

การออกแบบจำลองวัดของการหาตำแหน่งความถี่ร่วมแบบแถบกว้างยิ่ง  
สำหรับสภาวะแวดล้อมภายในอาคารด้วยเทคนิคการเกิดเวลาและเจเนติก  
MEASUREMENT AND MODELING OF UWB COMMON FREQUENCY  
LOCALIZATION FOR INDOOR ENVIRONMENTS WITH GENETIC AND TIME-  
GATING TECHNIQUES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบจำลองวัดของการหาตำแหน่งความถี่ร่วมแบบแถบกว้างยิ่ง  
สำหรับสภาวะแวดล้อมภายในอาคารด้วยเทคนิคการเกิดเวลาและเจเนติก

MEASUREMENT AND MODELING OF UWB COMMON FREQUENCY  
LOCALIZATION FOR INDOOR ENVIRONMENTS WITH GENETIC AND  
TIME-GATING TECHNIQUES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2567

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบจำลองวัดของการหาตำแหน่งความถี่ร่วมแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับสภาวะ  
แวดล้อมภายในอาคารด้วยเทคนิคการเกิดเวลาและเจเนติก

MEASUREMENT AND MODELING OF UWB COMMON FREQUENCY

LOCALIZATION FOR INDOOR ENVIRONMENTS WITH GENETIC AND TIME-

GATING TECHNIQUES

ผู้จัดทำ

- |    |         |           |          |
|----|---------|-----------|----------|
| 1. | ชนกชนม์ | รักฤทธิ   | 64010141 |
| 2. | ณิชาพร  | สังข์สกุล | 64010266 |
| 3. | ธนันท์  | ออมอด     | 64010316 |



(ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ.มนต์ชัย แซ่ม้อย)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินปฏิญานิพนธ์เรื่องนี้ “การออกแบบจำลองวัดของการหาตำแหน่งความถี่ร่วมแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับสภาวะแวดล้อมภายในอาคารด้วยเทคนิคการเกิดเวลาและเจเนติก” จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงตามที่วางแผนไว้ไปได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนจาก ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์ และ ผศ.มนต์ชัย แซ่มซ้อย ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาและแนวทางที่ดีที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาข้อมูลและการแก้ปัญหาอนุญาตให้ใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำงานรวมถึงให้ประสบการณ์การทำงานต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้จริงในอนาคต

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดลองวัด เป็นแรงผลักดันที่สำคัญให้สามารถทำปฏิญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี



ชนกชนม์ รักฤทธิ  
 ณิชภาพร สังข์สกุล  
 ธนันท์ ออมอด  
 ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบจำลองวัตของการหาตำแหน่งความถี่ร่วมแบบ  
แถบกว้างยิ่งสำหรับสภาวะแวดล้อมภายในอาคารด้วย  
เทคนิคการเกิดเวลาและเจเนติก  
MEASUREMENT AND MODELING OF UWB COMMON  
FREQUENCY LOCALIZATION FOR INDOOR  
ENVIRONMENTS WITH GENETIC AND TIME-GATING  
TECHNIQUES

โดย ชนกชนม์ รักฤทธิ์

64010141

ณิชาพร สังข์สกุล

64010266

ธนันท์ ออมอด

64010316

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.มนต์ชัย แซ่มซ้อย

### บทคัดย่อ

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra-Wideband) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งสัญญาณแบบความถี่สูงที่ใช้ในการหาตำแหน่งซึ่งมีความแม่นยำสูงในการส่งสัญญาณแบบอิมพัลส์ โดยเทคโนโลยีนี้สามารถตรวจจับตำแหน่งของวัตถุหรืออุปกรณ์ภายในอาคารได้อย่างแม่นยำ ปริมาณนิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบจำลองสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีความถี่ร่วมแบบแถบกว้างยิ่ง ด้วยแบบจำลอง Min-Max เทคนิคการหาตำแหน่งแบบเจเนติก เทคนิคการเกิดเวลา และวงจรกรองแบบแมตซ์ โดยทำการทดสอบในห้องภายในอาคารในช่วงความถี่ 7.25 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 8.50 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้สายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ นำผลที่ได้จากการวัดผลมาวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบโดยพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ การสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะแสดงผลในรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมในกรณีที่ใช้เทคนิคการเกิดเวลาและวงจรรองแบบแมตซ์ และกรณีที่ไม่ใช้วงจรรองแบบแมตซ์ ปริมาณนิพจน์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและทดสอบระบบที่ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ร่วมกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อประเมินความแม่นยำในการหาตำแหน่ง โดยใช้เครื่องมือที่สามารถระบุตำแหน่งได้ในระดับความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ และผลลัพธ์จากการทดลองสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาการหาตำแหน่งในอาคารได้จริง

## ABSTRACT

Ultra-wideband (UWB) technology is a high-frequency signal transmission technology for highly accurate positioning via impulse signals. This technology enables precise detection of the location of objects or devices within a building. This thesis presents a simulation design for indoor positioning using UWB technology within a Common Frequency range, employing a min-max model, genetic algorithms, time-gating techniques, and a matched filter. The experiment was conducted indoors within the frequency range of 7.25 GHz to 8.50 GHz, using a biconical antenna for transmission and a receiving antenna connected to a vector network analyzer. The measured results were analyzed and evaluated by comparing signal strength, path loss, time delay, and positioning errors. The positioning error results are presented as cumulative distribution functions (CDFs) in cases where the time-gating technique is used with a matched filter and without a matched filter. This thesis provides insights into the design and testing of systems that utilize UWB technology, combined with mathematical computations to evaluate positioning accuracy. The instruments used in this study offer highly precise location tracking with minimal error margins, and the experimental results can be applied to the practical development of indoor positioning systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XII
<b>บทที่ 1</b>	
<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์	2
<b>บทที่ 2</b>	
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 บทนำ	5
2.2 ความเป็นมาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง	6
2.3 ลักษณะเด่นของเทคโนโลยีแถบกว้าง	6
2.3.1 มาตรฐานโทรคมนาคมของสหภาพยุโรป	8
2.3.2 มาตรฐานและข้อกำหนดของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในประเทศญี่ปุ่น	9
2.4 ทฤษฎีการหาตำแหน่งภายในอาคาร	10
2.4.1 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength: RSS)	10
2.4.2 การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)	13
2.4.3 ภาพตัดขวางประวิงเวลา (Power Delay Profile: PDP)	14
2.4.4 การวัดหาตำแหน่งด้วยเทคนิค Min-Max	14
2.4.5 เทคนิคการเกตเวลา (Time-Gating)	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	2.4.6 วงจรกรองแบบแมตช์ (Matched Filter)	18
	2.4.7 เทคนิคการหาตำแหน่งแบบเจนติก	19
	2.5 สูตรการส่งผ่านสัญญาณฟรีส (Friis' Transmission Formula)	21
	2.6 ทฤษฎีการประยุกต์สูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส สำหรับระบบการส่งผ่านเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Extension of Friis' Transmission Formula)	22
	2.7 รูปคลื่นสัญญาณรับแถบกว้างยิ่ง	23
	2.8 รูปคลื่นสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่ง	24
	2.9 ค่าความผิดพลาดทางระยะทาง(Distance Error)	25
	2.10 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function : CDF)	26
บทที่ 3	<b>การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์</b>	<b>27</b>
	3.1 การออกแบบ	27
	3.1.1 การเลือกใช้สายอากาศ	27
	3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	27
	3.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer : VNA)	27
	3.2.2 สายอากาศแบบกรวยคู่	28
	3.2.3 สายส่งสัญญาณ Semi-Rigid ชนิด RG-142	29
	3.2.4 ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ	29
	3.2.5 เสารองรับสำหรับปรับความสูงสายอากาศ	30
	3.3 การทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบกรวยคู่	31
	3.3.1 การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน $ S_{21} $	31
	3.3.2 การทดลองวัดอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่	34
	3.4 การทดลองวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับของสายอากาศกรวยคู่	37
	3.4.1 แบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคาร	37
	3.4.2 แบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในรูปแบบ 3 มิติ	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3	แบบจำลองสถานที่ใช้ในการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารมุมมองด้านบน (Top view)	39
3.5	ขั้นตอนการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแบบความถี่ร่วม	40
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการทดลอง</b>	<b>43</b>
4.1	สัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $	42
4.2	อัตราการขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่	44
4.3	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณ	45
4.4	ความแรงของสัญญาณที่รับได้	48
4.5	การสูญเสียเชิงวิถี	50
4.6	ภาพตัดขวางประจิมเวลา	55
4.7	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทาง	58
4.7.1	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา	58
4.7.2	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ผ่านเทคนิคการเกิดเวลา	59
4.7.3	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์	60
4.7.4	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิคเจเนติก	61
4.7.5	เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิค	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ กรณีผ่าน  
วงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา และกรณี  
ผ่านเจเนติก

บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	64
	5.1 สรุปผล	64
	5.2 ข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม		68
ภาคผนวก		69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	บล็อกไดอะแกรมของการวัดหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ ความถี่ร่วมแบบแถบกว้างยิ่ง โดยแบบจำลอง Min-Max และเทคนิคการ เกตเวลาและเจเนติก	4
2.1	ข้อกำหนดการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงาน ของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับภายในและภายนอกอาคารที่ กำหนดในสหรัฐอเมริกา	7
2.2	ข้อกำหนดจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของ การสื่อสารแบบ แถบกว้างยิ่งในยุโรป	9
2.3	สเปกตรัมกำลังงานของระบบแถบกว้างยิ่งประเทศญี่ปุ่น	10
2.4	เทคนิคการหาตำแหน่ง Min-Max	15
2.5	บล็อกไดอะแกรมของเทคนิคการเกตเวลา	16
2.6	Kaiser-Bessel Window	17
2.7	บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองแบบแมตซ์	18
2.8	การสร้างลูกผสม หรือ Crossover	20
2.9	การกลายพันธุ์ หรือ Mutation	20
2.10	บล็อกไดอะแกรมของระบบการส่งผ่านโดยการประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่าน สัญญาณของฟรีส โดยมีแมตซ์ฟิลเตอร์ทางด้านรับเพื่อนำมาใช้กับระบบ เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง	23
2.11	รูปคลื่นสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา	25
2.12	สเปกตรัมของสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่	25
2.13	กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสม	26
3.1	เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น N5230A	28
3.2	สายอากาศกรวยคู่	28
3.3	สายส่งสัญญาณ Semi-Rigid ชนิด RG-142	29
3.4	ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ ( Calibration Kit )	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

3.5	เสารองรับสำหรับปรับความสูงสายอากาศ	30
3.6	ขั้นตอนการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศกรวยคู่	31
3.7	แบบจำลองการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศกรวยคู่	33
3.8	ขั้นตอนการทดลองวัดค่าอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่	34
3.9	แบบจำลองการทดลองวัดอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่	37
3.10	แบบจำลองการหาค่าตำแหน่งภายในอาคาร	38
3.11	แบบจำลองการหาค่าตำแหน่งภายในอาคารในรูปแบบ 3 มิติ (3D)	38
3.12	แบบจำลองขนาดสถานที่ในการวางตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ – มุมด้านบน	39
3.13	ขั้นตอนการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแบบความถี่ร่วม	40
3.14	การทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแบบความถี่ร่วม	41
3.15	ขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณ	42
4.1	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $ ระหว่างผลการทดลองวัดสายอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์กับผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์	43
4.2	เปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศของ E-plane ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกกับสายอากาศกรวยคู่	44
4.3	เปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศของ H-plane ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกกับสายอากาศกรวยคู่	44
4.4	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1)	45
4.5	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2)	46
4.6	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3)	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สารบัญรูป (ต่อ)

4.7	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4)	47
4.8	ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1)	48
4.9	ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2)	49
4.10	ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3)	49
4.11	ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4)	50
4.12	การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เทคนิคการเกิดเวลา และเทคนิคเจเนติก	51
4.13	การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเวลา	52
4.14	การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์	53
4.15	การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคเจเนติก	54
4.16	เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เทคนิคการเกิดเวลา และเทคนิคเจเนติก เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (2.18, 2.18)	55
4.17	เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลาเมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (2.18, 2.18)	56
4.18	เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (2.18, 2.18)	56
4.19	เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคเจเนติกเมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (2.18, 2.18)	57
4.20	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- |      |  |    |
|------|--|----|
| 4.21 | ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ผ่านเทคนิคการเกิดเวลา   | 59 |
| 4.22 | ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์   | 60 |
| 4.23 | ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิคเจเนติก   | 61 |
| 4.24 | เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และเทคนิคการเกิดเวลา และกรณีผ่านเจเนติก | 62 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	3
1.2	3
2.1	7
2.2	8
3.1	32
3.2	35
3.3	42
4.1	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น โดยเฉพาะเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย ระบบการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาและเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วไม่ว่าจะเป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ และโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ซึ่งในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง หรือ Ultra-Wideband สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ในอัตราความเร็วสูงและถูกจัดสรรคลื่นความถี่ให้ใช้งาน ข้อดีของเทคโนโลยีแบบไร้สาย คือ ลดต้นทุนในการใช้สาย เป็นตัวกลางในการสื่อสาร และมีความสะดวกในการใช้งาน ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เช่น การสื่อสารในเครือข่ายเซลลูลาร์ การสื่อสารผ่านดาวเทียม และการสื่อสารโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ เป็นต้น เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น การสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในเครือข่ายเซลลูลาร์ การแพร่ภาพและเสียงผ่านดาวเทียม การรับส่งข้อมูลไร้สายผ่านอุปกรณ์บลูทูธ และการหาตำแหน่งแบบไร้สาย เป็นต้น [1]

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้มีคุณสมบัติเด่นที่สำคัญ คือ สัญญาณแถบกว้างยิ่งเป็นสัญญาณที่มีแบนด์กว้างมาก อีกทั้งยังมีความละเอียดทางเวลาสูงทางด้านรับจึงสามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากองค์ประกอบของการเกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath component: MPC) ได้ดีมากขึ้น ตำแหน่งโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายอย่างด้วยกัน ระบบการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่งสามารถนำไปใช้ทั้ง ในส่วนของการหาตำแหน่งสำหรับ บริการในสถานะฉุกเฉิน , การติดตามสิ่งของตัวบุคคล และทรัพย์สินที่มีค่า เพื่อป้องกันและรักษาความปลอดภัย, ความสามารถในการนำทางที่มีความแม่นยำสำหรับยานพาหนะ, ในระบบอุตสาหกรรมและกลไกกรรม, การคาดคะเนตำแหน่ง และงานด้านเรดาร์ เป็นต้น การหาตำแหน่งแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการประมาณหาค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการหาตำแหน่ง (Range estimation) และขั้นตอนการนำค่าตัวแปรจากขั้นตอนแรกมาหาตำแหน่ง (Position estimation) ขั้นตอนการประมาณหาค่าตัวแปรมี 4 วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือเทคนิคการพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ (Received signal strength: RSS), การทางในการมาถึงของสัญญาณ (Angle of arrival: AOA), การพิจารณาเวลาในการมาถึงของสัญญาณ (Time of arrival: TOA) และการพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของ (Time difference of arrival: TDOA) โดยจะเป็นการพิจารณากำลัง, ทิศทาง และเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณได้ตามลำดับ แต่เนื่องมาจากวิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้ดีเฉพาะกับสัญญาณในวิธีตรงเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความผิดพลาดมากในการหาตำแหน่งภายในอาคารซึ่งมีการเกิดการจางหายหลายวิธี อย่างรุนแรง จึงนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเป็นการนำสัญญาณแถบกว้างยิ่ง มาใช้ร่วมกับวิธีการสแกนลายนิ้วมือ ซึ่งเทคนิคนี้จะทำให้การคาดคะเนตำแหน่งที่อยู่มีความเที่ยงตรงมากขึ้น เหมาะแก่การใช้หาตำแหน่งภายในอาคาร เป็นต้น [2]

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวัดหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยความถี่ร่วมแถบกว้างยิ่ง (7.25 - 8.50 กิกะเฮิรตซ์)
- 2) เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการหาตำแหน่งภายในอาคารที่เหมาะสมที่สุดจากผลที่ได้ทำการทดลองวัด
- 3) เพื่อศึกษาแบบจำลองการวัดภายในอาคารโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer : VNA) ในการวัดและบันทึกผล และสายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical antenna)
- 4) เพื่อศึกษาวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิคการเกตเวลา (Time-Gating) และเจเนติก (Genetic)

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาณิพนธ์

- 1) ศึกษาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra-wideband) แบบความถี่ร่วมสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร (ที่ความถี่ 7.25 - 8.50 กิกะเฮิรตซ์)
- 2) ศึกษาทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ประเมินผลโดยใช้เทคนิคการเกตเวลา (Time-Gating) และเจเนติก (Genetic) สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ผลการทดลองที่ได้จากการวัด
- 3) ศึกษาออกแบบจำลองการวัดภายในอาคารโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer : VNA) และสายอากาศกรวยคู่ (Biconical antenna)
- 4) วิเคราะห์และประเมินเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการเกตเวลา (Time-Gating) และเจเนติก (Genetic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการทำงานของปริญญานิพนธ์ในปีการศึกษาที่ 1

แผนงานที่จะดำเนินการ
1) ศึกษาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง การวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีความถี่ร่วมแบบแถบกว้างยิ่ง เทคนิคการหาตำแหน่งแบบเจเนติก เทคนิคการเกิดเวลา วงจรกรองแบบแมตช์ (Matched Filter) เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์และสายอากาศรูปแบบกรวยคู่
2) ศึกษาออกแบบจำลองการวัดหาตำแหน่งภายในอาคารและจัดเตรียมอุปกรณ์
3) ทำการวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีความถี่ร่วมแบบแถบกว้างยิ่ง

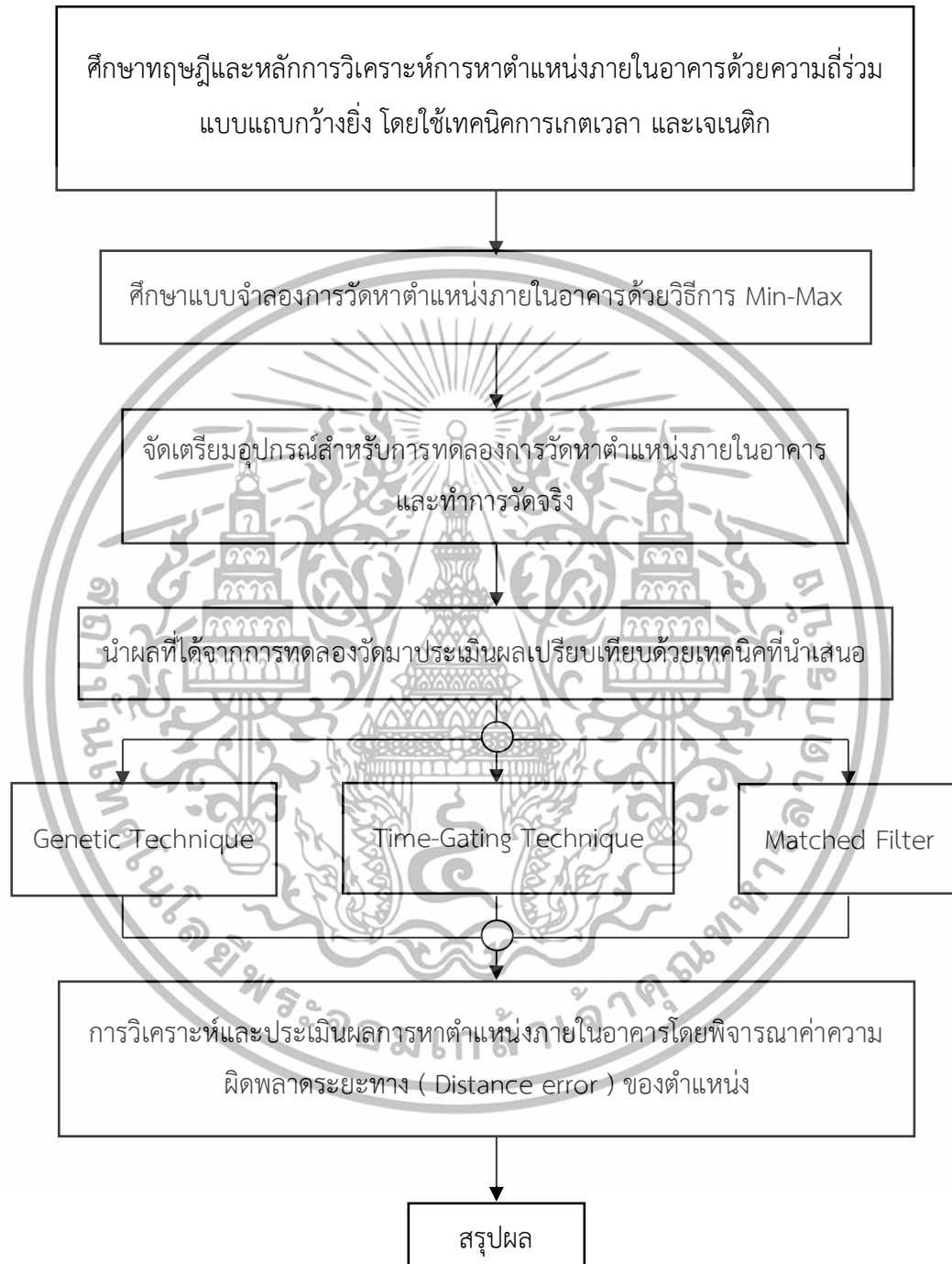
ตารางที่ 1.2 แผนการทำงานของปริญญานิพนธ์ในปีการศึกษาที่ 2

