

การศึกษาทดลองของการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์  
บนพื้นฐาน IEEE 802.15.4j  
EXPERIMENTAL STUDY OF WIRELESS BODY AREA NETWORKS  
LOCALIZATION BASE ON IEEE 802.15.4j



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาทดลองของการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

บนพื้นฐาน IEEE 802.15.4j

EXPERIMENTAL STUDY OF WIRELESS BODY AREA NETWORKS

LOCALIZATION BASE ON IEEE 802.15.4j



โดย

นางสาวชนม์นิภา หงษ์ยนต์ 61010190

นางสาวฐาณิญา สีสรรพ์ 61010266

นางสาวณัฐนิชา พงศ์พิทยาร 61010325

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2564

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาทดลองของการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์บนพื้นฐาน IEEE 802.15.4j

EXPERIMENTAL STUDY OF WIRELESS BODY AREA NETWORKS LOCALIZATION  
BASE ON IEEE 802.15.4j

ผู้จัดทำ

1. นางสาวชนมณีภา หงษ์ยนต์ 61010190
2. นางสาวฐาณิญา สีสรรพ์ 61010266
3. นางสาวณัฐนิชา พงศ์พิทยาธร 61010325



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ช่วยกรุณาให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา อนุญาตให้ใช้งานอุปกรณ์ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำงานรวมถึงประสบการณ์ที่ดี และฝึกฝนให้มีความสามารถในการทำโครงการ

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาเอก ในห้องปฏิบัติการของ ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ตลอดจนพี่ทุกท่านซึ่งได้ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือต่าง ๆ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการของ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้สถานที่เอื้อเอื้อสำหรับการใช้อุปกรณ์ และเครื่องวัดในการทำทดลองจนกระทั่งโครงการสำเร็จไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณบิดา และมารดาที่ให้การสนับสนุนในการทำโครงการฉบับนี้คอยให้กำลังใจและการสนับสนุนด้านงบประมาณในการทำงาน รวมถึงความห่วงใย ความเข้าใจและแรงบันดาลใจที่ช่วยผลักดันให้เราทำงานได้เป็นอย่างดี และขอขอบคุณคณาจารย์ในภาควิชาทุกท่านด้านการศึกษาและให้กำลังใจด้วยดี

นางสาวชนมณีภา

หงษ์ยนต์

นางสาวฐานิญา

สี้อสรร์พ์

นางสาวณัฐธิษา

พงศ์พิทยาร

ผู้จัดทำ

การศึกษาทดลองของการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบน  
ร่างกายมนุษย์บนพื้นฐาน IEEE 802.15.4j  
EXPERIMENTAL STUDY OF WIRELESS BODY AREA  
NETWORKS LOCALIZATION BASE ON IEEE 802.15.4j

โดย	นางสาวชนมณีภา หงษ์ยนต์	61010190
	นางสาวฐานิญา สือสรรพ์	61010266
	นางสาวณัฐนิชา พงศ์พิทยธร	61010325

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

การสื่อสารไร้สายระยะสั้นมีบทบาทและความสำคัญอย่างมากสำหรับการประยุกต์ใช้ระบบการเฝ้าสังเกตการณ์ทางการแพทย์ผ่านโครงข่ายไร้สาย และการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ดังนั้นจำเป็นต้องทราบคุณลักษณะของช่องสัญญาณ และผลกระทบของร่างกายมนุษย์ ปริมาณงานนี้ได้ศึกษาการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ และใช้เทคโนโลยีจิกบีนมาตรฐาน IEEE 802.15.4j โดยออกแบบและสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริป ออกแบบจำลองการวัดโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ และใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ช่วงความถี่ 2.2 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.6 จิกะเฮิรตซ์ สำหรับการวัดและบันทึกผล นำผลที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยพิจารณาความแรงของสัญญาณที่รับได้ และความผิดพลาดของระยะทางแสดงในรูปแบบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมด้วยอัลกอริทึมแบบคลีน จากการศึกษาทดลองของปริมาณงานนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาพัฒนา และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาวิจัยการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

## ABSTRACT

Short-range wireless communication is very important for application use in wireless medical monitoring systems and wireless body area networks localizations. Therefore, we have to study the characteristics of the channel and the human body effect. This project will study the wireless body area network localization and ZigBee technology based on the IEEE 802.15.4j. We design and fabricate a microstrip patch antenna. After that, we model wireless body area network measurement by using a vector network analyzer at the frequency range of 2.2 GHz to 2.6 GHz for measurement and recording. In the experiment result, we have to analyze and evaluate the wireless body area network localization by considering the received signal strength and distance error shown in the cumulative distribution function based on the CLEAN algorithm. From experimental studies this project is very useful for development studies and basic information for future research studies of wireless body area network localization applications.

## สารบัญ

	หน้า
กิติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XIII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของปริญญาโท	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.5 สรุป	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>7</b>
2.1 โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	7
2.1.1 ประวัติความเป็นมาโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	7
2.1.2 มาตรฐาน IEEE 802.15.4j	8
2.1.3 ข้อกำหนดของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	11
2.1.4 ข้อพิจารณาของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	13
2.2 เทคนิคการหาตำแหน่ง	14
2.2.1 เทคนิคพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ	15
2.2.2 เทคนิคพิจารณาทิศทางการมาถึงของสัญญาณ	15
2.2.3 เทคนิคพิจารณาเวลาการมาถึงของสัญญาณ	16
2.2.4 เทคนิควัดค่าความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ	16
2.2.5 เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ	17
2.3 อัลกอริทึมแบบคลื่น	20
2.4 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์การทดสอบสายอากาศกับร่างกายมนุษย์	23
2.4.1 การสูญเสียเชิงวิถี	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน	23
2.4.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	24
2.4.5 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม	25
2.5 สรุป	25
<b>บทที่ 3 การออกแบบและขั้นตอนการทดสอบ</b>	<b>27</b>
3.1 สายอากาศแผ่นไมโครสตริป	27
3.1.1 ประเภทของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	27
3.1.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	27
3.1.3 ส่วนประกอบของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	28
3.2 คุณสมบัติของสายอากาศ	29
3.2.1 อินพุตอิมพีแดนซ์	29
3.2.2 การสูญเสียย้อนกลับ	29
3.2.3 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของแรงดัน	30
3.2.4 อัตราขยายกำลัง	30
3.2.5 แบบรูปการแผ่กำลังงาน	31
3.2.6 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ	35
3.3 การออกแบบและการสร้างสายอากาศ	36
3.3.1 การออกแบบและสร้างสายอากาศ	36
3.3.2 เหตุผลที่เลือกใช้สายอากาศแผ่นไมโครสตริป	37
3.3.3 การออกแบบสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	37
3.3.4 จำลองการออกแบบสายอากาศแผ่นไมโครสตริปด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	40
3.3.5 การสร้างสายอากาศ	45
3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	48
3.4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์	48
3.4.2 สายนำสัญญาณเซมิริจิด	49
3.4.3 อุปกรณ์ปรับเทียบ	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การทดสอบและจัดเก็บผล	50
3.5.1 การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	50
3.5.2 การทดสอบช่องสัญญาณการส่งผ่านสำหรับการหาตำแหน่งโครงข่าย ไร้สายบนร่างกายมนุษย์	57
3.6 สรุป	64
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบ</b>	<b>65</b>
4.1 การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	65
4.1.1 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	65
4.1.2 ผลการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	66
4.1.3 ผลการทดสอบอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	67
4.1.4 ผลการทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	68
4.1.5 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	69
4.1.6 ผลการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ	70
4.2 ผลการทดสอบช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์	71
4.2.1 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ	71
4.2.2 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ	73
4.2.3 ภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงาน	75
4.2.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	77
4.3 ผลการทดสอบช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์เมื่อผ่าน อัลกอริทึมแบบคลื่น	78
4.3.1 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น	78
4.3.2 ภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงานเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น	80
4.3.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น	82
4.4 ผลการทดสอบการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยใช้เทคนิค การสแกนลายนิ้วมือ	84
4.5 สรุป	88

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ</b>	<b>89</b>
5.1 สรุปผลการทดสอบ	89
5.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	89
5.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบน ร่างกายมนุษย์	90
5.1.3 การวิเคราะห์ผลการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ด้วยเทคนิคสแกนลายนิ้วมือ	91
5.2 ข้อเสนอแนะ	91
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>93</b>
<b>ภาคผนวก ก ผลการทดสอบค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้</b>	<b>98</b>
<b>ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการสูญเสียเชิงวิถี</b>	<b>103</b>

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แบบจำลองการติดตั้งเครื่องมือสำหรับการทดลองวัดการศึกษาและประเมินผล การทดลองวัดของรูปคลื่นส่งผ่านแถบกว้างยิ่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	2
1.2 บล็อกไดอะแกรมของการศึกษาทดลองของการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบน ร่างกายมนุษย์บนพื้นฐาน IEEE 802.15.4j	5
1.3 บล็อกไดอะแกรมของการหาตำแหน่งด้วยเทคนิคสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึม แบบคลื่น	6
2.1 โครงสร้างโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	7
2.2 การหาตำแหน่ง	14
2.3 การหาตำแหน่งด้วยเทคนิคพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ	15
2.4 การหาตำแหน่งด้วยพิจารณาทิศทางในการมาถึงของสัญญาณ	16
2.5 การหาตำแหน่งโดยวิธีการวัดความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ	17
2.6 การหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคสแกนลายนิ้วมือ	18
2.7 เทคนิคการวิเคราะห์และประเมินผลโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านที่ใกล้เคียงที่สุด จำนวน $k$ ตัว	20
2.8 การใช้อัลกอริทึมแบบคลื่นเพื่อลดสัญญาณรบกวนแสดงให้เห็นสัญญาณภาครับ	20
2.9 แผนภูมิขั้นตอนวิธีการคลื่นสำหรับช่องสัญญาณการส่งผ่านบนร่างกายมนุษย์	22
2.10 ตัวอย่างภาพหน้าตัดข้างการประวิงเวลา	24
2.11 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสม	25
3.1 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 3 มิติ	28
3.2 วงจรสมมูลของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	28
3.3 ระบบพิกัดแสดงคุณสมบัติการแผ่กำลังงาน	31
3.4 แบบรูปหลักระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร	32
3.5 แบบรูปไอโซทรอปิก	32
3.6 แบบรูปชี้ทิศทาง	33
3.7 แบบรูปรอบทิศทาง	33
3.8 ลำคลื่นในรูปแบบเชิงขั้วแบบ 3 มิติ	34
3.9 ลำคลื่นในรูปแบบเชิงเส้นแบบ 2 มิติ	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 แบบจำลองวิธีสามสายอากาศ	35
3.11 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 2 มิติ	37
3.12 แบบจำลองสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบแผ่น	40
3.13 สัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $ ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	41
3.14 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	42
3.15 อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	43
3.16 สมิตซาร์ทของอินพุตอิมพีแดนซ์	43
3.17 อัตราขยายที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	44
3.18 แบบรูปการแผ่กำลังงานบนระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	45
3.19 แบบรูปการแผ่กำลังงานบนระนาบแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	45
3.20 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์	46
3.21 ต้นแบบที่พิมพ์ลงบนกระดาษภาพถ่ายผิวมัน	47
3.22 การบัดกรีขั้วต่อ SMA เข้ากับจุดบ่อนสัญญาณของสายอากาศ	47
3.23 ขนาดที่ใช้สร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	48
3.24 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์	49
3.25 สายนำสัญญาณเซมิริจิด	49
3.26 อุปกรณ์เปรียบเทียบ	50
3.27 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	51
3.28 แบบจำลองการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	52
3.29 การทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30 แบบจำลองการทดสอบอัตราการขยายและแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	54
3.31 การทดสอบอัตราการขยายและแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	55
3.32 แบบจำลองการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	56
3.33 การทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	57
3.34 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดสอบช่องสัญญาณการส่งผ่านสำหรับการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	58
3.35 แบบจำลองตำแหน่งต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง	59
3.36 แบบจำลองตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์	59
3.37 แบบจำลองการทดลองวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	60
3.38 การทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ด้านหน้า	61
3.39 การทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ด้านหลัง	62
3.40 การทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณกรณีมีร่างกายมนุษย์	63
3.41 ตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศภาครับบนตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกายทั้งด้านหน้าและด้านหลัง	63
4.1 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $ ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด	66
4.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด	67
4.3 การเปรียบเทียบสมิทชาร์ทของอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด	68
4.4 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด	69
4.5 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปในระนาบสนามไฟฟ้าระหว่างการจำลองและการทดสอบวัด	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ	71
4.7 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนเปรียบเทียบในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้าและด้านหลัง	72
4.8 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณกรณีมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า	72
4.9 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณกรณีมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง	73
4.10 การสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า	74
4.11 การสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง	74
4.12 การประวิงเวลากำลังงานในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า	75
4.13 การประวิงเวลากำลังงานในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง	76
4.14 การประวิงเวลากำลังงานในแฉกกลางลำตัวกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า	76
4.15 การประวิงเวลากำลังงานในแฉกกลางลำตัวกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง	77
4.16 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า	77
4.17 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง	78
4.18 การสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า	79
4.19 การสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง	79
4.20 การประวิงเวลากำลังงานในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า	80
4.21 การประวิงเวลากำลังงานในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง	81
4.22 การประวิงเวลากำลังงานในแฉกกลางลำตัวกรณีมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า	81
4.23 การประวิงเวลากำลังงานในแฉกกลางลำตัวกรณีมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง	82
4.24 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า	83
4.25 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง	83
4.26 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้าและด้านหลังเมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นและผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น	84
4.27 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ	85
4.28 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น	86

- 4.29 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางที่เกิดขึ้นจากการ  
หาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือกับใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วม  
กับอัลกอริทึมแบบคลีน 86
- 5.1 แบบจำลองการทดลองวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกาย  
มนุษย์ในห้องไร้การสะท้อน 92



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	40
3.2 พารามิเตอร์ในการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	52
3.3 พารามิเตอร์ในการทดสอบอัตราการขยาย และแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	54
3.4 พารามิเตอร์ในการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	56
3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์	60
4.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตำแหน่งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง	85
4.2 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของตำแหน่งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง	88

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ (Wireless Body Area Network: WBAN) มีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน โดยเฉพาะในทางการแพทย์สำหรับระบบตรวจสอบผู้ป่วยในการประมวลผลข้อมูลและการส่งข้อมูลแบบไร้สายต้นทุนต่ำที่สร้างระบบตรวจสอบผู้ป่วยจากระยะไกลโดยใช้อินเทอร์เน็ตที่สามารถทำการตรวจสอบสุขภาพแก่ทุกคนได้ทุกที่ทุกเวลา [1] โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ใช้อุปกรณ์รับรู้แบบไร้สาย สามารถสื่อสารได้ในระยะใกล้บริเวณใกล้เคียงร่างกายมนุษย์หรือภายในร่างกายมนุษย์ (แต่ไม่จำกัดเฉพาะมนุษย์) อุปกรณ์ที่ใช้งานมีระดับพลังงานต่ำ [2] โดยโครงข่ายอุปกรณ์รับรู้แบบไร้สาย (Wireless Sensor Network: WSN) จะอยู่ใกล้ชิดกับร่างกายของมนุษย์เป็นอย่างมากเพื่อรวบรวมข้อมูลทางสรีรวิทยาที่เฉพาะเจาะจง จากนั้นอุปกรณ์รับรู้จะส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทางของเทคโนโลยีซิกบี (ZigBee) แล้วจึงถ่ายโอนไปยังผู้ประสานงานของเทคโนโลยีซิกบี ซึ่งจะอนุญาตให้ผู้เชี่ยวชาญทางการแพทย์สามารถติดตามสถานการณ์ของผู้ป่วยได้อย่างต่อเนื่องโดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลเดิมของผู้ป่วย [3]

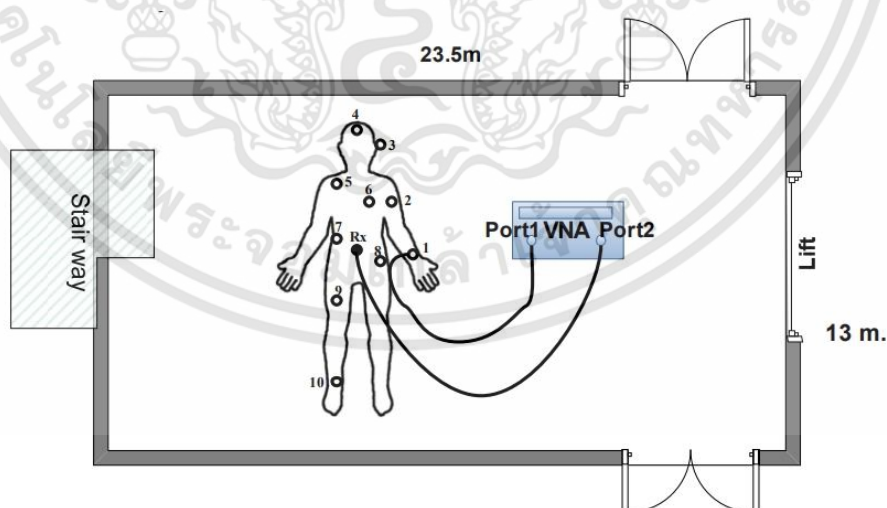
เทคโนโลยีซิกบีเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายบนมาตรฐานที่กำหนดโดยสถาบันวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE) 802.15.4j ซึ่งถูกออกแบบขึ้นสำหรับโครงข่ายอุปกรณ์รับรู้แบบไร้สายที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลต่ำ ใช้พลังงานต่ำ มีราคาถูก และสื่อสารได้ในระยะสั้น เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีซิกบีถูกนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ในทางการแพทย์ในการติดตามคนไข้ และการหาตำแหน่งภายในอาคาร [4] สิ่งแวดล้อมภายในอาคารรวมถึงร่างกายของมนุษย์อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณและการสื่อสารได้ การประเมินประสิทธิภาพของระบบไร้สายเพื่อนำไปสู่การแก้ไขและพัฒนา ระบบไร้สายให้สามารถรองรับการใช้งานของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การหาตำแหน่งไร้สายบนร่างกายมนุษย์ สามารถพิจารณาด้วยเทคนิคที่หลากหลาย เช่น เทคนิคพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength: RSS) เทคนิคพิจารณาทิศทางมาถึงของสัญญาณ (Angles of Arrival: AOA) เทคนิคพิจารณาเวลาในการมาถึงของสัญญาณ (Time of Arrival: TOA) หรือเทคนิคพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ (Time Difference of Arrival: TDOA) ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการแพร่กระจายสัญญาณ (คลื่นหลายวิถี (Multipath) หรือสภาวะที่ไม่สามารถมองเห็นได้ในระดับสายตา (Non-Line of Sight: NLOS) ทำให้เทคนิคเหล่านี้มีความเที่ยงตรงและแม่นยำไม่เพียงพอ [5] จึงเลือกใช้เทคนิคพิจารณา

ความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่ง หรือเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ (Location pattern or fingerprint) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fingerprinting) ในการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ เนื่องจากเทคนิคนี้นำเอาคุณลักษณะของช่องสัญญาณซึ่งเกิดจากการจางหายหลายวิธีมาสร้างเป็นเอกลักษณ์ต้นแบบ แล้วบันทึกลงฐานข้อมูล (Database) จากนั้นตำแหน่งต่าง ๆ จะถูกประมวลโดยการนำเอกลักษณ์ทดสอบของตำแหน่งนั้น ๆ เปรียบเทียบกับเอกลักษณ์ต้นแบบซึ่งได้บันทึกไว้ในฐานข้อมูล

จากการค้นคว้ามีงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาและประเมินผลการทดลองวัดของรูปคลื่นส่งผ่านแถบกว้างยิ่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ [6] ซึ่งร่างกายมีผลต่อการแพร่กระจายสัญญาณของสายอากาศ ดังรูปที่ 1.1 แต่ยังไม่มีการศึกษาทดลองประเมินผลการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยใช้เทคโนโลยีชิปบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4j โครงการนี้ได้นำเสนอสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมาใช้ในการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์เนื่องจากมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา รูปร่างไม่ซับซ้อน ออกแบบง่าย และราคาถูกมักถูกใช้งานในย่านความถี่ 1 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 6 จิกะเฮิรตซ์ [7] ดังนั้นจึงเหมาะสมในการใช้งานกับเทคโนโลยีชิปที่ความถี่ช่วง 2.36 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.4 จิกะเฮิรตซ์ โดยออกแบบและสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปทั้งด้านส่งและด้านรับสำหรับการศึกษาทดลองของการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ด้วยเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ โดยพิจารณาพารามิเตอร์ คือ ความแรงของสัญญาณที่รับได้ นอกจากนี้พิจารณาความเที่ยงตรงและแม่นยำของการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน (CLEAN Algorithm) เพื่อขจัดสัญญาณรบกวน การจางหาย (Fading) อันเป็นสาเหตุมาจากคลื่นหลายวิถี ทำให้สัญญาณส่งมีความชัดเจนมากขึ้น



รูปที่ 1.1 แบบจำลองการติดตั้งเครื่องมือสำหรับการทดลองวัดการศึกษาและประเมินผลการทดลองวัดของรูปคลื่นส่งผ่านแถบกว้างยิ่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเทคโนโลยีชிகิบบนพื้นฐาน IEEE 802.15.4j และการประยุกต์ใช้งานสำหรับการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์
2. ออกแบบและสร้างสายอากาศเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์
3. ออกแบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์บนพื้นฐาน IEEE 802.15.4j
4. เพื่อวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบของการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

## 1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

1. ศึกษาเทคโนโลยีชิกิบบนพื้นฐาน IEEE 802.15.4j มาใช้สำหรับการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์
2. ออกแบบและสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์สำหรับประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์
3. ออกแบบจำลองการวัดและทดลองวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยใช้สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปทั้งด้านส่งและด้านรับ และใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ในการวัดและบันทึกผล
4. วิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบของการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยพิจารณาพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถี ภาพตัดขวางการประวิงเวลา และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ด้วยเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลิน

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

สำหรับขั้นตอนการศึกษาในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ขั้นตอนแรกทางผู้จัดทำได้ทำการศึกษาแนวคิด และทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปริญญาานิพนธ์ เมื่อได้แนวคิดแล้วในขั้นตอนต่อมาจึงทำการออกแบบจำลองและสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์เพื่อใช้สำหรับการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ จากนั้นทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่สร้างขึ้นและปรับปรุงสายอากาศให้สามารถใช้งานได้จริง ขั้นตอนถัดมาทำการออกแบบจำลองและทดลองวัดจริงการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ จากนั้นวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยพิจารณาพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (Power Delay Profile: PDP) และสัมประสิทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) แล้วหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับ อัลกอริทึมแบบคลื่น ในขั้นตอนสุดท้ายทำการประเมินผลและเปรียบเทียบผลการหาตำแหน่ง ซึ่ง ขั้นตอนดังกล่าวแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 1.2 และรูปที่ 1.3

## 1.5 สรุป

จากแนวคิดและหลักการข้างต้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการศึกษาสำหรับปริญญา นิพนธ์นี้เป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ ซึ่งประกอบด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของโครงการ และขอบเขตของโครงการ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยโครงข่ายไร้สายบน ร่างกายมนุษย์ การหาตำแหน่งภายในอาคาร อัลกอริทึมแบบคลื่น และพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์การ ทดสอบสายอากาศกับร่างกายมนุษย์

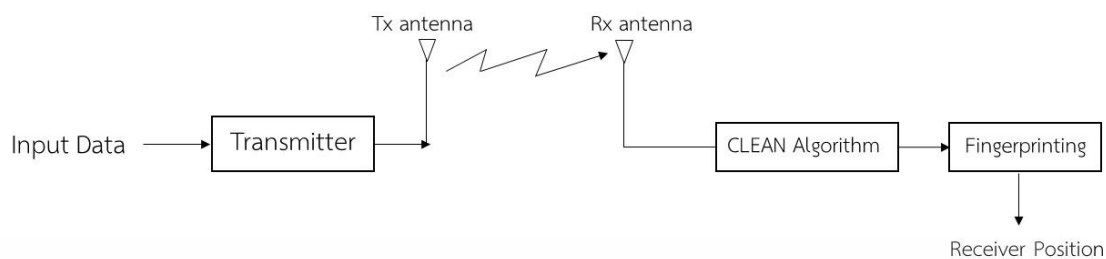
บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและการจัดทำปริญญาานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย การ ออกแบบสายอากาศแผ่นไมโครสตริป การออกแบบการวัดจริงช่องสัญญาณส่งผ่านไร้สายบน ร่างกายมนุษย์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ และการจัดเก็บผลการทดลอง

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยผลการทดสอบคุณสมบัติ และ ประสิทธิภาพของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป และผลการวัดช่องสัญญาณส่งผ่านไร้สายบน ร่างกายมนุษย์

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะการศึกษาทดลองของการหา ตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์บนพื้นฐาน IEEE 802.15.4j



รูปที่ 1.2 บล็อกไดอะแกรมของการศึกษาทดลองของการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์บนพื้นฐาน IEEE 802.15.4j



รูปที่ 1.3 บล็อกไดอะแกรมของการหาตำแหน่งด้วยเทคนิคสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบ

คลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

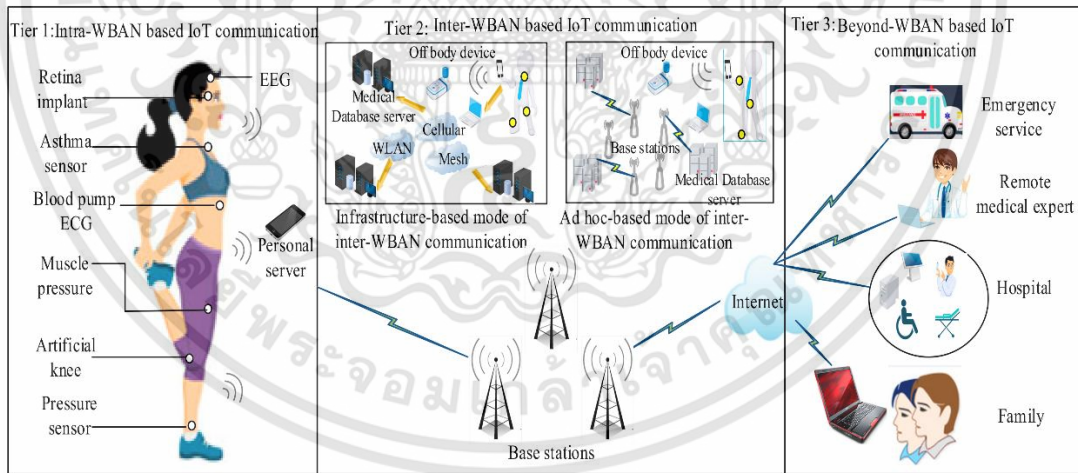
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ การหาตำแหน่งภายในอาคาร และอัลกอริทึมแบบคลัส

#### 2.1 โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

ในปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีอย่างมากโดยเฉพาะในด้านวงจรรวม อุปกรณ์รับรู้อุปกรณ์ขนาดเล็กและในโครงข่ายไร้สาย ในโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ อุปกรณ์เหล่านี้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานร่วมกันในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น การตรวจสุขภาพ ในการเล่นกีฬา และแม้กระทั่ง ในการทหารในอนาคตเนื่องจากน้ำหนักเบา พลังงานต่ำ และความสามารถในการตรวจจับ ราคาถูก เชื่อถือได้ และปรับขนาดได้สำหรับการตรวจสอบกิจกรรมประจำวันในระยะเวลาสั้นถึงระยะยาว แต่ยังมีปัญหาอยู่หลายประการ เช่น การรวมอุปกรณ์ การออกแบบระบบตามสถานการณ์ของผู้ใช้ ความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัวของข้อมูล การแก้ไข และปัญหาทางสังคม จะต้องได้รับการแก้ไขเพื่อให้ โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย [8]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ [9]

#### 2.1.1 ประวัติความเป็นมาโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ได้ถูกกล่าวถึงครั้งแรกในส่วนของโครงข่ายส่วนบุคคล (Personal Area network: PAN) และ Zimmermann ได้รับการยกย่องในการสร้างสรรค์แนวคิดเรื่องโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์ โดยมีพื้นฐานจากงานของเขาที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งแมสซาชูเซตส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Massachusetts Institute of Technology: MIT) และที่บริษัทไอบีเอ็มเขาได้พูดถึงการรวมกันของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่มีขนาดเล็ก และการเชื่อมต่อการสื่อสารไร้สายระยะสั้น การเชื่อมต่อนั้นถูกสร้างขึ้นผ่านการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ใกล้เคียงระยะน้อยกว่า 2 เมตร ในปี ค.ศ. 2004 โครงการข่างกายมนุษย์ ได้อธิบายสภาพแวดล้อมรวมถึงบริเวณที่ใกล้ที่สุดซึ่งก็คือส่วนหนึ่งของร่างกายมนุษย์ [10] กลุ่มทำงานเฉพาะ 15.6 (TG6) ของคณะกรรมการจากมาตรฐานสถาบันวิชาชีพวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีชื่ออย่างเป็นทางการว่า IEEE 802

IEEE 802.15.1 เป็นมาตรฐานแรกที่มุ่งเน้นไปที่สภาพแวดล้อมโครงข่ายส่วนบุคคลระยะสั้นและ IEEE 802.15.4 แลกเปลี่ยนปริมาณข้อมูลสำหรับการทำงานที่ใช้พลังงานต่ำ [11] จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า IEEE 802.15.4 สามารถตอบสนองความต้องการของระบบประยุกต์ทางการแพทย์ที่มีอัตราต่ำเท่านั้น ในขณะที่ [12] อ้างว่า IEEE 802.15.4 ให้โซลูชันสำหรับการใช้งานทางการแพทย์แม้ว่าการศึกษาจะเน้นไปที่ระบบประยุกต์ทางการแพทย์ที่มีอัตราสูงกว่า [11] ในเดือนเมษายน ค.ศ. 2010 คณะทำงาน IEEE 802.15.6 ได้สร้างร่างมาตรฐานฉบับแรกขึ้นและกำลังพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [13]

โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์และโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล มีเทคโนโลยีและแนวคิดที่ใกล้เคียงกัน แต่มีส่วนที่แตกต่างกัน คือ อุปกรณ์ของการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์สามารถอยู่บนร่างกายหรือภายในร่างกายมนุษย์ได้โดยมีความปลอดภัยกับอวัยวะและชิ้นส่วนของร่างกายมนุษย์ ในส่วนของช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ได้ถูกนำเสนอด้วยคุณลักษณะที่แตกต่างกับการสื่อสารไร้สายส่วนบุคคล เนื่องจากเนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์ที่เป็นตัวกลางซึ่งประกอบไปด้วยไขมันและน้ำ ทำให้การแพร่กระจายถูกลดทอนเร็วกว่าในแบบอวกาศว่างและรูปแบบของสายอากาศอาจจะมีผลกระทบกับร่างกายมนุษย์ [14]

