

การวัดหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำด้วย  
แบบจำลอง MIN-MAX และเทคนิคการเกตเวลา  
LOW-BAND ULTRA-WIDEBAND LOCALIZATION WITH MIN-MAX MODEL  
AND TIME-GATING TECHNIQUE



โดย  
นางสาวกนกกร บุญประเสริฐ  
นางสาวกนกภรณ์ บุญประเสริฐ  
นางสาวทิพรกานต์ ประวัตติ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำด้วย  
แบบจำลอง MIN-MAX และเทคนิคการเกตเวลา  
LOW-BAND ULTRA-WIDEBAND LOCALIZATION WITH MIN-MAX MODEL  
AND TIME-GATING TECHNIQUE

โดย

นางสาวกนกกร	บุญประเสริฐ	62010002
นางสาวกนกภรณ์	บุญประเสริฐ	62010007
นางสาวทิพรกานต์	ประวัตติ	62010326

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2565

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวัดหาดำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำด้วยแบบจำลอง MIN-MAX  
และเทคนิคการเกตเวลา

LOW-BAND ULTRA-WIDEBAND LOCALIZATION WITH MIN-MAX MODEL AND  
TIME-GATING TECHNIQUE

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกนกกร บุญประเสริฐ 62010002
2. นางสาวกนกภรณ์ บุญประเสริฐ 62010007
3. นางสาวทิพรกานต์ ประวัตติ 62010326

  
.....  
(ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินปริญญานิพนธ์เรื่อง “การวัดหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำด้วยแบบจำลอง Min-Max และเทคนิคการเกิดเวลา” จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงตามที่วางแผนไว้ไปได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนจาก ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาและแนวทางที่ดีที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าและการแก้ปัญหาอนุญาตให้ใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำงานรวมถึงให้ประสบการณ์การทำงานต่าง ๆ ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในอนาคต

ขอขอบคุณพี่ธนตล เตียงทอง นักศึกษาปริญญาเอกในห้องปฏิบัติการวิจัย ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ที่ให้การช่วยเหลือดูแลในการทำการทดลองจนกระทั่งรายงานฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ตลอดจนพี่ทุกท่านซึ่งได้ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน คอยให้กำลังใจ รวมถึงความห่วงใย และแรงบันดาลใจที่ช่วยผลักดันให้ผู้จัดทำทำงานได้เป็นอย่างดี และขอขอบคุณคณาจารย์ในภาควิชาทุกท่านด้านการศึกษาและให้กำลังใจด้วยดี

นางสาวกนกกร บัญประเสริฐ  
นางสาวกนกภรณ์ บัญประเสริฐ  
นางสาวทิพรกานต์ ประวัติ  
ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ  
ด้วยแบบจำลอง MIN-MAX และเทคนิคการเกตเวลา  
LOW-BAND ULTRA-WIDEBAND LOCALIZATION WITH  
MIN-MAX MODEL AND TIME-GATING TECHNIQUE

โดย นางสาวกนกกร บุญประเสริฐ 62010002  
นางสาวกนกภรณ์ บุญประเสริฐ 62010007  
นางสาวทิพรกานต์ ประวัติ 62010326

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra-Wideband) ปัจจุบันได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่ง ซึ่งมีความแม่นยำสูงในการส่งสัญญาณแบบอิมพัลส์ ปริมาณนิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบแบบจำลองสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำด้วยแบบจำลอง Min-Max และเทคนิคการเกตเวลา ทำการหาตำแหน่งภายในอาคารในช่วงความถี่ 3.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้สายอากาศกรวยคู่เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศรับร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ นำผลที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบโดยพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้ การสูญเสียเชิงวิถี การประวิงเวลา และค่าความผิดพลาดทางระยะทาง โดยค่าความผิดพลาดทางระยะทางจะแสดงผลในรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมในกรณีที่ใช้เทคนิคการเกตเวลาและวงจรรองแบบแมตซ์ และกรณีที่ไม่ใช้วงจรรองแบบแมตซ์ ปริมาณนิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาทดลองขั้นพื้นฐานโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่นำมาประยุกต์ใช้ของการหาตำแหน่ง และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ABSTRACT

Ultra-Wideband (UWB) technology is gaining popularity in the field of locating systems due to its high accuracy in impulse radio communication. This project proposes a model for indoor localization using UWB technology at low band with a min-max model and time-gating technique. The indoor localization measurement is carried out within the frequency range of 3.4 GHz to 4.8 GHz using a biconical antenna as the transmitter and receiver with a vector network analyzer. The results are analyzed and evaluated by considering the received signal strength, path loss, power delay profile, and distance error. The distance error is shown in the form of the cumulative distribution function for the case using a time-gating technique with matched filter and without matched filter. The study contributes to the field of UWB technology and provides insights into its application in indoor localization, with promising performance demonstrated for future research.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>6</b>
2.1 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง	6
2.1.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง	6
2.1.2 หลักการของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง	6
2.1.3 จุดเด่นของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง	8
2.1.4 มาตรฐานและข้อกำหนดของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง	8
2.1.5 มาตรฐานและข้อกำหนดของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งใน ประเทศญี่ปุ่น	9
2.1.6 การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง	10
2.2 ทฤษฎีการหาตำแหน่งภายในอาคาร	11
2.2.1 ความแรงของสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength : RSS)	11
2.2.2 เทคนิค Min-Max	14
2.2.3 การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)	15
2.2.4 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (Power Delay Profile : PDP)	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3</b>	
<b>การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์</b>	<b>17</b>
3.1 การออกแบบและทดลอง	17
3.1.1 เหตุผลที่เลือกใช้สายอากาศกรวยคู่	17
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	18
3.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer : VNA)	18
3.2.2 สายอากาศกรวยคู่ (Biconical Antenna)	19
3.2.3 สายส่งสัญญาณ Semi-Rigid ชนิด RG-142	19
3.2.4 ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ (Calibration Kit)	20
3.3 การทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศกรวยคู่	21
3.3.1 การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $	22
3.3.2 การทดลองวัดอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่	23
3.4 การทดลองวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับของสายอากาศกรวยคู่	25
3.4.1 แบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคาร	25
3.4.2 แบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในรูปแบบ 3 มิติ	26
3.4.3 แบบจำลองสถานที่ที่ใช้ในการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารมุมด้านข้าง (Sideview)	26
3.4.4 แบบจำลองสถานที่ที่ใช้ในการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารมุมด้านบน (Topview)	27
3.4.5 บล็อกไดอะแกรมการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ	28
3.5 สูตรการส่งผ่านสัญญาณฟรีส (Friis' Transmission Formula)	31
3.6 ทฤษฎีการประยุกต์สูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส สำหรับระบบการส่งผ่านเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Extension of Friis' Transmission Formula)	32
3.7 รูปคลื่นสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่ง	33

## สารบัญ (ต่อ)

	<b>หน้า</b>
3.8 รูปคลื่นสัญญาณรับแถบกว้างยิ่ง	34
3.9 วงจรกรองแบบแมตช์ (Matched Filter)	34
3.10 เทคนิคการเกตเวลา (Time-Gating Technique)	36
3.11 ค่าความผิดพลาดทางระยะทาง (Distance Error)	38
3.12 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function : CDF)	38
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	<b>39</b>
4.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $	39
4.2 อัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศรวยคู่	40
4.3 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณ	41
4.4 ความแรงของสัญญาณที่รับได้	44
4.5 การสูญเสียเชิงวิถี	47
4.6 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา	50
4.7 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทาง	51
4.7.1 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตช์และเทคนิคการเกตเวลา	52
4.7.2 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านเทคนิคการเกตเวลา	52
4.7.3 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตช์	55
4.7.4 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตช์และเทคนิคการเกตเวลา	56

## สารบัญ (ต่อ)

	<b>หน้า</b>
4.7.5 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทาง ระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max ระหว่าง กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิค การเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านวงจรกรองแบบ แมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา	57
<b>บทที่ 5</b>	
<b>สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	59
5.1 สรุปผล	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
<b>บรรณานุกรม</b>	61
<b>ภาคผนวก</b>	
ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง	65

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	บล็อกไดอะแกรมของการวัดหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำด้วยแบบจำลอง Min-Max และเทคนิคการเกิดเวลา	5
2.1	ความหนาแน่นกำลังงานเชิงสเปกตรัมและย่านความถี่ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารปัจจุบัน	7
2.2	เปรียบเทียบสเปกตรัมกำลังงานของระบบแถบกว้างยิ่งสหรัฐอเมริกาและประเทศญี่ปุ่น	10
2.3	เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max	14
3.1	สายอากาศกรวยคู่	17
3.2	เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น E5063A	18
3.3	ขนาดและโครงสร้างสายอากาศกรวยคู่	19
3.4	สาย Semi-Rigid ชนิด RG-142	19
3.5	ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ	20
3.6	ขั้นตอนการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศกรวยคู่	21
3.7	แบบจำลองการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศกรวยคู่	22
3.8	ขั้นตอนการทดลองวัดอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่	23
3.9	แบบจำลองการทดลองวัดอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่	24
3.10	แบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคาร	25
3.11	แบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในรูปแบบ 3 มิติ (3D)	26
3.12	แบบจำลองขนาดการวางตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ – มุมด้านข้าง	26
3.13	แบบจำลองขนาดการวางตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ – มุมด้านบน	27
3.14	บล็อกไดอะแกรมการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ	28
3.15	ขั้นตอนการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ	29
3.16	การทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.17	บล็อกไดอะแกรมของระบบการส่งผ่านโดยการประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส โดยมีแมตซ์ฟิลเตอร์ทางด้านรับเพื่อนำมาใช้กับระบบเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง	32
3.18	รูปคลื่นสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา	33
3.19	สเปกตรัมของสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่	33
3.20	บล็อกไดอะแกรมวงจรกรองแบบแมตซ์	34
3.21	บล็อกไดอะแกรมเทคนิคการเกิดเวลา	36
3.22	Kaiser-Bessel Window	37
3.23	กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสม	38
4.1	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $ ระหว่างผลการทดลองวัดสายอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์โคจรข่ายแบบเวกเตอร์กับผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์	39
4.2	เปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศของ E-plane ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกกับสายอากาศกรวยคู่	40
4.3	เปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศของ H-plane ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกกับสายอากาศกรวยคู่	40
4.4	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งที่ 1 (TX1)	41
4.5	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งที่ 2 (TX2)	42
4.6	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งที่ 3 (TX3)	42
4.7	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งที่ 4 (TX4)	43
4.8	ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 1 (TX1)	44
4.9	ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 2 (TX2)	44
4.10	ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 3 (TX3)	45
4.11	ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 4 (TX4)	46
4.12	เฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งทั้ง 4	46
4.13	การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิธีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา	48
4.15 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิธีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์	49
4.16 เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (1.63, 1.38)	50
4.17 เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (1.63, 1.38)	50
4.18 เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (1.63, 1.38)	51
4.19 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา	52
4.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา	54
4.21 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์	55
4.22 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา	56
4.23 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา	57

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	4
2.1	9
3.1	21
3.2	23
3.3	30
4.1	53
4.2	58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น โดยเฉพาะเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย เนื่องจากการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย มีข้อดีหลายอย่าง เช่น สามารถส่งข้อมูลได้ทุกทิศทางโดยมีอากาศเป็นตัวกลาง ประหยัดค่าใช้จ่าย สะดวก ใช้งานได้ในทุกสถานที่ทุกเวลา อย่างไม่จำกัด โดยเทคโนโลยีแบบไร้สายที่นิยมใช้เพื่อการเชื่อมต่ออุปกรณ์ ประกอบด้วย ไวไฟ (Wi-Fi) บลูทูธ (Bluetooth) เทคโนโลยีคลื่นสั้น (Short-Length) เทคโนโลยี WiMax เทคโนโลยีระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Identification) เทคโนโลยีซิกบี (ZigBee) และเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra-Wideband : UWB) เป็นต้น [1]

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายถูกนำไปใช้อย่างหลากหลาย ทั้งการแพทย์ การติดต่อสื่อสารในเชิงธุรกิจ การค้นหาทิศทางและการระบุตำแหน่ง ซึ่งการระบุตำแหน่งได้นำมาใช้ก่อนหน้านี้เป็นระบบจีพีเอส (Global Positioning System : GPS) เป็นระบบนำทางเพื่อไปยังสถานที่เป้าหมาย แต่มีข้อจำกัดเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ภายในอาคาร เนื่องจากการสื่อสารผ่านดาวเทียม ทำให้นำมาใช้ระบุตำแหน่งภายในอาคารหรือสถานที่ปิดจะไม่สามารถคำนวณหาตำแหน่งได้ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาการหาตำแหน่งภายในอาคาร โดยใช้โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีแบนด์วิดท์กว้าง มีความแม่นยำสูง ใช้พลังงานต่ำ ให้ความเร็วสูงในการรับและส่งข้อมูล เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้รับการกำหนดให้อยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.3a มีย่านความถี่ที่ถูกกำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communication Commission : FCC) อยู่ในช่วงย่านความถี่ที่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.6 กิกะเฮิรตซ์ [2] มีสเปกตรัมความหนาแน่นกำลังในการส่งให้อยู่ที่ระดับไม่เกิน -41.3 dBm/MHz เป็นระดับกำลังงานของสัญญาณรบกวน และกำหนดอัตราการรับส่งข้อมูลที่มีอัตราสูงมากกว่า 100 เมกะบิตต่อวินาที ข้อกำหนดเหล่านี้จึงเหมาะสมในการเลือกใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งสำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับเซ็นเซอร์ไร้สายขนาดเล็ก

นอกจากนี้การหาตำแหน่งก็มีความสำคัญ มีการนำมาประยุกต์ใช้หาตำแหน่งบนร่างกายมนุษย์ รวมถึงหาวัตถุสิ่งของ สามารถพิจารณาได้หลากหลายเทคนิค เช่น เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวงกลม 3 วง (Trilateration) เทคนิคพิจารณาวัตต์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ (Received signal strength : RSS) วิธีพิจารณาเวลาในการมาถึงของสัญญาณ (Time of arrival : TOA) วิธีพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ (Time Difference of Arrival : TDOA) ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขการแพร่กระจายของสัญญาณ ทำให้วิธีการเหล่านี้มีความแม่นยำไม่เพียงพอ [3] จึงได้มีการพัฒนาโดยเลือกใช้วิธีการหาตำแหน่งด้วยเทคนิค Min-Max เป็นเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้หลักการซ้อนทับกันของขอบเขตต่ำที่สุด และขอบเขตสูงที่สุด หรือกล่องอย่างน้อย 3 กล่อง ซึ่งอาศัยการวัดระยะทางระหว่างตัวส่ง ถึงตัวรับเพื่อนำมาใช้เป็นขอบเขต เป็นเทคนิคที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน มีความแม่นยำสูง และง่ายต่อการวิเคราะห์หาตำแหน่ง [4] ซึ่งก่อนหน้านี้งานวิจัยมีการประยุกต์ใช้เทคนิค Min-Max ร่วมกับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ในช่วงความถี่ 3.244 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.742 กิกะเฮิรตซ์ พบว่า เฟสของของสัญญาณ ณ ตำแหน่งที่เกิดค่าผิดพลาดสูงสุดมีความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่าเฟสของช่องสัญญาณ ที่ตำแหน่งที่เกิดค่าผิดพลาดต่ำสุด จึงเป็นผลให้สัญญาณที่รับได้ตำแหน่งที่เกิดค่าผิดพลาดสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์อยู่ตลอดเวลาทำให้ในบางการเปลี่ยนแปลงไปคล้ายคลึงกับตำแหน่งอื่น เป็นผลให้เกิดความผิดพลาดของการหาตำแหน่งขึ้น [5] และงานวิจัยที่มีการใช้เทคนิคเสมือนการสแกนลายนิ้วมือ (Fingerprinting Technique) เพื่อระบุตำแหน่งซึ่งจะเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการมาพิจารณาและนำมาเปรียบเทียบความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งนั้น ตำแหน่งเป้าหมายที่ได้คือตำแหน่งที่เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้วมีความใกล้เคียงกันที่สุด เพียงแค่มีสถานีฐานอย่างน้อย 1 ตัวก็สามารถหาตำแหน่งได้ ข้อด้อยคือต้องใช้เวลามากในการเก็บค่าพารามิเตอร์ วิธีการนี้จึงนิยมใช้ในระบบหาตำแหน่งภายในอาคารมากกว่าระบบหาตำแหน่งภายนอกอาคาร [6] พิจารณาร่วมกับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง และการวิเคราะห์อัลกอริทึมแบบ KNN พบว่า ช่วงความถี่ที่กว้างที่สุดคือ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.6 กิกะเฮิรตซ์ จะมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 1.48 เมตร ซึ่งมากกว่าช่วงความถี่ของแถบต่ำ คือ 3.244 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.742 กิกะเฮิรตซ์ และแถบสูง คือ 5.944 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.234 กิกะเฮิรตซ์ ที่ 0.50 เมตร และ 0.49 เมตร ตามลำดับ [3] และจากงานวิจัยที่ใช้ข้อดีจากเทคนิคการวัดเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง นำเทคนิคการเกิดเวลามาประยุกต์ใช้ลดผลกระทบของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับในโดเมนเวลา [7] พบว่าเมื่อสายอากาศปากแตรที่เลือกใช้มีคุณสมบัติที่เหมาะสม เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ต่ำและอัตราการขยายสูงในช่วงความถี่เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง แม้จะมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่แคบแต่ก็ยังคงแคบไม่พอจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการเกิดเวลามาช่วยลดการเชื่อมต่อร่วม ทำให้ผลการใช้เทคนิคการเกิดเวลาสามารถเพิ่มความเที่ยงตรงของ RCS แบบกิ่งรวมสายอากาศส่งรับอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยที่ RCS ที่ใช้เทคนิคการเกิดเวลาจะมีการแกว่งตามความถี่น้อย เนื่องจากไม่เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญญาณการเชื่อมต่อร่วมกับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจาก TUT หรือเกิดการแทรกสอดน้อย [8]

ดังนั้นในปริภูมิต้นี้จึงเลือกใช้วิธีการหาตำแหน่งด้วยเทคนิค Min-Max ร่วมกับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ในช่วงย่านความถี่ต่ำเริ่มที่ 3.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์ ตามมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น จากกระทรวงกิจการภายในประเทศและการสื่อสาร (The Ministry of Internal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Affairs and Communications : MIC) เนื่องจากมีการวิจัยศึกษาช่วงย่านความถี่นี้กับการหาตำแหน่งภายในอาคารน้อย และสามารถนำไปพัฒนาได้หลากหลาย [3] ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้ได้้นำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเกิดเวลามาใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งเนื่องจากเป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนเวลาที่จำกัดขอบเขตความกว้างของรูปคลื่นวิทยุอิมพัลส์เพื่อลดการหน่วงเวลาของรูปคลื่นวิทยุอิมพัลส์อันเนื่องมาจากผลกระทบของการแพร่กระจายคลื่นทำให้การคำนวณหาตำแหน่งมีการพัฒนาความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งและพารามิเตอร์สำหรับการวัดหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ
- 2) เพื่อศึกษาคูณสมบัติสายอากาศรูปแบบกรวยคู่
- 3) เพื่อศึกษาและทำการออกแบบรูปแบบของการจำลองในการทดลองเพื่อวัดหาตำแหน่ง
- 4) เพื่อศึกษาและทำการวิเคราะห์ประเมินผลการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิคการเกิดเวลา และวงจรกรองแบบแมตซ์

## 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ทำการศึกษาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (ย่านความถี่ต่ำ) คูณสมบัติสายอากาศแบบกรวยคู่ทำการออกแบบแบบจำลองการวัดและการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ ภายใต้การหาตำแหน่งแบบเทคนิค Min-Max และทำการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในแต่ละพิกัด โดยทำการวัดช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งย่านความถี่ต่ำที่ 3.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer : VNA) จากนั้นทำการเก็บค่าขนาดและเฟสของสัญญาณเพื่อนำค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับไปวิเคราะห์ และนำผลที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์ประเมินผล เปรียบเทียบหาตำแหน่งค่าความผิดพลาดระยะทางที่ได้จากการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max ในกรณีที่ใช้เทคนิคการเกิดเวลา โดยผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และกรณีที่ใช้เทคนิคการเกิดเวลา โดยไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และนำมาแสดงผลในรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