แผนงานที่จะดำเนินการ
1) วิเคราะห์และประเมินเปรียบเทียบผลการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการเกิดเวลาและเจเนติก โดยพิจารณาความผิดพลาดของระยะทาง
2) สรุปผลการหาตำแหน่งภายในอาคารที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เทคนิคการเกิดเวลา และเจเนติก
3) จัดทำเล่มปริญญานิพนธ์

ในภาคการศึกษาที่ 1 ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีความถี่ร่วมแบบกว้างยิ่ง คุณสมบัติของสายอากาศแบบกรวยคู่ และการออกแบบแบบจำลองการวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้แบบจำลอง Min-Max เทคนิคการหาตำแหน่งแบบเจเนติก เทคนิคการเกิดเวลา และวงจรกรองแบบแมตช์ โดยทำการวัดความแรงของสัญญาณในแต่ละพิกัด จากนั้นในภาคการศึกษาที่ 2 ได้เน้นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการหาตำแหน่งจากภาคการศึกษาแรกเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง รวมถึงจัดทำรายงานปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บล็อกไดอะแกรมของปริญญาพันธ์ที่นำเสนอ



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของการวัดหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ความถี่ร่วมแบบแถบกว้างยิ่ง โดยแบบจำลอง Min-Max และเทคนิคการเกิดเวลาและเจเนติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ปริญญานิพนธ์เรื่อง “การออกแบบจำลองวัดของการหาตำแหน่งความถี่ร่วมแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับสภาวะแวดล้อมภายในอาคารด้วยเทคนิคการเกิดเวลาและเจเนติก ” ได้ทำการออกแบบแบบจำลองและทำการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคาร ดังนั้นปริญญานิพนธ์นี้จึงเสนอบททฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

#### 2.1 บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra-wideband: UWB) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารไร้สายหลายรูปแบบ เทคโนโลยีนี้มีคุณลักษณะโดดเด่นที่แตกต่างจากเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายประเภทอื่น ๆ โดยใช้แถบความถี่ที่กว้างมาก ส่งผลให้สามารถส่งข้อมูลปริมาณมากได้อย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาสั้น ทั้งยังใช้พลังงานในระดับต่ำมาก (ระดับนาโนวัตินาทีหรือพิโควัตินาที) ส่งผลให้สัญญาณมีแบนด์วิดท์สูงและสามารถส่งข้อมูลได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.6 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งครอบคลุมแบนด์วิดท์กว้างถึง 7.5 กิกะเฮิรตซ์ โดยมีอัตราการส่งข้อมูลสูงถึง 480 Mb/s ในระยะ 2 เมตร และ 110 Mb/s ในระยะ 10 เมตร

เทคโนโลยี UWB นี้มีลักษณะเฉพาะในการส่งสัญญาณพลังงานต่ำ ทำให้เกิดการรบกวนต่ออุปกรณ์สื่อสารอื่นน้อย จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในระบบที่ต้องการความปลอดภัยของข้อมูลและการรบกวนที่ต่ำ เทคโนโลยีดังกล่าวยังเป็นที่ยอมรับในมาตรฐานการสื่อสารไร้สายระยะใกล้ที่สามารถประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ส่วนบุคคลต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ระบบการสื่อสารระยะใกล้ที่ต้องการความแม่นยำสูง อุปกรณ์ที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลที่รวดเร็ว และระบบระบุตำแหน่งที่มีความแม่นยำสูง

ด้วยคุณสมบัติเด่นดังกล่าว เทคโนโลยี UWB จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน ทั้งในด้านการระบุตำแหน่ง การสื่อสารข้อมูลที่มีความรวดเร็วและแม่นยำ ตลอดจนการใช้ในระบบที่มีความต้องการประหยัดพลังงานและลดผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่น ๆ ทำให้เทคโนโลยี UWB มีแนวโน้มที่จะได้รับการพัฒนาและนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลายในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ความเป็นมาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

ในศตวรรษที่ 19 นักวิทยาศาสตร์ได้เริ่มศึกษาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ ในปี ค.ศ. 1873 พบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเร็วเท่ากับแสงและส่งผ่านอากาศได้โดยไม่ต้องใช้สาย แต่แนวคิดนี้ไม่ได้รับความสนใจในตอนแรก จนกระทั่ง ไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ ในปี ค.ศ. 1886 ได้ทดลองพิสูจน์ทฤษฎีนี้ และในปี ค.ศ. 1893 ออกุสต์โต ริกี ได้ทดลองเพิ่มเติมจนยืนยันถึงความสัมพันธ์ของแม่เหล็กไฟฟ้าและแสงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ในปี ค.ศ. 1894 กุกลีเอลโม มาร์โคนีได้ศึกษาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและพัฒนาเครื่องส่งสัญญาณไร้สายสำเร็จ โดยในปี ค.ศ. 1895 เขาสามารถส่งสัญญาณไร้สายได้เป็นครั้งแรก ถือเป็นรากฐานของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย ต่อมาในปี ค.ศ. 1901 มาร์โคนีทำการส่งสัญญาณข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกโดยใช้รหัสมอร์ส ซึ่งใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณแบบสปาร์คแก๊ป (Spark gap generator) สร้างแรงดันสูงทำให้เกิดการสปาร์คในอากาศ เกิดเป็นคลื่นวิทยุสำหรับการสื่อสาร นับเป็นพื้นฐานสำคัญของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra-Wideband Technology) [3]

## 2.3 ลักษณะเด่นของเทคโนโลยีแถบกว้าง

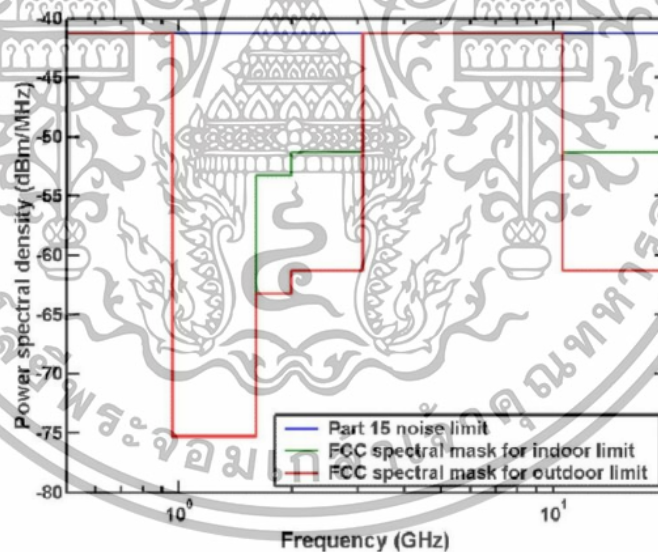
เทคโนโลยี UWB (Ultra-Wideband) มีจุดเด่นหลายประการที่ทำให้เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะในงานที่ต้องการการส่งข้อมูลที่รวดเร็ว ความแม่นยำสูง และประหยัดพลังงาน UWB มีแบนด์วิดท์ที่กว้าง ทำให้รองรับอัตราการส่งข้อมูลที่สูงและมีความสามารถในการรับส่งสัญญาณที่เสถียรในสภาพแวดล้อมที่มีการรบกวนจากสัญญาณสะท้อน (multipath) ช่วยให้สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง เช่น ภายในอาคาร นอกจากนี้ความสามารถในการระบุตำแหน่งที่มีความละเอียดสูงของ UWB ยังมีประโยชน์ต่อบริการที่ต้องการความแม่นยำด้านตำแหน่ง เช่น การติดตามตำแหน่งและระบบนำทาง

อีกทั้งเทคโนโลยี UWB ยังมีการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากการใช้งานที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น ในงานด้านการแพทย์ ซึ่งต้องการระบบตรวจวัดที่ใช้พลังงานน้อย จุดเด่นเหล่านี้ทำให้ UWB เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง การติดตามตำแหน่ง และการตรวจวัดทางการแพทย์ โดยสามารถตอบสนองต่อความต้องการในด้านความน่าเชื่อถือ ความแม่นยำ และประสิทธิภาพในการใช้งาน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การจำกัดความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังงานการสื่อสารแบบกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดยคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร

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



รูปที่ 2.1 ข้อกำหนดการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของการสื่อสารแบบกว้างยิ่งสำหรับภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดในสหรัฐอเมริกา [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

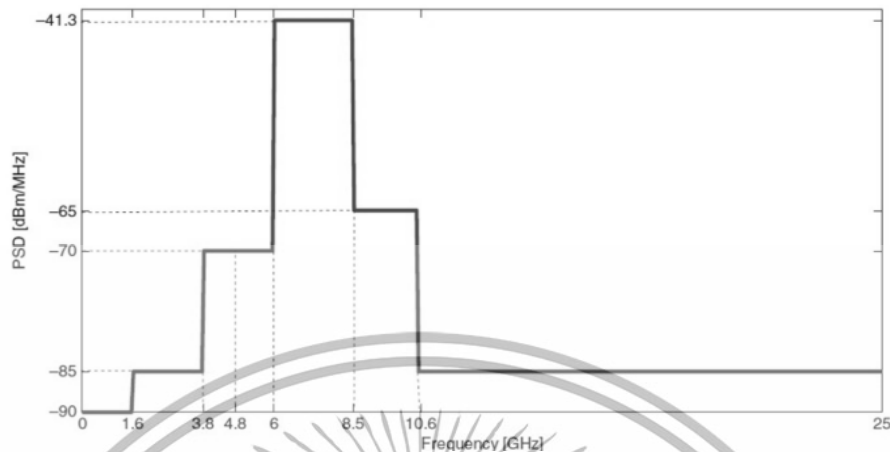
### 2.3.1 มาตรฐานโทรคมนาคมของสหภาพยุโรป (European Telecommunication Standards Institute: ETSI)

มีการกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมจากคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร คือ ได้แบ่งเป็นย่านความถี่ต่ำ (Low Band) โดยย่านความถี่ต่ำจะเริ่มที่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.8 กิกะเฮิรตซ์ และย่านความถี่สูง (High Band) โดยย่านความถี่สูงจะเริ่มที่ 6 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 8.5 กิกะเฮิรตซ์ ดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคารที่ใช้ในยุโรป [6]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ข้อกำหนดจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป [6]

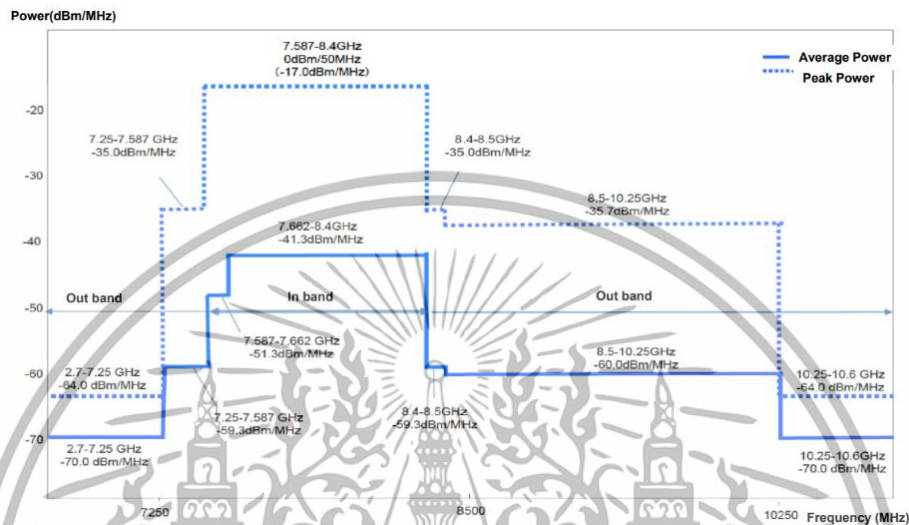
### 2.3.2 มาตรฐานและข้อกำหนดของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในประเทศญี่ปุ่น

กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งถูกบังคับใช้ในเดือนสิงหาคม ปี ค.ศ. 2006 จากกระทรวงกิจการภายในประเทศและการสื่อสาร (The Ministry of Internal Affairs and Communications : MIC) ความถี่ที่สามารถใช้งานได้อยู่ในช่วงย่านความถี่ต่ำ 3.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 48 กิกะเฮิรตซ์ และในย่านความถี่สูง 725 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.25 กิกะเฮิรตซ์ ดังรูปที่ 2.1 ทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกากับประเทศญี่ปุ่น 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 จาก ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของสัญญาณหรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 450 เมกะเฮิรตซ์
- ในการดำเนินการภายในอาคารอุปกรณ์ระบบแถบกว้างยิ่งสามารถเชื่อมต่อกับไฟ AC และ อุปกรณ์ระบบแถบกว้างยิ่งที่ไม่ได้ต่อกับไฟ AC จะต้องได้รับอนุญาตให้ปล่อยคลื่นวิทยุหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ได้รับสัญญาณจากอุปกรณ์วิทยุอื่นที่เชื่อมต่อกับไฟ AC และอัตราการส่งข้อมูลกว่า 50 เมกะบิตต่อวินาที ยกเว้นกรณีของสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์วิทยุอื่น



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมกำลังงานของระบบแลบกว้างยิ่งประเทศญี่ปุ่น [7]

## 2.4 ทฤษฎีการหาตำแหน่งภายในอาคาร

### 2.4.1 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength: RSS)

พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ เป็นพารามิเตอร์ของสัญญาณที่ใช้ในการคาดคะเนตำแหน่ง ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะแสดงให้เห็นถึงระดับของกำลังงานที่ถูกส่งออกมาซึ่งเป็น ค่าที่ไม่คงที่ จึงต้องทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์นั้นในจำนวนที่หลายครั้ง แล้วนำค่าที่บันทึกมาเฉลี่ย เพื่อความเที่ยงตรง สำหรับการหาตำแหน่งพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้เป็นการพิจารณา ค่าความแรงของสัญญาณซึ่งถูกลดทอนลงอันเนื่องมาจากความสัมพันธ์ของระยะทางและกำลังที่สูญเสีย หรือเรียกว่าการสูญเสียเชิงวิถีจากการประยุกต์ของสมการ Log-Distance Path Loss Model ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.1) เป็นรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่คาดการณ์ถึงการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่แพร่ออกไปในอาคารหรือนอกอาคาร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ด้วยการลดทอนของพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับนี้จะนำไปสู่พารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณในการหาตำแหน่งคือการแปลงค่าระยะทางจากค่าความเข้มข้นของสัญญาณที่ถูกปล่อยออกมาจากโหนดอ้างอิงหรือสายอากาศส่งไปยังโหนดเป้าหมายหรือสายอากาศรับ ดังสมการที่ (2.2) และในการหาตำแหน่งจะนำค่าระยะทางที่ได้ไปใช้คำนวณในทางเทคนิคการหาตำแหน่งแบบต่างๆ การแปลงค่าระยะทางสามารถวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ [8] 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 ( 1 เมตร )
$RSS(d)$	คือ ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ตำแหน่ง $d$ (dB)
$RSS(d_0)$	คือ ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ตำแหน่ง $d_0$ (dB)
$n$	คือ เลขชี้กำลังการสูญเสียเชิงวิถี

โดยในปริภูมิพจน์เล่มนี้  $RSS(d)$  เป็นค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากการทดลองโดยที่

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $v_r(t)$  คือ รูปคลื่นสัญญาณรับ

สามารถหาค่า  $RSS(d_0)$  และค่า  $n$  หาได้จากสมการ Channel Model โดยพิจารณาจากสมการที่ (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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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 [8]

#### 2.4.2 การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)

การสูญเสียเชิงวิถีเป็นอัตราส่วนระหว่างการสูญเสียของกำลังงานด้านส่งเทียบกับกำลังงานด้านรับ ซึ่งการสูญเสียเชิงวิถีจะแสดงถึงระดับของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างด้านส่งด้านรับ [9]

นิยามการสูญเสียเชิงวิถีเป็นอัตราส่วนกำลังส่งต่อกำลังรับ [10] คือ

$$P_L = \frac{P_t}{P_r} \quad (2.20)$$

โดยทั่วไปมักแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบล แสดงดังสมการ (2.21)

$$PL[dB] = 20 \log \left( \frac{v_t(t)}{v_r(t)} \right) \quad (2.21)$$

เมื่อ  $v_t(t)$  คือ ระดับสัญญาณที่ใช้ส่ง การสูญเสียเชิงวิถีสำหรับแถบกว้างยิ่งจะพิจารณาตามสมการที่ (2.22)

$$PL[dB] = 20 \log \left[ \frac{\max |v_t(t)|}{\max |v_r(t)|} \right] \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) กำหนดให้สัญญาณที่ส่งผ่านมีค่าเท่ากับ 1 [9] ดังนั้น สามารถจัดสมการใหม่ได้ ดังนี้ แสดงสมการที่ (2.23)

$$PL(d)[dB] = -20 \log (\max |v_r(t)|) \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 ภาพตัดข้างประวิงเวลา (Power Delay Profile: PDP)

ภาพตัดข้างประวิงเวลาจะแสดงถึงระดับกำลังงานของสัญญาณด้านส่งที่เข้ามาด้านรับที่เวลาต่างกัน เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นมีความเร็วไม่เท่ากัน จึงทำให้เวลาการแพร่กระจายคลื่นมีความล่าช้าตามระยะทางจากด้านส่งถึงด้านรับ [9] แสดงดังสมการที่ (2.24)

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^N a^2 \tau_i}{\sum_{i=1}^N a^2} = \frac{\sum_{i=1}^N P(\tau_i) \tau_i}{\sum_{i=1}^N P(\tau_i)} \quad (2.24)$$

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

### 2.4.4 การวัดหาตำแหน่งด้วยเทคนิค Min-Max

Min-Max เป็นเทคนิคการหาตำแหน่งที่มีการซ้อนทับของขอบเขตที่ต่ำที่สุดและขอบเขตที่สูงที่สุดในแกน  $x$  และ  $y$  โดยโหนดเป้าหมายจะวัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากโหนดอ้างอิงจากตำแหน่งตามที่วางไว้ นั่นคือตำแหน่ง  $x_i$  และ  $y_i$  ซึ่งจำเป็นต้องมีสายอากาศอย่างน้อย 3 ชุดเพื่อใช้เทคนิคนี้ การคำนวณหาตำแหน่งจะนำพารามิเตอร์ทั้งสองมาคำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ และจะทำการวาดขอบเขตที่เกิดจากสายอากาศส่งแต่ละอันโดยตำแหน่งที่ต้องการจะหาได้จากค่าเฉลี่ยในแกน  $x$  และ  $y$  ของส่วนที่ทับซ้อนในขอบเขต [9]

โดยระยะทางระหว่างโหนดเป้าหมายและโหนดอ้างอิงสามารถคำนวณหาได้จากพารามิเตอร์ความแรงของสัญญาณที่รับได้ และในส่วนของ การคำนวณหาตำแหน่งที่ต้องการหรือตำแหน่งของสายอากาศรับสามารถคำนวณได้จากการนำค่าเฉลี่ยของกล่องที่ซ้อนทับกัน หรือขอบเขตที่ต่ำที่สุด และขอบเขตที่สูงที่สุดในแกน  $x$  และแกน  $y$  [11] โดยขอบเขตที่ต่ำที่ต่ำที่สุดในแกน  $x$  และแกน  $y$  คือ

$$(x_i - d_i, y_i - d_i) \quad (2.25)$$

ขอบเขตที่ต่ำที่สุดและขอบเขตที่สูงที่สุดในแกน  $x$  และ  $y$

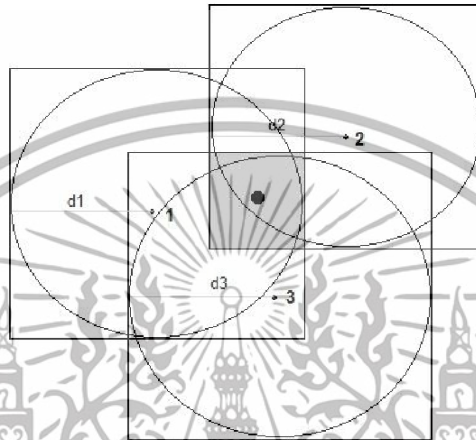
$$(x_i + d_i, y_i + d_i) \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $(x_i, y_i)$  คือ ตำแหน่งของโหนดอ้างอิง

$d_i$  คือ ระยะทางระหว่างโหนดเป้าหมาย และโหนดอ้างอิง(เมตร)

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



รูปที่ 2.4 เทคนิคการหาตำแหน่ง Min-Max [9]

จากสมการที่ (2.25) และสมการที่ (2.26) นำค่าขอบเขตที่คำนวณได้มาหาค่าที่สูงที่สุดและต่ำที่สุดของฟังก์ชันที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดในแกน  $x$  ดังสมการที่ (2.27) และสมการที่ (2.28) และหาค่าที่สูงที่สุดและต่ำที่สุดของฟังก์ชันที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดในแกน  $y$  ดังสมการที่ (2.29) และสมการที่ (2.30)

$$x_{min} = \max(x_i - d_i) \quad (2.27)$$

$$x_{max} = \min(x_i + d_i) \quad (2.28)$$

$$y_{min} = \max(y_i - d_i) \quad (2.29)$$

$$y_{max} = \min(y_i + d_i) \quad (2.30)$$

สุดท้ายสามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งที่ต้องการหรือหาตำแหน่งของสายอากาศรับได้จากสมการที่ (2.31) และสมการที่ (2.32) [11] ดังนี้