### 2.1.2 มาตรฐาน IEEE 802.15.4j

IEEE 802.15.4j เป็นคำอธิบายสำหรับโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคลพลังงานต่ำในอัตราต่ำในพื้นที่ปฏิบัติการส่วนบุคคลที่ระยะ 10 เมตร โดยทั่วไปจะเป็นอุปกรณ์รับรู้พื้นที่หนึ่งที่น่าสนใจที่เพิ่มขึ้น คือ การปรับตัวของเทคโนโลยีนี้เพื่อดำเนินงานในและรอบ ๆ ร่างกายมนุษย์เชื่อมต่อผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์มีระบบประยุกต์ที่มีศักยภาพมากมายที่จะอยู่บนพื้นฐานของโครงข่ายไร้สายมนุษย์ รวมถึงบริการดูแลสุขภาพความช่วยเหลือแก่ผู้พิการและการมีปฏิสัมพันธ์กับร่างกายและความบันเทิง นับตั้งแต่เปิดตัวรุ่นแรกในปี ค.ศ. 2003 IEEE 802.15.4 ได้รับความสนใจมากมายทั้งในด้านวิชาการ ธุรกิจอุตสาหกรรม และด้านการแพทย์ [15] มาตรฐาน IEEE 802.15.4 กำหนดโปรโตคอลและการเชื่อมต่อระหว่างกันของอุปกรณ์ผ่านการสื่อสารทางวิทยุในโครงข่ายส่วนบุคคล มาตรฐานใช้การเข้าถึงหลายครั้งของผู้ให้บริการรับรู้ด้วยกลไกการเข้าถึงสื่อหลีกเลี่ยงการชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ระบุคลื่นความถี่สามแถบ แม้ว่าการใช้งานจะต้องดำเนินการกับหนึ่งในสามเท่านั้น ได้แก่ แถบความถี่ 868 เมกะเฮิร์ตซ์ สำหรับการใช้งานในยุโรป 902 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 928 เมกะเฮิร์ตซ์ สำหรับระบบประยุกต์ในอเมริกาเหนือ และ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ สำหรับการใช้งานทั่วโลก หลายช่องสัญญาณในแถบความถี่ที่แตกต่างกันทำให้สามารถย้ายตำแหน่งภายในสเปกตรัมได้ มาตรฐานนี้ยังช่วยให้สามารถค้นหาช่องสัญญาณบิตคอน การตรวจจับพลังงานของตัวรับ ตัวระบุคุณภาพลิงก์ การสลับช่องสัญญาณ อัตราความถี่ที่ต่ำสามารถแปลงเป็นความไวที่ดีขึ้นและพื้นที่ครอบคลุมที่ใหญ่ขึ้น อัตราความถี่ที่สูงขึ้นหมายถึงปริมาณงานที่สูงขึ้น เวลาแฝงที่ต่ำกว่า หรือรอบการทำงานที่ต่ำลงจึงส่งผลให้โครงข่ายไร้สายเป็นสิ่งที่น่าสนใจมากยิ่งขึ้นในปัจจุบัน [16] และในมาตรฐาน IEEE 802.15.4j ได้มีคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้จัดสรรคลื่นความถี่ในช่วง 2.36 จิกะเฮิร์ตซ์ ถึง 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ เพื่อใช้งานบนพื้นฐานรองสำหรับบริการโครงข่ายทางการแพทย์บนร่างกายมนุษย์ อุปกรณ์ที่ทำงานภายในแถบความถี่นี้เป็นไปตามชุดของกฎที่ระบุไว้ในรายงานและคำสั่งซื้อที่ออกโดยคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร ซึ่งจำกัดการใช้แถบความถี่ไว้เฉพาะทางการแพทย์เท่านั้น รวมถึงข้อกำหนดอื่น ๆ ในฐานะผู้ใช้งานในแถบความถี่นี้ อุปกรณ์โครงข่ายทางการแพทย์บนร่างกายมนุษย์จำเป็นต้องปกป้องผู้ใช้หลักทั้งหมดและยอมรับการรบกวนที่อาจเกิดขึ้นจากผู้ใช้เหล่านั้น เมื่อผู้ใช้หลักใช้ส่วนหนึ่งของแถบความถี่โครงข่ายทางการแพทย์บนร่างกายมนุษย์ อุปกรณ์จะยกเลิกส่วนนั้นของแถบความถี่ การใช้งานแถบความถี่โดยผู้ใช้หลักโดยทั่วไปแล้วจะมีการกำหนดเวลาไว้ล่วงหน้าอย่างดีซึ่งอนุญาตให้ผู้ใช้ความถี่โครงข่ายทางการแพทย์บนร่างกายมนุษย์ แต่ต้องมีการจัดสรรอย่างมีระเบียบและถูกต้องตามหลักการที่ได้มีการกำหนดไว้ [17] ซึ่งเทคโนโลยีซิกบีเป็นหนึ่งในโพรโตคอลของมาตรฐาน IEEE 802.15.4j ที่สามารถนำมาใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ได้

#### 2.1.2.1 เทคโนโลยีซิกบี

เทคโนโลยีซิกบีมีอัตราข้อมูลต่ำ ใช้พลังงานต่ำ ต้นทุนต่ำ โพรโตคอลโครงข่ายไร้สายที่กำหนดเป้าหมายไปยังระบบอัตโนมัติและแอปพลิเคชันการควบคุมระยะไกล คณะกรรมการ IEEE 802.15.4 เริ่มทำงานกับมาตรฐานอัตราข้อมูลต่ำ จากนั้นสหพันธ์ซิกบี (ZigBee Alliance) และ IEEE ก็ตัดสินใจร่วมมือกัน และซิกบีเป็นชื่อทางการค้าสำหรับเทคโนโลยีนี้ โดยสหพันธ์ซิกบี คาดหวังจะพัฒนาการเชื่อมต่อที่มีต้นทุนต่ำและใช้พลังงานต่ำ แต่ไม่ต้องการอัตราการถ่ายโอนข้อมูลที่สูงเท่ากับบลูทูธ นอกจากนี้ซิกบียังสามารถนำไปใช้ในโครงข่ายแบบเมชที่มีขนาดใหญ่กว่าที่เป็นไปได้ด้วยบลูทูธ อุปกรณ์ไร้สายที่สามารถใช้ได้กับซิกบีนั้นคาดว่าจะสามารถส่งสัญญาณได้ 10 เมตร ถึง 75 เมตร ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของคลื่นความถี่ และปริมาณการใช้พลังงานที่จำเป็นสำหรับระบบประยุกต์ที่กำหนด และจะทำงานในคลื่นความถี่วิทยุทั่วโลกที่ไม่มีใบอนุญาต ซึ่งมีการกำหนดแถบความถี่ในการใช้งานตามมาตรฐานไว 3 แถบความถี่ คือ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 868

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมกะเฮิรตซ์ โดยแต่ละแถบความถี่จะมีช่องสัญญาณ 16 ช่อง 10 ช่อง และ 1 ช่อง ตามลำดับ และมีอัตราส่งข้อมูล 250 กิโลบิตต่อวินาที 40 กิโลบิตต่อวินาที และ 20 กิโลบิตต่อวินาที ตามลำดับ นอกจากนี้กำลังงานที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีนั้นน้อยมาก ในกรณีส่วนใหญ่จะใช้ที่ 1 มิลลิวัตต์ (หรือพลังงานน้อยกว่า) และสามารถได้ไกลถึง 150 เมตรในบริเวณกลางแจ้งซึ่งทำได้โดยเทคนิคที่เรียกว่าสเปกตรัมการแพร่กระจายโดยตรง [18] ซึ่งหลังจากการพัฒนาของสหพันธ์ซิกบี และ IEEE ซิกบีจึงถูกนำมาใช้สำหรับระบบประยุกต์ที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ซึ่งมีต้นทุนต่ำ เนื่องจากระบบประยุกต์ของซิกบี ส่วนมากมีระยะเวลาที่อุปกรณ์ไร้สายทำงานที่จำกัด อุปกรณ์จึงทำงานในโหมดประหยัดพลังงาน ระบบประยุกต์หนึ่งของซิกบี คือ การตรวจสอบผู้ป่วยในบ้าน ตัวอย่างเช่น ความดันโลหิตและอัตราการเต้นของหัวใจของผู้ป่วยสามารถวัดได้จากอุปกรณ์ที่สวมใส่ได้ ผู้ป่วยสวมอุปกรณ์ซิกบีที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับรู้ที่รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพเป็นระยะ เช่น ความดันโลหิต จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งแบบไร้สายไปยังเครื่องบริการในพื้นที่ เช่น คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลภายในบ้านของผู้ป่วยซึ่งทำการวิเคราะห์เบื้องต้น และสุดท้ายข้อมูลที่สำคัญจะถูกส่งไปยังพยาบาลหรือแพทย์ของผู้ป่วยผ่านทางอินเทอร์เน็ตเพื่อทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม [14]

#### 2.1.2.2 ประเภทอุปกรณ์ซิกบี [19]

ประเภทอุปกรณ์ซิกบีสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ อุปกรณ์ทางกายภาพ และอุปกรณ์ทางตรรกะ

##### 1) อุปกรณ์ทางกายภาพ สามารถออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1.1) อุปกรณ์เต็มฟังก์ชัน (Full Function Device: FFD) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์จัดเส้นทาง หรือเป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูลจากอุปกรณ์อื่น ๆ ใช้พลังงานจากสายไฟฟ้าสามารถทำงานได้ทุกโครงข่ายและสามารถทำเป็นจุดเชื่อมต่อกันได้

1.2) อุปกรณ์ลดฟังก์ชัน (Reduce Function Device: RFD) คือ อุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อภายในโครงข่าย ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์อื่น ๆ ได้ ถูกลดความสามารถในการทำโครงข่าย

##### 2) อุปกรณ์ทางตรรกะ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1.1) ตัวประสานงานซิกบี (ZigBee Coordinator: ZC) คือ อุปกรณ์ประเภทอุปกรณ์เต็มฟังก์ชันที่ทำหน้าที่สร้างโครงข่ายการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ปลายทางกับอุปกรณ์จัดเส้นทาง หรือตัวประสานงานกับอุปกรณ์จัดเส้นทาง หรือตัวประสานงานกับตัวประสานงานด้วยกัน โดยการกำหนดที่อยู่ให้กับอุปกรณ์ในโครงข่ายที่สร้างขึ้นไม่ให้ซ้ำกัน ทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลในโครงข่าย

1.2) อุปกรณ์จัดเส้นทางซิกบี (ZigBee Router: ZR) คือ อุปกรณ์ประเภทอุปกรณ์เต็มฟังก์ชันที่ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลและจัดการเส้นทางต่าง ๆ ของข้อมูลที่ส่งผ่านภายในโครงข่ายระหว่างคู่ของโหนดใด ๆ

1.3) อุปกรณ์ปลายทางของซิกบี (ZigBee End Device: ZED) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ปลายทาง ใช้พลังงานต่ำเมื่อใช้งานเป็นโหนดที่อยู่ในส่วนของผู้ใช้งาน อุปกรณ์ปลายทางของซิกบีเป็นอุปกรณ์ประเภท อุปกรณ์ลดฟังก์ชันหรืออุปกรณ์เต็มฟังก์ชัน ในบางกรณีขึ้นอยู่กับอุปกรณ์รับรู้ที่ใช้ และคอยจัดเส้นทางของข้อความ

อุปกรณ์เต็มฟังก์ชันสามารถทำหน้าที่ได้ 3 บทบาท ได้แก่ ตัวประสานงาน ตัวประสานงานโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Personal Area Network Coordinator: PAN Coordinator) และอุปกรณ์ส่วนมาตรฐานซิกบี ตัวประสานงานซิกบีคือตัวประสานงานโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล อุปกรณ์จัดเส้นทางซิกบีเป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวประสานงาน อุปกรณ์ปลายทางของซิกบี คือ อุปกรณ์ที่ไม่ใช่ตัวประสานงานหรืออุปกรณ์จัดเส้นทาง อุปกรณ์ปลายทางของซิกบีมีขนาดหน่วยความจำน้อยที่สุด มีความสามารถและคุณสมบัติในการประมวลผลน้อยที่สุด อุปกรณ์ปลายทางของซิกบีมักจะเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูกที่สุดในโครงข่าย

#### 2.1.2.3 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีซิกบี [4]

เทคโนโลยีซิกบีมีการประยุกต์ใช้ที่หลากหลายไม่จำกัดเพียงระบบอัตโนมัติในบ้าน รวมถึงการติดตามสินค้าคงคลัง และการดูแลสุขภาพ อุปกรณ์ซิกบีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและ/หรือลดต้นทุนได้ การใช้โปรโตคอลซิกบีอย่างเต็มรูปแบบมีข้อได้เปรียบด้านความสามารถในการสร้างโครงข่ายแบบเมชที่เชื่อถือได้ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ซิกบีมีดังนี้

ระบบอัตโนมัติในบ้าน เป็นหนึ่งในพื้นที่การใช้งานหลักสำหรับเทคโนโลยีซิกบี ระบบอัตโนมัติภายในบ้านมีอัตราการรับส่งข้อมูลเพียง 10 กิโลเมตร เช่น ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบการอ่านมิเตอร์ ระบบน้ำ และระบบควบคุมแสง

เครื่องใช้ไฟฟ้า ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับผู้บริโภคสามารถใช้ได้ในรีโมทไร้สาย ตัวควบคุมเกม เมาส์ไร้สายสำหรับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และระบบประยุกต์อื่น ๆ

ระบบอัตโนมัติอุตสาหกรรม ในระดับอุตสาหกรรม ทอพอโลยีโครงข่ายแบบตาข่ายของซิกบีสามารถช่วยในการใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น การจัดการพลังงาน การควบคุมแสง การควบคุมกระบวนการ และการจัดการ เช่น การจัดการสินทรัพย์และการติดตามบุคลากร การติดตามด้านปศุสัตว์

การดูแลด้านสุขภาพ ในการดูแลสุขภาพ เช่น การตรวจสอบข้อมูลที่สำคัญของผู้ป่วยจากระยะไกล

#### 2.1.3 ข้อกำหนดของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก พลังงานต่ำ ปลอดภัย และใส่ได้ เป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดของโครงสร้างโครงข่ายไร้สายบนร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มนุษย์ เนื่องจากโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์เป็นโครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ที่ออกแบบมาเพื่อส่งข้อมูลในระยะทางที่สั้นมาก คุณภาพของการบริการ (Quality of Service: QoS) ของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์จะขึ้นอยู่กับการใช้ ซึ่งเป็นหลักการของโปรแกรมทางการแพทย์ และโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ยังสามารถใช้ในโปรแกรมอื่นได้ เช่น การฝึกกีฬา การฟื้นฟู หรือการใช้ทหาร ที่ QoS จะถูกกำหนดโดยลักษณะของโปรแกรมเหล่านั้น สำหรับการใช้ทางการแพทย์ที่แหล่งข้อมูลคือสัญญาณทางกายภาพ เช่น อัตราการเต้นของหัวใจ ความดันเลือด การตรวจคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (Electrocardiography: ECG) และอื่น ๆ ระบบนี้ต้องการความล่าช้าต่ำและความไว้วางใจสูง อีกทั้งแหล่งสัญญาณทางกายภาพส่วนใหญ่จะทำให้ข้อมูลแตกได้สั้นลงด้วยคลื่นความถี่ตัวอย่างปกติ ดังนั้นการใช้ข้อมูลการส่งสัญญาณของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์เป็นความต้องการต่ำถึงกลางสำหรับแต่ละการเชื่อมต่อ อย่างไรก็ตามโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์จะรวมเป็นหลาย ๆ จุดตรวจจับการส่งข้อมูลควรจะถูกประสานงานโดยใช้โพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงกลางที่เชื่อถือได้และมีประสิทธิภาพไม่ว่าจะเป็นการใช้งานของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ สิ่งที่เป็นความต้องการหลักของการออกแบบของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ คือ การพัฒนาโครงข่ายตรวจจับไร้สายระยะสั้นและเชื่อถือได้ [20]

IEEE 802.15.6 ได้กำหนดขอบเขตที่กว้างขึ้นของการใช้งาน ไม่ใช่แค่เพียงทางการแพทย์และการดูแลสุขภาพอย่างเดียวเท่านั้นแต่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในด้านอื่น ๆ อีกมากมาย ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์จึงมีอยู่หลากหลายไม่สามารถนำมากล่าวได้ทั้งหมดดังนั้นจะกล่าวเฉพาะข้อกำหนดทางเทคนิคที่สำคัญของ IEEE 802.15.6 ดังนี้ [21]

1. จำนวนของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทางการแพทย์มี 6 โหนด แต่สามารถมีได้ถึง 256 โหนด
2. อัตรารับส่งข้อมูลตั้งแต่ 10 กิโลบิตต่อวินาที ถึง 10 เมกะบิตต่อวินาที
3. ช่วงการส่งผ่านไม่เกิน 3 เมตร
4. สามารถทำงานบนร่างกายภายใต้เสื้อผ้าหรือบนผิวหนัง
5. ลักษณะช่องสัญญาณจะขึ้นอยู่กับสภาพของร่างกาย
6. ระดับพลังงานของอุปกรณ์แต่ละชิ้นอยู่ในระดับต่ำ 0.1 มิลลิวัตต์ ถึง 1 มิลลิวัตต์
7. ใช้พลังงานน้อย
8. รองรับคุณภาพการบริการ
9. ความปลอดภัยของข้อมูล เช่น Authentication, Data Integrity, and Encryption

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4 ข้อพิจารณาของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ [21]

1. โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์มีการรับส่งข้อมูลแตกต่างและหลากหลาย การจรรยาอาจเป็นเรื่องปกติ เช่นเดียวกับเหตุฉุกเฉินในชีวิต
2. อัตราข้อมูลอาจแตกต่างกันตั้งแต่ระดับกิโลบิตต่อวินาทีถึงเมกะบิตต่อวินาที
3. อุปกรณ์หลายชนิดสามารถใช้งานได้พร้อมกันในโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์เดี่ยว อุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพหรือลดการทำงานลง นอกจากนี้อุปกรณ์สามารถปลุกฝัง (ในร่างกาย) สวมใส่ได้ (บนร่างกาย) หรือวางไว้ใกล้ร่างกาย (นอกร่างกาย)
4. แถบความถี่หลายแถบและเทคนิคชั้นกายภาพหลายแบบที่สอดคล้องกัน
5. การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำงานบนแถบความถี่ชั้นกายภาพที่ต่างกันจะเป็นปัญหาใหญ่ในระบบโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ได้มีการกำหนดข้อความปลอดภัยของการสื่อสารที่ได้รับการสนับสนุนโดย IEEE 802.15.6 หน่วยควบคุม (Control units: CU) และโหนดอุปกรณ์รับรู้ในโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์มีการใช้เงื่อนไขที่แตกต่างกันเพื่อรักษาความปลอดภัยของการสื่อสารในระดับต่าง ๆ ในการควบคุมการใช้สื่อกลาง มาตรฐานกลุ่มปฏิบัติงานที่ 6 ใช้ระดับความปลอดภัยสามระดับเพื่อรักษาความปลอดภัยในการสื่อสารซึ่งเรียกว่าระดับ 0 1 และ 2 ระดับเหล่านี้มีคุณสมบัติเฉพาะรูปแบบเฟรมและระดับการป้องกัน [22] และ [23]

ระดับ 0 การสื่อสารที่ไม่ปลอดภัย: ระดับ 0 คือ ระดับความปลอดภัยต่ำสุดใน IEEE 802.15.6 ในระดับนี้ข้อมูลจะถูกส่งโดยไม่มีกลไกการรักษาความปลอดภัย [23] นอกจากนี้ข้อความไม่ได้มาพร้อมกับการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและความสมบูรณ์ หรือการป้องกันการตอบกลับ การปกป้องความเป็นส่วนตัว และการรักษาความลับ [24]

ระดับ 1 การตรวจสอบสิทธิ์เท่านั้น: ระดับ 1 คือ ระดับความปลอดภัยโดยเฉลี่ยของ IEEE 802.15.6 ซึ่งข้อความจะถูกส่งในลักษณะที่ปลอดภัย แต่ไม่มีกลไกการเข้ารหัสใด ๆ ระดับนี้ไม่ได้ให้การคุ้มครองความเป็นส่วนตัวและการรักษาความลับ การป้องกันการตอบกลับ ความสมบูรณ์ และการตรวจสอบความถูกต้องของข้อความได้รับการสนับสนุนในระดับ 1 [23]

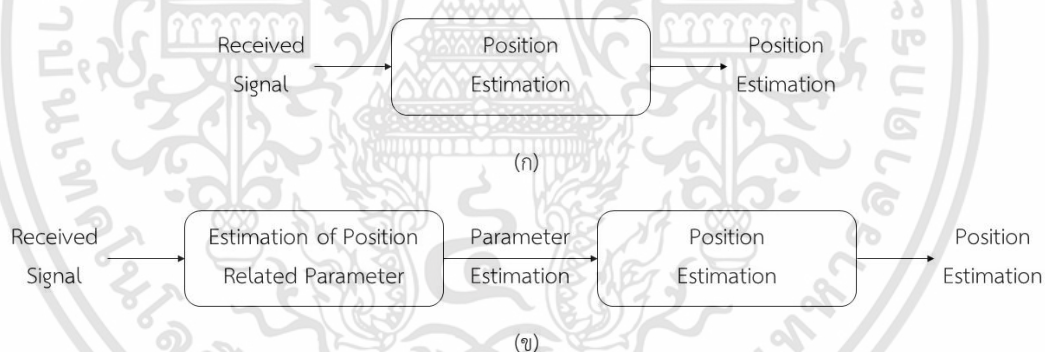
ระดับ 2 การรับรองความถูกต้องและการเข้ารหัส: ระดับ 2 เป็นระดับความปลอดภัยสูงสุดใน IEEE 802.15.6 และให้การสื่อสารที่ปลอดภัยโดยใช้กรอบการเข้ารหัสและการตรวจสอบสิทธิ์ที่ปลอดภัย ระดับนี้จะให้แนวทางแก้ไขปัญหาที่มีอยู่ทั้งหมดที่กล่าวมาในระดับก่อนหน้า เช่น ความสมบูรณ์ การป้องกันการตอบกลับ การรักษาความลับ การปกป้องความเป็นส่วนตัว และการตรวจสอบข้อความ [23] และ [24]

ในการสื่อสารโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ เมื่อโหนดหรือหน่วยควบคุมต้องการเข้าร่วมโครงข่ายใหม่หรือออกจากโครงข่ายควรเลือกระดับความปลอดภัยหนึ่งระดับเพื่อให้ตรงตาม

ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยที่จำเป็นตามที่กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้ควรตรวจสอบข้อกำหนดการรับรองความถูกต้องในระหว่างการส่งการสื่อสารแบบยูนิคาสต์จะสร้างมาสเตอร์คีย์ใหม่ (Master Key: MK) ในโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์สำหรับการสื่อสารแบบหลายผู้รับ หน่วยควบคุมจะแชร์คีย์ชั่วคราวของกลุ่ม (Group Temporal Key: GTK) ระหว่างฝ่ายต่าง ๆ ในโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ [25]

## 2.2 เทคนิคการหาตำแหน่ง

การหาตำแหน่งในระบบสื่อสารไร้สายมีอยู่สองลักษณะ คือ การหาตำแหน่งโดยตรง (Direct positioning) จากสัญญาณที่เดินทางระหว่างตำแหน่ง [26] และการหาตำแหน่งแบบสองขั้นตอน (Two-step positioning) ขั้นตอนแรกจะเป็นการเก็บค่าพารามิเตอร์จากสัญญาณแล้วจึงทำการประมาณหาตำแหน่งจากค่าพารามิเตอร์เหล่านั้น [27] การหาตำแหน่งทั้งสองลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้การหาตำแหน่งแบบสองขั้นตอนมากกว่าเนื่องจากการหาตำแหน่งโดยตรงมีความยุ่งยากมากกว่า อีกทั้งการหาตำแหน่งแบบสองขั้นตอนยังให้ผลที่ดีกว่าอีกด้วย



รูปที่ 2.2 การหาตำแหน่ง [28]

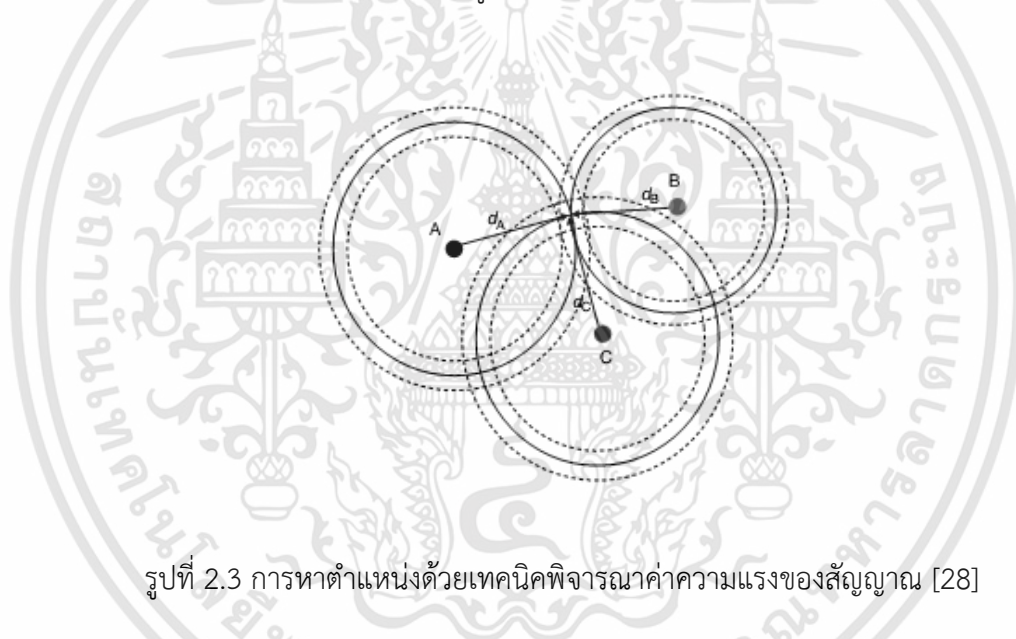
(ก) การหาตำแหน่งโดยตรง      (ข) การหาตำแหน่งแบบสองขั้นตอน

การหาตำแหน่งสามารถแบ่งออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงที่ไม่มีการอ้างอิงตำแหน่ง และช่วงที่อ้างอิงตำแหน่งจากฐานข้อมูล ช่วงที่อ้างอิงแบบแผนการรับข้อมูลบนพื้นฐานเวลาการมาถึงของสัญญาณ ค่าความแรงของสัญญาณความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณและทิศทางการมาถึงของสัญญาณ เมื่อพิจารณาที่ช่วงข้อมูลระหว่างโนดแล้วการประมาณตำแหน่งผ่านข้อมูลเหล่านี้ ช่วงที่แบบแผนที่อ้างอิงให้ความแม่นยำที่สูงกว่าช่วงที่ไม่มีการอ้างอิงแบบแผนสำหรับการหาตำแหน่งในแต่ละ

ละสภาวะแวดล้อม อย่างไรก็ตามในการหาตำแหน่งนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวัดจะขึ้นอยู่กับความต้องการความเที่ยงตรงและข้อจำกัดของเครื่องรับหรือเครื่องส่งอีกด้วย

### 2.2.1 เทคนิคพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ [28]

ค่าความแรงสัญญาณขึ้นอยู่กับรูปแบบการสูญเสียเชิงวิถี ระยะทางระหว่างสองโหนดสามารถประมาณค่าได้โดยการวัดพลังงานของสัญญาณที่รับได้ที่โหนดสุดท้าย เทคนิคหาระยะทางจะต้องอาศัยอย่างน้อย 3 โหนดอ้างอิงเพื่อพิจารณาจากตำแหน่งทั้ง 2 ทิศทางของโหนดที่เข้ามา โดยใช้การตัดกันของวงกลม 3 วง ซึ่งเป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะทางที่ภาครับอยู่ห่างจากสถานีฐานสามารถหาระยะทางโดยการคำนวณจากความแรงของสัญญาณที่รับได้ ด้วยวิธีการนี้จึงต้องใช้วงกลมอย่างน้อย 3 วงมาตัดกันจะเกิดเส้นตรง 3 เส้นเพื่อใช้หาพิกัดของตำแหน่งที่แน่ชัดซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า ไตรลาเทอร์เรชัน (Trilateration) แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การหาตำแหน่งด้วยเทคนิคพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ [28]

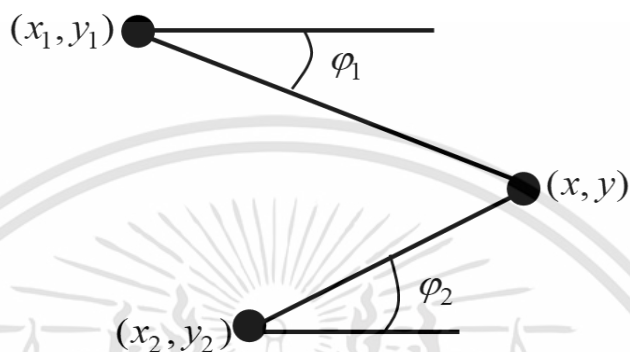
อย่างไรก็ตามการหาตำแหน่งโดยวัดค่าความแรงของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากการจางหายหลายวิถี (Multipath fading) และการลดทอนของสัญญาณเนื่องมาจากมีสิ่งกีดขวาง (Shadowing) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ ทำให้การหาตำแหน่งโดยวิธีนี้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

### 2.2.2 เทคนิคพิจารณาทิศทางการมาถึงของสัญญาณ [29]

เทคนิคเป็นการหาตำแหน่งโดยดูทิศทางของสัญญาณโดยการคำนวณความแตกต่างของเฟสของสัญญาณที่ไปถึงสายอากาศแต่ละตัวที่ไขว้ในชุดรับสัญญาณ โดยในการหาตำแหน่งนั้นต้องมีชุดสายอากาศที่ทำงานเหมือนกันทุกประการจำนวนหนึ่งซึ่งเรียกว่าสายอากาศแถวลำดับเฟส Phased

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

array antenna อย่างน้อย 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าการหาตำแหน่งด้วยวิธี AOA ทำได้ยากและเสียค่าใช้จ่ายสูงอีกทั้งยังต้องเจอปัญหาความผิดพลาดจากปรากฏการณ์การกระเจิง (Scattering) ของคลื่นวิทยุอีกด้วยจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้วิธีนี้ในการหาตำแหน่งมากนัก



รูปที่ 2.4 การหาตำแหน่งด้วยพิจารณาทิศทางในการมาถึงของสัญญาณ [29]

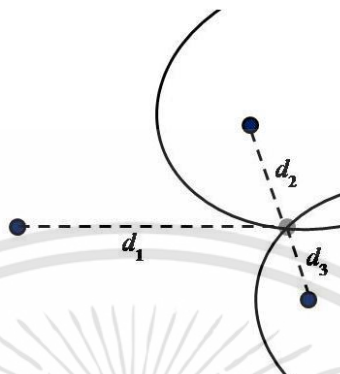
### 2.2.3 เทคนิคพิจารณาเวลาการมาถึงของสัญญาณ [28]