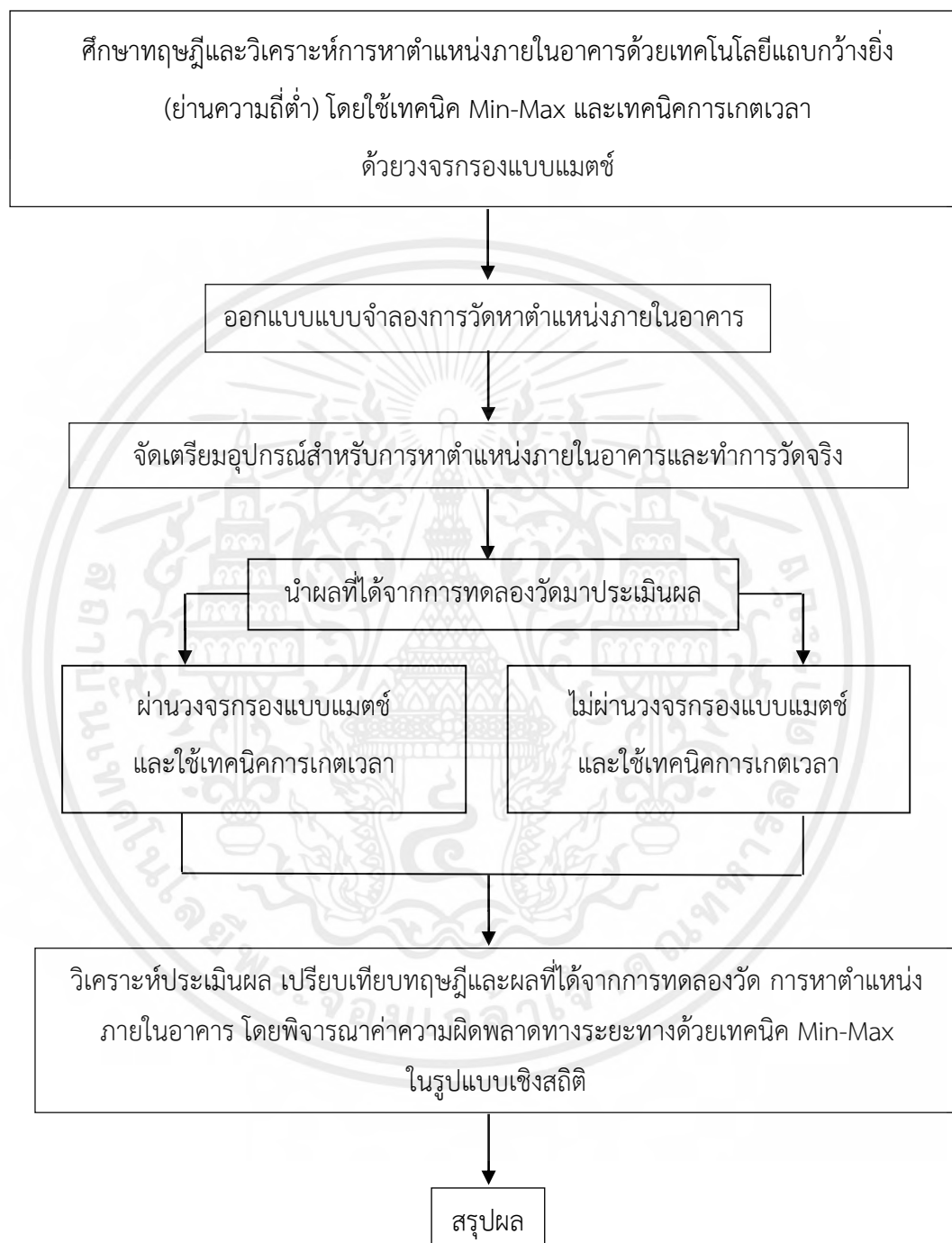
ตารางที่ 1.1 แผนการทำงานของปริญญานิพนธ์ในเทอม 1 และเทอม 2

เทอม 1	เทอม 2
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ศึกษาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (ย่านความถี่ต่ำ) คุณสมบัติสายอากาศแบบกรวยคู่</li> <li>- ออกแบบแบบจำลองการวัดและการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ ภายใต้การหาตำแหน่งแบบเทคนิค Min-Max</li> <li>- ทำการทดลองที่ 1 หาพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบกรวยคู่</li> <li>- ทำการทดลองที่ 2 หาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในแต่ละพิกัด</li> <li>- วิเคราะห์ประเมินผล และสรุปผล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ศึกษาเทคนิคการเกิดเวลา วงจรกรองแบบแมตซ์ และการหาตำแหน่งด้วยเทคนิค Min-Max</li> <li>- หาตำแหน่งค่าความผิดพลาดทางระยะทางที่ได้จากการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิคการเกิดเวลา ในกรณีที่ใช้เทคนิคการเกิดเวลา โดยผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และกรณีที่ใช้เทคนิคการเกิดเวลา โดยไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์</li> <li>- วิเคราะห์เปรียบเทียบผล และสรุปผล</li> <li>- สรุปแนวทางการแก้ไข และข้อเสนอแนะ</li> </ul>

ในภาคเรียนที่ 1 ทำการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (ย่านความถี่ต่ำ) คุณสมบัติสายอากาศแบบกรวยคู่ ทำการออกแบบแบบจำลองการวัดและการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ ภายใต้การหาตำแหน่งแบบเทคนิค Min-Max และทำการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในแต่ละพิกัด โดยแบ่งออกเป็น การทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 พร้อมวิเคราะห์ประเมินผล และสรุปผล

ในภาคเรียนที่ 2 ทำการศึกษาเทคนิคการเกิดเวลา วงจรกรองแบบแมตซ์ และการหาตำแหน่งด้วยเทคนิค Min-Max หาตำแหน่งค่าความผิดพลาดทางระยะทางที่ได้จากการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิคการเกิดเวลา ในกรณีที่ใช้เทคนิคการเกิดเวลา โดยผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และกรณีที่ใช้เทคนิคการเกิดเวลา โดยไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และวิเคราะห์เปรียบเทียบผล สรุปผล พร้อมสรุปแนวทางการแก้ไข และข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาต่อไป

### บล็อกไดอะแกรมของปริศยานิพนธ์ที่นำเสนอ



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของการวัดหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำด้วยแบบจำลอง Min-Max และเทคนิคการเกิดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ปริญาณิพนธ์เรื่อง “การวัดหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำด้วยแบบจำลอง Min-Max และเทคนิคการเกิดเวลา” ได้ทำการออกแบบแบบจำลองและทำการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคาร ดังนั้นปริญาณิพนธ์นี้จึงเสนอทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

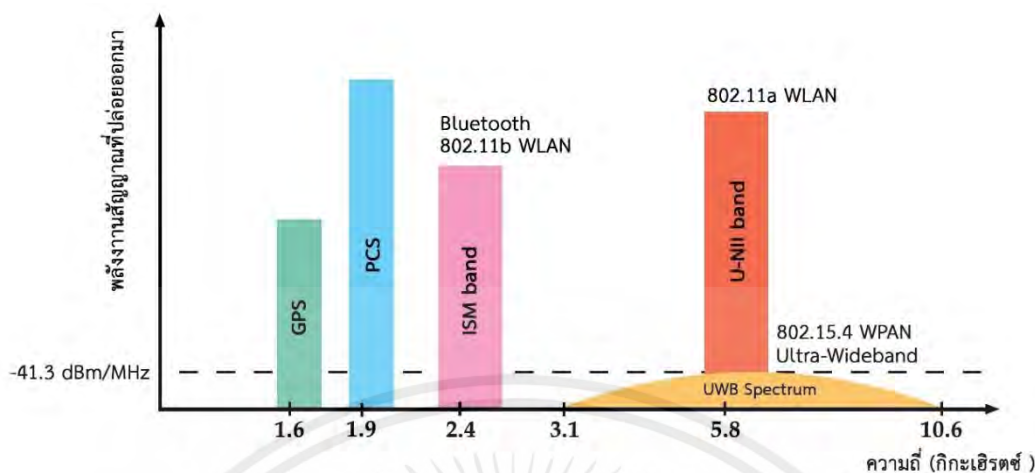
#### 2.1 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

##### 2.1.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเริ่มต้นที่การทดลองใช้งานครั้งแรกของวิทยุ โดยในปี ค.ศ. 1901 มาร์โกนี (Guglielmo Marconi) ใช้เครื่องส่งสัญญาณสปาร์กแก๊ป (Spark Gap Transmitters) ในการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติก ซึ่งทำงานโดยวงจรทำให้เกิดแรงดันสูงมากระหว่างช่องว่างของตัวนำสัญญาณซึ่งเรียกว่าช่องว่างการสปาร์ก (Spark Gap) ทำให้อากาศบริเวณนั้นแตกตัวและกระแสไฟฟ้าสามารถเดินทางผ่านอากาศได้ ซึ่งเรียกว่ากระแสสปาร์ก และทำให้เกิดสัญญาณคลื่นวิทยุรูปพัลส์ เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างมากในช่วงกลางศตวรรษที่ 20 ในสหรัฐอเมริกา เนื่องจากการพิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพสูงในทางเรดาร์ และเทคโนโลยีสื่อสาร จึงถูกใช้สำหรับการใช้งานทางทหารตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 ถึง ปี ค.ศ. 1990 [9]

##### 2.1.2 หลักการของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

สัญญาณเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่พิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการสื่อสาร การแปรผัน และการประยุกต์ใช้เรดาร์ เนื่องจากสัญญาณแถบกว้างยิ่งครอบคลุมส่วนใหญ่ในสเปกตรัม จึงต้องอยู่ร่วมกับระบบหน้าที่โดยไม่ก่อให้เกิดการรบกวน ตัวอย่างเช่น การจัดสรรความถี่ของระบบไร้สายบางระบบจะแสดงดังรูปที่ 2.1 หากเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้รับอนุญาตให้ส่งผ่านช่วงความถี่ของระบบเหล่านี้โดยไม่มีข้อจำกัด [10]



รูปที่ 2.1 ความหนาแน่นกำลังงานเชิงสเปกตรัมและย่านความถี่ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารปัจจุบัน [10]

จากรูปที่ 2.1 พบว่า ระดับกำลังงานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะอยู่ในระดับที่ต่ำเมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารในปัจจุบัน ดังนั้นสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจึงไม่ไปรบกวนกับสัญญาณของระบบการสื่อสารเดิม ซึ่งเป็นเหตุให้สามารถนำเอาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไปใช้งานในที่ที่มีระบบการสื่อสารเดิมใช้อยู่ได้และยังแสดงให้เห็นระดับความหนาแน่นแถบกำลังในระบบแถบกว้างยิ่งโดยเปรียบเทียบกับระบบอื่น ซึ่งการจัดสรรคลื่นความถี่ของระบบไร้สาย A. ระบบกำหนดตำแหน่งทั่วโลก (GPS) (1.56 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 1.61 กิกะเฮิรตซ์), B. ระบบสื่อสารส่วนบุคคล (PCS) (1.85 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 1.99 กิกะเฮิรตซ์), C. ISM band เต้าอบไมโครเวฟ, โทรศัพท์ไร้สาย, บลูทูธ, IEEE 802.11b (2.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.48 กิกะเฮิรตซ์), D. IEEE 802.11a (5.725 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 5.825 กิกะเฮิรตซ์), E. เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (3.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.6 กิกะเฮิรตซ์) โดยกฎระเบียบคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสารในสหรัฐอเมริกาได้เริ่มระบบการกำหนดข้อกำหนดสำหรับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง กำหนดแบนด์วิดท์และกำลังงานของระบบที่แพร่ออกมาในช่องสัญญาณระบบการสื่อสารเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะต้องทำงานให้ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังต้องไม่เกินระดับ  $-41.3$  dBm/MHz สำหรับช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.6 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นระดับของกำลังงานของสัญญาณรบกวน เช่น โทรศัพท์และจอคอมพิวเตอร์ [11]

### 2.1.3 จุดเด่นของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งหรือรวมถึงพัลส์ (Impulse) พัลส์แคบ (Pulse) สัญญาณที่ไม่ใช่ไซน์ซออยด์ (Non-Sinusoidal) สัญญาณที่ปราศจากคลื่นพาห์ (Short Carrier Less) การอัดพัลส์แบบเอพเอ็มอย่างเร็ว (Fast Frequency Chirp) และพัลส์แบบโมน (Mono Pulse) ซึ่งประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสาร เช่น

- มีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน (Noise) เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานต่ำและลักษณะเฉพาะในการสุ่มเทียบ (Pseudo-Random) ของสัญญาณส่ง ทำให้มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณรบกวนซึ่งทำให้การตรวจหาสัญญาณทำได้ยาก และก่อให้เกิดผลการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบคลื่นความถี่วิทยุ เนื่องจากสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับต่ำโดยอยู่ในระดับของสัญญาณรบกวนพื้น (Noise Floor) สัญญาณรบกวนเลยถูกกำจัดออกจากการพิจารณาของระบบ

- เป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อยและมีต้นทุนต่ำของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยทางลักษณะของสัญญาณเดิมที่ยังไม่ผ่านการมอดูเลตของการส่งสัญญาณ ไม่เหมือนกับระบบการส่งสัญญาณวิทยุแบบอื่น โดยที่เครื่องส่งจะทำการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากในโดเมนทางเวลา สามารถแพร่กระจายคลื่นออกไปโดยปราศจากการเพิ่มความถี่วิทยุหรือคลื่นพาห์ และการรวมสัญญาณวิทยุเป็นการนำเอาสัญญาณเบสแบนด์รวมเข้ากับคลื่นพาห์เพื่อย้ายสัญญาณไปยังแถบความถี่ที่มีคุณลักษณะในการแพร่กระจายคลื่นตามต้องการซึ่งสัญญาณจะถูกแพร่กระจายได้ดีโดยปราศจากความต้องการในการเพิ่มการแปลงความถี่ให้สูงขึ้น (Up Conversion) และการเพิ่มกำลังให้สูงขึ้น (Amplification) โดยในกระบวนการกลับกันการแปลงความถี่ลง (Down Conversion) และตัวผลิตความถี่ (Local Oscillator) จึงไม่จำเป็นในเครื่องรับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกัน ทำให้ลดความซับซ้อนของระบบและต้นทุนในการผลิต [10]

### 2.1.4 มาตรฐานและข้อกำหนดของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

ในปี ค.ศ. 2002 คณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร (The Federal Communications Commission : FCC) ได้ระบุแนวทางสำหรับการใช้งานสัญญาณแถบกว้างยิ่งตามแนวทางปฏิบัติว่า “สัญญาณที่มีความกว้างแถบหรือ แบนด์วิดท์มากกว่า 500 เมกะเฮิร์ตซ์ หรือมีแบนด์วิดท์แบบเศษส่วนมากกว่าหนึ่งในสี่ของความถี่กลางจะถูกจัดประเภทเป็นสัญญาณแถบกว้างยิ่ง” [12]

ตารางที่ 2.1 การจำกัดความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแถบกว้างยิ่งภายใน และภายนอกอาคารที่กำหนดโดยคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร [13]

ความถี่	ภายในอาคาร	ภายนอกอาคาร
	EIRP	EIRP
960 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 1.61 กิกะเฮิรตซ์	-75.3 dBm	-75.3 dBm
1.61 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 1.99 กิกะเฮิรตซ์	-53.3 dBm	-63.3 dBm
1.99 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 3.1 กิกะเฮิรตซ์	-51.3 dBm	-61.3 dBm
3.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.6 กิกะเฮิรตซ์	-41.3 dBm	-41.3 dBm
สูงกว่า 10.6 กิกะเฮิรตซ์	-51.3 dBm	-51.3 dBm

มาตรฐานโทรคมนาคมของสหภาพยุโรป (European Telecommunication Standards Institute : ETSI) มีการกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมจากคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร คือ ได้แบ่งเป็นย่านความถี่ต่ำ (Low Band) โดยย่านความถี่ต่ำจะเริ่มที่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์ และย่านความถี่สูง (High Band) โดยย่านความถี่สูงจะเริ่มที่ 6 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 8.5 กิกะเฮิรตซ์ [13]

### 2.1.5 มาตรฐานและข้อกำหนดของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในประเทศญี่ปุ่น

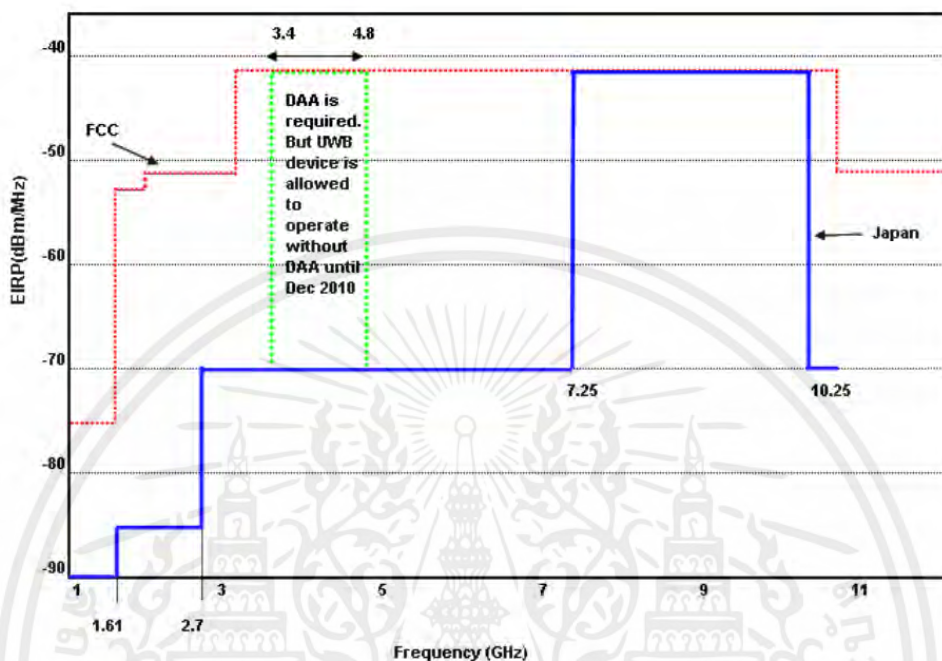
กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งถูกบังคับใช้ในเดือนสิงหาคม ปี ค.ศ. 2006 จากกระทรวงกิจการภายในประเทศและการสื่อสาร (The Ministry of Internal Affairs and Communications : MIC) ความถี่ที่สามารถใช้งานได้ภายในช่วงย่านความถี่ต่ำ 3.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์ และในย่านความถี่สูง 7.25 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.25 กิกะเฮิรตซ์ ดังรูปที่ 2.2 ทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา กับของประเทศญี่ปุ่น ในช่วงความถี่ต่ำวิธีการลดการรบกวนได้ถูกนำมาใช้ ช่วงความถี่ 4.2 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์ จนถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2010 แต่ประเทศญี่ปุ่นได้พิจารณาไปจนถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2013 โดยมีบางข้อกำหนดเฉพาะในประเทศญี่ปุ่น ดังนี้

- ความถี่แบนด์วิดท์อยู่ระหว่างความถี่บนและความถี่ล่าง โดยจะวัดค่าต่ำกว่า 10 เดซิเบล จากค่าความ หนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของสัญญาณหรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่า หรือเท่ากับ 450 เมกะเฮิรตซ์

- ในการดำเนินการภายในอาคารอุปกรณ์ระบบแถบกว้างยิ่งสามารถเชื่อมต่อกับไฟ AC และอุปกรณ์ระบบแถบกว้างยิ่งที่ไม่ได้ต่อกับไฟ AC จะต้องได้รับอนุญาตให้ปล่อยคลื่นวิทยุหลังจากที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับสัญญาณจาก อุปกรณ์วิทยุอื่นที่เชื่อมต่อกับไฟ AC และอัตราการส่งข้อมูลมากกว่า 50 เมกะบิตต่อวินาที ยกเว้นกรณีของสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์วิทยุอื่น [14]



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบสเปกตรัมกำลังงานของระบบแถบกว้างยิ่งยวดสหรัฐอเมริกาและประเทศญี่ปุ่น [14]

### 2.1.6 การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งยวด

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งยวดมีอัตราการส่งข้อมูลมากที่สุดเท่ากับ 110 เมกะบิตต่อวินาทีภายในระยะ 10 เมตร และ 200 เมกะบิตต่อวินาที ภายในระยะ 4 เมตร จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งยวดสามารถให้อัตราการส่งข้อมูลสูงกว่าเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นอย่างมากในการใช้งานจริงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ 2 โหมด โดยแบ่งตามอัตราการส่งข้อมูล คือ โหมดอัตราการส่งข้อมูลสูง (High Data Rate : HDR) หมายถึง มีอัตราการส่งข้อมูลเกินกว่า 100 เมกะบิตต่อวินาที ในระยะใกล้ และอีกโหมด คือ โหมดอัตราการส่งข้อมูลต่ำและ ใช้ในการค้นหาตำแหน่ง (Low Data Rate and Location Tracking : LDR/LT) หมายถึง มีอัตราการส่งข้อมูลลดลงเมื่อเทียบกับ HDR เพื่อเพิ่มระยะการสื่อสารไร้สาย และสามารถใช้บอกตำแหน่งของอุปกรณ์ได้อย่างแม่นยำ เช่น การหาตำแหน่งบุคคลภายในอาคาร การหาตำแหน่งและพิสูจน์อุปกรณ์ภายในโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงเก็บสินค้า [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ทฤษฎีการหาตำแหน่งภายในอาคาร

### 2.2.1 ความแรงของสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength : RSS)

พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้เป็นพารามิเตอร์ของสัญญาณที่ใช้ในการคาดคะเนตำแหน่ง ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะแสดงให้เห็นถึงระดับของกำลังงานที่ถูกส่งออกมาซึ่งเป็นค่าที่ไม่คงที่ จึงต้องทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์นั้นในจำนวนที่หลายครั้ง แล้วนำค่าที่บันทึกมาหาเฉลี่ยเพื่อความเที่ยงตรง สำหรับการหาตำแหน่ง พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้เป็นการพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณซึ่งถูกลดทอนลงอันเนื่องมาจากความสัมพันธ์ของระยะทางและกำลังที่สูญเสีย หรือเรียกว่า การสูญเสียเชิงวิถี จากการประยุกต์ของสมการ Log-Distance Path Loss Model ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.1) เป็นรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่คาดการณ์ถึงการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่แพร่ออกไปในอากาศหรือสายนำสัญญาณ

$$PL = P_{Tx} - P_{Rx} = PL_0 + 10 \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ	$PL$	คือ ผลรวมของค่าลดทอนที่วัดได้ (dB)
	$P_{Tx}$	คือ กำลังงานที่ถูกส่งออก (dBm)
	$P_{Rx}$	คือ กำลังงานที่สามารถรับได้ (dBm)
	$PL_0$	คือ ค่าลดทอนที่ระยะอ้างอิงที่ $d_0$

