เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงความเที่ยงตรงของการหาตำแหน่งใน และ แสดงผลของความเที่ยงตรงในรูปแบบของ CDF

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และ ขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงเทคโนโลยีแลกกว้าง และการหาตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งในส่วน ของเทคโนโลยีแลกกว้างจะกล่าวถึงความเป็นมา หลักการพื้นฐาน ข้อกำหนด และจุดเด่นของระบบการ สื่อสารแบบแลกกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย ทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง โดยจะกล่าวถึงประเภทของระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร รวมไปถึงเทคนิคพื้นฐานที่ใช้ในการหาตำแหน่งอีกด้วย สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งที่ใช้ในงานวิจัย สัญญาณที่รับได้โดยผ่านเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง และการวิเคราะห์หาความเที่ยงตรง

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองวิจัยโดยการวัดคุณลักษณะช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งประกอบ อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัด และแบบจำลองการวัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองวิจัยและการอภิปรายผล โดยจะแสดงผลของการสร้างลายลักษณ์ของแถบกว้างยิ่ง รวมถึงการวิเคราะห์ผลของความเที่ยงตรงของแบบจำลอง

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งและทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง

### 2.1 บทนำ

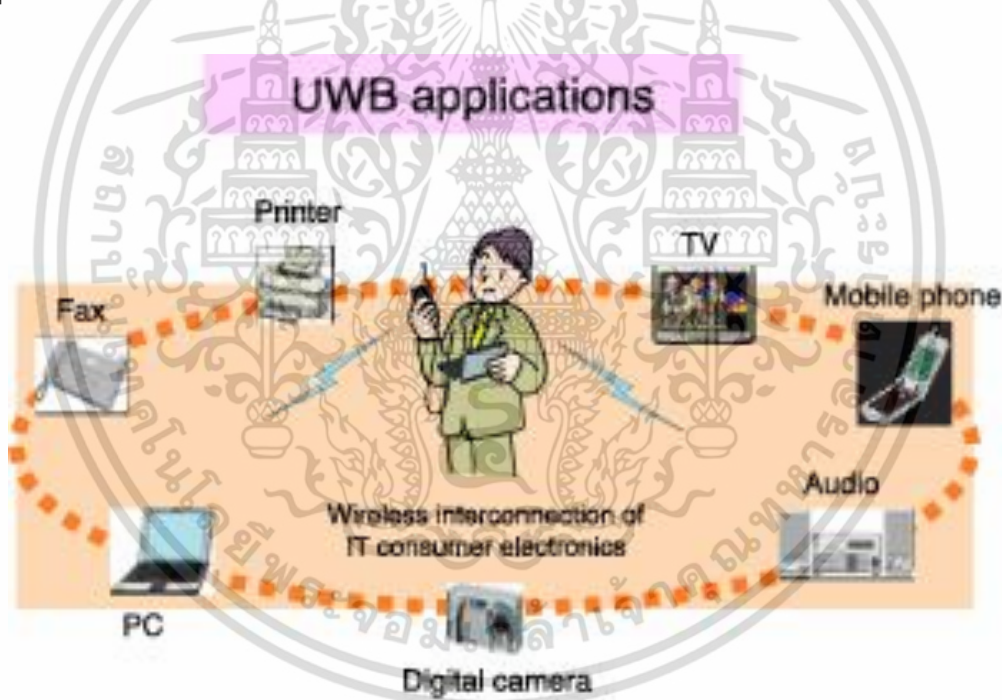
ในยุคที่เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายได้พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นปัจจัยที่มีบทบาทอย่างมากในการพัฒนาชีวิตและพัฒนาประเทศ และด้วยจากคุณสมบัติพิเศษต่างๆของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra wideband; UWB) ที่มีเหมาะสมในหลายๆด้าน เช่น สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงโดยเชื่อมต่อด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่สูงประมาณ 110 Mb/s ในระยะทาง 10 เมตร และมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นในระยะทางที่สั้นลงโดยอัตราการส่งสูงถึง 480 Mb/s ที่ระยะทางประมาณ 2 เมตร ต้องการกำลังงานในการส่งต่ำซึ่งมีค่าสูงสุดไม่เกิน -41.3 dBm ซึ่งเป็นข้อกำหนดของกำลังงานที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Part 15 limit) ทำให้ไม่มีผลกระทบต่อระบบอื่นๆที่มีอยู่ เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra wideband; UWB) มีแนวโน้มว่าจะมีการนำมาประยุกต์ใช้ในโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless personal area network; WPAN) อีกทั้งเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้กลายเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ซึ่งประกอบไปด้วย ความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง จุดเด่นของระบบแถบกว้างยิ่ง และการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้าง

### 2.2 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra-wideband : UWB) มีความแตกต่างจากเทคโนโลยีที่ใช้ในการสื่อสารประเภทอื่นๆ โดยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนี้เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาจากระบบเรดาร์ที่ใช้ในด้านทางการทหาร และได้มีการนำมาพัฒนาใช้ในระบบไร้สายที่ต้องการความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสำหรับพลเรือน จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนี้มีการรับส่งข้อมูลด้วยสัญญาณพัลส์ที่แคบมากโดยอยู่ในระดับนาโนวินาที (Nano second: ns) หรือที่ระดับพิโควินาที (Pico second: ps) โดยการที่มีสัญญาณพัลส์ที่มีช่วงความกว้างของพัลส์แคบมากในการส่งและรับสัญญาณ ซึ่งทำให้สัญญาณที่ส่งมีแบนด์วิดท์กว้างมาก ส่งผลให้มีความสามารถในการรับ-ส่งข้อมูลที่มีปริมาณมากและทนทานต่อการถูกสัญญาณกวนหรือแจมมิง (Jammimg) ปัจจุบันเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้ถูกนำมาใช้ในระบบการสื่อสารมากขึ้นเนื่องจากคุณลักษณะเด่นของแถบกว้างยิ่งทำให้สามารถรองรับระบบการสื่อสารแบบมัลติมีเดีย ซึ่งเป็นระบบที่ต้องการปริมาณการรับส่งข้อมูลสูง และนอกจากนี้เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยังถูกนำมาใช้ในระบบเรดาร์ รวมไปถึงระบบการหาตำแหน่งอีกด้วย

## 2.3 ความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่ต่อยอดมาจากการทดสอบส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ โดยย้อนกลับไปในปี ค.ศ. 1894 ได้มีการค้นคว้าทดลองเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นเป็นครั้งแรก โดยวิศวกรไฟฟ้าชาวอิตาลี มาร์โคนี (Guglielmo Marconi) หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1895 มาร์โคนีได้ทำการสร้างเครื่องส่งซึ่งนำมาใช้ในการทดลองในการส่งสัญญาณแบบไร้สายเป็นครั้งแรก ดังรูปที่ 2.1 ในปีค.ศ.1897 มาร์โคนีจึงทำการประดิษฐ์เครื่องส่งวิทยุโทรเลขขึ้นและทำการทดลองส่งวิทยุโทรเลขไร้สายผ่านภูเขาปรากฏว่าสัญญาณจากวิทยุสามารถส่งผ่านมาได้ และในปี ค.ศ. 1901 มาร์โคนีได้ทำการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ เพื่อใช้สื่อสารด้วยรหัสมอร์ส (Morse code) ข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกโดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณหรือสปาร์กแก๊ป (Spark gap generator) ซึ่งทำงานโดยวงจรทำให้เกิดแรงดันสูงมากระหว่างช่องว่างของตัวนำสัญญาณซึ่งเรียกว่าช่องว่างการสปาร์ก (Spark gap) ทำให้อากาศบริเวณนั้นแตกตัว และกระแสไฟฟ้าสามารถเดินทางผ่านอากาศได้ ซึ่งเรียกว่ากระแสสปาร์ก [1] และทำให้เกิดสัญญาณคลื่นวิทยุรูปพัลส์ เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลตัวอักษรในการสื่อสาร ซึ่งถือได้ว่าเป็นพื้นฐานเทคนิคการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง



รูปที่ 2.1 เครื่องส่งในการทดลองส่งสัญญาณแบบไร้สาย [2]

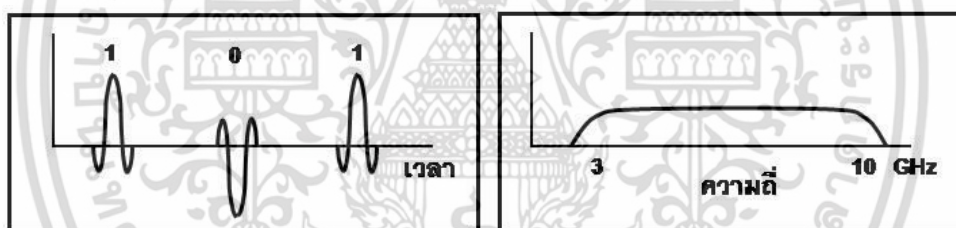
ต่อมาเทคนิคการส่งสัญญาณพัลส์ได้พัฒนา และนำมาใช้ในงานด้านการทหารซึ่งการใช้งานโดยทั่วไปนำมาใช้งานสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารด้วยเรดาร์ซึ่งทำให้สามารถแสดงภาพของวัตถุที่ถูกบดบัง ด้วยการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีลักษณะเป็นพัลส์ ทะลุผ่านอุปสรรคกีดขวางเช่น เรดาร์ทะลุพื้นดินหรือจีพีอาร์ (Ground penetration radar: GPR) [3] จนกระทั่งเทคโนโลยีทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้ก้าวหน้าทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการสื่อสารเชิงพาณิชย์โดยเฉพาะในระบบสื่อสารไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยความสามารถในการส่งข้อมูลได้เป็นปริมาณมาก เพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลแบบสื่อประสม (Multimedia communications) ซึ่งต้องการอัตราการส่งข้อมูลสูง มีการใช้พลังงานต่ำและมีราคาถูกรวมทั้งการนำไปใช้ในการหาตำแหน่งวัตถุที่มีความแม่นยำสูง และทนทานต่อสัญญาณรบกวน

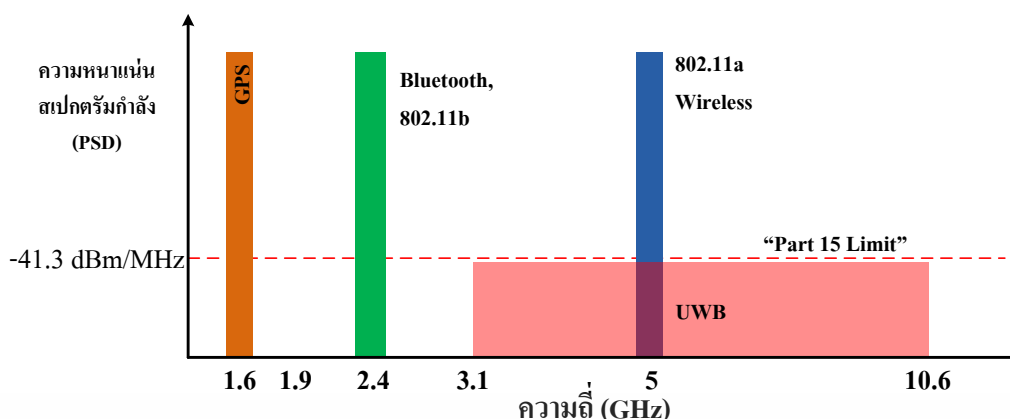
### 2.3.1 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่แตกต่างจากการสื่อสารทางคลื่นความถี่วิทยุแบบอื่น ๆ โดยจุดเด่นของระบบแบบแถบกว้างยิ่งก็คือ เป็นระบบสื่อสารที่ไม่ต้องใช้คลื่นพาหะ (Radio frequency, RF) เหมือนในระบบอื่น สัญญาณของระบบแบบกว้างยิ่งจะเป็นสัญญาณพัลส์ (Pulse signal) โดยจะเป็นพัลส์แคบๆ ขนาด ประมาณ 0.2 นาโนวินาที จึงทำให้มีความหนาแน่นแถบความถี่ (Spectral density) ที่กว้างมาก ดังนั้นจึงแผ่กระจายครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้างในระดับ GHz และเนื่องด้วยระบบนี้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงทำให้สามารถที่จะรองรับอัตราการส่งข้อมูลได้สูงถึง 110 Mb/s ในระยะทางประมาณ 10 เมตร อีกทั้งรูปคลื่นสัญญาณยังมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับสัญญาณในอุดมคติที่เรียกว่าสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse signal) โดยระบบแถบกว้างยิ่งในการส่งและรับสัญญาณนั้นไม่ใช้คลื่นพาหะ (Carrierless) ในการผสมสัญญาณเหมือนในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ แต่จะเป็นการส่งสัญญาณที่มีรูปคลื่นของพัลส์ที่มีรูปคลื่นซึ่งไม่ต่อเนื่องในทางเวลาด้วยอัตราการส่งพัลส์ ในระดับจำนวนหลายร้อยล้านพัลส์ต่อหนึ่งวินาทีในการส่งและรับสัญญาณ ซึ่งทำให้พลังงานของสัญญาณถูกกระจายอยู่ในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมาก ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นที่มาของชื่อแถบกว้างยิ่ง [1]



รูปที่ 2.2 สัญญาณแถบกว้างยิ่งซึ่งมีแถบความถี่กว้างมากในทางเวลาและความถี่ [3]

รูปที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างซึ่งมีการกระจายกำลังงานของสัญญาณอยู่ในช่วงแถบความถี่กว้างมากในระดับกิกะเฮิรตซ์กับสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบที่มีการกระจายกำลังงานของสัญญาณอยู่ในช่วงแถบความถี่แคบ



**รูปที่ 2.3** การเปรียบเทียบช่วงความถี่และระดับความหนาแน่นกำลังงานของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งกับการสื่อสารแบบแถบแคบอื่นๆ [1]

สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งไม่ได้ถูกจำกัดเฉพาะกับสัญญาณในรูปแบบอิมพัลส์ที่ครอบคลุมความถี่ช่วงเวลาที่กว้างมากเท่านั้น เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งยังสามารถแบ่งออกเป็นแบบแถบความถี่เดี่ยว (Single band approach) และแบบหลายแถบความถี่ (Multiband approach) [1] รวมทั้งใช้เรียกเทคนิคการใช้คลื่นพาห่อย่อยที่ไม่รบกวนกันจำนวนมากในการผสมสัญญาณ หรือการมอดูเลชันแบบที่เรียกว่ามัลติแบนด์โอเอฟดีเอ็ม (MB-OFDM: Multiband OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing)) ซึ่งเป็นอีกเทคนิคที่ครอบคลุมการใช้ความถี่แถบกว้างมาก โดยประยุกต์ใช้ในการส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงเช่นเดียวกัน สัญญาณแถบกว้างยิ่งแบบอิมพัลส์และมัลติแบนด์โอเอฟดีเอ็มได้รับการพิจารณาเพื่อนำไปใช้สำหรับมาตรฐานเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลของกลุ่มความร่วมมือไวมี่เดีย (WiMedia alliance) โดยใช้เป็นเทคโนโลยีพื้นฐานสำหรับอุปกรณ์เชื่อมต่อในรูปแบบยูเอสบีความเร็วสูงไร้สาย (High speed wireless universal serial bus (USB) interface) [4]

### 2.3.2 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ในสหรัฐอเมริกาได้มีการก่อตั้งกลุ่มงานที่ชื่อว่า (Ultra wideband working group: UWBWG) เพื่อทำการเจรจาข้อตกลงร่วมกับ FCC ในการจัดสรรการใช้งานช่วงความถี่ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง เช่นเดียวกับกับในยุโรป ญี่ปุ่น เกาหลี และสิงคโปร์ ต่างก็ได้ออกข้อกำหนดเพื่อรองรับการใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแล้ว โดยในหัวข้อนี้จะขอลำถึงข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา และในยุโรปเท่านั้น

#### 2.3.2.1 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา

ในปี ค.ศ. 1998 FCC ได้ออกประกาศเกี่ยวกับการตรวจสอบหรือ Notice of Inquiry (NOI) เนื่องจากมีความเป็นไปได้ว่าจะมีผลกระทบต่อการทำงานของสัญญาณที่มีต่อระบบที่มีอยู่เดิมและระบบความปลอดภัยในกิจการการบินและทิศทางในการค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องส่งในระบบแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกัน

ในวันที่ 14 กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 FCC ได้ออกกฎสำหรับระบบแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง และยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของคำประกาศและระเบียบการฉบับที่หนึ่งได้เผยแพร่ต่อสาธารณชนในวันที่ 22 เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งในเอกสารได้กล่าวถึงการอนุญาตใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่งทั้ง 4 ประเภทและการกำหนดขอบเขตการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร่กระจายพลังงานสำหรับการใช้ในประเภทต่าง ๆ โดยจากนิยามข้างต้นได้ทำการลดค่าการจำกัด  $B_f$  ไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 0.25 และข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC สำหรับใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร

เมื่อเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้ถูกเสนอสำหรับการนำมาใช้ในกิจการการสื่อสารของพลเรือน ซึ่งยังไม่ได้มีการกำหนดใดๆ สำหรับลักษณะสัญญาณที่จะนำมาใช้ จึงได้มีหน่วยงานหนึ่งที่ชื่อว่า DARPA (Defense advanced research project agency) ได้ทำการออกข้อกำหนดฉบับที่หนึ่งสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งอยู่บนพื้นฐานอัตราส่วนแบนด์วิดท์  $B_f$  ของสัญญาณโดยต้องมีค่ามากกว่า 25%

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

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

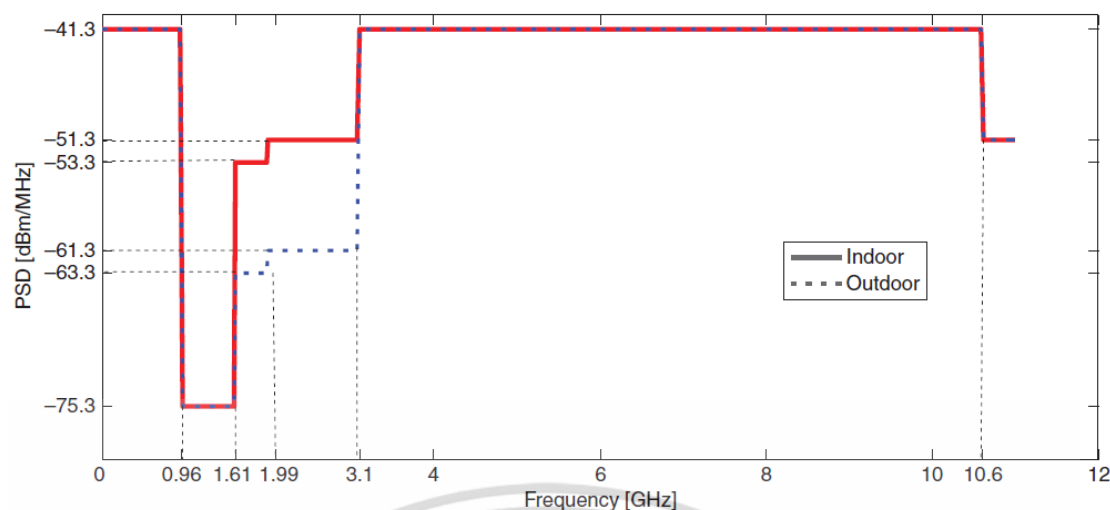
เมื่อ  $f_H$  และ  $f_L$  คือความถี่สูงสุดและความถี่ต่ำสุดตามลำดับ

นอกจากนั้น FCC ยังมีการกำหนดสเปกตรัมมาร์ค (Spectral mask) สำหรับการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคาร [5] ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 การจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

ความถี่	ภายในอาคาร	ภายนอกอาคาร
	EIRP	EIRP
960 MHz – 1.61 GHz	-75.3 dBm	-75.3 dBm
1.61 GHz – 1.99 GHz	-53.3 dBm	-63.3 dBm
1.99 GHz – 3.1 GHz	-51.3 dBm	-61.3 dBm
3.1 GHz – 10.6 GHz	-41.3 dBm	-41.3 dBm
สูงกว่า 10.6 GHz	-51.3 dBm	-51.3 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 หน้ากากสเปกตรัมสำหรับการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน สำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC [4]

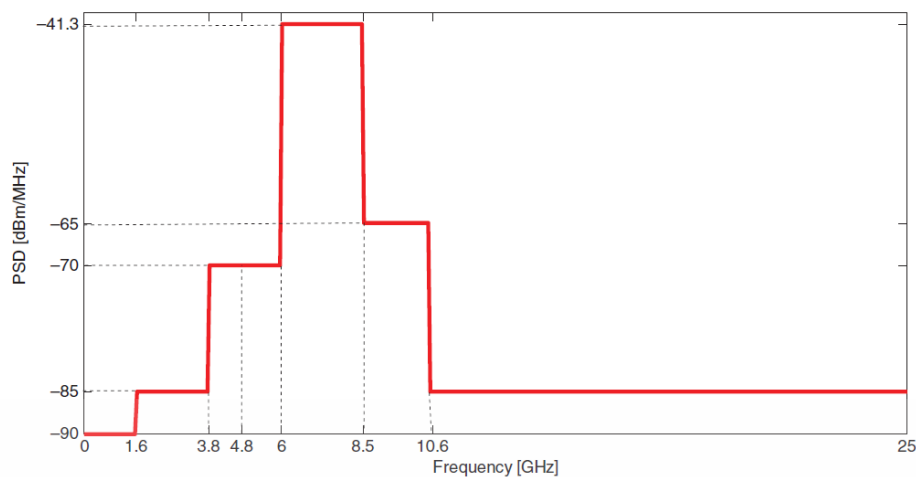
### 2.3.2.2 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป

โดยในปี ค.ศ. 2003 สหภาพยุโรปได้มอบหมายให้ ETSI กำหนดมาตรฐานให้ครอบคลุมการใช้งานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 2004 เมื่อ CEPT ได้ทำการศึกษาถึงสเปกตรัมในการใช้งานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเสร็จสิ้น ETSI ได้ทำการปรับปรุงมาตรฐานเดิมที่มีอยู่เพื่อการใช้งานอุปกรณ์ไร้สายที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 2005 คณะกรรมาธิการของยุโรปได้มอบหมายให้ CEPT ทำการตรวจสอบข้อมูลทางเทคนิคเพื่อที่จะเริ่มใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในสหภาพยุโรป และในงานประชุมซึ่งจัดขึ้นที่ประเทศฟินแลนด์ ซึ่งจะมีข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งสำหรับภายในอาคารเท่านั้น ซึ่งความต้องการทางด้านเทคนิคสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 10.6 GHz ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขของ ECC แสดงดังตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.5 โดยข้อกำหนดในการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณแถบกว้างยิ่งในยุโรปมีความเข้มงวดกว่า FCC ที่ระดับกำลังของการแพร่กระจายคลื่นมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 2.6