เทคนิคนี้มีลักษณะการพิจารณาหาตำแหน่งคล้ายกับเทคนิควัดค่าความแรงสัญญาณโดยพิจารณาพารามิเตอร์ที่ต่างกัน พิจารณาจากเวลาที่สัญญาณจากภาครับเดินทางมาถึงสถานีฐาน เป็นการพิจารณาตำแหน่งโดยใช้การตัดกันของวงกลม 3 วง เช่นเดียวกับเทคนิควัดค่าความแรงสัญญาณ โดยสามารถจะหาระยะทางได้โดยการคำนวณจากเวลาที่สัญญาณจากภาครับเดินทางมาถึงสถานีฐาน จึงจะได้ตำแหน่งที่แน่ชัด อย่างไรก็ตามเทคนิคการวัดเวลาการมาถึงของสัญญาณเมื่อนำมาใช้ภายในอาคารที่มีระยะทางที่สั้น เวลาที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณจะน้อยมากทำให้ยากในการพิจารณาหาตำแหน่งเมื่อใช้เทคนิคนี้

### 2.2.4 เทคนิควัดค่าความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ [28]

วิธีการหาตำแหน่งด้วยวิธีการวัดความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณมีลักษณะคล้ายกับวิธีการวัดเวลาการมาถึงของสัญญาณ เนื่องจากวิธีการวัดเวลาการมาถึงของสัญญาณพิจารณาเวลาที่สัญญาณใช้ในการเดินทางของแต่ละสถานีฐาน ส่วนวิธีการวัดความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณจะวัดความต่างของเวลาในแต่ละคู่สถานีฐานแล้วนำมาเขียนเป็นกราฟของไฮเปอร์โบลิก ซึ่งบอกถึงระยะห่างระหว่างคู่สถานีฐาน ดังนั้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการจึงต้องใช้เส้นกราฟอย่างน้อย 2 เส้นมาตัดกัน ซึ่งเกิดจากสถานีฐานอย่างน้อย 3 สถานี แสดงดังรูปที่ 2.5 สิ่งที่สำคัญของวิธีนี้คือแต่ละสถานีฐานต้องมีการประสานงานกัน ซึ่งในการทดลองสำหรับการหาตำแหน่งด้วยวิธีการ

นี้ต้องใช้วิธีการในการวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งที่ยู่ยากเมื่อเทียบกับวิธีการหาตำแหน่งด้วยวิธีการวัดเวลาการมาถึงของสัญญาณ

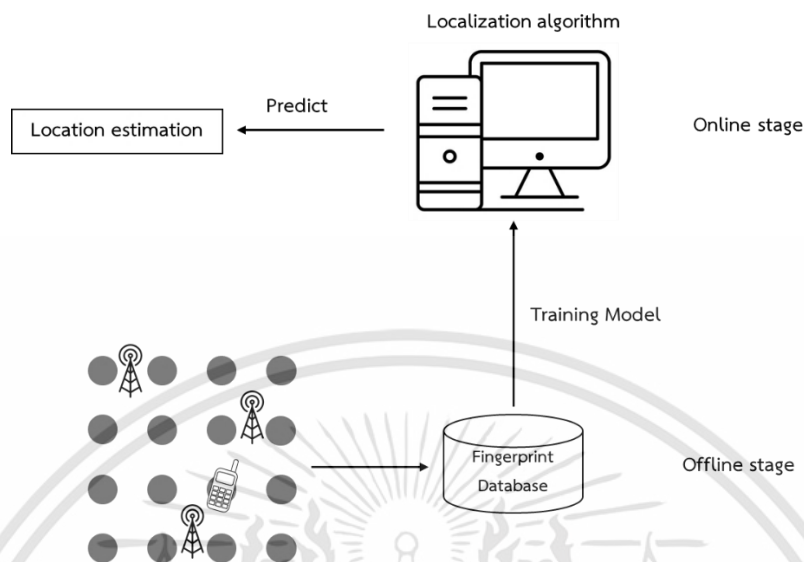


รูปที่ 2.5 การหาตำแหน่งโดยวิธีการวัดความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ [28]

### 2.2.5 เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ

เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือเป็นวิธีการพิจารณาความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งดังรูปที่ 2.6 โดยที่จะเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการนำมาพิจารณาฐานข้อมูลชุดที่ 1 และเก็บค่าข้อมูลชุดที่ 2 ซึ่งเป็นข้อมูลทดสอบ แล้วนำข้อมูลทั้งสองชุดเปรียบเทียบความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งนั้น ๆ หลังจากนั้นทำการแสดงตำแหน่งโดยเปรียบเทียบค่าที่ใกล้เคียงที่สุดโดยเทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สถานีฐานจำนวนมากเหมือนกับเทคนิคอื่น ๆ เพราะเมื่อมีสถานีฐานเพียงอย่างน้อย 1 สถานีฐานก็สามารถหาตำแหน่งได้ ข้อเสียของการพิจารณาหาตำแหน่งด้วยวิธีการนี้คือ จำเป็นต้องมีพื้นที่ที่เหมาะสมในการจัดเก็บข้อมูลที่ต้องการพิจารณาในปริมาณมากเพื่อเป็นในฐานข้อมูลได้ และยังต้องใช้เวลานานในการเก็บค่าเอกลักษณ์นอกจากนั้นแล้วหากบริเวณที่ต้องการหาตำแหน่งมีพื้นที่ขนาดใหญ่มาก เทคนิคนี้จึงไม่นิยมนำมาใช้สำหรับการหาตำแหน่งภายนอกอาคารอีกด้วย [30]

โดยเทคนิคสแกนลายนิ้วมือจะมีการเก็บค่าข้อมูลพารามิเตอร์ของสัญญาณที่ต้องการนำมาพิจารณาไว้ในฐานข้อมูลก่อนซึ่งจะเรียกขั้นตอนนี้ว่าขั้นตอนการฝึกฝน (Training process) หลังจากนั้นในกระบวนการหาตำแหน่งพารามิเตอร์ของสัญญาณจะถูกเก็บแล้วนำมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลทำการเก็บไว้ก่อนหน้า หลังจากนั้นจะทำการแสดงตำแหน่งที่มีค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณแตกต่างกันน้อยที่สุด ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่าขั้นตอนการทดสอบ (Testing process)



รูปที่ 2.6 การหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคสแกนลายนิ้วมือ [31]

สำหรับในขั้นตอนการฝึกฝนนั้น เป็นการเก็บค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณซึ่งจะแสดงถึงเอกลักษณ์เฉพาะของตำแหน่ง ซึ่งจะเรียกว่าชุดข้อมูลฝึกฝน ( $S$ ) โดยสามารถเขียนให้อยู่ ในรูปของสมการดังนี้

$$S = \{(m_1, p_1), (m_2, p_2), \dots, (m_n, p_n)\} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $m_i$  คือ พารามิเตอร์ของสัญญาณในตำแหน่งที่  
 $p_i = (x_i, y_i)$  คือ ตำแหน่งสำหรับปริภูมิ 2 มิติ ของพิกัดในแนวแกน  $x$  และ  $y$   
 $n$  คือ จำนวนข้อมูลฝึกทั้งหมด

จากนั้นชุดข้อมูลจะถูกนำไปประมวลผลก่อนที่จะเก็บลงฐานข้อมูล ในส่วนขั้นตอนการทดสอบจะเป็นการเก็บพารามิเตอร์ของสัญญาณชนิดเดียวกันกับที่เก็บไว้ในฐานข้อมูล และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่ในฐานข้อมูล

การวิเคราะห์หาความแม่นยำของเทคนิคสแกนนิ้วมือ บนพื้นฐานโครงข่ายพื้นที่ไร้สาย จะพิจารณาในเทอมของค่าความผิดพลาดระยะทาง โดยกำหนดพิกัดตำแหน่ง  $(x_c, y_c)$  เป็นพิกัดตำแหน่งที่ได้จากเทคนิคสแกนลายนิ้วมือและกำหนดให้พิกัดตำแหน่ง  $(x_e, y_e)$  เป็นพิกัดที่ถูกต้อง ค่าความผิดพลาดของระยะทาง  $e_d$  จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$e_d = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2} \quad (2.2)$$

ค่าความผิดพลาดของระยะทางนี้จะพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ถึงความแม่นยำของการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคสแกนลายนิ้วมือบนพื้นฐานโครงข่ายพื้นที่ไร้สายซึ่งมีความแม่นยำมากเมื่อค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อย [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้เทคนิคสแกนลายนิ้วมือนั้นจะนำพารามิเตอร์ของลายลักษณะทดสอบไปเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ของลายลักษณะต้นแบบในทุกตำแหน่งโดยคำนวณหาความแตกต่างของพารามิเตอร์ระหว่างลายลักษณะต้นแบบและลายลักษณะทดสอบในแต่ละตำแหน่ง ขั้นตอนในการคาดคะเนตำแหน่งจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดและอัลกอริทึมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดจำนวน  $k$  ตัว

#### 2.2.5.1 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square: LS)

ในการคาดคะเนตำแหน่งโดยการใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด [33] นั้นเมื่อกำหนดให้ลายลักษณะต้นแบบ ( $S_i$ ) ซึ่งจะมีจำนวน  $m$  จุดและลายลักษณะทดสอบเป็น ( $s$ ) สามารถคำนวณค่าความแตกต่างของลายลักษณะ ( $d_i$ ) โดยใช้ระยะทางยุคลิดดังสมการที่ (2.3)

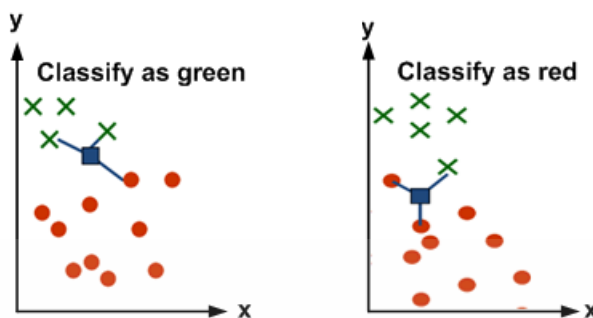
$$d_i = \sqrt{\sum_{i=1}^m (S_i - s)^2} \quad (2.3)$$

พิกัดตำแหน่งที่คาดคะเนได้จากเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ ( $x_c, y_c$ ) สามารถนิยามได้จากพิกัดตำแหน่งที่มีค่าความแตกต่างของลายลักษณะที่น้อยที่สุดดังสมการที่ (2.4)

$$(x_c, y_c) = \arg_{x,y} \min d_i(x, y) \quad (2.4)$$

#### 2.2.5.2 อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน $k$ ตัว (k-Nearest Neighbor Algorithm: kNN)

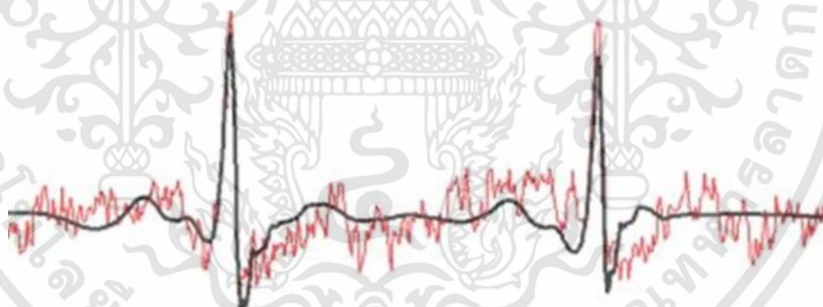
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน  $k$  ตัว [34] เป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับปัญหาแบบการจำแนกประเภท อัลกอริทึมนี้แตกต่างจากอัลกอริทึมอื่นที่ไม่ต้องใช้ข้อมูลฝึกฝนในการสร้างแบบจำลอง แต่จะใช้ข้อมูลนั้นมาเป็นตัวแบบจำลองเลยในการใช้งาน อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน  $k$  ตัว นั้นต้องกำหนดค่าตัวเลขจำนวนเต็มบวกให้กับ  $k$  ด้วย ซึ่งค่านี้จะเป็นตัวบอกจำนวนของกรณีที่จะต้องค้นหาในการทำนายกรณีใหม่ อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน  $k$  ตัว เช่น 1-NN, 2-NN, 3-NN, ..., k-NN โดยที่  $k$  แทนเลขจำนวนเต็มบวกเช่น 3-NN หมายถึงอัลกอริทึมนี้จะค้นหา 3 กรณีที่มีลักษณะใกล้เคียงกรณีใหม่ (3 nearest cases) ในการทำนายกรณีครั้งต่อไป ดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 เทคนิคการวิเคราะห์และประเมินผลโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านที่ใกล้เคียงที่สุดจำนวน  $k$  ตัว

### 2.3 อัลกอริทึมแบบคลื่น [35]

การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบบคลื่นจะทำการปรับปรุงในโดเมนของเวลาเพื่อลดสัญญาณรบกวนในระบบการสื่อสาร มีการนำอัลกอริทึมแบบคลื่นมาใช้ในการหาตำแหน่งในลักษณะการหาตำแหน่งแบบเทคนิคพิจารณาเวลาในการมาถึงของสัญญาณ เพราะกระบวนการคลื่น (CLEAN) มีข้อดีที่สามารถขจัดสัญญาณรบกวนได้จึงสามารถเห็นสัญญาณภาครับในแต่ละช่วงเวลาได้ชัดเจนยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.8 การใช้อัลกอริทึมแบบคลื่นเพื่อลดสัญญาณรบกวนแสดงให้เห็นสัญญาณภาครับ [36]

ในปริภูมิตฤษฎีนี้นำเสนอขั้นตอนการคลื่นโดยได้มีการประยุกต์ใช้บนร่างกายมนุษย์ได้มีการปรับปรุงจากรูปแบบที่มีอยู่เดิมเพื่อสามารถนำมาใช้ในลักษณะช่องสัญญาณการส่งผ่านบนร่างกายมนุษย์เพื่อลดสัญญาณรบกวน การจางหาย (Fading) ซึ่งเป็นผลมาจากเนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์และยังผลให้เห็นสัญญาณภาคส่งชัดเจนขึ้น ขั้นตอนการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.8 และมีขั้นตอนวิธีการดังนี้

ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการคลีน

1. ทำการหา Dirty map ( $d_t$ ) คือ สัญญาณรับ ( $v_r$ ) ในโดเมนเวลา (Channel Impulse Response: CIR) โดยที่

$$v_r = IFT \{V_r\} \quad (2.5)$$

และ

$$V_r = V_t * H_c \quad (2.6)$$

2. ทำการหา Auto-correlation ( $C_{au}$ ) ระหว่างสัญญาณส่ง ( $v_t$ ) ในโดเมนเวลา ดังสมการที่ (2.5) และทำการหา Cross-correlation ( $C_{cc}$ ) ระหว่างสัญญาณส่ง ( $v_t$ ) และสัญญาณรับ ( $v_r$ ) ดังสมการที่ (2.6)

$$C_{au}(\tau) = v_t(t) \otimes v_t(t) \quad (2.7)$$

$$C_{cc}(\tau) = v_r(t) \otimes v_t(t) \quad (2.8)$$

3. ทำการสร้างบีมสังเคราะห์ (Synthesis Beam:  $a_k$ ) โดยการหาค่าสูงสุดของ  $C_{cc}$  ที่แต่ละตำแหน่งของแต่ละข้อมูล

$$a_k = \max |C_{cc}(\tau)| \quad (2.9)$$

4. ทำการกำหนดเกณฑ์โดยที่ถ้าค่าของบีมสังเคราะห์น้อยกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้จะกลับไปทำข้อ 3

5. ถ้าค่าของบีมสังเคราะห์มากกว่าเกณฑ์จะเป็นไปตามสมการที่ (2.8) และ (2.9)

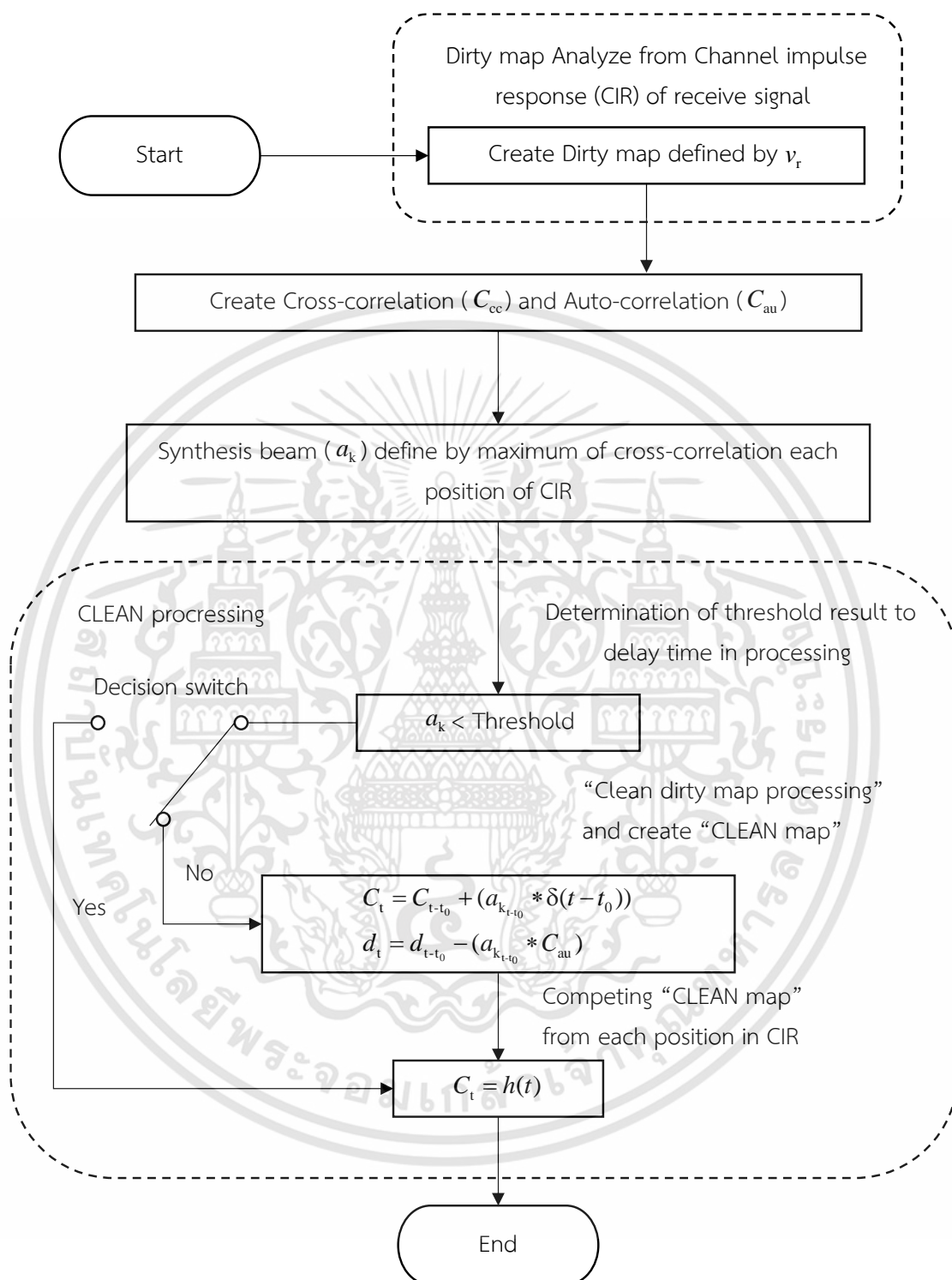
$$d_t = d_{t-t_0} - (a_{k-t_0} * C_{au}) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $a_k$  คือ บีมสังเคราะห์ ขั้นตอนนี้เรียกว่า CLEAN Dirty map

$$C_t = C_{t-t_0} + (a_{k-t_0} * \delta(t-t_0)) \quad (2.11)$$

ซึ่งจะได้  $C_t = h(t)$  โดยเรียก  $C_t$  ที่เป็นช่องสัญญาณอิมพัลส์ (CIR) ใหม่กว่า CLEAN map หรือ CLEAN component

6. ได้ช่องสัญญาณอิมพัลส์ใหม่เรียกว่า CLEAN map ( $h(t)$ )



รูปที่ 2.9 แผนภูมิขั้นตอนวิธีการคลีนสำหรับช่องสัญญาณการส่งผ่านบนร่างกายมนุษย์ [37]

## 2.4 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์การทดสอบสายอากาศกับร่างกายมนุษย์

ผลที่ได้จากการวัดจะถูกนำไปประมวลผลผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งประกอบด้วยด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

### 2.4.1 การสูญเสียเชิงวิถี [38]

ในระบบสื่อสารไร้สายนั้นเป้าหมายหลักของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นคือการคาดการณ์ถึงค่าความสูญเสียเชิงวิถี การสูญเสียเชิงวิถีเป็นอัตราส่วนระหว่างการสูญเสียของกำลังงานทางด้านส่งเทียบกับกำลังงานทางด้านรับแสดงค่าระดับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงของระบบ ในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นเป้าหมายหลักของการจำลองการแพร่กระจายคลื่น คือ การคาดการณ์ถึงค่าความสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากการแพร่กระจายผ่าน ช่องสัญญาณโดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างระดับสัญญาณที่ใช้ส่งและระดับกำลังงานที่รับได้ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบลดังแสดงในสมการที่ (2.12)

$$PL(d)[dB] = 20 \log \left( \frac{V_t(t)}{V_r(t)} \right) \quad (2.12)$$

โดย  $V_t(t)$  คือ ระดับสัญญาณที่ใช้ส่ง

$V_r(t)$  คือ ระดับสัญญาณที่รับได้

โดยในสมการที่ (2.12) ได้กำหนดให้ขนาดของสัญญาณที่ใช้ส่งมีค่าเท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้นสามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้ ดังแสดงในสมการที่ (2.13)

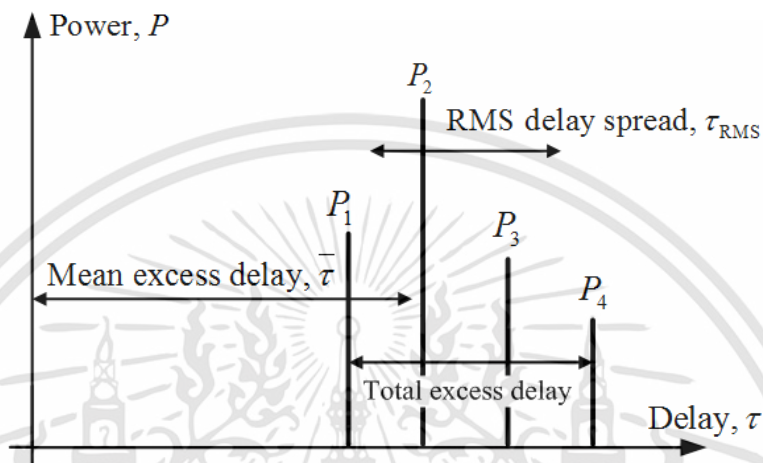
$$PL(d)[dB] = -20 \log[\max |v_r(t, d)|] \quad (2.13)$$

### 2.4.2 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน [39]

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่นิยมนำมาวิเคราะห์ให้เห็นถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับที่เวลาต่าง ๆ กัน อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสัญญาณที่มีการสะท้อนหลายทิศทางหรือคลื่นหลายวิถีดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.10 โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานของสัญญาณที่ได้รับเทียบกับเวลาที่เข้ามาถึงและนอกจากนั้นสามารถนำไปพิจารณาถึงผลการกระจายทางเวลาอันประกอบไปด้วย ค่าเฉลี่ยเวลาประวิง และค่าการแผ่ของเวลาประวิง RMS โดยมีการคำนวณดังสมการที่ (2.14)

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2 \tau_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n P(\tau_i) \tau_i}{\sum_{i=1}^n P(\tau_i)} \quad (2.14)$$

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



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างภาพหน้าตัดข้างการประวิงเวลา [40]

### 2.4.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ [40]

ค่าความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณที่รับได้นั้นสามารถวิเคราะห์และแสดงให้เห็นโดยการพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ข้าม (Cross correlation) ที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้กับค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์รากที่สองของผลคูณระหว่างค่าอัตสหสัมพันธ์ (Auto correlation) ของสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้โดยสมการที่นิยามค่าดังกล่าวแสดงดังสมการที่ (2.15) ถึงสมการ (2.18) ตามลำดับ

$$C = \frac{\max |r_{ab}(\tau)|}{\max |\sqrt{r_a(\tau)r_b(\tau)}|} \quad (2.15)$$

โดยสมการนิยามค่าสหสัมพันธ์ข้ามคือ

$$r_{ab}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_t(\tau)v_r(t+\tau)dt \quad (2.16)$$

และสมการนิยามค่าอัตสหสัมพันธ์คือ

$$r_a(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_t(\tau)v_t(t+\tau)dt \quad (2.17)$$

$$r_b(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_r(\tau)v_r(t+\tau)dt \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

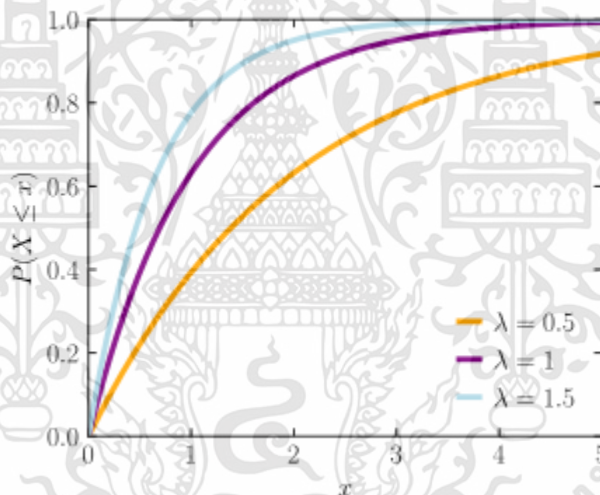
โดยที่  $v_i(\tau)$  คือ สัญญาณส่ง  
 $v_r(\tau)$  คือ สัญญาณที่รับได้

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

[41]

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเป็นการแสดงการแจกแจงที่มาสะสมด้วยกันโดยจะดูที่ความชันของเส้นกราฟซึ่งในทางทฤษฎีเส้นกราฟจะมีความเป็นเส้นตรง แต่ในความเป็นจริงนั้นต้องดูจากการทดสอบซึ่งค่าของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมสามารถหาได้จากสมการที่ (2.19)

$$F(r) = P_r(r \leq R) = \int_0^R \rho(r) dr = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.11 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสม [41]

จากรูปที่ 2.11 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมที่ถูกนำมาแสดงข้อมูลผลการทดลองโดยกำหนดค่าจำนวนจริงให้กับ  $\lambda$  ซึ่งเป็นแฟคเตอร์ถ่วงน้ำหนักและในแนวแกน  $x$  คือ ค่าของระยะทางความผิดพลาด E เมื่อเทียบกับ CDF

## 2.5 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์อธิบายถึงข้อกำหนดในการพัฒนาโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ และถึงกล่าวประวัติความเป็นมาของมาตรฐาน IEEE 802.15.4j ที่มีโปรโตคอล คือ เทคโนโลยีซิกบี ข้อพิจารณาด้านความถี่ที่สามารถใช้งานได้ในแต่ละภูมิภาคได้แก่ แถบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 868 เมกะเฮิร์ตซ์ สำหรับการใช้งานในยุโรป 902 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 928 เมกะเฮิร์ตซ์สำหรับระบบประยุกต์ในอเมริกาเหนือ และ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ สำหรับการใช้งานทั่วโลกตามที่ได้มีการกำหนดการใช้งาน และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีซิกบีในด้านเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ภายในบ้านเรือน ด้านระบบอุตสาหกรรม และด้านสุขภาพการแพทย์ อีกทั้งกล่าวถึงเทคนิคการหาตำแหน่ง เช่น เทคนิคพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ เทคนิคพิจารณาทิศทางการมาถึงของ เทคนิคพิจารณาเวลาในการมาถึงของสัญญาณ เทคนิคพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ และเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ ปริมาณงานที่เลือกใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือในการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ เนื่องจากเทคนิคนี้นำเอาคุณลักษณะของช่องสัญญาณซึ่งเกิดจากการจางหายหลายวิธีมาสร้างเป็นเอกลักษณ์ต้นแบบ แล้วบันทึกลงฐานข้อมูลจากนั้นตำแหน่งต่าง ๆ จะถูกประมวลโดยการนำเอกลักษณ์ทดสอบของตำแหน่งนั้น ๆ เปรียบเทียบกับเอกลักษณ์ต้นแบบซึ่งได้บันทึกไว้ในฐานข้อมูล นอกจากนี้พิจารณาความเที่ยงตรงและแม่นยำของการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์เพื่อจัดสัญญาณรบกวน และการจางหาย อันเป็นสาเหตุมาจากคลื่นหลายวิธี ทำให้สัญญาณส่งมีความชัดเจนมากขึ้น และได้มีการแสดงพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์การทดสอบสายอากาศกับร่างกายมนุษย์ ได้แก่ การสูญเสียเชิงวิถี ภาพหน้าตัดข้าง ประสิทธิภาพ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและขั้นตอนการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและรายละเอียดการออกแบบและสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ และการออกแบบจำลองการวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์

#### 3.1 สายอากาศแผ่นไมโครสตริป

ไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ และใช้ในการเชื่อมโยงชิ้นส่วนวงจรต่าง ๆ ของวงจรไมโครเวฟ เนื่องจากไมโครสตริปมีขนาดเล็กจึงเหมาะสำหรับทำวงจรรวมของไมโครเวฟ (Microwave Integrated Circuit: MIC) แต่ก็มีข้อจำกัดที่สามารถรับกำลังได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่น นอกจากนี้ยังมีค่าการลดทอนสัญญาณค่อนข้างสูงด้วย ดังนั้นจึงใช้ในการส่งผ่านและการจัดการกับสัญญาณที่มีระดับต่ำและในบริเวณจำกัด เช่น ภายในแผ่นวงจรพิมพ์เดียวกัน เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแนวคิดในการวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครสตริป การออกแบบไมโครสตริป ชิ้นส่วนวงจรไมโครสตริปแบบต่าง ๆ และตัวอย่างวงจรไมโครสตริปที่มีใช้อย่างกว้างขวางในทางปฏิบัติ [42]

##### 3.1.1 ประเภทของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป [42]

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีหลายประเภท แต่แบ่งตามการใช้งานได้ 3 ประเภทดังนี้

3.1.1.1 สายอากาศแบบแพร่กระจายคลื่นตามแนวกว้าง เพื่อการสื่อสารตามแนวกว้างของแผ่นทองแดง สายอากาศแบบนี้จะมีทิศทางการส่งสัญญาณตั้งฉากกับแผ่นทองแดง

3.1.1.2 สายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นตามแนวยาว เพื่อการสื่อสารในทิศทางตัดขวางของแผ่นทองแดง สายอากาศแบบนี้จะมีทิศทางการส่งสัญญาณตามแนวเดียวกับแผ่นทองแดง

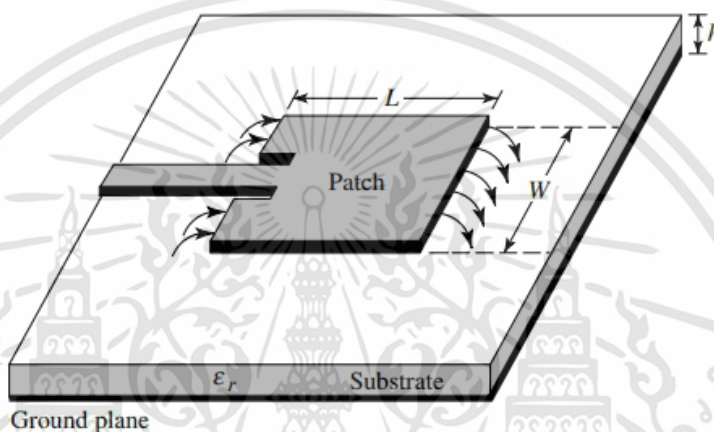
3.1.1.3 สายอากาศอื่น ๆ เป็นสายอากาศที่ออกแบบมาเฉพาะการใช้งานชนิดหนึ่ง ๆ อาจมีมากกว่าสองทิศทางหรืออาจปรับเปลี่ยนทิศทางได้ตามความถี่ที่ใช้งาน