ด้วยการลดทอนของพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้นี้ จะนำไปสู่พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณในการหาตำแหน่งคือการแปลงค่าระยะทางจากค่าความเข้มของสัญญาณที่ถูกปล่อยออกมาจากโหนดอ้างอิงหรือสายอากาศส่งไปยังโหนดเป้าหมายหรือสายอากาศรับ ดังสมการที่ (2.2) และในการหาตำแหน่งจะนำค่าระยะทางที่ได้ไปใช้คำนวณในเทคนิคการหาตำแหน่งแบบต่าง ๆ การแปลงค่าระยะทางสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ [16] ดังสมการที่ (2.3)

$$RSS(d) = RSS(d_0) - 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (2.2)$$

$$d = d_0 \cdot 10^{\left[ \frac{RSS(d_0) - RSS(d)}{10n} \right]} \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $d$  คือ ระยะทางระหว่างโหนดเป้าหมาย และโหนดอ้างอิง (เมตร)  
 $d_0$  คือ ระยะทางอ้างอิง (กำหนดให้ตำแหน่งละ 1.6 เมตร)  
 $RSS(d)$  คือ ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ตำแหน่ง  $d$  (dB)  
 $RSS(d_0)$  คือ ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ตำแหน่ง  $d_0$  (dB)  
 $n$  คือ เลขชี้กำลังการสูญเสียเชิงวิถี

ในปริณิญาณิพนธ์เล่มนี้  $RSS(d)$  เป็นค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลองโดยที่

$$RSS(d) = 20 \log (\max (v_r(t))) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $v_r(t)$  คือ รูปคลื่นสัญญาณรับ

สามารถหาค่า  $RSS(d_0)$  และค่า  $n$  หาได้จากสมการ Channel Model [17] โดยพิจารณาสมการที่ (2.2) ดังนี้ กำหนดให้

$$y = RSS(d) \quad (2.5)$$

$$A = -10n \quad (2.6)$$

$$x = \log \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (2.7)$$

$$B = RSS(d_0) \quad (2.8)$$

เขียนให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่าย แสดงดังสมการที่ (2.9)

$$y = Ax + B \quad (2.9)$$

กำหนดให้  $N$  คือ จำนวนของข้อมูลที่วัด หรือจำนวนตำแหน่งของโหนดเป้าหมายเท่ากับ 49 ตำแหน่ง โดยที่  $j = 1, 2, \dots, N$

$$y_j = RSS(d_j) \quad (2.10)$$

$$x_j = \log \left( \frac{d_j}{d_0} \right) \quad (2.11)$$

จะได้ค่าความผิดพลาดของข้อมูล  $j$

$$E_j = y_j - Ax_j - B \quad (2.12)$$

ผลรวมของค่าความผิดพลาดกำลังสอง

$$\sum_{j=1}^N E_j^2 = \sum_{j=1}^N (y_j - Ax_j - B)^2 \quad (2.13)$$

จากเงื่อนไขค่าความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุด

$$\frac{\partial}{\partial A} \sum_{j=1}^N (y_j - Ax_j - B)^2 = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial B} \sum_{j=1}^N (y_j - Ax_j - B)^2 = 0 \quad (2.15)$$

จะได้

$$\sum_{j=1}^N x_j y_j - A \sum_{j=1}^N x_j^2 - B \sum_{j=1}^N x_j = 0 \quad (2.16)$$

$$\sum_{j=1}^N y_j - A \sum_{j=1}^N x_j - BN = 0 \quad (2.17)$$

เขียนให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่าย แสดงดังสมการที่ (2.17) และสมการที่ (2.18)

$$A \sum_{j=1}^N x_j^2 + B \sum_{j=1}^N x_j = \sum_{j=1}^N x_j y_j \quad (2.18)$$

$$A \sum_{j=1}^N x_j + BN = \sum_{j=1}^N y_j \quad (2.19)$$

ทำการแก้สมการ เพื่อหาค่า  $A$  และ  $B$  จากนั้นนำไปแทนในสมการที่ (2.18) และสมการที่ (2.19) จะได้ค่า  $RSS(d_0)$  และค่า  $n$  ของแต่ละสายอากาศส่ง [16]

## 2.2.2 เทคนิค Min-Max

การ ำตำแหน่งด้วยเทคนิค Min-Max แสดงดังรูปที่ 2.3 โหนดเป้าหมายจะวัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากโหนดอ้างอิงจากตำแหน่งตามที่วางไว้ นั่นคือตำแหน่ง  $x_i$  และ  $y_i$  เทคนิค Min-Max จึงเป็นการหาตำแหน่งแบบ 2 มิติในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  เป็นเทคนิคการหาตำแหน่งที่ต้องใช้สายอากาศส่งอย่างน้อย 3 อัน เพื่อให้เกิดการซ้อนทับกันของกล่องหรือขอบเขตที่ต่ำที่สุด (Minimum) และขอบเขตที่สูงที่สุด (Maximum) ระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ โดยระยะทางระหว่างโหนดเป้าหมายและโหนดอ้างอิงสามารถคำนวณหาได้จากพารามิเตอร์ความแรงของสัญญาณที่รับได้ และในส่วนของ การคำนวณหาตำแหน่งที่ต้องการหรือตำแหน่งของสายอากาศรับสามารถคำนวณได้จากการนำค่าเฉลี่ยของกล่องที่ซ้อนทับกัน หรือขอบเขตที่ต่ำที่สุด และขอบเขตที่สูงที่สุดในแกน  $x$  และแกน  $y$  [18] โดยขอบเขตที่ต่ำที่สุดในแกน  $x$  และแกน  $y$  คือ

$$(x_i - d_i, y_i - d_i) \quad (2.20)$$

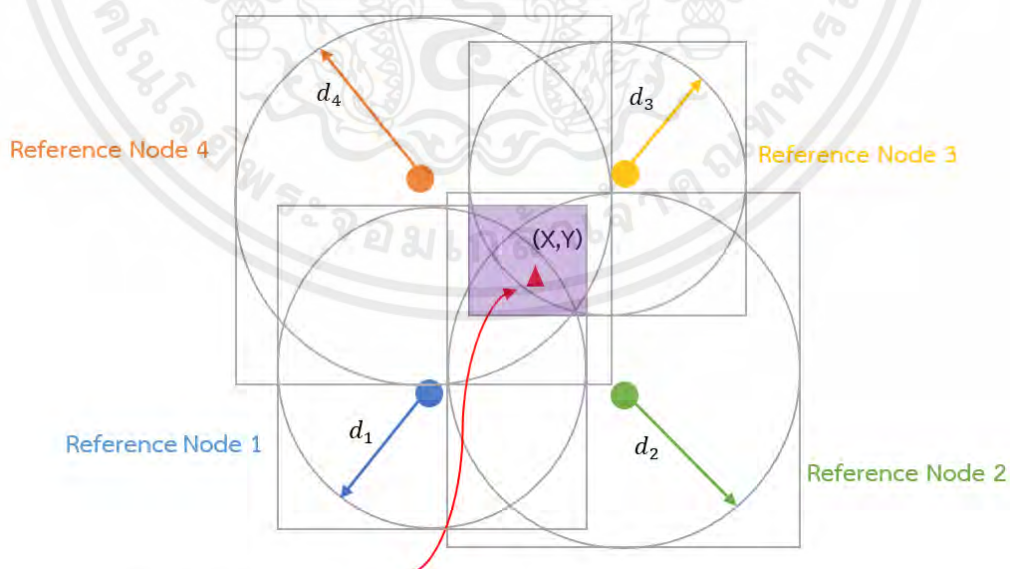
และ ขอบเขตที่สูงที่สุดในแกน  $x$  และแกน  $y$  คือ

$$(x_i + d_i, y_i + d_i) \quad (2.21)$$

เมื่อ  $(x_i, y_i)$  คือ ตำแหน่งของโหนดอ้างอิง

$d_i$  คือ ระยะทางระหว่างโหนดเป้าหมาย และโหนดอ้างอิง (เมตร)

$i$  คือ หมายเลขโหนดอ้างอิง โดยที่  $i=1, 2, 3$  และ 4



The Position of Target Antenna (X, Y)

รูปที่ 2.3 เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Min-Max [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.20) และสมการที่ (2.21) นำค่าขอบเขตที่คำนวณได้มาหาค่าที่สูงที่สุดและต่ำที่สุดของพิกัดที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดในแกน  $x$  ดังสมการที่ (2.22) และสมการที่ (2.23) และค่าที่สูงที่สุดและต่ำที่สุดของพิกัดที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดในแกน  $y$  ดังสมการที่ (2.24) และสมการที่ (2.25)

$$x_{\min} = \max (x_i - d_i) \quad (2.22)$$

$$x_{\max} = \min (x_i + d_i) \quad (2.23)$$

$$y_{\min} = \max (y_i - d_i) \quad (2.24)$$

$$y_{\max} = \min (y_i + d_i) \quad (2.25)$$

สุดท้ายสามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งที่ต้องการหาหรือตำแหน่งของสายอากาศรับได้จากสมการที่ (2.26) และสมการที่ (2.27) [19] ดังนี้

$$X = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} \quad (2.26)$$

$$Y = \frac{y_{\min} + y_{\max}}{2} \quad (2.27)$$

### 2.2.3 การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)

การสูญเสียเชิงวิถีเป็นอัตราส่วนระหว่างการสูญเสียของกำลังงานด้านส่งเทียบกับกำลังงานด้านรับ ซึ่งค่าการสูญเสียเชิงวิถีจะแสดงถึงระดับของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างด้านส่งและด้านรับ [20]

นิยามการสูญเสียเชิงวิถีเป็นอัตราส่วนกำลังส่งต่อกำลังรับ [21] คือ

$$P_L = \frac{P_t}{P_r} \quad (2.28)$$

โดยทั่วไปมักจะแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบล แสดงดังสมการที่ (2.29)

$$PL[dB] = 20 \log \left( \frac{v_t(t)}{v_r(t)} \right) \quad (2.29)$$

เมื่อ  $v_t(t)$  คือ ระดับสัญญาณที่ใส่ส่ง

การสูญเสียเชิงวิถีสำหรับแถบกว้างยิ่งจะพิจารณาดังสมการที่ (2.30)

$$PL(d)[dB] = 20 \log \left[ \frac{\max |v_t(t)|}{\max |v_r(t)|} \right] \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.30) กำหนดให้สัญญาณที่ส่งผ่านมีค่าเท่ากับ 1 [20] ดังนั้น สามารถจัดสมการใหม่ได้ ดังนี้ แสดงดังสมการที่ (2.31)

$$PL(d)[dB] = -20 \log(\max|v_r(t)|) \quad (2.31)$$

#### 2.2.4 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (Power Delay Profile: PDP)

ภาพตัดขวางการประวิงเวลาจะแสดงถึงระดับกำลังงานของสัญญาณด้านส่งที่เข้ามา ด้านรับที่เวลาต่างกัน เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นมีความเร็วไม่เท่ากัน จึงทำให้เวลาการแพร่กระจายของคลื่นมีความล่าช้าตามระยะทางจากด้านส่งถึงด้านรับ [20] แสดงดังสมการที่ (2.32)

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^N a_i^2 \tau_i}{\sum_{i=1}^N a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^N P(\tau_i) \tau_i}{\sum_{i=1}^N P(\tau_i)} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $P(\tau_i)$  คือ กำลังงานของสัญญาณที่เส้นทางที่  $i$   
 $\tau_i$  คือ ค่าประวิงเวลาในเส้นทางที่  $i$   
 $a_i$  คือ ขนาดของสัญญาณในเส้นทางที่  $i$

## บทที่ 3

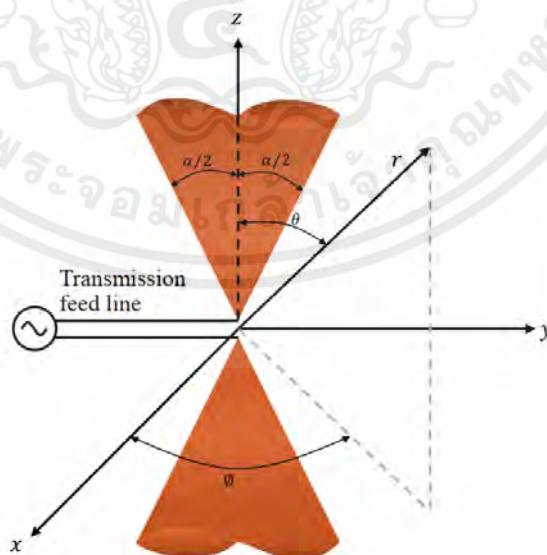
### การออกแบบและการจัดทำปฏิญานิพนธ์

#### 3.1 การออกแบบและทดลอง

##### 3.1.1 เหตุผลที่เลือกใช้สายอากาศกรวยคู่

สายอากาศกรวยคู่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารได้หลากหลาย สายอากาศกรวยคู่เกิดขึ้นจากการวางรูปทรงกรวยทั้งสองอันเข้าไว้ด้วยกันโดยให้วางอยู่ในแนวเดียวกัน ให้จุดยอดของกรวยทั้งสองที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของสายอากาศเป็นจุดป้อนสัญญาณ หรือจุดป้อนการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งเป็นจุดที่มีแรงดันต่ำที่สุดและเป็นจุดที่มีการไหลผ่านของกระแสมากที่สุด ส่วนบริเวณปลายทั้งสองของสายอากาศแบบกรวยคู่จะมีแรงดันมากที่สุด ซึ่งมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional Antenna) สายอากาศประเภทนี้มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทาง 360 องศา ในระนาบใดระนาบหนึ่ง เหมาะสำหรับใช้ติดต่อกับเครื่องลูกข่ายที่เคลื่อนไหวอยู่ในตำแหน่งและทิศทางที่ไม่แน่นอน

ข้อดี ของสายอากาศกรวยคู่ คือ มีแถบความถี่กว้างมากมีแบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในแนวราบ เป็นสายอากาศโครงสร้างหนึ่งที่สามารถใช้ในระบบสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่ง โครงสร้างไม่ซับซ้อน ขนาดเล็ก และมีน้ำหนักเบา แต่ข้อเสีย คือ ในการสร้างสายอากาศมีความยุ่งยาก [22]



รูปที่ 3.1 สายอากาศกรวยคู่ [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

### อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น E5063A	จำนวน	1	เครื่อง
2. สายอากาศแบบกรวยคู่	จำนวน	2	ตัว
3. สายส่งสัญญาณ Semi-Rigid ชนิด RG-142	จำนวน	2	สาย
4. ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ	จำนวน	1	ชุด
5. ผ้าใบขนาด 2 × 2 ตารางเมตร	จำนวน	1	ผืน
6. เสารองรับสำหรับปรับความสูงสายอากาศ	จำนวน	2	ตัว

### 3.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer : VNA)

เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น E5063A เป็นรูปแบบหนึ่งของตัววิเคราะห์โครงข่ายความถี่วิทยุ (Radio-Frequency : RF) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับใช้วัดคุณสมบัติของสัญญาณ โดยสามารถวัดได้ทั้งขนาดของสัญญาณ (Amplitude) และมุม (Phase) เช่น สายอากาศ ตัวกรอง สายเคเบิล หรือตัวเชื่อมต่อสูงสุด 18 กิกะเฮิรตซ์ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น E5063A มีการทำงานได้ในคลื่นความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 8.5 กิกะเฮิรตซ์ สามารถรองรับการใช้งานวัดส่วนประกอบได้หลากหลายด้วยชุดทดสอบพารามิเตอร์ S-Parameter 2 พอร์ต 50 โอห์ม ลดความซับซ้อนของการออกแบบ PCB เพิ่มประสิทธิภาพด้วยกรอบการวัดที่สม่ำเสมอ และอัปเดตตัวเลือกได้ตลอดเวลา [23]

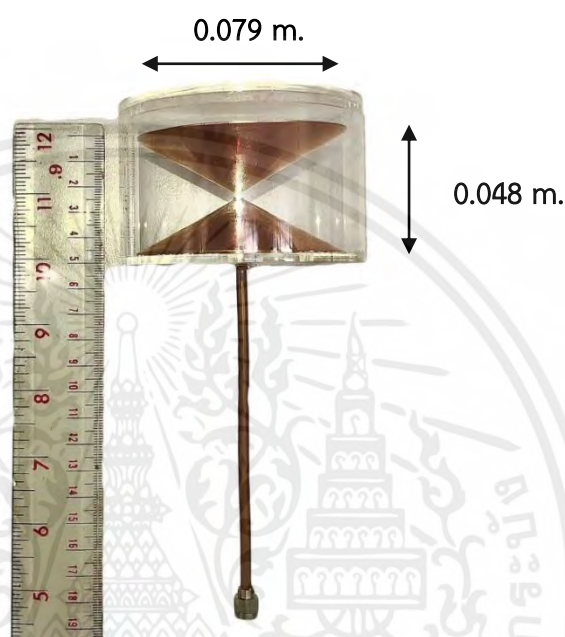


รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น E5063A [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 สายอากาศกรวยคู่ (Biconical Antenna)

โดยแผ่นทองแดงที่มีความหนา 0.005 เมตร ที่ผ่านกระบวนการกลึงโลหะให้แผ่นทองแดงเป็นทรงกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.079 เมตร และมีความยาวของกรวยรวมกัน 0.048 เมตร [24] ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขนาดและโครงสร้างสายอากาศกรวยคู่ [24]

### 3.2.3 สายส่งสัญญาณ Semi-Rigid ชนิด RG-142

สายส่งสัญญาณ Semi-Rigid ชนิด RG-142 เป็นสายส่งสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม [25] ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สาย Semi-Rigid ชนิด RG-142 [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ (Calibration Kit)

เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากเครื่องมือกับค่ามาตรฐาน ใช้สำหรับกำจัดสัญญาณรบกวนในสายนำสัญญาณที่สูญเสียค่าแบบเชิงเรขาคณิตก่อนเริ่มการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยฝั่งชั่วคราว Open ชั่วคราว Short และชั่วคราว Load การปรับเทียบเครื่องมือวิเคราะห์โครงข่ายกับสายนำสัญญาณยังคงมีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ความผิดพลาดของระบบไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงทิศทาง การรบกวนไม่ตรงกัน การจับคู่โหลด และการตอบสนองความถี่ของระบบ ( $<10\%$ ) เมื่อเทียบกับข้อกำหนดด้านความแม่นยำ (OSLT = Open + Short + 50 โอห์ม termination Load + Through Adaptor) [26]

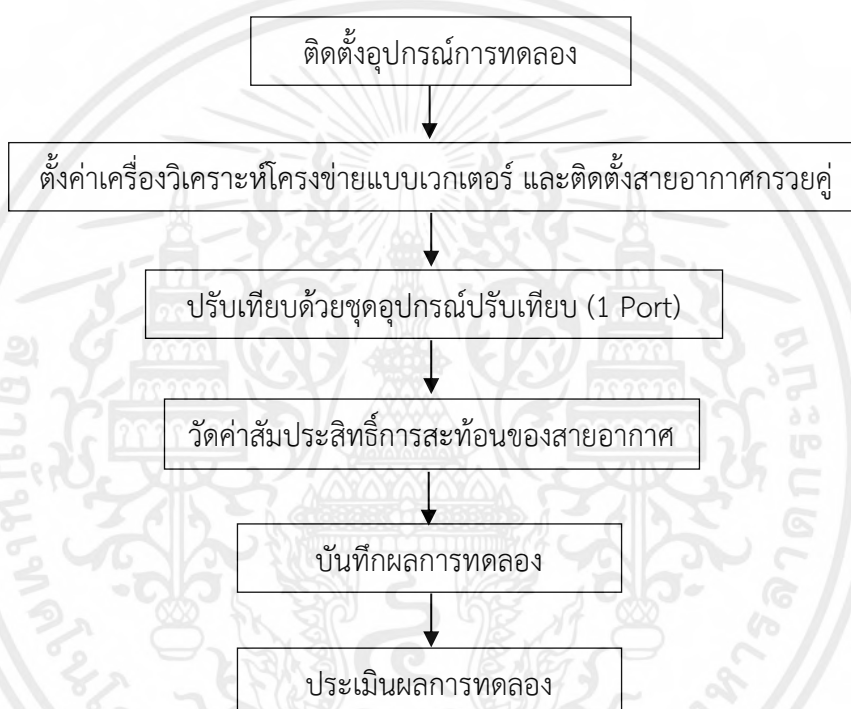


รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ปรับเทียบ [26]

### 3.3 การทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบกรวยคู่

#### 3.3.1 การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{11}|$  เป็นค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกว่าสายอากาศกรวยคู่ที่ได้นำมาใช้วัดสามารถที่จะนำไปใช้งานได้จริงหรือไม่ โดยการพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศจะทำให้รู้ว่าที่ความถี่ที่จะนำไปใช้งานนั้นสายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำกว่า -10 เดซิเบลลงไปยังสายอากาศนั้นจึงสามารถนำไปใช้งานได้



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศกรวยคู่

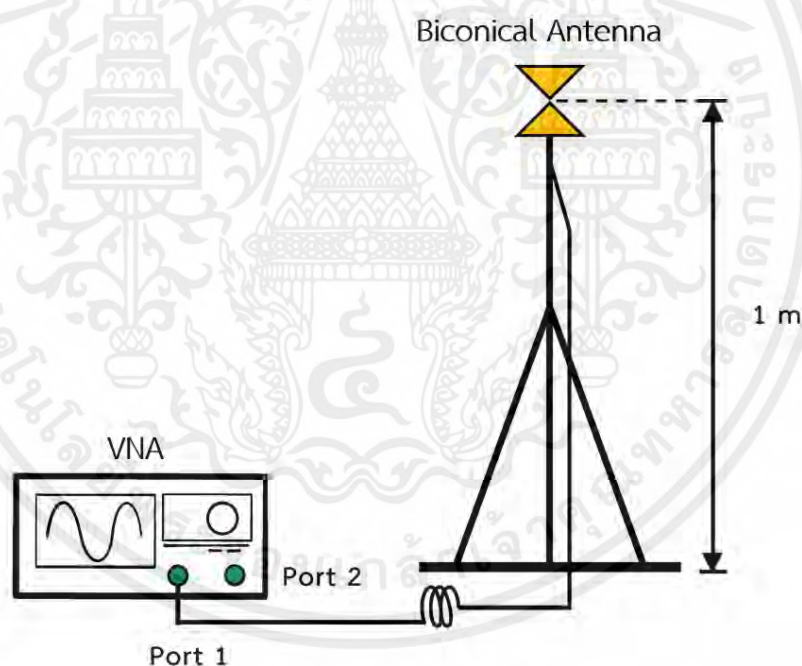
ตารางที่ 3.1 ตารางพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศกรวยคู่