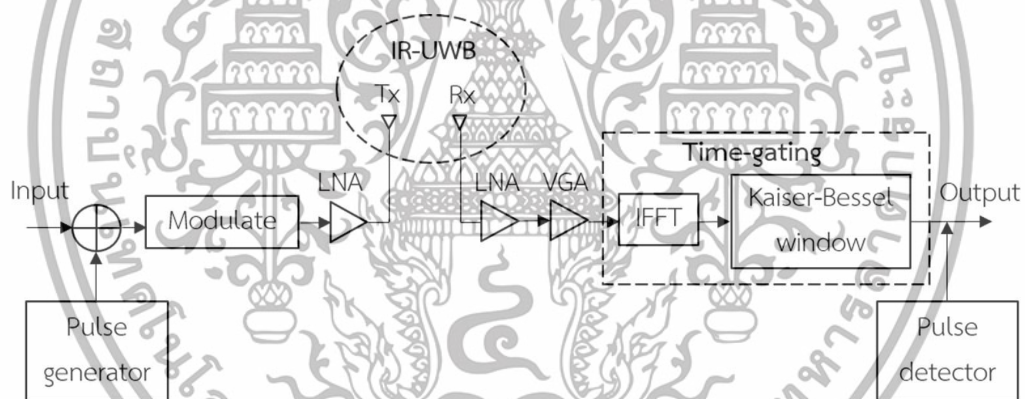
$$X = \frac{x_{min} + x_{max}}{2} \quad (2.31)$$

$$Y = \frac{y_{min} + y_{max}}{2} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.5 เทคนิคการเกตเวลา (Time-Gating)

เทคนิคการเกตเวลาเป็นการใช้วินโดว์คูณกับสัญญาณในโดเมนเวลาเพื่อเป็นการกำหนดช่วงเวลา ที่ทำให้สัญญาณมีค่าประมาณเท่าเดิม และช่วงเวลาที่ทำให้สัญญาณมีค่าประมาณเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามการใช้วินโดว์จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดของสัญญาณในช่วงเวลาที่ต้องการขึ้น วินโดว์ที่ทำให้มีค่าผิดพลาด เกิดขึ้นน้อยจะต้องมีคุณสมบัติในโดเมนความถี่คือโลบหลักจะต้องแคบและมีความชันมาก โลบข้างจะต้อง มีระดับต่ำ เพื่อที่จะทำให้ได้คุณสมบัติเหล่านี้วินโดว์พื้นฐานชนิดต่าง ๆ จะต้องใช้ความยาวของวินโดว์มาก และอันดับวินโดว์สูง วินโดว์ที่ทำให้เกิดค่าผิดพลาดน้อยและใช้ความยาวของวินโดว์น้อยจะต้องใช้วินโดว์ทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างแต่วินโดว์ชนิดนี้มีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์มาก วินโดว์ไคเซอร์-เบสเซลเป็นวินโดว์ที่ประมาณมาจากวินโดว์ทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างให้อยู่ในเทอมทางคณิตศาสตร์ที่ง่ายขึ้น แล้วยังคงคุณสมบัติที่ทำให้เกิดค่าผิดพลาดน้อยโดยแสดงบล็อกไดอะแกรมเทคนิคการเกตเวลา [12] แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของเทคนิคการเกตเวลา [12]

เมื่อวินโดว์ไคเซอร์-เบสเซล แสดงดังสมการที่ (2.33)

$$w(t) = \begin{cases} \frac{I_0\left(\pi\alpha\sqrt{1-\left(\frac{2[t-t_p]}{T}\right)^2}\right)}{I_0(\pi\alpha)}, & t_p - \frac{T}{2} \leq t \leq t_p + \frac{T}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.33)$$

เมื่อ  $T$  คือ ความกว้างของวินโดว์ หรือระยะเวลาของวินโดว์ (วินาที)  
 $\alpha$  คือ พารามิเตอร์รูปร่างของวินโดว์

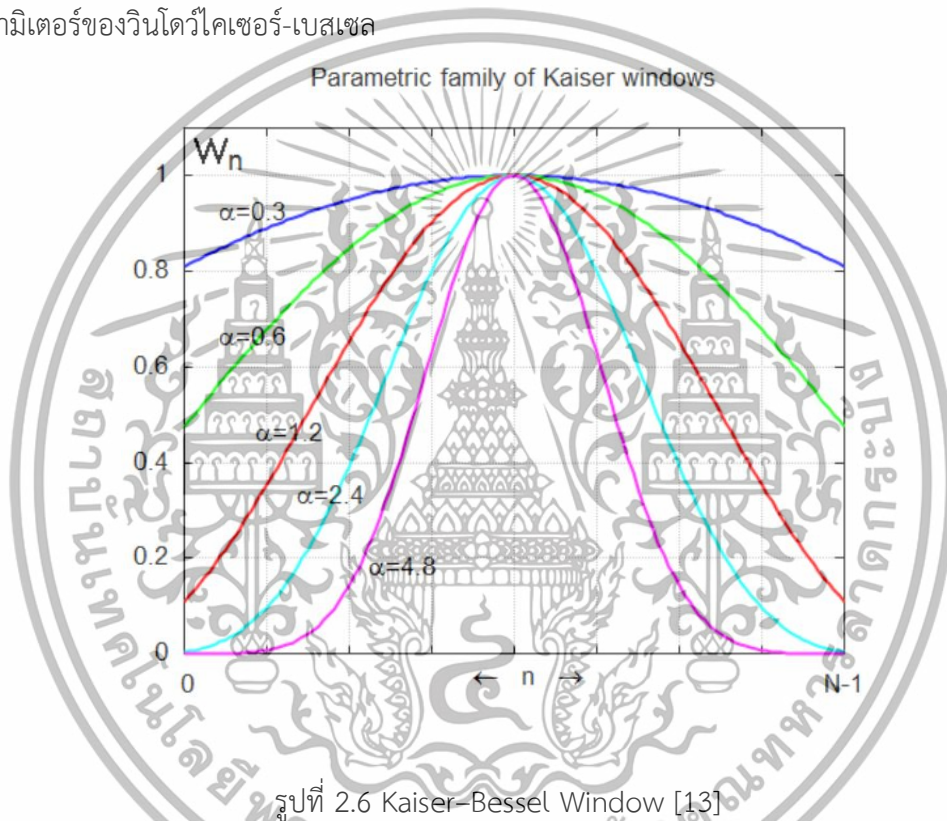
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t_p$  คือ เวลาที่วินโดว์มีแอมพลิจูดสูงสุด (วินาที)

ฟังก์ชัน  $I_0(x)$  เป็นฟังก์ชันเบสเซลที่ถูกแก้ไขอันดับที่ศูนย์ของชนิดแรก แสดงดังสมการที่ (2.34)

$$I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi e^{xcos(\theta)} d\theta \quad (2.34)$$

พารามิเตอร์ของวินโดว์โคเซอร์-เบสเซล



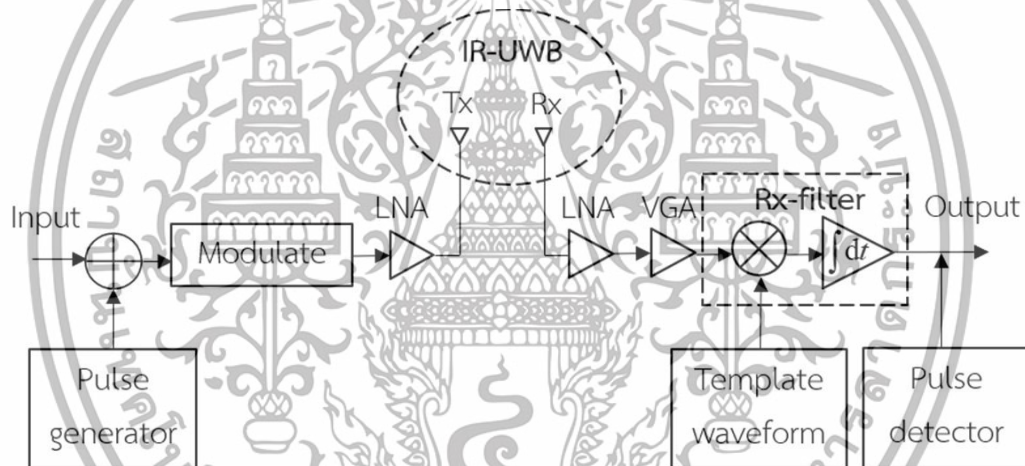
โคเซอร์-เบสเซล ได้รับการพัฒนาโดย James Kaiser ที่ Bell Laboratories เป็นพารามิเตอร์ ที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองการตอบสนองแรงกระตุ้นที่จำกัด และการวิเคราะห์สเปกตรัม วินโดว์โคเซอร์-เบสเซลใกล้เคียงกับวินโดว์  $\alpha$  เป็นจำนวนจริงที่ไม่ติดลบซึ่งกำหนดรูปร่างของวินโดว์ ในโดเมนความถี่ จะกำหนดการแลกเปลี่ยนระหว่างความกว้างของโลบหลักและระดับของโลบข้าง ซึ่งเป็นการตัดสินใจที่สำคัญในการออกแบบวินโดว์ จากรูปที่ 3.21 ค่า  $\alpha$  ต่างกัน โคเซอร์-เบสเซลมีความสามารถในการรักษาพลังงานสูงสุดในโลบหลัก (เช่น ความกว้างของโลบหลักแคบ) และสามารถลดระดับโลบข้างได้ บางกรณีวินโดว์โคเซอร์จะถูกกำหนดพารามิเตอร์โดย  $\beta$  โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $\beta = \pi\alpha$  เมื่อ  $\alpha$  เพิ่มขึ้น โลบลักจะมีความกว้างเพิ่มขึ้น และโลบข้างจะมีความกว้างลดลง  $\alpha = 0$  ตรงกับวินโดว์สี่เหลี่ยม สำหรับ  $\alpha$  ขนาดใหญ่ รูปร่างของวินโดว์โคเซอร์ (ทั้งในโดเมนเวลาและความถี่) มีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นโค้งแบบเกาส์เซียน วินโดว์โคเซอร์เกือบจะดีที่สุดในเรื่องของความเข้มข้นของความถี่สูงสุด [13]

#### 2.4.6 วงจรกรองแบบแมตช์ (Matched Filter)

เป็นตัวกรองเชิงเส้นที่สามารถช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน ข้อดีของวงจรกรองแบบแมตช์ คือ เมื่อสัญญาณที่รับได้มีการสูญเสียจากสัญญาณรบกวน จะช่วยปรับปรุงให้สัญญาณทางด้านรับดีขึ้น แต่ยังมีข้อเสีย คือ มีความซับซ้อน [12]



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองแบบแมตช์ [12]

โดยที่สายอากาศด้านรับนั้นได้ใช้สมการวงจกรองแบบแมตช์ในการนำมาวิเคราะห์กับ  $H_{Friis}(f)$  เพื่อนำมาหาค่าสูงสุดของสัญญาณเอาต์พุตทางด้านรับโดยสมการวงจกรองแบบแมตช์ใช้ในการกรองความถี่  $H_{MF}(f)$  สามารถนำมาคำนวณได้สมการที่ (2.35)

$$H_{MF}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} H^* e^{-Friis}(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H^* e^{-Friis}(f)|^2 df}} \quad (2.35)$$

และวงจกรองแบบแมตช์ในกรณีสมการไอโซทรอปิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{MF,Iso}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} H_{e-Friis,Iso}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis,Iso}^*(f)|^2 df}} \quad (2.36)$$

จากสมการที่ได้ จะได้ค่ากำลังของสัญญาณรบกวน แสดงดังสมการที่ (2.37)

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_{3MF}(f)|^2 df = 2f_b \quad (2.37)$$

โดยในกรณีนี้รูปร่างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มาจากวงจรกรองแบบแมตซ์  $v_{MF}(t)$  เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} v_{MF}(t) &= h_{e-Friis}(t) \otimes h_{MF}(t) \\ &= \frac{\sqrt{2f_b} h_{e-Friis}(t) \otimes h_{e-Friis}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{e-Friis}^2(t) dt}} \end{aligned} \quad (2.38)$$

และสำหรับกรณีไอโซทรอปิก

$$\begin{aligned} v_{MF,Iso}(t) &= h_{e-Friis}(t) \otimes h_{MF,Iso}(t) \\ &= \frac{\sqrt{2f_b} h_{e-Friis,Iso}(t) \otimes h_{e-Friis,Iso}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{e-Friis,Iso}^2(t) dt}} \end{aligned} \quad (2.39)$$

สำหรับสเปกตรัมของเอาต์พุตที่ได้มาจากวงจรกรองแบบแมตซ์  $v_{MF}(t)$  คือ

$$\begin{aligned} v_{MF}(f) &= \frac{H_{e-Friis}(t) H_{MF,Iso}(t)}{\sqrt{2f_b |H_{e-Friis}(t)|}} \\ &= \frac{\sqrt{2f_b} |H_{e-Friis}(f)|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df}} \end{aligned} \quad (2.40)$$

พิจารณาค่าสูงที่สุดของสัญญาณ จะได้

$$\begin{aligned} \max v_{MF}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} V_{MF}(f) df \\ &= \sqrt{2f_b \int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df} \end{aligned} \quad (2.41)$$

#### 2.4.7 เทคนิคการหาตำแหน่งแบบเจเนติก

วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetics algorithm หรือ GA) [14] เป็นวิธีหาคำตอบด้วยการคัดเลือกทางธรรมชาติโดยจำลองมาจากทฤษฎีวิวัฒนาการโดยการคัดเลือกตามธรรมชาติของ ชาร์ลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดาร์วิน กระบวนการทำงานของอัลกอริทึมนี้ มีด้วยกัน 5 ขั้นตอนคือ การสร้างต้นแบบ (Initial population) การขยายจำนวนประชากร (Scale population) การสงวนไว้เฉพาะผู้ที่เหมาะสม (Selection) การสร้างลูกผสม (Crossover) และ การกลายพันธุ์ (Mutation) โดยจุดที่น่าสนใจของอัลกอริทึมนี้มี 3 ขั้นตอนที่ทำให้มีความแตกต่างจากการสุ่ม ไล่ค่าแบบทั่วไปคือ การสงวนไว้เฉพาะผู้ที่เหมาะสม การสร้างลูกผสมและการกลายพันธุ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

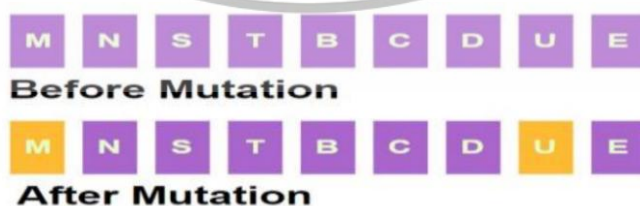
2.2.7.1 การคัดเลือกผู้รอด (Selection) จะเป็นการรักษาประชากรไว้เฉพาะประชากรที่มี ค่าความเหมาะสมในการอยู่รอด (fitness) ไว้ ซึ่งจะเก็บเฉพาะกลุ่มของผู้ที่มีค่าสูงสุดไว้ และกลุ่ม ที่มีค่าความเหมาะสมน้อยจะถูกตัดออกเปรียบเหมือนการสูญพันธุ์ไปและเก็บไว้เฉพาะผู้รอด

2.2.7.2 การสร้างลูกผสม (Crossover) เป็นการสร้างรุ่นต่อไปจากรุ่นปัจจุบัน หรือรุ่นลูก [14]



รูปที่ 2.8 การสร้างลูกผสม หรือ Crossover [14]

2.2.7.3 การกลายพันธุ์ (Mutation) จะเกิดขึ้นหลังจากขั้นตอน Crossover แล้ว หรือ คือการกลายพันธุ์หลังการผสมให้เกิดรุ่นลูก [14]



รูปที่ 2.9 การกลายพันธุ์ หรือ Mutation [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขั้นตอนของวิธีเชิงพันธุกรรมที่กล่าวมานั้น จะเห็นได้ว่าจุดสำคัญที่ทำให้อัลกอริทึมนี้แตกต่างจากการสุ่มทั่วไปคือ จะมีการเก็บค่าของข้อมูลที่มีค่า fitness สูงไว้เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการสุ่มครั้งถัดไป แต่จะยังมีการประชากรที่มีค่าสูงไว้กลุ่มหนึ่งไว้เป็นพ่อแม่ของรุ่นถัดไป เพื่อว่าในรุ่นถัดไปจะใช้การสุ่มเลือกพ่อแม่ ไม่ใช่การเลือกจากประชากรที่มีค่าสูงสุด 2 ค่าเท่านั้น เพื่อป้องกันการเกิด local optimal solution เพราะประชากรที่มีค่าสูงสุดในรุ่น ๆ หนึ่ง อาจจะไม่นำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดก็เป็นได้ [15]

## 2.5 สูตรการส่งผ่านสัญญาณฟรีส (Friis' Transmission Formula)

ถูกเสนอขึ้นครั้งแรกโดยวิศวกรไฟฟ้าชาวเดนมาร์ค ฮาราล์ท ฟรีส สามารถใช้เพื่ออธิบายถึงการเชื่อมโยงในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย โดยสัญญาณจากสายอากาศส่งจะถูกส่งผ่านอากาศไปยังสายอากาศรับ การส่งคลื่นสัญญาณผ่านอวกาศว่างนั้นมักจะนิยามให้ค่าการสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่างซึ่งมีค่าเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังงานของสัญญาณที่ถูกส่งออกมา [16] แสดงดังสมการที่ (2.42)

$$G_{\text{Friis}}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} = G_f(f)G_r(f)G_t(f) \quad (2.42)$$

- เมื่อ  $G_{\text{Friis}}(f)$  คือ อัตราการขยายของฟรีส  
 $P_r(f)$  คือ กำลังของสัญญาณด้านรับในรูปของกำลังงาน  
 $P_t(f)$  คือ กำลังของสัญญาณด้านส่งในรูปของกำลังงาน  
 $G_f(f)$  คือ อัตราการขยายของช่องสัญญาณในอวกาศว่าง แสดงดังสมการที่ (2.43)  
 $G_r(f)$  คือ อัตราการขยายของสัญญาณด้านรับ (dB)  
 $G_t(f)$  คือ อัตราการขยายของสัญญาณด้านส่ง (dB)

$$G_f(f) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi d f}\right)^2 \quad (2.43)$$

- เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสง  
 $f$  คือ ความถี่

สามารถคำนวณหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของอวกาศว่างได้ แสดงดังสมการที่ (2.44) เป็นการเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{\text{Friis}}(f, d) = H_f(f, d) \mathbf{H}_r(f) \cdot \mathbf{H}_t(f) \quad (2.44)$$

เมื่อ  $H_f(f, d)$  คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านสัญญาณในอวกาศว่าง

$\mathbf{H}_r(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศรับ

$\mathbf{H}_t(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่ง

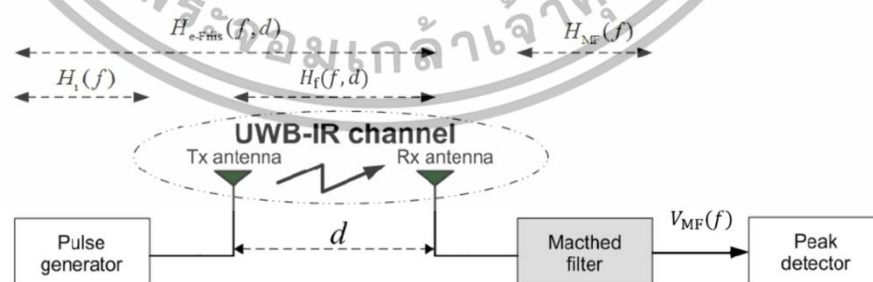
สามารถคำนวณหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของอวกาศว่างได้ แสดงดังสมการที่ (2.45)

$$H_f(f, d) = \frac{\lambda}{4\pi d} \cdot e^{-jkd} = \frac{c}{4\pi df} \cdot e^{-jkd} \quad (2.45)$$

เมื่อ  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

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

เนื่องจากสูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส แสดงดังสมการที่ (2.42) ที่กล่าวมาข้างต้น ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ได้โดยตรงกับระบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งสมการที่ (2.42) จะมีความเหมาะสมกับค่าความถี่แคบช่วงเท่านั้น จึงมีการปรับปรุงสมการการส่งผ่านของฟรีสให้เหมาะสมกับระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง เรียกว่า การขยายสมการการส่งผ่านของฟรีส (Extension Friis' Transmission Formula) โดยจะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการถ่ายโอนโดยการเพิ่มฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณส่งจากวงจรกรองกำเนิดพัลส์ (Pulse generator filter,  $H_i$ ) เพื่อใช้ในการหาค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ [16] ดังนี้



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมของระบบการส่งผ่านโดยการประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส โดยมีแมตซ์ฟิลเตอร์ทางด้านรับเพื่อนำมาใช้กับระบบเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงได้นำการประยุกต์ของสูตรการส่งผ่านของฟรีสมาประยุกต์ใช้กับรูปคลื่นการส่งผ่านการได้ดังนี้

$$H_{e\text{-Friis}}(f, d) = \frac{V_r(f)}{E_i} = H_f(f, d)H_i(f)H_r(f) \cdot H_t(f) \quad (2.46)$$

เมื่อ  $H_f(f, d)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนในอากาศว่าง

$H_i(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณส่ง

$H_r(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่ง

$H_t(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศรับ

## 2.7 รูปคลื่นสัญญาณรับแถบกว้างยิ่ง

สำหรับสัญญาณรับที่ได้ในโดเมนความถี่ สามารถวิเคราะห์หาได้จากการนำฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งคูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ ซึ่งสัญญาณรับที่รับได้ในโดเมนความถี่ [17] แสดงดังสมการที่ (2.47)