##### 3.1.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

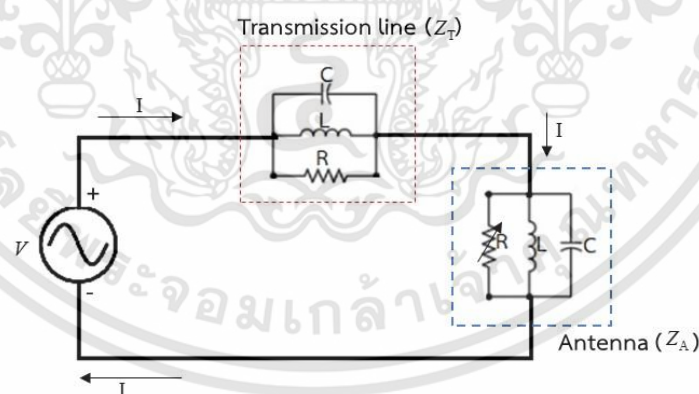
สายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 โครงสร้างโดยทั่วไปประกอบด้วยแผ่นไมโครสตริปอยู่บนวัสดุฐานรอง (Substrate) ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของวัสดุฐานรองเป็นผิวโลหะ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองบริเวณที่อยู่ระหว่างสตริปกับผิวโลหะด้านล่าง โดยวัสดุฐานรองมีความสูงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และความกว้างของสตริปนั้นขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ต้องการ ส่วนที่

เป็นแผ่นไมโครสตริปซึ่งเป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีหลายรูปทรง เช่น สี่เหลี่ยมมุมฉาก สามเหลี่ยม วงกลม วงแหวน เป็นต้น โครงสร้างที่นิยมใช้กัน คือ สี่เหลี่ยมและวงกลม

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปเป็นแถบนำไฟฟ้าโดยปกติแล้วจะมีความกว้างน้อยมากเมื่อเทียบกับแผ่นไมโครสตริป สายส่งไมโครสตริปนั้นสร้างง่าย แมตซ์ง่ายโดยการควบคุมตำแหน่งแทรก และง่ายต่อการสร้างแบบจำลอง วงจรสมมูลของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 3.2 [7]



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 3 มิติ [7]



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป [7]

### 3.1.3 ส่วนประกอบของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

แม้ว่าสายอากาศชนิดนี้จะมีรูปร่างที่แตกต่างกันไปหลายแบบ แต่ส่วนประกอบยังคงเหมือนกัน คือ หัวเชื่อมต่อเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมระหว่างสายอากาศกับอุปกรณ์ส่งข้อมูล โดยปกติแล้วจะใช้ตามมาตรฐาน SMA ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลแต่มาตรฐาน SMA นี้ก็สามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญตให้ำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่าสิบชนิดเพื่อให้ตรงกับการใช้งานมากที่สุด ถ้าใช้ผิดประเภทแล้วจะไม่สามารถต่อกันได้ หรือถ้าได้ก็ จะลดประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณลดลง และแผ่นทองแดงเป็นฐานของทองแดง ซึ่งทองแดงนี้ คือ สายอากาศขนาดเล็กนั่นเอง เมื่อความถี่สูงขึ้นจึงมีขนาดเล็กลงจนไม่สามารถคงรูปเดิมได้จึงต้องมีแผ่น ทองแดงมายึดโครงสร้างของสายอากาศเอาไว้

แผ่นทองแดงนี้มีหลายชนิดในประเทศไทย แผ่นทองแดงที่มีวัสดุฐานรองชนิดเอพาร์ โฟร์ หรือแผ่นทองแดงหนา 1.6 มิลลิเมตร มีใช้อย่างแพร่หลายที่สุดเนื่องจากราคาถูกและสามารถหา ได้ง่าย แบ่งย่อยได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบด้านเดียวและแบบสองด้านตามการใช้งานสามารถหาซื้อได้ ตามแหล่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป แต่แผ่นทองแดงที่มีวัสดุฐานรองชนิดเอพาร์โฟร์มีข้อเสีย คือ การส่งสัญญาณที่ไม่ดีมากนัก [42]

## 3.2 คุณสมบัติของสายอากาศ

### 3.2.1 อินพุตอิมพีแดนซ์ [43]

อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็นอิมพีแดนซ์ที่หัวของสายอากาศซึ่งจะพิจารณาว่า อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศและคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ จะเห็นได้ว่าในกรณี ที่  $Z_{in}$  เท่ากับ  $Z_0$  จะเกิดการแมตช์อย่างสมบูรณ์จะทำให้ไม่เกิดการสะท้อนกลับ ถ้ากรณีที่  $Z_{in}$  ไม่ เท่ากับ  $Z_0$  ไม่เกิดการแมตช์จะทำให้เกิดการสะท้อน ซึ่งแสดงอัตราส่วนของแรงดันต่อกระแสหัวต่อ ทั้งสองหรืออัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กในจุดที่กำหนด สามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (3.1)$$

เมื่อ $X_{in}$	คือ ความต้านทานเชิงจินตภาพ (โอห์ม)
$R_{in}$	คือ ความต้านทาน (โอห์ม) โดย $R_{in} = R_r + R_L$
$R_r$	คือ ความต้านทานการแผ่กำลังงาน (โอห์ม)
$R_L$	คือ ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ (โอห์ม)

### 3.2.2 การสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) [43]

การย้อนกลับของสายอากาศแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหลดเมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่ง และสายอากาศไม่แมตช์กัน การสูญเสียย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันถ้า สายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเป็น 0 เดซิเบล สายอากาศจะเกิดการสะท้อนกลับ แต่ถ้า สายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเป็นอนันต์สายอากาศไม่เกิดการสะท้อนกลับถือว่าเป็นสายอากาศ ที่ดีสามารถหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$RL(dB) = -20 \log |\Gamma| \quad ; \quad 0 \leq RL \leq \infty \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $RL$  คือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (เดซิเบล)  
 $\Gamma$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (Complex reflection coefficient)  
 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนสามารถหาได้จากอัตราส่วนผลต่างและผลรวมระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์กับคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ ถ้าสายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนเป็น 0 นั่นคือสายอากาศจะไม่เกิดการสะท้อนกลับถือว่าเป็นสายอากาศที่ดี แต่ถ้าสายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนเป็น 1 สายอากาศจะเกิดการสะท้อนกลับสามารถหาได้จากสมการที่ (3.3)

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}; 0 \leq |\Gamma| \leq 1 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $Z_{in}$  คือ อินพุตอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)  
 $Z_0$  คือ คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ (โอห์ม)

### 3.2.3 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของแรงดัน [43]

อัตราส่วนของค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุดต่อค่าน้อยที่สุดในระบบสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของแรงดันเท่ากับ 1 สายอากาศไม่เกิดการสะท้อนกลับถือว่าเป็นสายอากาศที่ดี แต่ถ้าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของแรงดันเป็นอนันต์สายอากาศจะเกิดการสะท้อนกลับ สามารถหาได้จากสมการที่ (3.4)

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}; 1 \leq VSWR \leq \infty \quad (3.4)$$

เมื่อ  $V_{max}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุด (โวลต์)  
 $V_{min}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าน้อยที่สุด (โวลต์)

### 3.2.4 อัตราขยายกำลัง (Power gain) [7]

อัตราขยายกำลังของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทางโดยรวมค่าประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (3.5)

$$G = e_t D \quad (3.5)$$

เมื่อ  $G$  คือ อัตราขยาย  
 $e_t$  คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ  
 $D$  คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

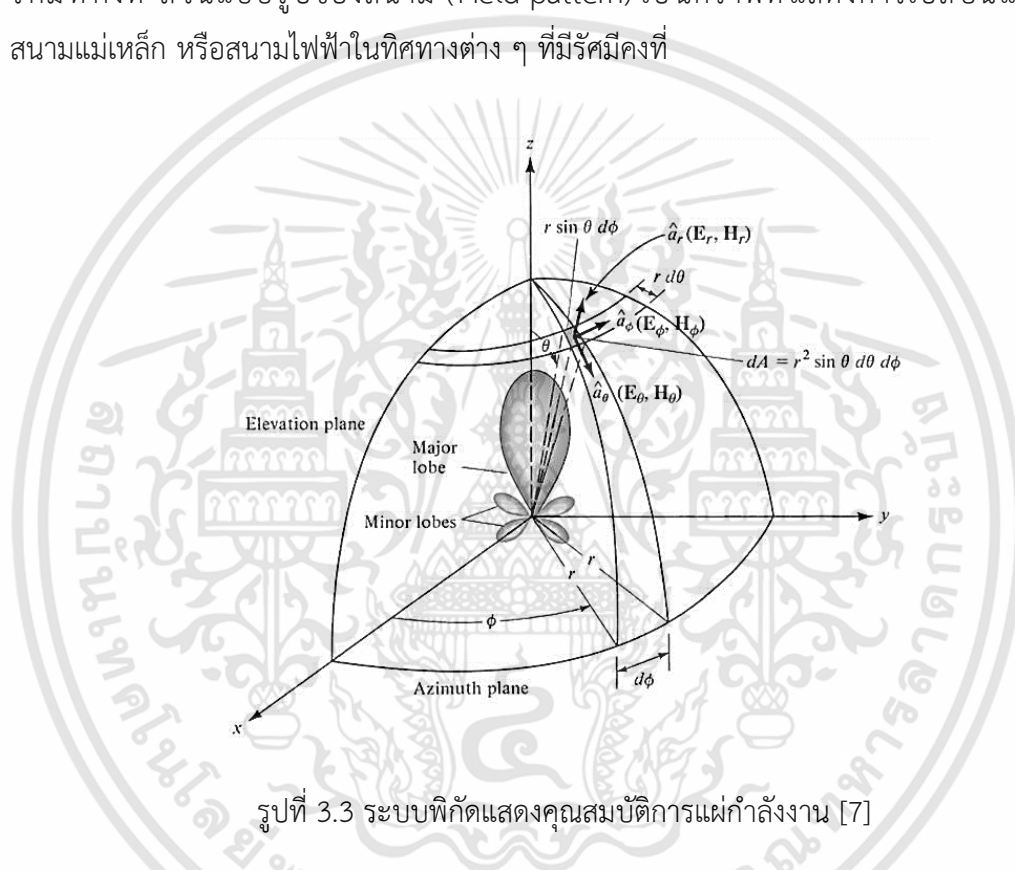
โดยทั่วไปมักจะแสดงค่าอัตราขยายเป็นหน่วยเดซิเบล สามารถหาได้จากสมการที่ (3.6)

$$G(dB) = 10\log(e_r D) \quad (3.6)$$

### 3.2.5 แบบรูปการแผ่กำลังงาน (Radiation pattern) [7]

รูปภาพแสดงคุณสมบัติของการแผ่กำลังงาน ส่วนมากมักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far field) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

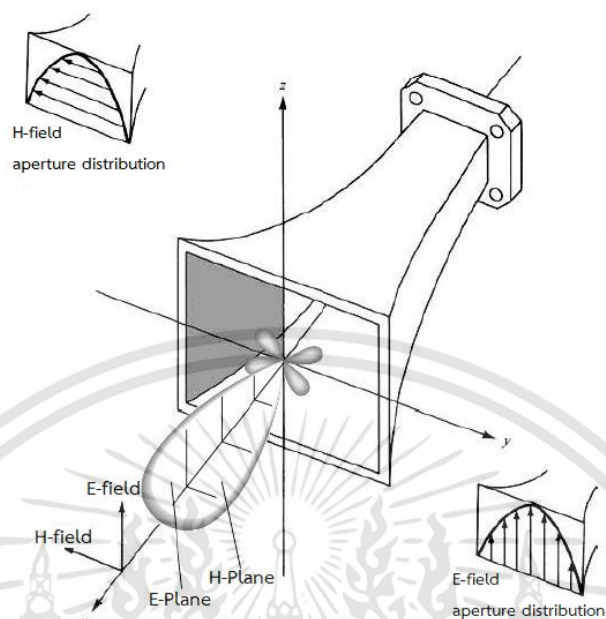
จากรูปที่ 3.3 แสดงแบบรูปของกำลัง (Power pattern) ของสายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่คงที่ ส่วนแบบรูปของสนาม (Field pattern) เป็นกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่



รูปที่ 3.3 ระบบพิกัดแสดงคุณสมบัติการแผ่กำลังงาน [7]

#### 3.2.5.1 แบบรูปหลัก (Principal pattern)

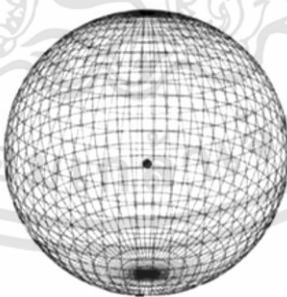
แบบรูปหลักของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สำหรับสายอากาศที่มีโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้าจะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปในระนาบสนามแม่เหล็กจะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแผ่กำลังงานที่ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบรูปหลักระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร [7]

### 3.2.5.2 แบบรูปการแผ่กำลังงาน

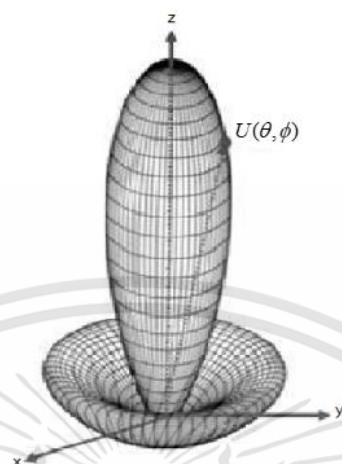
1) แบบรูปไอโซทรอปิก (Isotropic pattern) เป็นสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้น มีคุณสมบัติแผ่กำลังงานเท่ากันในทุกทิศทางใช้ในการเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติและทิศทางของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบรูปไอโซทรอปิก [7]

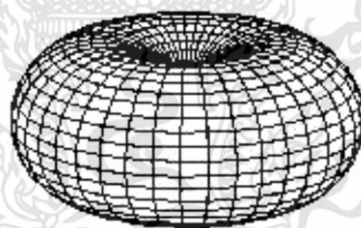
2) แบบรูปชี้ทิศทาง (Directional pattern) เป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติการแผ่กำลังงาน หรือรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แบบรูปชี้ทิศทาง [7]

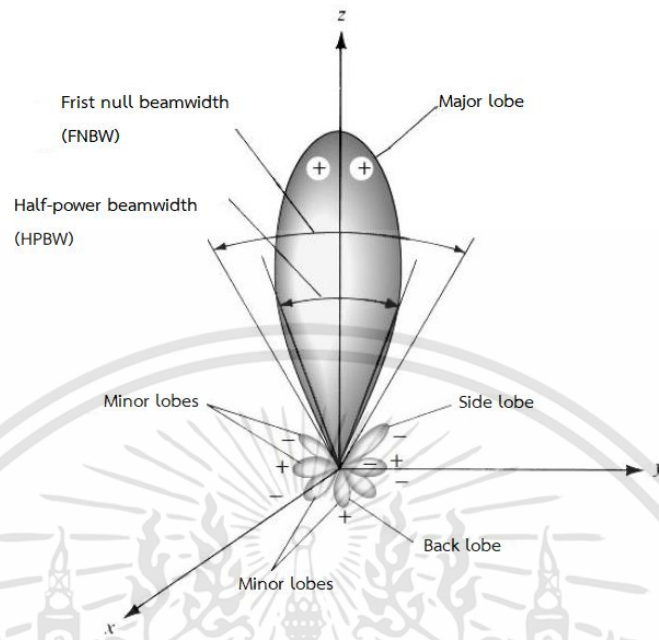
3) แบบรูปรอบทิศทางเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติการแผ่กำลังงานรอบทิศทางหรือไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุท (Azimuth plane) แต่มีทิศทางในระนาบเอเลเวชัน (Elevation pattern) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



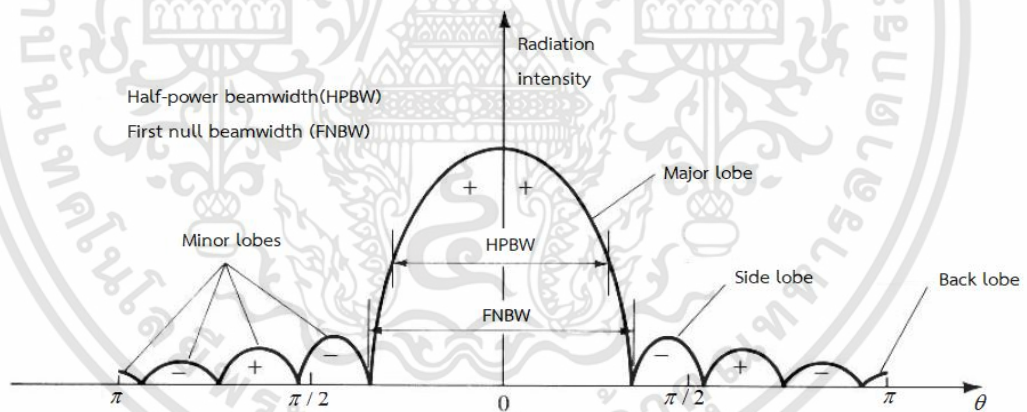
รูปที่ 3.7 แบบรูปรอบทิศทาง [7]

### 3.2.5.3 ลำคลื่นของแบบรูปการแผ่กำลังงาน (Radiation pattern lobes)

ลำคลื่นของแบบรูปการแผ่กำลังงานเป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแผ่กำลังงาน และเป็นส่วนที่มีความเข้มของการแผ่กำลังงานต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 ลำคลื่นในรูปแบบเชิงขั้วแบบ 3 มิติ [7]



รูปที่ 3.9 ลำคลื่นในรูปแบบเชิงเส้นแบบ 2 มิติ [7]

จากรูปที่ 3.8 และ รูปที่ 3.9 จะประกอบไปด้วยลำคลื่นแบบต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ลำคลื่นหลัก (Major lobe หรือ main lobe) เป็นลำคลื่นที่มีทิศทางการแผ่กำลังงานแรงมากที่สุด
- 2) ลำคลื่นย่อย (Minor lobe) เป็นลำคลื่นที่มีทิศทางการแผ่กำลังงานแรงน้อยกว่าลำคลื่นหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

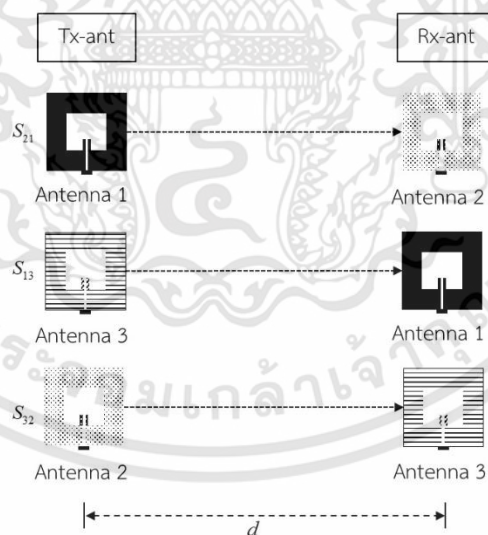
3) ลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ติดกับลำคลื่นหลัก และอยู่ในระนาบเดียวกับลำคลื่นหลัก

4) ลำคลื่นย่อยด้านหลัง (Back lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ตรงข้ามกับระนาบลำคลื่นหลัก

### 3.2.6 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ (Antenna transfer function) [44]

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศสามารถวัดได้ด้วยวิธีสามสายอากาศ (Three antenna method) ดังรูปที่ 3.10 โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ สามารถวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตามฟังก์ชันการถ่ายโอนนี้เป็นผลลัพธ์ของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศภาคส่งและภาครับในพื้นที่อากาศว่าง

ฟังก์ชันการถ่ายโอนพื้นที่ว่างคำนวณจากระยะทางระหว่างสายอากาศ เพื่อทราบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่กำลังทดสอบ (Antenna Under Test: AUT) ด้านสายอากาศภาครับจะต้องทราบล่วงหน้าว่าฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศภาคส่งซึ่งมักจะเป็นสายอากาศมาตรฐาน เป็นข้อมูลการเปรียบเทียบการวัดโดยรวมสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 3.10 แบบจำลองวิธีสามสายอากาศ

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณมาตรฐานของสายอากาศ ตามมาตรฐานการปรับการเปรียบเทียบวิธีสามสายอากาศ ได้ถูกเสนอขึ้นเพื่อการวัดปัจจัยสายอากาศที่ซับซ้อน ด้วยวิธีการนี้ ต้องใช้สายอากาศแบบขั้วเชิงเส้น 3 ตัว แต่ไม่จำเป็นต้องเหมือนกัน การวัด 3 ครั้งจะดำเนินการโดยใช้ชุดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบทั้งหมดของสายอากาศทั้ง 3 ตัวซึ่งไปยังทิศทางเดียวกันกับที่แสดงในรูปที่ 3.10 ผลลัพธ์คือชุดของสมการ 3 สมการพร้อมกันดังสมการ

$$S_{21}(f) = H_1(f)H_f(f, d)H_2(f) \quad (3.7)$$

$$S_{13}(f) = H_3(f)H_f(f, d)H_1(f) \quad (3.8)$$

$$S_{32}(f) = H_2(f)H_f(f, d)H_3(f) \quad (3.9)$$

โดย  $H_i(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของสายอากาศ  $i$   $S_{ji}$  คือ ผลการวัดโดยการใช้สายอากาศภาคส่ง  $i$  และสายอากาศภาครับ  $j$   $d$  คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศ และ  $H_f(f, d)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนเชิงซ้อนของพื้นที่อากาศว่าง จากนั้นเราสามารถประเมินฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของสายอากาศ โดยใช้สมการดังนี้

$$H_1(f) = \sqrt{\frac{S_{21}(f)S_{32}(f)}{S_{13}(f)H_f(f, d)}} \quad (3.10)$$

$$H_2(f) = \sqrt{\frac{S_{21}(f)S_{13}(f)}{S_{32}(f)H_f(f, d)}} \quad (3.11)$$

$$H_3(f) = \sqrt{\frac{S_{32}(f)S_{13}(f)}{S_{21}(f)H_f(f, d)}} \quad (3.12)$$

ขั้นตอนที่ 2 วัดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่กำลังทดสอบ ด้วยการใช้สายอากาศมาตรฐานและสายอากาศที่กำลังทดสอบเป็นสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ ตามลำดับ ฟังก์ชันการถ่ายโอนระหว่างพอร์ตสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับแสดงดังสมการที่ (3.13)

$$S_{21}(f) = H_{AUT}(\theta, \varphi, f)H_f(f, d)H_{Std}(f) \quad (3.13)$$

และฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่กำลังทดสอบได้ดังสมการที่ (3.14)

$$H_{AUT}(\theta, \varphi, f) = \frac{S_{21}(f)}{H_f(f, d)H_{Std}(f)} \quad (3.14)$$

### 3.3 การออกแบบและการสร้างสายอากาศ

#### 3.3.1 การออกแบบและสร้างสายอากาศ [45]

การออกแบบและสร้างสายอากาศมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มต้นจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ และจำลองการสร้างสายอากาศโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองเทคโนโลยีไมโครเวฟ (Computer Simulation Technology Microwave Studio: CST Microwave Studio) จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการ หากยังไม่ได้สายอากาศตามคุณสมบัติของสายอากาศตามที่ต้องการให้นำกลับมาแก้ไขใหม่ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ เช่น ความกว้างของแผ่นไมโครสตริป ความยาวของแผ่นไมโครสตริป ความกว้างของระนาบพื้น และความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

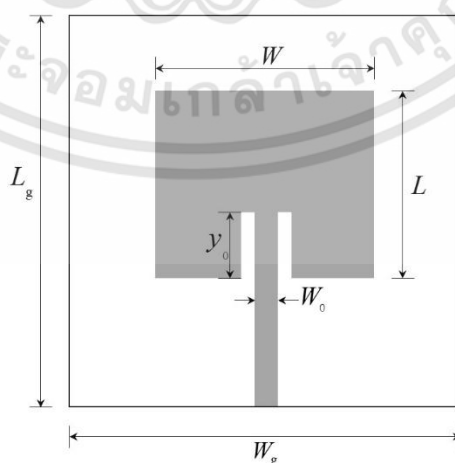
ยาวของระนาบพื้น เป็นต้น แต่ถ้าสายอากาศมีคุณสมบัติตามที่ต้องการแล้วจึงทำการสร้างสายอากาศตามที่จำลองไว้ พร้อมทั้งวัดผลการทดสอบคุณสมบัติ 6 ส่วน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราการขยาย แบบรูปการแผ่กำลังงาน และฟังก์ชันการถ่ายโอน

### 3.3.2 เหตุผลที่เลือกใช้สายอากาศแผ่นไมโครสตริป

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB) และใช้ในการเชื่อมโยงชิ้นส่วนวงจรต่าง ๆ ของวงจรไมโครเวฟ เนื่องจากสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีขนาดเล็กจึงเหมาะสำหรับทำวงจรรวมไมโครเวฟ และสายอากาศแผ่นไมโครสตริปเป็นที่ได้รับความนิยมมาก มีบทบาทสำคัญมากของระบบการสื่อสารไร้สายในปัจจุบัน โครงสร้างไม่ซับซ้อน มีลักษณะแบนราบ ราคาไม่แพง สามารถสร้างและออกแบบได้ง่าย แต่ก็มีข้อจำกัดที่สามารถรับกำลังงานได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่น นอกจากนี้ยังมีค่าการลดทอนสัญญาณค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงใช้ในการส่งผ่านและการจัดการกับสัญญาณที่มีระดับต่ำและในบริเวณจำกัด เช่น ภายในแผ่นวงจรพิมพ์อันเดียวกัน เป็นต้น

### 3.3.3 การออกแบบสายอากาศแผ่นไมโครสตริป [7]

ออกแบบสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่มีความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ จากรูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปประกอบด้วย  $W$  คือ ความกว้างของแผ่นไมโครสตริป  $L$  คือ ความยาวของแผ่นไมโครสตริป  $W_g$  คือ ความกว้างของระนาบพื้น  $L_g$  คือ ความยาวของระนาบพื้น  $W_0$  คือ ความกว้างของสายป้อนไมโครสตริป และ  $y_0$  คือ ความยาวตัวป้อน ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 2 มิติ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของแผ่นไมโครสตริบคำนวณได้จากสมการ (3.15)

$$W = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.15)$$

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.4 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4.3 + 1}}$$

$$= 38.37 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อ  $c_0$  คือ ความเร็วแสง (เมตรต่อวินาที)

$f_r$  คือ ความถี่ที่ใช้งาน (เฮิรตซ์)

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุฐานรอง

ค่าดัชนีการหักเหของแสงที่มีประสิทธิภาพของแผ่นเป็นพารามิเตอร์สำคัญในขั้นตอนการออกแบบของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริบ การแผ่รังสีที่เดินทางจากแผ่นไปยังพื้นดินจะผ่านอากาศและบางส่วนผ่านวัสดุพิมพ์ (fringing) ทั้งอากาศและสารตั้งต้นมีค่าไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน ดังนั้นเราจึงพบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีประสิทธิผล โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีประสิทธิผลคำนวณได้จากสมการ (3.16)

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}, \frac{W}{h} > 1 \quad (3.16)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{4.3 + 1}{2} + \frac{4.3 - 1}{2} \left( 1 + \frac{12 \times 1.6 \times 10^{-3}}{38.37 \times 10^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$= 4.00$$

เมื่อ  $h$  คือ ความหนาของไดอิเล็กทริก

เนื่องจากการเชื่อมต่อไฟฟ้า ดังนั้นขนาดของสายอากาศจึงเพิ่มขึ้นตามความยาวที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta L$ ) ซึ่งความยาวที่เพิ่มขึ้นของแผ่นไมโครสตริบ ( $\Delta L$ ) จะคำนวณได้จากสมการ (3.17)

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \left[ \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right] \quad (3.17)$$

$$\Delta L = 1.6 \times 10^{-3} \times 0.412 \left[ \frac{(4.00 + 0.3) \left( \frac{38.37 \times 10^{-3}}{1.6 \times 10^{-3}} + 0.264 \right)}{(4.00 - 0.258) \left( \frac{38.37 \times 10^{-3}}{1.6 \times 10^{-3}} + 0.8 \right)} \right]$$

$$= 0.74 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นความยาวของแผ่นไมโครสตริบคำนวณได้จากสมการ (3.18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \frac{c_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L \quad (3.18)$$

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.4 \times 10^9 \sqrt{4.00}} - 2 \times 0.74 \times 10^{-3}$$

$$= 29.76 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อทราบความยาวและความกว้างของแผ่นไมโครสตริปแล้ว จึงคำนวณหาค่าความยาวของระนาบพื้นและความกว้างของระนาบพื้นซึ่งมีขนาดเท่ากับวัสดุพิมพ์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$L_g = 6h + L \quad (3.19)$$

$$L_g = 6 \times 1.6 \times 10^{-3} + 29.76 \times 10^{-3}$$

$$= 39.36 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$W_g = 6h + W \quad (3.20)$$

$$W_g = 6 \times 1.6 \times 10^{-3} + 38.37 \times 10^{-3}$$

$$= 47.97 \text{ มิลลิเมตร}$$

และอิมพีแดนซ์คุณสมบัติคำนวณได้จากสมการที่ (3.21)

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \ln \left[ \frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right], & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \left[ \frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (3.21)$$

$$50 = \frac{120\pi}{\sqrt{4.00} \left[ \frac{W_0}{1.6 \times 10^{-3}} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_0}{1.6 \times 10^{-3}} + 1.444 \right) \right]}$$

แก้สมการได้

$$W_0 = 2.60 \text{ มิลลิเมตร}$$

ความยาวตัวป้อนของแผ่นไมโครสตริปสามารถคำนวณโดยใช้ความกว้างของแผ่นไมโครสตริปคำนวณได้โดย [46]

$$y_0 = 10^{-4} (0.001699 \times \epsilon_r^7 + 0.13761 \times \epsilon_r^6 - 6.1783 \times \epsilon_r^5 + 93.187 \times \epsilon_r^4 - 682.69 \times \epsilon_r^3 + 2561.9 \times \epsilon_r^2 - 4043 \times \epsilon_r + 6697) \times \frac{L}{2} \quad (3.22)$$

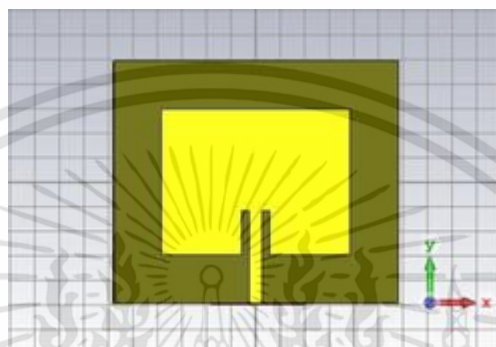
$$y_0 = 10^{-4} (0.001699 \times 4.3^7 + 0.13761 \times 4.3^6 - 6.1783 \times 4.3^5 + 93.187 \times 4.3^4 - 682.69 \times 4.3^3 + 2561.9 \times 4.3^2 - 4043 \times 4.3 + 6697) \times \frac{29.76 \times 10^{-3}}{2}$$

$$y_0 = 9.06 \text{ มิลลิเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 จำลองการออกแบบสายอากาศแผ่นไมโครสตริปด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio [46]