พารามิเตอร์	เงื่อนไขในการทดลอง
ช่วงความถี่	3.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์
ประเภทสายอากาศ	สายอากาศกรวยคู่
ความสูงของสายอากาศส่ง-รับ	1 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการทดลอง

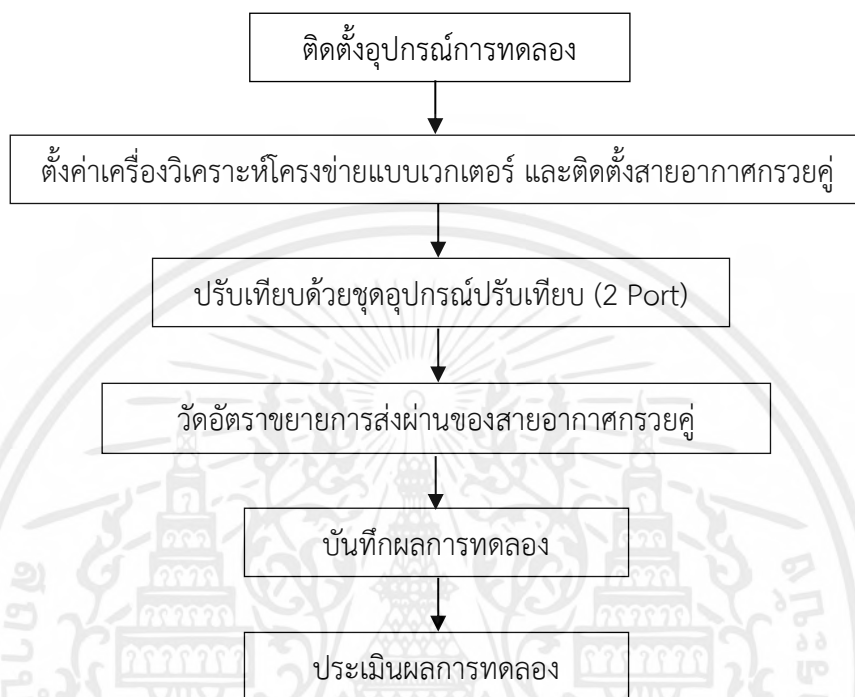
1. ตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ โดยกำหนดความถี่ที่ต้องการทดสอบ กำลังส่ง และจำนวนจุดความถี่
2. เริ่มตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ เลือก Preset-OK > Calibration > Calibrate> 1-Port Cal จากนั้นเลือก Select Port 1 ต่อหัว Open เข้ากับสายนำสัญญาณ กด Open แล้วถอดหัว Open ออก ต่อหัว Short เข้ากับสายนำสัญญาณ กด Short แล้วถอดหัว Short ออก และต่อหัว Load เข้ากับสายนำสัญญาณ กด Load จากนั้นกด Done
3. ติดตั้งสายอากาศกรวยคู่เข้ากับสายนำสัญญาณที่ทำการปรับเทียบแล้ว ดังรูปที่ 3.7
4. เลือกฟังก์ชันการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ  $|S_{11}|$  จากนั้นบันทึกผลการทดสอบ
5. ใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์และประเมินผล



รูปที่ 3.7 แบบจำลองการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศกรวยคู่

### 3.3.2 การทดลองวัดอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่

อัตราขยายการส่งผ่านเป็นตัวบ่งบอกสำหรับการเลือกสายอากาศไปประยุกต์ใช้งาน โดยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะต้องใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบรอบทิศทาง



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดลองวัดอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่

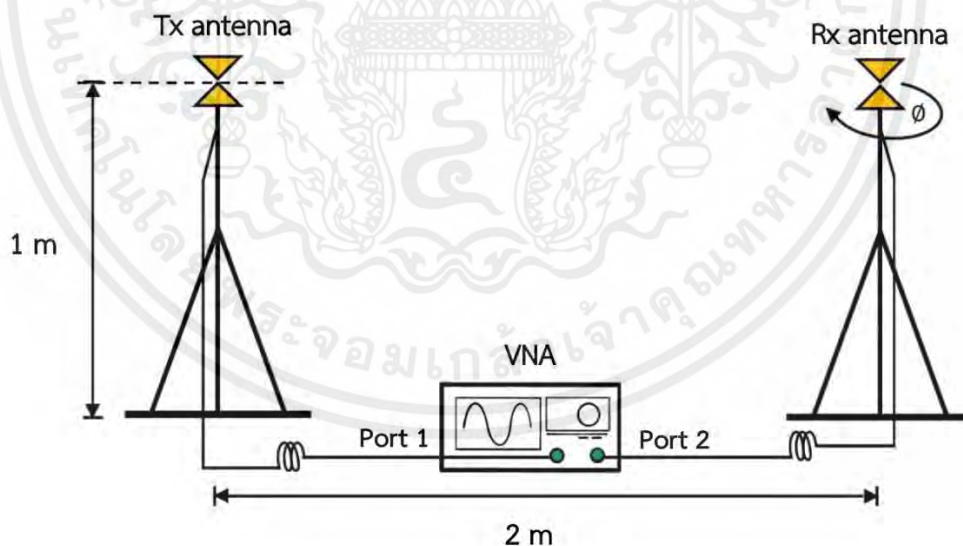
ตารางที่ 3.2 ตารางพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่

พารามิเตอร์	เงื่อนไขในการทดลอง
ช่วงความถี่	3.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์
ประเภทสายอากาศ	สายอากาศกรวยคู่
ความสูงของสายอากาศส่ง-รับ	1 เมตร
ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง-รับ	2 เมตร
การหมุนสายอากาศ	0 องศา ถึง 360 องศา
การหมุนสายอากาศต่อครั้ง	10 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการทดลอง

1. เริ่มตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ เลือก Preset-OK > Calibration > Calibrate > 2-Port Cal (เพื่อวัดทั้งสองสาย) > Reflection สาย 1 กด Port1 Open จากนั้นถอดหัว open ออกแล้วใส่หัว short แล้วกด Port1 short นำหัว short ออกแล้วต่อหัว Load กด Port1 Load จากนั้นทำซ้ำอีกครั้งโดยเลือก Port2 เสร็จแล้วกด Return
2. เลือก Transmission นำหัวเชื่อมต่อเข้าที่ Port1 และ Port2 เพื่อเชื่อมต่อทั้งสองสายสัญญาณเข้าด้วยกัน จากนั้นกด Port 1-2 Thru แล้วถอดสายออก จากนั้นกด Done
3. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.9 ประกอบด้วยสายอากาศส่ง และสายอากาศรับซึ่งเป็นสายอากาศที่ต้องการทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Antenna Under Test : AUT) เพื่อจะทำการหมุนสายอากาศ
4. วัดการแผ่กระจายพลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ตั้งค่ากำหนดความถี่เริ่มต้นที่ 3.4 กิกะเฮิร์ตซ์ และความถี่สุดท้ายที่ 4.8 กิกะเฮิร์ตซ์ แล้วบันทึกค่าทุก ๆ องศาของการหมุน  $\theta$  ของสายอากาศรับ (ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา) โดยหมุนสายอากาศแบบกรวยคู่วัดทีละ 10 องศา
5. วัดการแผ่กระจายพลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ตามข้อที่ 4
6. ใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์และประเมินผล

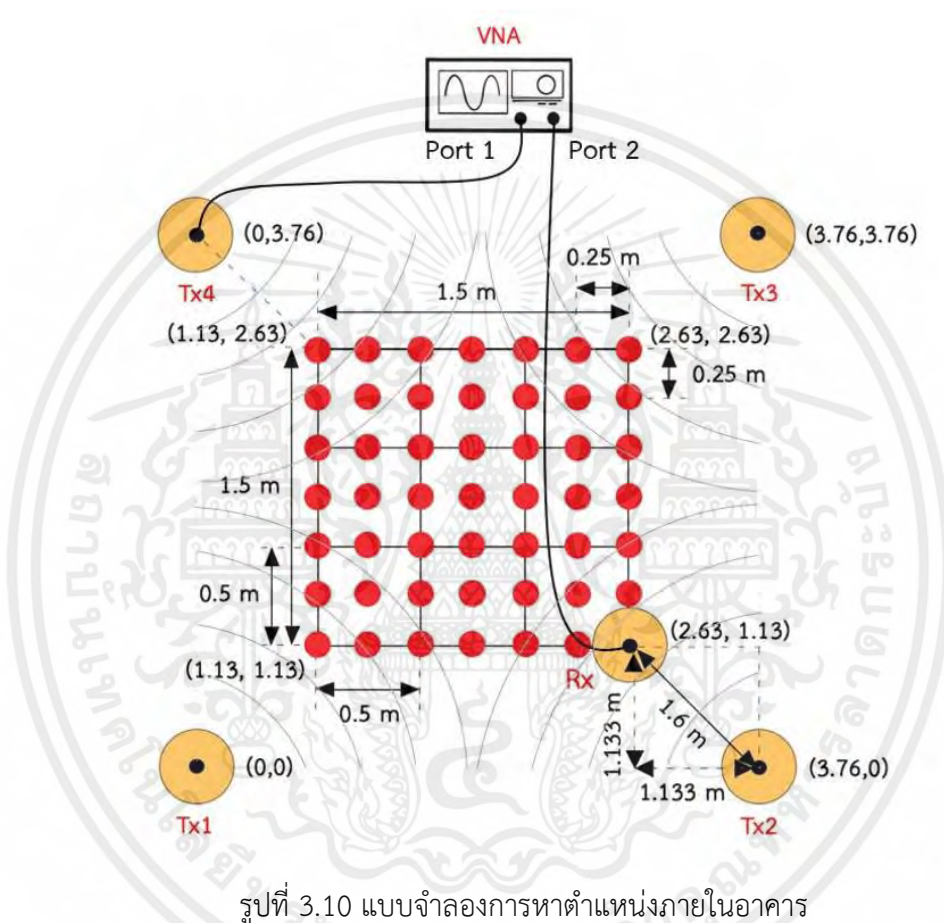


รูปที่ 3.9 แบบจำลองการทดลองวัดอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่

### 3.4 การทดลองวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับของสายอากาศกรวยคู่

#### 3.4.1 แบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคาร

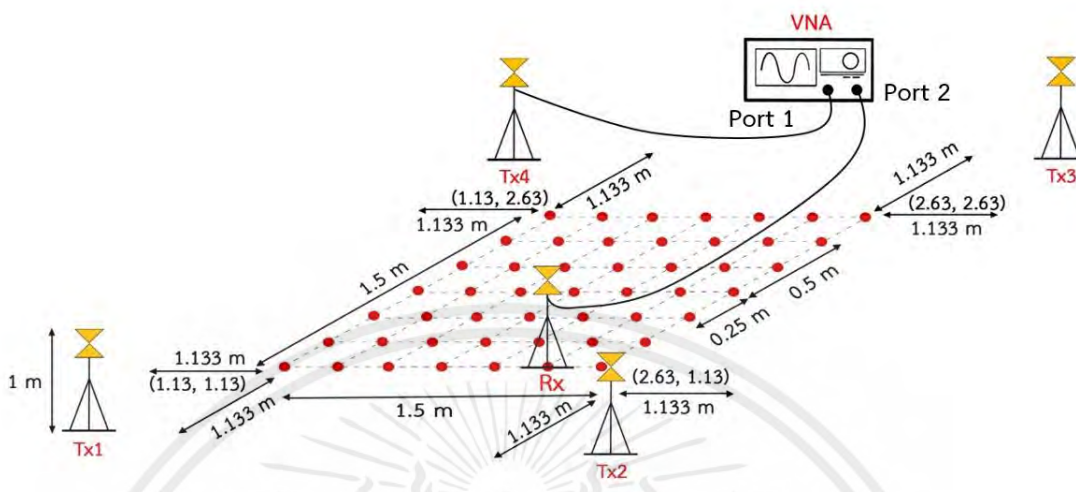
การออกแบบวัดความแรงของสัญญาณที่รับได้จากแบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.3 มาพิจารณาในการออกแบบจำลองดังรูปที่ 3.10



จากรูปที่ 3.10 ในปริภูมิพิกัด  $1/2565$  นี้ทำการทดลองวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณ โดยการวางสายอากาศรับไว้ที่จุดที่ทำการทดสอบ จากนั้นทำการทดลองวัดโดยการเคลื่อนที่สายอากาศรับให้ครบทั้ง 49 ตำแหน่งต่อสายอากาศส่ง ซึ่งแต่ละจุดห่างกันตามแนวแกน  $x$  และ  $y$  เป็นระยะ 0.25 เมตร ในการหาตำแหน่งภายในอาคาร จะทำการบันทึกค่าทั้งหมด 3 ครั้งต่อตำแหน่งของสายอากาศรับ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น E5063A สำหรับการทดลองเป็นสายอากาศแบบกรวยคู่ส่งและรับ โดยที่พอร์ต 1 เชื่อมต่อเข้ากับสายอากาศส่งด้วยสายนำสัญญาณ ที่มีระดับความสูง 1 เมตร และพอร์ตที่ 2 เชื่อมต่อกับสายอากาศรับด้วยสายนำสัญญาณ ที่มีระดับความสูง 1 เมตร ผลการทดลองวัดจะอยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

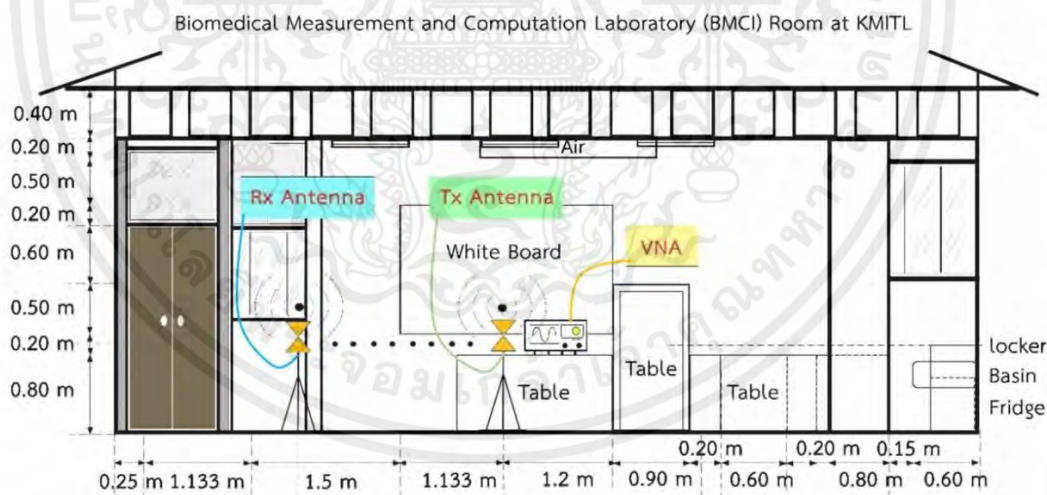
### 3.4.2 แบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในรูปแบบ 3 มิติ (3D)



รูปที่ 3.11 แบบจำลองการวัดหาตำแหน่งในรูปแบบ 3 มิติ (3D)

### 3.4.3 แบบจำลองสถานที่ที่ใช้ในการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารมุมด้านข้าง

(Sideview)

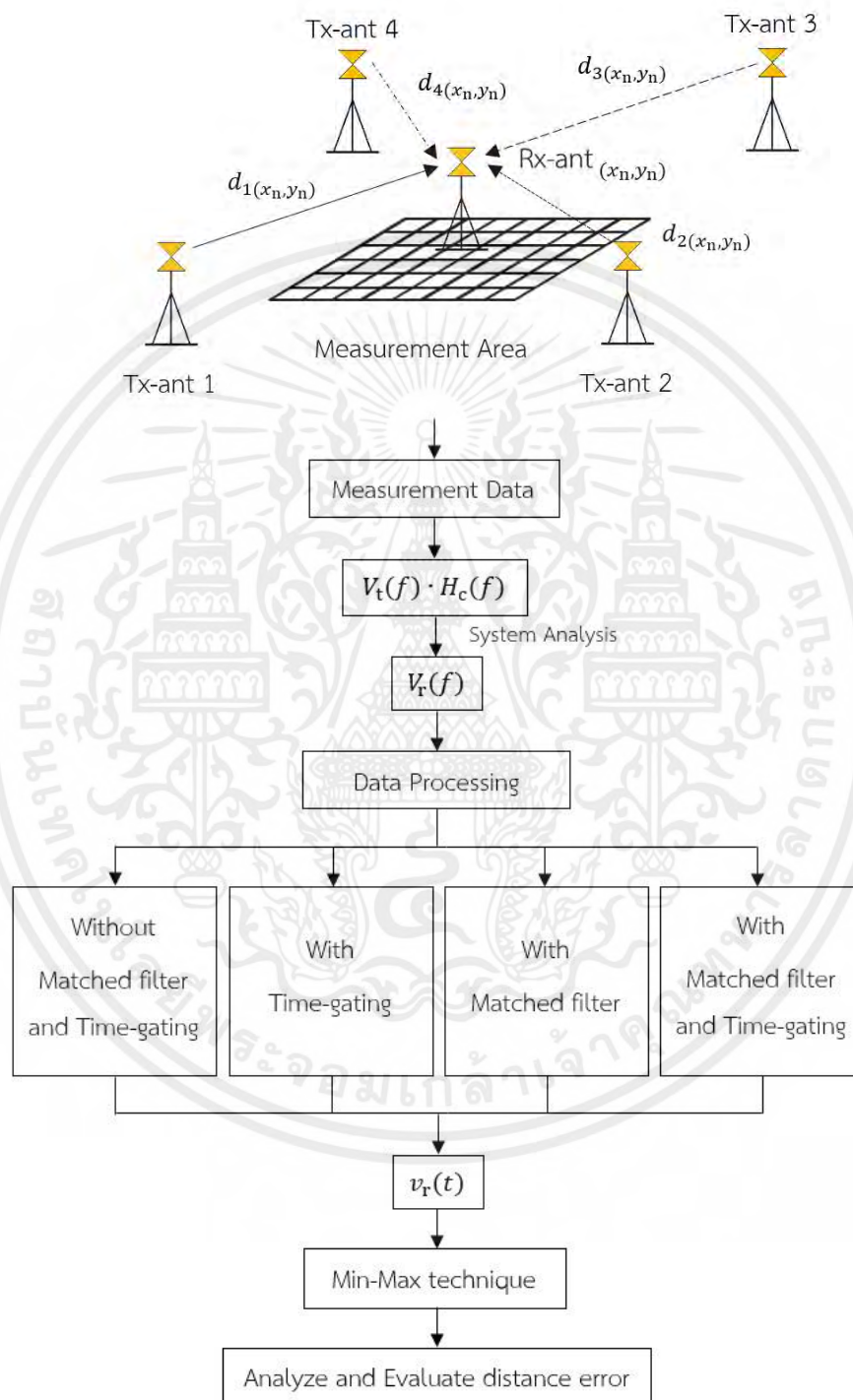


รูปที่ 3.12 แบบจำลองขนาดการวางตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ – มุมด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



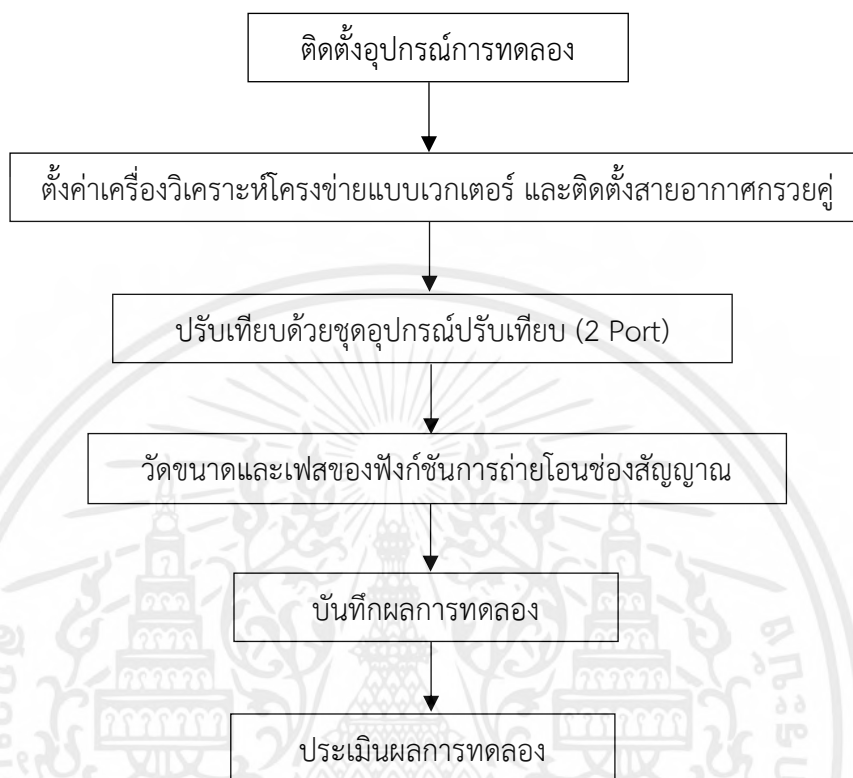
### 3.4.5 แผนผังการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ ย่านความถี่ต่ำ