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H_c(f) \quad (2.47)$$

เมื่อ  $V_t(f)$  คือ สัญญาณรับแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่

$H_c(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ

สัญญาณรับที่ได้ในโดเมนเวลาสามารถหาได้จากการใช้การแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform : IFFT) สัญญาณรับที่ได้ในโดเมนเวลา [17] แสดงดังสมการที่ (2.48)

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f)e^{j2\pi ft}df \quad (2.48)$$

## 2.8 รูปคลื่นสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่ง

รูปคลื่นส่งที่ผู้จัดทำได้เลือกใช้ในโครงงานนี้ ได้กำหนดให้เป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม (Rectangular Passband Waveform) กำหนดให้ความถี่ต่ำสุด ( $f_{\min}$ ) เท่ากับ 3.4 กิกะเฮิร์ตซ์ ความถี่สูงสุด ( $f_{\max}$ ) เท่ากับ 4.8 กิกะเฮิร์ตซ์ แบนด์วิดท์ ( $f_b$ ) เท่ากับ 1.4 กิกะเฮิร์ตซ์ และความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลาง ( $f_c$ ) เท่ากับ 4.1 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา แสดงดังสมการที่ (2.49)

$$v_t(t) = \frac{A}{2f_b} [f_{\max} \text{sinc}(2f_{\max}t) - f_{\min} \text{sinc}(2f_{\min}t)] \tag{2.49}$$

สัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่ [17] แสดงดังสมการที่ (2.50)

$$V_t(f) = \begin{cases} \frac{A}{2f_b} & ||f| - f_c| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & ||f| - f_c| > \frac{f_b}{2} \end{cases} \tag{2.50}$$

เมื่อ  $v_t(t)$  คือ สัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา

$V_t(f)$  คือ สัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่

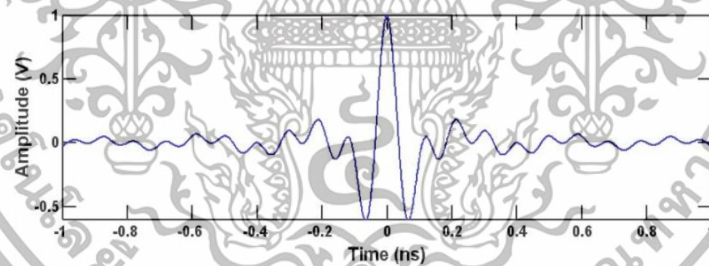
$A$  คือ แอมพลิจูดสูงสุด

$f_b$  คือ แบนด์วิดท์

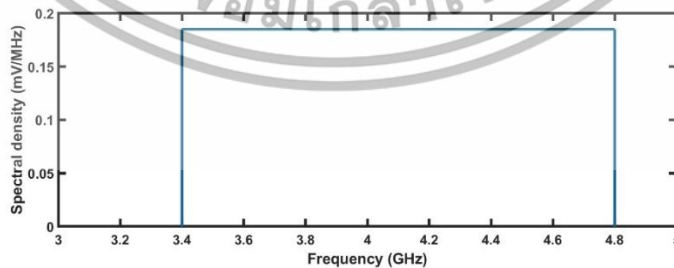
$f_c$  คือ ความถี่กลาง

$f_{\max}$  คือ ความถี่สูงสุด

$f_{\min}$  คือ ความถี่ต่ำสุด



รูปที่ 2.11 รูปคลื่นสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา [17]



รูปที่ 2.12 สเปกตรัมของสัญญาณส่งแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 ค่าความผิดพลาดทางระยะทาง (Distance Error)

ค่าความผิดพลาดทางระยะทางเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ถึงความแม่นยำของการระบุตำแหน่งโดยหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งจริงและตำแหน่งจากการทดลอง ด้วยสูตรการคำนวณค่ากำลังงานเฉลี่ยผิดพลาด สามารถหาค่าความผิดพลาดทางระยะทางได้ [3] จากสมการที่ (2.51)

$$Error = \sqrt{(X - x_{\text{real}})^2 + (Y - y_{\text{real}})^2} \quad (2.51)$$

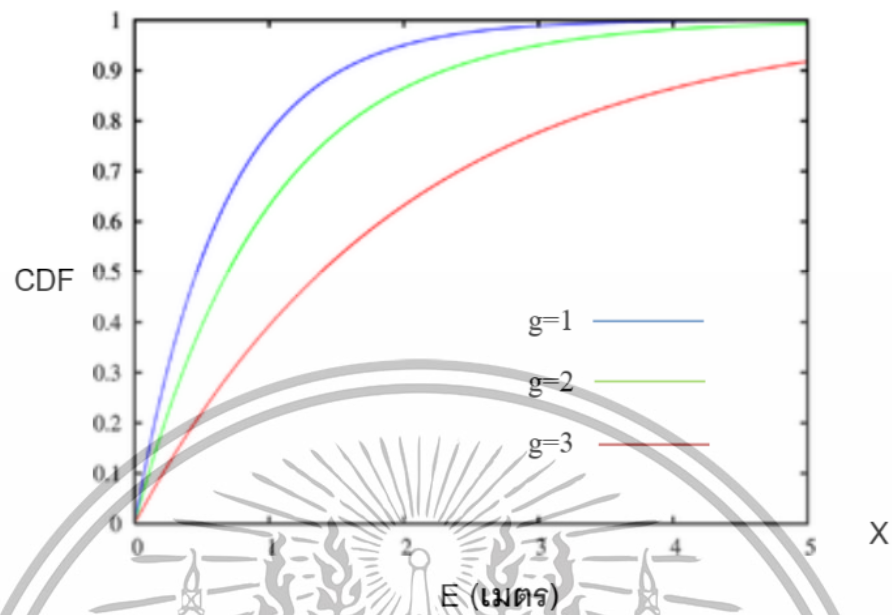
เมื่อ $x_{\text{real}}$	คือ ตำแหน่งในพิกัด $x$ ที่ถูกต้อง
$y_{\text{real}}$	คือ ตำแหน่งในพิกัด $y$ ที่ถูกต้อง
$X$	คือ ตำแหน่งในพิกัด $x$ ที่ได้จากการทดลอง
$Y$	คือ ตำแหน่งในพิกัด $y$ ที่ได้จากการทดลอง

## 2.10 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function : CDF)

ในโครงการนี้จะอธิบายผลการทดลองในรูปกราฟฟังก์ชันการแจกแจงแบบสะสม สำหรับในทางทฤษฎีความน่าจะเป็นทางสถิติ โดย CDF คือ ค่าข้อมูลจริงของตัวแปรสุ่ม  $x$  หรือฟังก์ชันการกระจายของ  $x$  [8]

$$F(E; g) = \begin{cases} 1 - e^{-gE}, & E \geq 0 \\ 0, & E < 0 \end{cases} \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสม [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์

#### 3.1 การออกแบบ

##### 3.1.1 การเลือกใช้สายอากาศ

สายอากาศกรวยคู่เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์การส่งผ่าน ในย่านความถี่ 7.25-8.50 กิกะเฮิรตซ์ เนื่องจากมีความสามารถในการครอบคลุมย่านความถี่กว้าง และมีรูปแบบการแผ่คลื่นที่สม่ำเสมอ ทำให้การวัดค่าซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการส่งผ่าน ของสัญญาณระหว่างตำแหน่งส่งและรับมีความแม่นยำ สายอากาศกรวยคู่ยังมีการสูญเสียพลังงานต่ำใน ย่านความถี่นี้ ทำให้ผลการวัดค่ามีความเสถียรและมีความน่าเชื่อถือ จึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ การวิเคราะห์หาตำแหน่งภายในอาคาร

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

##### อุปกรณ์การทดลอง

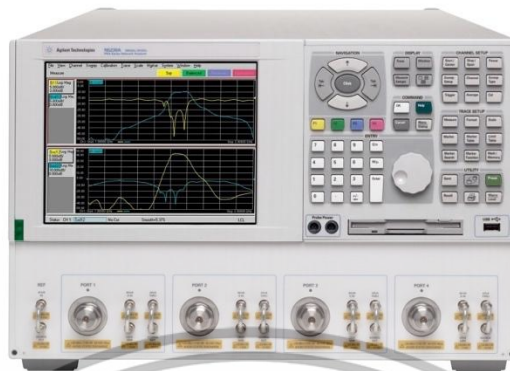
- 1) เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น รุ่น N5230A จำนวน 1 เครื่อง
- 2) สายอากาศแบบกรวยคู่ จำนวน 2 ตัว
- 3) สายส่งสัญญาณ Semi-Rigid ชนิด RG-142 จำนวน 2 สาย
- 4) ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ จำนวน 1 ชุด
- 5) ผ้าใบขนาด 2.8 x 2.8 ตารางเมตร จำนวน 1 ผืน
- 6) เสารองรับสำหรับปรับความสูงสายอากาศ จำนวน 2 ตัว

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

##### VNA)

เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer) ที่รองรับการวัด พารามิเตอร์ของเครือข่าย RF และไมโครเวฟ โดยครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 300 kHz ถึง 50 GHz มีรุ่นที่รองรับทั้งแบบ 2 พอร์ตและ 4 พอร์ต ช่วงไดนามิกสูงสุด 108 dB และความเร็วในการวัดที่ 9  $\mu$ s ต่อจุด รองรับการเชื่อมต่อผ่าน GPIB, LAN และ USB สำหรับการควบคุมและถ่ายโอนข้อมูล ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานในงานวิจัยและพัฒนารวมถึงการผลิตอุปกรณ์ RF และไมโครเวฟ [1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น N5230A [18]

### 3.2.2 สายอากาศแบบกรวยคู่

โดยแผ่นทองแดงที่มีความหนา 0.005 เมตร ที่ผ่านกระบวนการกลึงโลหะให้แผ่นทองแดงเป็นทรงกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.079 เมตร และมีความยาวของกรวยรวมกัน 0.048 เมตร [9]

รูปที่ 3.2 สายอากาศกรวยคู่ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สายส่งสัญญาณชนิด Semi-Rigid RG-142 เป็นสายส่งสัญญาณที่มีการห่อหุ้มด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงระดับปานกลาง ทำจากทองแดงหรืออลูมิเนียมที่สามารถดัดโค้งได้ตามความต้องการ แต่ยังคงรูปร่างที่มีความมั่นคง มีคุณสมบัติพิเศษที่ช่วยในการลดการสูญเสียของสัญญาณที่ย่านความถี่สูงโดยสามารถรองรับความถี่ได้ถึง 18 กิกะเฮิร์ตซ์ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการการส่งสัญญาณที่มีความเสถียรและลดสัญญาณรบกวน เช่น งานในระบบเรดาร์ ระบบสื่อสาร RF และงานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการการทดสอบสัญญาณ สายส่งสัญญาณชนิดนี้มีค่าความต้านทานที่ 50 โอห์ม ช่วยให้การส่งสัญญาณในระบบต่าง ๆ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ [19]



รูปที่ 3.3 สายส่งสัญญาณ Semi-Rigid ชนิด RG-142 [19]

### 3.2.4 ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ

ชุดอุปกรณ์การปรับเทียบ (Calibration Kit) ที่ประกอบด้วยขั้วต่อ Open, Short, และ Load (OSLT) ถูกออกแบบมาในการช่วยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับค่ามาตรฐาน ชุดอุปกรณ์นี้มีบทบาทสำคัญในการกำจัดสัญญาณรบกวนในสายนำสัญญาณแบบ Semi-Rigid ที่มีการสูญเสียต่ำ ซึ่งมักจะใช้ก่อนเริ่มการทดลองกับเครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) โดยการใช้ชุดอุปกรณ์ OSLT ช่วยให้การปรับเทียบกับสายนำสัญญาณมีความแม่นยำ การใช้ Open, Short, และ Load พร้อมกับ Through Adaptor เป็นวิธีการที่นิยมสำหรับการปรับเทียบเครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณในย่านความถี่สูง [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ ( Calibration Kit ) [20]

### 3.2.5 เสารองรับสำหรับปรับความสูงสายอากาศ

เสารองรับสำหรับปรับตำแหน่งสายอากาศนี้เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการตั้งและปรับตำแหน่งสายอากาศเพื่อให้ได้มุมที่เหมาะสมสำหรับการรับ-ส่งสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ โดยโครงสร้างของอุปกรณ์ประกอบด้วยเสาแนวตั้งสีดำและท่อ PVC ที่ออกแบบให้มีข้อต่อรูปตัว T และข้อต่ออ ช่วยเพิ่มความมั่นคงในการตั้งสายอากาศในตำแหน่งที่ต้องการ ทำให้ผู้ใช้สามารถปรับตำแหน่งและองศาของสายอากาศได้ง่าย



รูปที่ 3.5 เสารองรับสำหรับปรับความสูงสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบกรวยคู่

#### 3.3.1 การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน $|S_{21}|$

ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่าน  $|S_{21}|$  ควรอยู่ในระดับที่ไม่เกิน -10 เดซิเบล เพื่อให้สายอากาศมีประสิทธิภาพในการส่งผ่านสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริง หากค่า  $|S_{21}|$  ต่ำกว่า -10 เดซิเบล จะบ่งบอกถึงการสูญเสียพลังงานที่มากเกินไป ซึ่งอาจไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในระบบที่ต้องการการส่งผ่านพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

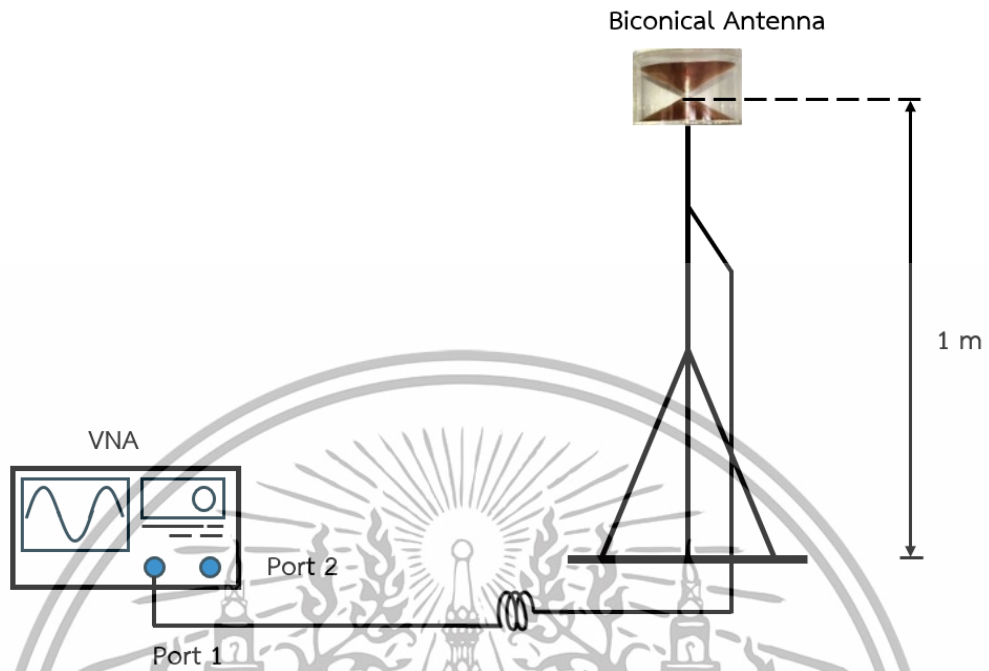
ตารางที่ 3.1 ตารางพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ กรวยคู่

พารามิเตอร์	เงื่อนไขในการทดลอง
ช่วงความถี่	7.25 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 8.50 กิกะเฮิรตซ์
ประเภทสายอากาศ	สายอากาศกรวยคู่
ความสูงของสายอากาศส่ง-รับ	0.80 เมตร

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. ตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ โดยกำหนดความถี่ที่ต้องการทดสอบกำลังส่ง 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  $|S_{21}|$  จากนั้นบันทึกผลการทดสอบ
5. ใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์และประเมินผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แบบจำลองการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การทดลองวัดอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่

อัตราขยายการส่งผ่านเป็นตัวบ่งบอกสำหรับการเลือกสายอากาศไปประยุกต์ใช้งาน โดยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะต้องใช้สายอากาศที่มีรูปแบบการแผ่กระจายพลังงานแบบรอบทิศทาง



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดลองวัดค่าอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตารางพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่

พารามิเตอร์	เงื่อนไขในการทดลอง
ช่วงความถี่	7.25 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 8.50 กิกะเฮิรตซ์
ประเภทของสายอากาศ	สายอากาศกรวยคู่
ความสูงของสายอากาศส่ง-รับ	0.80 เมตร
ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง-รับ	1.60 เมตร
การหมุนสายอากาศ	0 องศา ถึง 360 องศา
การหมุนสายอากาศต่อครั้ง	10 องศา

พารามิเตอร์ที่ระบุในตารางที่ 3.2 เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบส่งสัญญาณไร้สายในสภาพแวดล้อมที่กำหนด โดยมีเหตุผลทางวิศวกรรมที่ต้องกำหนดพารามิเตอร์เหล่านี้ ดังนี้

1. ช่วงความถี่ 7.25 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 8.50 กิกะเฮิรตซ์ เป็นช่วงความถี่รวมที่ต้องการทดสอบซึ่งอาจเป็นช่วงการทำงานของสายอากาศกรวยคู่ มีการครอบคลุมย่านความถี่ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานจริง เช่น ระบบสื่อสารหรือเรดาร์
2. ประเภทของสายอากาศแบบสายอากาศกรวยคู่ เนื่องจากเหมาะกับการใช้กับเทคโนโลยี UWB เพราะมีช่วงแบนวิดท์กว้าง 20 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 18 กิกะเฮิรตซ์ เป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง นอกจากนี้ยังสร้างง่าย ราคาถูก และมีใช้ในห้องทำการทดลอง
3. ความสูงของสายอากาศส่ง-รับ (0.80 เมตร)  
ความสูงของสายอากาศถูกกำหนดให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในการติดตั้งเพื่อให้สามารถรับส่งสัญญาณได้ดีที่สุด และลดการสูญเสียพลังงานในระหว่างการส่งสัญญาณ
4. ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง-รับ (1.60 เมตร)  
ระยะห่างนี้ถูกกำหนดเพื่อให้แน่ใจว่าการส่งและรับสัญญาณสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่มีปัญหาสัญญาณรบกวนระหว่างกัน
5. การหมุนสายอากาศ ( $0^{\circ}$  -  $360^{\circ}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศต้องสามารถหมุนได้รอบทิศทางเพื่อรองรับการปรับตำแหน่งให้เหมาะสม กับ ทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา และช่วยลดปัญหาสัญญาณสะท้อนที่อาจเกิดขึ้นจากสิ่งกีดขวาง

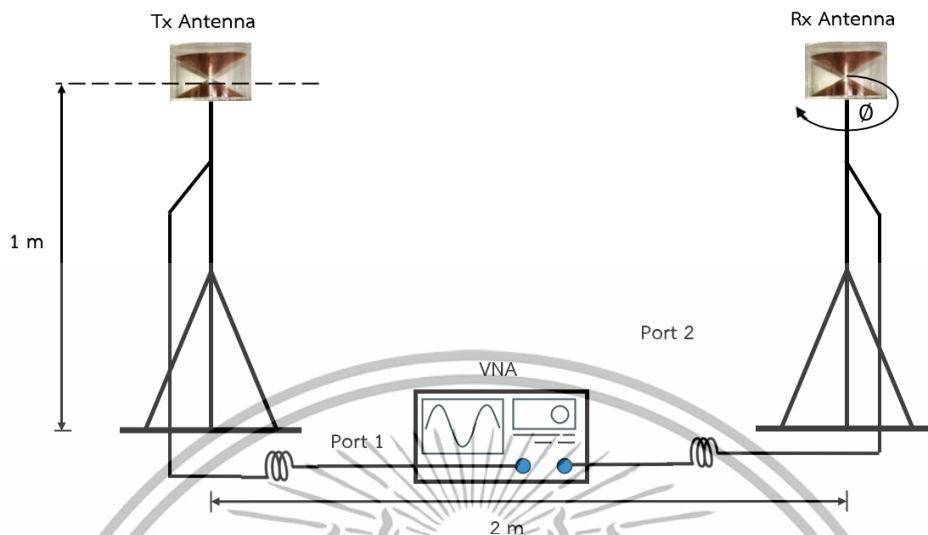
#### 6. การหมุนสายอากาศต่อครึ่ง (10°)

การกำหนดค่าการหมุนสายอากาศเป็นช่วงละ 10 องศาทำให้สามารถปรับแต่งทิศทางของสายอากาศได้อย่างละเอียดเพื่อให้ได้สัญญาณที่มีคุณภาพสูงสุด

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. เริ่มตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ เลือก Preset-OK > Calibration > Calibrate > 2-Port Cal (เพื่อวัดทั้งสองสาย) > Reflection สาย 1 กด Port1 Open จากนั้น ถอดหัว 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 กิกะเฮิรตซ์ และความถี่สุดท้ายที่ 4.8 กิกะเฮิรตซ์ แล้วบันทึกค่าทุก ๆ องศาของการหมุน  $\theta$  ของสายอากาศรับ (ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา) โดยหมุนสายอากาศแบบกรวยคู่วัดทีละ 10 องศา
5. วัดการแผ่กระจายพลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ตามข้อที่ 4
6. ใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์และประเมินผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