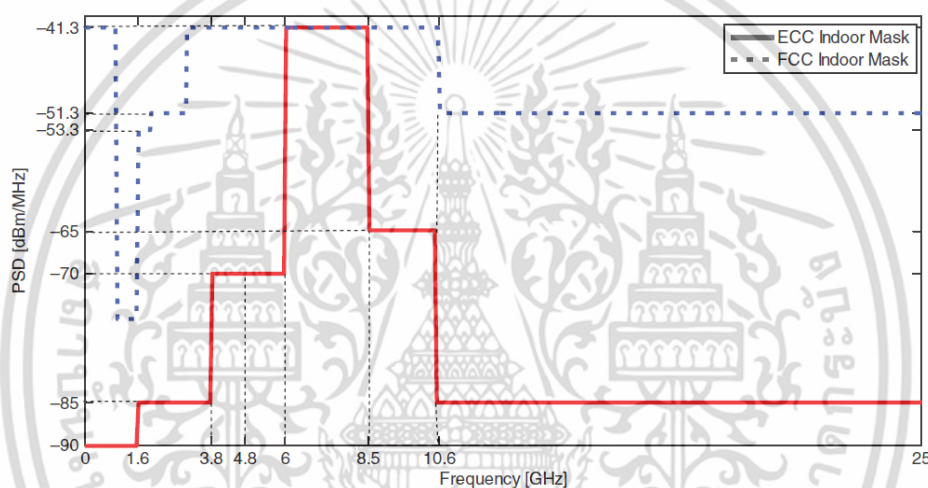
ตารางที่ 2.2 ความต้องการทางด้านเทคนิคสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 10.6 GHz ในยุโรป

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 หน้ากากสเปกตรัมสำหรับการสื่อสารแถบกว้างยิ่งในยุโรป [2]



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบหน้ากากสเปกตรัมการสื่อสารแถบกว้างยิ่งในยุโรปและสหรัฐอเมริกา [2]

### 2.3.3 จุดเด่นของระบบแถบกว้างยิ่ง

ระบบแถบกว้างยิ่งรวมถึงรวมถึงอิมพัลส์ (Impulse), พัลส์แคบ (Short – pulse), สัญญาณที่ไม่ใช่ไซน์ซอยด์ (Non – sinusoidal), สัญญาณที่ปราศจากคลื่นพาห้ (Carrierless), แถบกว้างยวดยิ่ง (Super wideband), การอัดพัลส์แบบเอฟเอ็มอย่างรวดเร็ว (Fast frequency chirp) และพัลส์เดี่ยว (Mono – pulse) [6] เป็นระบบที่มีลักษณะเด่นที่น่าสนใจสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารไร้สายได้หลายประการ เช่น มีความจุของช่องสัญญาณสูง, มีความซับซ้อนของระบบน้อย, ราคาถูก, มีระดับกำลังของสัญญาณต่ำใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน, มีความต้านทานต่อคลื่นหลายวิถี, มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลา เป็นต้น

- มีความจุช่องสัญญาณสูง

เนื่องจากระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งเป็นระบบที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากถึง 7.5 GHz จึงทำให้มีความจุของช่องสัญญาณมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งขนาดความจุระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งเป็นไปตามสูตรของแฮนนอน (Hartley-Shannon) ดังสมการที่ 2.3 โดยจะเห็นว่าค่าความจุของช่องสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแบนด์วิดท์มีมากขึ้น ทำให้มีอัตราการส่งข้อมูลในระดับหลายร้อยเมกะ

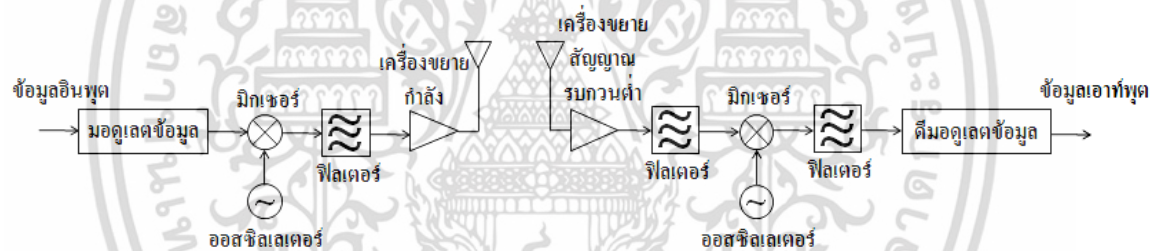
บิตต่อวินาที (Mbps) จึงทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นได้รับความนิยมในระบบการสื่อสารไร้สาย ระยะสั้นที่มีความเร็วสูง เช่น โครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPANs)

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

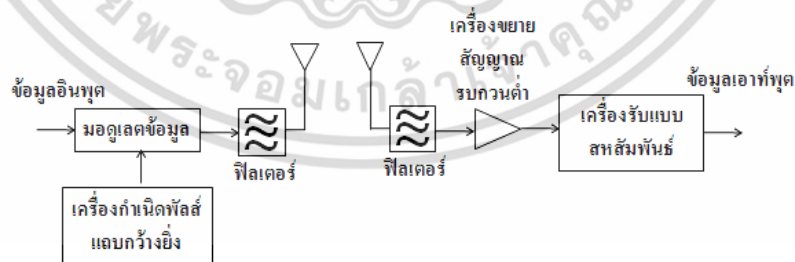
เมื่อ  $C$  คือค่าความจุของช่องสัญญาณ  
 $B$  คือแบนด์วิดท์  
 $SNR$  คืออัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

- เป็นระบบที่มีความซับซ้อนและต้นทุนต่ำ

เนื่องจากการสื่อสารแถบกว้างยิ่งใช้พัลส์ที่มีกำลังส่งต่ำจึงไม่จำเป็นต้องมีตัวขยายกำลัง (Amplifier, PA) ในภาคส่ง และจากการที่การสื่อสารแถบกว้างยิ่งไม่มีการใช้คลื่นพาห้จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้มิกเซอร์ (Mixer) และออสซิลเลเตอร์ (Oscillators) ในการแปลงความถี่ของคลื่นพาห้ไปเป็นแถบความถี่ที่ต้องการทั้งในภาครับและภาคส่ง จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าโครงสร้างทั้งภาคส่ง-ภาครับของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่าระบบการสื่อสารแบบแถบแคบ



(a) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของระบบสื่อสารแถบแคบ



(b) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของระบบสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบโครงสร้างของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งกับระบบสื่อสารแถบแคบ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีระดับกำลังของสัญญาณต่ำใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนี้มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณรบกวน (Noise) เนื่องจากสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งนั้นมีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับต่ำโดยอยู่ในระดับของสัญญาณระบบรบกวน (Noise floor) ดังนั้นการส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นจึงไม่ก่อให้เกิดผลการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบอื่น ๆ เนื่องจากถูกมองว่าเป็นสัญญาณรบกวนเลยถูกกำจัดออกจากการพิจารณาของระบบ

- มีความต้านทานต่อคลื่นหลายวิถี (Multipath) และการรบกวนของสัญญาณใกล้เคียงในระบบการมอดูเลตทางเวลา (Time modulation)

ในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารมักเกิดคลื่นหลายวิถี ซึ่งเป็นผลมาจากการสะท้อนของสัญญาณจากวัสดุต่างๆ เช่น กำแพง ประตู โตะ เพดาน พื้น หรือเครื่องใช้ภายในอาคารในหลายๆ ทิศทาง โดยสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนจากพื้นผิวของวัสดุต่างๆ จะไม่เป็นเส้นระดับสายตา (Non line of sight: NLOS) นอกจากนี้ในระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งนั้นช่วงเวลาการส่งผ่านของพัลส์แถบกว้างยิ่งมีช่วงเวลาสั้นในระดับนาโนวินาที (Nano second: ns) จึงทำให้พัลส์ที่เกิดจากการสะท้อนมีโอกาสน้อยมากที่จะไปถึงพร้อมกับพัลส์ที่เป็น LOS อีกทั้งการที่ระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งนั้นมีแบนด์วิดท์ที่กว้างทำให้เกิดความแตกต่างทางความถี่อย่างมากรวมเข้ากับการส่งสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องจึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งมีการมอดูเลตทางเวลานั้นมีความต้านทานต่อการแพร่กระจายของคลื่นหลายวิถีรุนแรง และการรบกวนหรือแทรกสอดจากสัญญาณความถี่ใกล้เคียงกันได้

- มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลาสำหรับการกำหนดตำแหน่งและการประยุกต์ใช้ในระบบติดตาม (Tracking)

ระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งมีพัลส์ที่มีลักษณะทางโดเมนเวลาที่แคบมากๆ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมจังหวะและค่านวนเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่าระบบคลื่นวิทยุแบบอื่นๆ อีกทั้งยังสามารถทะลุผ่านวัสดุได้ดีจึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งมีการมอดูเลตทางเวลาถูกนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ระยะสั้น

### 2.3.4 การประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง [8]

จากคุณลักษณะเด่นของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว ทำให้ในปัจจุบันมีการนำระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย โดยสามารถแบ่งประเภทการใช้งานเป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้ การติดต่อสื่อสารและเซนเซอร์, เรดาร์, การหาตำแหน่งและการติดตาม

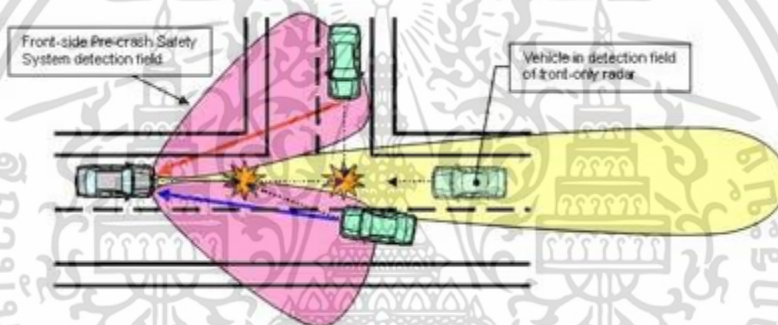
#### 2.3.4.1 การติดต่อสื่อสารและเซนเซอร์

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีแบนด์วิดท์กว้าง จึงทำให้สามารถทำให้รองรับกับระบบมัลติมีเดียที่ต้องการความเร็วในการส่งข้อมูลที่สูง เนื่องจากมีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลสูงในระดับหลายร้อยเมกะบิตต่อวินาที จึงเกิดแนวคิดที่จะนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไปใช้ในด้าน การติดต่อสื่อสารหรือการรับส่งข้อมูลก็คือระบบโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล ซึ่งอาจจะเป็นการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ภายในบ้านหรือสำนักงาน ในอนาคตอันใกล้นี้เราจะสามารถดูภาพจากกล้องถ่ายภาพวิดีโอแบบพกพาผ่านทางหน้าจอของโทรศัพท์มือถือทันทีโดยไม่ต้องทำการต่อสายสัญญาณ เป็นต้น

นอกจากนี้มีการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมาใช้งานในระบบเซ็นเซอร์ โดยมีการนำเอาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ไปใช้งานในทางการแพทย์ เช่น การวัดอัตราการเต้นของหัวใจ หรืออื่นๆ ที่เป็นสัญญาณอันตรายต่อผู้ป่วย ซึ่งก่อนหน้านี้ ตัวเซ็นเซอร์จะมีสายไฟหรือสายเคเบิลติดอยู่กับตัวผู้ป่วยทำให้ไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายหรือการตรวจของแพทย์ ดังนั้นเมื่อมีการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้จึงทำให้เกิดความสะดวกสบายต่อคนไข้เพิ่มมากขึ้น

#### 2.3.4.2 เรดาร์

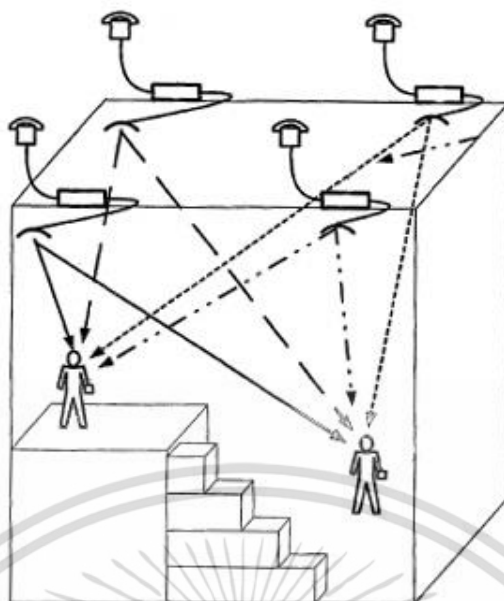
ในอดีตระบบเรดาร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในทางทหาร แต่ในอนาคตอันใกล้ระบบเรดาร์จะถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์มากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากระบบแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่ราคาไม่แพงจึงได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเรดาร์ที่มีความสามารถเพิ่มขึ้น โดยมีการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไปใช้ในระบบเซ็นเซอร์รถยนต์เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันดังรูปที่ 2.8 และนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบทะลุผ่านวัสดุที่ใช้ทำอาคารเช่น ไม้ อิฐ อิฐบล็อก ไฟเบอร์ พลาสติกและคอนกรีต ซึ่งในอดีตระบบเรดาร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในทางทหาร แต่ในอนาคตอันใกล้ระบบเรดาร์จะถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์มากขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 2.8 การตรวจจับการชนกันของรถยนต์ [9]

#### 2.3.4.3 การหาตำแหน่งและระบุตำแหน่ง

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งสามารถใช้ค้นหาตำแหน่งหรือพิกัดต่างๆ บนโลกได้ อีกทั้งเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีความเหมาะสมเป็นในการนำมาใช้งานกับสถานะแวดล้อมภายในอาคาร เนื่องจากสามารถระบุตำแหน่งได้แม่นยำในระดับเซนติเมตร จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการค้นหาคนหรือสิ่งของต่างๆ ได้ เช่น การระบุตำแหน่งของนักผจญเพลิงที่เข้าไปค้นหาผู้ประสบภัยที่ติดอยู่ในอาคารที่ถูกไฟไหม้ หรือการระบุตำแหน่งผู้ป่วยในโรงพยาบาล ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การระบุตำแหน่งผู้ป่วยในโรงพยาบาล [10]

## 2.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันของระบบเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง และจุดเด่นที่น่าสนใจของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง ภายใต้ข้อกำหนดอุปกรณ์การสื่อสารระบบแถบกว้างยิ่งโดย FCC และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง เป็นต้น ซึ่งข้อมูลในเบื้องต้นของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะเป็นแนวทางการศึกษาวิจัยให้ระบบมีประสิทธิภาพมากและสามารถใช้งานได้หลากหลายหรือการประยุกต์ใช้งานได้มากขึ้น

### บทที่ 3

## ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์การหาตำแหน่ง โดยใช้ช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง

### 3.1 บทนำ

จากที่กล่าวไว้ในข้างต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเห็นว่าการหาตำแหน่งโดยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง สามารถนำมาใช้งานได้ดี กับระบบการหาตำแหน่งในบริเวณที่มีการจางหายหลายวิถีมาก เช่น สภาวะแวดล้อมภายในอาคารได้ และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ที่ใช้ในการหาตำแหน่งโดยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงประเภทของระบบการหาตำแหน่งรวมถึงเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ต่อมาจะกล่าวถึงการวิเคราะห์หาสัญญาณที่รับได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาสัญญาณที่รับได้ในโดเมนความถี่ และหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งโดยในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงขั้นตอน และหลักการทำงานของวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ใช้ในการประมาณหาตำแหน่ง และในที่สุดท้ายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

### 3.2 ทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง [11] - [13]

ในปัจจุบันมีการนำเอาเทคโนโลยีใหม่ๆมาใช้ร่วมกับระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น การหาตำแหน่งของผู้ป่วยภายในอาคารโรงพยาบาล, การหาตำแหน่งของนักผจญเพลิงที่เข้าไปช่วยเหลือผู้ประสบภัยภายในอาคาร และการหาตำแหน่งของนักชุดแร่ที่อยู่ในเหมืองแร่ [14] เป็นต้น

#### 3.2.1 ประเภทของระบบหาตำแหน่งภายในอาคาร

เมื่อแบ่งตามประเภทของเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจจับ จะสามารถแบ่งระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารได้เป็น 3 ประเภทคือ อินฟราเรด [15], ความถี่วิทยุ [16]-[19] และอัลตราซาวด์ [20] โดยแต่ละประเภทจะมีรายละเอียดดังนี้

##### 3.2.1.1 อินฟราเรด (Infrared) [21]

เนื่องจากสัญญาณอินฟราเรดไม่สามารถเดินทางผ่านกำแพงหรือสิ่งกีดขวางได้ จึงเกิดข้อจำกัดของระยะการใช้งานในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณอินฟราเรดมีความเร็วในการแพร่สัญญาณสูง ประมาณ  $3 \times 10^8$  m/s ดังนั้นระบบสัญญาณอินฟราเรดจึงต้องการอุปกรณ์ที่มากกว่าระบบอัลตราซาวด์ อีกทั้งแสงสว่างภายในอาคารยังมีผลต่อการตรวจจับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของระบบอินฟราเรดอีกด้วย ระบบอินฟราเรดโดยทั่วไปจะมีระยะการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 5 เมตร [15]

### 3.2.1.2 ความถี่วิทยุ (Radio frequency: RF) [21]

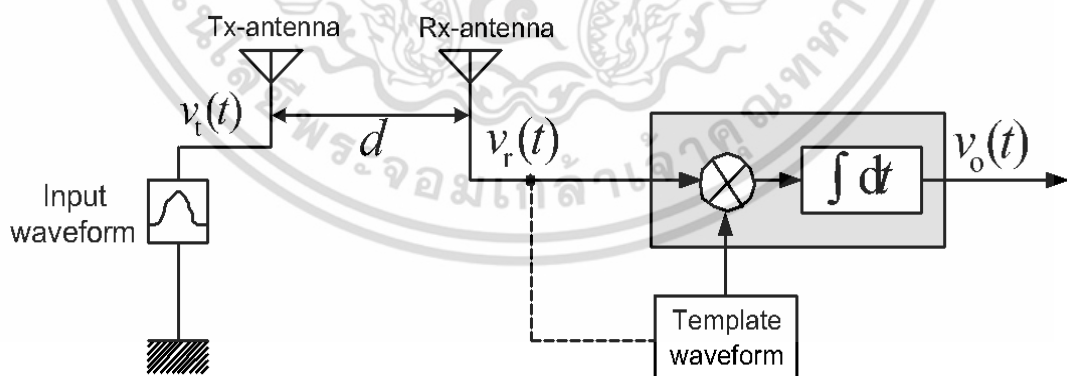
ระบบสัญญาณความถี่วิทยุ เป็นระบบที่สามารถใช้งานได้ดีในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร เนื่องจากสัญญาณความถี่วิทยุ (Radio Frequency) สามารถเดินทางผ่านวัสดุภายในอาคารได้ดี โดยสัญญาณความถี่วิทยุมีความเร็วในการแพร่สัญญาณที่สูงคือ ประมาณ  $3 \times 10^8$  m/s อีกทั้งยังเป็นระบบที่ใช้ความถี่สาธารณะ และมีระยะการใช้งานที่กว้างกว่าระบบที่ใช้อินฟราเรดและอัลตราซาวด์

### 3.2.1.3 อัลตราซาวด์ (Ultrasound) [21]

ระบบอัลตราซาวด์มีความแม่นยำสำหรับตำแหน่งที่ตรวจจับที่มีความเร็วของการแพร่สัญญาณต่ำ (343 m/s) แม้ว่าจะทำงานที่ย่านความถี่ต่ำ (40 kHz) ก็ตาม ข้อดีของระบบอัลตราซาวด์คือ ง่ายและราคาไม่แพง โดยระบบอัลตราซาวด์นี้มีระยะการใช้งานประมาณ 3 เมตรถึง 10 เมตร และมีความละเอียด 1 เซนติเมตรของการวัดระยะ อีกทั้งอุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพการตรวจจับของระบบอัลตราซาวด์

## 3.2.2 เทคนิคการวัดที่นำมาใช้ในระบบหาตำแหน่งด้วยเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์

สำหรับการหาตำแหน่งในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นจะมีอยู่สองลักษณะด้วยกัน ในลักษณะแรกจะเป็นการหาตำแหน่งโดยตรงจากสัญญาณที่เดินทางระหว่างตำแหน่งซึ่งจะเรียกว่า Direct positioning [22] และอีกลักษณะหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมใช้งานมากกว่า จะเป็นการแบ่งการหาตำแหน่งออกเป็น 2 ขั้นตอน (Two-step positioning) โดยขั้นตอนแรกจะเป็นการเก็บค่าพารามิเตอร์จากสัญญาณ จากนั้นทำการประมาณหาตำแหน่งจากค่าพารามิเตอร์เหล่านั้น [23] โดยการหาตำแหน่งทั้งสองลักษณะแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งสำหรับระบบการหาตำแหน่ง [24]

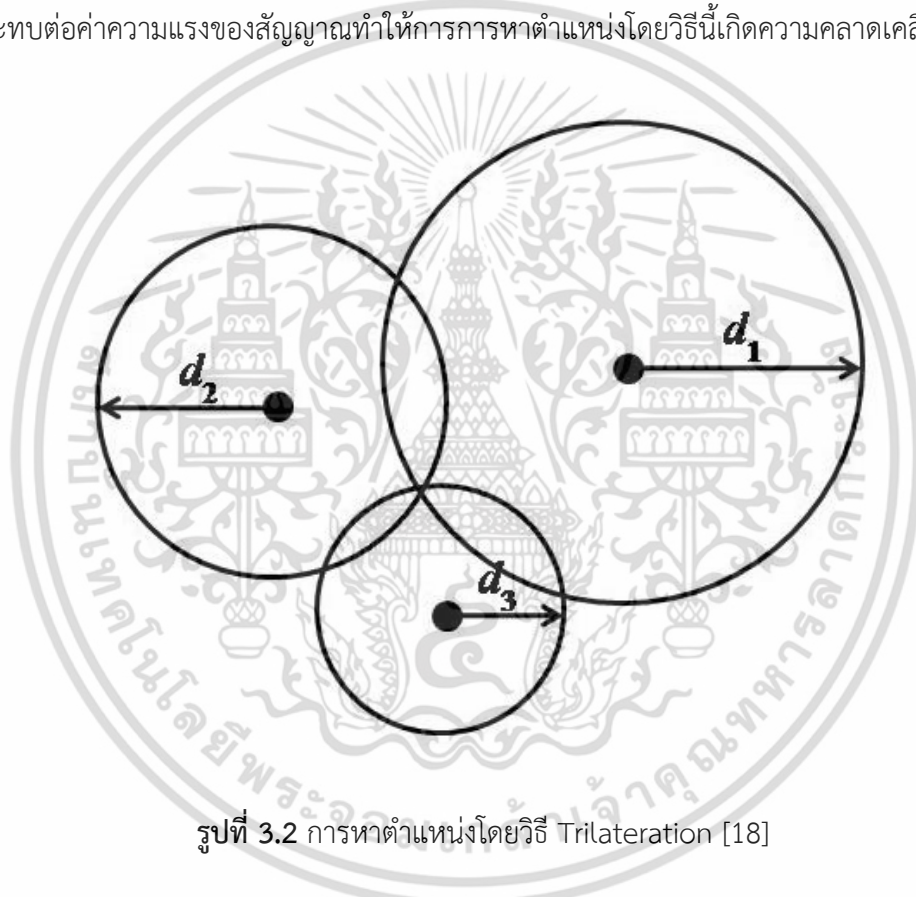
ในการหาตำแหน่งนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการวัดจะขึ้นอยู่กับความต้องการด้านความเที่ยงตรงและข้อจำกัดของเครื่องรับหรือเครื่องส่งอีกด้วย โดยทั่วไปแล้วค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสัญญาณสามารถนำมาใช้ได้โดยในแต่ละสัญญาณที่รับได้นั้นจะพิจารณาพารามิเตอร์เพียงชนิดเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่านั้น อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการพิจารณาพารามิเตอร์ของสัญญาณมากกว่า 1 ชนิดเพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงในการหาตำแหน่งให้ดียิ่งขึ้น