การออกแบบสายอากาศแผ่นไมโครสตริปโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แบบจำลองสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบแผ่น

การจำลองผลการออกแบบสายอากาศแผ่นไมโครสตริป เพื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และอินพุตอิมพีแดนซ์ ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับไม่เป็นไปตามทฤษฎีในการออกแบบ จึงทำการปรับค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่มีช่วงความถี่ครอบคลุมช่วงความถี่ปฏิบัติการตั้งแต่ 2.2 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.6 จิกะเฮิรตซ์ มีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.1 การสร้างไมโครสตริปแบบแผ่นใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดเอพอาร์ 4 ทองแดง 2 หน้า หน้าที่มีค่าคงที่ฉนวนไฟฟ้าของวัสดุฐานรอง ( $\epsilon_r$ ) 4.2 ความสูงของฉนวนไฟฟ้าวัสดุฐานรอง ( $h$ ) 1.6 มิลลิเมตร และความสูงของทองแดง 0.035 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

พารามิเตอร์	ค่า
ช่องความถี่	2.2 ถึง 2.6 จิกะเฮิรตซ์
ความถี่ใช้งาน ( $f_r$ )	2.4 จิกะเฮิรตซ์
ค่าคงที่ฉนวนไฟฟ้าของวัสดุฐานรอง ( $\epsilon_r$ )	4.3
ความสูงของฉนวนไฟฟ้าวัสดุฐานรอง ( $h$ )	1.6 มิลลิเมตร
ความสูงของทองแดง	0.035 มิลลิเมตร
ความกว้างของระนาบพื้น ( $W_g$ )	47.97 มิลลิเมตร
ความยาวของระนาบพื้น ( $L_g$ )	39.36 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

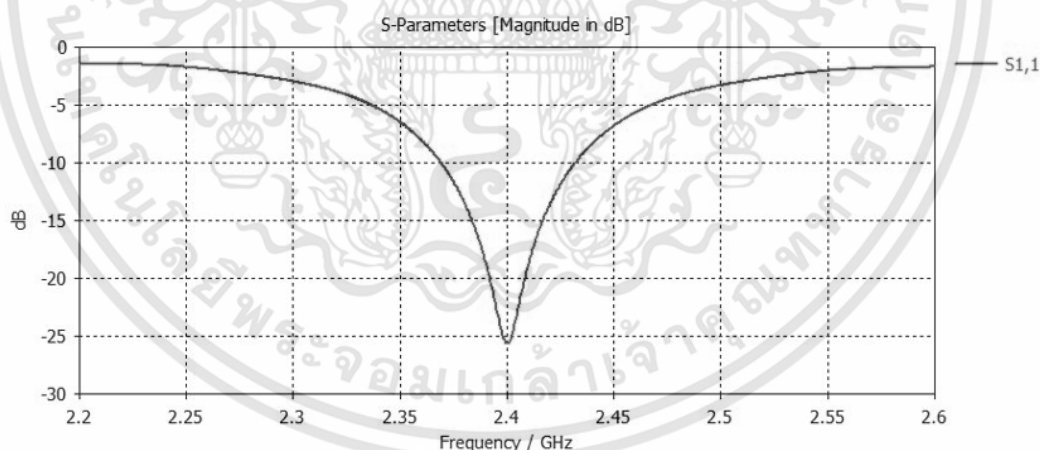
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกาสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริป (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า
ความกว้างของแผ่นไมโครสตริป ( $W$ )	38.37 มิลลิเมตร
ความยาวของแผ่นไมโครสตริป ( $L$ )	29.76 มิลลิเมตร
ความกว้างของตัวป้อน	1.50 มิลลิเมตร
ความยาวของตัวป้อน ( $y_0$ )	9.06 มิลลิเมตร
ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป ( $W_0$ )	2.60 มิลลิเมตร

#### 3.3.4.1 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน

สัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นพารามิเตอร์ของสายอากาศที่บ่งบอกสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสัญญาณจากโหลดซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมรับได้ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $-10$  เดซิเบล หากมากกว่าพลังงานทั้งหมดจะสะท้อนออกและไม่มีการแผ่รังสี

จากรูปที่ 3.13 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมรับได้อยู่ในช่วงความถี่ 2.36 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.44 จิกะเฮิรตซ์ ซึ่งตรงตามที่ต้องการใช้งานที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 3.13 สัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{1,1}|$  ที่ได้จากแบบจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

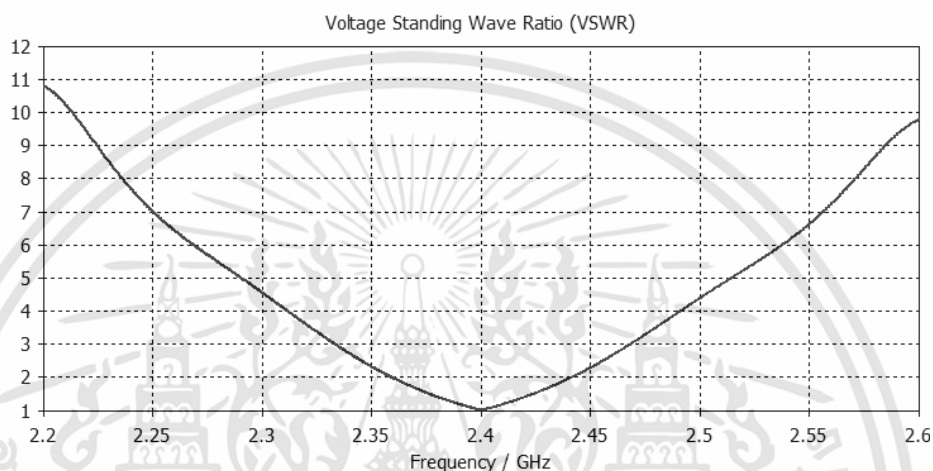
#### 3.3.4.2 ผลการจำลองอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน คือ อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายส่งสัญญาณ อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันเป็นค่าวัดปริมาณที่โหลดผิดไปจากภาวะที่โหลดแมตซ์มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือน้อยเท่าใด อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันยิ่งมีค่ามากขึ้นจะยิ่งทำให้ไม่เกิดความแมตซ์มากขึ้นด้วย ซึ่งอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ยอมรับได้ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2

จากรูปที่ 3.14 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ยอมรับได้อยู่ในช่วงความถี่ 2.36 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.44 จิกะเฮิรตซ์ ดังนั้นสายอากาศที่จำลองขึ้นจึงมีความแมตซ์ที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์

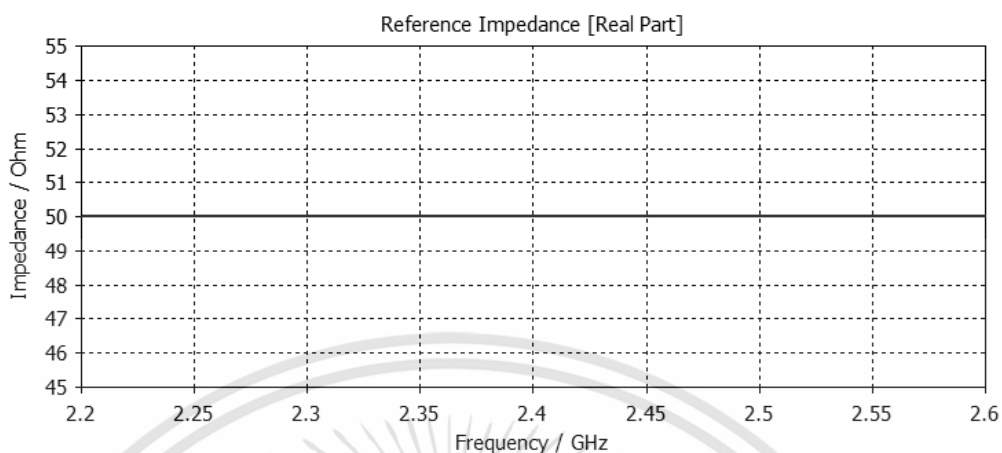


รูปที่ 3.14 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

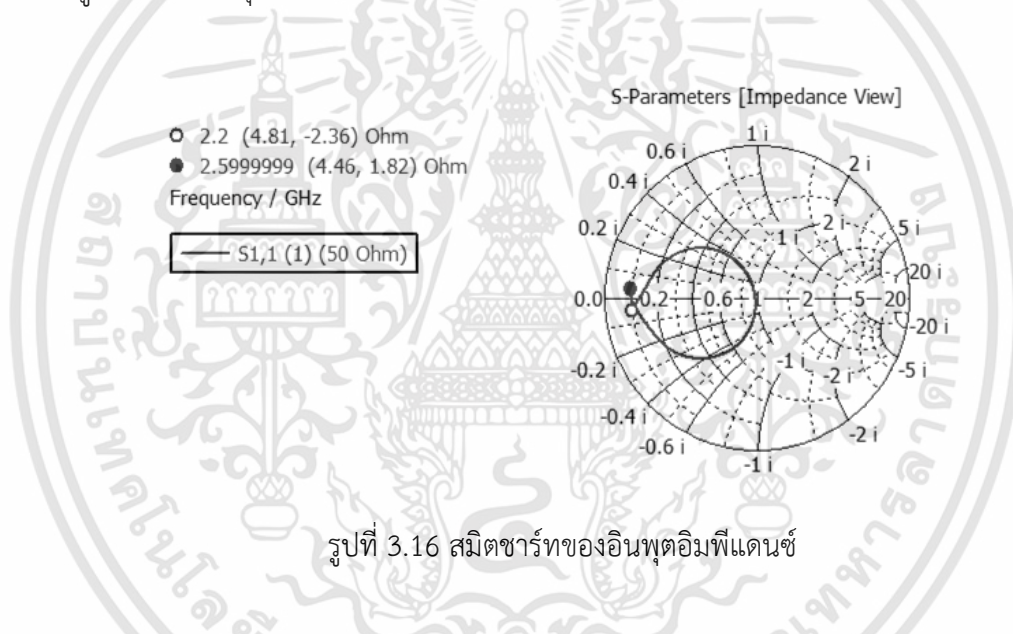
#### 3.3.4.3 ผลการจำลองอินพุตอิมพีแดนซ์

อินพุตอิมพีแดนซ์มาตรฐานของระบบ คือ 50 โอห์ม ดังนั้นจึงออกแบบให้มีอินพุตอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม เพื่อการเชื่อมต่อแมตซ์หรือไม่มีการสะท้อนกลับที่จุดเชื่อมต่อ และใช้สายส่งสัญญาณที่มีความต้านทานจำเพาะ 50 โอห์ม

จากรูปที่ 3.15 อินพุตอิมพีแดนซ์มีการแมตซ์กับมาตรฐานของระบบตลอดย่านความถี่ 2.2 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.6 จิกะเฮิรตซ์ และจากสมิทชาร์ทของอินพุตอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.2 จิกะเฮิรตซ์ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $4.81 - i2.36$  โอห์ม ที่ความถี่ 2.6 จิกะเฮิรตซ์ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $4.46 + i1.82$  โอห์ม และมีการแมตซ์กับมาตรฐานของระบบที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 3.15 อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

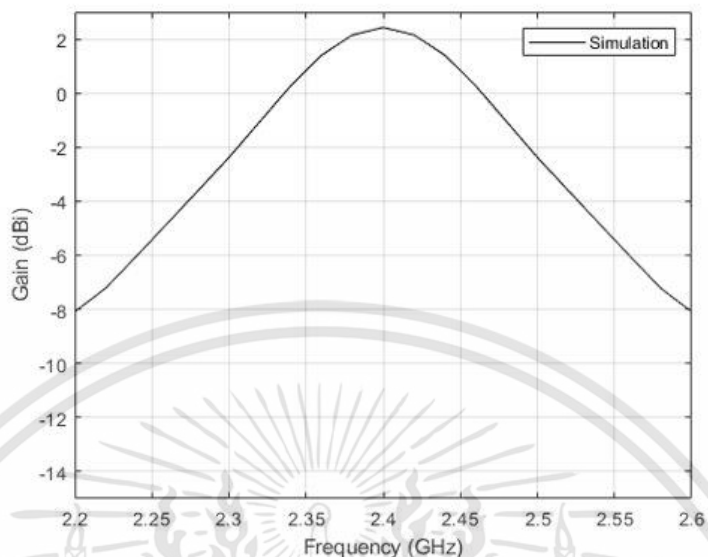


รูปที่ 3.16 สมิตซาร์ทของอินพุตอิมพีแดนซ์

#### 3.3.4.4 ผลการจำลองอัตราการขยาย

อัตราการขยาย คือ กำลังส่งของสายอากาศเมื่อเทียบกับสายแบบไอโซทรอปิกโดยอัตราการขยายที่ได้จากแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงดังรูป 3.17

จากรูปที่ 3.17 แสดงอัตราการขยายในช่วงความถี่ 2.2 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.6 จิกะเฮิรตซ์ มีที่ความถี่ 2.2 จิกะเฮิรตซ์ มีอัตราการขยายเท่ากับ -8.08 ดีบีไอ ที่ความถี่ 2.6 จิกะเฮิรตซ์ มีอัตราการขยายเท่ากับ -8.08 ดีบีไอ และที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ มีอัตราการขยายสูงสุดเท่ากับ 2.43 ดีบีไอ

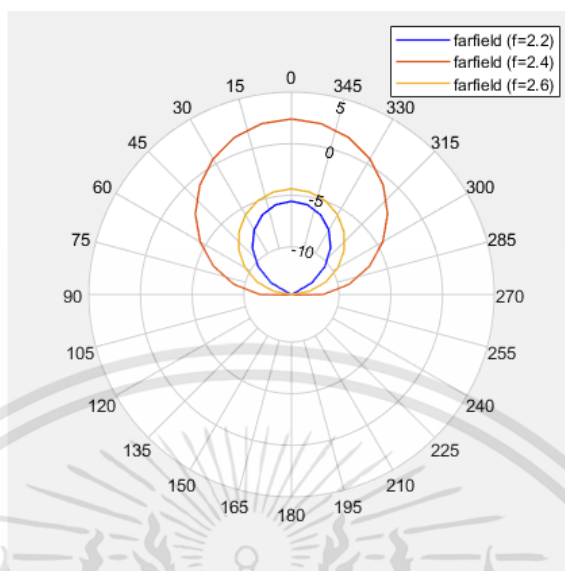


รูปที่ 3.17 อัตราขยายที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

#### 3.3.4.5 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังงาน

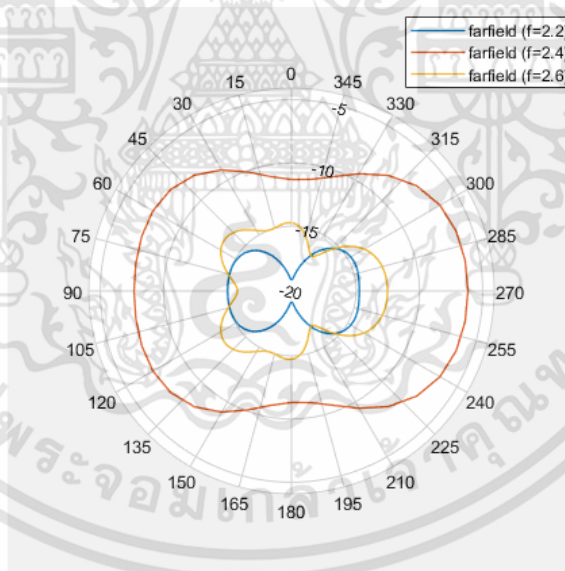
การแผ่กำลังงานของสายอากาศมักคิดในบริเวณสนามระยะไกล แบบรูปการแผ่พลังงาน แสดงแบบรูปของกำลังงานของสายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีคงที่ ส่วนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่

จากรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 จำลองแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริบที่ 3 ความถี่ คือ ความถี่ต้น 2.2 จิกะเฮิร์ตซ์ (เส้นน้ำเงิน) ความถี่กลาง 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ (เส้นสีส้ม) และความถี่ปลาย 2.6 จิกะเฮิร์ตซ์ (เส้นสีเหลือง)



รูปที่ 3.18 แบบรูปการแผ่กำลังงานบนระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST

Microwave Studio



รูปที่ 3.19 แบบรูปการแผ่กำลังงานบนระนาบแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST

Microwave Studio

### 3.3.5 การสร้างสายอากาศ

สร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ ตามขนาดที่ได้คำนวณและออกแบบ โดยมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.20

#### 3.3.5.1 ตัดแผ่นวงจรพิมพ์ตามขนาดที่ต้องการและนำมาทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการพิมพ์แบบลงบนกระดาษภาพถ่ายผิวมันขนาด 85 แกรม ดังรูปที่ 3.21 จากนั้นตัดแผ่นวงจรพิมพ์ขนาดเท่ากับแบบที่ได้ออกแบบไว้

### 3.3.5.2 ลอกลายแบบลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้เตรียมเอาไว้ก่อนหน้า

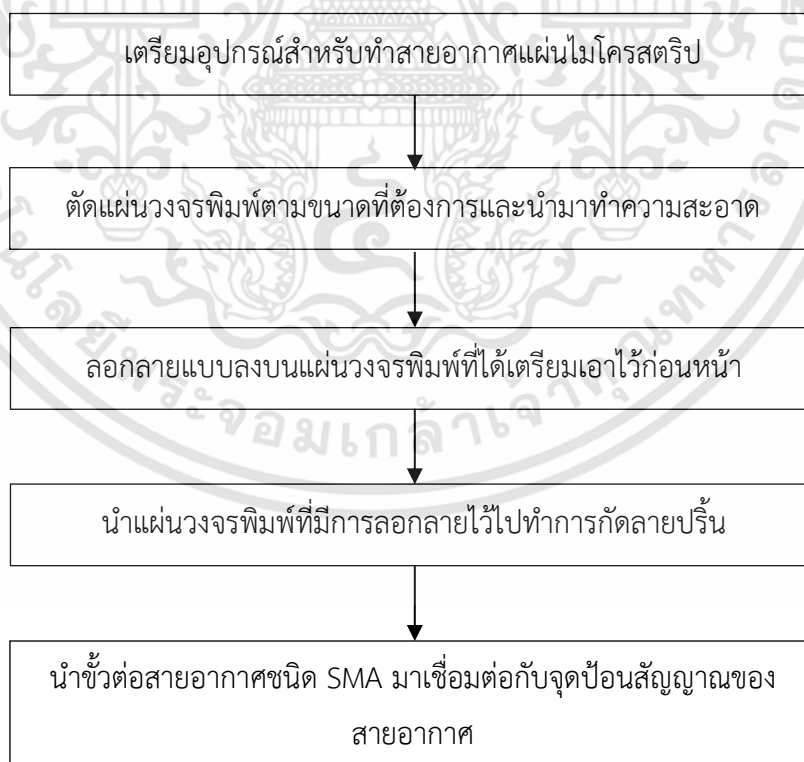
นำลายปริ้นวางทับกับแผ่นวงจรพิมพ์ที่ตัดและทำความสะอาดแล้วไม่ให้แบบขยับ จากนั้นเทน้ำยาลอกลายลงไปรอสักครู่ ลอกกระดาษออกอย่างเบามือเพื่อไม่ให้หมึกที่ลอกลงบนแผ่นวงจรพิมพ์เสียหาย

### 3.3.5.3 นำแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีการลอกลายไว้ไปทำการกัดลาย

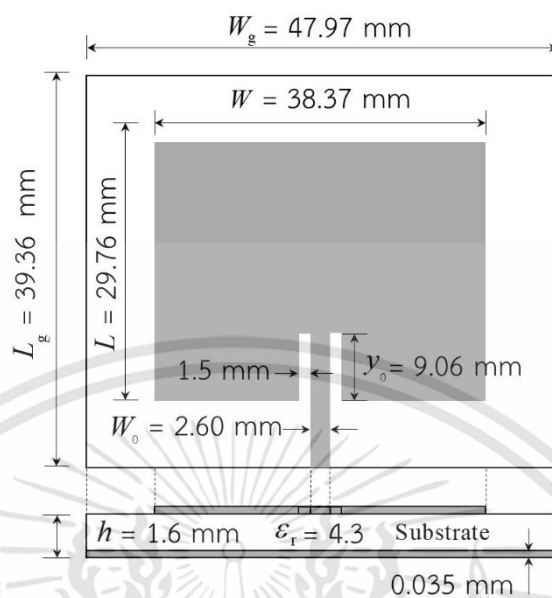
นำแผ่นวงจรพิมพ์ที่ทำการลอกลายแล้ว แช่ลงในน้ำยากัดปริ้น หมั่นเขย่าให้น้ำยากัดปริ้นมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลาเพื่อช่วยเร่งประสิทธิภาพการกัดปริ้น หลังจากกัดทองแดงส่วนที่ไม่ต้องการออกหมดแล้วทำการแช่ละลายหมึกบนแผ่นวงจรพิมพ์ออก

### 3.3.5.4 นำขั้วต่อเชื่อมต่อกับจุดป้อนสัญญาณสายอากาศสายอากาศโดยการบัดกรี

นำสายอากาศที่ได้มาเชื่อมต่อกับขั้วต่อสายอากาศชนิด SMA ที่จุดป้อนสัญญาณสายอากาศด้วยการบัดกรี ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.20 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์

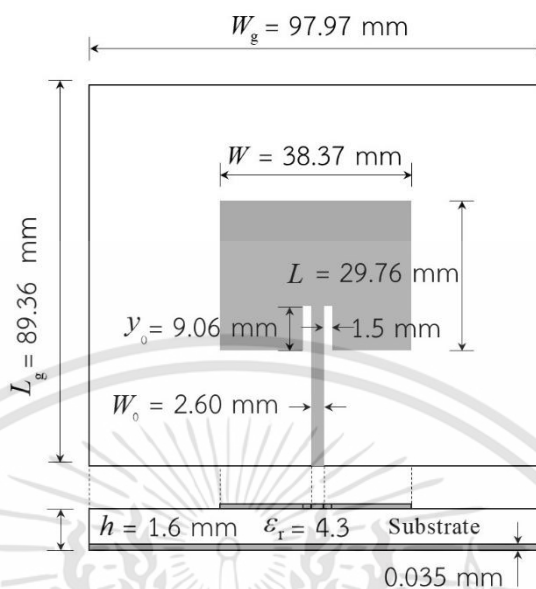


รูปที่ 3.21 ต้นแบบที่พิมพ์ลงบนกระดาษภาพถ่ายผิวมัน



รูปที่ 3.22 การบัดกรีขั้วต่อ SMA เข้ากับจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศ

เมื่อสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปตามที่ได้คำนวณและออกแบบไว้พบว่าคุณสมบัติของสายอากาศยังไม่ได้ตามที่ต้องการจึงนำกลับมาแก้ไขใหม่ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ ได้แก่ ความกว้างของระนาบพื้น และความยาวของระนาบพื้นให้มีขนาด 97.97 มิลลิเมตร และ 89.36 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ขนาดที่ใช้สร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

### 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

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

[47]

เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ดังรูปที่ 3.24 เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติในการทดสอบสัญญาณในโครงข่ายแบบหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ต สามารถใช้เพื่อการวิเคราะห์และทดสอบการทำงานกับคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุไม่ต่ำกว่าย่านความถี่ 3 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 3 จิกะเฮิร์ตซ์ แสดงผลการวัดในรูปของขนาดเชิงลอการิทึม ขนาดเชิงเส้น เฟส เฟสขยาย เฟสด้านบวก อัตราส่วนคลื่นนิ่ง จำนวนจริง จำนวนจินตภาพ สมิทซาร์ท และในรูปเชิงขั้ว มีระบบ S-Parameter สามารถเปลี่ยนค่าเป็นอิมพีแดนซ์การสะท้อน อิมพีแดนซ์การส่งผ่าน แอดมิตแทนซ์การสะท้อน แอดมิตแทนซ์การส่งผ่าน และ  $1/S$  ได้



รูปที่ 3.24 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ [47]

### 3.4.2 สายนำสัญญาณเซมิริจิด (Semi Rigid)

สายนำสัญญาณเซมิริจิดดังรูปที่ 3.25 เป็นสายเคเบิลที่มีการลดทอนต่ำ มาตรฐานอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันครอบคลุมย่านความถี่ไมโครเวฟทั้งหมด และมีการป้องกันการสูญเสียสัญญาณและป้องกันสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.25 สายนำสัญญาณเซมิริจิด

### 3.4.3 อุปกรณ์ปรับเทียบ (Calibration kit)

อุปกรณ์ปรับเทียบดังรูปที่ 3.26 เป็นชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบค่าที่ได้จากเครื่องมือกับค่ามาตรฐานเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการกำจัดสัญญาณรบกวนในสายนำสัญญาณที่ความสูญเสียต่ำแบบเซมิริจิดก่อนเริ่มการทดลอง โดยต้องดำเนินการตามขั้นตอน Open Short และ Load ตามลำดับเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนในสายนำสัญญาณที่ความสูญเสียต่ำแบบเซมิริจิด



รูปที่ 3.26 อุปกรณ์ปรับเทียบ

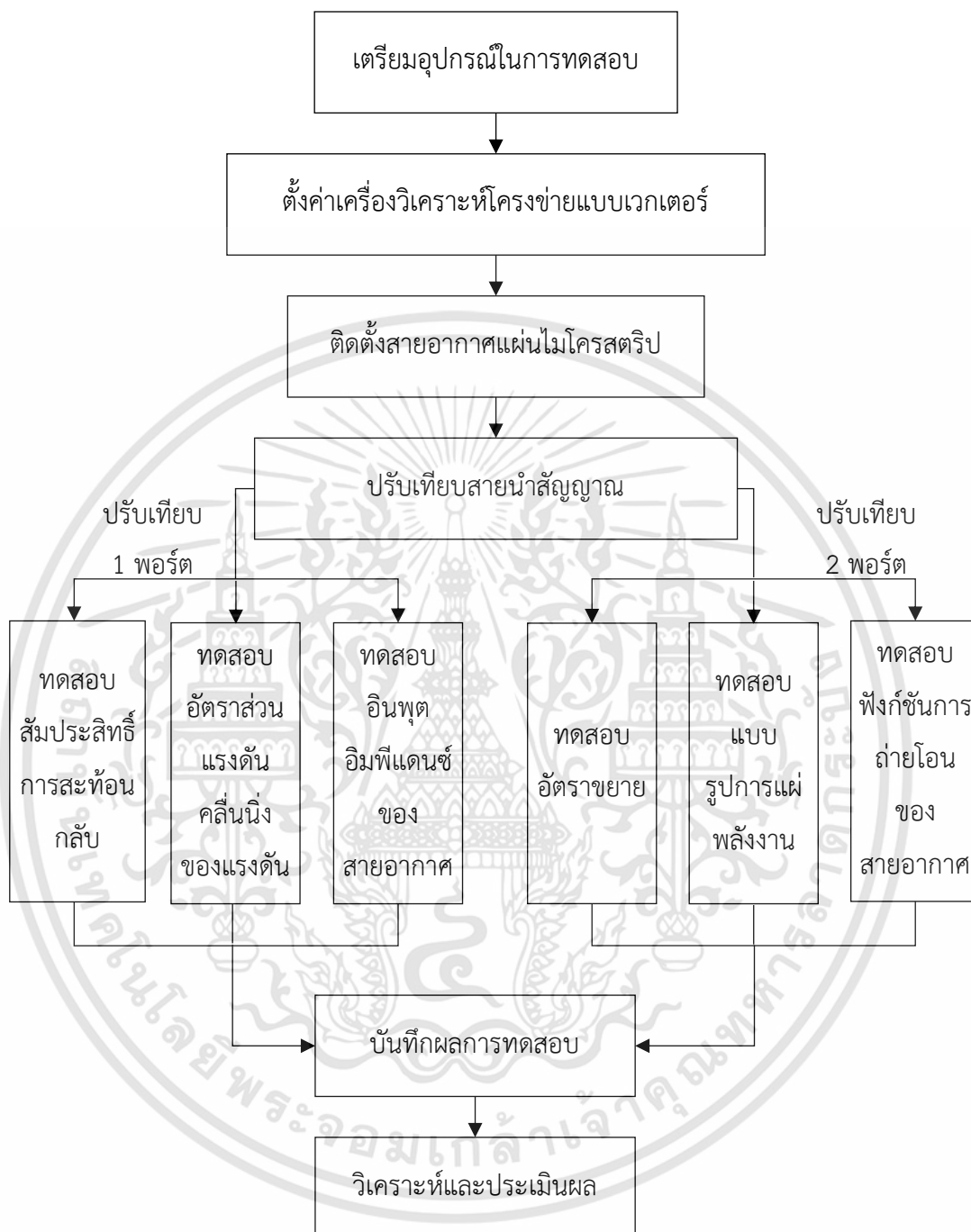
### 3.5 การทดสอบและจัดเก็บผล

#### 3.5.1 การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

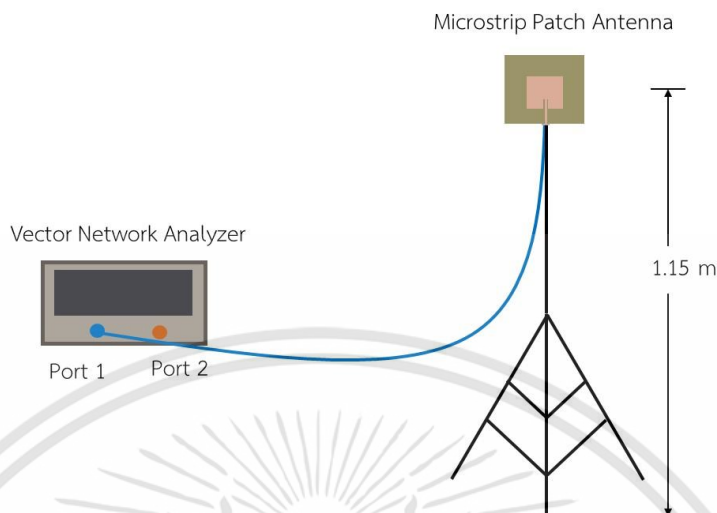
ทดสอบคุณสมบัติสายอากาศสร้างขึ้นโดยพิจารณาสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของแรงดัน อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราการขยาย แบบรูปการแผ่กำลังงาน และฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศเป็นหลัก สำหรับการทดลองวัดได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย แบบเวกเตอร์ในการวัดและบันทึกผล จากนั้นใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ และประเมินผลเพื่อให้ทราบว่าสายอากาศมีคุณสมบัติที่เป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังรูปที่ 3.27 [7] และ [48]

3.5.1.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

แบบจำลองและตารางพารามิเตอร์ในการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 3.28 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ นำสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่สร้างขึ้น ติดตั้งบนขาตั้งสายอากาศโดยยึดติดกับขาตั้งที่ตำแหน่งสูง 1.15 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับความสูงบริเวณกึ่งกลางลำตัวของผู้ทดลองสำหรับการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์