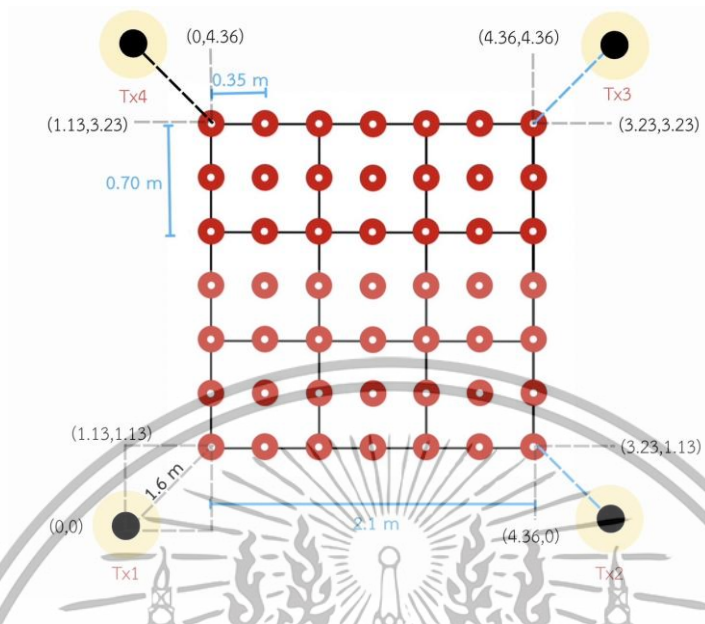
รูปที่ 3.9 แบบจำลองการทดลองวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับของสายอากาศคู่

### 3.4 การทดลองวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับของสายอากาศกรวยคู่

#### 3.4.1 แบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคาร

การทดลองในรูปที่ 3.10 ของปริญญาบัตรนี้เป็นการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น N5230A สำหรับการวิเคราะห์ระบบสายอากาศกรวยคู่ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร การทดลองนี้ประกอบด้วย การวางตำแหน่งสายอากาศรับที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแบบจำลอง โดยสายอากาศส่งและรับจะถูกตั้งอยู่ในระดับความสูง 0.80 เมตร โดยทั้งสองตำแหน่งเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายผ่านสายนำสัญญาณ มีการเชื่อมต่อพอร์ต 1 ของเครื่องวิเคราะห์เข้ากับสายอากาศรับ และพอร์ต 2 เข้ากับสายอากาศส่งในการวัดผลการทดลอง สายอากาศรับจะถูกเคลื่อนย้ายไปยังตำแหน่งทั้งหมด 49 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งห่างกันตามแนวแกน  $x$  และ  $y$  เป็นระยะ 0.35 เมตร การวัดแต่ละตำแหน่งจะถูกทำซ้ำ 10 ครั้งเพื่อลดความคลาดเคลื่อนและเพิ่มความแม่นยำ ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะเป็นข้อมูลในโดเมนความถี่ ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์ในตำแหน่งต่อไป

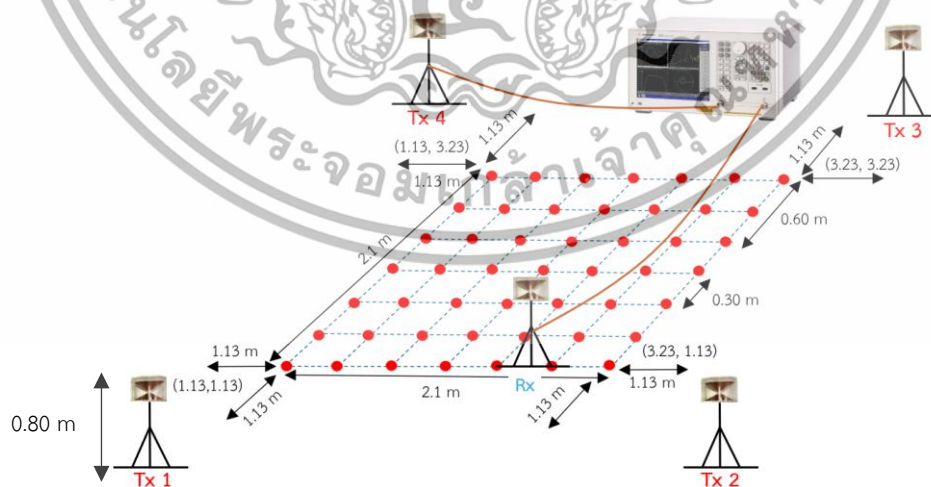
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แบบจำลองการหาค่าตำแหน่งภายในอาคาร

### 3.4.2 แบบจำลองการหาค่าตำแหน่งภายในอาคารในรูปแบบ 3 มิติ

การวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณในแบบ 3 มิติ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของสัญญาณในสภาพแวดล้อมภายในอาคารแสดงดังรูปที่ 3.11

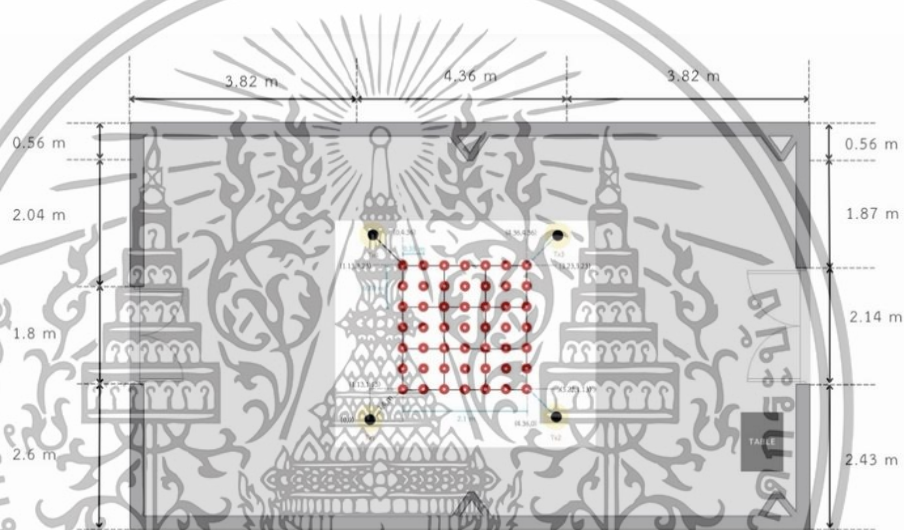


รูปที่ 3.11 แบบจำลองการหาค่าตำแหน่งภายในอาคารในรูปแบบ 3 มิติ (3D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 แบบจำลองสถานที่ใช้ในการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารมูมด้านบน (Top view)

แผนผังการวางตำแหน่งอุปกรณ์สำหรับการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารมูมมอดมด้านบน (Top view) โดยมีการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศส่งและรับในพื้นที่ทดสอบพร้อมระบุตำแหน่งวัดต่าง ๆ ตามแนวแกน  $x$  และ  $y$  ภายในขอบเขตห้องตามมาตราส่วนที่ระบุแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แบบจำลองขนาดสถานที่ในการวางตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ – มูมด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ขั้นตอนการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแบบความถี่รวม



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแบบความถี่รวม

#### ขั้นตอนการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแบบความถี่รวม

- 1) จัดวางตำแหน่งผ้าใบขนาด 2.8 x 2.8 เมตร ตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ และจัดวางตำแหน่งเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ พร้อมกับสายอากาศกรวยคู่ โดยทำการวางสายอากาศรับไว้ที่ตำแหน่งทดสอบที่กำหนด และวางสายอากาศส่งไว้ที่ตำแหน่ง Tx ตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้
- 2) ตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ และทำการปรับเทียบด้วยชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ โดยเลือกช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศ ซึ่งตั้งค่า Start Frequency ที่ 7.25

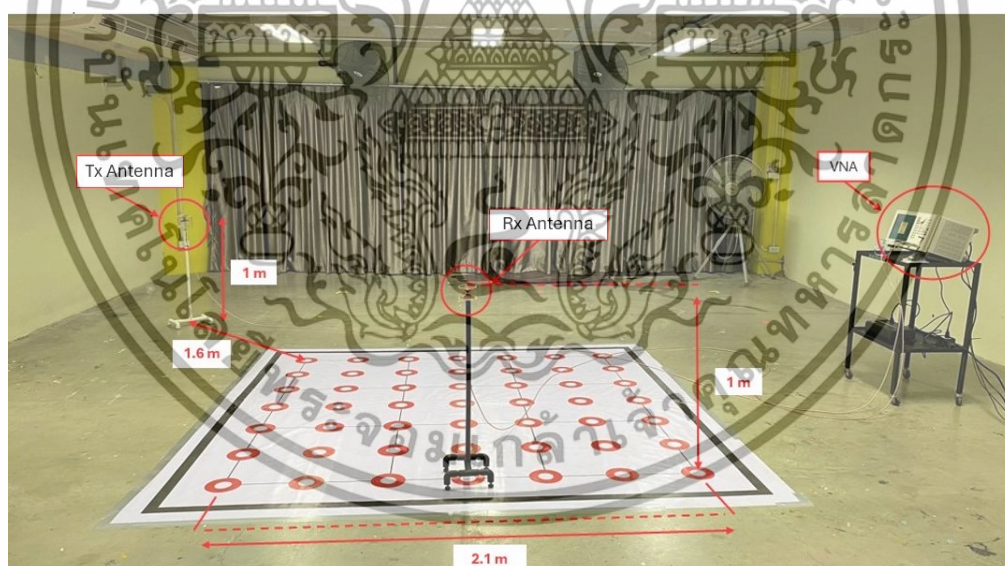
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิกะเฮิรตซ์ และ Stop Frequency ที่ 8.50 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นติดตั้งสายอากาศกรวยคู่เข้ากับสายนำสัญญาณที่ผ่านการปรับเทียบแล้ว โดยพอร์ต 1 เชื่อมต่อกับสายอากาศรับผ่านสายนำสัญญาณที่อยู่ในระดับความสูง 0.80 เมตร และพอร์ต 2 เชื่อมต่อกับสายอากาศส่งผ่านสายนำสัญญาณที่อยู่ในระดับความสูง 0.80 เมตร

3) ทำการวัดค่าขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณโดยการเคลื่อนย้ายสายอากาศรับให้ครอบคลุมทั้ง 49 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งห่างกันในแนวแกน  $x$  และ  $y$  เป็นระยะ 0.35 เมตร การวัดจะถูกทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้งต่อจุดทดสอบแต่ละตำแหน่ง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการเก็บข้อมูล

4) บันทึกผลการทดสอบ และนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบตำแหน่งและประสิทธิภาพการรับ-ส่งสัญญาณในพื้นที่ทดลอง

การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแบบความถี่ร่วม



รูปที่ 3.14 การทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแบบความถี่ร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ตารางพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองการหาตำแหน่งภายในอาคาร

พารามิเตอร์	เงื่อนไขในการทดลอง
ช่วงความถี่	7.25 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 8.50 กิกะเฮิรตซ์
ประเภทของสายอากาศ	สายอากาศกรวยคู่
ความสูงของสายอากาศส่ง-รับ	0.80 เมตร
จำนวนตำแหน่งที่ใช้ทดลองต่อ 1 Tx	49 ตำแหน่ง
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
Dynamic power range	80 เดซิเบล



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณ

จากรูปที่ 3.15 ข้อมูลเชิงซ้อน (Complex Data) ที่ได้จาก VNA (S21) ถูกใช้เป็นสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal) ก่อนนำไปผ่านแต่ละกรณี โดยมีกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เพื่อเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) และปรับสัญญาณให้เหมาะสม จากนั้นกรณีผ่านการเกิดเวลาเพื่อลดสัญญาณสะท้อนที่ไม่ต้องการ และ กรณีผ่านเทคนิคเจเนติก เพื่อเพิ่มความแม่นยำของค่าที่ได้ ต่อมาผลลัพธ์ที่ได้คือค่า Received Signal Strength (RSS) ซึ่งถูกนำไปใช้ในเทคนิค Min-Max เพื่อคำนวณหาตำแหน่งภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

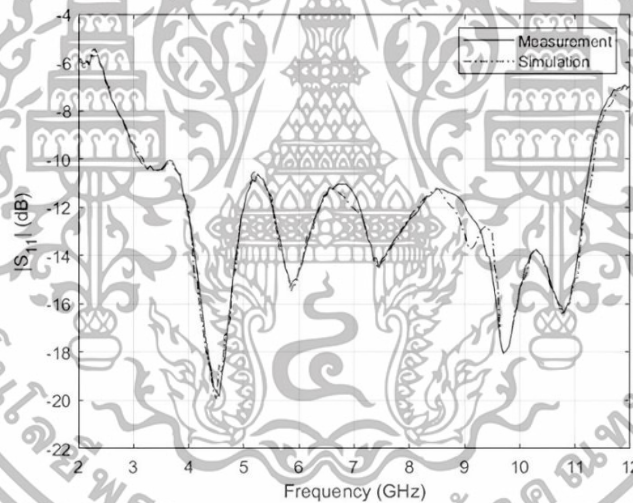
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากการทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแบบความถี่ร่วมตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ 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  $|S_{11}|$  แสดงถึงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศรอยคู่ระหว่างผลการทดลองวัดสายอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (เส้นทึบ) กับผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ (เส้นประ) พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่ความถี่ 7.25 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 8.50 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำกว่า -10 เดซิเบล หมายความว่า สายอากาศกรวยคู่ที่ได้นำมาศึกษานี้ สามารถนำไปใช้ทดลองหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแบบความถี่ร่วมตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ได้ เนื่องจากครอบคลุมช่วงความถี่ 7.25 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 8.50 กิกะเฮิรตซ์

#### 4.2 อัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่

อัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศกรวยคู่ จะแสดงในรูปของกราฟสองมิติ แสดงดังรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศของ E-plane ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกกับสายอากาศกรวยคู่

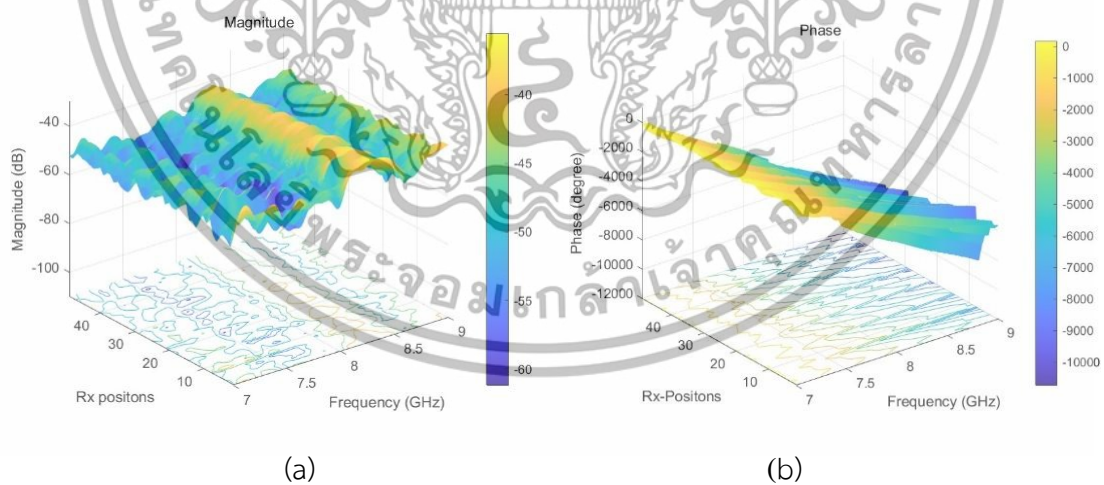
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศของ H-plane ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกกับสายอากาศกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 เปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศของ E-plane ระหว่างสายอากาศไอโซทรอปิกกับสายอากาศกรวยคู่ แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยายการส่งผ่านของสายอากาศไอโซทรอปิก (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

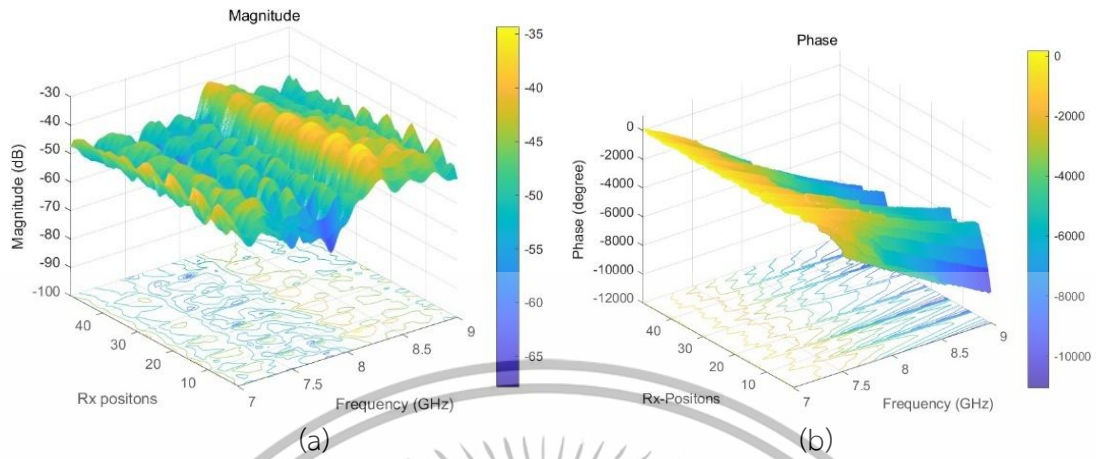


รูป 4.4 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1)

(a) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1)

(b) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1)

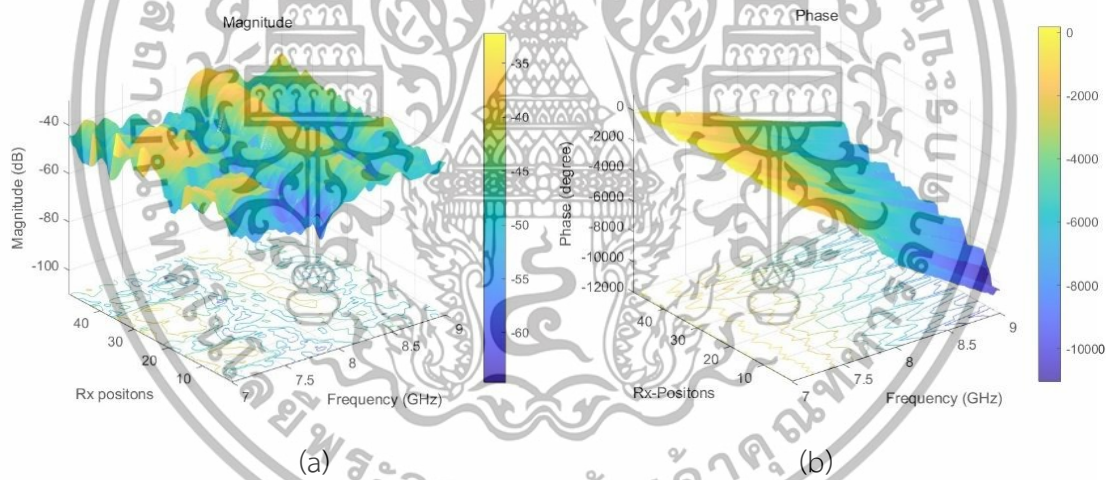
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2)

(a) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2)

(b) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2)

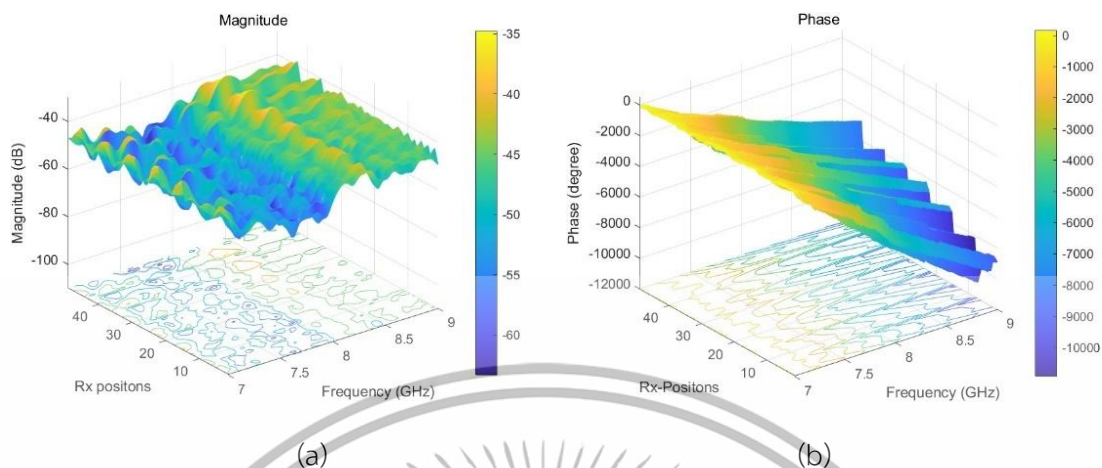


รูปที่ 4.6 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3)

(a) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3)

(b) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4)

(a) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4)

(b) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4)

จากการทดลองหาตำแหน่ง พบว่า บริเวณที่กราฟมีสีเหลืองเป็นบริเวณที่สายอากาศรับ อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้สายอากาศส่ง ส่งผลให้ขนาดของช่องสัญญาณนั้นจะมีระดับสัญญาณที่มาก และเฟสของช่องสัญญาณหากมีความเป็นเชิงเส้นจะแสดงถึงคุณภาพที่ดีของช่องสัญญาณ ดังนั้น การพิจารณาทั้ง Magnitude และ Phase จึงมีความสำคัญ เนื่องจาก Magnitude แสดงถึงระดับความแรงของสัญญาณที่ได้รับ ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับระยะทางและการลดทอนของสัญญาณ ในขณะที่ Phase สะท้อนถึงลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นและความต่อเนื่องของเฟสตามตำแหน่งและความถี่ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงเสถียรภาพและคุณภาพของช่องสัญญาณ การวิเคราะห์ทั้งสองส่วนร่วมกันช่วยให้สามารถประเมินความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง รวมถึงช่วยปรับปรุงความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารในสภาพแวดล้อมที่มีการสะท้อนและการรบกวนสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