### 3.2.2.1 การพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ (RSS) [24]

RSS เป็นวิธีการพิจารณาตำแหน่งโดยพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณซึ่งถูกลดทอนลงเนื่องจากการสูญเสียในวิถี (Path loss attenuation) โดยใช้การตัดกันของวงกลมซึ่งเป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะทางที่ภาครับอยู่ห่างจากสถานีฐาน สามารถหาระยะทางโดยการคำนวณจากความแรงของสัญญาณที่รับได้ ด้วยวิธีการนี้จึงต้องใช้วงกลมอย่างน้อย 3 วงมาตัดกันเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่แน่ชัดซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า Trilateration ดังแสดงในรูปที่ 3.2 อย่างไรก็ตามการหาตำแหน่งโดยวัดค่าความแรงของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์การจางหายหลายวิถี (Multipath fading) และการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากสิ่งกีดขวาง (Shadowing) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าความแรงของสัญญาณทำให้การหาตำแหน่งโดยวิธีนี้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

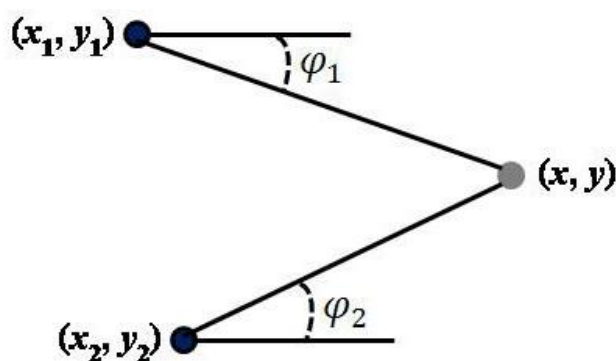


รูปที่ 3.2 การหาตำแหน่งโดยวิธี Trilateration [18]

### 3.2.2.2 การพิจารณาทิศทางการมาถึงของสัญญาณ (AOA) [24]

AOA เป็นการหาตำแหน่งโดยดูทิศทางของสัญญาณโดยการคำนวณความแตกต่างของเฟสของสัญญาณที่ไปถึงสายอากาศแต่ละตัวที่ใช้อยู่ในชุดรับสัญญาณ โดยในการหาตำแหน่งนั้นต้องมีชุดสายอากาศที่ทำงานเหมือนกันทุกประการจำนวนหนึ่งซึ่งเรียกว่า Phase array antenna อย่างน้อย 2 ตัวดังแสดงในรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าการหาตำแหน่งด้วยวิธี AOA มีข้อเสียคือยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งยังต้องเจอปัญหาความผิดพลาดจากปรากฏการณ์การกระเจิง (Scattering) ของคลื่นวิทยุอีกด้วย จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการหาตำแหน่งมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



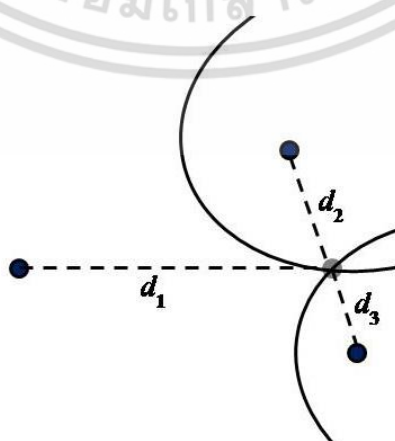
รูปที่ 3.3 การหาตำแหน่งโดยวิธี Angle of arrival (AOA) [18]

### 3.2.2.3 การพิจารณาเวลาการมาถึงของสัญญาณ (TOA) [24]

TOA จะมีลักษณะการพิจารณาหาตำแหน่งคล้าย RSS เพียงแต่เปลี่ยนพารามิเตอร์ที่พิจารณาเป็นเวลาที่สัญญาณจากภาครับเดินทางมาถึงสถานีฐาน เป็นการพิจารณาตำแหน่ง โดยใช้การตัดกันของวงกลมเช่นเดียวกับ RSS ซึ่งเป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะทางที่ภาครับอยู่ห่างจากสถานีฐาน โดยสามารถจะหาระยะทางได้โดยการคำนวณจากเวลาที่สัญญาณจากภาครับเดินทางมาถึงสถานีฐาน ด้วยวิธีการนี้จะต้องใช้วงกลมอย่างน้อย 3 วงมาตัดกันเช่นเดียวกับ RSS แสดงดังรูปที่ 3.2 จึงจะได้ตำแหน่งที่แน่ชัด อย่างไรก็ตามเทคนิค TOA เมื่อนำมาใช้ภายในอาคารที่มีระยะทางที่สั้น เวลาที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณจะน้อยมากทำให้ยากในการพิจารณาหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคนี้

### 3.2.2.4 การพิจารณาความต่างของเวลาการมาถึงของสัญญาณ (TDOA) [24]

วิธีการหาตำแหน่งด้วยวิธีของ TDOA มีลักษณะคล้ายกับวิธีของ TOA เนื่องจาก TOA พิจารณาเวลาที่สัญญาณใช้ในการเดินทางของแต่ละสถานีฐาน ส่วนวิธี TDOA จะวัดความต่างของเวลาในแต่ละคู่สถานีฐานแล้วนำมาเขียนเป็นกราฟของ Hyperbolic ซึ่งบอกถึงระยะห่างระหว่างคู่สถานีฐาน ดังนั้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการจึงต้องใช้เส้นกราฟอย่างน้อย 2 เส้นมาตัดกัน ซึ่งเกิดจากสถานีฐานอย่างน้อย 3 สถานีดังแสดงในรูปที่ 3.4 สิ่งที่สำคัญของวิธีนี้คือแต่ละสถานีฐานต้องมีการซิงโครไนซ์กัน อย่างไรก็ตามเช่นเดียวกับเทคนิค TOA เมื่อนำมาใช้ภายในอาคารที่มีระยะทางที่สั้น เวลาที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณจะน้อยมากทำให้ยากในการพิจารณาหาตำแหน่ง



รูปที่ 3.4 การหาตำแหน่งโดยวิธี Time difference of arrival (TDOA) [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระยา การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.5 Location Pattern or Fingerprinting

วิธีการพิจารณาความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่ง (Location pattern or Fingerprinting) จะมีลักษณะคล้ายกับวิธีการสแกนลายนิ้วมือของมนุษย์ โดยที่จะเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการนำมาพิจารณาและนำมาเปรียบเทียบความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งนั้นๆ ที่ได้ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์นั้นๆ ไว้ในฐานข้อมูลก่อนหน้าแล้ว หลังจากนั้นทำการแสดงตำแหน่งที่เปรียบเทียบแล้วใกล้เคียงที่สุดโดยวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สถานีฐานมากเหมือนวิธีอื่นๆ เพียงแค่มีสถานีฐานอย่างน้อย 1 ตัวก็สามารถหาตำแหน่งได้ ข้อดีของการใช้วิธีนี้ในการหาตำแหน่งคือต้องใช้เวลามากในการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการพิจารณาไว้ในฐานข้อมูล กรณีที่บริเวณที่ต้องการหาตำแหน่งมีขนาดใหญ่ ดังนั้นวิธีการนี้จึงนิยมนำมาใช้ในระบบหาตำแหน่งภายในอาคารมากกว่าระบบหาตำแหน่งภายนอกอาคาร

## 3.3 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง

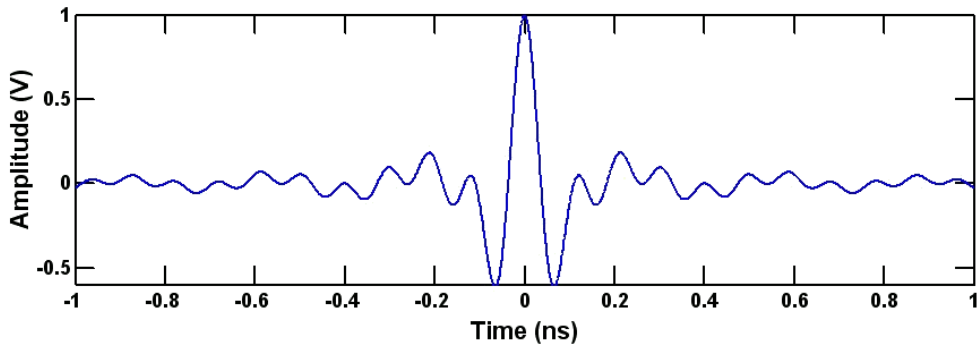
เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือแบบแถบกว้างยิ่งใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งร่วมกับวิธีการสแกนลายนิ้วมือ สำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมถูกนำมาใช้เป็นรูปคลื่นที่ถูกส่งไปของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยที่รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา (Time domain) แสดงในรูปที่ 3.5 และฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมในโดเมนความถี่ (Frequency domain) สามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

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

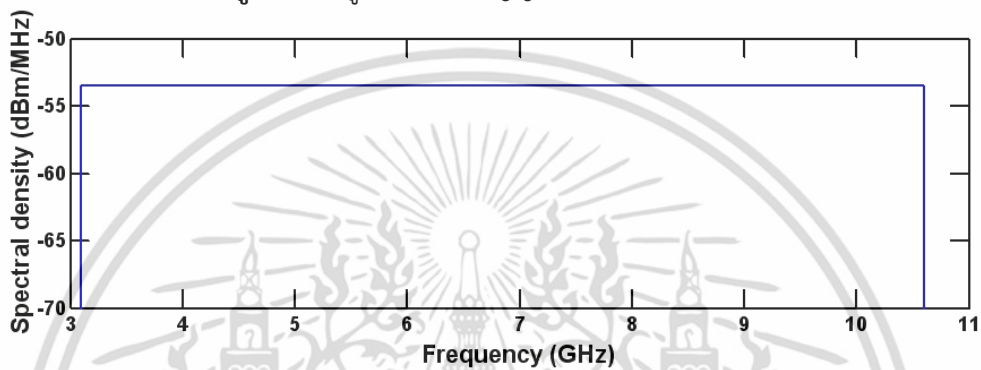
$$V_i(f) = \begin{cases} \frac{A}{2f_b} & |f| - f_c \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & |f| - f_c > \frac{f_b}{2} \end{cases} \quad (3.2)$$

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

รูปสี่เหลี่ยมทั้งในด้านความถี่บวกและความถี่ลบ โดยความหนาแน่นสเปกตรัมจะมีขนาดคงที่เท่ากับ  $A/(2f_b)$  อยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่  $-f_H$  ถึง  $-f_L$  และ  $f_L$  ถึง  $f_H$  และจะมีเฟสเป็นศูนย์ ถือได้ว่ารูปคลื่นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมนี้เป็นรูปคลื่นแถบกว้างยิ่งในอุดมคติ อีกทั้งยังมีความสมมาตรแบบฟังก์ชันคู่ และมีส่วนประกอบกระแสตรง (Direct current: DC) เป็นศูนย์



รูปที่ 3.5 รูปคลื่นของสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่ง



รูปที่ 3.6 สเปกตรัมของสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่ง

### 3.4 สัญญาณที่รับได้

สำหรับความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้นั้น สามารถหาได้จากการนำความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งคูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ โดยสัญญาณที่รับได้ในโดเมนความถี่ หรือความหนาแน่นของสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้  $V_r(f)$  ดังสมการที่ (3.3)

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

เมื่อ  $V_t(f)$  คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง และ  $H_c(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณซึ่งได้จากการวัด

จากนั้นสัญญาณที่รับได้ในโดเมนเวลา สามารถคำนวณได้โดยการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับของความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้  $v_r(t)$  ดังสมการที่ (3.4)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

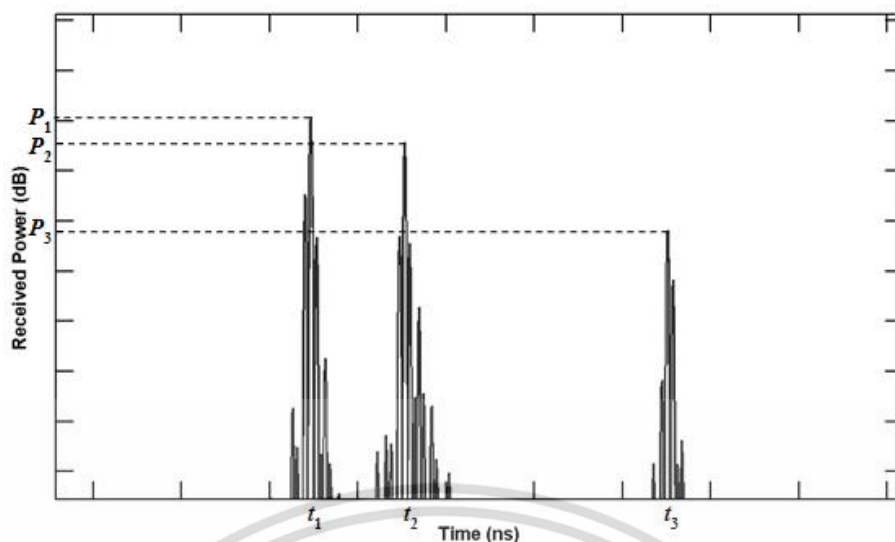
วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้น อยู่บนพื้นฐานความคิดของการระบุตำแหน่งแบบเฉพาะเจาะจงโดยการใช้ข้อมูลที่สามารถแสดงถึงตำแหน่งนั้นได้ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการสแกนลายนิ้วมือของมนุษย์ โดยข้อมูลที่แตกต่างกันสามารถใช้ในการสร้างลายนิ้วมือซึ่งทำให้สามารถชี้เฉพาะถึงส่วนต่างๆของพื้นที่นั้นๆได้ ซึ่งวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้นมีหลักการทำงานอยู่ 2 ส่วน กล่าวคือในส่วนแรกจะเป็นการรวบรวมข้อมูลและเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างลายลักษณ์ต้นแบบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง จากนั้นจะเก็บข้อมูลเหล่านั้นไว้ในฐานข้อมูล และในส่วนที่สองจะเป็นการนำลายลักษณ์ทดสอบมาเปรียบเทียบกับลายลักษณ์ต้นแบบเพื่อหาตำแหน่งที่เราต้องการ

#### 3.5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้นจะประกอบไปด้วยการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss) และ การประวิงเวลา (Delay time) โดยในการพิจารณาค่าการสูญเสียเชิงวิถีนั้นจะสามารถหาได้มาจากกำลังของสัญญาณที่รับได้ โดยค่ากำลังงานที่รับได้  $P_r(t)$  ในหน่วยเดซิเบล (dB) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.5)

$$P_r(t)[dB] = 20 \log |v_r(t)| \quad (3.5)$$

จากคุณสมบัติของสัญญาณแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นสัญญาณที่มีรูปคลื่นสัญญาณปรากฏเพียงชั่วขณะหรือเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณในทางเวลาที่แคบมาก ทำให้มีความละเอียดทางเวลาสูง จึงสามารถสังเกตกำลังงานของรูปคลื่นที่มาจากวิถีต่างๆ ได้โดยง่าย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณารูปคลื่นทั้งหมด 3 วิถี จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1, 2 และ 3 คือ  $PL_1 = -P_1$ ,  $PL_2 = -P_2$  และ  $PL_3 = -P_3$  ตามลำดับ และในทำนองเดียวกันการประวิงเวลาของวิถีที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเป็น  $t_1$ ,  $t_2$  และ  $t_3$  ตามลำดับ จากนั้นค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกเก็บไว้ในฐานข้อมูลเพื่อใช้เป็นลายลักษณ์ต้นแบบของสัญญาณแถบกว้างยิ่งในแต่ละตำแหน่ง โดยจะใช้คู่ลำดับ  $(x, y)$  แทนพิกัดตำแหน่งแกน  $x$  และแกน  $y$



รูปที่ 3.7 รูปคลื่นในการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

### 3.5.2 การสร้างลายลักษณ์ต้นแบบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

ในการสร้างแบบรูปการหาตำแหน่งต้นแบบด้วยสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้นนอกจากจะใช้พารามิเตอร์ซึ่งประกอบไปด้วยการสูญเสียเชิงวิถีและการประวิงเวลาแล้ว ยังใช้หลักการของการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation) [25] , ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) และทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) ในการสร้างลายลักษณ์ต้นแบบด้วย

#### 3.5.2.1 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation)

เป็นการพิจารณาชุดข้อมูล  $N + 1$  จุด  $(x_i, y_i)$  โดย  $i = 0, 1, \dots, N$  และเป็นไปตามสมการ

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_N = b \quad (3.6)$$

ซึ่งข้อมูลที่เราต้องการคือฟังก์ชัน  $S(x)$  ที่นิยามบน  $c$  ซึ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไขของการประมาณค่าในช่วงดังสมการ

$$S(x_i) = y_i, \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (3.7)$$

และ  $S^{(i)}(x)$ ,  $i = 0, 1, \dots, n-1$  เป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง โดยที่  $n$  เป็นดีกรีของ  $S(x)$  นั่นคือเงื่อนไขความราบเรียบนั่นเอง ซึ่งในที่นี้  $S(x)$  เป็นฟังก์ชันชนิดใดก็ได้ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กล่าวมาข้างต้น แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้ฟังก์ชันพหุนามดีกรี 1 และ 3 เท่านั้น ซึ่งการประมาณค่าในช่วงโดยใช้ทฤษฎีสไปไลน์นั้นจะแบบย่อออกได้เป็นสองชนิดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การประมาณค่าในช่วงเสมือนพหุนามเชิงเส้น (Linear spline interpolation)
- การประมาณค่าในช่วงเสมือนพหุนามกำลังสาม (Cubic spline interpolation)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การประมาณค่าในช่วงเสมือนพหุนามกำลังสาม โดยที่ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้นมีหลายฟังก์ชันแต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันคือ Natural cubic spline function ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติความเป็นหนึ่งเดียวฟังก์ชันนั้นคือสามารถหา Natural cubic spline function ได้ตัวเดียวเท่านั้นที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้นโดยที่ฟังก์ชัน  $S(x)$  จะถูกเรียกว่า Natural cubic spline function สำหรับชุดข้อมูล  $(x_i, y_i), i = 0, 1, \dots, N$  เมื่อ  $S(x)$  สอดคล้องกับเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1.  $S(x)$  เป็น polynomial degree ไม่เกิน 3 สำหรับแต่ละช่วงย่อย  $|x_{i-1}, x_i|, i = 1, 2, \dots, N$  นั่นคือ

$$S(x) = \begin{cases} s_1(x), & x \in |x_0, x_1| \\ s_2(x), & x \in |x_1, x_2| \\ \dots & \dots \\ s_N(x), & x \in |x_{N-1}, x_N| \end{cases} \quad (3.8)$$

โดยที่  $s_i(x), i = 1, 2, \dots, N$  เป็น polynomial degree ไม่เกิน 3

2.  $S(x), S'(x), S''(x)$  เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องบนช่วงปิด  $[a, b]$  นั่นคือ
  - (a)  $s_i(x_i) = s_{i+1}(x_i), i = 1, 2, \dots, N-1$
  - (b)  $s'_i(x_i) = s'_{i+1}(x_i), i = 1, 2, \dots, N-1$
  - (c)  $s''_i(x_i) = s''_{i+1}(x_i), i = 1, 2, \dots, N-1$
3.  $S''(x_0) = S''(x_N) = 0$

### 3.5.2.2 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation)

เมื่อมีความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ปริมาณ ( $x$  กับ  $y$ ) ตามธรรมชาติ ที่เราต้องการทราบกำหนดให้เป็น ฟังก์ชัน  $f(x)$  แต่เนื่องจากข้อมูลจากการทดลองของเรามีจำกัด เราอาจทราบข้อมูลเพียง 2 จุดเท่านั้น คือ จุด  $(x_0, y_0)$  กับ จุด  $(x_1, y_1)$  เราสามารถสร้างสมการเส้นตรงที่ unique ผ่านจุดทั้งสองนี้ สมการเส้นตรงที่เราหาได้ กำหนดให้เป็นสมการ  $y = P_1(x)$  ที่นิยามในช่วง

$x \in [x_0, x_1]$  หากเราต้องการทราบค่าของฟังก์ชัน  $f(x_i)$  ที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ กำหนดให้เป็น  $x_i$  ดังรูปที่ 5.4 ในที่นี้เราจะพบว่าจุดต่างๆ บนแกน  $x$  เรียงตัวกันดังนี้ คือ  $x_0 < x_i < x_1$  เนื่องจากเราไม่ทราบ  $f(x)$  ในธรรมชาติ เราเพียงแค่มียุคข้อมูล 2 จุด และสมการเส้นตรงที่ผ่าน 2 จุดนั้น เราจึงทำการประมาณฟังก์ชันจริงในธรรมชาติ ด้วยฟังก์ชันหรือสมการเส้นตรงที่เราสร้างขึ้น  $f(x) \approx P_1(x)$  ฉะนั้นค่าของฟังก์ชันที่เราสนใจ  $f(x_i)$  ก็จะประมาณได้ด้วย  $P_1(x_i)$  นั่นเอง

สมการหลัก (key function) ที่ใช้อธิบายกราฟเส้นตรงผ่านจุด 2 จุด คือ สมการเส้นตรง หรือสมการ Polynomial อันดับหนึ่ง เขียนได้ดังสมการ (3.9)

$$f(x) \approx P_1(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (3.9)$$

### 3.5.2.3 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation)

การประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) หรือเรียกอีกอย่างได้ว่า Piecewise interpolation ถ้ามีเซตของจุดบนแกน  $x$  ทั้งหมด  $n+1$  จุดซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไข  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  โดยจุดเหล่านี้เรียกว่าจุดตรึง ละเอียดเราสมมติต่อไปอีกว่า เรามีค่าจำนวนเต็ม  $k \leq 0$  ใดๆ แล้ว ฟังก์ชันเสมือนพหุนามที่มีดีกรีเป็น  $k$  และมีจุดตรึงเป็น  $x_1, x_2, \dots, x_n$  คือฟังก์ชัน  $S$  ที่มีคุณสมบัติดังนี้

1. ในแต่ละช่วง  $[x_{i-1}, x_i]$  นั้น ฟังก์ชัน  $S$  เป็นฟังก์ชันพหุนามที่มีดีกรี  $\leq k$ ,
2. ในช่วง  $[x_0, x_1]$  ฟังก์ชัน  $S$  มีอนุพันธ์ที่ต่อเนื่องจำนวน  $k-1$  อนุพันธ์

กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือฟังก์ชัน  $S$  เป็น Piecewise Polynomial ที่มีดีกรีสูงสุดคือ  $k$  ที่มีอนุพันธ์ที่ต่อเนื่องทุกอนุพันธ์ตั้งแต่อันดับที่ 1 ถึงอันดับที่  $k-1$

ดังนั้นฟังก์ชันเสมือนพหุนามที่มีดีกรีเป็น 0 คือ ค่าคงที่เป็นช่วงๆ (Piecewise Constants) นั่นเอง และฟังก์ชันเสมือนพหุนามดีกรีศูนย์นี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$S_0(x) \begin{cases} c_1, & x \in [x_0, x_1] \\ c_2, & x \in [x_1, x_2] \\ \dots \\ c_n, & x \in [x_{n-1}, x_n] \end{cases} \quad (3.10)$$

เมื่อ  $c_i$  คือค่าคงที่ใด ในทำนองเดียวกัน ฟังก์ชันเสมือนพหุนามดีกรี 1 คือสมการเส้นตรงเป็นช่วงๆ (Piecewise Linear) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$S_0(x) \begin{cases} a_1 + b_1x, & x \in [x_0, x_1] \\ a_2 + b_2x, & x \in [x_1, x_2] \\ \dots \\ a_n + b_nx, & x \in [x_{n-1}, x_n] \end{cases} \quad (3.11)$$