รูปที่ 3.14 แผนผังการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ ย่านความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ

ตารางที่ 3.3 ตารางพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดความแรงของสัญญาณที่รับได้จากแบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคาร

พารามิเตอร์	เงื่อนไขในการทดลอง
ช่วงความถี่	3.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์
ประเภทสายอากาศ	สายอากาศกรวยคู่
จำนวนตำแหน่งที่ใช้ทดลองต่อ 1 Tx	49 ตำแหน่ง
จำนวนตำแหน่งที่ใช้ทดลองทั้งหมด	196 ตำแหน่ง
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
Dynamic power range	80 เดซิเบล
ความสูงของสายอากาศส่ง-รับ	1 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ

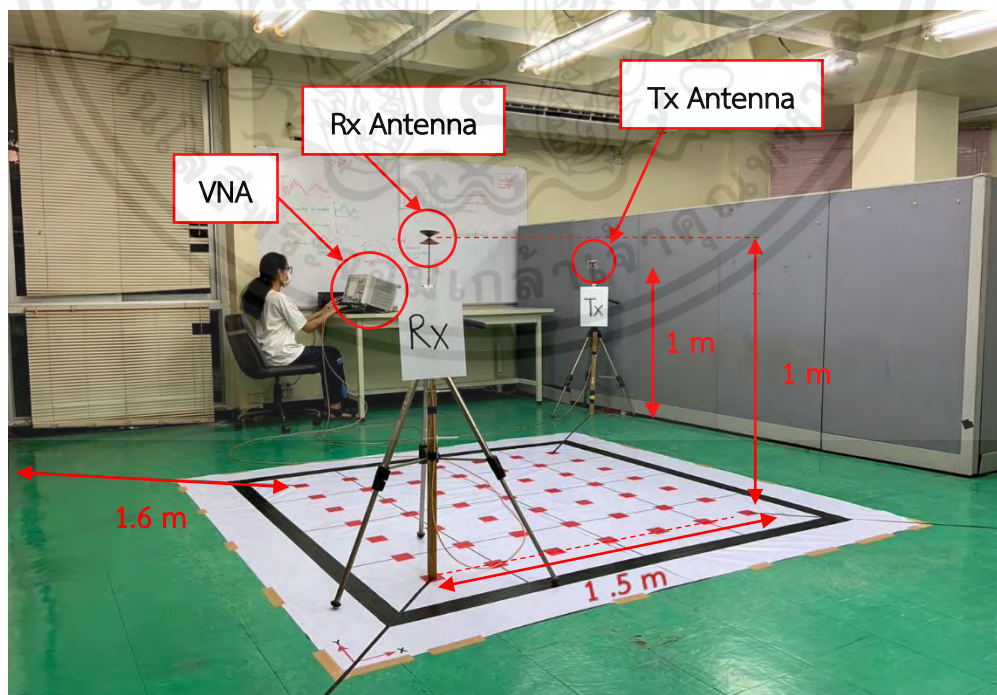
1. จัดวางตำแหน่งผ้าใบ  $2 \times 2$  เมตร ตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ และจัดวางตำแหน่งเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ และสายอากาศแบบกรวยคู่ โดยการวางสายอากาศรับไว้ที่จุดที่ทำการทดสอบ และสายอากาศส่งไว้ที่จุด Tx ตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้

2. ตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ และทำการปรับเทียบด้วยชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ โดยเลือกช่วงความถี่ในการทดสอบสายอากาศโดยให้ Start freq. ที่ 3.4 กิกะเฮิรตซ์ และ Stop freq. ที่ 4.8 กิกะเฮิรตซ์ และติดตั้งสายอากาศกรวยคู่เข้ากับสายนำสัญญาณที่ทำการปรับเทียบแล้ว โดยที่พอร์ต 1 เชื่อมต่อเข้ากับสายอากาศส่งด้วยสายนำสัญญาณ ที่มีระดับความสูง 1 เมตร และพอร์ตที่ 2 เชื่อมต่อกับสายอากาศรับด้วยสายนำสัญญาณ ที่มีระดับความสูง 1 เมตร

3. ทำการวัดค่าขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณโดยการเคลื่อนที่สายอากาศรับให้ครบทั้ง 49 ตำแหน่ง ต่อสายอากาศส่ง ซึ่งแต่ละจุดห่างกันตามแนวแกน x และ y เป็นระยะ 0.25 เมตร ขั้นตอนการวัดจะถูกทำซ้ำ 3 ครั้งต่อตำแหน่งจุดทดสอบ

4. บันทึกผล และนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งต่อไป

การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำห้อง Biomedical Measurement and Computation Laboratory (BMCI) แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 สูตรการส่งผ่านสัญญาณฟรีส (Friis' Transmission Formula)

ถูกเสนอขึ้นครั้งแรกโดยวิศวกรไฟฟ้าชาวเดนมาร์ก ฮาราลีท ฟรีส สามารถใช้เพื่ออธิบายถึงการเชื่อมโยงในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย โดยสัญญาณจากสายอากาศส่งจะถูกส่งผ่านอากาศไปยังสายอากาศรับ การส่งคลื่นสัญญาณผ่านอวกาศว่างนั้นมักจะนิยามให้ค่าการสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่างซึ่งมีค่าเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังงานของสัญญาณที่ถูกส่งออกมา [27] แสดงดังสมการที่ (3.1)

$$G_{\text{Friis}}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} = G_f(f)G_r(f)G_t(f) \quad (3.1)$$

เมื่อ  $G_{\text{Friis}}(f)$  คือ อัตราการขยายของฟรีส

$P_r(f)$  คือ กำลังของสัญญาณด้านรับในรูปของกำลังงาน

$P_t(f)$  คือ กำลังของสัญญาณด้านส่งในรูปของกำลังงาน

$G_f(f)$  คือ อัตราการขยายของช่องสัญญาณในอวกาศว่าง แสดงดังสมการที่ (3.2)

$G_r(f)$  คือ อัตราการขยายของสัญญาณด้านรับ (dB)

$G_t(f)$  คือ อัตราการขยายของสัญญาณด้านส่ง (dB)

$$G_f(f) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi d f}\right)^2 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสง

$f$  คือ ความถี่

สามารถคำนวณหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของอวกาศว่างได้ แสดงดังสมการที่ (3.3) เป็นการเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ

$$H_{\text{Friis}}(f, d) = H_f(f, d)H_r(f) \cdot H_t(f) \quad (3.3)$$

เมื่อ  $H_f(f, d)$  คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านสัญญาณในอวกาศว่าง

$H_r(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศรับ

$H_t(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่ง

สามารถคำนวณหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของอวกาศว่างได้ แสดงดังสมการที่ (3.4)

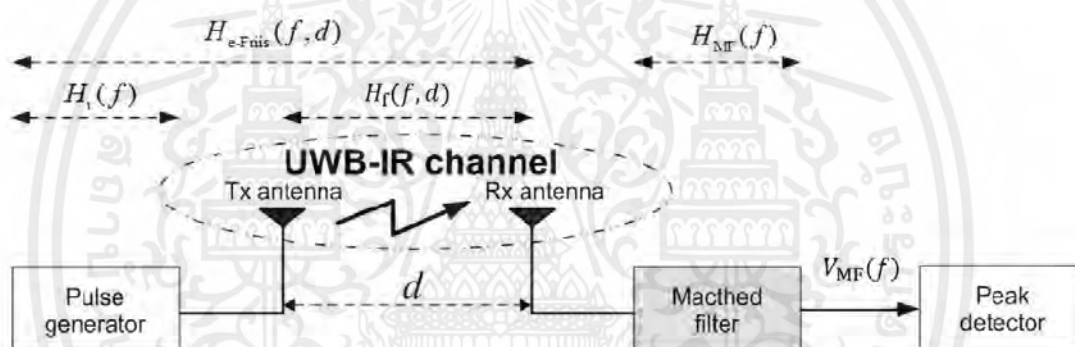
$$H_f(f, d) = \frac{\lambda}{4\pi d} \cdot e^{-jkd} = \frac{c}{4\pi d f} \cdot e^{-jkd} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 ทฤษฎีการประยุกต์สูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส สำหรับระบบการส่งผ่านเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Extension of Friis' Transmission Formula)

เนื่องจากสูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส แสดงดังสมการที่ (3.1) ที่กล่าวมาข้างต้นไม่สามารถที่จะนำมาใช้ได้โดยตรงกับระบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งสมการที่ (3.1) จะมีความเหมาะสมกับค่าความถี่แค่บางช่วงเท่านั้น จึงมีการปรับปรุงสมการการส่งผ่านของฟรีสให้เหมาะสมกับระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง เรียกว่า การขยายสมการการส่งผ่านของฟรีส (Extension Friis' Transmission Formula) โดยจะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการถ่ายโอนโดยการเพิ่มฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณส่งจากวงจรกรองกำเนิดพัลส์ (Pulse generator filter,  $H_i$ ) เพื่อใช้ในการหาค่าความผิดพลาดของสัญญาณได้ [27] ดังนี้



รูปที่ 3.17 บล็อกไดอะแกรมของระบบการส่งผ่านโดยการประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส โดยมีแมตซ์ฟิลเตอร์ทางด้านรับเพื่อนำมาใช้กับระบบเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง [27]

จึงได้นำการประยุกต์ของสูตรการส่งผ่านของฟรีสมาประยุกต์ใช้กับรูปคลื่นการส่งผ่านการได้ ดังนี้

$$H_{e\text{-Friis}}(f, d) = \frac{V_r(f)}{E_i} = H_f(f, d)H_i(f)H_r(f) \cdot H_t(f) \quad (3.5)$$

เมื่อ  $H_f(f, d)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนในอวกาศว่าง

$H_i(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณส่ง

$H_r(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่ง

$H_t(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศรับ

### 3.7 รูปคลื่นสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่ง

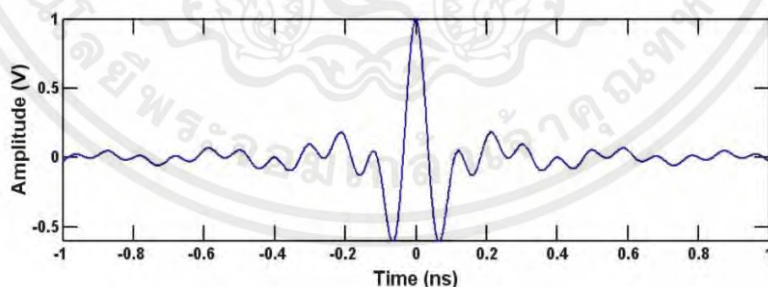
รูปคลื่นส่งที่ผู้จัดทำได้เลือกใช้ในโครงการนี้ ได้กำหนดให้เป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม (Rectangular Passband Waveform) กำหนดให้ความถี่ต่ำสุด ( $f_{\min}$ ) เท่ากับ 3.4 กิกะเฮิรตซ์ ความถี่สูงสุด ( $f_{\max}$ ) เท่ากับ 4.8 กิกะเฮิรตซ์ แบนด์วิดท์ ( $f_b$ ) เท่ากับ 1.4 กิกะเฮิรตซ์ และความถี่กลาง ( $f_c$ ) เท่ากับ 4.1 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา แสดงดังสมการที่ (3.6)

$$v_t(t) = \frac{A}{2f_b} [f_{\max} \text{sinc}(2f_{\max}t) - f_{\min} \text{sinc}(2f_{\min}t)] \quad (3.6)$$

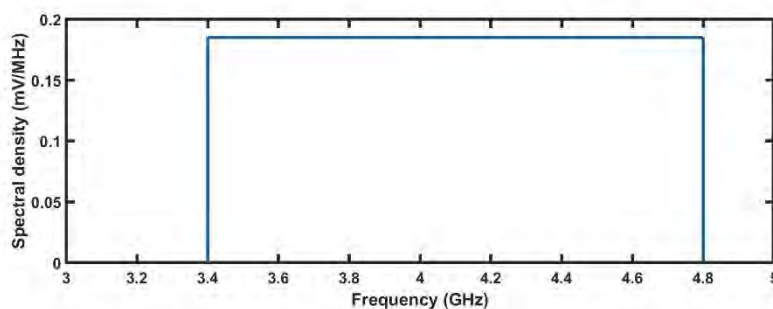
สัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่ [1] แสดงดังสมการที่ (3.7)

$$V_t(f) = \begin{cases} \frac{A}{2f_b} & |f| - f_c \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & |f| - f_c > \frac{f_b}{2} \end{cases} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $v_t(t)$  คือ สัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา  
 $V_t(f)$  คือ สัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่  
 $A$  คือ แอมพลิจูดสูงสุด  
 $f_b$  คือ แบนด์วิดท์  
 $f_c$  คือ ความถี่กลาง  
 $f_{\max}$  คือ ความถี่สูงสุด  
 $f_{\min}$  คือ ความถี่ต่ำสุด



รูปที่ 3.18 รูปคลื่นสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา [4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.19 สเปกตรัมของสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่ [4] ะโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 รูปคลื่นสัญญาณรับแถบกว้างยิ่ง

สำหรับสัญญาณรับที่ได้ในโดเมนความถี่ สามารถวิเคราะห์หาได้จากการนำฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งคูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ ซึ่งสัญญาณรับที่รับได้ในโดเมนความถี่ [1] แสดงดังสมการที่ (3.8)

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H_c(f) \quad (3.8)$$

เมื่อ  $V_r(f)$  คือ สัญญาณรับแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่

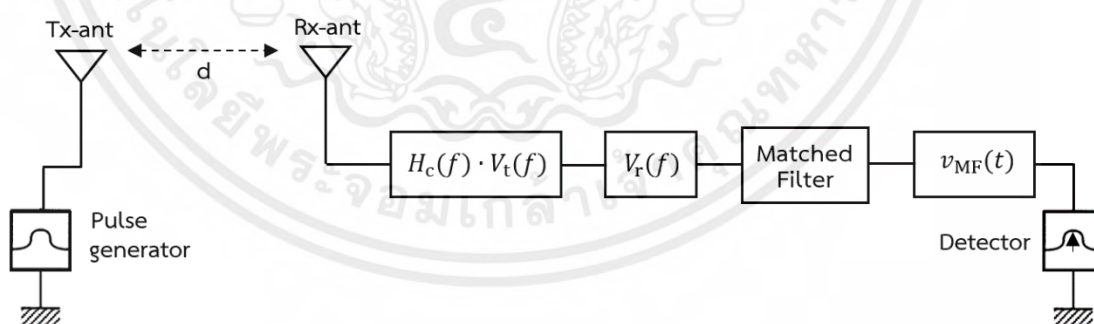
$H_c(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ

สัญญาณรับที่ได้ในโดเมนเวลาสามารถหาได้จากการใช้การแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform : IFFT) สัญญาณรับที่ได้ในโดเมนเวลา [1] แสดงดังสมการที่ (3.9)

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.9)$$

### 3.9 วงจรกรองแบบแมตช์ (Matched Filter)

เป็นตัวกรองเชิงเส้นที่สามารถช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน ข้อดีของวงจรกรองแบบแมตช์คือ เมื่อสัญญาณที่รับได้มีการสูญเสียจากสัญญาณรบกวน จะช่วยปรับปรุงให้สัญญาณทางด้านรับให้ดีขึ้น แต่ยังมีข้อเสีย คือ มีความซับซ้อน [19]



รูปที่ 3.20 บล็อกไดอะแกรมวงจรกรองแบบแมตช์ [19]

โดยที่สายอากาศด้านรับนั้นได้ใช้สมการวงจรกรองแบบแมตช์ในการนำมาวิเคราะห์กับ  $H_{Friis}(f)$  เพื่อในการถูกนำมาหาค่าสูงสุดของสัญญาณเอพท์พุดทางด้านรับโดยสมการวงจรกรองแบบแมตช์ในการกรองความถี่  $H_{Friis}(f)$  สามารถหาคำนวณได้สมการที่ (3.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{MF}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} H_{e-Friis}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df}} \quad (3.10)$$

และวงจรรองแบบแมตซ์ในกรณีสมการไอโซทรอปิก

$$H_{MF,Iso}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} H_{e-Friis,Iso}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis,Iso}(f)|^2 df}} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ได้ จะได้ค่ากำลังของสัญญาณรบกวน แสดงได้ดังสมการที่ (3.12)

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_{MF}(f)|^2 df = 2f_b \quad (3.12)$$

โดยในกรณีนี้รูปร่างของสัญญาณเอาท์พุตที่ได้มาจากวงจรรองแบบแมตซ์  $v_{MF}(t)$  เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} v_{MF}(t) &= h_{e-Friis}(t) \otimes h_{MF}(t) \\ &= \frac{\sqrt{2f_b} h_{e-Friis}(t) \otimes h_{e-Friis}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h^2_{e-Friis}(t) dt}} \end{aligned} \quad (3.13)$$

และสำหรับกรณีไอโซทรอปิก

$$\begin{aligned} v_{MF,Iso}(t) &= h_{e-Friis,Iso}(t) \otimes h_{MF,Iso}(t) \\ &= \frac{\sqrt{2f_b} h_{e-Friis,Iso}(t) \otimes h_{e-Friis,Iso}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h^2_{e-Friis,Iso}(t) dt}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

สำหรับสเปกตรัมของเอาท์พุตที่ได้มาจากวงจรรองแบบแมตซ์  $V_{MF}(f)$  คือ

$$\begin{aligned} V_{MF}(f) &= H_{e-Friis}(f) H_{MF}(f) \\ &= \frac{\sqrt{2f_b} |H_{e-Friis}(f)|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

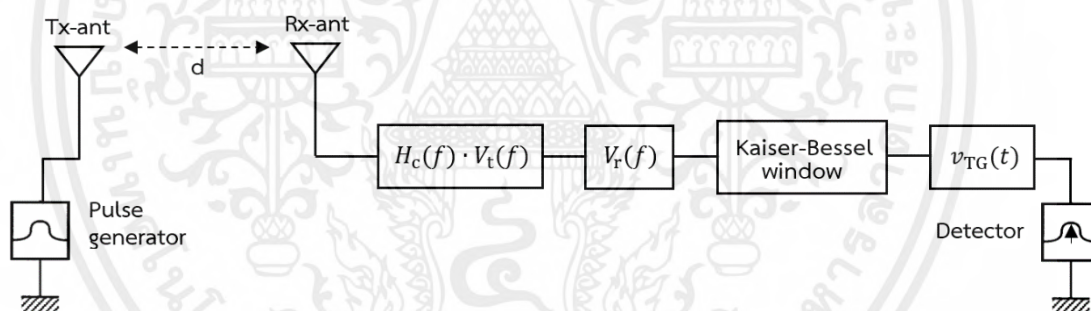
พิจารณาค่าสูงที่สุดของสัญญาณ จะได้

$$\begin{aligned} \max_t v_{MF}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} V_{MF}(f) df \\ &= \sqrt{2f_b \int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df} \end{aligned} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.10 เทคนิคการเกตเวลา (Time-Gating Technique)

การเกตเวลาเป็นวิธีการลดการรบกวนหลายวิธีและเป็นการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนเวลา โดยการใช้นิวทริ์คคูณกับสัญญาณในโดเมนเวลา เพื่อเป็นการกำหนดช่วงเวลาที่ทำให้สัญญาณมีค่าประมาณเท่าเดิม และช่วงเวลาที่ทำให้สัญญาณมีค่าประมาณเป็นศูนย์ แต่การใช้นิวทริ์คจะทำให้เกิดค่าผิดพลาดของสัญญาณในช่วงเวลาที่ต้องการขึ้น โดยนิวทริ์คพื้นฐานมีหลายชนิด เช่น นิวทริ์คสี่เหลี่ยม (Rectangular Window) นิวทริ์คบาร์ทเลทท์ (Barlett Window) นิวทริ์คแฮมมิง (Hamming Window) นิวทริ์คฮานนิง (Hanning Window) และนิวทริ์คแบลคแมน (Blackman Window) จะต้องใช้ความยาวของนิวทริ์คมากและอันดับนิวทริ์คสูง นิวทริ์คที่ทำให้เกิดค่าผิดพลาดน้อยจะต้องใช้นิวทริ์คทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง แต่มีข้อเสีย คือ มีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์มาก ซึ่งนิวทริ์คไคเซอร์-เบสเซล (Kaiser-Bessel Window) เป็นนิวทริ์คที่ประมาณมาจากนิวทริ์คทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง และอยู่ในเทอมทางคณิตศาสตร์ที่ง่ายขึ้น แล้วยังคงคุณสมบัติที่ทำให้เกิดค่าผิดพลาดน้อยอีกด้วย ดังนั้นปริยญาณีพนธ์ฉบับนี้ จึงเลือกใช้นิวทริ์คไคเซอร์-เบสเซลในการศึกษา โดยบล็อกไดอะแกรมเทคนิคการเกตเวลา [28] แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 บล็อกไดอะแกรมเทคนิคการเกตเวลา [28]

เมื่อนิวทริ์คไคเซอร์-เบสเซล แสดงดังสมการที่ (3.17)

$$w(t) = \begin{cases} \frac{I_0\left(\pi\alpha\sqrt{1-\left\{\frac{2[t-t_p]}{T}\right\}^2}\right)}{I_0(\pi\alpha)}, & t_p - \frac{T}{2} \leq t \leq t_p + \frac{T}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.17)$$