รูปที่ 3.27 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป



รูปที่ 3.28 แบบจำลองการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ในการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดสอบ
ช่วงความถี่	2.2 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.6 จิกะเฮิรตซ์
จำนวนจุดของความถี่	401 จุด
ความสูงของสายอากาศ	1.15 เมตร
ชนิดของสายอากาศ	สายอากาศแผ่นไมโครสตริป

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ
2. ตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ดังตารางที่

3.2

3. ปรับเทียบสายนำสัญญาณในการทดสอบก่อนเชื่อมต่อสายอากาศกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

4. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณระหว่างขั้วของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ จากนั้นติดตั้งสายอากาศแผ่นไมโครสตริปกับขาตั้งสายอากาศดังรูปที่

3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

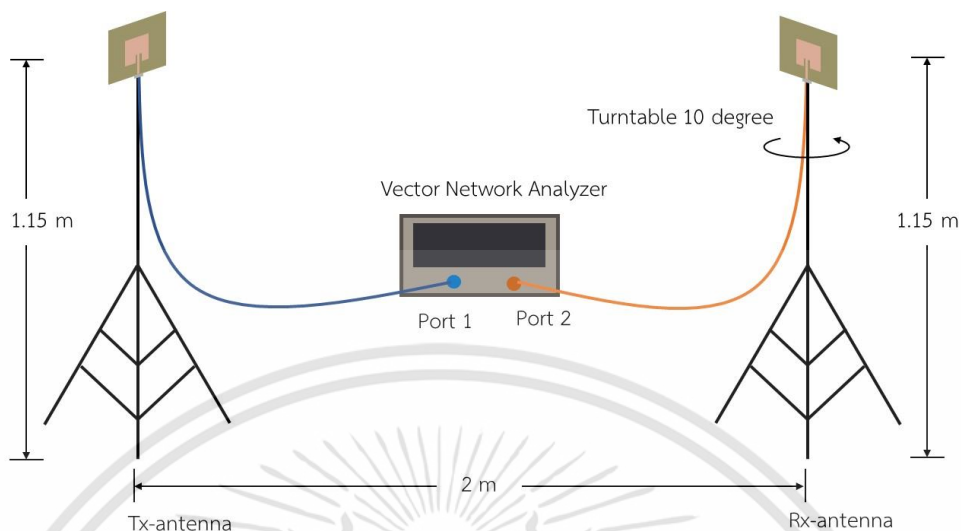
5. เลือกคำสั่งการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน
6. บันทึกผลการทดสอบ
7. ใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์วิเคราะห์และประเมินผล
8. ทำการขั้นตอนที่ 5 ถึงขั้นตอนที่ 7 ซ้ำ โดยเปลี่ยนคำสั่งการทดสอบเป็นการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และการทดสอบอินพุตอิมพีแดนซ์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.29 การทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

### 3.5.1.2 การทดสอบอัตราการขยาย และแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

แบบจำลองและตารางพารามิเตอร์ในการทดสอบอัตราการขยาย และแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 3.30 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ นำสายอากาศแผ่นไมโครสตริปติดตั้งบนขาตั้งสายอากาศโดยยึดติดกับขาตั้งที่ตำแหน่งสูง 1.15 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับความสูงบริเวณกึ่งกลางลำตัวของผู้ทดลองสำหรับการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ 2.0 เมตร



รูปที่ 3.30 แบบจำลองการทดสอบอัตราการขยายและแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ในการทดสอบอัตราการขยาย และแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดสอบ
ช่วงความถี่	2.2 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.6 จิกะเฮิรตซ์
จำนวนจุดของความถี่	401 จุด
ความสูงของสายอากาศภาคส่งและภาครับ	1.15 เมตร
ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ	2.0 เมตร
ชนิดของสายอากาศภาคส่ง	สายอากาศแผ่นไมโครสตริป
ชนิดของสายอากาศภาครับ	
การหมุนสายอากาศ	0 องศา ถึง 360 องศา
การหมุนสายอากาศต่อครั้ง	10 องศา

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ
2. ตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์ห้โครงข่ายแบบเวกเตอร์ตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ดังตารางที่

### 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปรับเทียบสายนำสัญญาณในการทดสอบก่อนเชื่อมต่อสายอากาศกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

4. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณระหว่างหัวของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ทั้งภาคส่งและภาครับ จากนั้นติดตั้งสายอากาศแผ่นไมโครสตริปกับขาตั้งสายอากาศดังรูปที่ 3.31

5. ตั้งค่าความถี่ที่ต้องการทดสอบและส่งสัญญาณที่ระดับความแรง 0 ดบีเอ็ม

6. หมุนสายอากาศครั้งละ 10 องศา ต่อการวัดหนึ่งครั้ง ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา

6. บันทึกผลการทดสอบ

7. คำนวณอัตราการขยายของสายอากาศดังสมการที่ (3.23) [49]

$$G_t = P_t - P_r + G_r + C_L \quad (3.23)$$

เมื่อ  $G_t$  คือ อัตราการขยายของสายอากาศรับภายใต้การทดสอบ (ดีบีไอ)

$G_r$  คือ อัตราการขยายของสายอากาศมาตรฐานอ้างอิง (ดีบีไอ)

$P_t$  คือ กำลังส่งของสัญญาณที่วัดได้จากสายอากาศรับภายใต้การทดสอบ (ดีบีวัตต์)

$P_r$  คือ กำลังของสัญญาณที่วัดได้จากสายอากาศมาตรฐานอ้างอิง (ดีบีวัตต์)

$C_L$  คือ ความสูญเสียของการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (เดซิเบล)

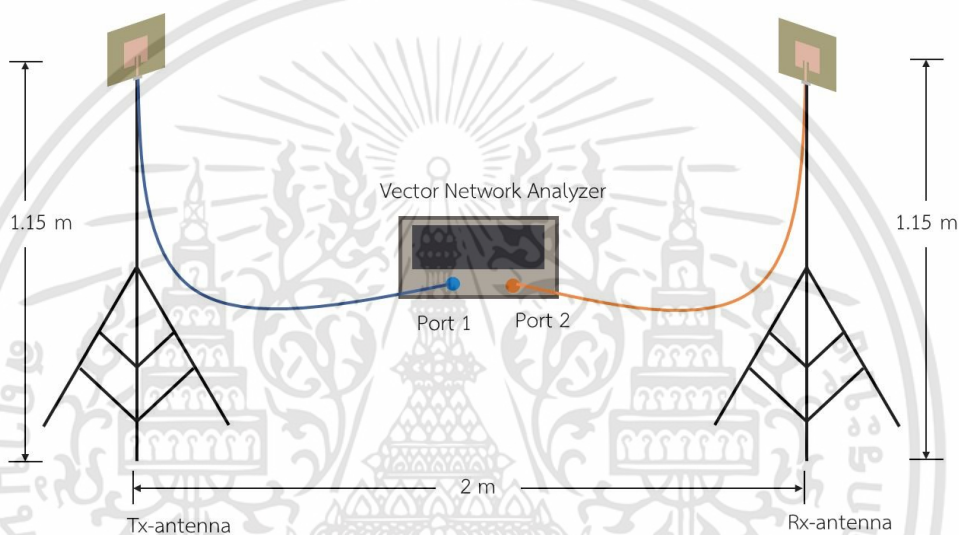
8. ใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์วิเคราะห์และประเมินผล



รูปที่ 3.31 การทดสอบอัตราการขยายและแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

### 3.5.1.3 การทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

แบบจำลองและตารางพารามิเตอร์ในการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 3.32 และตารางที่ 3.4 ตามลำดับ นำสายอากาศแผ่นไมโครสตริปติดตั้งบนขาตั้งสายอากาศโดยยึดติดกับขาตั้งที่ตำแหน่งสูง 1.15 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับความสูงบริเวณกึ่งกลางลำตัวของผู้ทดลองสำหรับการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ 2.0 เมตร



รูปที่ 3.32 แบบจำลองการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ในการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดสอบ
ช่วงความถี่	2.2 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.6 จิกะเฮิรตซ์
จำนวนจุดของความถี่	401 จุด
ความสูงของสายอากาศภาคส่งและภาครับ	1.15 เมตร
ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ	2.0 เมตร
ชนิดของสายอากาศภาคส่ง	สายอากาศแผ่นไมโครสตริป
ชนิดของสายอากาศภาครับ	

### ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ
2. ตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์ตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ดังตารางที่

3.4

3. ปรับเทียบสายนำสัญญาณในการทดสอบก่อนเชื่อมต่อสายอากาศกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์
4. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณระหว่างหัวของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ทั้งภาคส่งและภาครับ จากนั้นติดตั้งสายอากาศแผ่นไมโครสตริปกับขาตั้งสายอากาศดังรูปที่ 3.33
5. ตั้งค่าความถี่ที่ต้องการทดสอบและส่งสัญญาณที่ระดับความแรง 0 ดีบีเอ็ม
6. บันทึกผลการทดสอบ
7. ใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์วิเคราะห์และประเมินผล

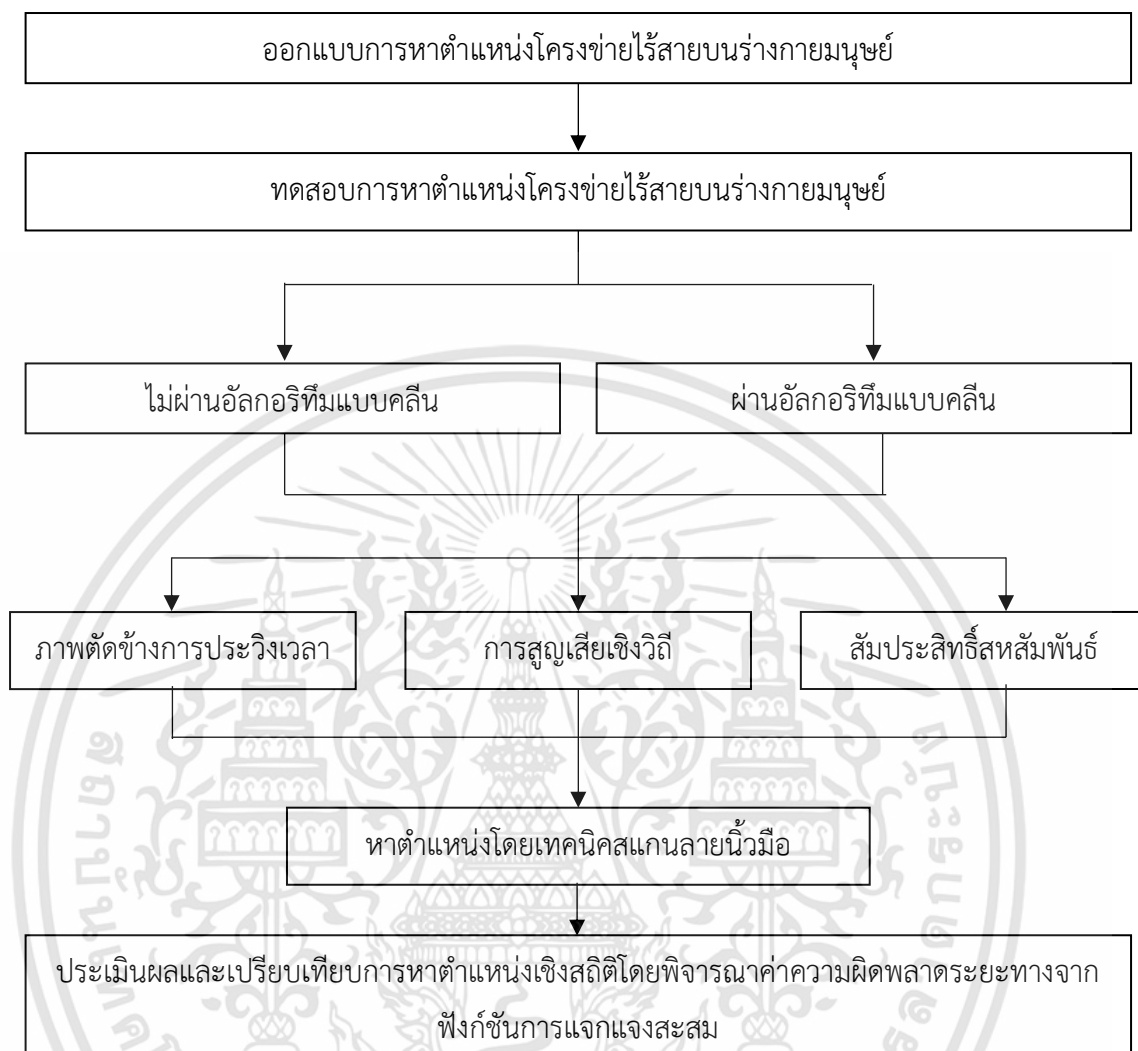


รูปที่ 3.33 การทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

### 3.5.2 การทดสอบช่องสัญญาณการส่งผ่านสำหรับการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

การวัดช่องสัญญาณส่งผ่านบนร่างกายมนุษย์ในกรณีที่ไม่มีร่างกายมนุษย์ และกรณีที่มีร่างกายมนุษย์ ในกรณีที่มีร่างกายมนุษย์มีตำแหน่งการวัดช่องสัญญาณส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ด้านหน้า 49 ตำแหน่ง และด้านหลัง 49 ตำแหน่ง รวมทั้งหมด 98 ตำแหน่ง ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางแต่ละตำแหน่ง 4 เซนติเมตร ขั้นตอนการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.34

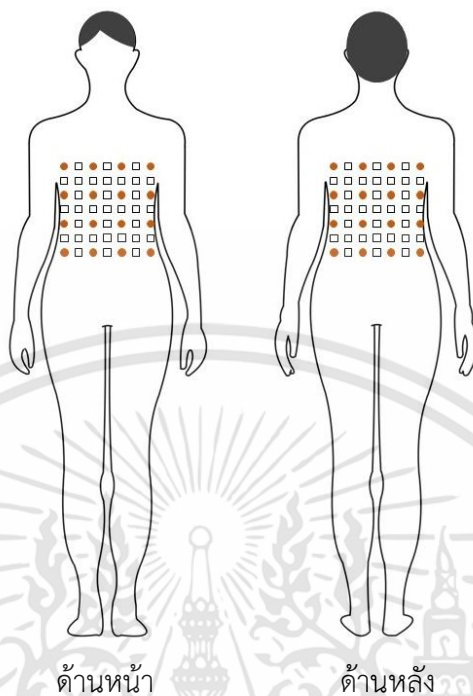
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



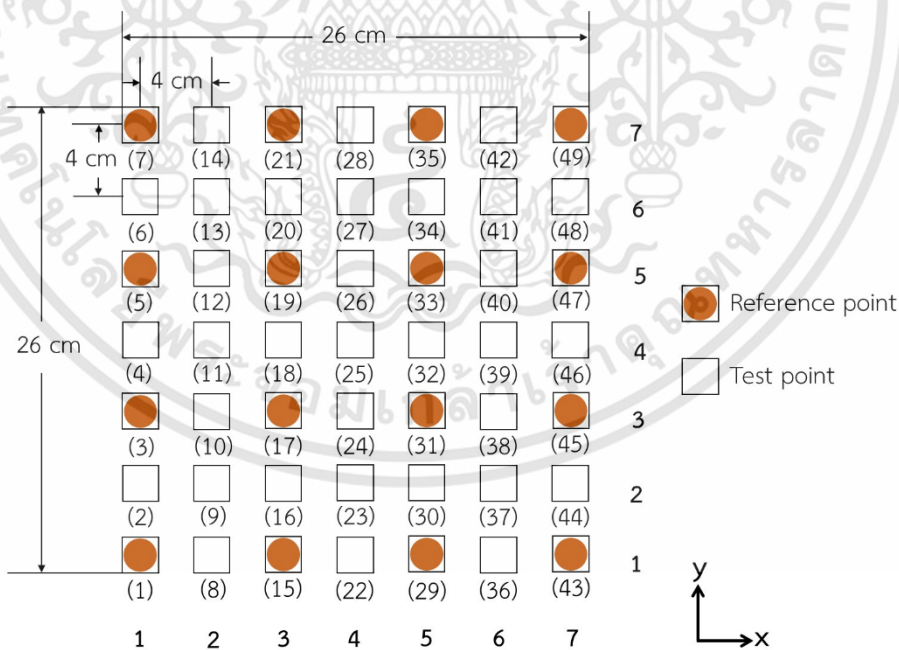
รูปที่ 3.34 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดสอบช่องสัญญาณการส่งผ่านสำหรับการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

### 3.5.2.1 แบบจำลองการติดตั้งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์

แบบจำลองตำแหน่งต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์สำหรับการวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ด้านหน้า 49 ตำแหน่ง และด้านหลัง 49 ตำแหน่ง รวมทั้งหมด 98 ตำแหน่งดังรูปที่ 3.35 ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางแต่ละตำแหน่ง 4 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.35 แบบจำลองตำแหน่งต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง

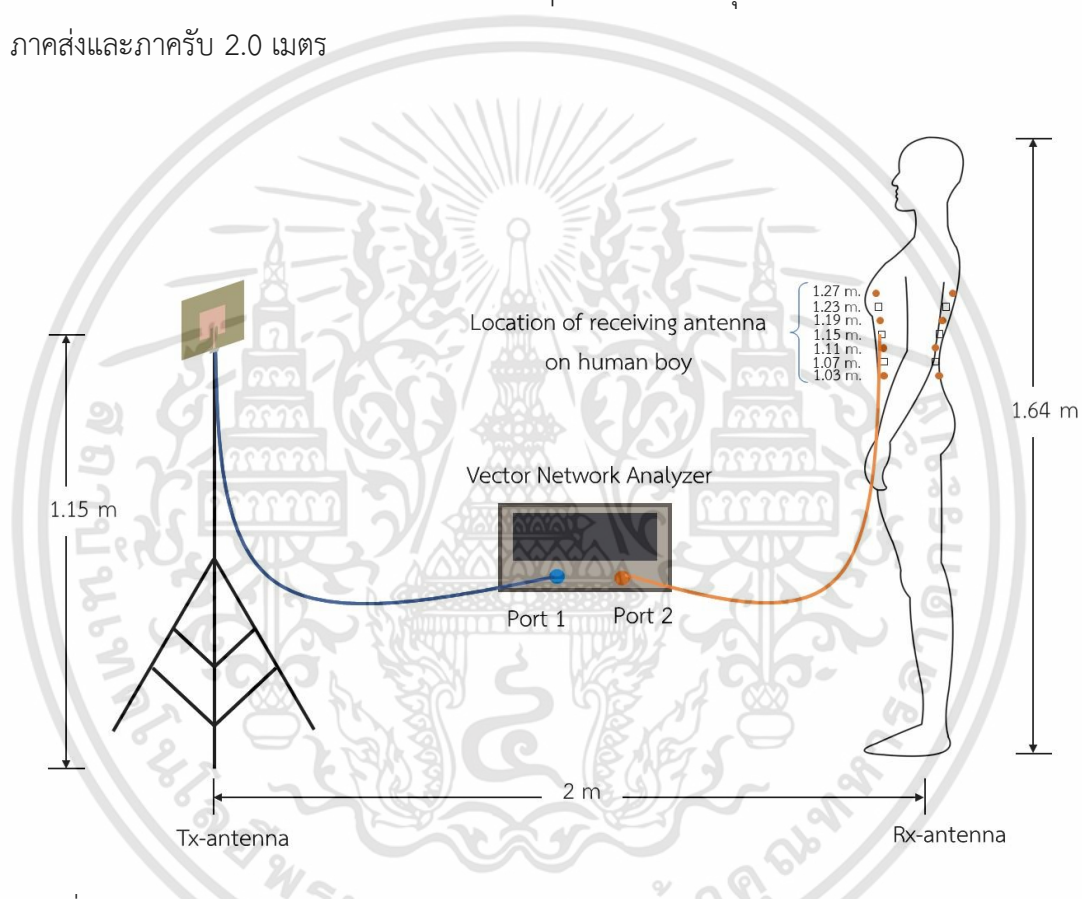


รูปที่ 3.36 แบบจำลองตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2.2 แบบจำลองการวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

แบบจำลองและพารามิเตอร์ในการทดลองวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์แสดงดังรูปที่ 3.37 และดังตารางที่ 3.5 ตามลำดับ โดยสายอากาศภาคส่งใช้สายอากาศแผ่นไมโครสตริปติดตั้งบนขาตั้งสายอากาศที่ความสูง 1.15 เมตร สายอากาศภาครับใช้สายอากาศแผ่นไมโครสตริปติดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ 2.0 เมตร



รูปที่ 3.37 แบบจำลองการทดลองวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

พารามิเตอร์	ค่า
ช่องความถี่	2.2 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.6 จิกะเฮิรตซ์
จำนวนจุดของความถี่	401 จุด
ความสูงของสายอากาศภาคส่ง	1.15 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า
ความสูงของสายอากาศภาครับ	1.03 เมตร ถึง 1.27 เมตร
ระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งกับด้านรับ	2.0 เมตร
ชนิดของสายอากาศด้านรับ	สายอากาศแผ่นไมโครสตริบ
ชนิดของสายอากาศด้านส่ง	

### 3.5.2.3 ทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์

ทดสอบการวัดช่องสัญญาณโดยวิเคราะห์ผลกระทบจากอากาศว่างที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและคุณลักษณะของสายอากาศแผ่นไมโครสตริบ ใช้สายอากาศที่ได้จากการสร้างมาก่อนหน้านี้ มาติดตั้งในภาคส่งและภาครับโดยสายอากาศทั้งสองจะถูกยึดติดกับขาตั้งที่ความสูง 1.15 เมตร ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ 2 เมตร จากนั้นทำการวัดสัญญาณที่รับได้ กรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ด้านหน้าแสดงดังรูปที่ 3.38 กรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ด้านหลังแสดงดังรูปที่ 3.39



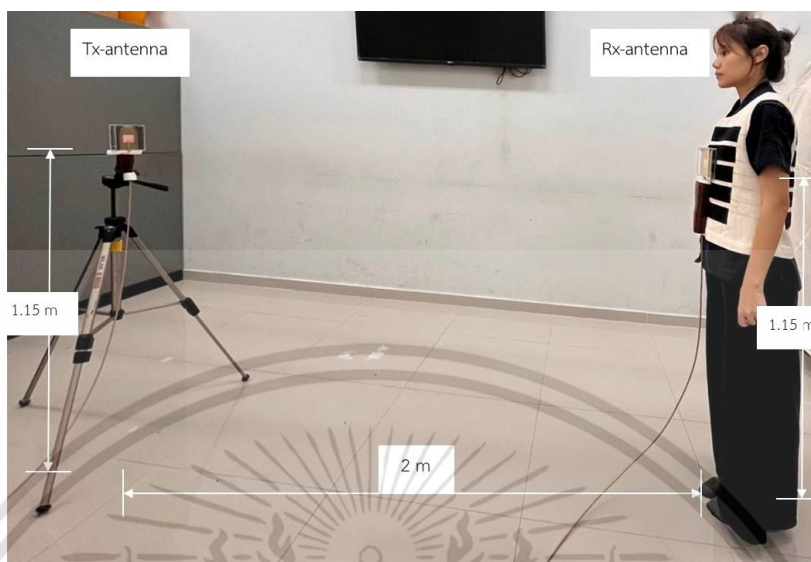
รูปที่ 3.38 การทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ด้านหน้า



รูปที่ 3.39 การทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ด้านหลัง

## 2) การทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณกรณีมีร่างกายมนุษย์

ทดสอบการวัดช่องสัญญาณโดยวิเคราะห์ผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและคุณลักษณะของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป ใช้สายอากาศที่สร้างมาติดตั้งในภาคส่งและภาครับ โดยภาคส่งจะถูกยึดติดกับขาตั้งที่ความสูง 1.15 เมตร ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ 2 เมตร ดังรูปที่ 3.40 หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์โดยทำการทดสอบตั้งแต่ตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ 49 ของทั้งด้านหน้า และด้านหลัง ดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.40 การทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณกรณีมีร่างกายมนุษย์



ด้านหน้า

ด้านหลัง

รูปที่ 3.41 ตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศภาครับบนตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกายทั้งด้านหน้า และด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีสายอากาศแผ่นไมโครสตริป การออกแบบและสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริป โดยการคำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแผ่นไมโครสตริป และจำลองการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราการขยาย แบบรูปการแผ่กำลังงาน และฟังก์ชันการถ่ายโอน อีกทั้งสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปตามทีออกแบบไว้จากนั้นนำไปทดสอบวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านบนร่างกายมนุษย์ โดยผลที่ได้จะถูกนำไปแสดงและวิเคราะห์ ดังจะแสดงในบทถัดไป



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบคุณลักษณะสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ สำหรับใช้ในการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ โดยพิจารณาสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราการขยาย แบบรูปการแผ่กำลังงาน และฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ อีกทั้งยังกล่าวถึงผลการทดสอบช่องสัญญาณการส่งผ่านด้วยอัลกอริทึมแบบคลื่น และผลการทดสอบการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น แสดงผลในรูปแบบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทาง

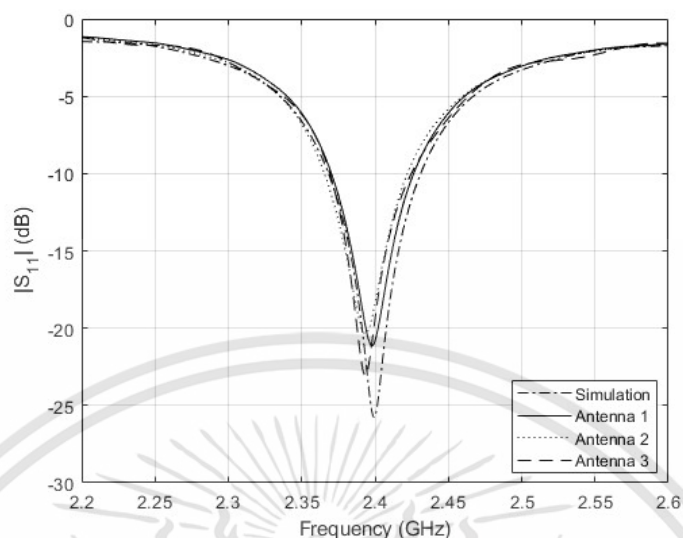
#### 4.1 การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

##### 4.1.1 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศเพื่อบ่งบอกว่าสายอากาศที่สร้างขึ้นตามที่สร้างมานั้นมีช่วงความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงหรือไม่ โดยพิจารณาคุณลักษณะสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 เดซิเบล

การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (เส้นลูกโซ่) และผลการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 (เส้นทึบ) สายอากาศแผ่นไมโครสตริป 2 (เส้นจุดประ) และสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 3 (เส้นประ) จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 เดซิเบลของการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.37 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.43 จิกะเฮิรตซ์ และการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 2 และ 3 มีช่วงความถี่ 2.37 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.43 จิกะเฮิรตซ์ ช่วงความถี่ 2.37 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.42 จิกะเฮิรตซ์ และช่วงความถี่ 2.37 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.43 จิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ นั่นคือสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 2 และ 3 สามารถใช้งานที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากผลการจากการจำลองมีค่าเท่ากับ -25.77 เดซิเบล และผลการทดสอบวัดของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ -21.14 -20.35 และ -23.06 เดซิเบล ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองมีค่าดีกว่าเนื่องจากมีค่าสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่าจึงทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด

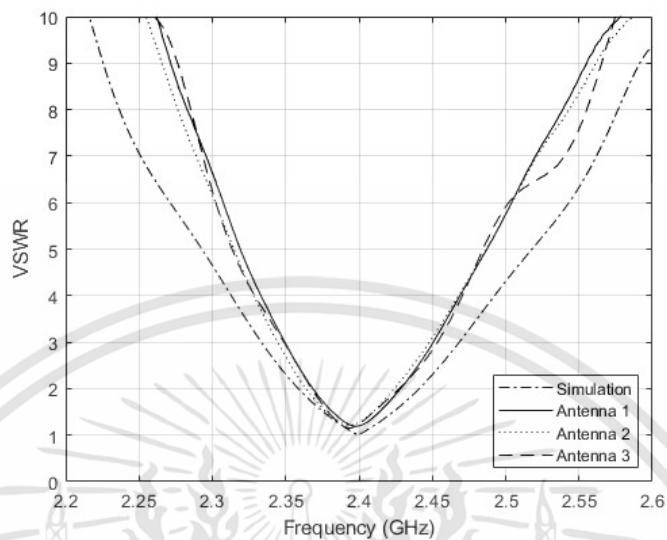
#### 4.1.2 ผลการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

การพิจารณาอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันเพื่อบ่งบอกว่าคุณสมบัติที่จะนำไปใช้สามารถใช้งานได้หรือไม่ อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันควรมีค่าต่ำกว่า 2

การเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างผลการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (เส้นลูกโซ่) และผลการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 (เส้นทึบ) สายอากาศแผ่นไมโครสตริป 2 (เส้นจุดประ) และสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 3 (เส้นประ) เห็นได้ว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ยอมรับได้อยู่ในช่วงความถี่ 2.36 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.44 จิกะเฮิรตซ์ และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ได้จากการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 2 และ 3 ที่ยอมรับได้อยู่ในช่วงความถี่ 2.37 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.43 จิกะเฮิรตซ์ ช่วงความถี่ 2.36 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.42 จิกะเฮิรตซ์ และช่วงความถี่ 2.36 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.43 จิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ โดยอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของแรงดันที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากับ 1.00 และจากการทดสอบวัดของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 1.19 1.21 และ 1.15 ตามลำดับ ดังนั้นสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ได้ เนื่องจากอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันมีค่าน้อยกว่า 2 และสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่จำลองและสร้างขึ้นมีความแม่นยำที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



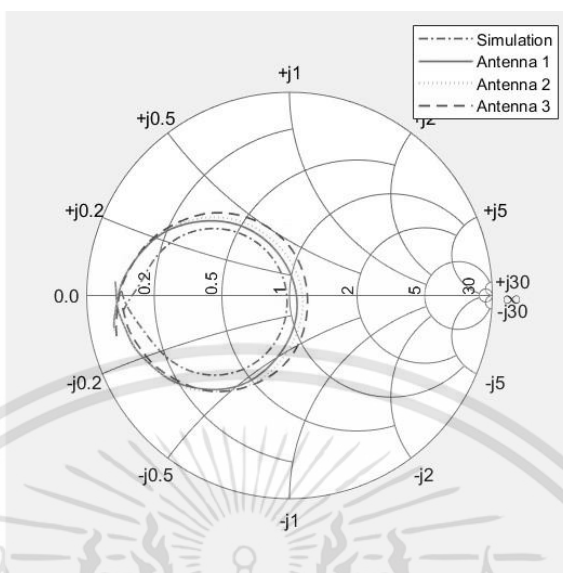
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด

#### 4.1.3 ผลการทดสอบอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

การพิจารณาอินพุตอิมพีแดนซ์เพื่อบ่งบอกว่าสายอากาศสามารถนำไปใช้งานได้หรือไม่ เนื่องจากสายอากาศจะมีอินพุตอิมพีแดนซ์ที่สามารถแมตช์กับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณซึ่งอินพุตอิมพีแดนซ์ต้องมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม หรือใกล้เคียง 50 โอห์มมากที่สุด

การเปรียบเทียบสมิทชาร์ทของอินพุตอิมพีแดนซ์ของของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างผลการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.3