เมื่อ  $a_i$  และ  $b_i$  คือค่าคงที่ใดๆ

### 3.5.3 วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้การเปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ของลายลักษณ์ต้นแบบ กับพารามิเตอร์ของลายลักษณ์ทดสอบในทุกตำแหน่ง โดยขั้นตอนแรกจะทำการหาพารามิเตอร์จากกำลังของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่รับได้เหมือนกับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างลายลักษณ์ต้นแบบ ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้พารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับได้เพื่อใช้ในการสร้างลายลักษณ์ทดสอบมีตัวห้อย  $t$  เพิ่มขึ้นมา จะได้พารามิเตอร์ของลายลักษณ์ทดสอบเป็น  $PL_{t_1}$ ,  $PL_{t_2}$  และ  $PL_{t_3}$  คือการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ พารามิเตอร์  $t_{t_1}$ ,  $t_{t_2}$  และ  $t_{t_3}$  เป็นการประวิงเวลาของวิถีที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากนั้นจะนำพารามิเตอร์ของลายลักษณ์ทดสอบไปเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ของลายลักษณ์ต้นแบบในทุกตำแหน่ง โดยสามารถคำนวณหาความต่างของพารามิเตอร์ระหว่างลายลักษณ์ต้นแบบและลายลักษณ์ทดสอบในแต่ละตำแหน่ง โดยที่ค่าความต่างของลายลักษณ์  $e_f(x, y)$  ในตำแหน่ง  $(x, y)$  หาได้จากสมการที่ (3.12)

$$e_f(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left\{ \frac{[PL_i(x, y) - PL_{ti}]^2}{\sigma_{PL_i}^2} + \frac{[t_i(x, y) - t_{ti}]^2}{\sigma_{t_i}^2} \right\}} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $\sigma_{PL_1}$ ,  $\sigma_{PL_2}$  และ  $\sigma_{PL_3}$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1, 2 และ 3  
 $\sigma_{t_1}$ ,  $\sigma_{t_2}$  และ  $\sigma_{t_3}$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1, 2 และ 3  
 $PL_i$  คือ การสูญเสียเชิงวิถีในการสร้างลายลักษณ์ต้นแบบของวิถีที่  $i$   
 $PL_{ti}$  คือ การสูญเสียเชิงวิถีในการสร้างลายลักษณ์ทดสอบของวิถีที่  $i$   
 $t_i$  คือ การประวิงเวลาในการสร้างลายลักษณ์ต้นแบบของวิถีที่  $i$   
 $t_{ti}$  คือ การประวิงเวลาในการสร้างลายลักษณ์ทดสอบของวิถีที่  $i$

พิกัดตำแหน่งที่คาดคะเนได้จากวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง  $(x_c, y_c)$  สามารถนิยามได้จากพิกัดตำแหน่งที่มีค่าความต่างของลายลักษณ์ที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$(x_c, y_c) = \arg \min_{x, y} e_f(x, y) \quad (3.13)$$

### 3.6 การวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือแบบแถบกว้างยิ่ง

การวิเคราะห์หาความเที่ยงตรงของวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาในเทอมของค่าความผิดพลาดของระยะทางซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความเที่ยงตรงมากเมื่อมีค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อย โดยในที่นี้ได้กำหนดให้พิกัดตำแหน่ง  $(x_c, y_c)$  เป็นพิกัดตำแหน่งที่ได้จากวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง และกำหนดให้พิกัดตำแหน่ง  $(x_c, y_c)$  เป็นพิกัดที่ถูกต้อง ส่วนค่าความผิดพลาดของระยะทาง  $e_d$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.14)

$$e_d = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $(x_e, y_e)$  คือ พิกัดตำแหน่งที่ได้จากวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง  
 $(x_c, y_c)$  คือ พิกัดที่ถูกต้อง

ค่าผิดพลาดระยะทางนี้จะเป็นการวัดระยะที่ใช้ในการวิเคราะห์ถึงความเที่ยงตรงของการหาตำแหน่งโดยใช้แบบรูปการหาตำแหน่งด้วยสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งจะมีความเที่ยงตรงมากเมื่อมีค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อย

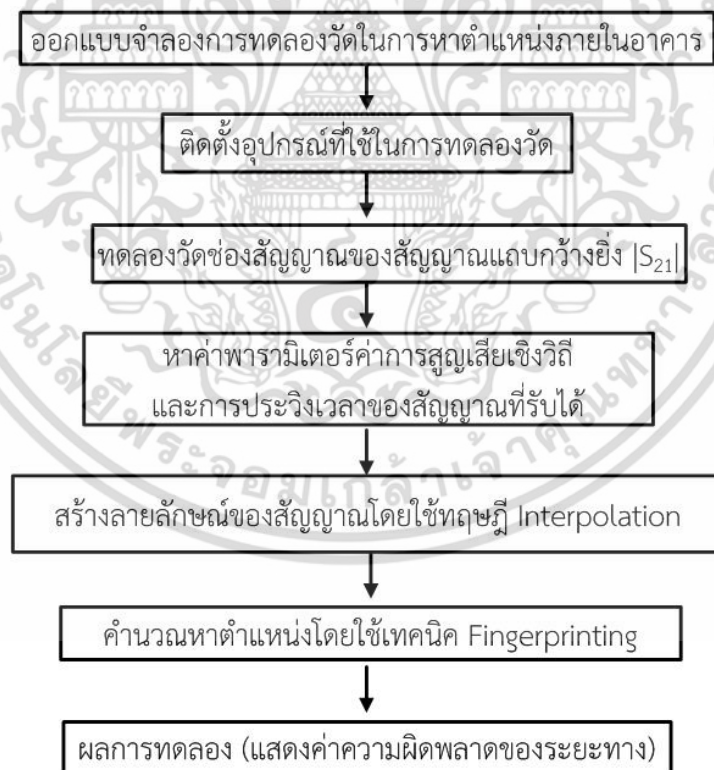
### 3.7 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์การหาตำแหน่ง โดยใช้วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือ และได้นำเสนอเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง โดยได้ทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ซึ่งประกอบไปด้วยการสูญเสียเชิงวิถีและการประวิงเวลา รวมถึงได้ใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ซึ่งประกอบไปด้วย ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) และ ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) เพื่อช่วยในการสร้างลายลักษณ์ต้นแบบด้วย สุดท้ายได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ความแม่นยำในการหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง

## บทที่ 4 การทดลองวิจัย

### 4.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้วิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือบนพื้นฐานของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง โดยทำการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณของสถานะแวดล้อมบริเวณทางเดิน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (VNA) ในช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz โดยได้แบ่งการวัดออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกทำการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณ เพื่อทำการเก็บค่าพารามิเตอร์คือค่าการสูญเสียเชิงวิถีและการประวิงเวลาของสัญญาณที่รับได้จำนวน 3 วิธี ในบริเวณที่ต้องการหาตำแหน่งทั้งหมด จากนั้นนำมาสร้างเป็นลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล และในส่วนที่สองทำการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ต้องการหาตำแหน่งและคำนวณหาพารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับได้เพื่อใช้ในการประมาณหาตำแหน่งจากพารามิเตอร์นั้นๆ โดยผลของความเที่ยงตรงจะแสดงในรูปของ CDF ซึ่งขั้นตอนการทดลองสามารถแสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของขั้นตอนการทดลองวิจัย

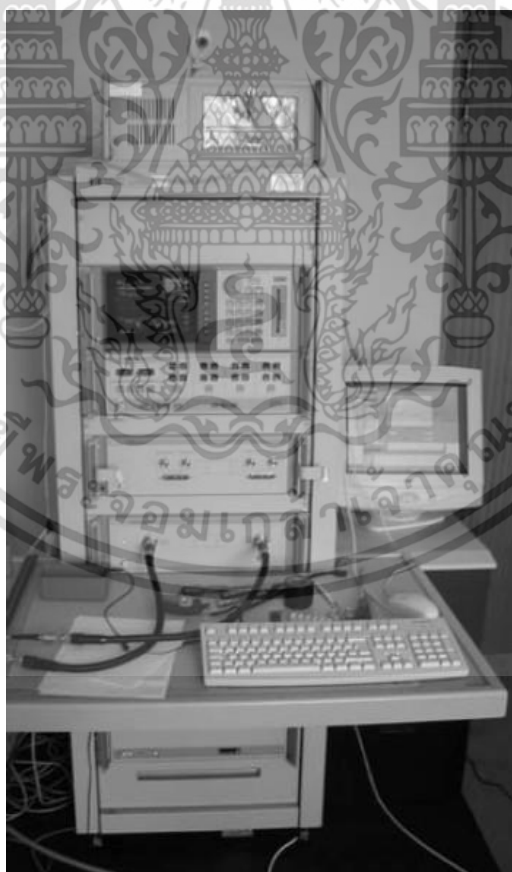
## 4.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัด

### 4.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

ในการศึกษาการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือบนพื้นฐานของสัญญาณแถบกว้างยั้งนั้น การทดสอบจะมีการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณของสภาวะแวดล้อมบริเวณทางเดิน โดยจะใช้เครื่องมือวัดเฉพาะทางดังแสดงในรูปที่ 4.2 อันประกอบไปด้วย

- เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์รุ่น HP8510C
- ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-Parameter test set) รุ่น HP8514B
- ตัวสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesized sweeper) รุ่น HP83620A

โดยอุปกรณ์ทั้งหมดนั้นจะถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ที่เชื่อมต่อผ่านพอร์ต GPIB (General Purpose Interface Bus) ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์ที่จะมีคุณสมบัติที่สามารถทดสอบสัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตหรือสองพอร์ต ซึ่งในการทดลองนี้จะเป็นการวัดช่องสัญญาณแบบสองพอร์ต โดยพอร์ตที่หนึ่งคือ พอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (Tx) และพอร์ตที่สองคือ พอร์ตที่ใช้ในการรับสัญญาณ (Rx) โดยที่ โดยที่ปลายของพอร์ตทั้งด้านรับและด้านส่งจะถูกต่อเข้ากับสายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical antenna) หลังจากนั้นจะนำค่าที่วัดได้ซึ่งอยู่ในรูปของโดเมนความถี่ไปใช้วิเคราะห์ผลต่อไป

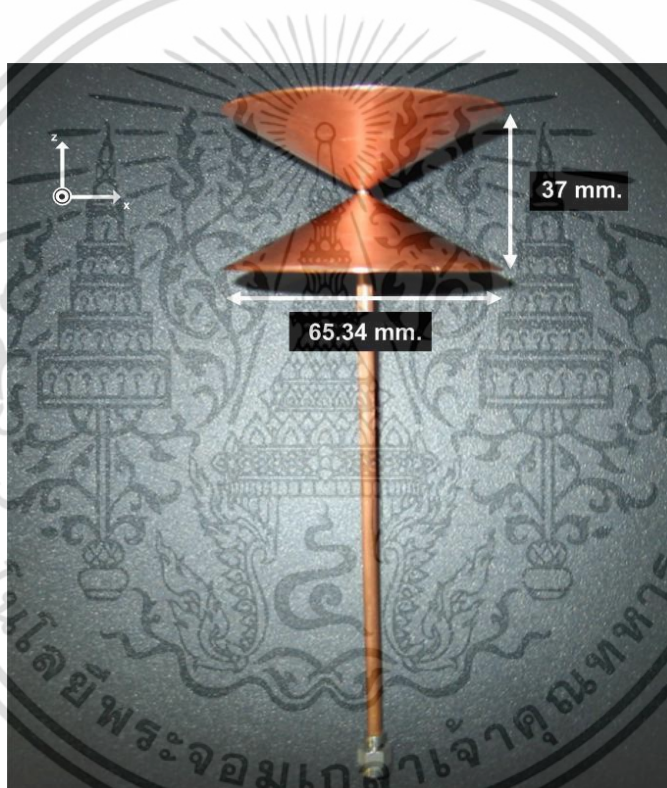


รูปที่ 4.2 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวิจัย [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

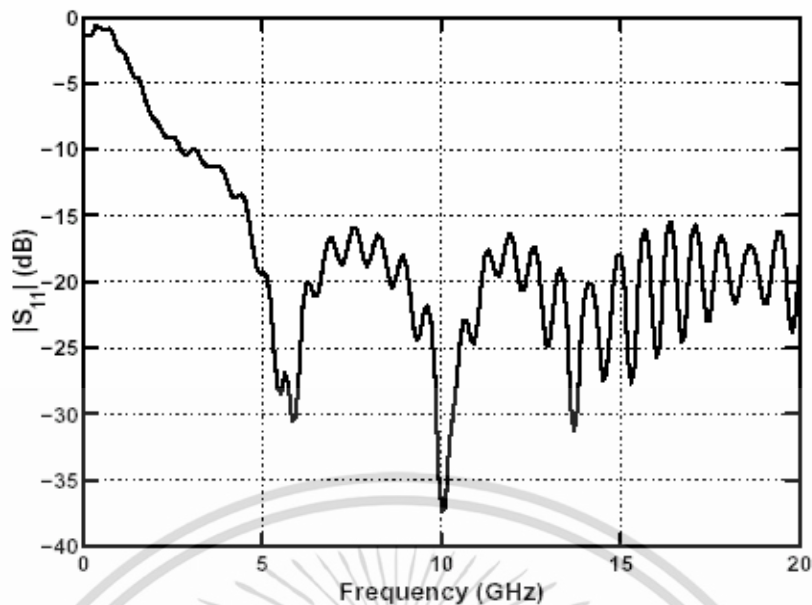
#### 4.2.2 สายอากาศแบบกรวยคู่

ในการส่งสัญญาณแบบไร้สายจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำคัญอย่างหนึ่งคือ สายอากาศ ซึ่งจะอยู่ทางด้านส่งและทางด้านรับ โดยทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แพร่กระจายคลื่นผ่านอากาศไปยังสายอากาศด้านรับแล้วเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับได้เป็นสัญญาณไฟฟ้าตามเดิม ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical antenna) ที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานของแต่ละกรวยเป็น 65.34 mm และมีระยะห่างระหว่างฐานกรวยทั้งสองเป็น 37 mm สายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในมุมกวาด (Azimuth) โดยมีอัตราขยาย (Gain) อยู่ในช่วง 1.5 ถึง 15.0 dBi และมีช่วงความถี่การแผ่กระจายที่กว้างครอบคลุมช่วงความถี่ที่ใช้วัด อีกทั้งยังเป็นสายอากาศที่สร้างง่ายและมีราคาถูกอีกด้วย ซึ่งการทดลองนี้จะใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ทั้งทางด้านรับและด้านส่ง โดยโครงสร้างของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3



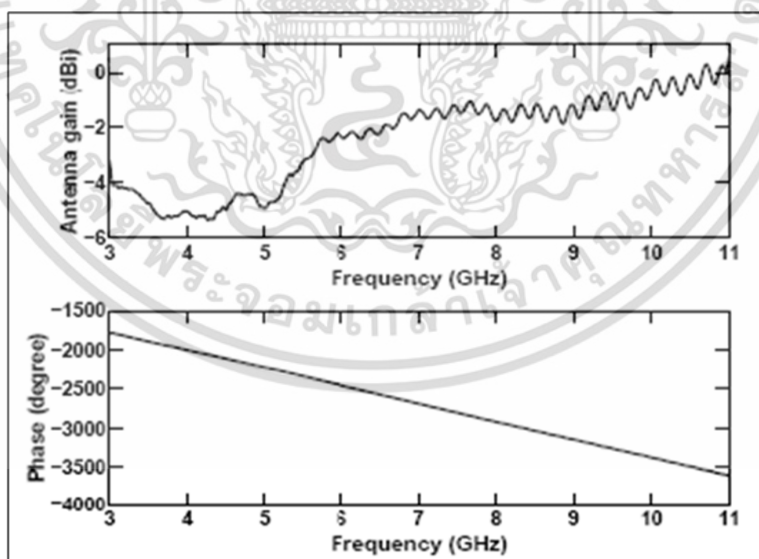
รูปที่ 4.3 โครงสร้างของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวิจัย [26]

สายอากาศแบบกรวยคู่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับต่ำกว่า  $-10$  dB ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายอากาศแบบกรวยคู่สามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งจากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficient)  $|S_{11}|$  ของสายอากาศกรวยคู่ จะเห็นว่าในช่วงความถี่ของแถบกว้างยิ่งคือช่วงตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz



รูปที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficient)  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแบบกรวยคู่ [27]

สายอากาศแบบกรวยคู่มีเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศมีความเป็นเชิงเส้นที่มาก โดยขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลองวิจัย แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศแบบกรวยคู่ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ

ในการทดลองวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการวัดออกเป็นสองส่วนคือ ในส่วนแรกจะเป็นการวัดคุณสมบัติของช่องเพื่อนำมาสร้างเป็นลายลักษณ์ต้นแบบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง และในส่วนที่สองจะเป็นการวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณเพื่อนำมาสร้างเป็นลายลักษณ์ทดสอบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง โดยในแบบจำลองนี้ได้ทำการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณของสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร บริเวณทางเดินของตึก 12 ชั้น อาคาร E คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งทั้งหมด โดยใช้จำนวนจุดความถี่ 801 จุด แบบจำลองนี้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ทั้งทางด้านส่งและทางด้านรับ และมีแนวการวางสายอากาศทั้งทางด้านส่งและรับในแนวนอน โดยมีความสูงของสายอากาศทั้งทางด้านส่งและด้านรับความสูงเป็น 1 เมตร โดยวางสายอากาศด้านส่งไว้บริเวณจุดกลางของทางเดิน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบทดลองนี้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1

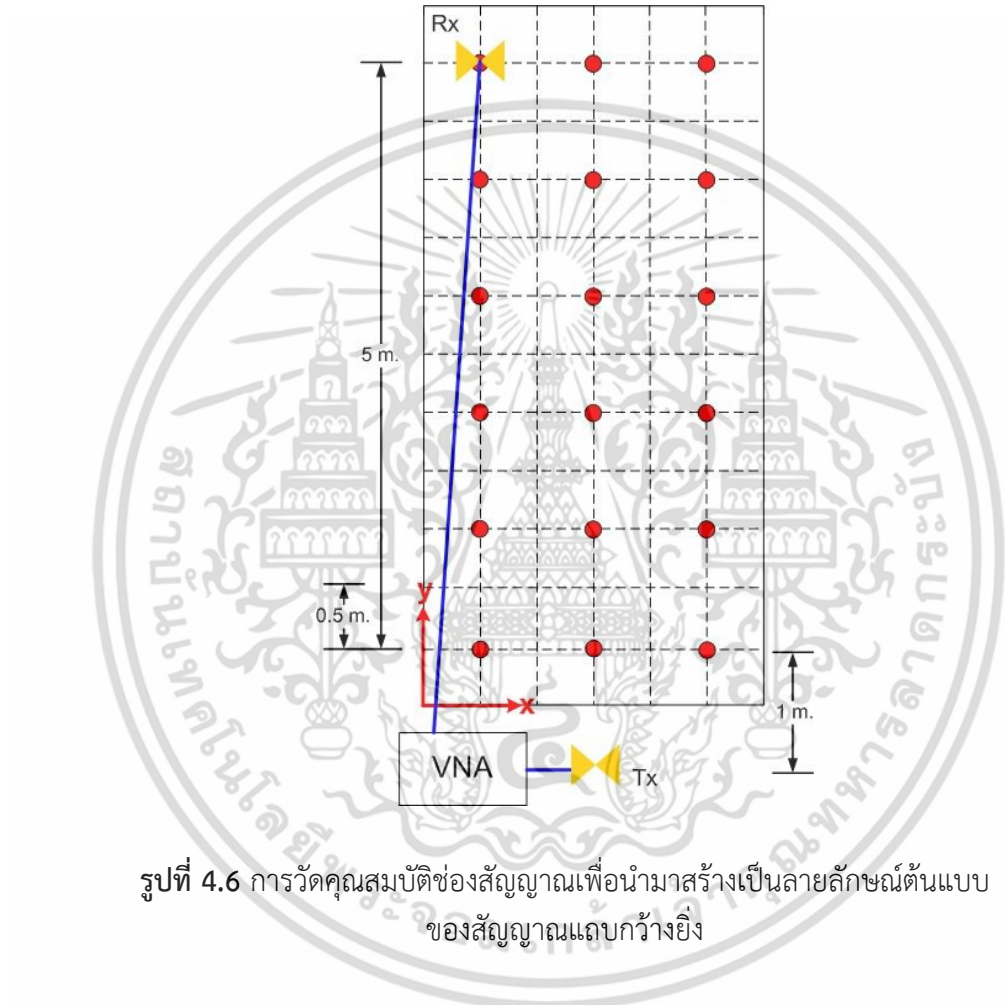
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ทดสอบ
ช่วงความถี่	3 GHz – 11 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
ชนิดสายอากาศ	กรวยคู่
การวางสายอากาศทางด้านส่งและทางด้านรับ	แนวนอน
ความสูงของสายอากาศด้านส่ง (Tx)	1 เมตร
ความสูงของสายอากาศด้านรับ (Rx)	1 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

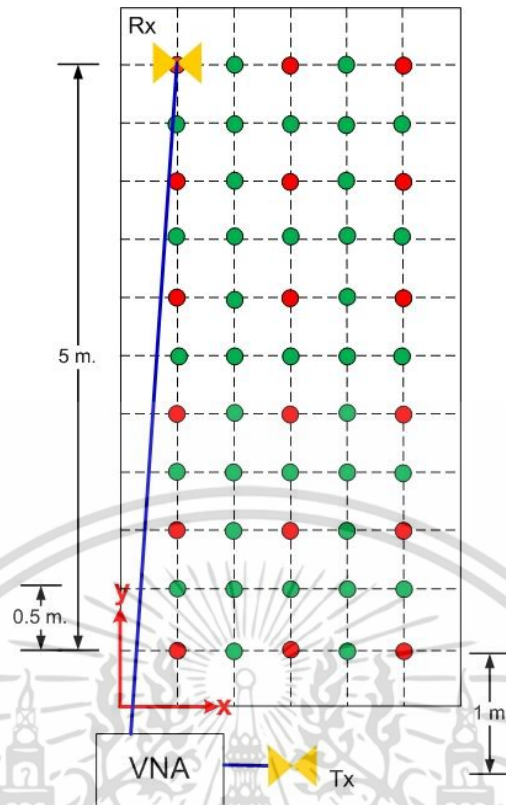
สำหรับการวัดคุณสมบัติของสัญญาณเพื่อนำมาสร้างเป็นลายลักษณ์ต้นแบบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง โดยทำการวัดทั้งหมด 18 จุด โดยในแต่ละจุดมีระยะห่างในแนวแกน x และ y เป็นระยะทาง 1 m โดยแสดงดังรูปที่ 4.6

สำหรับการวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณเพื่อนำมาสร้างเป็นลายลักษณ์ทดสอบของสัญญาณแถบกว้างยิ่งรูปที่ 4.7 โดยจะทำการวัดทั้งหมด 55 จุด โดยในแต่ละจุดห่างกันในแนวแกน x และ y เป็นระยะทาง 0.5 m



รูปที่ 4.6 การวัดคุณสมบัติของสัญญาณเพื่อนำมาสร้างเป็นลายลักษณ์ต้นแบบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การวัดคุณสมบัติช่องสัญญาณเพื่อนำมาสร้างเป็นลายลักษณ์ทดสอบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