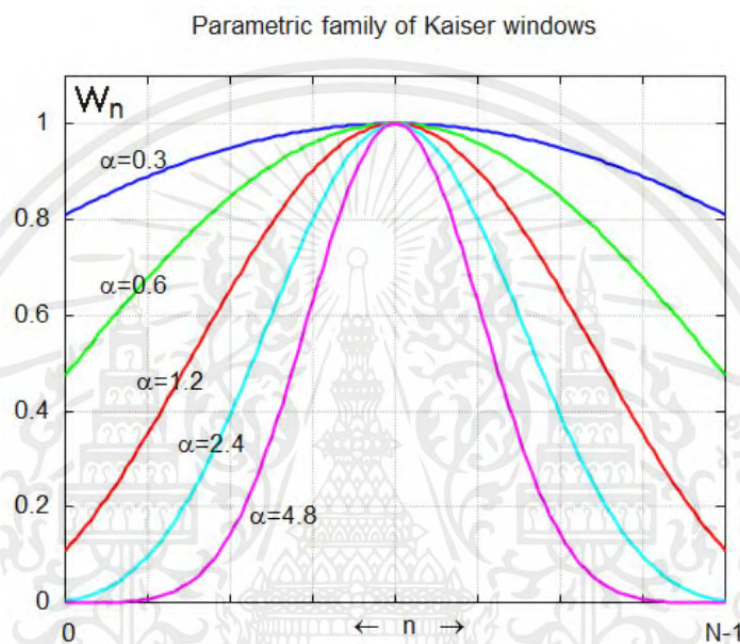
- เมื่อ  $T$  คือ ความกว้างของนิวทริ์ค หรือระยะเวลาของนิวทริ์ค (วินาที)  
 $\alpha$  คือ พารามิเตอร์รูปร่างของนิวทริ์ค  
 $t_p$  คือ เวลาที่นิวทริ์คมีแอมพลิจูดสูงสุด (วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชัน  $I_0(x)$  เป็นฟังก์ชันเบสเซลที่ถูกแก้ไขอันดับที่ศูนย์ของชนิดแรก แสดงดังสมการที่ (3.18)

$$I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} e^{xcos(\theta)} d\theta \quad (3.18)$$

พารามิเตอร์ของวินโดว์ไคเซอร์-เบสเซล



รูปที่ 3.22 Kaiser-Bessel Window [29]

ไคเซอร์-เบสเซล ได้รับการพัฒนาโดย James Kaiser ที่ Bell Laboratories เป็นพารามิเตอร์ ที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองการตอบสนองแรงกระตุ้นที่จำกัด และการวิเคราะห์สเปกตรัม วินโดว์ไคเซอร์-เบสเซลใกล้เคียงกับวินโดว์  $\alpha$  เป็นจำนวนจริงที่ไม่ติดลบซึ่งกำหนดรูปร่างของวินโดว์ ในโดเมนความถี่ จะกำหนดการแลกเปลี่ยนระหว่างความกว้างของโลบหลักและระดับของโลบข้าง ซึ่งเป็นการตัดสินใจที่สำคัญในการออกแบบวินโดว์ จากรูปที่ 3.21 ค่า  $\alpha$  แตกต่างกัน ไคเซอร์-เบสเซลมีความสามารถในการรักษาพลังงานสูงสุดในโลบหลัก (เช่น ความกว้างของโลบหลักแคบ) และสามารถลดระดับโลบข้างได้ บางกรณีวินโดว์ไคเซอร์จะถูกกำหนดพารามิเตอร์โดย  $\beta$  โดยที่  $\beta = \pi\alpha$  เมื่อ  $\alpha$  เพิ่มขึ้น โลบหลักจะมีความกว้างเพิ่มขึ้น และโลบข้างจะมีความกว้างลดลง  $\alpha = 0$  ตรงกับวินโดว์สี่เหลี่ยม สำหรับ  $\alpha$  ขนาดใหญ่ รูปร่างของวินโดว์ไคเซอร์ (ทั้งในโดเมนเวลาและความถี่) มีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นโค้งแบบเกาส์เซียน วินโดว์ไคเซอร์เกือบจะดีที่สุดในการแข่งขันของความถี่สูงสุด [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.11 ค่าความผิดพลาดทางระยะทาง (Distance Error)

ค่าความผิดพลาดทางระยะทางเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ถึงความแม่นยำของการระบุตำแหน่งโดยหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งจริงและตำแหน่งจากการทดลอง ด้วยสูตรการคำนวณค่ากำลังงานเฉลี่ยผิดพลาด สามารถหาค่าความผิดพลาดทางระยะทางได้ [30] จากสมการที่ (3.19)

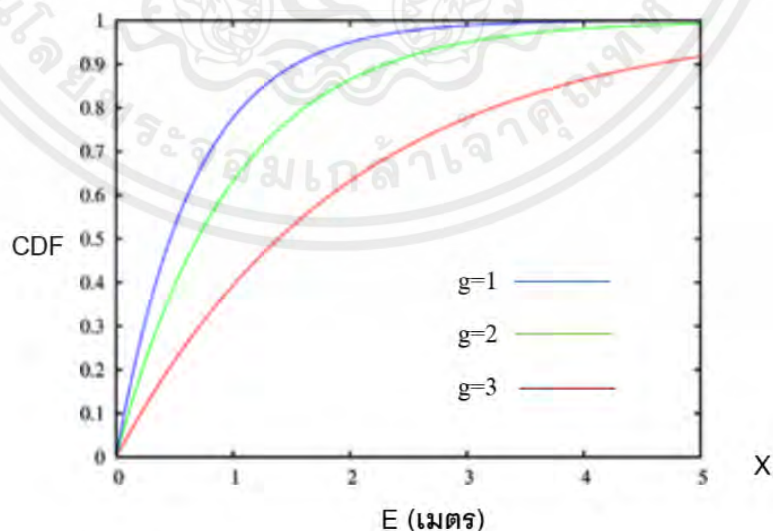
$$Error = \sqrt{(X - x_{\text{real}})^2 + (Y - y_{\text{real}})^2} \quad (3.19)$$

เมื่อ  $x_{\text{real}}$  คือ ตำแหน่งในพิกัด  $x$  ที่ถูกต้อง  
 $y_{\text{real}}$  คือ ตำแหน่งในพิกัด  $y$  ที่ถูกต้อง  
 $X$  คือ ตำแหน่งในพิกัด  $x$  ที่ได้จากการทดลอง  
 $Y$  คือ ตำแหน่งในพิกัด  $y$  ที่ได้จากการทดลอง

### 3.12 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function : CDF)

ในโครงงานนี้จะอธิบายผลการทดลองในรูปกราฟฟังก์ชันการแจกแจงแบบสะสม สำหรับในทางทฤษฎีความน่าจะเป็นทางสถิติ โดย CDF คือ ค่าข้อมูลจริงของตัวแปรสุ่ม  $x$  หรือฟังก์ชันการกระจายของ  $x$  [16]

$$F(E; g) = \begin{cases} 1 - e^{-gE}, & E \geq 0 \\ 0, & E < 0 \end{cases} \quad (3.20)$$



รูปที่ 3.23 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสม [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

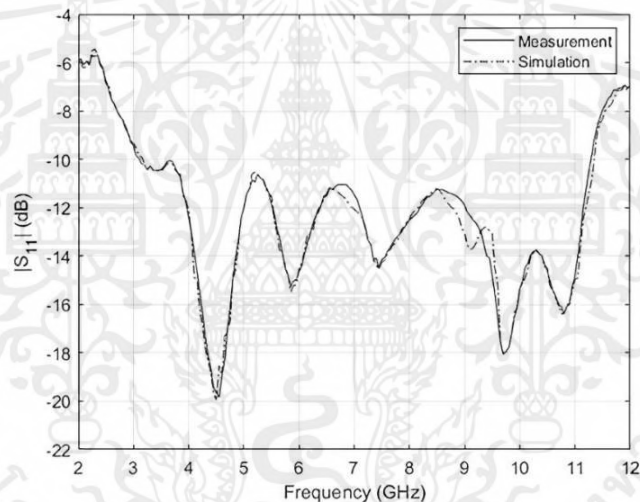
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ ได้นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ โดยจะแสดงผลการทดลองที่ได้ดังนี้

#### 4.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จะแสดงในรูปของกราฟสองมิติ โดยที่แกน  $x$  คือ ความถี่ในหน่วยกิกะเฮิรตซ์ แกน  $y$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในหน่วยเดซิเบล แสดงดังรูปที่ 4.1



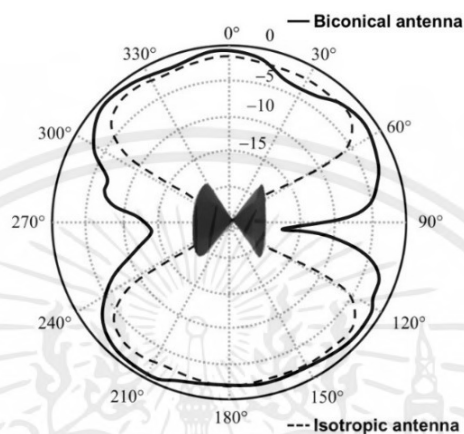
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{11}|$  ระหว่างผลการทดลองวัดสายอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์กับผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{11}|$  แสดงถึงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศระหว่างผลการทดลองวัดสายอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (เส้นทึบ) กับผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ (เส้นประ) พบว่า ตั้งแต่ความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.6 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำกว่า -10 เดซิเบล หมายความว่า สายอากาศรอยคู่ที่ได้นำมาศึกษานี้ สามารถนำไปใช้ทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ได้ เนื่องจากครอบคลุมช่วงความถี่ 3.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์

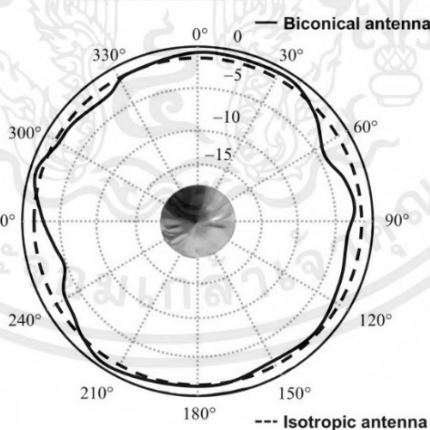
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 อัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่

อัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่ จะแสดงในรูปของกราฟสองมิติ แสดงดังรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศของ E-plane ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกกับสายอากาศกรวยคู่



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศของ H-plane ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกกับสายอากาศกรวยคู่

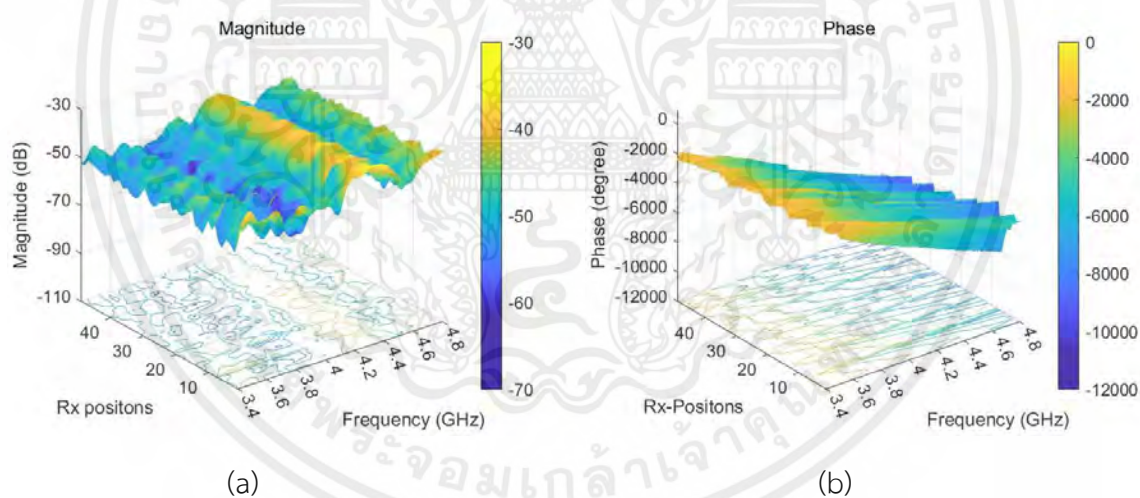
จากรูปที่ 4.2 เปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศของ E-plane ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกกับสายอากาศกรวยคู่ แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยายการส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสายอากาศไอโซทรอปิก (เส้นประ) กับอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่ (เส้นทึบ) และจากรูปที่ 4.3 เปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศของ H-plane แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศไอโซทรอปิก (เส้นประ) กับอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่ (เส้นทึบ) พบว่า เป็นไปตามคุณสมบัติของสายอากาศกรวยคู่ มีการแพร่กระจายแบบรอบทิศทาง โดยมีค่าคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

### 4.3 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณ

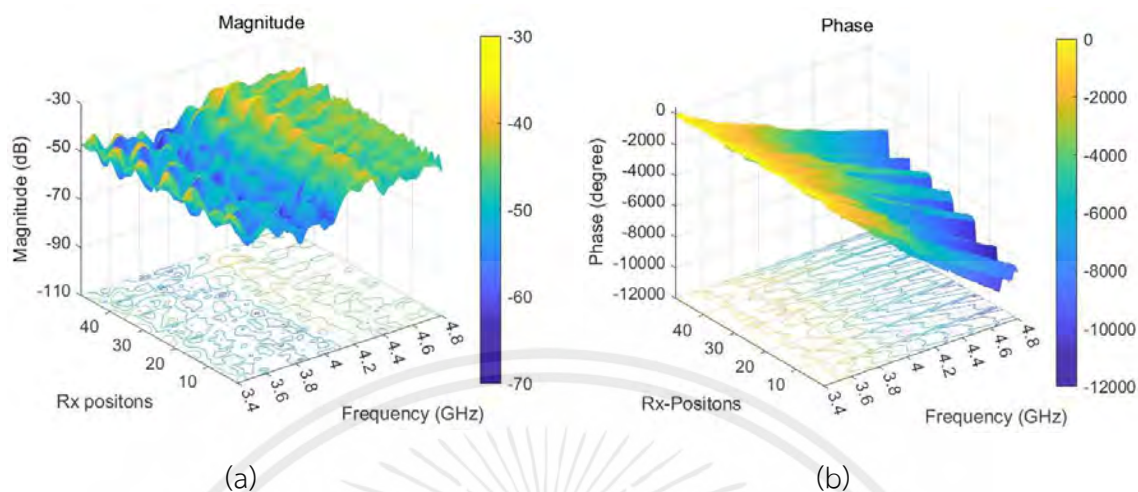
ขนาดจะแสดงให้เห็นถึงระดับสัญญาณในการส่งผ่านที่ความถี่ที่พิจารณา และเฟสจะแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของช่องสัญญาณ หากช่องสัญญาณที่ได้มีความเป็นเชิงเส้น หมายความว่าคุณภาพของช่องสัญญาณดี ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณจะแสดงในรูปของกราฟสามมิติ โดยที่แกน  $x$  คือ ความถี่ในหน่วยกิกะเฮิรตซ์ แกน  $y$  คือ ตำแหน่งของสายอากาศรับ และแกน  $z$  คือ ขนาดในหน่วยเดซิเบล และเฟสในหน่วยองศา แสดงดังรูปที่ 4.4 ถึง รูปที่ 4.7



รูปที่ 4.4 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1)

(a) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1)

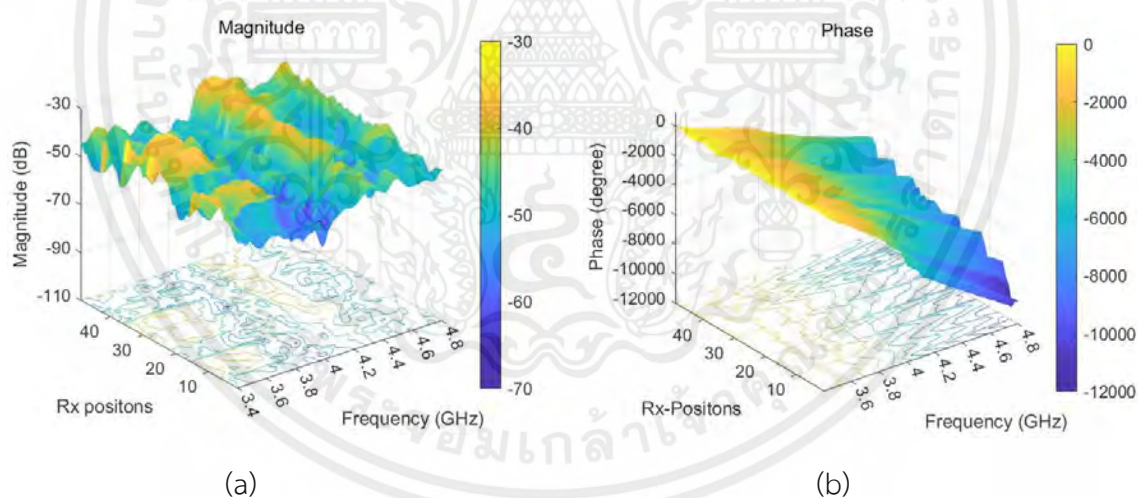
(b) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1)



รูปที่ 4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2)

(a) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2)

(b) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2)

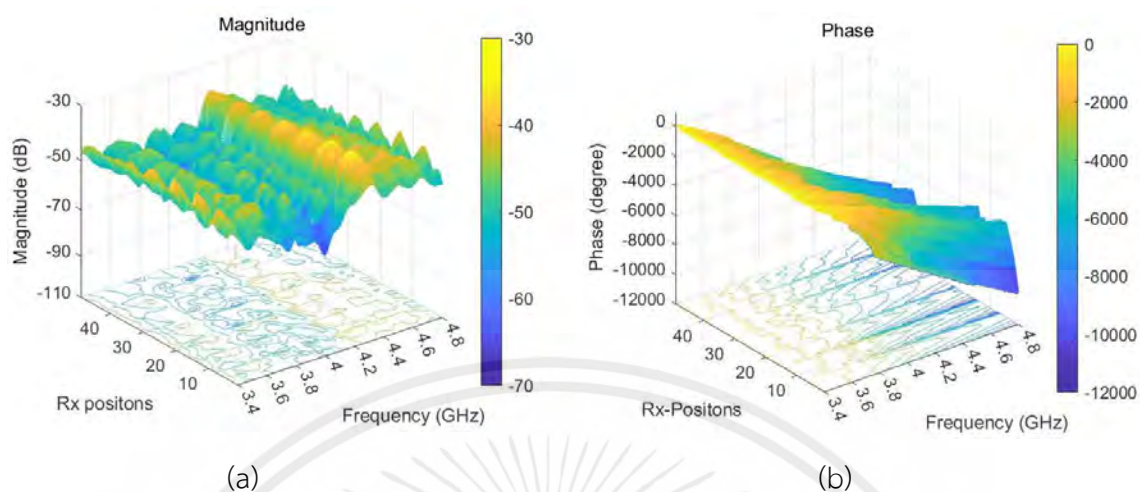


รูปที่ 4.6 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3)

(a) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3)

(b) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4)

(a) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4)

(b) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4)

จากการทดลองหาดำแหน่ง พบว่า บริเวณที่กราฟมีสีเหลืองเป็นบริเวณที่สายอากาศรับอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้สายอากาศส่ง ส่งผลให้ขนาดของช่องสัญญาณนั้นจะมีระดับสัญญาณที่มาก และเฟสของช่องสัญญาณหากมีความเป็นเชิงเส้นจะแสดงถึงคุณภาพที่ดีของช่องสัญญาณ

จากรูปที่ 4.4 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1) พบว่า จุดที่มีระดับสัญญาณที่มากที่สุด เท่ากับ  $-35.52$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 1 และจุดที่มีระดับสัญญาณที่น้อยที่สุด เท่ากับ  $-61.22$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 49

จากรูปที่ 4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2) พบว่า จุดที่มีระดับสัญญาณที่มากที่สุด เท่ากับ  $-34.75$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 43 และจุดที่มีระดับสัญญาณที่น้อยที่สุด เท่ากับ  $-63.34$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 7

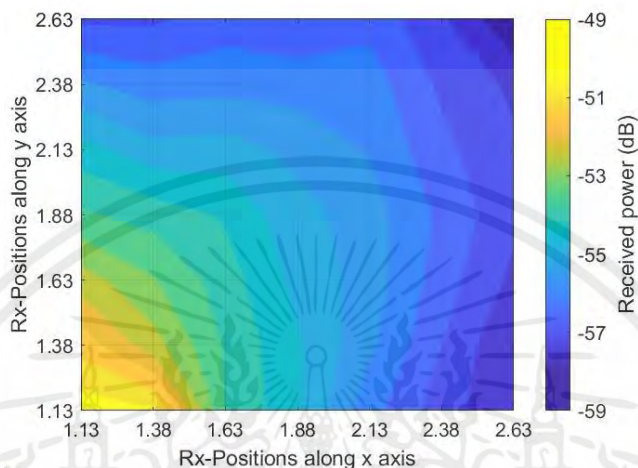
จากรูปที่ 4.6 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3) พบว่า จุดที่มีระดับสัญญาณที่มากที่สุด เท่ากับ  $-32.22$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 27 และจุดที่มีระดับสัญญาณที่น้อยที่สุด เท่ากับ  $-67.67$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 3

จากรูปที่ 4.7 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4) พบว่า จุดที่มีระดับสัญญาณที่มากที่สุด เท่ากับ  $-34.34$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 7 และจุดที่มีระดับสัญญาณที่น้อยที่สุด เท่ากับ  $-67.87$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