จากรูปที่ 4.4 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1) พบว่า จุดที่มีระดับสัญญาณที่มากที่สุด เท่ากับ -35.71 เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 1 และจุดที่มีระดับสัญญาณที่น้อยที่สุด เท่ากับ -58.21 เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2) พบว่า จุดที่มีระดับสัญญาณที่มากที่สุด เท่ากับ  $-34.35$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 7 และจุดที่มีระดับสัญญาณที่น้อยที่สุด เท่ากับ  $-67.87$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 43

จากรูปที่ 4.6 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3) พบว่า จุดที่มีระดับสัญญาณที่มากที่สุด เท่ากับ  $-34.65$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 49 และจุดที่มีระดับสัญญาณที่น้อยที่สุด เท่ากับ  $-56.39$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 1

จากรูปที่ 4.7 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4) พบว่า จุดที่มีระดับสัญญาณที่มากที่สุด เท่ากับ  $-34.78$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 43 และจุดที่มีระดับสัญญาณที่น้อยที่สุด เท่ากับ  $-55.00$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 7

#### 4.4 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับ

ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจะแสดงค่ากำลังงานของสัญญาณในหน่วยเดซิเบล โดยที่แกน  $x$  และแกน  $y$  คือ ตำแหน่งของสายอากาศรับ แสดงดังรูปที่ 4.8 ถึง รูปที่ 4.11

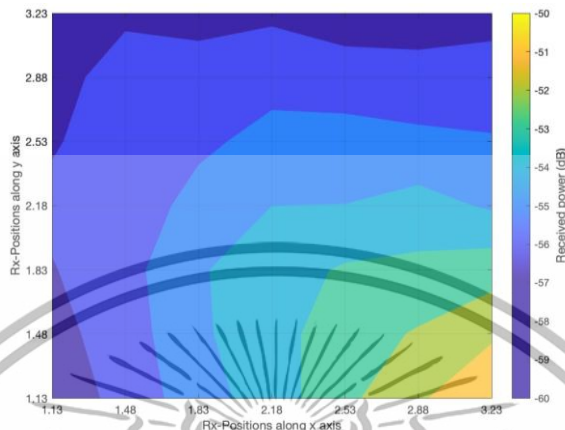


รูปที่ 4.8 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1)

จากรูปที่ 4.8 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศส่งที่ 1 (Tx1) พบว่า จุดที่มีความแรงของสัญญาณสูงที่สุด เท่ากับ  $-50.21$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (1.13, 1.13) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ใกล้กับสายอากาศส่งที่ 1 มากที่สุด และจุดที่มีความแรงของสัญญาณต่ำที่สุด

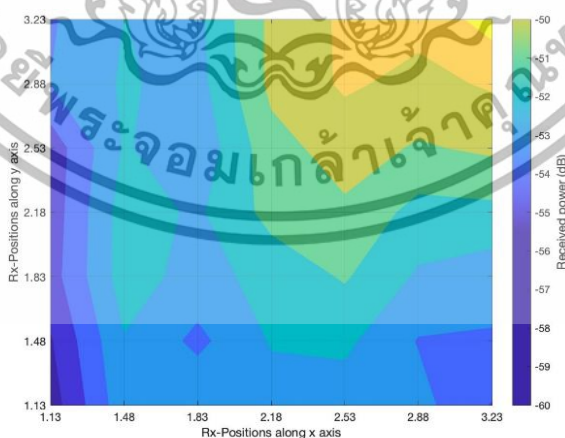
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ -57.95 เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (3.23, 3.23) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ไกลจากสายอากาศส่งที่ 1 มากที่สุด



รูปที่ 4.9 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2)

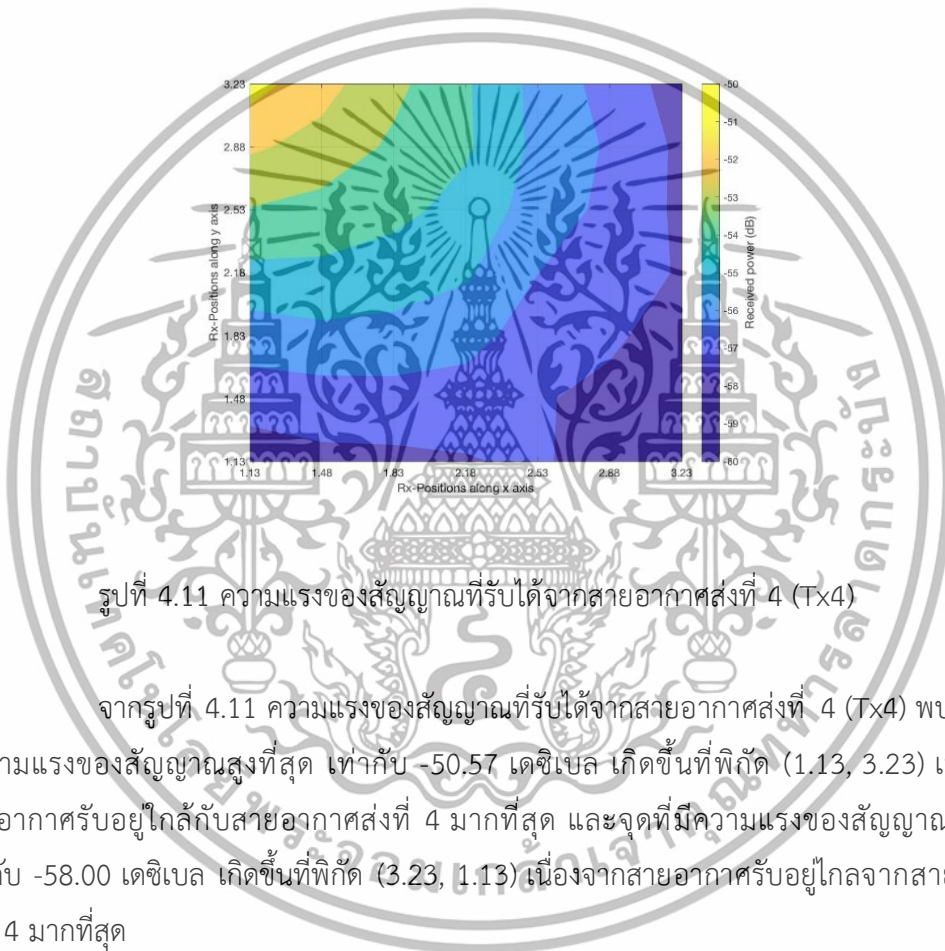
จากรูปที่ 4.9 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 2 (Tx2) พบว่า จุดที่มีความแรงของสัญญาณสูงที่สุด เท่ากับ -49.97 เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (3.23, 1.13) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ใกล้กับสายอากาศส่งที่ 2 มากที่สุด และจุดที่มีความแรงของสัญญาณต่ำที่สุด เท่ากับ -56.90 เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (1.13, 3.23) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ไกลจากสายอากาศส่งที่ 2 มากที่สุด



รูปที่ 4.10 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 3 (Tx3) พบว่า จุดที่มีความแรงของสัญญาณสูงที่สุด เท่ากับ  $-49.25$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (3.23, 3.23) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ใกล้กับสายอากาศส่งที่ 3 มากที่สุด และจุดที่มีความแรงของสัญญาณต่ำที่สุด เท่ากับ  $-57.82$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (1.13, 1.13) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ไกลจากสายอากาศส่งที่ 3 มากที่สุด



รูปที่ 4.11 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4)

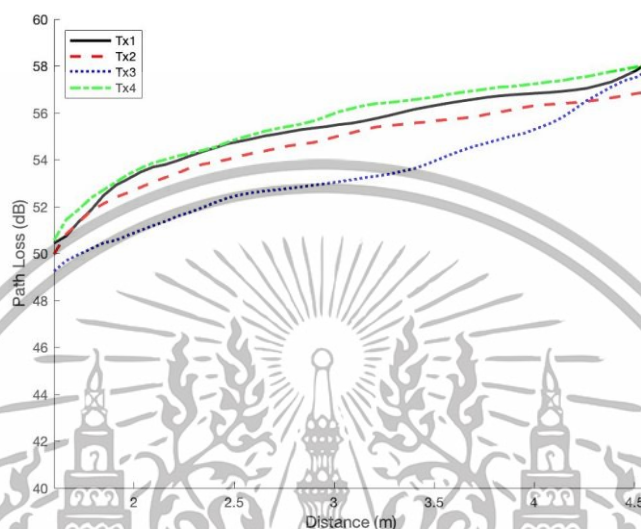
จากรูปที่ 4.11 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศส่งที่ 4 (Tx4) พบว่า จุดที่มีความแรงของสัญญาณสูงที่สุด เท่ากับ  $-50.57$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (1.13, 3.23) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ใกล้กับสายอากาศส่งที่ 4 มากที่สุด และจุดที่มีความแรงของสัญญาณต่ำที่สุด เท่ากับ  $-58.00$  เดซิเบล เกิดขึ้นที่พิกัด (3.23, 1.13) เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ไกลจากสายอากาศส่งที่ 4 มากที่สุด

#### 4.5 การสูญเสียเชิงวิถี

เมื่อระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งอยู่ใกล้กันจะทำให้มีค่าสูญเสียเชิงวิถีที่สูงขึ้น โดยที่แกน  $x$  คือ ระยะทางในหน่วยเมตร และแกน  $y$  คือ ค่าสูญเสียเชิงวิถีในหน่วยเดซิเบล โดยทำการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีที่ไม่ผ่านวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

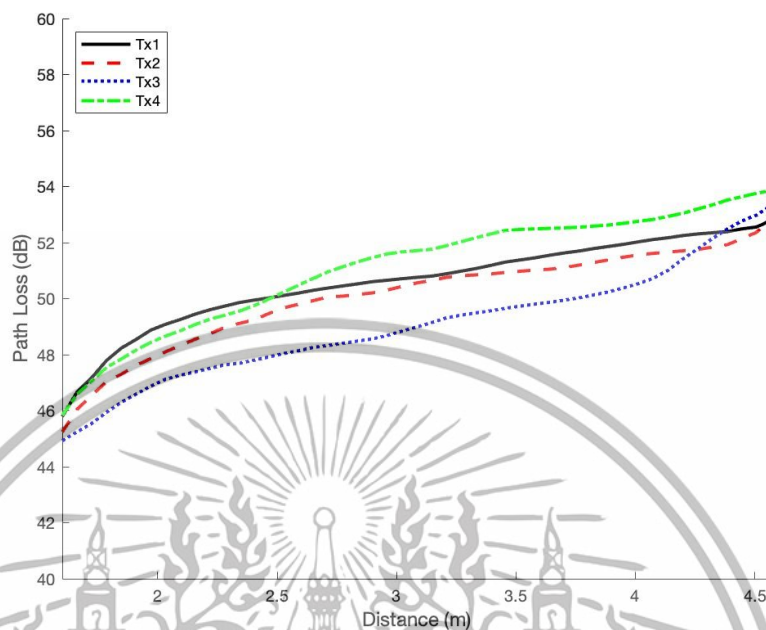
กรรแบบแมตซ์ เทคนิคการเกิดเวลาและเทคนิคเจเนติก กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่าน  
วงจรรองแบบแมตซ์และกรณีผ่านเทคนิคเจเนติก แสดงดังรูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีไม่ผ่านวงจรรอง  
แบบแมตซ์ เทคนิคการเกิดเวลา และเทคนิคเจเนติก

จากรูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีไม่  
ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์, เทคนิคการเกิดเวลาและเทคนิคเจเนติก พบว่า สายอากาศส่งที่ 1 มีค่า  
การสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด เท่ากับ 58.17 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถี  
ที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 50.45 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 2 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูง  
ที่สุด เท่ากับ 56.90 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ  
49.97 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 3 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงสุดเท่ากับ 57.82  
เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 49.25 เดซิเบล ที่  
ระยะทาง 1.6 เมตร และสายอากาศส่งที่ 4 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด เท่ากับ 57.46 เดซิเบล ที่  
ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 50.57 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6  
เมตร

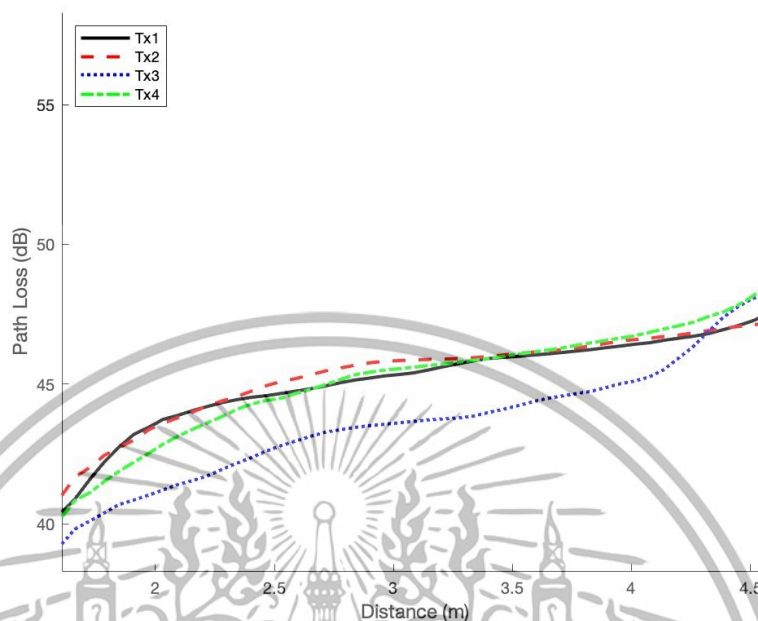
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา

จากรูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา พบว่า สายอากาศส่งที่ 1 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่สูงที่สุด เท่ากับ 52.80 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 45.79 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 2 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่สูงที่สุด เท่ากับ 52.83 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 45.24 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 3 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่สูงที่สุด เท่ากับ 53.33 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 44.92 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร และสายอากาศส่งที่ 4 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่สูงที่สุด เท่ากับ 53.86 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 45.83 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร

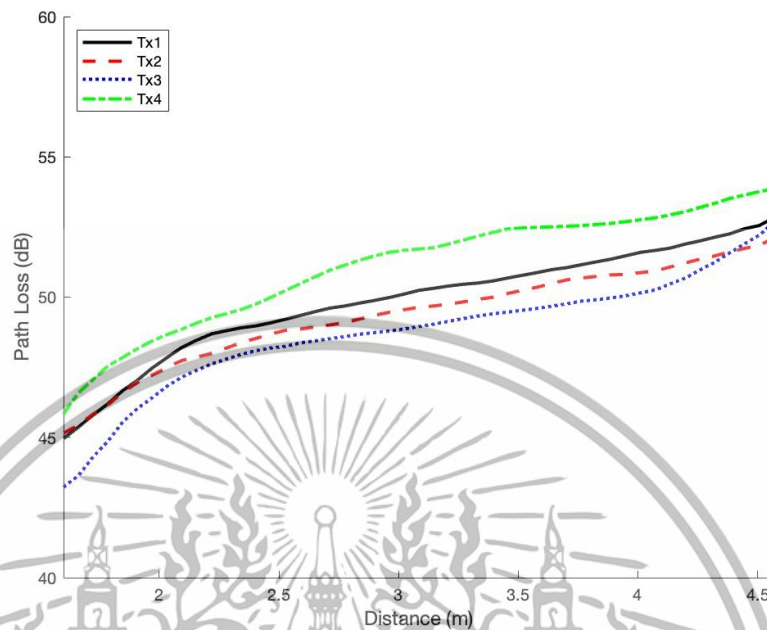
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์

จากรูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ พบว่า สายอากาศส่งที่ 1 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด เท่ากับ 47.50 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 40.36 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 2 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด เท่ากับ 47.18 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 40.93 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 3 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด เท่ากับ 48.19 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 39.21 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร และสายอากาศส่งที่ 4 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด เท่ากับ 48.52 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 40.17 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคเจเนติก

จากรูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคเจเนติกพบว่า สายอากาศส่งที่ 1 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 47.50 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 40.36 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 2 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 47.18 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 40.93 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร สายอากาศส่งที่ 3 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 48.19 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 39.21 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร และสายอากาศส่งที่ 4 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เท่ากับ 54.95 เดซิเบล ที่ระยะทาง 4.57 เมตร และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 46.60 เดซิเบล ที่ระยะทาง 1.6 เมตร

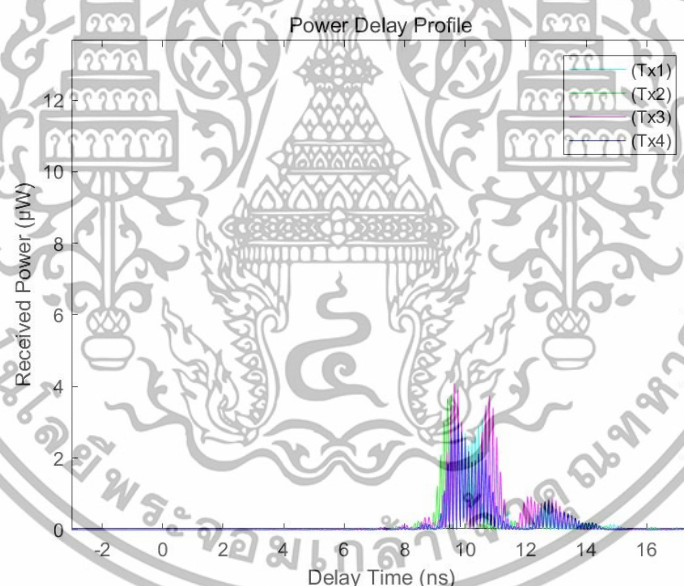
จากรูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 จึงสรุปได้ว่า การสูญเสียเชิงวิถีมีความเกี่ยวข้องกับระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับส่งผลให้ค่าสูญเสียเชิงวิถีมีการเพิ่มขึ้นและลดลง ผลกระทบอาจมาจากสภาพแวดล้อมของห้องทำการทดลองวัด หาดำแหน่งภายในอาคาร และจากรูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.14 การสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงวิถีของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ มีค่าสูญเสียเชิงวิถีที่ได้มีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.15 เนื่องจากกรณีผ่านเทคนิคเจเนติก นั้นสามารถลดการรบกวนของสัญญาณลงได้ส่งผลให้ระดับสัญญาณที่รับได้มีค่าขึ้น

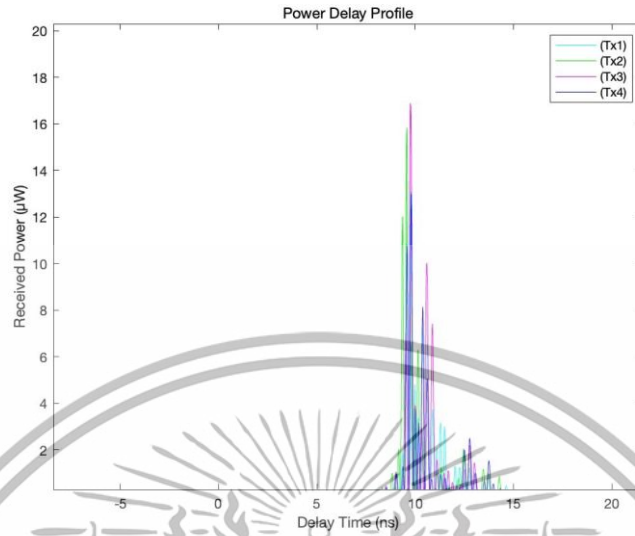
#### 4.6 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา

ภาพตัดขวางการประวิงเวลาจะแสดงในรูปแบบกราฟสองมิติ โดยที่แกน  $x$  คือ ค่าการประวิงเวลาในหน่วยนาโนวินาที แกน  $y$  คือ ระดับกำลังงานของสัญญาณในหน่วยไมโครวัตต์ โดยทำการเปรียบเทียบ การประวิงเวลาของสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีที่ไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เทคนิคการเกิดเวลาและเทคนิคเจเนติก ซึ่งกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านเทคนิคเจเนติก ทั้ง 3 กรณีนี้ จะทำการเปรียบเทียบเมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัดเดียวกัน คือ (2.18, 2.18) แสดงดังรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.19 ตามลำดับ

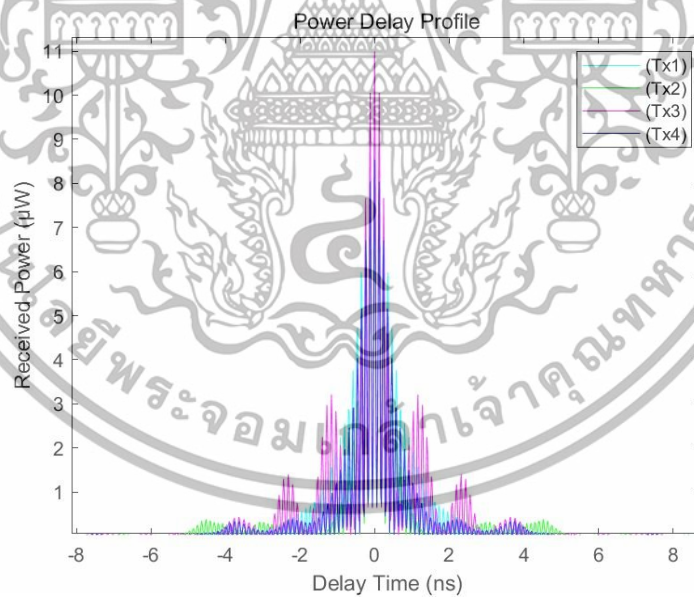


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เทคนิคการเกิดเวลา และเทคนิคเจเนติก เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (2.18, 2.18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