#### 4.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัด คือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ และสายอากาศแบบกรวยคู่ และสุดท้ายได้กล่าวถึงแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งจะแสดงแบบจำลองการทดลองวัด สถานที่ที่ใช้ในการทดลองวัด และลักษณะการจัดวางสายอากาศ

## บทที่ 5

# การทดลองวิจัยและการอภิปรายผล

### 5.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือบนพื้นฐานของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง (UWB fingerprinting-liked) โดยกำหนดให้สัญญาณส่งมีลักษณะเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่มีความถี่อยู่ในช่วง 3.1 GHz และ 10.6 GHz ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดสูงที่ 1 V และแบนด์วิดท์ของสัญญาณมีค่าเป็น 7.5 GHz ในบทนี้จะแสดงถึงผลการทดลองโดยแบบจำลองได้แสดงถึงลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1, 2 และ 3 และการประวิงเวลาของวิถีที่ 1, 2 และ 3 โดยผลของความเที่ยงตรงจะแสดงอยู่ในทอมของค่าความผิดพลาดของระยะทาง และในตอนท้ายจะแสดงถึง CDF ของค่าความผิดพลาดของระยะทาง

### 5.2 ผลการทดลองวิจัยแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

แบบจำลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความเที่ยงตรงในการหาตำแหน่งของวิธีการหาตำแหน่งโดยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งโดยนำเอาทฤษฎีของการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเหมือนพหุนาม (Spline Interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) และ ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) มาใช้ในการประมาณค่าการหาตำแหน่งด้วย ในการทดลองจะทำการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณเพื่อนำมาสร้างลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งให้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ในช่วง 3.1 GHz และ 10.6 GHz จากนั้นทำการวัดเพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีและการประวิงเวลาของสัญญาณที่รับได้ในบริเวณที่ต้องการหาตำแหน่ง โดยจะเก็บค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 วิธี จากนั้นทำประมาณค่าตำแหน่งของข้อมูลที่ถูกวัด โดยใช้ทฤษฎีของการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเหมือนพหุนาม (Spline Interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) และ ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) จากเดิม (รูปที่ 4.6) ตำแหน่งของข้อมูลที่ถูกวัดจะห่างกันตำแหน่งละ 1 เมตร จะถูกประมาณค่าออกเป็น 0.01 เมตร จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณเพื่อนำมาสร้างเป็นลายลักษณะทดสอบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง นำพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีและการประวิงเวลาของสัญญาณที่รับได้มาทำการเปรียบเทียบประมาณหาตำแหน่ง และโดยผลของความเที่ยงตรงจะแสดงในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function: CDF)

## 5.2.1 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

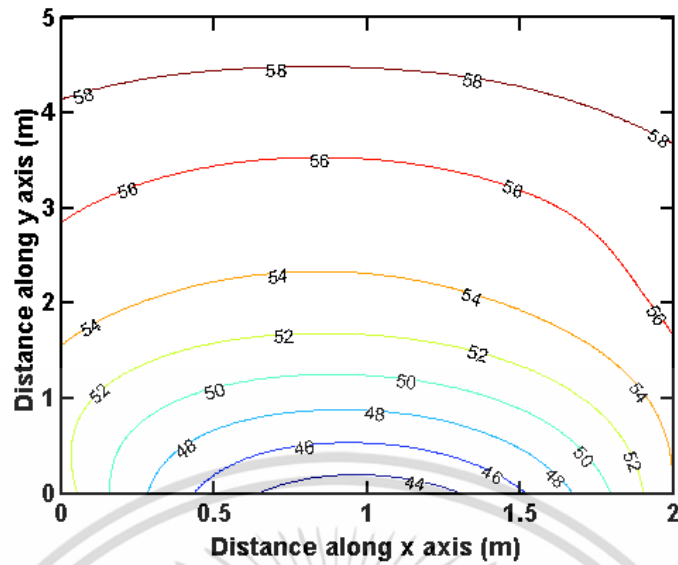
### 5.2.1.1 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation)

สำหรับการสร้างลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้น จะทำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1, 2 และ 3 และข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ถูกวัดห่างกัน 1 เมตรถูกประมาณค่าออกเป็น 0.01 เมตรโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation)

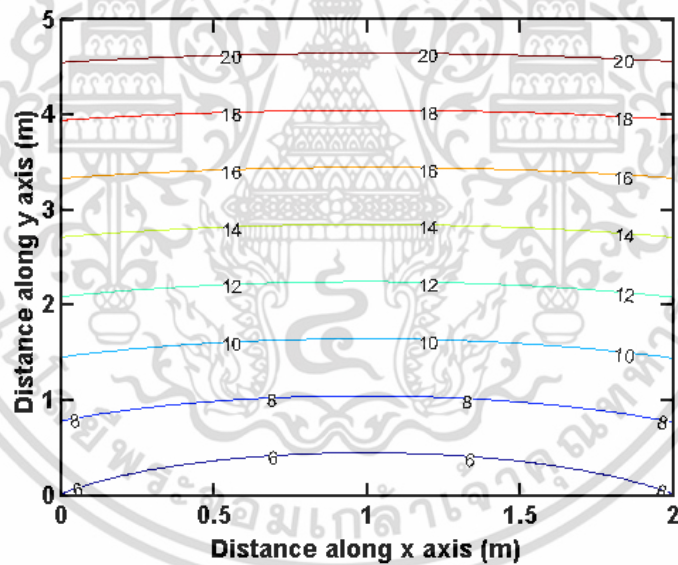
รูปที่ 5.1 แสดงลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation) จากข้อมูลการสูญเสียเชิงวิถีที่วัดได้ การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1 จะมีค่าอยู่ในช่วง 42.83 dB ถึง 59.78 dB มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 51.93 dB

รูปที่ 5.2 แสดงลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation) จากข้อมูลการประวิงเวลาที่วัดได้ การประวิงเวลาของวิถีที่ 1 จะมีค่าอยู่ในช่วง 4.49 ns ถึง 21.46 ns มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 67.05 ns





รูปที่ 5.1 ลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation)

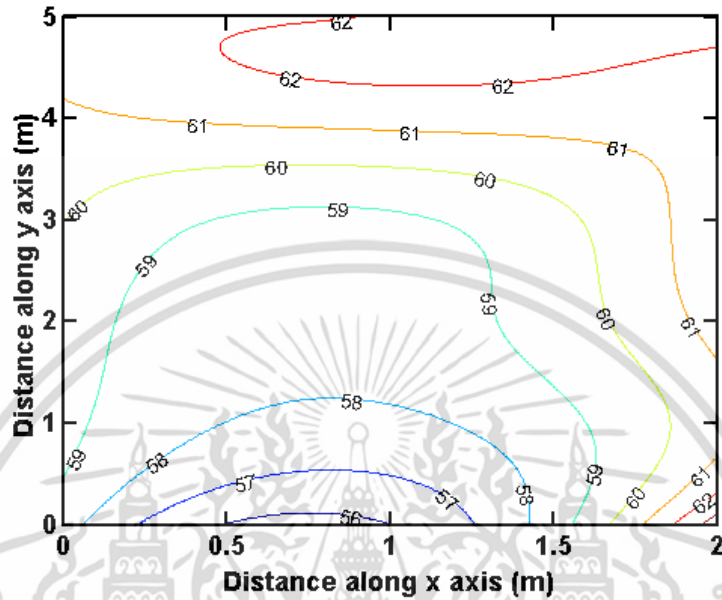


รูปที่ 5.2 ลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation)

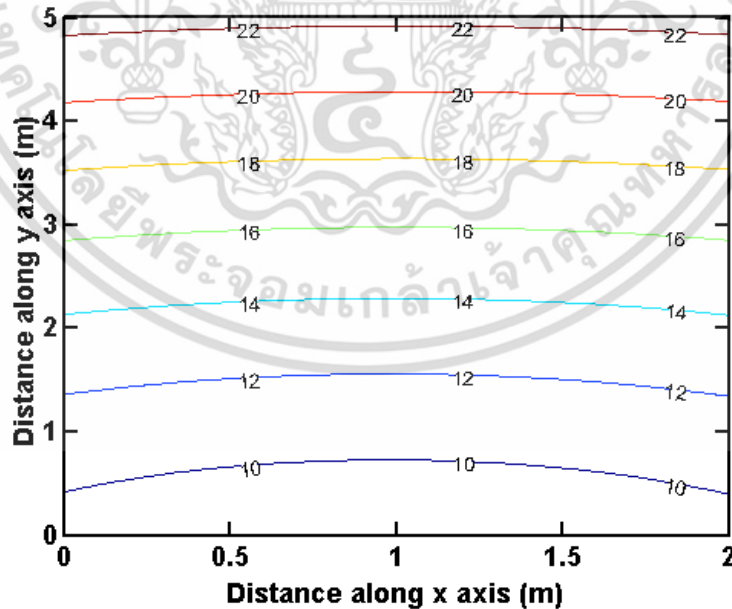
รูปที่ 5.3 แสดงลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation) จากข้อมูลการสูญเสียเชิงวิถีที่วัดได้ การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 2 จะมีค่าอยู่ในช่วง 55.66 dB ถึง 63.63 dB มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 20.24 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.4 แสดงลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่นำมาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation) จากข้อมูลการประวิงเวลาที่วัดได้ การประวิงเวลาของวิถีที่ 2 จะมีค่าอยู่ในช่วง 8.63 ns ถึง 22.53 ns มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 56.76 ns



รูปที่ 5.3 ลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่นำจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation)

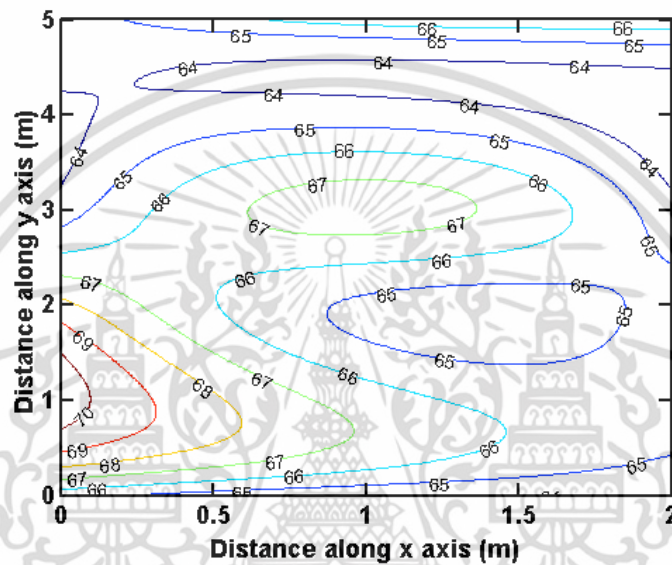


รูปที่ 5.4 ลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่นำจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation)

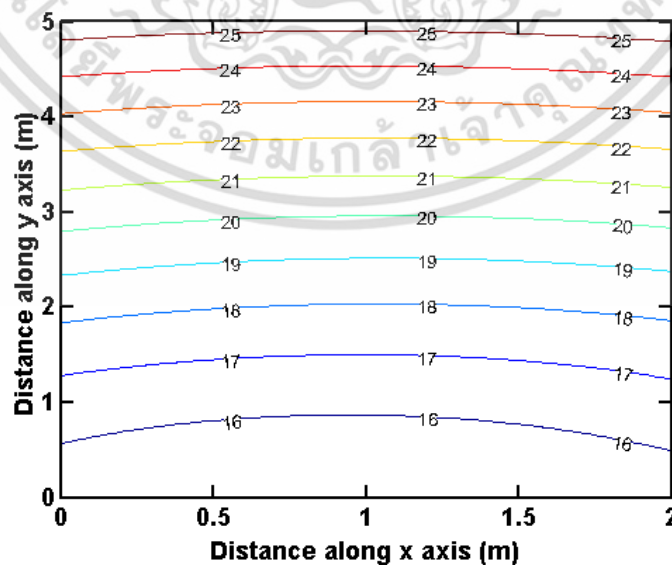
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.5 แสดงลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation) จากข้อมูลการสูญเสียเชิงวิถีที่วัดได้ การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 3 จะมีค่าอยู่ในช่วง 63.24 dB ถึง 70.54 dB มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 17.65 dB

สำหรับรูปที่ 5.6 แสดงลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากการประวิงเวลาของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation) จากข้อมูลการประวิงเวลาที่วัดได้ การประวิงเวลาของวิถีที่ 3 จะมีค่าอยู่ในช่วง 15.06 ns ถึง 25.55 ns มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 43.02 ns



รูปที่ 5.5 ลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation)



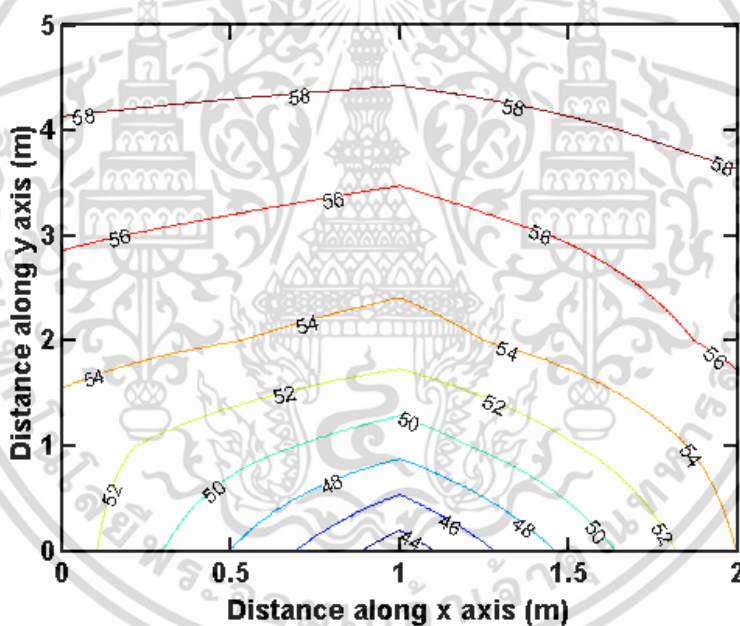
รูปที่ 5.6 ลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation) การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.1.2 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation)

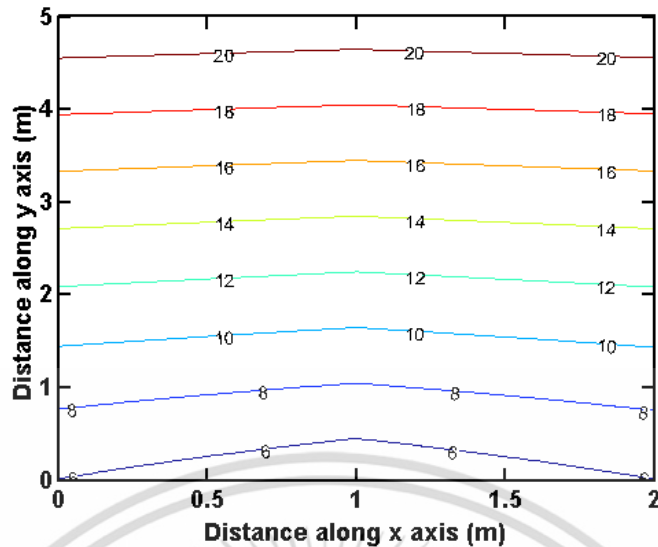
สำหรับการสร้างลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้น จะทำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1, 2 และ 3 และข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ถูกวัดห่างกัน 1 เมตรถูกประมาณค่าออกเป็น 0.01 เมตรโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation)

รูปที่ 5.7 แสดงลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) จากข้อมูลการสูญเสียเชิงวิถีที่วัดได้ การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1 จะมีค่าอยู่ในช่วง 42.84 dB ถึง 59.78 dB มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 45.98 dB

รูปที่ 5.8 แสดงลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) จากข้อมูลการประวิงเวลาที่วัดได้ การประวิงเวลาของวิถีที่ 1 จะมีค่าอยู่ในช่วง 4.49 ns ถึง 21.46 ns มีค่าส่วนเบี่ยงเบนเบนมาตรฐานเป็น 66.32 ns



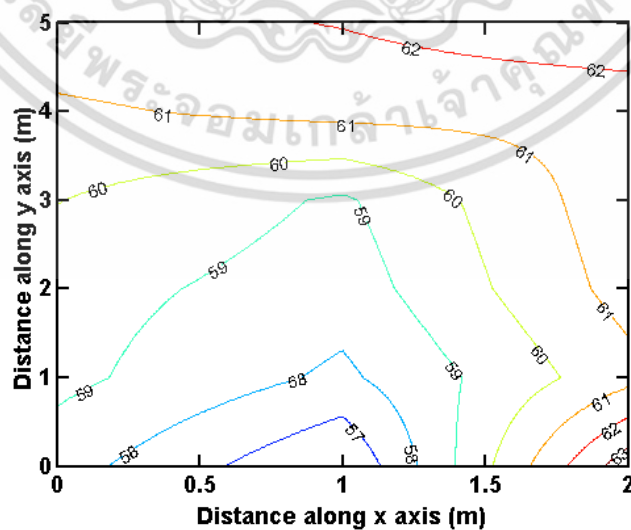
รูปที่ 5.7 ลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation)



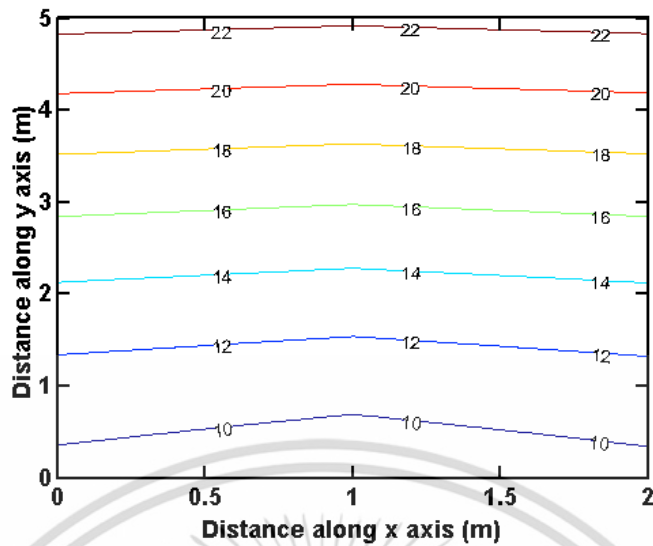
รูปที่ 5.8 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation)

รูปที่ 5.9 แสดงลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) จากข้อมูลการสูญเสียเชิงวิถีที่วัดได้ การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 2 จะมีค่าอยู่ในช่วง 55.99 dB ถึง 63.63 dB มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 16.74 dB

รูปที่ 5.10 แสดงลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) จากข้อมูลการประวิงเวลาที่วัดได้ การประวิงเวลาของวิถีที่ 2 จะมีค่าอยู่ในช่วง 8.63 ns ถึง 22.53 ns มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 56.17 ns



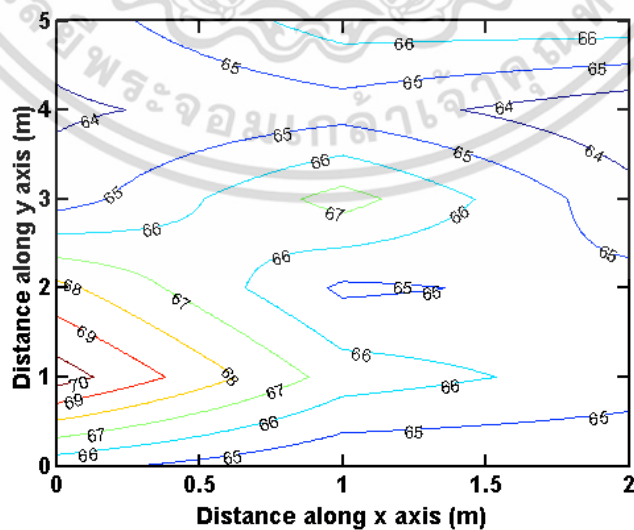
รูปที่ 5.9 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation)



รูปที่ 5.10 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation)

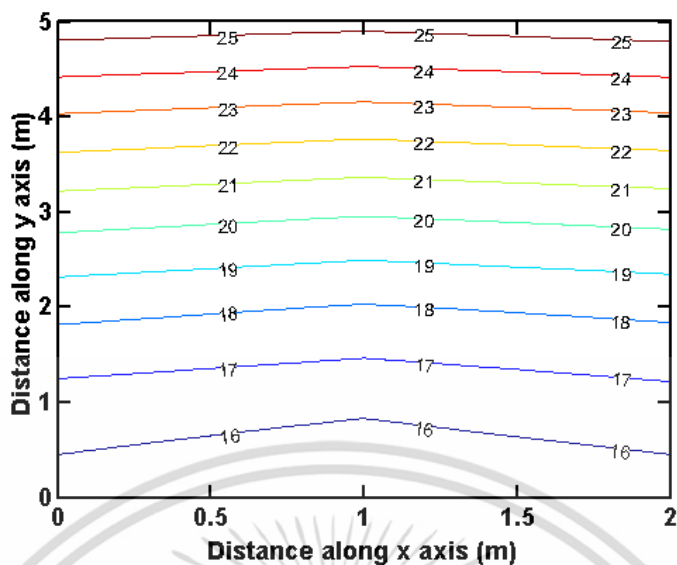
รูปที่ 5.11 แสดงลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) จากข้อมูลการสูญเสียเชิงวิถีที่วัดได้ การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 3 จะมีค่าอยู่ในช่วง 63.25 dB ถึง 70.52 dB มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 15.23 dB

รูปที่ 5.12 แสดงลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) จากข้อมูลการประวิงเวลาที่วัดได้ การประวิงเวลาของวิถีที่ 3 จะมีค่าอยู่ในช่วง 15.06 ns ถึง 25.55 ns มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 42.68 ns



รูปที่ 5.11 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



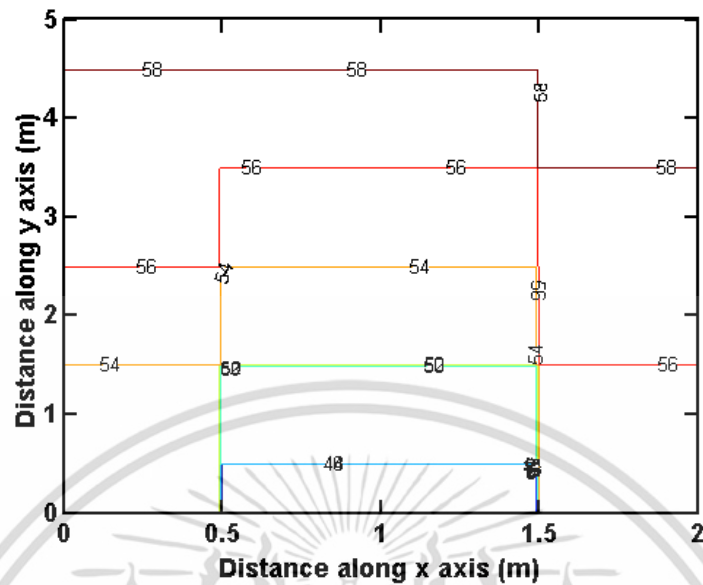
รูปที่ 5.12 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation)