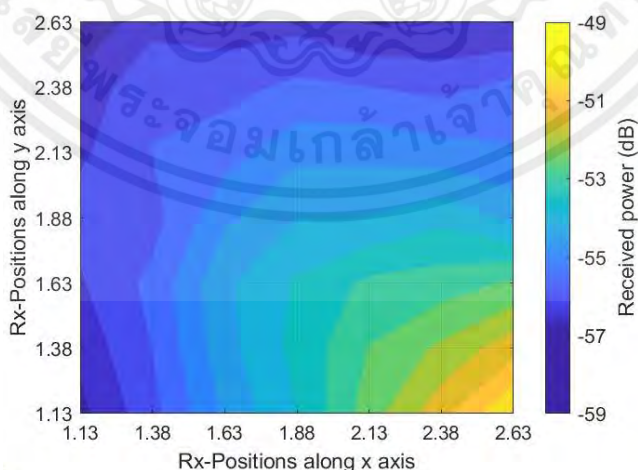
#### 4.4 ความแรงของสัญญาณที่รับได้

ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะแสดงค่ากำลังงานของสัญญาณในหน่วยเดซิเบล โดยที่แกน  $x$  และแกน  $y$  คือ ตำแหน่งของสายอากาศรับ แสดงดังรูปที่ 4.8 ถึง รูปที่ 4.12



รูปที่ 4.8 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1)

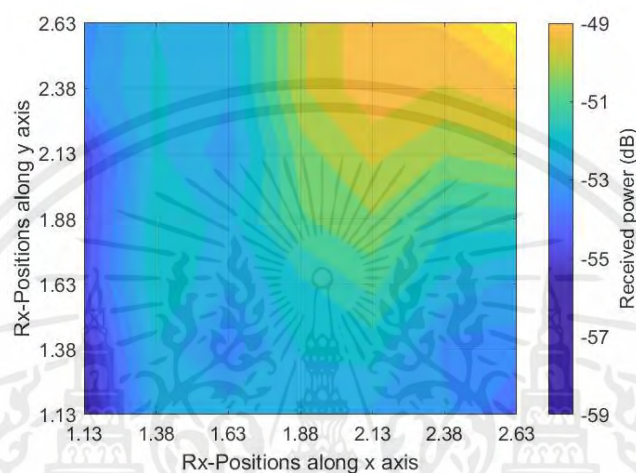
จากรูปที่ 4.8 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1) พบว่า จุดที่มีความแรงของสัญญาณสูงที่สุด เท่ากับ  $-50.21$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (1.13, 1.13) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ใกล้กับสายอากาศส่งที่ 1 มากที่สุด และจุดที่มีความแรงของสัญญาณต่ำที่สุด เท่ากับ  $-57.95$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (2.63, 2.63) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ไกลจากสายอากาศส่งที่ 1 มากที่สุด



รูปที่ 4.9 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2)

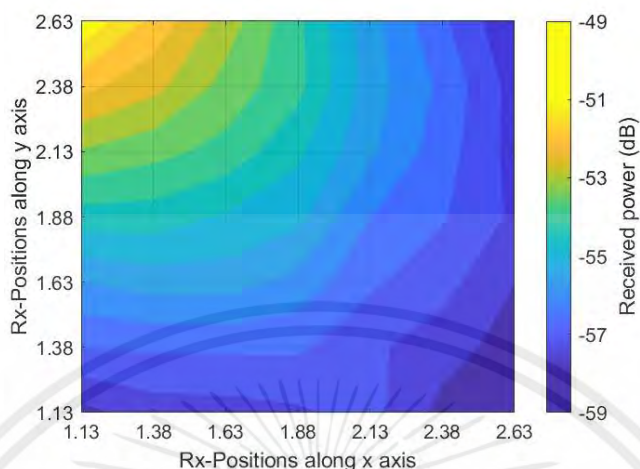
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้จากสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2) พบว่า จุดที่มีความแรงของสัญญาณสูงที่สุด เท่ากับ  $-49.97$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (2.63, 1.13) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ใกล้กับสายอากาศส่งที่ 2 มากที่สุด และจุดที่มีความแรงของสัญญาณต่ำที่สุด เท่ากับ  $-56.90$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (1.13, 2.63) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ไกลจากสายอากาศส่งที่ 2 มากที่สุด



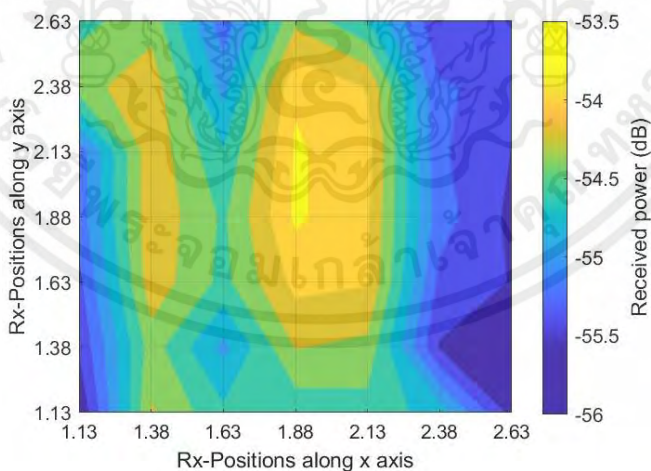
รูปที่ 4.10 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้จากสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3)

จากรูปที่ 4.10 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้จากสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3) พบว่า จุดที่มีความแรงของสัญญาณสูงที่สุด เท่ากับ  $-49.25$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (2.63, 2.63) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ใกล้กับสายอากาศส่งที่ 3 มากที่สุด และจุดที่มีความแรงของสัญญาณต่ำที่สุด เท่ากับ  $-57.82$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (1.13, 1.13) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ไกลจากสายอากาศส่งที่ 3 มากที่สุด



รูปที่ 4.11 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4)

จากรูปที่ 4.11 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4) พบว่า จุดที่มีความแรงของสัญญาณสูงที่สุด เท่ากับ  $-50.57$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (1.13, 2.63) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ใกล้กับสายอากาศส่งที่ 4 มากที่สุด และจุดที่มีความแรงของสัญญาณต่ำที่สุด เท่ากับ  $-58.00$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (2.63, 1.13) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ไกลจากสายอากาศส่งที่ 4 มากที่สุด



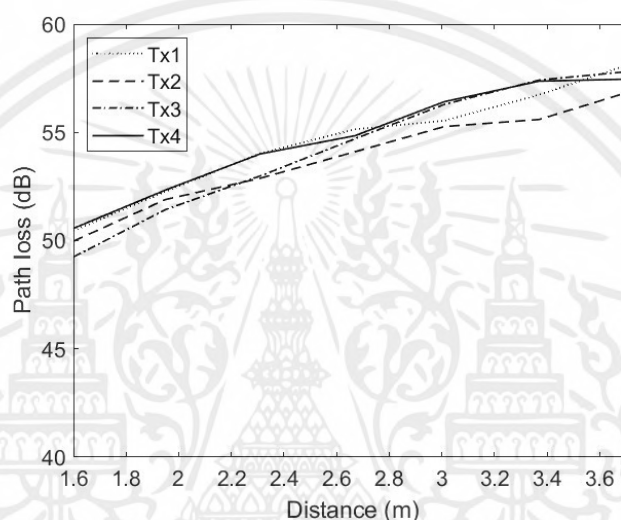
รูปที่ 4.12 เฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งทั้ง 4

จากรูปที่ 4.12 เฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งทั้ง 4 พบว่า จุดที่มีความแรงของสัญญาณสูงที่สุด เท่ากับ  $-53.76$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (1.88, 1.88) เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่สายอากาศรับอยู่ตรงกลางแบบจำลองพอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

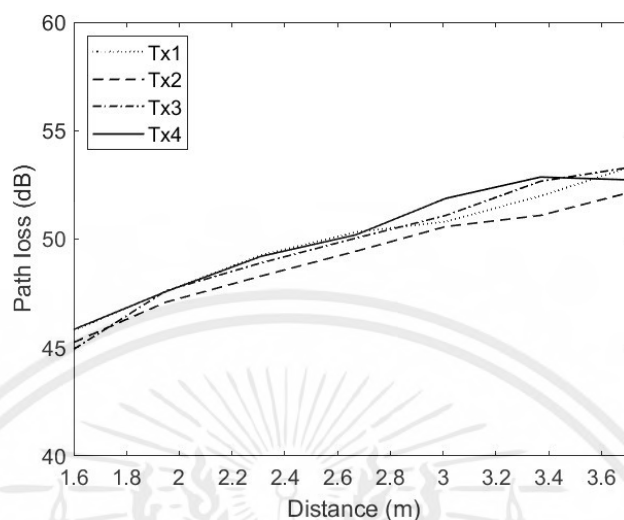
## 4.5 การสูญเสียเชิงวิถี

เมื่อระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งอยู่ใกล้กันจะทำให้มีค่าสูญเสียเชิงวิถีที่สูงขึ้น โดยที่แกน  $x$  คือ ระยะทางในหน่วยเมตร และแกน  $y$  คือ ค่าสูญเสียเชิงวิถีในหน่วยเดซิเบล โดยทำการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีที่ไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา และกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์แสดงดังรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 ตามลำดับ



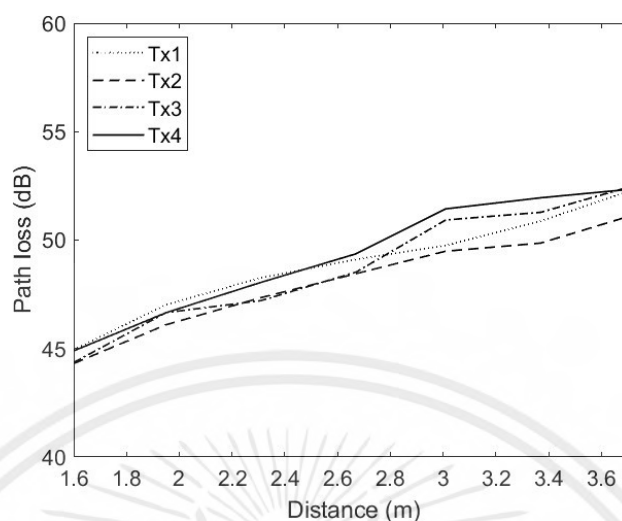
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา

จากรูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา พบว่า สายอากาศส่งที่ 1 (เส้นจุด) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 58.17 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 50.45 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 2 (เส้นประ) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 56.90 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 49.97 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 3 (เส้นประจุด) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 57.82 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 49.25 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร และสายอากาศส่งที่ 4 (เส้นทึบ) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 57.46 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 50.57 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา

จากรูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา พบว่า สายอากาศส่งที่ 1 (เส้นจุด) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 53.36 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 45.79 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 2 (เส้นประ) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 52.19 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 45.29 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 3 (เส้นประจุด) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 53.33 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 44.92 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร และสายอากาศส่งที่ 4 (เส้นทึบ) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 52.72 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 45.83 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร



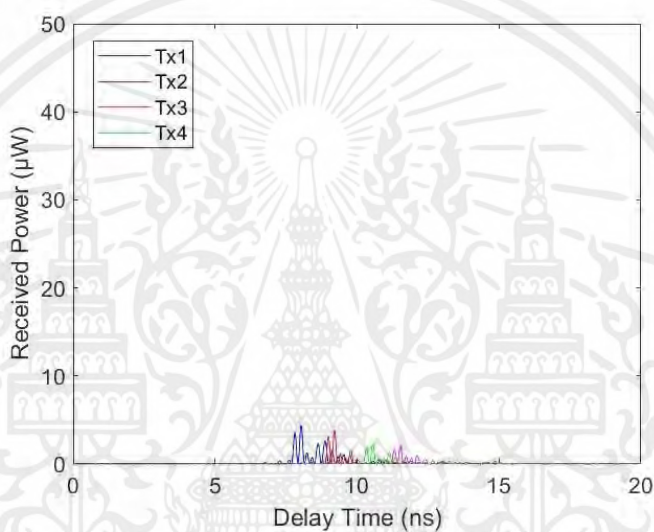
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์

จากรูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ พบว่า สายอากาศส่งที่ 1 (เส้นจุด) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 52.32 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 44.95 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 2 (เส้นประ) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 51.15 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 44.31 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 3 (เส้นประจุด) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 52.50 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 44.36 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร และสายอากาศส่งที่ 4 (เส้นทึบ) มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 52.36 เดซิเบล ที่ระยะทาง 3.72 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 44.90 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร

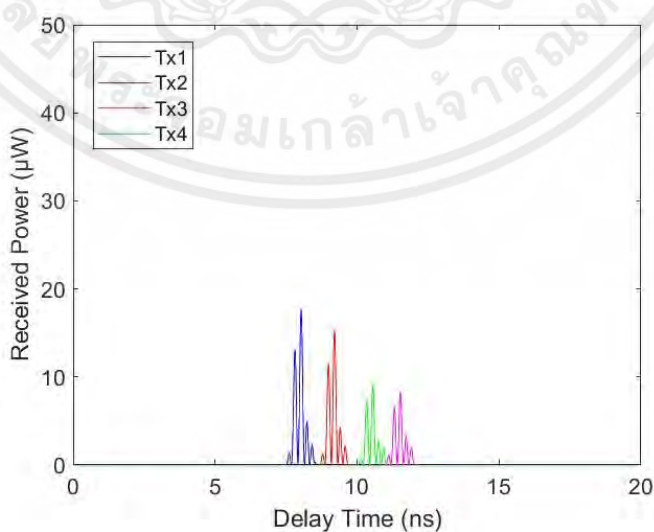
จากรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 จึงสรุปได้ว่า การสูญเสียเชิงวิถีมีความเกี่ยวข้องกับระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ส่งผลให้ค่าการสูญเสียเชิงวิถีมีการเพิ่มขึ้นและลดลง ผลกระทบอาจมาจากสภาพแวดล้อมของห้องทำการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคาร และจากรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.15 การสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลาและกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ได้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.12 เนื่องจากเทคนิคการเกิดเวลาและวงจรกรองแบบแมตซ์นั้นสามารถลดการรบกวนของสัญญาณลงได้ส่งผลให้ระดับสัญญาณที่รับได้มีค่าสูงขึ้น

#### 4.6 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา

ภาพตัดขวางการประวิงเวลาจะแสดงในรูปแบบกราฟสองมิติ โดยที่แกน  $x$  คือ ค่าการประวิงเวลาในหน่วยนาโนวินาที แกน  $y$  คือ ระดับกำลังงานของสัญญาณในหน่วยไมโครวัตต์ โดยทำการเปรียบเทียบการประวิงเวลาของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีที่ไม่วางจรรยาแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา และกรณีผ่านจรรยาแบบแมตซ์ ซึ่งทั้ง 3 กรณีนี้จะทำการเปรียบเทียบเมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัดเดียวกัน คือ (1.63, 1.38) แสดงดังรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18 ตามลำดับ

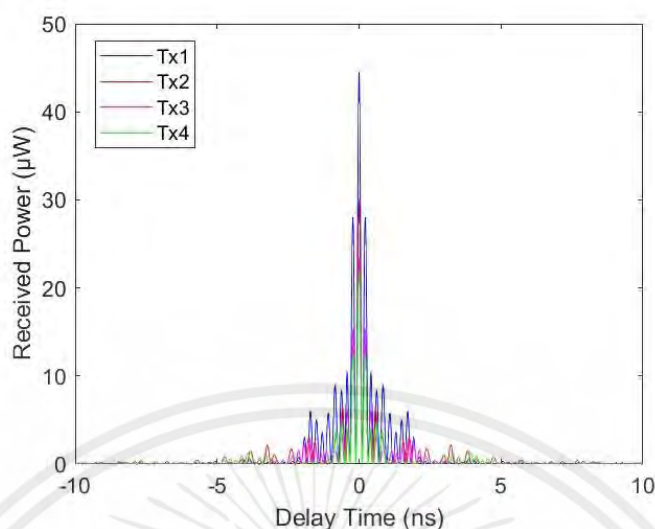


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีไม่วางจรรยาแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (1.63, 1.38)



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (1.63, 1.38)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



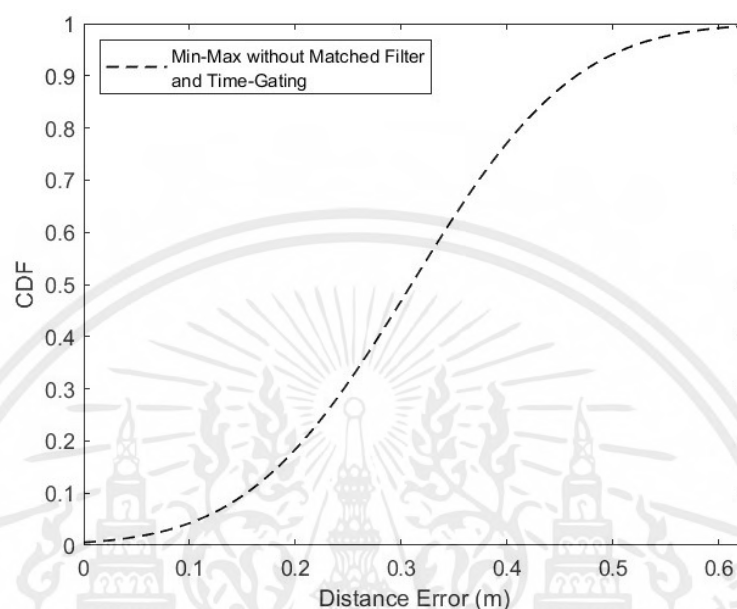
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (1.63, 1.38)

จากรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (1.63, 1.38) พบว่า กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา สายอากาศส่งที่ 1 มีค่าการประวิงเวลาน้อยที่สุด ประมาณ 8.02 นาโนวินาทีและมีค่ากำลังงานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสายอากาศส่งอื่น เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ใกล้กับสายอากาศส่งที่ 1 มากที่สุด และสายอากาศส่งที่ 3 มีค่าการประวิงเวลามากที่สุด ประมาณ 11.52 นาโนวินาทีและมีค่ากำลังงานต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสายอากาศส่งอื่น ๆ เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ไกลจากสายอากาศส่งที่ 3 มากที่สุด กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา ค่าการประวิงเวลามีค่าเท่าเดิมแต่ระดับกำลังงานของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น และกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ ค่าการประวิงเวลาของสายอากาศส่งทั้ง 4 จะมีค่าเป็น 0 ทั้งหมดและระดับกำลังงานของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น

#### 4.7 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทาง

ค่าความผิดพลาดทางระยะทางจะแสดงในรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม โดยทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา แสดงดังรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.22 ตามลำดับ

#### 4.7.1 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาดำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา



รูปที่ 4.19 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาดำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา

จากรูปที่ 4.19 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาดำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา พบว่า มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางต่ำที่สุด เท่ากับ 0.11 เมตร มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางเฉลี่ย เท่ากับ 0.31 เมตร และมีค่าความผิดพลาดทางระยะทางสูงที่สุด เท่ากับ 0.62 เมตร

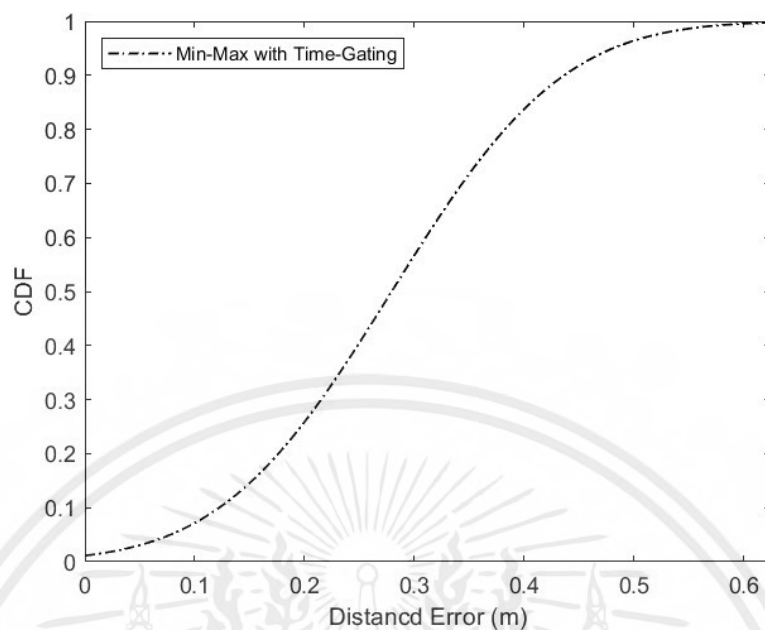
#### 4.7.2 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาดำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา

เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทางระยะทาง โดยพิจารณาความกว้างของวินโดว์ และพารามิเตอร์รูปร่างของวินโดว์ไคเซอร์-เบสเซล เพื่อเลือกค่าที่มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์ในปริภูมิพหุคูณนี้ โดยความกว้างของวินโดว์ไคเซอร์-เบสเซลถูกกำหนดเป็น 1 นาโนวินาที และ 2 นาโนวินาที และพารามิเตอร์รูปร่างของวินโดว์ไคเซอร์-เบสเซลเป็น 0.3 0.6 1.2 2.4 และ 4.8 [29]

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทางระยะทาง โดยพิจารณาความกว้างของวินโดว์และพารามิเตอร์รูปร่างของวินโดว์โคเซอร์-เบสเซล

ความกว้างของวินโดว์ (นาโนวินาที)	พารามิเตอร์รูปร่าง ของวินโดว์	ค่าความผิดพลาดทางระยะทาง (เมตร)		
		ต่ำที่สุด	ค่าเฉลี่ย	สูงที่สุด
1	0.3	0.067	0.279	0.601
	0.6	0.070	0.282	0.600
	1.2	0.076	0.286	0.599
	2.4	0.086	0.292	0.600
	4.8	0.102	0.305	0.614
2	0.3	0.089	0.290	0.605
	0.6	0.086	0.288	0.604
	1.2	0.080	0.286	0.603
	2.4	0.075	0.284	0.601
	4.8	0.077	0.287	0.599