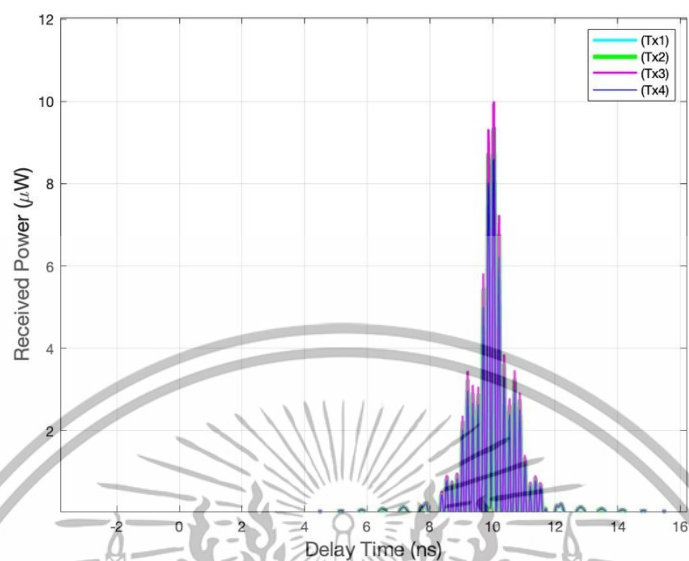


รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคการเกตเวลา  
เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (2.18, 2.18)



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์  
เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (2.18, 2.18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 ในกรณีผ่านเทคนิคเจเนติกเมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (2.18, 2.18)

จากรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบการประวิงเวลาระหว่างสายอากาศส่งทั้ง 4 เมื่อสายอากาศรับอยู่ที่พิกัด (2.18, 2.18) พบว่า กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เทคนิคการเกิดเวลาและเทคนิคเจเนติก สายอากาศส่งที่ 1 มีค่าการประวิงเวลาน้อยที่สุด ประมาณ 8.02 นาโนวินาทีและมีค่ากำลังงานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสายอากาศส่งอื่น เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ใกล้กับสายอากาศส่งที่ 1 มากที่สุด และสายอากาศส่งที่ 3 มีค่าการประวิงเวลามากที่สุด ประมาณ 11.52 นาโนวินาทีและมีค่ากำลังงานต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสายอากาศส่งอื่น ๆ เนื่องจากสายอากาศรับอยู่ไกลจากสายอากาศส่งที่ 3 มากที่สุด กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา ค่าการประวิงเวลามีค่าเท่าเดิมแต่ระดับกำลังงานของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ ค่าการประวิงเวลาของสายอากาศส่งทั้ง 4 จะมีค่าเป็น 0 ทั้งหมดและระดับกำลังงานของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น และสุดท้ายกรณีผ่านเทคนิคเจเนติก ค่าการประวิงเวลาของสายอากาศส่งทั้ง 4 จะมีค่าเป็น 10 ส่งผลให้ระดับกำลังงานของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทาง

ค่าความผิดพลาดทางระยะทางจะแสดงในรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม โดยทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา และเทคนิคการเจเนติก แสดงดังรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.24 ตามลำดับ

### 4.7.1 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร ด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา



รูปที่ 4.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา

จากรูปที่ 4.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา พบว่า มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางต่ำที่สุด เท่ากับ 0.14 เมตร มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางเฉลี่ย เท่ากับ 0.42 เมตร และมีค่าความผิดพลาดทางระยะทางสูงที่สุด เท่ากับ 0.87 เมตร

#### 4.7.2 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร ด้วยเทคนิคการเกตเวลา

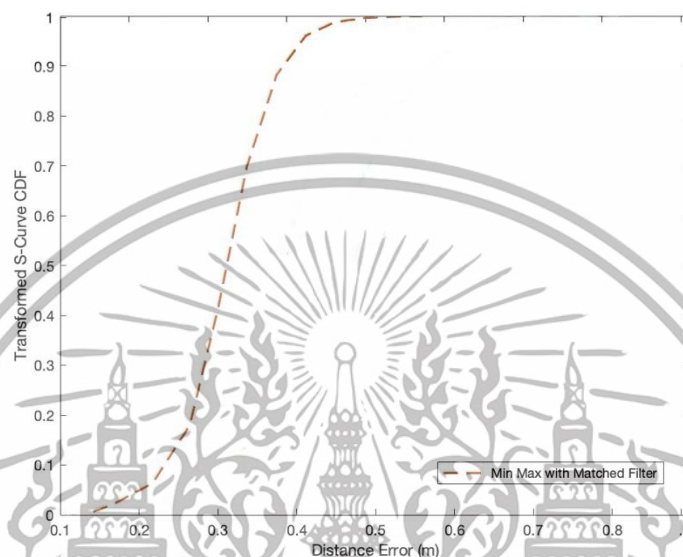


รูปที่ 4.21 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ผ่านเทคนิคการเกตเวลา

จากรูปที่ 4.21 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร ด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ผ่านเทคนิคการเกตเวลา พบว่า มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางต่ำที่สุด เท่ากับ 0.05 เมตร มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางเฉลี่ย เท่ากับ 0.39 เมตร และมีค่าความผิดพลาดทางระยะทางสูงที่สุด เท่ากับ 0.83 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

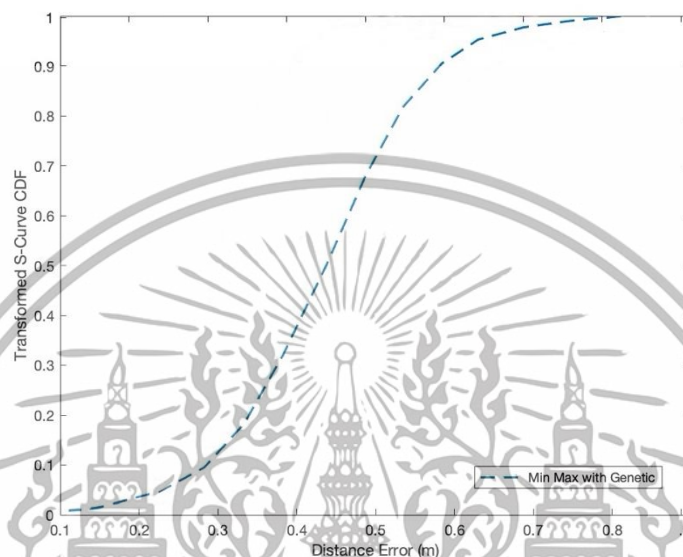
#### 4.7.3 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์



รูปที่ 4.22 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์

จากรูปที่ 4.22 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีที่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ พบว่า มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางต่ำที่สุด เท่ากับ 0.02 เมตร มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางเฉลี่ย เท่ากับ 0.39 เมตร และมีค่าความผิดพลาดทางระยะทางสูงที่สุด เท่ากับ 0.77 เมตร

#### 4.7.4 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร ด้วยเทคนิคเจเนติก

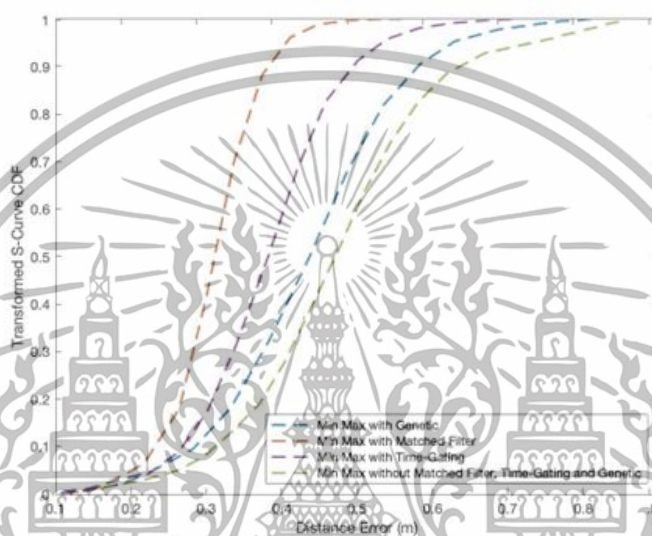


รูปที่ 4.23 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิคเจเนติก

จากรูปที่ 4.23 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max กรณีผ่านเทคนิคเจเนติก พบว่า มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางต่ำที่สุด เท่ากับ 0.02 เมตร มีค่าความผิดพลาดทางระยะทางเฉลี่ย เท่ากับ 0.40 เมตร และมีค่าความผิดพลาดทางระยะทางสูงที่สุด เท่ากับ 0.98 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.5 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านเทคนิคเจเนติก



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านเจเนติก

จากรูปที่ 4.24 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมค่าความผิดพลาดทางระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min Max ระหว่างกรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา และกรณีผ่านเทคนิคเจเนติก พบว่า ในกรณีที่ไม่มีวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลามีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.42 เมตร ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลามีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.39 เมตร ในกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.38 เมตร และในกรณีผ่านเทคนิคเจเนติกมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.40 เมตร

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคนิค Min-Max

การหาตำแหน่งภายในอาคารด้วย เทคนิค Min-Max	ค่าความผิดพลาดทางระยะทาง (เมตร)		
	ต่ำที่สุด	ค่าเฉลี่ย	มากที่สุด
กรณีที่ไม่ผ่านวงจรรองแบบ แมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา	0.14470	0.42237	0.86968
กรณีที่ผ่านมาเทคนิคการเกิดเวลา	0.05076	0.39378	0.83169
กรณีที่ผ่านมาวงจรรองแบบแมตซ์	0.01687	0.38760	0.77014
กรณีที่ผ่านมาเทคนิคเจเนติก	0.02256	0.39861	0.97857

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา และเทคนิคเจเนติก ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลาจะมีประสิทธิภาพการหาตำแหน่งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 6.76 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ จะมีประสิทธิภาพการหาตำแหน่งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 8.23 เปอร์เซ็นต์ และกรณีผ่านเทคนิคเจเนติกจะมีประสิทธิภาพการหาตำแหน่งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 5.63 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นกรณีส่งผลให้ค่าความผิดพลาดทางระยะทางมีค่าที่ดีที่สุด คือ กรณีผ่านวงจรรองแบบแมตซ์ กรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา กรณีผ่านเทคนิคเจเนติก และสุดท้ายในกรณีไม่ผ่านวงจรรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คือการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ย่านความร่วมมือด้วยแบบจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารแบบ Min-Max ด้วยเทคนิคการเกิดเวลาและเจเนติก โดยทำการศึกษาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งและพารามิเตอร์ในการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งย่านความร่วมมือ ศึกษาคุณสมบัติสายอากาศรวยคู่ และออกแบบจำลองการทดลองวัดหาตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งช่วงความถี่ที่ได้ทำการวัดอยู่ในช่วง 7.50 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 8.25 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้สายอากาศรวยคู่เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ บันทึกค่าความแรงของสัญญาณในลักษณะของขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ได้รับ การสูญเสียเชิงวิถี การประวิงเวลาของสัญญาณและทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทางระยะทาง

จากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีและการประวิงเวลาของสัญญาณจากสายอากาศส่งทั้ง 4 ของการหาตำแหน่งภายในอาคารทั้ง 4 กรณี ได้แก่ กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เทคนิคการเกิดเวลา และเทคนิคเจเนติก กรณีผ่านเทคนิคเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ และกรณีผ่านเจเนติก พบว่ากรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เทคนิคการเกิดเวลา และเทคนิคเจเนติกมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีมากที่สุด เมื่อเทียบกับกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลา และผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ช่วยลดทอนสัญญาณรบกวน

จากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทางระยะทางในรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมทั้ง 4 กรณี ได้แก่ กรณีไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เทคนิคการเกิดเวลา และเทคนิคเจเนติก กรณีผ่านเทคนิคเกิดเวลา กรณีผ่านวงจรกรองแบบ และกรณีผ่านเจเนติก พบว่าในกรณีที่ไม่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์และเทคนิคการเกิดเวลามีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทางเท่ากับ 0.42 เมตร ในกรณีผ่านเทคนิคการเกิดเวลามีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทางเท่ากับ 0.39 เมตร ในกรณีกรณีผ่านวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรองแบบแมตซ์มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.38 เมตร และในกรณีผ่านเทคนิค เจเนติกมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางระยะทาง เท่ากับ 0.40 เมตร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า กรณีผ่านวงจร กรองแบบแมตซ์มีประสิทธิภาพการหาตำแหน่งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 8.23 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกรณีไม่ ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ เทคนิคการเกิดเวลา และเทคนิคเจเนติก ซึ่งในในกรณีผ่านวงจรกรองแบบ แมตซ์นี้ ถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในเชิงทฤษฎี มีความแม่นยำที่สุดในสภาวะอุดมคติ แต่ในทาง ปฏิบัติ ยังมีข้อจำกัดสำคัญ คือ ต้องอาศัยการคำนวณที่ซับซ้อนและมีต้นทุนในการประมวลผลสูง อีกทั้ง วงจรกรองแบบแมตซ์ที่มีความแม่นยำสมบูรณ์นั้นไม่สามารถสร้างขึ้นได้จริง จึงจำเป็นต้องใช้วิธีอื่น ให้เหมาะสมกับข้อจำกัด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการทดลองใช้เทคโนโลยีแถบกว้างในย่านความถี่ร่วมเพื่อระบุตำแหน่งภายใน อาคาร พบว่าสภาพแวดล้อมของสถานที่ที่ใช้ในการวัดยังไม่ได้มาตรฐานเพียงพอที่จะให้ผลลัพธ์ที่ แม่นยำและเชื่อถือได้ การจัดการสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม รวมถึงการควบคุมปัจจัยการรบกวน ภายในอาคาร เช่น ความสูงของห้อง สิ่งกีดขวาง อุปกรณ์ที่ใช้ และสัญญาณรบกวนต่าง ๆ จะเป็น ปัจจัยสำคัญ ที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง อาจเพิ่มการทดลองในสถานการณ์ที่ แตกต่างกันไป เช่น อาคารที่มีโครงสร้างและวัสดุต่างกัน หรือพื้นที่ที่มีสัญญาณรบกวน เพื่อให้เข้าใจ ข้อจำกัดของเทคโนโลยีได้มากขึ้น

เพื่อพัฒนาการทดลองให้มีมาตรฐานสูงขึ้น จึงควรมีการจัดเตรียมสถานที่ทดลองวัดที่ เหมาะสม รวมถึงการนำเทคนิคต่าง ๆ เช่น การวัดแบบ Min-Max, การคำนวณเวลาเดินทางของ สัญญาณ (TOA), การใช้เจเนติก และวงจรกรองแบบแมตซ์มาใช้งาน นอกจากนี้ควรพิจารณาการใช้ ร่วมกับเทคนิคอื่นที่สามารถเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งได้ เช่น Trilateration และ อัลกอริทึมการถ่วงน้ำหนักแบบเซนทรอยด์ ในการปรับปรุงประสิทธิภาพและความแม่นยำของระบบ การระบุตำแหน่งภายในอาคาร เพื่อให้การทดลองมีมาตรฐานและคุณภาพที่สูงขึ้นและเพื่อเป็นข้อมูล อ้างอิงสำหรับการศึกษาวิจัยและพัฒนาในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] ทศพร น้อมระวี. “การประเมินผลของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [2] รุจิเรจ ชัยชนะ. “การจำลองสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งโดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.
- [3] จิรพัฒน์ แสงทอง “ศึกษาการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคเสมือนการสแกนลายนิ้วมือแบบแถบกว้างยิ่ง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [4] M. Di Benedetto and G. Giancola, “Understanding Ultra Wideband Radio Fundamentals,” New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [5] D. A. Gratton, “Developing Practical Wireless Applications,” Boston: Elsevier, 2006.
- [6] H. Nikookar and R. Prasad, “Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications,” Springer, 2009.
- [7] IEEE Standards Association, *IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. Report on the meeting: Update of UWB Radio Regulation in Japan. Yokohama: Yokohama National University, 2018.
- [8] กันตถณ โตรัตน์. “การออกแบบชิพพารามิเตอร์อัลกอริทึมแบบเซนทรอยด์สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2556.
- [9] ศักดิ์พัฒน์ คำเอียด, สกวรรณ ทุงคำ, นัจฉนท งามสกุลเดิม. “การศึกษาหาตำแหน่งด้วยสัญญาณวิทยุอิมพัลส์โดยใช้เทคนิคการเกิดเวลา.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาโทรคมนาคมและโครงข่าย คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2565.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] ประเมษฐ์ เนียรชาญ. “การศึกษาผลกระทบการกระจายของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งโดยใช้วิธีการ *Time Gating*.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2562.
- [11] กนกกร บุญประเสริฐ, กนกภรณ์ บุญประเสริฐ, ทิพรกานต์ ประวัติ. “การวัดหาตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่อ่านความถี่ต่ำด้วยแบบจำลอง *MIN-MAX* การเทคนิคการเกิดเวลา.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2565.
- [12] ชัยรัชช ดีปัญญา, “สายอากาศแถบกว้างยิ่งสำหรับระบบมีเดียกว้าง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมศาสตรโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [13] Sebastian Sadowski, Petros Spachos. “RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things”. in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30149-30161, 2018
- [14] Tanweer Alam, Shamimul Qamar, Amit Dixit, Mohamed Benaida. “*Genetic Algorithm: Reviews, Implementations and Applications*.” *International Journal of Engineering Pedagogy*, 2020.
- [15] สุรวัช อ่ำพันธ์. “การแทนที่ข้อมูลสูญหายด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม และการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเพื่อปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองทำนายข้อมูล.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2565.
- [16] S. K. Mitra and J. F. Kaiser, *Handbook for Digital Signal Processing*. New York : John Wiley. 1993.
- [17] วุฒิชัย ป้อมคำ และสนธิ เตยวณิช. “แบบแผนการตีเทคตำแหน่งของวิทยุแถบกว้างยิ่งสำหรับโครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลแบบไร้สาย.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [18] Keysight. (n.d.). Agilent N5230A PNA-L Microwave Network Analyzer Data Sheet. Retrieved from <https://www.axiomtest.com/documents/models/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] Times Microwave Systems. (2023). RG-142 Semi-Rigid Coaxial Cable Specifications. Retrieved from <https://www.timesmicrowave.com>.
- [20] Rosenkranz Elektronik. (2023). OSLNF50LF Open Short Load CalibraDdatasheet. Retrieved from <https://www.rosenkranzelektronik.com/userUpload/pdf/oslnf50f%20datasheet>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง						
RSS (dB) Tx1						
X(m)	Y(m)	Rx position	กรณีไม่ผ่านวงจรรอง แบบแมตซ์ เทคนิคเกิดเวลา และเจเนติก	กรณีผ่าน วงจรรอง แบบแมตซ์	กรณีผ่าน เทคนิค การเกิดเวลา	กรณีผ่าน เจเนติก
1.13	1.13	1	-50.21363	-40.3562	-45.57810	-44.193
1.13	1.48	2	-51.20348	-41.4116	-46.51530	-45.188
1.13	1.83	3	-52.24892	-42.6162	-47.55390	-47.5547
1.13	2.18	4	-53.41197	-43.8799	-48.65970	-47.817
1.13	2.53	5	-54.27454	-44.6747	-49.59840	-48.689
1.13	2.88	6	-55.41755	-45.8146	-50.69270	-49.407
1.13	3.23	7	-56.59734	-46.5797	-51.85420	-50.809
1.48	1.13	8	-50.41919	-40.8855	-45.91700	-45.652
1.48	1.48	9	-52.27055	-42.633	-47.59130	-47.5856
1.48	1.83	10	-52.95343	-43.5531	-48.33450	-48.3398
1.48	2.18	11	-53.70682	-44.394	-49.09920	-47.692
1.48	2.53	12	-54.84245	-45.33	-50.14740	-48.822
1.48	2.88	13	-55.74286	-46.0421	-51.02960	-49.7379
1.48	3.23	14	-56.58387	-47.2779	-51.85330	-50.5661
1.83	1.13	15	-53.49265	-43.6726	-48.74790	-47.465
1.83	1.48	16	-53.56587	-43.5201	-48.82740	-47.5506
1.83	1.83	17	-53.75687	-44.062	-49.04520	-47.7363
1.83	2.18	18	-54.06017	-44.2407	-49.36870	-49.3728
1.83	2.53	19	-54.77165	-44.6663	-50.11010	-49.274
1.83	2.88	20	-55.66086	-45.5489	-50.90880	-50.006
1.83	3.23	21	-56.26040	-46.2077	-51.52050	-51.5205
2.18	1.13	22	-54.41076	-44.5895	-49.57230	-48.925
2.18	1.48	23	-54.42469	-44.5744	-49.70110	-48.4107
2.18	1.83	24	-54.65745	-44.4047	-49.90110	-48.6369
2.18	2.18	25	-54.82026	-44.8121	-50.06570	-49.104
2.18	2.53	26	-55.13584	-45.2422	-50.45540	-50.4547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง						
RSS (dB) Tx1						
X(m)	Y(m)	Rx position	กรณีไม่ผ่านวงจรกรอง แบบแมตซ์ เทคนิคเกิดเวลา และเจเนติก	กรณีผ่าน วงจรกรอง แบบแมตซ์	กรณีผ่าน เทคนิค การเกิดเวลา	กรณีผ่าน เจเนติก
2.18	2.88	27	-55.70102	-45.4277	-51.00970	-51.0097
2.18	3.23	28	-56.46276	-46.0763	-51.71070	-50.4435
2.53	1.13	29	-55.80689	-45.2997	-50.99340	-49.7974
2.53	1.48	30	-55.38907	-45.1838	-50.64710	-50.6607
2.53	1.83	31	-55.21102	-45.0011	-50.50470	-50.5047
2.53	2.18	32	-55.24096	-44.9866	-50.56160	-50.5518
2.53	2.53	33	-55.54038	-45.393	-50.80850	-50.8034
2.53	2.88	34	-55.74498	-45.9078	-51.09840	-49.953
2.53	3.23	35	-56.16041	-46.3152	-51.51790	-50.1429
2.88	1.13	36	-56.78940	-46.1653	-51.97550	-50.7792
2.88	1.48	37	-56.49500	-46.1262	-51.74440	-50.774
2.88	1.83	38	-56.25710	-45.9628	-51.52930	-50.2364
2.88	2.18	39	-56.12201	-45.9109	-51.43430	-50.431
2.88	2.53	40	-56.36275	-45.9462	-51.63650	-51.6542
2.88	2.88	41	-56.60668	-46.464	-51.92300	-51.923
2.88	3.23	42	-56.92782	-46.8269	-52.24120	-52.2412
3.23	1.13	43	-57.39452	-47.4972	-52.72140	-51.731
3.23	1.48	44	-57.53255	-46.8219	-52.69810	-51.5064
3.23	1.83	45	-57.12153	-46.5407	-52.37930	-51.3019
3.23	2.18	46	-56.88098	-46.3356	-52.21410	-51.133
3.23	2.53	47	-56.91564	-46.464	-52.28490	-52.2795
3.23	2.88	48	-57.10188	-46.7863	-52.44020	-52.4576
3.23	3.23	49	-57.94823	-46.9942	-53.11510	-52.8307