### 5.2.1.3 ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation)

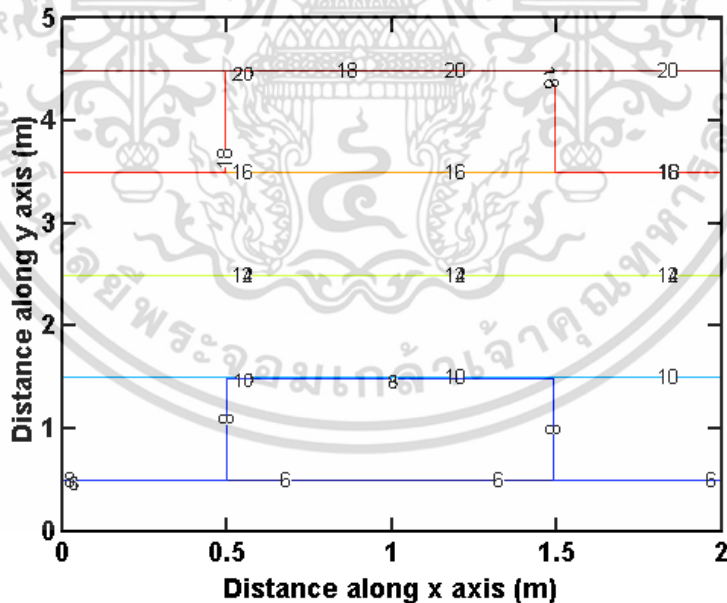
สำหรับการสร้างลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้น จะทำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1, 2 และ 3 และข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ถูกวัดห่างกัน 1 เมตรถูกประมาณค่าออกเป็น 0.01 เมตรโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation)

รูปที่ 5.13 แสดงลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) จากข้อมูลการสูญเสียเชิงวิถีที่วัดได้ การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1 จะมีค่าอยู่ในช่วง 42.84 dB ถึง 59.78 dB มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 51.17 dB

รูปที่ 5.14 แสดงลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) จากข้อมูลการประวิงเวลาที่วัดได้ การประวิงเวลาของวิถีที่ 1 จะมีค่าอยู่ในช่วง 4.49 ns ถึง 21.46 ns มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 68.92 ns



รูปที่ 5.13 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation)

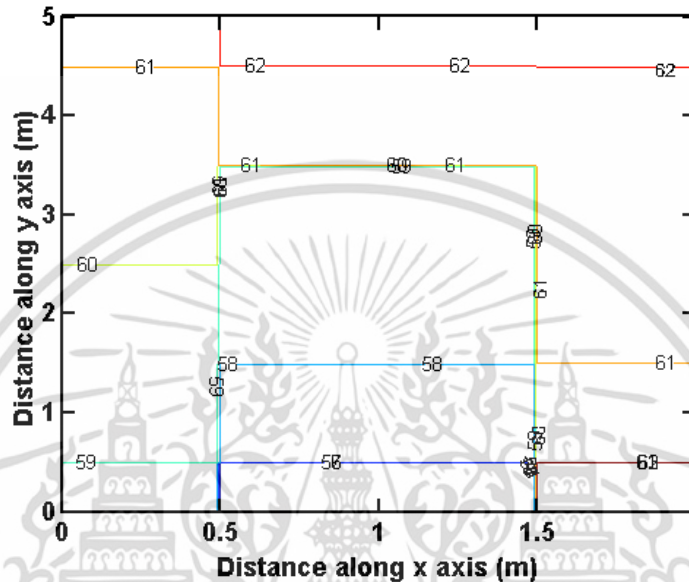


รูปที่ 5.14 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 1 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation)

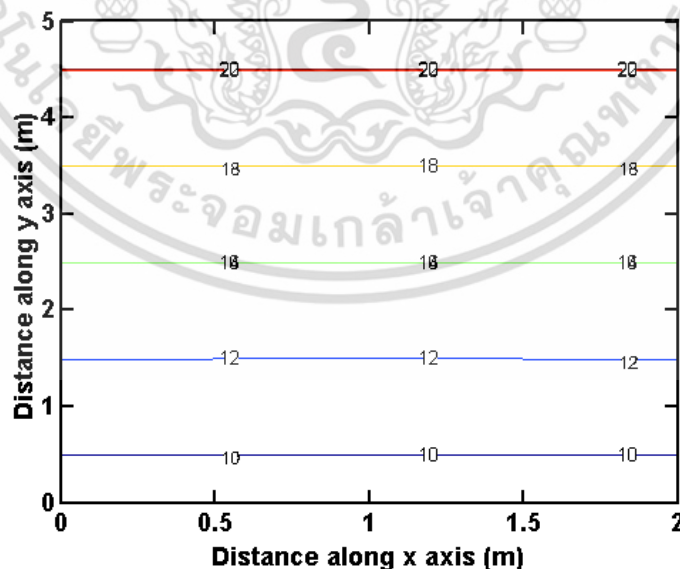
ในรูปที่ 5.15 แสดงลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่ทำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Neighbor Interpolation) จากข้อมูลการสูญเสียเชิงวิถีที่วัดได้ การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 2 จะมีค่าอยู่ในช่วง 55.99 dB ถึง 63.63 dB มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 20.13 dB

รูปที่ 5.16 แสดงลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่นำมาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) จากข้อมูลการประวิงเวลาที่วัดได้ การประวิงเวลาของวิถีที่ 2 จะมีค่าอยู่ในช่วง 8.63 ns ถึง 22.53 ns มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 58.35 ns



รูปที่ 5.15 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่นำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation)

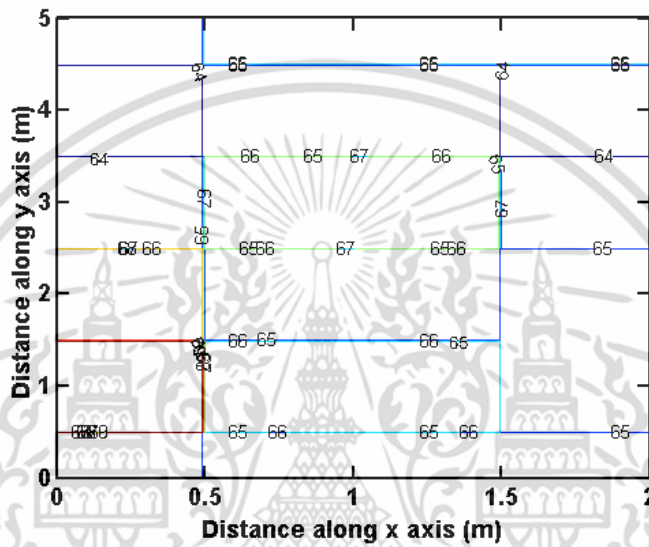


รูปที่ 5.16 ลายลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่นำมาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation)

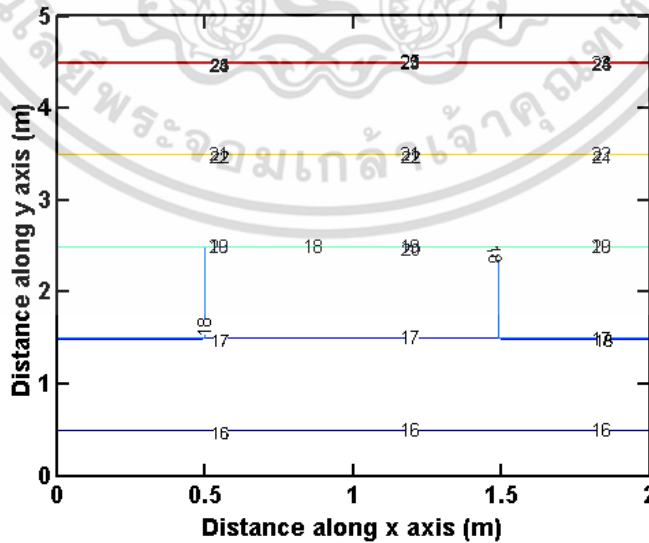
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.17 แสดงลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่นำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) จากข้อมูลการสูญเสียเชิงวิถีที่วัดได้ การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 3 จะมีค่าอยู่ในช่วง 63.25 dB ถึง 70.52 dB มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 23.17 dB

รูปที่ 5.18 แสดงลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่นำมาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) จากข้อมูลการประวิงเวลาที่วัดได้ การประวิงเวลาของวิถีที่ 3 จะมีค่าอยู่ในช่วง 15.06 ns ถึง 25.55 ns มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 44.41 ns



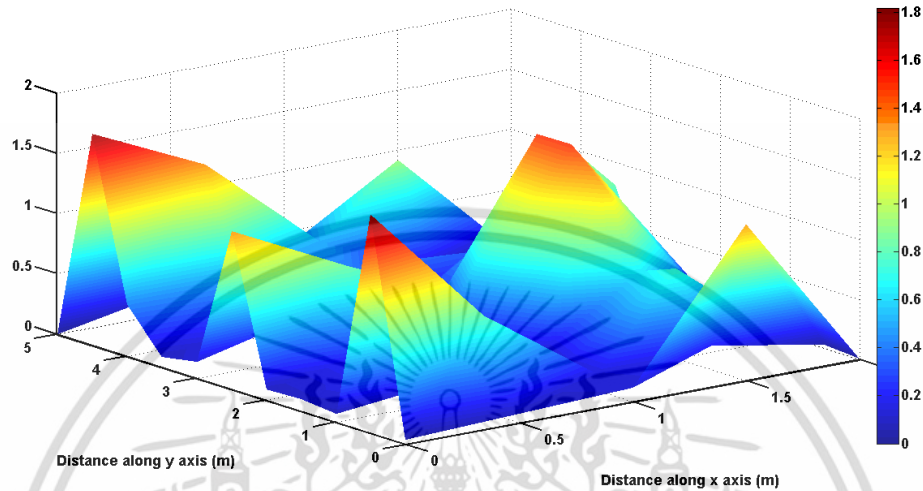
รูปที่ 5.17 ลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่นำมาจากข้อมูลของการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation)



รูปที่ 5.18 ลายลักษณ์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่นำมาจากข้อมูลของการประวิงเวลาของวิถีที่ 3 โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation)

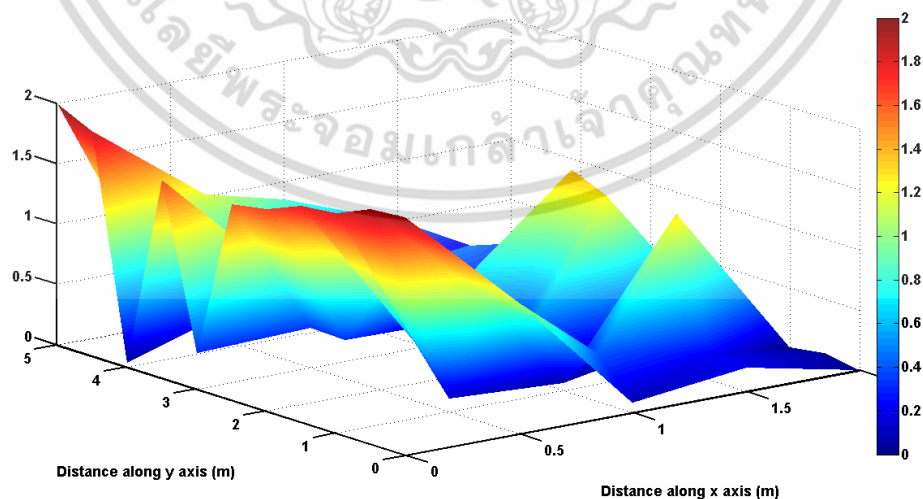
### 5.2.2 ผลการทดลองวิจัยและการวิเคราะห์ผล

รูปที่ 5.19 แสดงค่าความผิดพลาดระยะทางตามแกน x และ y ของการหาตำแหน่งโดยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation) ซึ่งความผิดพลาดมากที่สุดเกิดขึ้นที่บริเวณตำแหน่ง (0, 0.5)



รูปที่ 5.19 ความผิดพลาดระยะทางโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation)

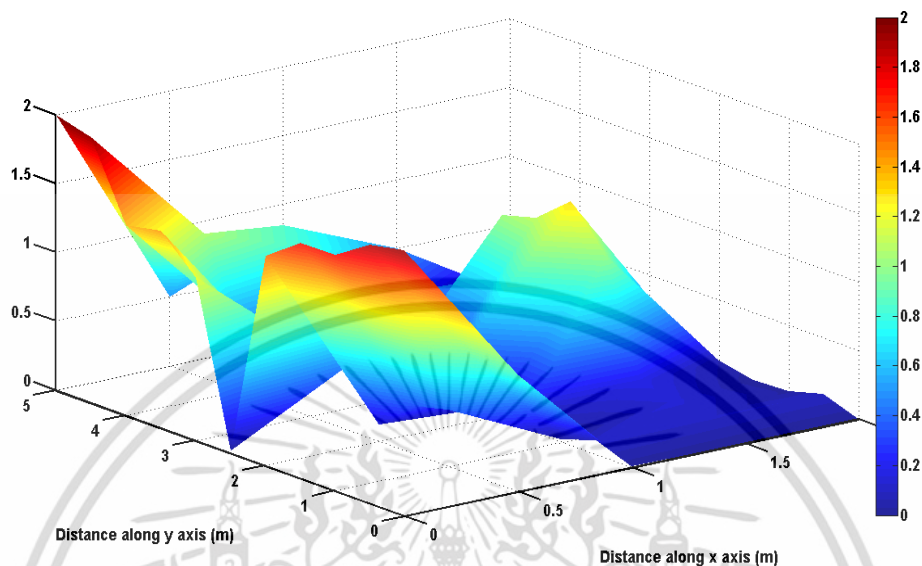
รูปที่ 5.20 แสดงค่าความผิดพลาดระยะทางตามแกน x และ y ของการหาตำแหน่งโดยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) ซึ่งความผิดพลาดมากที่สุดเกิดขึ้นที่บริเวณตำแหน่ง (0, 5)



รูปที่ 5.20 ความผิดพลาดระยะทางโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation)

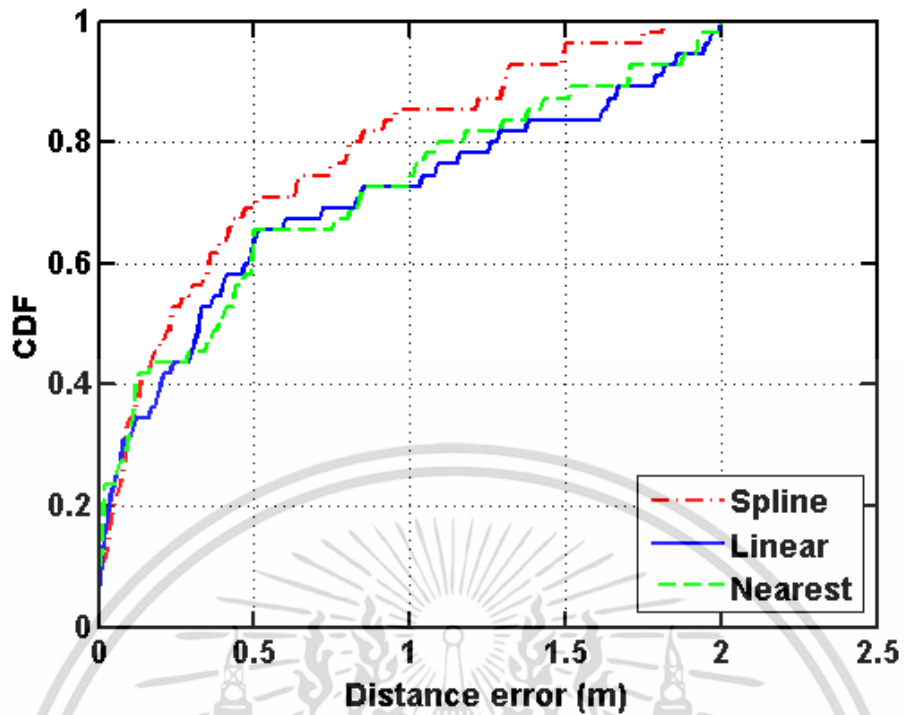
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.21 แสดงค่าความผิดพลาดระยะทางตามแกน x และ y ของการหาตำแหน่งโดยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) ซึ่งความผิดพลาดมากที่สุดเกิดขึ้นที่บริเวณตำแหน่ง (0, 5)



รูปที่ 5.21 ความผิดพลาดระยะทางโดยใช้ทฤษฎี Nearest-neighbor interpolation

รูปที่ 5.22 แสดง CDF ของค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดระยะทางที่เกิดขึ้นจากการหาตำแหน่งด้วยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือของสัญญาณแถบกว้างยิ่งโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) และ ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) โดยค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดระยะทางมีค่าเท่ากับ 0.45 เมตร, 0.6 เมตร และ 0.58 เมตร ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดโดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) และ ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) ที่เกิดขึ้นมีค่าเป็น 1.82 เมตร, 2 เมตร, และ 2 เมตร ตามลำดับ โดยค่าความแม่นยำของระบบสำหรับวิธี ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) และ ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) มีค่าเป็น 85 เปอร์เซ็นต์, 73 เปอร์เซ็นต์ และ 75 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะ 1 เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายสะสมที่ความผิดพลาดในระยะทางด้วยวิธีที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์การหาตำแหน่งภายในอาคารโดยวิธีเสมือนการสแกนลายนิ้วมือ และได้นำเสนอเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้ช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง (UWB fingerprinting-liked) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (VNA) ในการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของสัญญาณของสภาวะแวดล้อมบริเวณทางเดินของตึก 12 ชั้น อาคารเรียนรวม E คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง สำหรับแบบจำลองนี้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ทั้งทางด้านส่งและทางด้านรับ และวางสายอากาศทางด้านส่งและรับในแนวนอน โดยที่ความสูงของสายอากาศเป็น 1 เมตรทั้งทางด้านส่งและด้านรับ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการวัดออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกจะเป็นการรวบรวมข้อมูลและเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างลายลักษณ์ต้นแบบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง จากนั้นจะเก็บข้อมูลเหล่านั้นไว้ในฐานข้อมูล และในส่วนที่สองจะเป็นการนำลายลักษณ์ทดสอบมาเปรียบเทียบกับลายลักษณ์ต้นแบบเพื่อหาตำแหน่งที่ต้องการ

### 6.2 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้วิธีการสแกนลายนิ้วมือบนพื้นฐานของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณของสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ถูกวัดโดยใช้ความถี่ในช่วง 3 GHz ถึง 11 GHz ค่าการสูญเสียเชิงวิถีและการประวิงเวลาของสามวิถีแรกถูกนำมาใช้สร้างเป็นสร้างลายลักษณ์ต้นแบบและลายลักษณ์ทดสอบของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง จากผลการทดลองวิจัยพบว่าค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดระยะทางที่ใช้ โดยใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) มีค่าเท่ากับ 0.45 เมตร, 0.6 เมตร และ 0.58 เมตร ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดที่เกิดขึ้นมีค่าเป็น 1.82 เมตร, 2 เมตร, และ 2 เมตร ตามลำดับ และค่าความแม่นยำของระบบสำหรับวิธีที่ใช้ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation), ทฤษฎีการประมาณค่าในช่วงบริเวณใกล้เคียงมากที่สุด (Nearest Neighbor Interpolation) มีค่าเป็น 85 เปอร์เซ็นต์, 73 เปอร์เซ็นต์ และ 75 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะ 1 เมตรตามลำดับ จากผลการทดลองวิจัยข้างต้น จึงสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า เทคนิคการประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation) มีความเที่ยงตรงในการหาตำแหน่งสูงกว่าเทคนิคอื่นๆ เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดระยะทางน้อยมากเพียงแค่ 0.45 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการหาตำแหน่งภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง ได้นำเสนอการประเมินผลของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งได้เปรียบเทียบความแม่นยำและประสิทธิภาพในการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Fingerprinting ซึ่งอาศัยพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีและการประวิงเวลาของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง โดยวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นในงานทางด้านการทหาร การรักษาความปลอดภัย เป็นต้น ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการหาตำแหน่งในสภาวะแวดล้อมแบบ Line of sight (LOS) เท่านั้น ยังไม่ได้พิจารณาสภาวะแวดล้อมแบบ Non Line of sight (NLOS) ซึ่งสามารถที่จะพิจารณาได้โดยใช้เทคนิคเดียวกันหรือใช้เทคนิคอื่น ๆ ในการหาตำแหน่งดังแสดงดังรูปที่ 6.1



รูป 6.1 การหาตำแหน่งภายในอาคารสำหรับสภาวะแวดล้อมจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Nekoogar, **Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications**, Prentice Hall, New Jersey 2005.
- [2] H. Nikookar and R. Prasad, **Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications**. Springer. 2009.
- [3] M. Di Benedetto and G. Giancola, **Understanding Ultra Wide Band Radio Fundamentals**, Prentice Hall, New Jersey 2004.
- [4] D. A. Gratton, **Developing Practical Wireless Applications**, Elsevier, Boston 2006.
- [5] I. Oppermann, M. Hamalainen and J. Linatti, **UWB Theory and Applications**. John Wiley and Sons. 2004.
- [6] H.P. Taylor, G.G. Haroules and W.E. Brown, “**Analysis of a Multiplicative Feed System for Monopulse Tracking Applications**,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. vol. AES-5, no. 4, pp. 581 – 588, July 1969.
- [7] M. Di Benedetto and G. Giancola, “**Understanding Ultra Wideband Radio Fundamentals**,” New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [8] K. Siwiak and D. McKeown, **Ultra-Wideband Radio Technology**. John Wiley & Sons. 2004.
- [9] J. Fuller, “**Collision Free Cars are Coming**,” [Online]. Available : <http://auto.howstuffworks.com/car-driving-safety/safety-regulatory-devices/pre-collision-systems1.htm>. 2009.
- [10] W. Knight, “**Underground GPS**,” [Online]. Available : [http://www.newscientist.com/blog/invention/2007\\_02\\_01\\_archive.html](http://www.newscientist.com/blog/invention/2007_02_01_archive.html). 2007.
- [11] H. Liu, 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, pp. 1067–1080, Nov. 2007.
- [12] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, “**A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks**,” IEEE Communications Surveys and Tutorials. vol. 11, no. 1, pp. 13–32, Mar. 2009.
- [13] K. Kaemarungsi, “**Design of indoor positioning systems based on location fingerprinting technique**,” Ph.D.Thesis, Faculty of Information Science, Pittsburgh University. 2005.
- [14] A. Toak, N. Kandil, S. Affes and S. Georges, “**Fingerprinting localization using Ultra-Wideband and neural networks**,” 2007 International Symposium on Signals, Systems and Electronics, pp. 529 – 532, July 2007.
- [15] R. Want, A. Hopper, V. Falcao and J. Gibbons, “**The active badge location system**,” ACM Transactions on Information Systems. vol. 40, pp. 91-102, Jan. 1992.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, “**RADAR : An In-Building RF-Based User Location and Tracking System,**” IEEE INFOCOM. vol. 2, pp. 775-784, Mar. 2000.
- [17] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy, “**Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting,**” IEEE INFOCOM. vol. 2, pp. 1012-1022, Mar. 2004.
- [18] P. Prasithsangaree, P. Krishnamurthy and P. Chrysanthis, “**On Indoor Position Location with Wireless LANs,**” The 13<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2002). vol. 2, pp. 720-724, Sep. 2002.
- [19] C. Gentile and L. Berndt, “**Robust Location using System Dynamics and Motion Constraints,**” Proc. IEEE Int’l Conf. Comm, vol. 3, pp. 1360-1364, June. 2004.
- [20] N. Priyantha, A. Chakraborty and H. Balakrishnan, “**The Cricket Location-Support System,**” Proc. 6th ACM MOBICOM Conf. vol. 1, Aug. 2000. pp. 32-43.
- [21] J. A. Tauber, “**Location systems for pervasive computing,**” Area Exam Report. Massachusetts Institute of Technology. 2002.
- [22] A. J. Weiss, “**Direct position determination of narrowband radio frequency Transmitters,**” IEEE Sig. Processing Lett. pp. 513–516, May 2004.
- [23] J. J. Caffery, **Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems.** Boston : Kluwer Academic. 1999.
- [24] Z. Sahinoglu, S. Gezici and I. Guvenc, **Ultra-wideband Positioning Systems.** Cambridge University Press. 2008.
- [25] E. Kreyszig, **Advanced Engineering Mathematics.** John Wiley and Sons. 1993.
- [26] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, “**Experimental evaluation scheme of UWB antenna performance,**” Tech. on Instrumentation and Measurements, IEE Japan, IM-03-35 pp. 37-42, June 2003.
- [27] S. Promwong and W. Hachitani, and J. Takada, “Free Space Link Budget Evaluation of UWBIR Systems,” 2004 International Workshop on Ultra Wideband Systems Joint with Conference on Ultra Wideband Systems and Technology (UWBST&IWUWBS), pp. 312-316, May 2004.