จากรูปที่ 4.3 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (เส้นลูกโซ่) และผลการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 (เส้นทึบ) สายอากาศแผ่นไมโครสตริป 2 (เส้นจุดประ) และสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 3 (เส้นประ) สมิทชาร์ทของอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีการแมตช์กับมาตรฐานของระบบที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ สายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ได้ โดยอินพุตอิมพีแดนซ์ของผลการจำลองมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม และผลการทดสอบวัดของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 54 โอห์ม 56 โอห์ม และ 58 โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งผลจากการจำลองมีค่าดีกว่าเนื่องจากผลการจำลองมีอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของระบบ



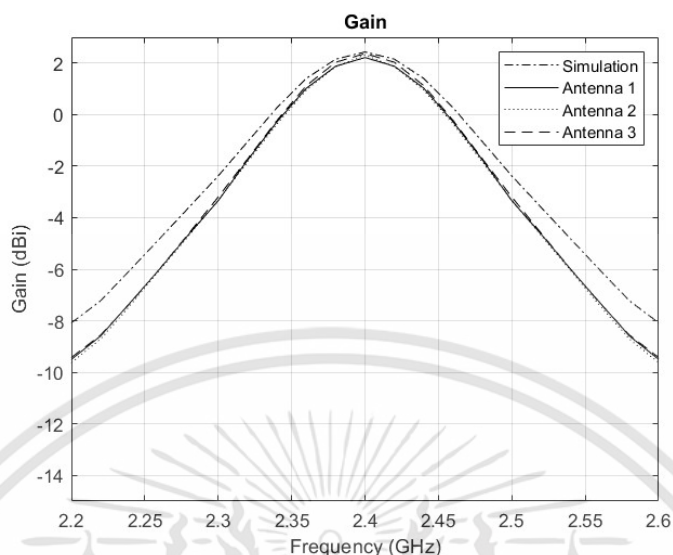
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบสมิทชาร์ทของอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด

#### 4.1.4 ผลการทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

อัตราการขยาย คือ กำลังส่งของสายอากาศเมื่อเทียบกับสายแบบไอโซทรอปิก

การเปรียบเทียบอัตราการขยายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าอัตราการขยายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปช่วงความถี่ 2.2 จิกะเฮิร์ตซ์ ถึง 2.6 จิกะเฮิร์ตซ์ ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (เส้นลูกโซ่) และผลการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 (เส้นทึบ) สายอากาศแผ่นไมโครสตริป 2 (เส้นจุดประ) และสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 3 (เส้นประ) ที่ความถี่ 2.2 จิกะเฮิร์ตซ์ มีอัตราการขยายเท่ากับ -8.08 ดีบีไอ -9.50 ดีบีไอ -9.63 ดีบีไอ และ -9.42 ดีบีไอ ตามลำดับ ที่ความถี่ 2.6 จิกะเฮิร์ตซ์ มีอัตราการขยายเท่ากับ -8.08 ดีบีไอ -9.50 ดีบีไอ -9.63 ดีบีไอ และ -9.43 ดีบีไอ ตามลำดับ และที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ มีอัตราการขยายสูงสุดเท่ากับ 2.43 ดีบีไอ 2.21 ดีบีไอ 2.32 ดีบีไอ และ 2.37 ดีบีไอ ตามลำดับ ดังนั้นสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ได้ เนื่องจากอัตราการขยายมีค่าสูงสุด

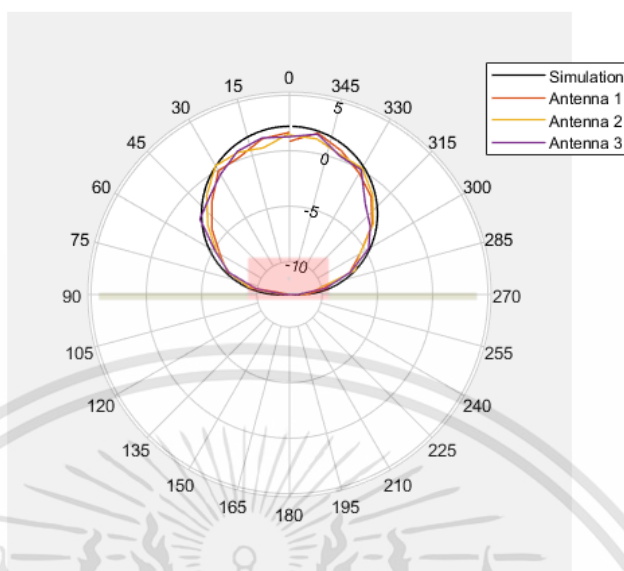


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด

#### 4.1.5 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปในระนาบสนามไฟฟ้าระหว่างผลการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ แสดงดังรูปที่ 4.5

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปในระนาบสนามไฟฟ้าจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ มีความใกล้เคียงกัน

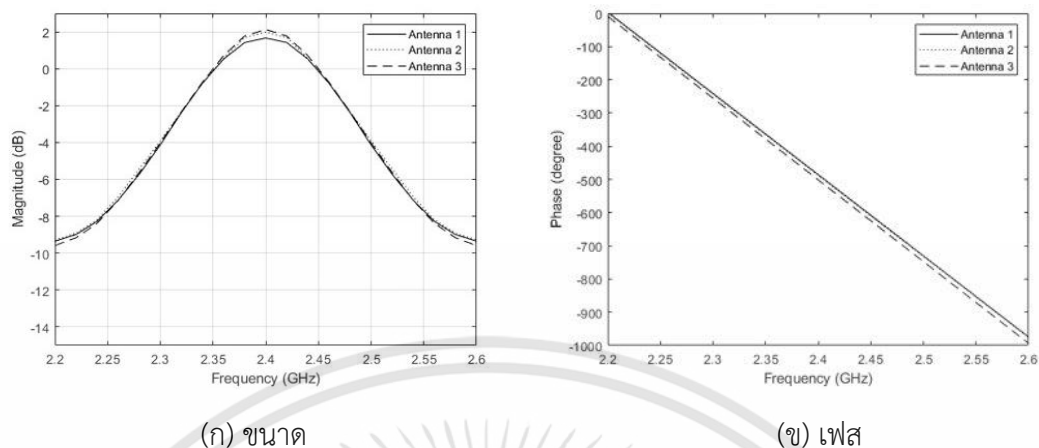


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปในระนาบสนามไฟฟ้าระหว่างการจำลองและการทดสอบวัด

#### 4.1.6 ผลการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ

ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณในกรณีอากาศว่าง สามารถเห็นได้ว่าลักษณะความถี่ของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศรับ 3 ตัว จากการทดสอบจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อยแสดงดังรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปช่วงความถี่ 2.2 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.6 จิกะเฮิรตซ์ ที่ได้จากการทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 (เส้นทึบ) สายอากาศแผ่นไมโครสตริป 2 (เส้นจุดประ) และสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 3 (เส้นประ) ความถี่ 2.2 จิกะเฮิรตซ์ มีฟังก์ชันการถ่ายโอนเท่ากับ -9.35 เดซิเบล -9.29 เดซิเบล และ -9.58 เดซิเบล ตามลำดับ ที่ความถี่ 2.6 จิกะเฮิรตซ์ มีฟังก์ชันการถ่ายโอนเท่ากับ -9.35 เดซิเบล -9.29 เดซิเบล และ -9.58 เดซิเบล ตามลำดับ และที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ มีฟังก์ชันการถ่ายโอนสูงสุดเท่ากับ 1.66 เดซิเบล 1.98 เดซิเบล และ 2.13 เดซิเบล ตามลำดับ และเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนมีความเป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงเลือกใช้สายอากาศแผ่นไมโครสตริป 1 และสายอากาศแผ่นไมโครสตริป 2 เป็นสายอากาศภาคส่งและภาครับ



(ก) ขนาด

(ข) เฟส

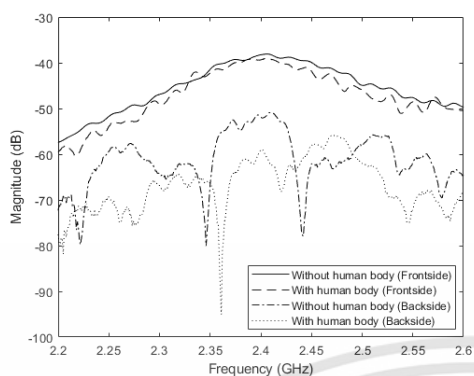
รูปที่ 4.6 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ

## 4.2 ผลการทดสอบช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์

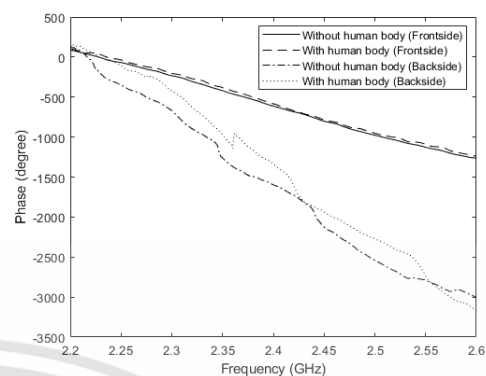
### 4.2.1 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ

ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณจะแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยขนาดจะบอกระดับสัญญาณในการถ่ายโอนที่ความถี่ที่เราพิจารณา และเฟสจะบอกถึงคุณภาพของช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณที่ดีนั้นจะมีความเป็นเชิงเส้น ทำการเปรียบเทียบขนาดและเฟสในกรณีมีร่างกายมนุษย์และไม่มีร่างกายมนุษย์ทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง

กรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ฟังก์ชันการถ่ายโอนจะแสดงในรูปของกราฟสองมิติโดยแกน  $x$  คือ ความถี่ แกน  $y$  คือ ขนาดหรือเฟส แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนทางด้านหน้าจะมีสูงกว่าทางด้านหลังเนื่องจากโครงสร้างและแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศ



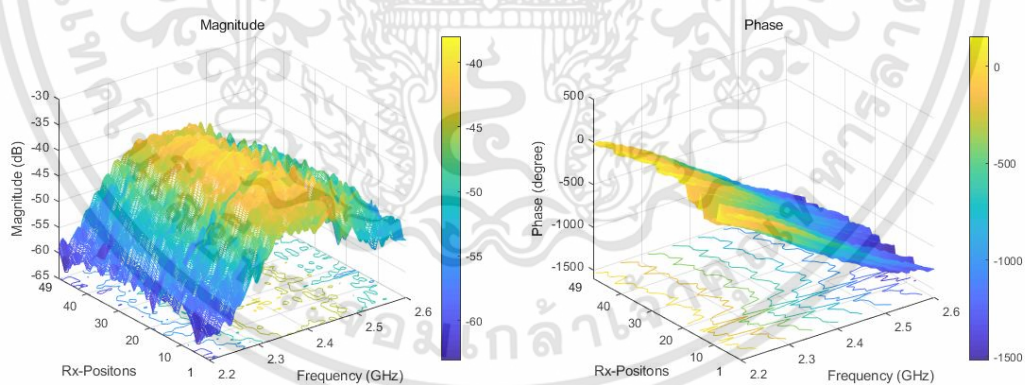
(ก) ขนาด



(ข) เฟส

รูปที่ 4.7 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนเปรียบเทียบในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้าและด้านหลัง

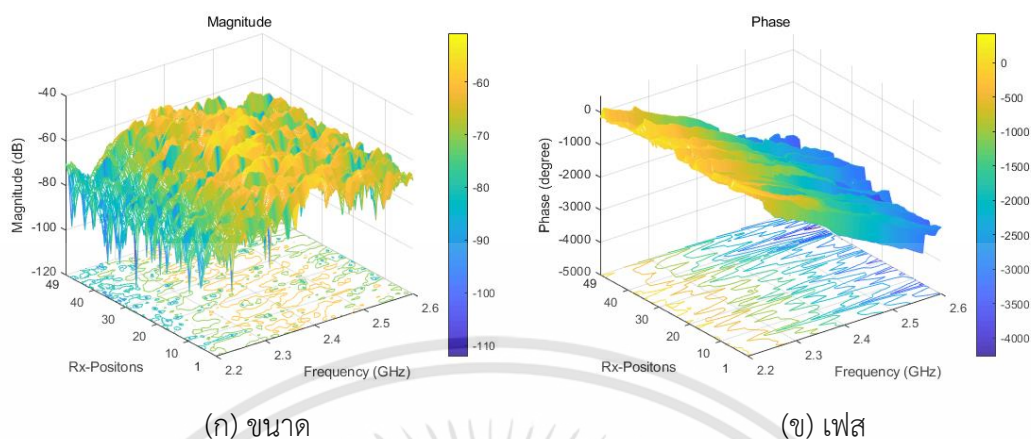
กรณีที่มีร่างกายมนุษย์ฟังก์ชันการถ่ายโอนจะแสดงในรูปของกราฟสามมิติโดยแกน x คือ ความถี่ แกน y คือ ตำแหน่งบนร่างกายมนุษย์ และแกน z คือ ขนาดหรือเฟส แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนทางด้านหน้าจะมีสูงกว่าทางด้านหลัง เนื่องจากการบดบังของร่างกายมนุษย์และการสะท้อนของช่องสัญญาณ



(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.8 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณกรณีมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า



รูปที่ 4.9 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณกรณีมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง

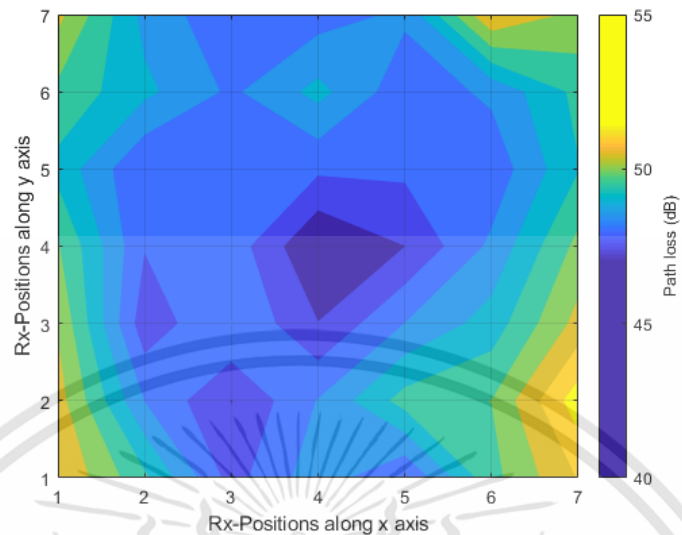
#### 4.2.2 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ

การแสดงผลการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียเชิงวิถีและตำแหน่งในการทดสอบ

การวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทั้งด้านหน้าและด้านหลังถูกจัดอยู่ในรูปแบบกราฟสองมิติโดยแกน  $x$  และ  $y$  คือ ตำแหน่งที่ติดตั้งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ตามแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ดังรูปที่ 3.36 ระดับสีหมายถึงการสูญเสียเชิงวิถีในหน่วยเดซิเบล ดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลการสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยติดตั้งสายอากาศภาครับทางด้านหน้า แถบสีแต่ละระดับสีแทนการสูญเสียเชิงวิถีดังนี้

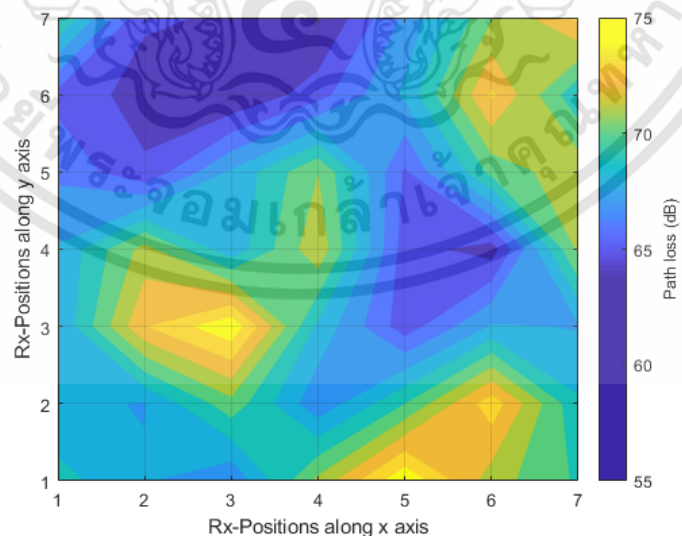
- สีน้ำเงินถึงสีเขียว มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 40 เดซิเบล ถึง 50 เดซิเบล
- สีเขียวถึงสีเหลือง มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 50 เดซิเบล ถึง 55 เดซิเบล



รูปที่ 4.10 การสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยติดตั้งสายอากาศภาครับทางด้านหน้า แถบสีแต่ละระดับสีแทนการสูญเสียเชิงวิถีดังนี้

- สีน้ำเงินถึงสีฟ้า มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 55 เดซิเบล ถึง 65 เดซิเบล
- สีฟ้าถึงสีเขียว มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 65 เดซิเบล ถึง 70 เดซิเบล
- สีเขียวถึงสีเหลือง มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 70 เดซิเบล ถึง 75 เดซิเบล



รูปที่ 4.11 การสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง

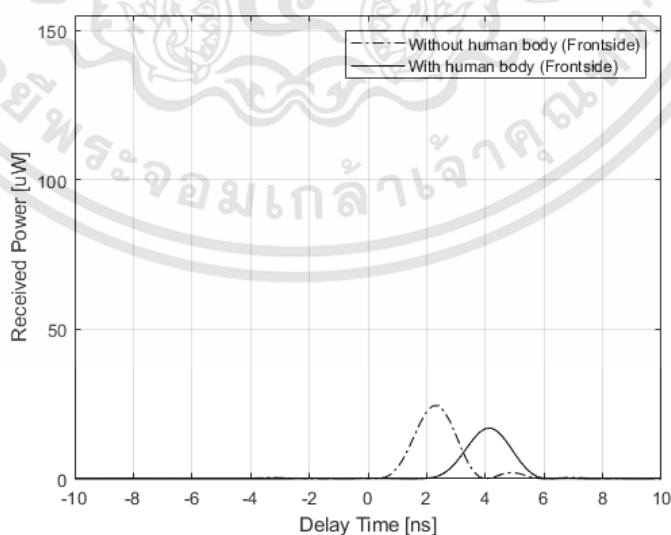
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งสายอากาศภาครับด้านหน้ามีค่าการสูญเสียเชิงวิถีอยู่ในช่วง 46.99 เดซิเบล ถึง 51.80 เดซิเบล ตำแหน่งของสายอากาศที่มีการสูญเสียเชิงวิถีต่ำสุด คือ ตำแหน่ง (4, 4) ตำแหน่งของสายอากาศที่มีการสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด คือ ตำแหน่ง (7, 2) และด้านหลังมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีอยู่ในช่วง 63.78 เดซิเบล ถึง 74.88 เดซิเบล ตำแหน่งของสายอากาศที่มีการสูญเสียเชิงวิถีต่ำสุด คือ ตำแหน่ง (4, 7) ตำแหน่งของสายอากาศที่มีการสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด คือ ตำแหน่ง (5, 1) ซึ่งด้านหลังมาค่ามากกว่าด้านหน้า และมีระดับของสัญญาณแต่ละตำแหน่งแตกต่างจากด้านหน้า เนื่องมาจากด้านหลังมีผลกระทบจากการบดบังของร่างกายมนุษย์และการสะท้อนของช่องสัญญาณ

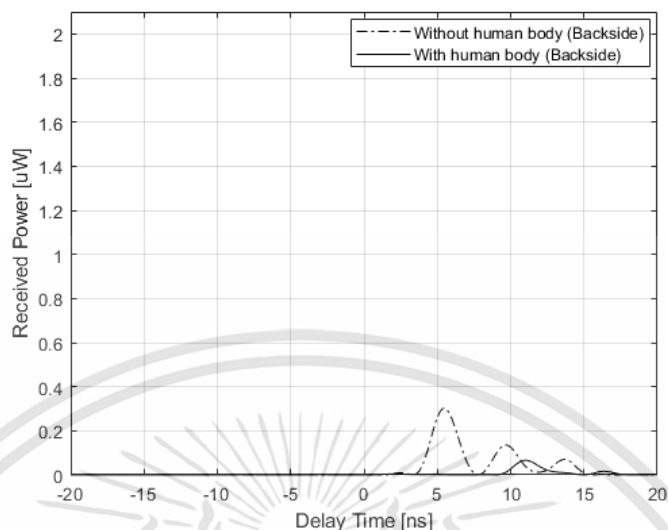
#### 4.2.3 ภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงาน

ภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงานจะอธิบายลักษณะความถี่การแพร่กระจายและฟังก์ชันการถ่ายโอน การแสดงผลนั้นจะแสดงในรูปแบบกราฟ 2 มิติโดยแกน x คือ เวลาที่ใช้การเดินทาง และแกน y คือ ระดับกำลังงานของสัญญาณ โดยทำการเปรียบเทียบกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง

รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงานในกรณีที่ไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ ทางด้านหน้ามีค่าประวิงเวลาที่ 2.4 นาโนวินาที และที่ 4 นาโนวินาที ตามลำดับ ทางด้านหลังมีค่าประวิงเวลาช่วง 6 นาโนวินาทีถึง 14 นาโนวินาที และช่วง 12 นาโนวินาที ถึง 16 นาโนวินาที ซึ่งจะเห็นว่าในกรณีที่ไม่มีร่างกายมนุษย์มีระดับกำลังงานสูงกว่ากรณีมีร่างกายมนุษย์

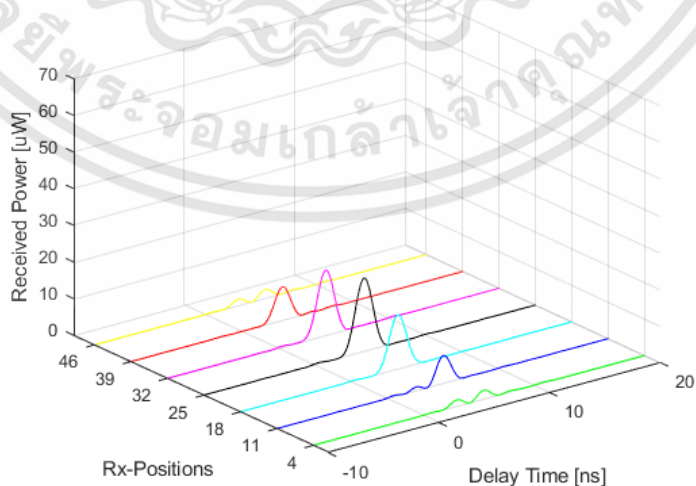


รูปที่ 4.12 การประวิงเวลากำลังงานในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า



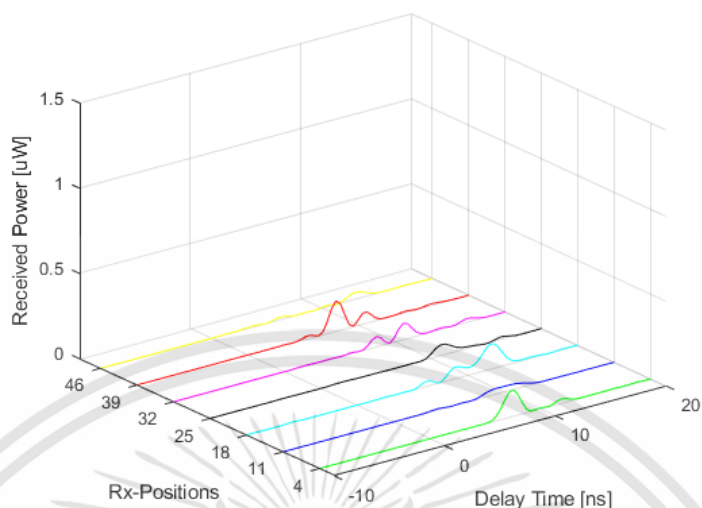
รูปที่ 4.13 การประวิงเวลากำลังงานในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง

รูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 ข้อมูลถูกนำมาแสดง 7 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่ 4 11 18 25 32 39 และ 46 ซึ่งเป็นแถวกลางลำตัวของตำแหน่งที่ติดตั้งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ด้านหน้าและด้านหลังตามลำดับ พบว่าด้านหน้ามีกำลังงานมากกว่าด้านหลังในแต่ละตำแหน่ง มีค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ย 4.74 นาโนวินาที น้อยกว่าด้านหลังที่มีค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ย 10.34 นาโนวินาที เนื่องจากด้านหน้าเกิดการรบกวนของสัญญาณน้อยกว่าด้านหลังทำให้ผลที่ได้ไม่สามารถแยกความแรงของสัญญาณได้ชัดเจนอันเป็นผลมาจากผลกระทบจากการการบดบังของร่างกายมนุษย์



รูปที่ 4.14 การประวิงเวลากำลังงานในแถวกลางลำตัวกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า

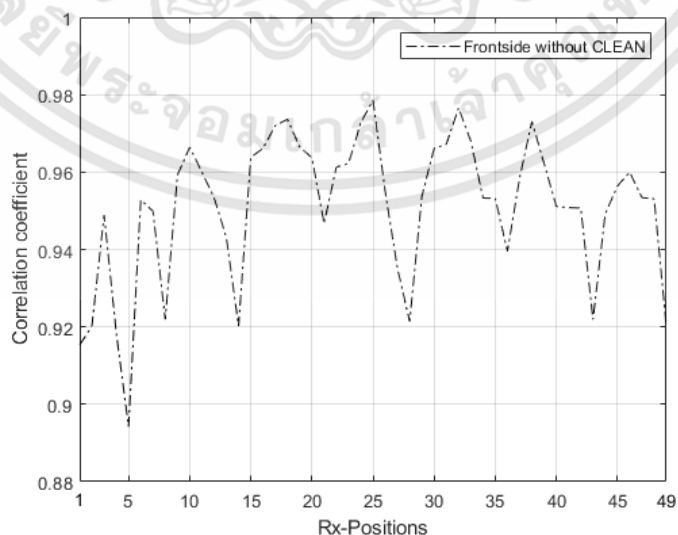
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การประวิงเวลากำลังงานในแฉวกลางลำตัวกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง

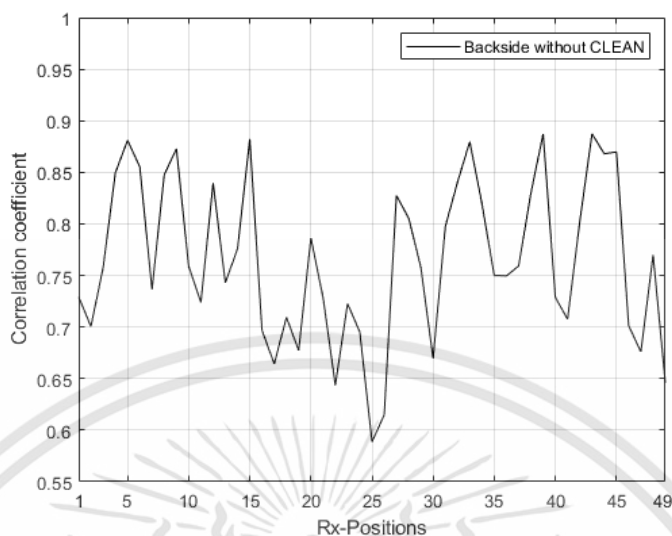
#### 4.2.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การแสดงผลสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และตำแหน่งในการทดสอบ สำหรับระบบโครงข่ายไร้สายรูปร่างของสัญญาณมีความสำคัญ ดังนั้นจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ถึงค่าความเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้ โดยค่าดังกล่าวจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 กล่าวคือถ้าค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเท่ากับ 1 นั้นสัญญาณที่รับได้จะเหมือนกับสัญญาณแบบไอโซทรอปิกทุกประการ คือ ไม่เกิดความผิดเพี้ยน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทางด้านหน้าและด้านหลังแสดงดังรูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง

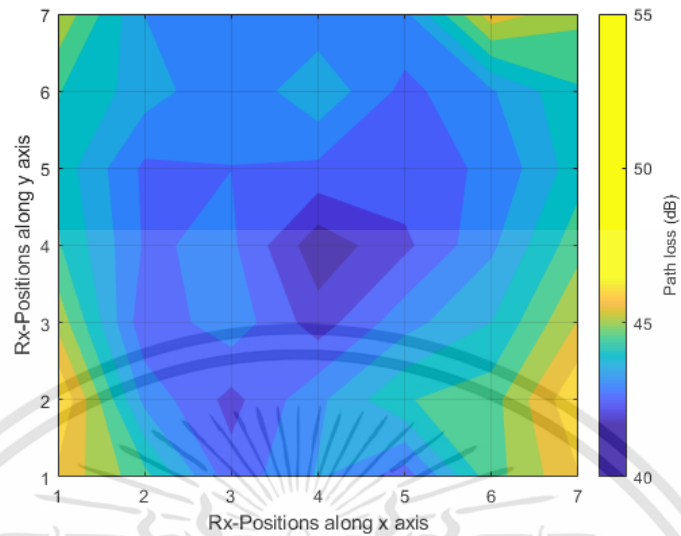
### 4.3 ผลการทดสอบช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีน

#### 4.3.1 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีน

จากการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทั้งด้านหน้าและด้านหลังเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีน แสดงดังรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.18 แสดงผลการสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยติดตั้งสายอากาศภาครับทางด้านหน้า แถบสีแต่ละระดับสีแทนการสูญเสียเชิงวิถีดังนี้

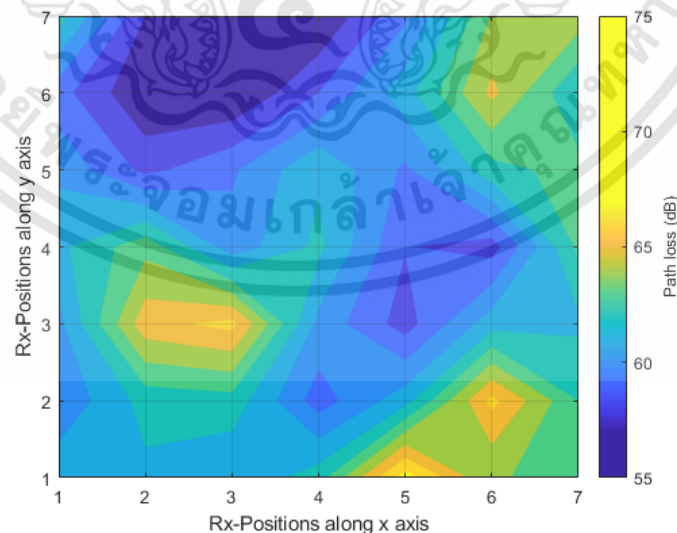
- สีน้ำเงินถึงสีเขียว มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 40 เดซิเบล ถึง 45 เดซิเบล
- สีเขียวถึงสีเหลือง มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 45 เดซิเบล ถึง 55 เดซิเบล



รูปที่ 4.18 การสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า

จากรูปที่ 4.19 แสดงผลการสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยติดตั้งสายอากาศภาครับทางด้านหลัง แถบสีแต่ละระดับสีแทนการสูญเสียเชิงวิถีดังนี้

- สีน้ำเงินถึงสีฟ้า มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 55 เดซิเบล ถึง 60 เดซิเบล
- สีฟ้าถึงสีส้ม มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 60 เดซิเบล ถึง 65 เดซิเบล
- สีส้มถึงสีเหลือง มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 65 เดซิเบล ถึง 75 เดซิเบล



รูปที่ 4.19 การสูญเสียเชิงวิถีของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง