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง						
RSS (dB) Tx2						
X(m)	Y(m)	Rx position	กรณีไม่ผ่านวงจรรอง แบบแมตซ์ เทคนิคเกตเวลา และเจเนติก	กรณีผ่าน วงจรรอง แบบแมตซ์	กรณีผ่าน เทคนิค การเกตเวลา	กรณีผ่าน เจเนติก
1.13	1.13	1	-56.65245	-47.1843	-52.08790	-50.8677
1.13	1.48	2	-56.33577	-46.6451	-51.76150	-50.764
1.13	1.83	3	-56.05846	-46.2076	-51.50510	-50.531
1.13	2.18	4	-55.77345	-46.2297	-51.24600	-51.246
1.13	2.53	5	-56.09418	-46.106	-51.54580	-50.081
1.13	2.88	6	-56.33727	-47.0382	-51.77910	-51.7791
1.13	3.23	7	-56.89753	-46.8999	-52.18960	-52.1041
1.48	1.13	8	-55.65783	-45.6169	-51.06570	-49.675
1.48	1.48	9	-55.48935	-46.1673	-50.86810	-49.455
1.48	1.83	10	-55.35034	-45.9008	-50.77240	-50.7858
1.48	2.18	11	-55.70312	-45.9036	-51.08080	-49.969
1.48	2.53	12	-55.48198	-46.0451	-50.94720	-50.949
1.48	2.88	13	-55.59437	-45.9612	-51.06970	-51.0587
1.48	3.23	14	-56.16023	-46.6441	-51.56240	-51.5437
1.83	1.13	15	-54.41700	-44.9158	-49.84650	-48.3962
1.83	1.48	16	-54.16960	-45.2521	-49.62690	-48.796
1.83	1.83	17	-54.09961	-45.396	-49.61150	-48.7064
1.83	2.18	18	-54.58620	-45.8181	-50.03090	-48.9542
1.83	2.53	19	-55.23560	-46.1605	-50.57770	-50.5605
1.83	2.88	20	-55.65255	-46.4698	-51.09210	-51.0942
1.83	3.23	21	-56.26555	-46.8512	-51.66880	-51.6694
2.18	1.13	22	-53.50870	-43.9782	-48.81650	-48.8099
2.18	1.48	23	-53.34935	-44.287	-48.72310	-47.7762
2.18	1.83	24	-53.43710	-44.5602	-48.88050	-47.4128
2.18	2.18	25	-54.00161	-45.0895	-49.42290	-49.4281
2.18	2.53	26	-54.63442	-45.8448	-50.07740	-49.4179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง						
RSS (dB) Tx2						
X(m)	Y(m)	Rx position	กรณีไม่ผ่านวงจรรอง แบบแมตซ์ เทคนิคเกิดเวลา และเจเนติก	กรณีผ่าน วงจรรอง แบบแมตซ์	กรณีผ่าน เทคนิค การเกิดเวลา	กรณีผ่าน เจเนติก
2.18	2.88	27	-55.38096	-45.8956	-50.79110	-50.8121
2.18	3.23	28	-56.16310	-46.7031	-51.54110	-50.4256
2.53	1.13	29	-52.23175	-43.2684	-47.49980	-46.5545
2.53	1.48	30	-52.47660	-43.4809	-47.77270	-46.446
2.53	1.83	31	-52.88108	-44.1197	-48.29620	-48.2788
2.53	2.18	32	-53.98222	-45.3149	-49.45840	-49.4892
2.53	2.53	33	-54.62672	-45.8608	-50.01860	-50.0215
2.53	2.88	34	-55.48643	-46.3726	-50.86510	-50.8642
2.53	3.23	35	-56.55156	-47.0671	-51.83380	-50.5306
2.88	1.13	36	-51.16486	-41.9394	-46.44940	-45.1313
2.88	1.48	37	-51.89949	-42.1124	-47.09530	-46.0969
2.88	1.83	38	-52.74464	-43.1521	-48.04150	-46.7322
2.88	2.18	39	-53.63261	-44.1241	-49.03230	-47.612
2.88	2.53	40	-54.77126	-45.8949	-50.16110	-49.5247
2.88	2.88	41	-55.64889	-46.6664	-50.94060	-50.0292
2.88	3.23	42	-56.46911	-47.0952	-51.79930	-50.6348
3.23	1.13	43	-49.96626	-40.9343	-45.23810	-43.9455
3.23	1.48	44	-51.17846	-42.1343	-46.45350	-45.1552
3.23	1.83	45	-52.42908	-42.926	-47.68970	-46.5275
3.23	2.18	46	-54.12716	-44.8874	-49.43040	-48.1079
3.23	2.53	47	-54.95176	-45.7498	-50.32610	-48.9313
3.23	2.88	48	-55.32096	-45.774	-50.77980	-49.3014
3.23	3.23	49	-56.52533	-46.5298	-51.76340	-50.2998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง						
RSS (dB) Tx3						
X(m)	Y(m)	Rx position	กรณีไม่ผ่านวงจรรอง แบบแมตซ์ เทคนิคเกตเวลา และเจเนติก	กรณีผ่าน วงจรรอง แบบแมตซ์	กรณีผ่าน เทคนิค การเกตเวลา	กรณีผ่าน เจเนติก
1.13	1.13	1	-50.63180	-48.1864	-53.32920	-52.499
1.13	1.48	2	-50.31512	-47.9744	-52.93730	-52.155
1.13	1.83	3	-50.03777	-48.0249	-52.68640	-51.874
1.13	2.18	4	-49.75268	-47.228	-52.47810	-51.721
1.13	2.53	5	-50.07358	-47.382	-52.44600	-51.051
1.13	2.88	6	-50.31662	-44.4835	-49.24230	-48.768
1.13	3.23	7	-50.87688	-44.9157	-49.53210	-50.809
1.48	1.13	8	-49.63731	-43.8385	-49.05050	-48.679
1.48	1.48	9	-49.46883	-43.4258	-48.66660	-48.6666
1.48	1.83	10	-49.32966	-43.3513	-48.44530	-48.02
1.48	2.18	11	-49.68268	-43.4256	-48.27520	-48.2752
1.48	2.53	12	-49.46154	-43.809	-48.27940	-47.801
1.48	2.88	13	-49.57385	-43.9896	-48.33320	-46.5829
1.48	3.23	14	-50.13968	-43.8334	-48.51690	-48.0194
1.83	1.13	15	-48.39622	-43.6721	-48.69270	-48.336
1.83	1.48	16	-48.14911	-45.3253	-50.66360	-50.6762
1.83	1.83	17	-48.07907	-44.8143	-50.08950	-50.0895
1.83	2.18	18	-48.56548	-44.3834	-49.88730	-49.8873
1.83	2.53	19	-49.21507	-44.3799	-49.99680	-48.6151
1.83	2.88	20	-49.63172	-44.8176	-50.29860	-50.2873
1.83	3.23	21	-50.24495	-45.1526	-50.44970	-49.1891
2.18	1.13	22	-47.48800	-43.6881	-48.65090	-48.6541
2.18	1.48	23	-47.32875	-43.1163	-48.12640	-46.56
2.18	1.83	24	-47.41650	-42.5822	-47.60160	-47.6198
2.18	2.18	25	-47.98111	-41.9236	-47.04550	-47.0466
2.18	2.53	26	-48.61382	-41.3594	-46.54450	-49.4179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง						
RSS (dB) Tx3						
X(m)	Y(m)	Rx position	กรณีไม่ผ่านวงจรรอง แบบแมตซ์ เทคนิคเกิดเวลา และเจเนติก	กรณีผ่าน วงจรรอง แบบแมตซ์	กรณีผ่าน เทคนิค การเกิดเวลา	กรณีผ่าน เจเนติก
2.18	2.88	27	-49.36029	-40.4811	-46.13840	-49.9782
2.18	3.23	28	-50.14255	-40.5673	-46.17790	-46.1842
2.53	1.13	29	-46.21112	-43.6584	-48.58960	-47.0695
2.53	1.48	30	-46.45603	-43.0634	-47.78330	-49.7553
2.53	1.83	31	-46.86048	-42.127	-47.00210	-49.4996
2.53	2.18	32	-47.96179	-41.27	-46.30060	-46.3072
2.53	2.53	33	-48.60625	-40.6871	-45.70570	-49.7456
2.53	2.88	34	-49.46576	-39.7326	-45.22590	-43.5569
2.53	3.23	35	-50.53096	-39.2119	-45.58770	-44.9255
2.88	1.13	36	-45.14421	-43.548	-48.65550	-48.266
2.88	1.48	37	-45.87892	-45.5273	-51.24730	-49.9994
2.88	1.83	38	-46.72396	-44.6249	-50.42000	-50.42
2.88	2.18	39	-47.61201	-43.7554	-49.43010	-48.2083
2.88	2.53	40	-48.75072	-42.6816	-48.46720	-47.6531
2.88	2.88	41	-49.62813	-41.6571	-47.59180	-46.313
2.88	3.23	42	-50.44846	-41.2252	-46.89890	-46.0078
3.23	1.13	43	-43.94555	-46.2602	-51.85320	-50.6952
3.23	1.48	44	-45.15786	-45.3196	-50.84400	-49.4951
3.23	1.83	45	-46.40848	-44.5159	-49.90160	-49.9064
3.23	2.18	46	-48.10650	-43.4844	-48.96600	-47.6753
3.23	2.53	47	-48.93129	-42.535	-47.83880	-46.8805
3.23	2.88	48	-49.30036	-41.505	-46.66660	-45.389
3.23	3.23	49	-50.50469	-40.4758	-44.92400	-44.3051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง						
RSS (dB) Tx4						
X(m)	Y(m)	Rx position	กรณีไม่ผ่านวงจรรอง แบบแมตซ์ เทคนิคเกิดเวลา และเจเนติก	กรณีผ่าน วงจรรอง แบบแมตซ์	กรณีผ่าน เทคนิค การเกิดเวลา	กรณีผ่าน เจเนติก
1.13	1.13	1	-57.66065	-53.6745	-53.32920	-52.9272
1.13	1.48	2	-56.48339	-53.1416	-52.93730	-51.7957
1.13	1.83	3	-55.51433	-52.0676	-52.68640	-49.4939
1.13	2.18	4	-54.23601	-50.9387	-52.47810	-49.5031
1.13	2.53	5	-53.03941	-49.6411	-52.44600	-47.0189
1.13	2.88	6	-51.84449	-47.9353	-49.24230	-47.0146
1.13	3.23	7	-50.56639	-46.5986	-49.53210	-44.908
1.48	1.13	8	-57.25150	-53.0923	-49.05050	-57.259
1.48	1.48	9	-56.43534	-52.8351	-48.66660	-50.705
1.48	1.83	10	-55.24343	-51.6487	-48.44530	-49.2227
1.48	2.18	11	-54.22876	-50.6602	-48.27520	-48.713
1.48	2.53	12	-53.33417	-49.4841	-48.27940	-47.717
1.48	2.88	13	-52.33877	-47.9794	-48.33320	-46.665
1.48	3.23	14	-51.64119	-47.2835	-48.51690	-46.13
1.83	1.13	15	-57.21246	-53.1892	-48.69270	-57.209
1.83	1.48	16	-56.40032	-52.5888	-50.66360	-50.3797
1.83	1.83	17	-55.27170	-51.8274	-50.08950	-49.7758
1.83	2.18	18	-54.56205	-50.6373	-49.88730	-49.8453
1.83	2.53	19	-53.66754	-50.0268	-49.99680	-48.9779
1.83	2.88	20	-53.17566	-48.6123	-50.29860	-48.4065
1.83	3.23	21	-52.72451	-47.8797	-50.44970	-46.9927
2.18	1.13	22	-57.08209	-53.0759	-48.65090	-51.439
2.18	1.48	23	-56.41095	-52.3612	-48.12640	-51.7013
2.18	1.83	24	-55.65735	-51.9582	-47.60160	-51.0509
2.18	2.18	25	-54.84577	-50.9562	-47.04550	-49.4043
2.18	2.53	26	-57.66065	-50.3464	-46.54450	-49.6775

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการทดลอง						
RSS (dB) Tx4						
X(m)	Y(m)	Rx position	กรณีไม่ผ่านวงจรกรอง แบบแมตซ์ เทคนิคเกิดเวลา และเจเนติก	กรณีผ่าน วงจรกรอง แบบแมตซ์	กรณีผ่าน เทคนิค การเกิดเวลา	กรณีผ่าน เจเนติก
2.18	2.88	27	-54.39161	-49.5302	-52.92690	-49.1888
2.18	3.23	28	-53.84344	-49.1061	-51.79570	-47.8579
2.53	1.13	29	-53.87842	-53.7169	-50.77170	-52.2813
2.53	1.48	30	-56.80415	-53.8276	-49.50310	-51.9681
2.53	1.83	31	-56.89902	-52.6474	-48.24800	-51.8757
2.53	2.18	32	-56.41780	-52.0457	-47.01460	-51.384
2.53	2.53	33	-55.98755	-51.5232	-45.83290	-50.3924
2.53	2.88	34	-55.40985	-50.9948	-52.55170	-49.2252
2.53	3.23	35	-55.24561	-51.0326	-51.69000	-50.1998
2.88	1.13	36	-55.30826	-54.4892	-50.56230	-52.8545
2.88	1.48	37	-57.67131	-53.7091	-49.55380	-52.8377
2.88	1.83	38	-57.27578	-52.7033	-48.59410	-52.3411
2.88	2.18	39	-56.81248	-52.2296	-47.58170	-51.5524
2.88	2.53	40	-56.45450	-51.9113	-46.90430	-51.3498
2.88	2.88	41	-56.26297	-51.8763	-52.52490	-51.5794
2.88	3.23	42	-56.11810	-52.143	-51.74980	-51.2977
3.23	1.13	43	-56.40108	-54.9452	-50.64040	-53.6158
3.23	1.48	44	-57.99423	-54.2446	-49.84530	-53.2346
3.23	1.83	45	-57.71600	-53.2661	-48.97790	-51.4705
3.23	2.18	46	-57.49117	-52.3818	-48.40490	-52.5797
3.23	2.53	47	-57.09587	-52.2237	-47.99030	-51.1693
3.23	2.88	48	-57.18989	-52.477	-52.41950	-51.1851
3.23	3.23	49	-57.20561	-52.7646	-51.69730	-52.7363

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพิกัดของการหาตำแหน่งโดย Min-Max										
Rx position	พิกัดจริง		ไม่ผ่านเทคนิค		วงจรรองแบบ แมตซ์		การเกิดเวลา		เจเนติก	
	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)
1	1.13	1.13	0.83	0.88	0.78	0.86	0.82	0.98	0.58	0.85
2	1.13	1.48	1.05	1.30	1.09	1.13	1.05	1.35	0.87	1.25
3	1.13	1.83	1.27	1.65	1.41	1.55	1.25	1.69	1.45	1.80
4	1.13	2.18	1.54	2.08	1.64	2.01	1.54	2.12	1.84	2.17
5	1.13	2.53	1.35	2.44	1.63	2.41	1.32	2.51	1.71	2.42
6	1.13	2.88	1.52	2.84	1.37	2.94	1.48	2.85	1.38	2.72
7	1.13	3.23	1.29	3.29	1.09	3.32	1.26	3.35	1.14	3.09
8	1.48	1.13	1.41	1.41	1.35	1.35	1.41	1.41	1.44	1.44
9	1.48	1.48	1.76	1.76	1.71	1.71	1.74	1.74	1.64	1.64
10	1.48	1.83	1.93	1.93	1.89	1.89	1.91	1.91	1.80	1.92
11	1.48	2.18	2.11	2.14	2.05	2.17	2.09	2.16	1.94	2.33
12	1.48	2.53	2.00	2.51	1.77	2.59	1.96	2.53	1.93	2.39
13	1.48	2.88	1.84	2.86	1.51	2.92	1.52	2.91	1.76	2.70
14	1.48	3.23	1.71	3.16	1.47	3.21	1.38	3.22	1.61	2.96
15	1.83	1.13	1.92	1.92	1.96	1.84	1.97	1.83	2.07	1.80
16	1.83	1.48	1.98	1.67	1.84	1.60	1.84	1.70	2.12	1.56
17	1.83	1.83	2.03	1.95	1.91	1.88	1.90	1.80	2.16	2.02
18	1.83	2.18	1.97	2.14	1.84	2.14	1.94	2.16	1.83	2.28
19	1.83	2.53	1.69	2.44	1.70	2.34	1.69	2.50	1.79	2.40
20	1.83	2.88	1.50	2.72	1.37	2.77	1.47	2.72	1.67	2.64
21	1.83	3.23	1.25	2.93	1.16	3.06	1.25	3.00	1.54	3.02
22	2.18	1.13	2.27	1.99	2.36	1.85	2.29	1.72	2.24	1.89
23	2.18	1.48	2.31	2.11	2.29	2.05	2.28	2.14	2.27	2.03
24	2.18	1.83	2.42	2.26	2.24	2.23	2.44	2.30	2.29	2.21
25	2.18	2.18	2.51	2.50	2.43	2.47	2.50	2.53	2.38	2.48
26	2.18	2.53	2.53	2.75	2.43	2.68	2.31	2.57	2.39	2.78
27	2.18	2.88	2.53	2.97	2.44	2.87	2.32	2.53	2.54	3.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพิกัดของการหาตำแหน่งโดย Min-Max										
Rx position	พิกัดจริง		ไม่ผ่านเทคนิค		วงจรรองแบบแมตซ์		การเกิดเวลา		เจเนติก	
	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)
28	2.18	3.23	2.52	3.14	2.36	3.04	2.06	2.89	2.51	3.23
29	2.53	1.13	2.81	1.77	2.68	1.71	2.85	1.81	2.77	1.63
30	2.53	1.48	2.67	2.03	2.61	1.90	2.67	2.06	2.63	1.92
31	2.53	1.83	2.66	2.28	2.48	2.22	2.67	2.32	2.59	2.22
32	2.53	2.18	2.81	2.64	2.63	2.63	2.81	2.68	2.83	2.65
33	2.53	2.53	2.87	2.88	2.76	2.83	2.88	2.90	2.85	2.92
34	2.53	2.88	2.91	3.10	2.79	3.11	2.90	3.12	2.90	3.25
35	2.53	3.23	2.81	3.09	2.87	3.30	3.35	3.35	2.93	3.39
36	2.88	1.13	3.23	1.60	3.14	1.52	3.19	1.64	3.14	1.43
37	2.88	1.48	3.04	1.23	3.10	1.04	3.04	1.22	2.97	1.13
38	2.88	1.83	2.84	1.49	2.88	1.46	2.83	1.50	2.75	1.42
39	2.88	2.18	2.61	1.75	2.60	1.86	2.66	1.83	2.56	1.73
40	2.88	2.53	2.36	2.23	2.47	2.55	2.71	2.36	2.40	2.32
41	2.88	2.88	2.58	2.71	2.66	2.98	2.66	2.77	2.61	2.82
42	2.88	3.23	2.79	3.04	2.80	3.17	3.19	3.16	2.81	2.88
43	3.23	1.13	3.56	0.76	3.72	0.54	3.45	0.78	3.15	0.96
44	3.23	1.48	3.36	1.00	3.32	1.04	3.33	1.03	3.31	0.89
45	3.23	1.83	3.10	1.32	3.07	1.42	3.07	1.43	3.00	1.19
46	3.23	2.18	2.67	1.95	2.46	2.10	2.66	1.73	2.61	1.94
47	3.23	2.53	2.79	2.47	2.57	2.54	2.81	2.56	2.70	2.55
48	3.23	2.88	3.05	2.82	2.82	2.75	2.84	2.71	2.97	2.98
49	3.23	3.23	3.48	3.54	3.05	3.14	3.30	3.38	3.22	3.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพแสดงการทำการทดลองวัดหาตำแหน่งความถี่ร่วมแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับสภาวะ  
แวดล้อมภายในอาคาร



รูปที่ ค1. การตั้งค่าการทดลองสำหรับการวัด



รูปที่ ค2. ภาพแสดงการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค3. ภาพแสดงการเก็บค่าสัญญาณจากเครื่อง VNA



รูปที่ ค4. ภาพแสดงการเก็บค่าสัญญาณจากเครื่อง VNA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้