ภาคผนวก ก

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

- [1] R. Chaichana, and S. Promwong, “A Novel Comparison of UWB Indoor Localization,” International Symposium on Multimedia and Communication Technology (ISMAC 2015), pp 84 – 87, September 23-25, 2015, Thailand.
- [2] P. Supanakoon, R. Chaichana, and S. Promwong, “Indoor Fingerprinting Localization Using Novel Coparison,” APSAEM 2012, Vietnam, July 2012.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A Novel Comparison of UWB Indoor Localization

Rujirate Chaichana

Department of Telecommunication Engineering,  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok 10520, Thailand  
E-mail: rujirate.chaichana@gmail.com

Sathaporn Promwong

Department of Telecommunication Engineering,  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok 10520, Thailand  
E-mail: kpsathap@kmitl.ac.th

**Abstract**— An indoor localization has been widely used in medical, industrial, public safety and transportation because of its potential localization in dense multi-path fading environments. In this paper, indoor localization using novel comparison is proposed. The ultra-wideband (UWB) technology, which is rectangular pass band waveform under FCC, is used as transmitted signal for obtaining high time resolution. The channel transfer functions of corridor environment were measured using vector network analyzer (VNA). The biconical antennas are used as both transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. The received signals are evaluated to build the fingerprints and signatures. The novel comparison between fingerprints and signatures is considered in the term of correlation coefficient included peak amplitude and time delay factors. The accuracy is studied and shown in the term of the cumulative distribution function (CDF) of distance error. The results reflect that the proposed comparison can be very well used in the indoor fingerprint localization.

**Keywords**— UWB localization, impulse radio, indoor localization, fingerprinting technique, correlation coefficient.

## I. INTRODUCTION

The indoor fingerprinting localization has been widely used in medical, industrial, public safety and transportation because of its potential localization in dense multi-path fading environments [1]. For estimating location, the common techniques use the received signal strength (RSS), the time of arrival (TOA), the time difference of arrival (TDOA) and the angle of arrival (AOA). These techniques estimate the location by considering power, delay time or direction of received signal [2]. However, these techniques consider only direct path signal. Much error is due to the absence of line-of-sight (LOS) and dense multi-path fading. This leads to the development of the fingerprinting technique.

In a given area technique consists of two phases. First comprises the choice of data to build a fingerprint and collect in the database. The second phase consists of using the fingerprint in the database in order to find the location by comparing a target signature with the fingerprint [3]

Ultra wideband impulse radio (UWB-IR) becomes an important topic for wireless system due to its potential to offer very high capacity, low cost and low power consumption properties [4]. The Federal Communications Commission (FCC) first specified that UWB signal can be transmitted at the frequency spectrum from 3.1 GHz to 10.6 GHz. The

UWB-IR signal as the signal that has fractional bandwidth greater than or equal to 0.2, or occupied bandwidth greater than or equal to 500 MHz [5]. Moreover, the UWB-IR signal can resolve dense multi-path fading [6]. Furthermore, very low power spectral density (PSD) of UWB-IR signal can coexist with other existing wireless communications without or with low interference. These are the reasons that led the UWB-IR signal is an ideal signal for indoor fingerprinting localization. There has been some research about fingerprinting localization using UWB-IR signal such as based on maximum channel spatial correlation [7], maximum likelihood estimation (MLE) [8], k-nearest neighbor (k-NN), [9] and neural networks [10].

In this paper, an indoor fingerprinting localization using novel comparison is proposed. The UWB-IR signal, which is rectangular passband waveform, is used as transmitted signal for obtaining high time resolution. The channel transfer functions of corridor environment were measured using vector network analyzer (VNA) at frequency ranging from 3 to 11 GHz. The biconical antennas with horizontal polarization are used as both transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. The novel comparison between fingerprints and signatures is considered in the term of correlation coefficient included peak amplitude and time delay factors. The accuracy is studied and shown in the term of the cumulative distribution function (CDF) of distance error.

## II. FINGERPRINTING LOCALIZATION TECHNIQUE

### A. Transmitted waveform of UWB system

In this paper, the rectangular passband waveform is used as the transmitted waveform. The expressions of this waveform in time domain  $v_t(t)$  [14].

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

where  $A$  is the maximum amplitude,  $t$  is the time,  $f$  is the frequency,  $f_c$  is the center frequency,  $f_b$  is the spectral bandwidth,  $f_L$  is lowest frequency,  $f_H$  is the highest frequency

$$\sin c(x) = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ \frac{1}{\pi x} \sin(\pi x) & x \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

### B. Received Waveform

The spectral density of received waveform  $V_r$  is calculated by using multiplication between channel transfer function  $H_c$  obtained from measurement and spectral density of transmitted waveform  $V_t$ :

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H_c(f) \quad (3)$$

The received waveform in time domain  $v_r$  is calculated by using inverse Fourier transform of its spectral density and it can be written as

$$v_r(t) = \mathcal{F}^{-1}\{V_r(f)\} = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} dt \quad (4)$$

### C. Proposed Comparison

The proposed comparison between fingerprints and signatures is considered in the term of correlation coefficient included peak amplitude and time delay factors. This modified correlation coefficient  $C_m$  is defined as

$$C_m(x, y) = c(x, y) \cdot a(x, y) \cdot d(x, y) \quad (5)$$

where  $C$  is the correlation coefficient,  $a$  is the peak amplitude factor and  $d$  is the time delay factor. The correlation coefficient, peak amplitude factor and time delay factor are respectively defined as

$$c(x, y) = \frac{\max \left[ \int_{-\infty}^{\infty} v_{r,fi(x,y)}(t) \cdot v_{r,si}(t + \tau) dt \right]}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} v_{r,fi(x,y)}^2(t) dt \int_{-\infty}^{\infty} v_{r,si}^2(t) dt}} \quad (6)$$

$$a(x, y) = 1 - \frac{|a_{fi(x,y)} - a_{si}|}{\bar{a}} \quad (7)$$

$$d(x, y) = 1 - \frac{|d_{fi(x,y)} - d_{si}|}{\bar{d}} \quad (8)$$

where  $v_{r,fi(x,y)}$  is the received waveform of  $(x, y)$  fingerprint point,  $v_{r,si}$  is the received waveform of signature point,  $a_{fi(x,y)}$  and  $d_{fi(x,y)}$  are the peak amplitude and delay time of  $(x, y)$  fingerprint point,  $a_{si}$  and  $d_{si}$  are the peak amplitude and delay time of signature point,  $\bar{a}$  and  $\bar{d}$  are the means of the peak amplitude and the time delay of fingerprint point.

The estimate position  $(x_e, y_e)$  is considered as the position with maximum modified correlation coefficient and can be written as

$$(x_e, y_e) = \arg \max C(x, y) \quad (9)$$

Finally, the accuracy of fingerprinting is considered in the term of distance error  $e_d$  and can be written as

$$e_d = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2} \quad (10)$$

where  $(x_c, y_c)$  is the correct position.

## III. MEASUREMENTS SYSTEM

Using VNA at the frequency ranging from 3 GHz to 11 GHz. The VNA was operated in the response measurement mode, where Port- 1 was connected to Tx antenna and Port-2 was connected to Rx antenna.

The biconical antennas are used as both Tx and Rx antennas. Both Tx and Rx antennas were fixed at the heights of 1.0 m. The polarizations of both antennas are horizontal polarization. The measurement model is shown in Fig. 3. First, the measurements were done to correct the data to build the fingerprints with 15 positions and 1 m space. After that, 45 positions with 0.5 m space were measured to build signatures.

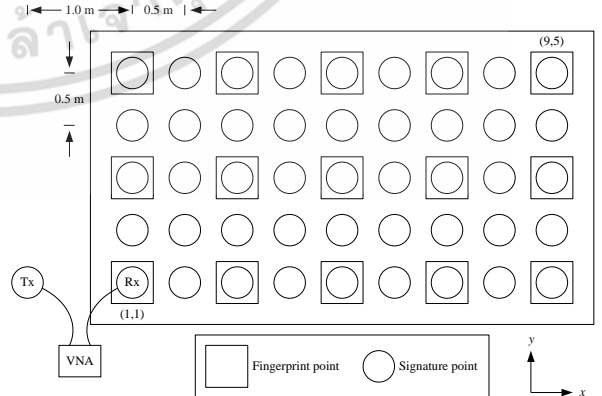


Fig. 3. Measurement model.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### IV. RESULTS AND DISCUSSION

For the transmitted waveform, the rectangular passband is used. The parameters of this waveform, the spectral bandwidth  $f_b$  is 7.5 GHz, the center frequency  $f_c$  is 6.85 GHz, the lowest frequency  $f_L$  is 3.1 GHz, the highest frequency  $f_H$  is 10.6 GHz and maximum amplitude  $A$  is 1 V.

The received waveforms at the example points of (1,1) and (9,5) are shown in Figs. 4 and 5, respectively. The received waveforms of fingerprint and signature are almost the same. At the point (1,1), the correlation coefficient between waveforms of fingerprint and signature is 0.99. The peak amplitudes of received waveforms of fingerprint and signature are 6.11 and 6.06 mV, while the time delays of both fingerprint and signature are 4.16 ns. At the point (9,5), the correlation coefficient between waveforms of fingerprint and signature is 0.79. The peak amplitudes of received waveforms of fingerprint and signature are 0.79 and 0.78 mV, while the time delays of both fingerprint and signature are 18.85 ns.

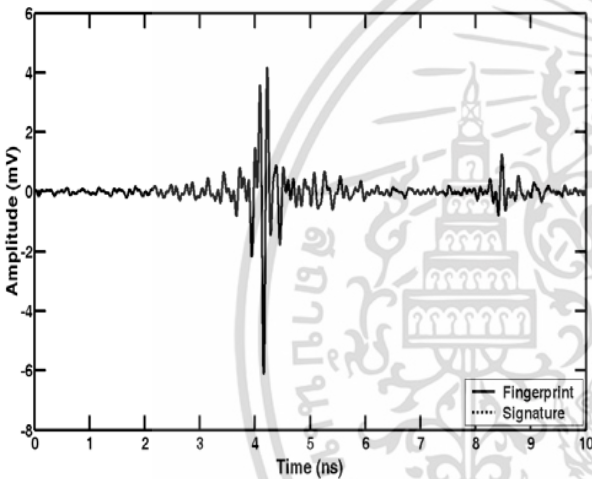


Fig. 4. Received waveform at the point of (1, 1).

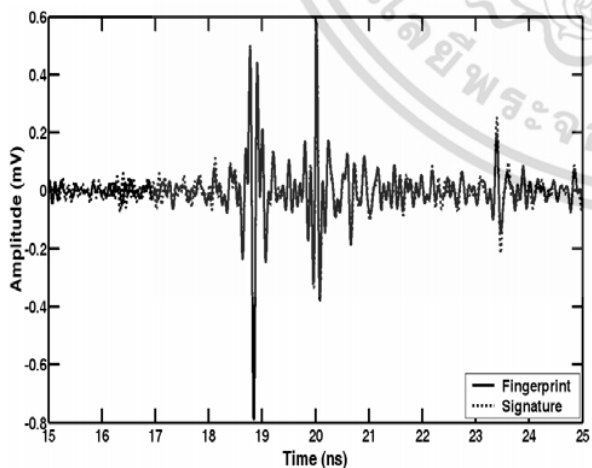


Fig. 5. Received waveform at the point of (9, 5).

The peak amplitude and time delay, which are called as fingerprint, are shown in Figs. 10 and 11, respectively. The peak amplitude ranges from 0.26 to 4.17 mV with the mean is 1.11 mV. The time delay ranges from 4.22 to 20.02 ns with the mean is 13.35 ns. These data are used for peak amplitude and time delay factors.

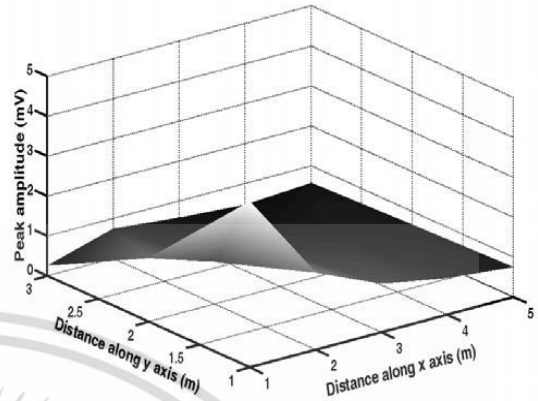


Fig. 6. Peak amplitude of fingerprint.

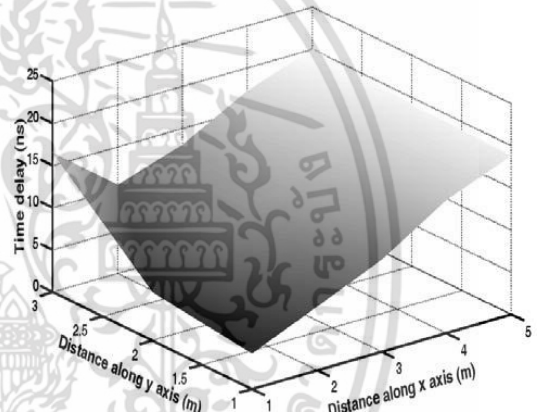


Fig. 7. Time delay of fingerprint.

The accuracy of the fingerprinting localization is considered in the term of CDF of distance error. The CDF of distance error along x axis is shown in Fig. 8. The probability of no distance error along x axis is 0.22. The maximum distance error along x axis is 1.36 m. The mean and standard deviation of distance error along x axis are 0.27 and 0.31 m, respectively. The CDF of distance error along y axis is shown in Fig. 9. The probability of no distance error along y axis is up to 0.42. The maximum distance error along y axis reduces to 1.00 m. The mean and standard deviation of distance error along y axis are 0.23 and 0.27 m, respectively.

Finally, the distance error, which considered from distance error along both x and y axes, is presented. The CDF of distance error is shown in Fig. 10. The probability of no distance error is reduced to 0.11 or 11 percent. The maximum distance error is 1.48 m. The mean and standard deviation of distance error are 0.42 and 0.35 m, respectively.

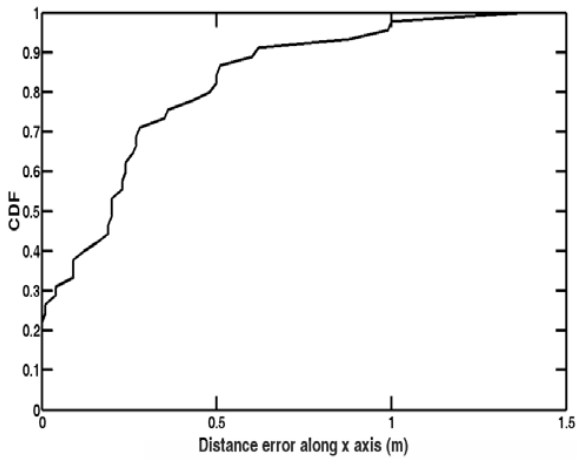


Fig. 8. CDF of distance error along x axis.

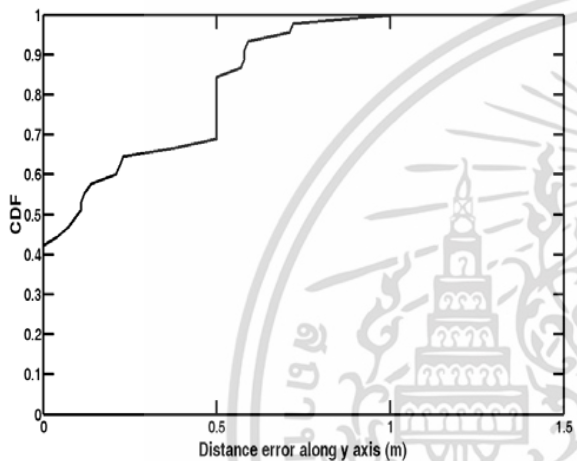


Fig. 9. CDF of distance error along y axis.

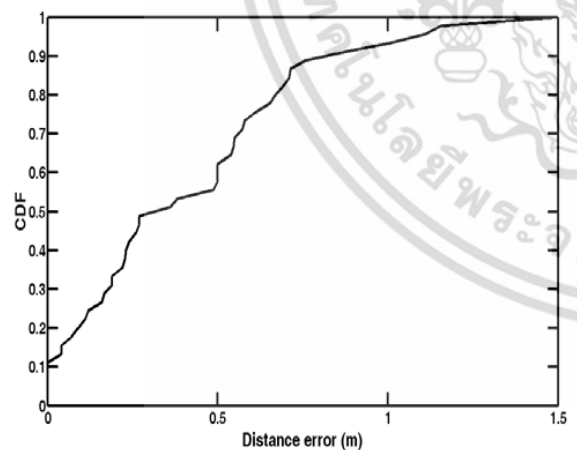


Fig. 10. CDF of distance error.

## V. CONCLUSION

In this paper, the indoor fingerprinting localization using novel comparison is proposed. The UWB-IR signal, which is rectangular passband waveform, is used as transmitted signal. The distance error along x axis is more than that along y axis. That because the distance along x axis is longer then there is more effect from multi-path fading. There is no distance error about 11 percent. The mean of distance error is 0.42 m with 1.48 m maximum distance error. The results reflect that the comparison can be very well used in an indoor fingerprint localization.

This proposed comparison should be a promising choice for indoor fingerprint localization.

## REFERENCES

- [1] M. L. Rodrigues, L. F. M. Vieira and M. F. M. Campos, "Fingerprinting based radio localization in indoor environments using multiple wireless technologies," *2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1203-1207, 2011.
- [2] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, Jan.-Mar. 2009.
- [3] H. Laitinen, J. Lahteenmaki, and T. Nordstrom, "Database correlation method for GSM location", *IEEE: Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol.4, pp. 2504-2508, May 2001.
- [4] K. Siwiak, "Ultra-wide band radio: introducing a new technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Conference*, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.
- [5] Federal Communications Commission, "Revision of part 15 of the commission's rules regarding UWB transmission systems," *First Report*, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [6] M.G. Di Benedetto, and G. Giancola, "Understanding ultra wide Band radio fundamentals", Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2004.
- [7] W. Q. Malik and B. Allen, "Wireless sensor positioning with ultrawideband fingerprinting," *The Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-5, 2007.
- [8] H. Kroll and C. Steiner, "Indoor ultra-wideband location fingerprinting," *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1-5, 2010.
- [9] R. Uppahad, J. Sangthong and S. Promwong, "UWB localization with 2-D interpolation and k-nearest neighbor based on measurement data," *2011 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, ThG3-6, 25-28 Oct. 2011.
- [10] A. Taok, N. Kandil, S. Affes and S. Georges, "Fingerprinting localization using ultra wideband and neural networks," *International Symposium on Signals, Systems and Electronics (ISSSE)*, pp. 529-532, 2007.

# Indoor Fingerprinting Localization Using Novel Comparison

Pichaya Supanakoon<sup>\*1</sup>, Rujirate Chaichana<sup>\*1</sup>, Jirapat Sangthong<sup>\*1</sup> and Sathaporn Promwong<sup>\*1</sup>

In recent year, an indoor fingerprinting localization has been widely used in medical, industrial, public safety and transportation because of its potential localization in dense multi-path fading environments. In this paper, the indoor fingerprinting localization using novel comparison is proposed. The ultra wideband impulse radio (UWB-IR) signal, which is rectangular passband waveform, is used as transmitted signal for obtaining high time resolution. The channel transfer functions of corridor environment were measured using vector network analyzer (VNA). The biconical antennas are used as both transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. The received signals are evaluated to build the fingerprints and signatures. The novel comparison between fingerprints and signatures is considered in the term of correlation coefficient included peak amplitude and time delay factors. The accuracy is studied and shown in the term of the cumulative distribution function (CDF) of distance error. The results reflect that the proposed comparison can be very well used in the indoor fingerprint localization.

*Keywords:* indoor fingerprinting localization, ultra wideband impulse radio (UWB-IR), correlation coefficient.

## 1. Introduction

In recent year, an indoor fingerprinting localization has been widely used in medical, industrial, public safety and transportation because of its potential localization in dense multi-path fading environments [1,2]. For estimating location, the common techniques use the received signal strength (RSS), the time of arrival (TOA), the time difference of arrival (TDOA) and the angle of arrival (AOA). These techniques estimate the location by considering power, delay time or direction of received signal [3,4]. However, these techniques consider only direct path signal. Much error is due to the absence of line-of-sight (LOS) and dense multi-path fading. This leads to the development of the fingerprinting technique. The fingerprinting localization is based on the same concept of human fingerprinting. In a given area, different information can be used to construct a fingerprint that can identify different parts of the area. This technique consists of two phases. First comprises the choice of data to build a fingerprint and collect in the database. The second phase consists of using the fingerprint in the database in order to find the location by comparing a target signature with the fingerprint [5].

Ultra wideband impulse radio (UWB-IR) becomes an important topic for wireless system due to its potential to offer very high capacity, low cost and low power consumption properties [6]. The Federal Communications Commission (FCC) first specified that UWB-IR signal can be transmitted at the frequency spectrum ranging

from 3.1 to 10.6 GHz. Additionally, FCC defined the UWB-IR signal as the signal that has fractional bandwidth greater than or equal to 0.2, or occupied bandwidth greater than or equal to 500 MHz [7]. The UWB-IR signal has extreme high time resolution. In addition, ultra wide bandwidth of UWB-IR signal obtains the good penetrating capability. Moreover, the UWB-IR signal can resolve dense multi-path fading [8]. Furthermore, very low power spectral density (PSD) of UWB-IR signal can coexist with other existing wireless communications without or with very low interference. These are the reasons that led the UWB-IR signal is an ideal signal for indoor fingerprinting localization. There has been some research about fingerprinting localization using UWB-IR signal such as based on maximum channel spatial correlation [9], maximum likelihood estimation (MLE) [10], k-nearest neighbor (k-NN), [11] and neural networks [12,13].

In this paper, the indoor fingerprinting localization using novel comparison is proposed. The UWB-IR signal, which is rectangular passband waveform, is used as transmitted signal for obtaining high time resolution. The channel transfer functions of corridor environment were measured using vector network analyzer (VNA) at frequency ranging from 3 to 11 GHz. The biconical antennas with horizontal polarization are used as both transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. The received signals are evaluated to build the fingerprints and signatures. The novel comparison between fingerprints and signatures is considered in the term of correlation coefficient included peak amplitude and time delay factors. The accuracy is studied and shown in the term of the cumulative distribution function (CDF) of distance error. The results reflect that the proposed comparison can be very well used in the indoor fingerprint localization.