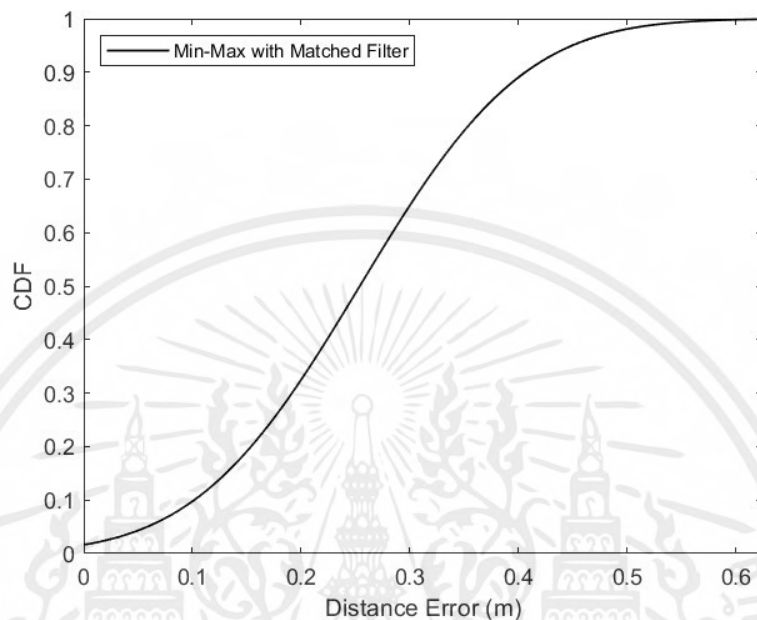
จากตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทางระยะทาง โดยพิจารณาความกว้างของวินโดว์ และพารามิเตอร์รูปร่างของวินโดว์ พบว่า ความกว้างของวินโดว์ 1 นาโนวินาทีเป็นความกว้างของวินโดว์ที่เหมาะสมเนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับ 0.71 ซึ่งเป็นความกว้างของพัลส์ และพารามิเตอร์รูปร่างของวินโดว์ 0.3 ให้ค่าความผิดพลาดทางระยะทางที่ดีที่สุด ดังนั้นในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ จึงเลือกใช้ความกว้างของวินโดว์ 1 นาโนวินาที และพารามิเตอร์รูปร่างของวินโดว์ 0.3



รูปที่ 4.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านเทคนิคการเกตเวลา

จากรูปที่ 4.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านเทคนิคการเกตเวลา พบว่า มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางต่ำที่สุด เท่ากับ 0.07 เมตร มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางเฉลี่ย เท่ากับ 0.28 เมตร และมีค่าความผิดพลาดทางระยะทางสูงที่สุด เท่ากับ 0.60 เมตร

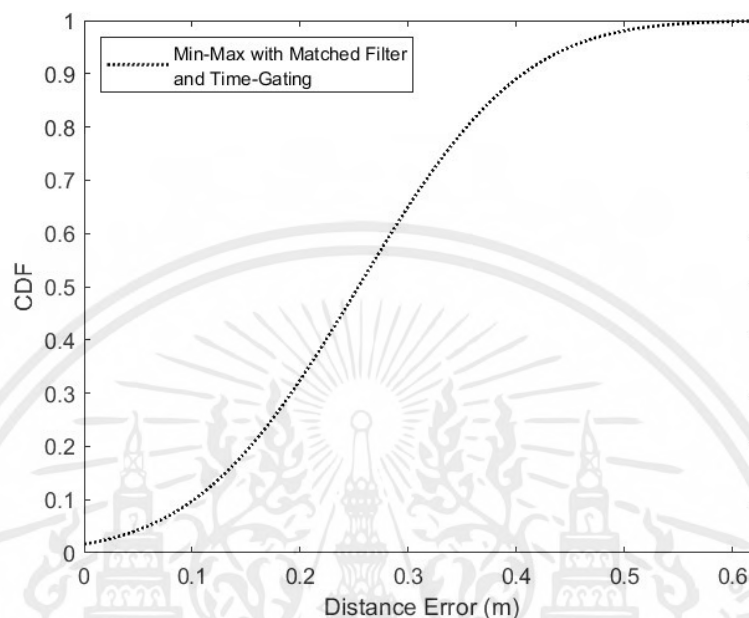
#### 4.7.3 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์



รูปที่ 4.21 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์

จากรูปที่ 4.21 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ พบว่า มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางต่ำที่สุด เท่ากับ 0.02 เมตร มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางเฉลี่ย เท่ากับ 0.25 เมตร และมีค่าความผิดพลาดทางระยะทางสูงที่สุด เท่ากับ 0.53 เมตร

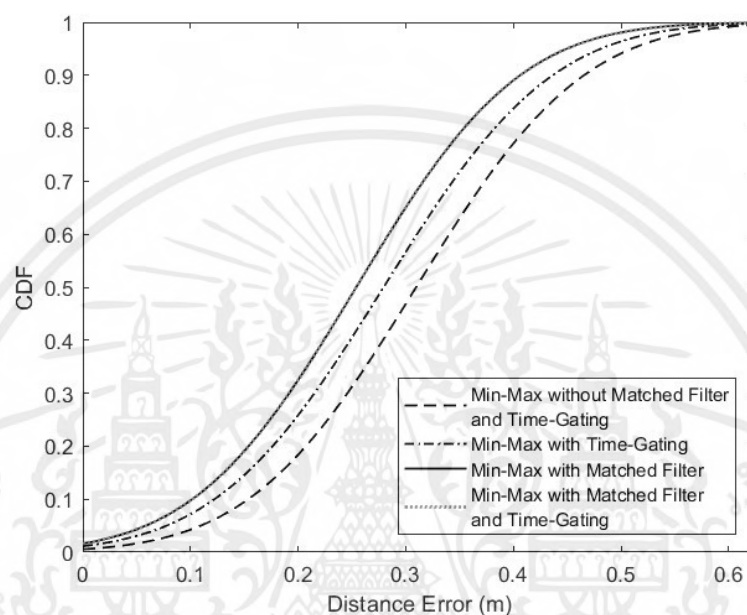
#### 4.7.4 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่ง ภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา



รูปที่ 4.22 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา

จากรูปที่ 4.22 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา พบว่า ค่าความผิดพลาดทางระยะทางที่ได้มีค่าเท่ากับค่าความผิดพลาดทางระยะทางกรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ นั้นหมายความว่า การใช้วงจรรองแบบแมตซ์ในการปรับปรุงสัญญาณทางด้านรับมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้เทคนิคการเกิดเวลา ทำให้ค่าความผิดพลาดทางระยะทางที่ได้ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อนำมาผ่านเทคนิคการเกิดเวลาอีกรอบ

4.7.5 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา

จากรูปที่ 4.23 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา พบว่า ในกรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา (เส้นประ) มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.31 เมตร ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา (เส้นประจุด) มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.28 เมตรและกรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ (เส้นทึบ) มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.25 เมตร และกรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา (เส้นจุด) มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.25 เมตร ค่าความผิดพลาดทางระยะทางที่ได้จากกรณีที่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ และเทคนิค

การเกิดเวลามีแนวโน้มที่ดีกว่าการไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และเทคนิคการเกิดเวลา เนื่องจากวงจรกรองแบบแมตซ์ และเทคนิคการเกิดเวลาจะช่วยทำการปรับปรุงสัญญาณทางด้านรับให้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา

การหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max	ค่าความผิดพลาดทางระยะทาง (เมตร)		
	ต่ำที่สุด	ค่าเฉลี่ย	สูงที่สุด
กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และเทคนิคการเกิดเวลา	0.11	0.31	0.62
กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา	0.07	0.28	0.60
กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์	0.02	0.25	0.53
กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และเทคนิคการเกิดเวลา	0.02	0.25	0.53

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลาจะมีประสิทธิภาพการหาตำแหน่งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลาจะมีประสิทธิภาพการหาตำแหน่งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 18.07 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นกรณีที่ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดทางระยะทางมีค่าที่ดีที่สุด คือ กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา ตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คือการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำด้วยแบบจำลองการหาตำแหน่งแบบ Min-Max และเทคนิคการเกิดเวลา โดยทำการศึกษาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งและพารามิเตอร์สำหรับการวัดหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งย่านความถี่ต่ำ ศึกษาคุณสมบัติสายอากาศกรวยคู่ และออกแบบแบบจำลองสำหรับการทดลองหาตำแหน่ง ซึ่งจะทำการวัดช่องสัญญาณในช่วงความถี่ 3.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้สายอากาศกรวยคู่เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ เพื่อสำหรับบันทึกค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในลักษณะของขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณและทำการประเมินผลของการหาตำแหน่งโดยพิจารณาจากความแรงของสัญญาณที่รับได้ การสูญเสียเชิงวิถี การประวิงเวลาของสัญญาณและทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทางระยะทางในรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

จากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีและการประวิงเวลาของสัญญาณของสายอากาศส่งทั้ง 4 ของการหาตำแหน่งภายในอาคารทั้ง 3 กรณี ได้แก่ กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา และกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์พบว่า กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลามีค่าการสูญเสียเชิงวิถีมากที่สุด เมื่อเทียบกับกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา และผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เนื่องจากเทคนิคการเกิดเวลาและวงจรกรองแบบแมตซ์ช่วยลดสัญญาณรบกวน ทำให้สัญญาณรับดีขึ้น ในขณะที่การประวิงเวลาของสัญญาณของสายอากาศส่งทั้ง 4 เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิคัดเดียวกัน คือ (1.63, 1.38) พบว่า กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์มีค่าการประวิงเวลาเป็นศูนย์ทั้งหมด เนื่องจากวงจรกรองแบบแมตซ์มีการออปติไมซ์ทางเวลา และมีระดับกำลังงานที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา และผ่านเทคนิคการเกิดเวลา

จากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทางระยะทางในรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมทั้ง 4 กรณี ได้แก่ กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา พบว่า กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลามีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.31 เมตร กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลามีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.28 เมตร กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 0.25 เมตร และกรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลามีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทางเท่ากับกรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ เนื่องจาก วงจรรองแบบแมตซ์นั้นได้ปรับปรุงสัญญาณทางด้านรับให้ดีขึ้นอยู่แล้วเมื่อผ่านเทคนิคการเกิดเวลาอีกรอบ จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า กรณีที่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์สามารถลดค่าความผิดพลาดทางระยะทางได้ดีที่สุด ซึ่งมีประสิทธิภาพการหาตำแหน่งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 18.07 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความถี่ต่ำ ทำให้ผู้จัดทำสังเกตเห็นถึงความสำคัญของการหาตำแหน่งภายในอาคารที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาเทคนิคการหาตำแหน่งภายในอาคารแบบ Min-Max เทคนิคการเกิดเวลา และวงจรรองแบบแมตซ์เท่านั้น ซึ่งนอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นอีกที่สามารถใช้ในการหาตำแหน่งได้ทั้งภายในอาคารและนอกอาคาร เช่น เทคนิคการพิจารณาเวลาในการมาถึงของสัญญาณ เทคนิคการหาตำแหน่งแบบ Trilateration เทคนิคเสมือนการสแกนลายนิ้วมือ และอัลกอริทึมการถ่วงน้ำหนักแบบเซนทรอยด์ เนื่องจากเทคนิคการหาตำแหน่งแบบอื่นอาจจะให้ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งที่ดีกว่า และจะเป็นข้อมูลอ้างอิงแนวทางในการศึกษาทดลองต่อไปในอนาคต

## บรรณานุกรม

- [1] วุฒิชัย ป้อมคำ และสนธิ เตียวนิม. “แบบแผนการตีเทคตำแหน่งของวิทยุแถบกว้างยิ่งสำหรับโครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลแบบไร้สาย.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [2] ภาณุพงศ์ พวงนาค และจิรายุทธ ธรรมแสง. “การหาตำแหน่งของบุคคลภายในอาคารด้วยสัญญาณแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [3] รัตติยา อุปฮาด. “การประเมินผลของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคเสมือนการสแกนลายนิ้วมือแบบแถบกว้างยิ่งด้วยวิธีการ KNN.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.
- [4] ทศพร น้อมระวี. “การประเมินผลของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [5] ธานินทร์ ถาวรศาสนวงศ์. “การจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [6] จิรพัฒน์ แสงทอง. “ระบบหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือและอัลกิริทึมการแบ่งกลุ่มพื้นฐานเทคโนโลยีเครือข่ายพื้นที่ท้องถิ่นไร้สาย.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.
- [7] R. Phumvijit, P. Supanakoon and S. Promwong, “Measurement Scheme of Radar Cross Section with Time Gating,” The 24th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and

Information Technology (ECTI-CON), pp. 822-825, Phuket Graceland Resort and Spa, Phuket, Thailand 27-30 June 2017

- [8] รัชชานนท์ ภูมิวิจิตร. “แบบแผนการวัดภาคตัดขวางเข้าเรดาร์แบบกิ่งรวมสายอากาศส่งรับโดยใช้เทคนิคการเกิดเวลา.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2561. หน้า 10
- [9] Faranak Nekoogar. *Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications*. 1<sup>st</sup> ed. Pearson, 20050
- [10] พิทักษ์ อนุรักษ์, เฉลิมพล ชื่นอารมณ์, และอรรฎุ เหลืองอนุศาสตร์. “การศึกษาทดลองวัดของการจัดการจ่ายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากผิวอาคารในรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [11] Sahinoglu, Zafer, Gezici, Sinan, Guvenc, Ismail. *Ultra-wideband Positioning Systems Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols*. New York : Cambridge University Press, 2008.
- [12] P.S. Sharma, Sandeep Vijay, and Manoj Shukla. “Ultra-Wideband Technology: Standards, Characteristics, Applications.” [https://www. researchgate.net/publication/345453838UltraWideband\\_Technology\\_Standards\\_Characteristics\\_Applications#pf3](https://www.researchgate.net/publication/345453838UltraWideband_Technology_Standards_Characteristics_Applications#pf3).
- [13] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems," First Report and Order, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [14] พิษยนันท์ พรหมศรีสวัสดิ์. “การปรับปรุงแบบจำลองการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งประกอบด้วยร่างกายมนุษย์สำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2561.
- [15] กิตติศักดิ์ ลำดี “เทคโนโลยีสื่อสารสัญญาณวิทยุแถบกว้างย่านความถี่สูงยิ่งยวด.” สุธธิปริทัศน์. 19 (กันยายน 2548) : 80-85.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] กันตภณ โตรัตน์. “การออกแบบพีซีพารามิเตอร์อัลกอริทึมแบบเซนทรอยด์ สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร.” ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2556
- [17] พิชญ์ สุพรรณกุล. *Chanel Model*. เอกสารประกอบการสอนวิชา 01016463 Radar and localization
- [18] Kuo Yang, Zhonghua Liang, Ren Liu, and Wei Li. “RSS-Based Indoor Localization Using Min-Max Algorithm with Area Partition Strategy.” in IEEE Access, vol. 9, pp. 125561-125568, 2021
- [19] นิศากร ยิ่งขจร. “การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมช่องทางเดิน”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [20] N. Supa and S. Promwong. "Characterization of UWB-IR Transmission for Short Range Wireless Communication"
- [21] ประเมษฐ์ เชี่ยวชาญ. “การศึกษามลกระทบการกระจายของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งโดยใช้วิธีการ *Time Gating*” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2562.
- [22] Basic concept of the preliminary UWB transmission mask. “Preliminary UWB transmission mask for impact analysis (only indoor use) of Japan” Recommendation ITU-R SM.1756-0 , pp24
- [22] Constantine, A. Balanis. *Antenna Theory Analysis and Design*. 4<sup>nd</sup> ed. Hoboken, New Jersey, U.S. : John wiley and sons, 2016
- [23] Agilent Technologies. “Agilent E5063A Network Analyzer” Product Information Installation Guide, 2013, <http://www.agilent.com/find /e5063a-manual>, pp. 429.
- [24] ศักดิ์พัฒน์ คำเอียด, สกลวรรณ พุ่งคำ และนัจฉนัท งามสกุลเดิม. “การศึกษาของการหาตำแหน่งด้วยสัญญาณวิทยุอิมพัลส์โดยใช้เทคนิคการเกิดเวลา.” ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2564.

- [25] Multicomp pro. “Coaxial Cable RG142” Element14 Asia-Pacific Authorized Distributor, 2019, <https://www.farnell.com/datasheets/3117962.pdf>
- [26] Agilent Technologies. “Calibration Kit Datasheet” User’s and Service Guide, USA,2010,[http://www.av.it.pt/medidas/data/Test\\_Equipment\\_manuals/Agilent-85\\_038A-7-17\\_calibration-kit.pdf](http://www.av.it.pt/medidas/data/Test_Equipment_manuals/Agilent-85_038A-7-17_calibration-kit.pdf)
- [27] S. K. Mitra and J. F. Kaiser, *Handbook for Digital Signal Processing*. New York : John Wiley. 1993.
- [28] Myo Myint Maw, “*Measurement and Modeling of Furniture Effect in an Indoor Propagation Channel*” A Thesis Submitted in Fulfillment of The Requirement for The Degree of Doctor of Engineering in Electrical Engineering Faculty of Engineering King mongkut’s Institute of Technology Ladkabang 2015, KMITL-2015-EN-D-018-061, pp.39-40.
- [29] Sebastian Sadowski, Petros Spachos. “RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things”. in IEEE Access, vol. 6, pp. 30149-30161, 2018



ภาคผนวก

ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง							
x(m)	y(m)	Rx position	RSS (dB) Tx1	RSS (dB) Tx2	RSS (dB) Tx3	RSS (dB) Tx4	Avg.RSS(dB)
1.13	1.13	1	-50.21	-56.65	-57.82	-57.66	-55.59
1.13	1.38	2	-51.20	-56.34	-57.49	-56.48	-55.38
1.13	1.63	3	-52.25	-56.06	-57.19	-55.51	-55.25
1.13	1.88	4	-53.41	-55.77	-57.04	-54.24	-55.12
1.13	2.13	5	-54.27	-56.09	-57.08	-53.04	-55.12
1.13	2.38	6	-55.42	-56.34	-53.52	-51.84	-54.28
1.13	2.63	7	-56.60	-56.90	-53.79	-50.57	-54.46
1.38	1.13	8	-50.42	-55.66	-53.38	-57.25	-54.18
1.38	1.38	9	-52.27	-55.49	-52.99	-56.44	-54.30
1.38	1.63	10	-52.95	-55.35	-52.73	-55.24	-54.07
1.38	1.88	11	-53.71	-55.70	-52.52	-54.23	-54.04
1.38	2.13	12	-54.84	-55.48	-52.54	-53.33	-54.05
1.38	2.38	13	-55.74	-55.59	-52.60	-52.34	-54.07
1.38	2.63	14	-56.58	-56.16	-52.75	-51.64	-54.28
1.63	1.13	15	-53.49	-54.42	-53.10	-57.21	-54.55
1.63	1.38	16	-53.57	-54.17	-55.31	-56.40	-54.86
1.63	1.63	17	-53.76	-54.10	-54.71	-55.27	-54.46
1.63	1.88	18	-54.06	-54.59	-54.52	-54.56	-54.43
1.63	2.13	19	-54.77	-55.24	-54.64	-53.67	-54.58
1.63	2.38	20	-55.66	-55.65	-55.01	-53.18	-54.87
1.63	2.63	21	-56.26	-56.27	-55.21	-52.72	-55.12
1.88	1.13	22	-54.41	-53.51	-53.11	-57.08	-54.53
1.88	1.38	23	-54.42	-53.35	-52.57	-56.41	-54.19
1.88	1.63	24	-54.66	-53.44	-52.00	-55.66	-53.94
1.88	1.88	25	-54.82	-54.00	-51.43	-54.85	-53.78
1.88	2.13	26	-55.14	-54.63	-50.89	-54.39	-53.76
1.88	2.38	27	-55.70	-55.38	-50.38	-53.84	-53.83
1.88	2.63	28	-56.46	-56.16	-50.48	-53.88	-54.25
2.13	1.13	29	-55.81	-52.23	-53.10	-56.80	-54.49
2.13	1.38	30	-55.39	-52.48	-52.25	-56.90	-54.25
2.13	1.63	31	-55.21	-52.88	-51.42	-56.42	-53.98
2.13	1.88	32	-55.24	-53.98	-50.69	-55.99	-53.97
2.13	2.13	33	-55.54	-54.63	-50.09	-55.41	-53.92
2.13	2.38	34	-55.74	-55.49	-49.58	-55.25	-54.01
2.13	2.63	35	-56.16	-56.55	-49.25	-55.31	-54.59
2.38	1.13	36	-56.79	-51.16	-53.11	-57.67	-54.68
2.38	1.38	37	-56.50	-51.90	-56.00	-57.28	-55.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง							
x(m)	y(m)	Rx position	RSS (dB) Tx1	RSS (dB) Tx2	RSS (dB) Tx3	RSS (dB) Tx4	Avg.RSS(dB)
2.38	1.63	38	-56.26	-52.74	-55.22	-56.81	-55.26
2.38	1.88	39	-56.12	-53.63	-54.23	-56.45	-55.11
2.38	2.13	40	-56.36	-54.77	-53.28	-56.26	-55.17
2.38	2.38	41	-56.61	-55.65	-52.33	-56.12	-55.18
2.38	2.63	42	-56.93	-56.47	-51.70	-56.40	-55.37
2.63	1.13	43	-57.39	-49.97	-56.53	-57.99	-55.47
2.63	1.38	44	-57.53	-51.18	-55.52	-57.72	-55.49
2.63	1.63	45	-57.12	-52.43	-54.60	-57.49	-55.41
2.63	1.88	46	-56.88	-54.13	-53.70	-57.10	-55.45
2.63	2.13	47	-56.92	-54.95	-52.56	-57.19	-55.40
2.63	2.38	48	-57.10	-55.32	-51.41	-57.21	-55.26
2.63	2.63	49	-57.95	-56.53	-50.33	-57.46	-55.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้