The rest of this paper is organized as follows. In Section 2, the fingerprinting localization technique is proposed. Next, the measurements and results are presents in Sections 3 and 4, respectively. Finally, conclusion is discussed in Section 5.

**Correspondence:** Pichaya Supanakoon, Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
email: kspichay@kmitl.ac.th

<sup>\*1</sup> King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. Fingerprinting Localization Technique

### 2.1 Transmitted Waveform

In this paper, the rectangular passband waveform is used as the transmitted waveform. The expressions of this waveform in time domain  $v_t$  and its spectral density  $V_t$  are [14]

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

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

where  $A$  is the maximum amplitude,  $t$  is the time,  $f$  is the frequency,  $f_c$  is the center frequency,  $f_b$  is the spectral bandwidth,  $f_L$  is lowest frequency,  $f_H$  is the highest frequency and

$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ \frac{1}{\pi x} \sin(\pi x) & x \neq 0 \end{cases}$$

### 2.2 Received Waveform

The spectral density of received waveform  $V_r$  is calculated by using multiplication between channel transfer function  $H_c$  obtained from measurement and spectral density of transmitted waveform  $V_t$ :

$$V_r(f) = H_c(f) \cdot V_t(f). \quad (3)$$

The received waveform in time domain  $v_r$  is calculated by using inverse Fourier transform of its spectral density and it can be written as

$$v_r(t) = \mathcal{F}^{-1}\{V_r(f)\} = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} df. \quad (4)$$

### 2.3 Proposed Comparison

The proposed comparison between fingerprints and signatures is considered in the term of correlation coefficient included peak amplitude and time delay factors. This modified correlation coefficient  $C_m$  is defined as

$$C_m(x, y) = C(x, y) \cdot a(x, y) \cdot d(x, y), \quad (5)$$

where  $C$  is the correlation coefficient,  $a$  is the peak amplitude factor and  $d$  is the time delay factor. The

correlation coefficient, peak amplitude factor and time delay factor are respectively defined as

$$C(x, y) = \frac{\max \left[ \int_{-\infty}^{\infty} v_{r,fi}(x, y)(t) \cdot v_{r,si}(t + \tau) dt \right]}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} v_{r,fi}^2(x, y)(t) dt \int_{-\infty}^{\infty} v_{r,si}^2(t) dt}}, \quad (6)$$

$$a(x, y) = 1 - \frac{|a_{fi}(x, y) - a_{si}|}{\bar{a}}, \quad (7)$$

$$d(x, y) = 1 - \frac{|d_{fi}(x, y) - d_{si}|}{\bar{d}}, \quad (8)$$

where  $v_{r,fi}(x, y)$  is the received waveform of  $(x, y)$  fingerprint point,  $v_{r,si}$  is the received waveform of signature point,  $a_{fi}(x, y)$  and  $d_{fi}(x, y)$  are the peak amplitude and delay time of  $(x, y)$  fingerprint point,  $a_{si}$  and  $d_{si}$  are the peak amplitude and delay time of signature point,  $\bar{a}$  and  $\bar{d}$  are the means of the peak amplitude and the time delay of fingerprint point.

The estimate position  $(x_e, y_e)$  is considered as the position with maximum modified correlation coefficient and can be written as

$$(x_e, y_e) = \arg \max C_m(x, y). \quad (9)$$

Finally, the accuracy of fingerprinting is considered in the term of distance error  $e_d$  and can be written as

$$e_d = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2}, \quad (10)$$

where  $(x_c, y_c)$  is the correct position.

## 3. Measurements

The channel transfer functions were measured as transmission coefficient  $S_{21}$  in frequency by using VNA at the frequency ranging from 3 to 11 GHz. The VNA was operated in the response measurement mode, where Port-1 was connected to Tx antenna and Port-2 was connected to Rx antenna.

The biconical antennas are used as both Tx and Rx antennas. The structure and dimensions of the biconical antenna is shown in Fig. 1. The diameter of the biconical antenna is 6.53 cm and the length is 3.7 cm. The reflection coefficient  $S_{11}$  of the biconical antenna is shown in Fig. 2. The reflection coefficient of the biconical antenna along all measurement frequency range, which is 3 to 11 GHz, is less than  $-10$  dB.

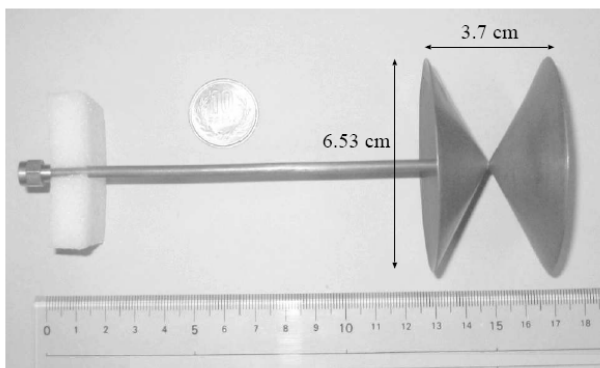


Fig. 1. Structure and dimensions of biconical antenna.

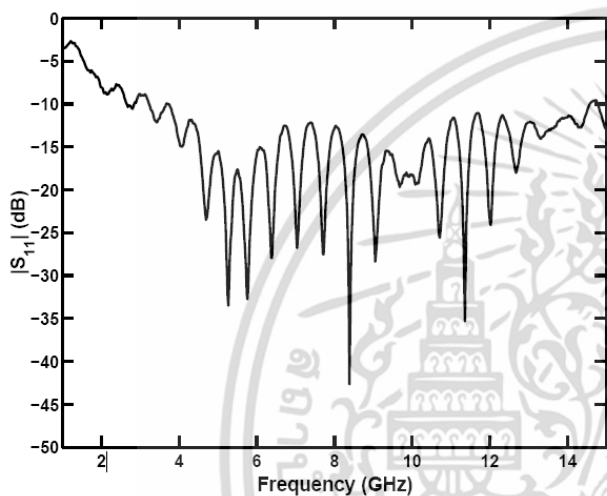


Fig. 2. Reflection coefficient of biconical antenna.

The measurements were done in the corridor of 12<sup>th</sup> floor, E-Building, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. Both Tx and Rx antennas were fixed at the heights of 1.0 m. The polarizations of both antennas are horizontal polarization. The measurement model is shown in Fig. 3. First, the measurements were done to correct the data to build the fingerprints with 15 positions and 1 m space. After that, 45 positions with 0.5 m space were measured to build signatures.

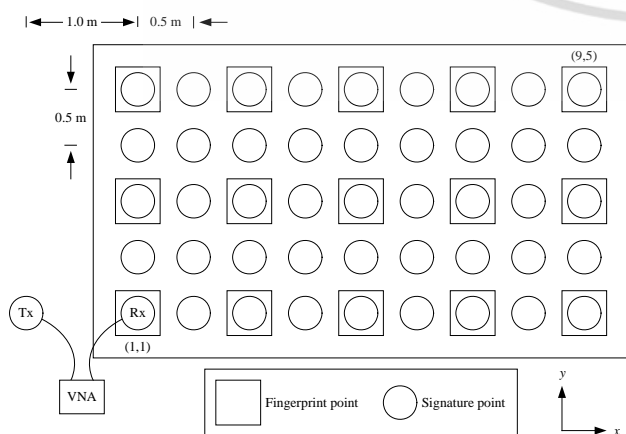


Fig. 3. Measurement model.

#### 4. Results

For the transmitted waveform, the rectangular passband is used. The rectangular passband waveform and its spectral density are shown in Figs. 4 and 5, respectively. For the parameters of this waveform, the spectral bandwidth  $f_b$  is 7.5 GHz, the center frequency  $f_c$  is 6.85 GHz, the lowest frequency  $f_L$  is 3.1 GHz, the highest frequency  $f_H$  is 10.6 GHz and maximum amplitude  $A$  is 1 V.

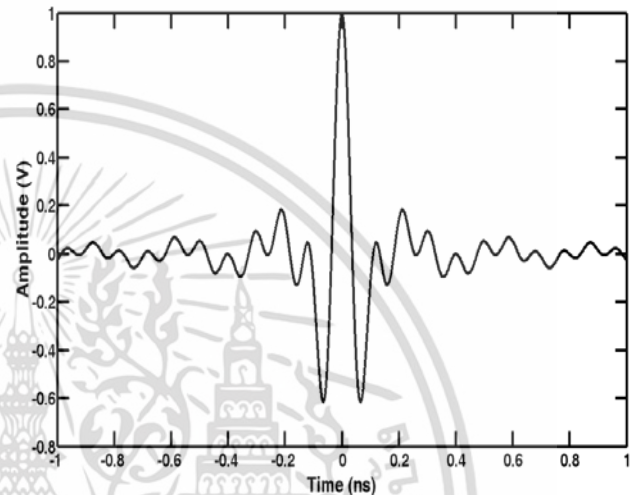


Fig. 4. Transmitted waveform.

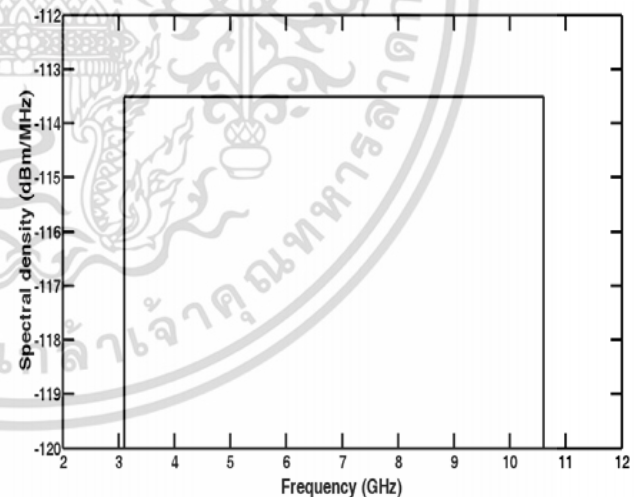


Fig. 5. Spectral density of transmitted waveform.

The channel transfer functions at the example points of (1,1) and (9,5) are shown in Figs. 6 and 7, respectively. At the point (1,1), the means of the channel transfer functions of fingerprint and signature are  $-43.59$  and  $-43.69$  dB, while the standard deviations of both fingerprint and signature are 2.78 dB. At the point (9,5), the means of the channel transfer functions of fingerprint and signature are  $-58.67$  and  $-58.75$  dB, while the standard deviations of fingerprint and signature are 5.49 and 5.36 dB, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

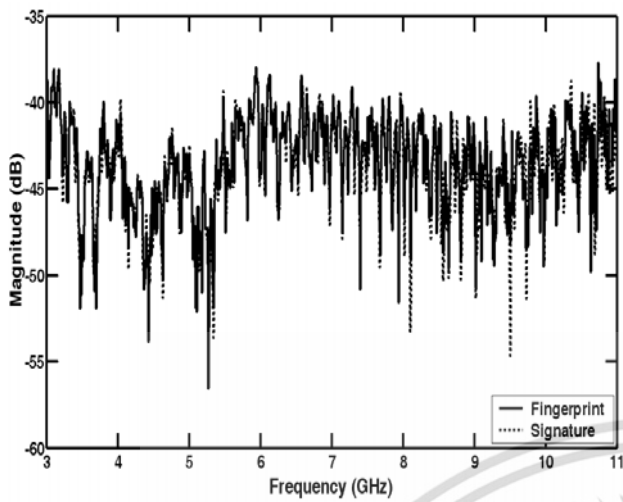


Fig. 6. Channel transfer function at the point of (1,1).

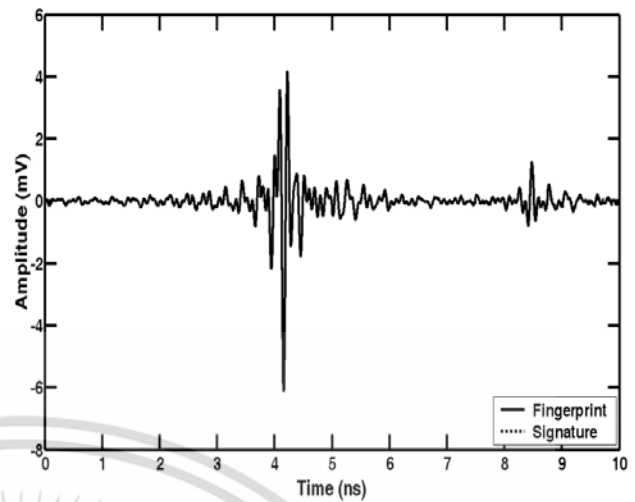


Fig. 8. Received waveform at the point of (1,1).

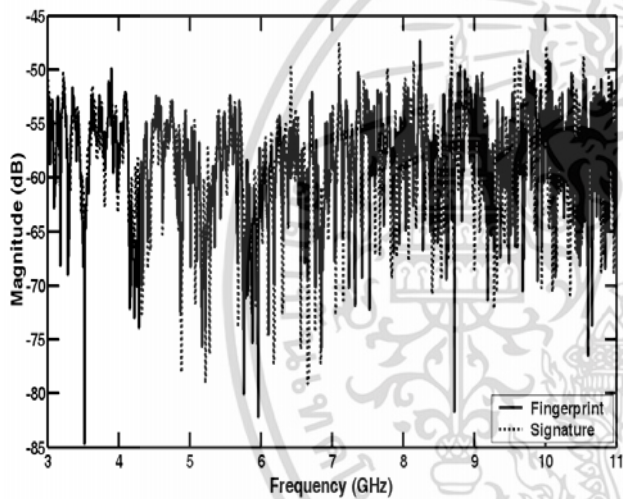


Fig. 7. Channel transfer function at the point of (9,5).

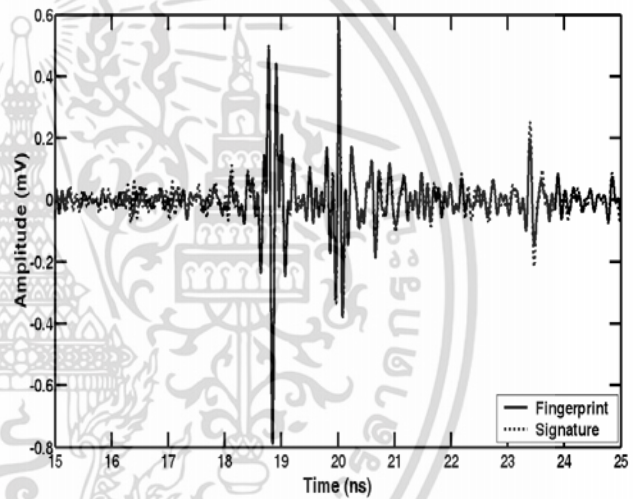


Fig. 9. Received waveform at the point of (9,5).

The received waveforms at the example points of (1,1) and (9,5) are shown in Figs. 8 and 9, respectively. The received waveforms of fingerprint and signature are almost the same. At the point (1,1), the correlation coefficient between waveforms of fingerprint and signature is 0.99. The peak amplitudes of received waveforms of fingerprint and signature are 6.11 and 6.06 mV, while the time delays of both fingerprint and signature are 4.16 ns. At the point (9,5), the correlation coefficient between waveforms of fingerprint and signature is 0.79. The peak amplitudes of received waveforms of fingerprint and signature are 0.79 and 0.78 mV, while the time delays of both fingerprint and signature are 18.85 ns.

The peak amplitude and time delay, which are called as fingerprint, are shown in Figs. 10 and 11, respectively. The peak amplitude ranges from 0.26 to 4.17 mV with the mean is 1.11 mV. The time delay ranges from 4.22 to 20.02 ns with the mean is 13.35 ns. These data are used for peak amplitude and time delay factors.

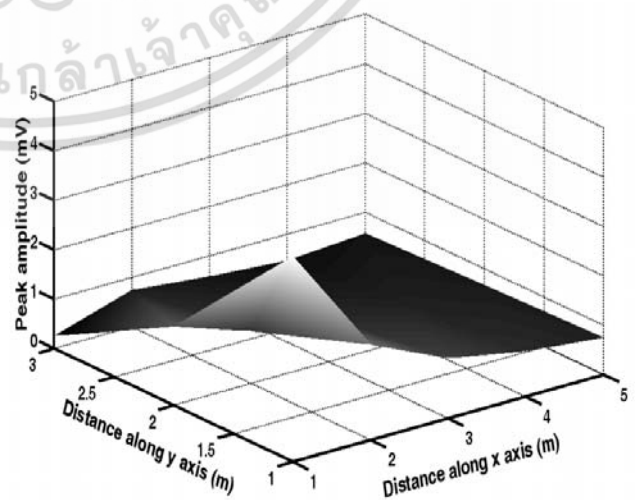


Fig. 10. Peak amplitude of fingerprint.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

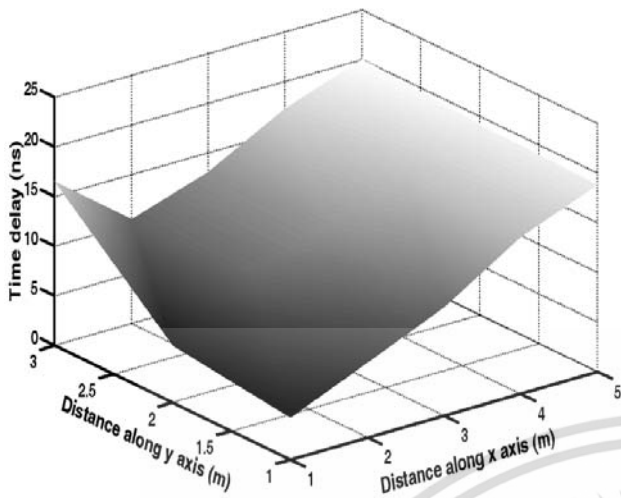


Fig. 11. Time delay of fingerprint.

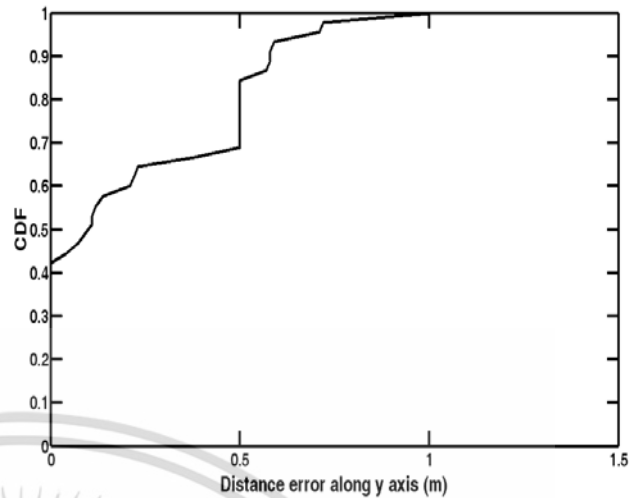


Fig. 13. CDF of distance error along y axis.

The accuracy of the fingerprinting localization is considered in the term of CDF of distance error. The CDF of distance error along x axis is shown in Fig. 12. The probability of no distance error along x axis is 0.22. The maximum distance error along x axis is 1.36 m. The mean and standard deviation of distance error along x axis are 0.27 and 0.31 m, respectively. The CDF of distance error along y axis is shown in Fig. 13. The probability of no distance error along y axis is up to 0.42. The maximum distance error along y axis reduces to 1.00 m. The mean and standard deviation of distance error along y axis are 0.23 and 0.27 m, respectively.

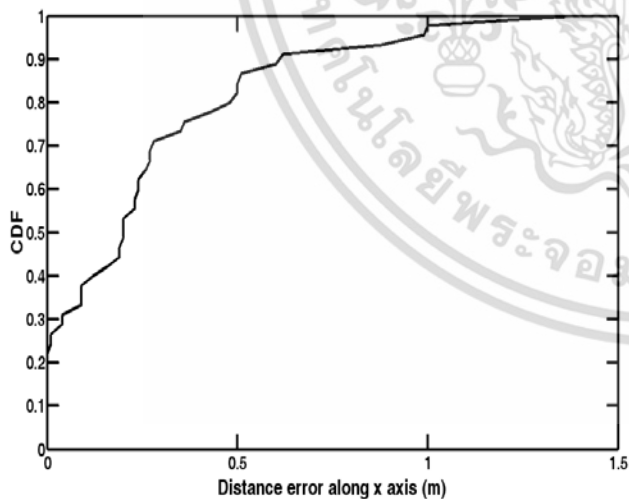


Fig. 12. CDF of distance error along x axis.



Fig. 14. CDF of distance error.

## 5. Conclusion

In this paper, the indoor fingerprinting localization using novel comparison is proposed. The UWB-IR signal, which is rectangular passband waveform, is used as transmitted signal for obtaining high time resolution. The distance error along x axis is more than that along y axis. That because the distance along x axis is longer then there is more effect from multi-path fading. There is no distance error about 11 percent. The mean of distance error is 0.42 m with 1.48 m maximum distance error. This proposed comparison should be a promising choice for indoor fingerprint localization.

## References

- [1] M. L. Rodrigues, L. F. M. Vieira and M. F. M. Campos, "Fingerprinting-based radio localization in indoor environments using multiple wireless technologies," *2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1203-1207, 2011.

Finally, the distance error, which considered from distance error along both x and y axes, is presented. The CDF of distance error is shown in Fig. 14. The probability of no distance error is reduced to 0.11 or 11 percent. The maximum distance error is 1.48 m. The mean and standard deviation of distance error are 0.42 and 0.35 m, respectively.

- [2] Y. Jin, W.-S. Soh and W.-C. Wong, "Indoor localization with channel impulse response based fingerprint and non-parametric regression," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 3, pp. 1120-1127, 2010.
- [3] H. Liu, 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, pp. 1067-1080, Nov. 2007.
- [4] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, Jan.-Mar. 2009.
- [5] H. Laitinen, J. Lahteenmaki, and T. Nordstrom, "Database correlation method for GSM location", *IEEE: Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol.4, pp. 2504-2508, May 2001.
- [6] K. Siwiak, "Ultra-wide band radio: introducing a new technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.
- [7] Federal Communications Commission, "Revision of part 15 of the commission's rules regarding UWB transmission systems," *First Report*, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [8] M.G. Di Benedetto, and G. Giancola, "Understanding ultra wide band radio fundamentals", Prentice Hall: Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2004.
- [9] W. Q. Malik and B. Allen, "Wireless sensor positioning with ultrawideband fingerprinting," *The Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-5, 2007.
- [10] H. Kroll and C. Steiner, "Indoor ultra-wideband location fingerprinting," *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1-5, 2010.
- [11] R. Uppahad, J. Sangthong and S. Promwong, "UWB localization with 2-D interpolation and k-nearest neighbor based on measurement data," *2011 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, ThG3-6, 25-28 Oct. 2011.
- [12] A. Taok, N. Kandil, S. Affes and S. Georges, "Fingerprinting localization using ultra-wideband and neural networks," *International Symposium on Signals, Systems and Electronics (ISSSE)*, pp. 529-532, 2007.
- [13] L. Yu, M. Laaraiedh, S. Avrillon, B. Uguen, "Fingerprinting localization based on neural networks and ultra-wideband signals," *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, pp. 184-189, 2011.
- [14] P. Supanakoon, K. Wansiang, S. Promwong and J. Takada, "Simple waveforms for UWB communication," *ECTI International Conference (ECTI-CON)*, pp. 626-629, May 2005.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวรุจิเรจ ชัยชนะ  
วัน เดือน ปีเกิด 16 เมษายน 2531  
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 60 หมู่2 บ้านหนองบ่อ ต.หนองบ่อ อ.นาแก จ.นครพนม 48130

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2540-2544 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2554-2558 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2554-ปัจจุบัน RF Engineering บริษัท RAY TEL Co.,LTD.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้