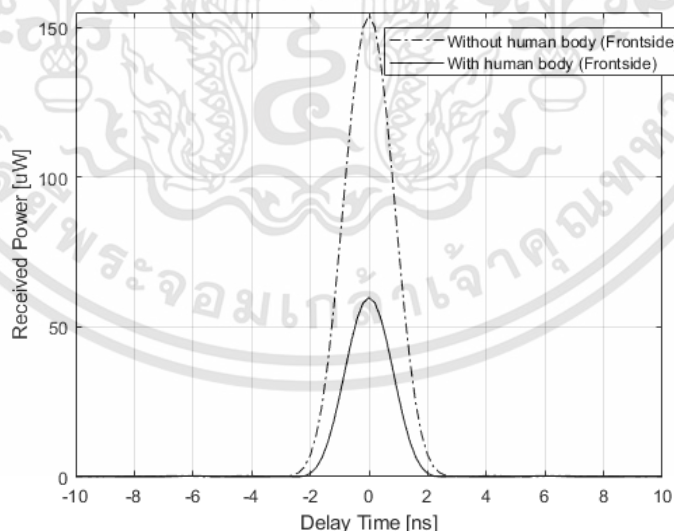
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งสายอากาศภาครับด้านหน้ามีค่าการสูญเสียเชิงวิถีอยู่ในช่วง 41.67 เดซิเบล ถึง 46.55 เดซิเบล ตำแหน่งของสายอากาศที่มีการสูญเสียเชิงวิถีต่ำสุด คือ ตำแหน่ง (4, 4) ตำแหน่งของสายอากาศที่มีการสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด คือ ตำแหน่ง (1, 2) และด้านหลังมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีอยู่ในช่วง 56.94 เดซิเบล ถึง 67.55 เดซิเบล ตำแหน่งของสายอากาศที่มีการสูญเสียเชิงวิถีต่ำสุด คือ ตำแหน่ง (3, 6) ตำแหน่งของสายอากาศที่มีการสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด คือ ตำแหน่ง (5, 1) ซึ่งด้านหลังมาค่ามากกว่าด้านหน้า และมีระดับของสัญญาณแต่ละตำแหน่งแตกต่างจากด้านหน้า เนื่องมาจากด้านหลังมีผลกระทบจากการการบดบังของร่างกายมนุษย์และการสะท้อนของช่องสัญญาณ

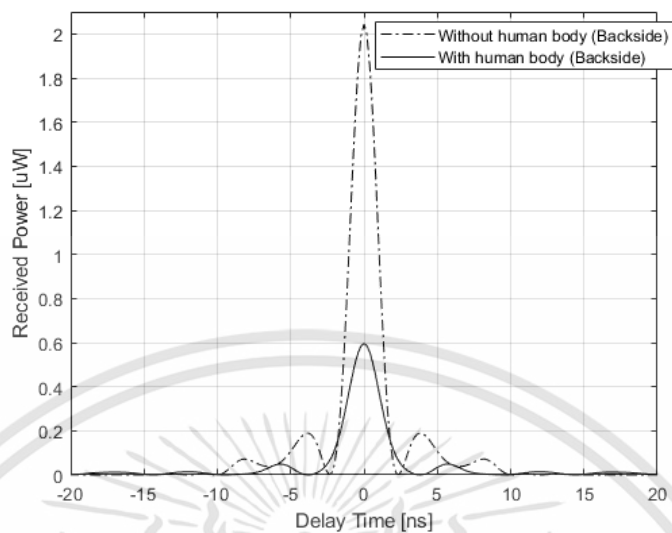
เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียเชิงวิถีเมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นแล้วค่าการสูญเสียเชิงวิถีจะน้อยกว่าเมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น

#### 4.3.2 ภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงานเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น

รูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงานในกรณีที่ไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้าและด้านหลังเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ไม่มีร่างกายมนุษย์มีระดับกำลังงานสูงกว่ากรณีมีร่างกายมนุษย์ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงานเมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น

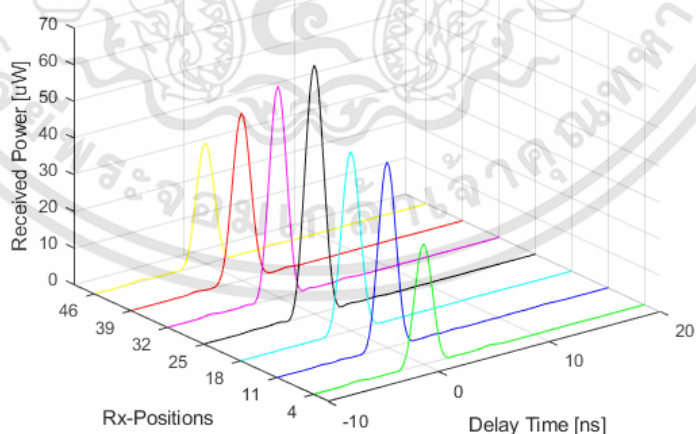


รูปที่ 4.20 การประวิงเวลากำลังงานในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า



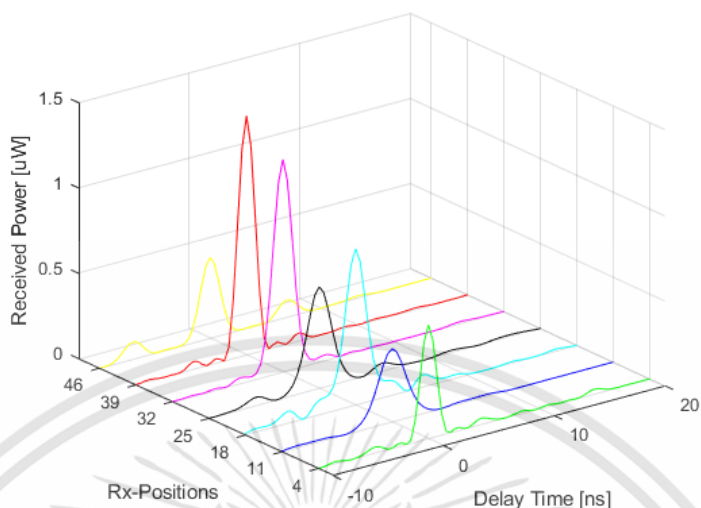
รูปที่ 4.21 การประวิงเวลากำลังงานในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง

รูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ข้อมูลถูกนำมาแสดง 7 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่ 4 11 18 25 32 39 และ 46 ซึ่งเป็นแถวกลางลำตัวของตำแหน่งที่ติดตั้งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ ด้านหน้าและด้านหลังตามลำดับ พบว่าด้านหน้าและด้านหลังในแต่ละตำแหน่ง มีค่าประวิงเวลา 0 นาโนวินาที



รูปที่ 4.22 การประวิงเวลากำลังงานในแถวกลางลำตัวกรณีมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

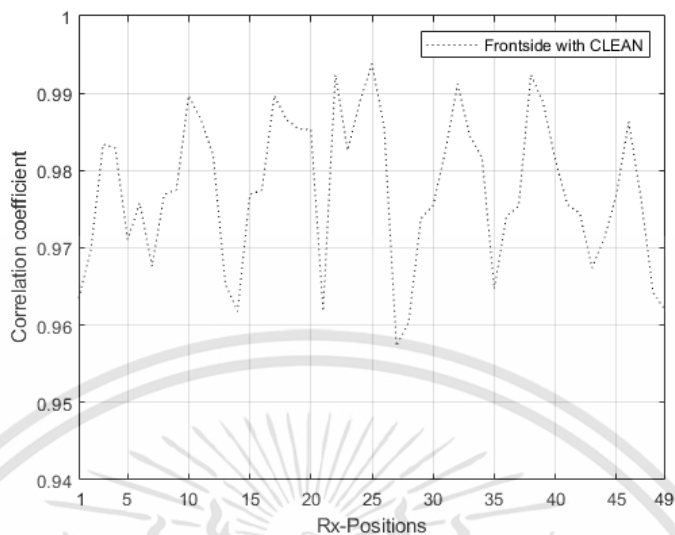


รูปที่ 4.23 การประวิงเวลากำลังงานในแฉกกลางลำตัวกรณีมีร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง

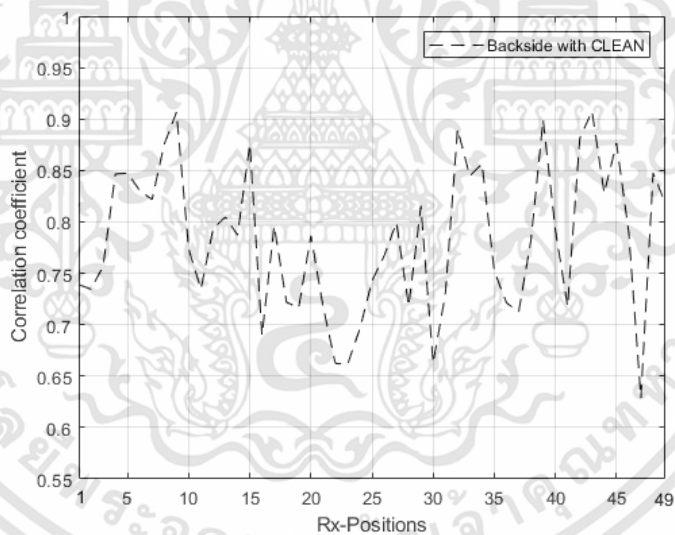
### 4.3.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น

การแสดงผลสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และตำแหน่งในการทดสอบ สำหรับระบบโครงข่ายไร้สายรูปร่างของสัญญาณมีความสำคัญ ดังนั้นจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ถึงค่าความเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้ โดยค่าดังกล่าวจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 กล่าวคือถ้าค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเท่ากับ 1 นั้นสัญญาณที่รับได้จะเหมือนกับสัญญาณแบบไอโซทรอปิกทุกประการ คือ ไม่เกิดความผิดเพี้ยน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นทางด้านหน้าและด้านหลังแสดงดังรูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นทางด้านหน้าและด้านหลัง (รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17) กับเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นทางด้านหน้าและด้านหลัง (รูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25) จะเห็นได้ว่าทางด้านหน้าเมื่อผ่านคลื่นแล้วค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าสูงขึ้น แต่ทางด้านหลังเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นแล้วค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะใกล้เคียงกับเมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น แสดงดังรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.1

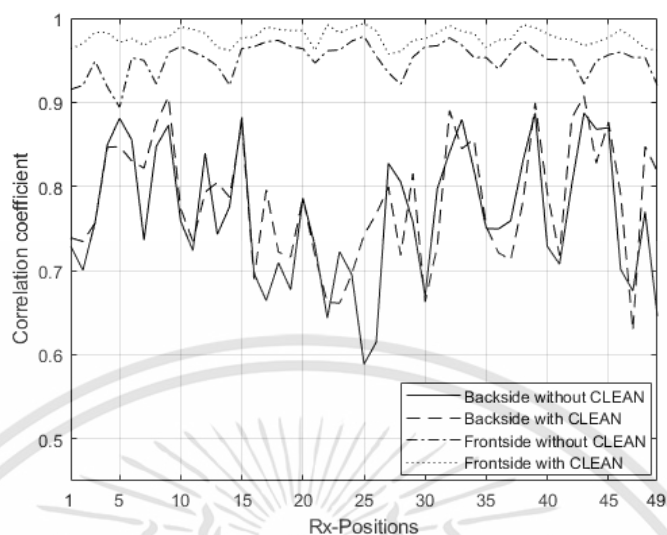


รูปที่ 4.24 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า



รูปที่ 4.25 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้าและด้านหลัง  
เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลีนและผ่านอัลกอริทึมแบบคลีน

ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตำแหน่งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์  
ทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง

ตำแหน่งของสายอากาศ ภาครับบนร่างกายมนุษย์	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์					
	เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึม แบบคลีน			เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีน		
	ค่าน้อย ที่สุด	ค่ามาก ที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าน้อย ที่สุด	ค่ามาก ที่สุด	ค่าเฉลี่ย
ด้านหน้า	0.89	0.98	0.95	0.89	0.99	0.97
ด้านหลัง	0.59	0.89	0.77	0.63	0.91	0.79

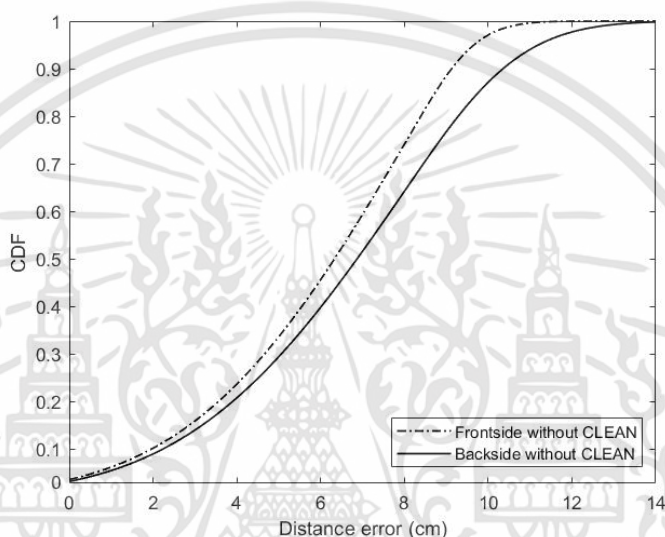
#### 4.4 ผลการทดสอบการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยใช้เทคนิคการ สแกนลายนิ้วมือ

สำหรับการพิจารณาอัลกอริทึมแบบคลีนที่เหมาะสมที่นำมาใช้ร่วมกับการระบุตำแหน่ง  
โดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือนั้นจะพิจารณาตำแหน่งโดยใช้ลายลักษณะของตำแหน่งอ้างอิงและ  
ตำแหน่งทดสอบ

ประสิทธิภาพความแม่นยำในการหาตำแหน่งในปริภูมิงานนี้ พิจารณาจากค่าความ  
ผิดพลาดของระยะทาง แสดงในรูปแบบของค่าความผิดพลาดของระยะทางในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$   
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

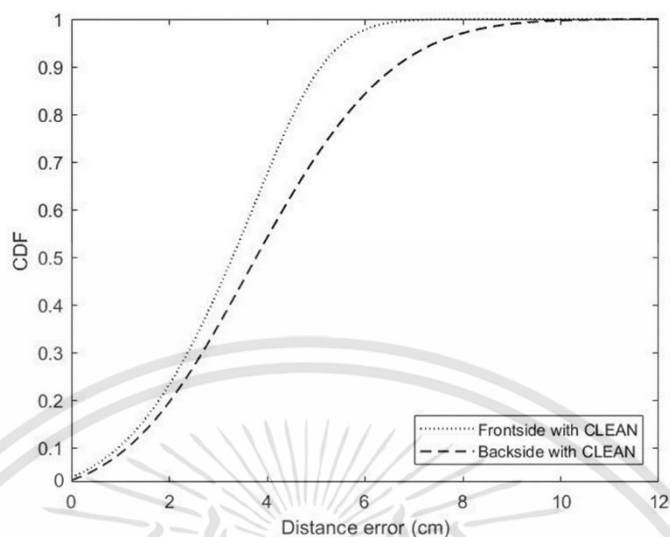
ตามแบบจำลองการวัดด้วยฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางโดยปริญาณิพนธ์นี้ ได้ใช้ค่าความแรงของสัญญาณในการหาตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.27 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางที่เกิดขึ้นจากการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ จะพบว่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุดเท่ากับ 12 เซนติเมตร ความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุดที่ 0 เซนติเมตร



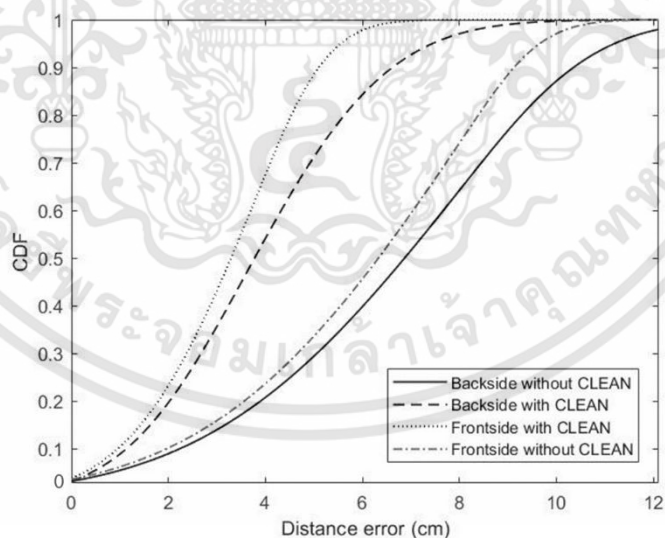
รูปที่ 4.27 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ

จากรูปที่ 4.28 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางที่เกิดขึ้นจากการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลิน จะพบว่าทางด้านหน้าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุดเท่ากับ 5.66 เซนติเมตร ความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุดที่ 0 เซนติเมตร และทางด้านหลังความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุดที่เท่ากับ 8.94 เซนติเมตร ความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุด 0 เซนติเมตร



รูปที่ 4.28 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น

จากรูปที่ 4.29 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางที่เกิดขึ้นจากการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือเปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่นทั้งด้านหน้าและด้านหลัง



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางที่เกิดขึ้นจากการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือกับใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 พบว่าตำแหน่งของสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด 0 เซนติเมตร ค่าความผิดพลาดมากที่สุด 11.31 เซนติเมตร และมีค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย 5.61 เซนติเมตร เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นมีค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุด 0 เซนติเมตร ค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด 5.66 เซนติเมตร และค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.69 เซนติเมตร ซึ่งค่าความผิดพลาดของระยะเฉลี่ยเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นดีกว่าเมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นเท่ากับ 2.92 เซนติเมตร คิดเป็นร้อยละ 52.05 และทางด้านหลังเมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นมีค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุด 0 เซนติเมตร ค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด 12.00 เซนติเมตร และมีค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย 6.41 เซนติเมตร เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นมีค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อยที่สุด 0 เซนติเมตร ค่าความผิดพลาดของระยะทางมากที่สุด 8.94 เซนติเมตร และมีความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.53 เซนติเมตร ซึ่งค่าความผิดพลาดของระยะเฉลี่ยเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นดีกว่าเมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นเท่ากับ 2.88 เซนติเมตร คิดเป็นร้อยละ 44.93 เนื่องจากอัลกอริทึมแบบคลื่นได้ทำการขจัดสัญญาณรบกวนที่ภาครับ

ตารางที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของตำแหน่งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ ทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง

ตำแหน่งของสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เซนติเมตร)						เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นกับเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น
	เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น			เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น			
	ค่าน้อยที่สุด	ค่ามากที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าน้อยที่สุด	ค่ามากที่สุด	ค่าเฉลี่ย	
ด้านหน้า	0	11.31	5.61	0	5.66	2.69	เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นดีกว่าร้อยละ 52.05
ด้านหลัง	0	12.00	6.41	0	8.94	3.53	เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นดีกว่าร้อยละ 44.93

#### 4.5 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงผลการทดสอบวัดคุณลักษณะของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปและผลการทดสอบช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยใช้แบบจำลองตามที่แสดงไว้ในบทที่ 3 พารามิเตอร์ที่พิจารณาสำหรับการทดสอบคุณสมบัติสายอากาศ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{11}|$  อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราการขยาย และแบบรูปการแผ่กำลังงาน อีกทั้งยังแสดงผลการทดสอบการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์เมื่อขจัดสัญญาณรบกวนด้วยอัลกอริทึมแบบคลื่น รวมทั้งผลการทดสอบการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น จากนั้นทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพความแม่นยำและประเมินผลการหาตำแหน่งด้วยค่าความผิดพลาดระยะทาง แสดงผลในรูปแบบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทาง



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยใช้เทคนิคสแกนลายนิ้วมือทำการวัดที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกการสร้างและทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป ทำการพิจารณาพารามิเตอร์ดังนี้ สัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราการขยาย และฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ ส่วนที่สองทดสอบและวิเคราะห์การวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ พารามิเตอร์ที่พิจารณาได้แก่ การสูญเสียเชิงวิถี ภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงาน และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ส่วนที่สามหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น จากนั้นทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพความแม่นยำและประเมินผลการหาตำแหน่งด้วยค่าความผิดพลาดระยะทาง แสดงผลในรูปแบบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทาง สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

##### 5.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

เนื่องจากสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่สร้างขึ้นตามการคำนวณและการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คุณสมบัติของสายอากาศที่สร้างขึ้นไม่เป็นไปตามที่ต้องการ จึงทำการแก้ไขปรับปรุงขนาดของสายอากาศโดยการเพิ่มความกว้างของระนาบพื้น และความยาวของระนาบพื้นเป็นผลให้สายอากาศมีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณดีขึ้น ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราการขยาย และแบบรูปการแผ่กำลังงาน และฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

การทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบพบว่าสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ยอมรับได้ที่ช่วงความถี่ประมาณ 2.37 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.43 จิกะเฮิรตซ์ นั่นคือสายอากาศมีความแม่นยำที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์

การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบพบว่าสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันที่ยอมรับได้ที่ช่วงความถี่ประมาณ 2.36 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.44 จิกะเฮิรตซ์ นั่นคือสายอากาศมีความแม่นยำที่ช่วงความถี่ 2.36 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.44 จิกะเฮิรตซ์

การทดสอบอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบพบว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีการแมตช์กับมาตรฐานของระบบที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์

การทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลการทดสอบพบว่าอัตราการขยายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์มีค่าสูงสุด

การทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลการทดสอบพบว่าแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ได้จากการทดสอบใกล้เคียงกับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศด้วยวิธีสามสายอากาศ พบว่าสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน และขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์

จากผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปพบว่าสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้จริงที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นไปตามผลการจำลองคุณลักษณะสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ดังนั้นสายอากาศแผ่นไมโครสตริปนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ได้

### 5.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์

นำสายอากาศที่สร้างมาใช้งานจริงโดยนำไปทดสอบวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์โดยกำหนดตำแหน่งสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ด้านหน้า 49 ตำแหน่งและด้านหลัง 49 ตำแหน่ง ได้ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน  $|S_{21}|$  นำผลการทดสอบดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังนี้

จากการทดสอบการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณพบว่าในตำแหน่งของสายอากาศด้านหน้ามีการสูญเสียเชิงวิถีน้อยกว่าด้านหลังอันเนื่องมาจากด้านหลังมีผลกระทบจากการบดบังของร่างกายมนุษย์ การสะท้อนของช่องสัญญาณ และโครงสร้างของสายอากาศ เมื่อนำผลไปผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นแล้วค่าการสูญเสียเชิงวิถีจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น

ภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงานของสัญญาณพบว่าตำแหน่งของสายอากาศด้านหน้ามีค่าภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงานมากกว่าด้านหลังอันเนื่องมาจากการบดบังของร่างกายมนุษย์และการสะท้อนของช่องสัญญาณ เมื่อนำผลไปผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นแล้วภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงานมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณพบว่าตำแหน่งของสายอากาศด้านหน้ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่าด้านหลังอันเนื่องมาจากการบดบังของร่างกายมนุษย์และการสะท้อนของช่องสัญญาณ เมื่อนำผลด้านหน้าผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นแล้วค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าสูงขึ้น แต่ด้านหลังเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นแล้วมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น จากผลการวิเคราะห์จึงสรุปได้ว่าร่างกายมนุษย์มีผลต่อสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณ

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นแล้วจะทำให้ผลการทดสอบวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์ดีขึ้น เนื่องจากอัลกอริทึมแบบคลื่นจะขจัดสัญญาณรบกวนภาครับได้

### 5.1.3 การวิเคราะห์ผลการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ด้วยเทคนิคสแกนลายนิ้วมือ

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบช่องสัญญาณการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์พบว่ามีความสอดคล้องกับแผนงานที่ได้นำเสนอไว้จึงได้ทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ผ่านการจัดสัญญาณรบกวนด้วยอัลกอริทึมแบบคลื่นโดยมีการพิจารณาการสูญเสียเชิงวิถี ภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และได้แสดงผลความผิดพลาดของระยะทางในการหาตำแหน่งในรูปแบบของฟังก์ชันแจกแจงสะสม

จากผลการวิเคราะห์ความผิดพลาดของระยะทางที่ได้จากการวัดคุณลักษณะช่องสัญญาณเมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นพบว่าตำแหน่งด้านหน้ามีความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย 5.61 เซนติเมตร และตำแหน่งด้านหลังมีความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย 6.41 เซนติเมตร

จากผลการวิเคราะห์ความผิดพลาดของระยะทางที่ได้จากการวัดคุณลักษณะช่องสัญญาณเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นพบว่าตำแหน่งด้านหน้ามีความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย 2.69 เซนติเมตร และตำแหน่งด้านหลังมีความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย 3.53 เซนติเมตร

เมื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะเฉลี่ยตำแหน่งด้านหน้าเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นดีกว่าเมื่อไม่อัลกอริทึมแบบคลื่นคิดเป็นร้อยละ 52.05 และตำแหน่งด้านหลังเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นดีกว่าเมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นคิดเป็นร้อยละ 44.93 เนื่องจากอัลกอริทึมแบบคลื่นได้ทำการขจัดสัญญาณรบกวนภาครับให้ดีขึ้น

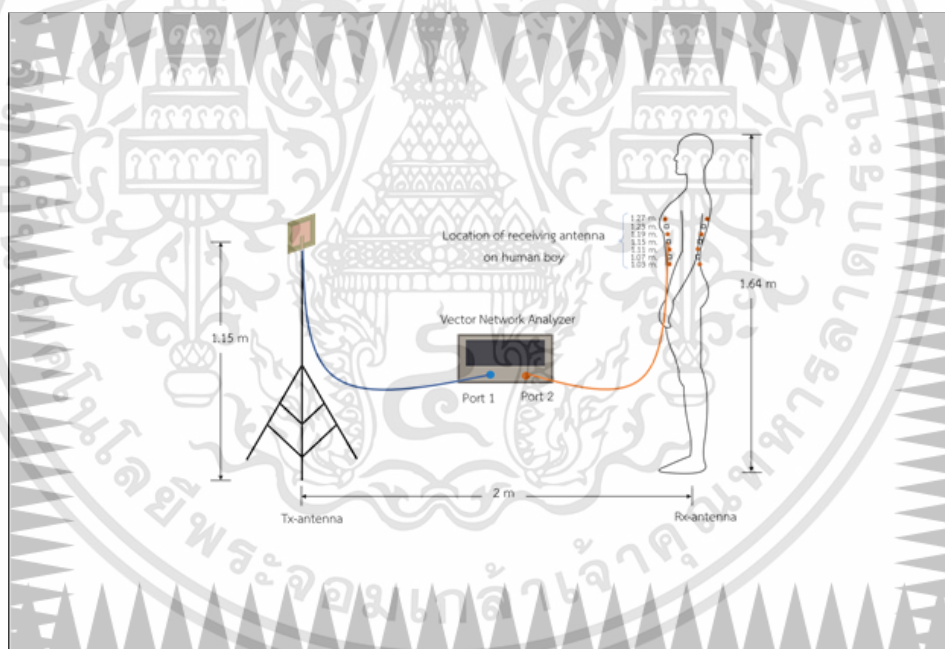
## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป พบว่ามีข้อผิดพลาดเนื่องมาจากผู้จัดทำขาดประสบการณ์ในการสร้างสายอากาศ การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบเป็นผลให้สายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่สร้างขึ้นนั้นมีผลการทดสอบคุณลักษณะของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศไม่เป็นไปตามผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งหมด จึงต้องมีการปรับปรุงให้มีคุณลักษณะของสายอากาศตามที่ต้องการ

ในปฏิญานิพนธ์นี้ออกแบบและสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปสำหรับการศึกษาทดลองของการหาตำแหน่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ด้วยเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ และพิจารณาความเที่ยงตรงและแม่นยำของการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่นเพื่อขจัดสัญญาณรบกวน สำหรับในโอกาสถัดไปอาจทำการทดสอบด้วยสายอากาศชนิดอื่น เช่น สายอากาศกรวยคู่ สายอากาศแบบวงแหวน หรือสายอากาศแผ่นไมโครสตริปในรูปแบบอื่น เป็นต้น สถานที่ทดสอบปฏิญานิพนธ์นี้ทำในห้องปิด ครั้งถัดไปอาจทำในพื้นที่โล่ง หรือห้องไร้การสะท้อน ดังรูปที่ 5.1 เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดอันเป็นผลมาจากการสะท้อน และเพื่อความแม่นยำในการหาตำแหน่ง และสุดท้ายอาจเป็นเทคนิคในการหาตำแหน่ง ซึ่งสามารถพัฒนาต่อไปได้ขึ้นกับการประยุกต์ใช้งานในอนาคต



รูปที่ 5.1 แบบจำลองการทดลองวัดจริงช่องสัญญาณการส่งผ่านโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ในห้องไร้การสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] R. Jafari and M. Effatparvar, "WBAN," Cooperative Routing Protocols in Wireless Body Area Networks (WBAN): A Survey, Dec 18 2016.
- [2] B. Cusack and A. K. Kyaw, "Medical wireless networks," Forensic Readiness for Wireless Medical Systems, Mar 12 2012.
- [3] R. Yuce Mehmet and Y. Khan Jamil, Wireless Body Area Networks: Technology, Implementation, and Applications, Dec 02 2012.
- [4] F. Shahin, ZigBee Wireless Networks and Transceivers. Burlington, MA.: Newnes, 2008.
- [5] N. Chahé, D. Charles and A. Sofiene, "Geolocation in Mines With an Impulse Response Fingerprinting Technique and Neural Networks," *2006 IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 3, March 2006.
- [6] สนิท เตียวฉิม. "การประเมินผลทดลองวัดของรูปคลื่นส่งผ่านแถบกว้างยิ่งโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559
- [7] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [8] S. S. Ahmad, S. Camtepe, and D. Jayalath, "Understanding data flow and security requirements in wireless body area networks for healthcare," in 2015 17th International Conference on E-health Networking, Application & Services (HealthCom). IEEE, 2015, pp. 621–626.
- [9] Olatinwo, D. Damilola, A. Abu-Mahfouz, and G. Hancke. "A Survey on LPWAN Technologies in WBAN for Remote Health-Care Monitoring." *Sensors* 19, Department of Computer Science, City University of Hong Kong, 2019.
- [10] M. H. Ali, and F. Haque. "Wireless Body Area Network: An Overview and Various Applications." *Journal of Computer and Communications, Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Daffodil International University*, 2017.

- [11] N. F. Timmons and W. G. Scanlon, "Analysis of the performance of IEEE 802.15.4 for medical sensor body area networking," *In Proceedings of 2004 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (IEEE SECON)*, Oct 2004.
- [12] M. Sukor, S. Ariffin, N. Fisal, S. K. S. Yusof and A. Abdallah, "Performance Study of Wireless Body Area Network in Medical Environment," *2008 Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS)*, pp. 202-206, 2008.
- [13] "IEEE Draft Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 15.6: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs) used in or around a body." in IEEE P802.15.6/D04, Jun 2011.
- [14] J. Mišić and V. Mišić, *Wireless Personal Area Networks Performance, Interconnections and Security with IEEE 802.15.4*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [15] "IEEE 802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)." Sep 2006.
- [16] D. Gislason, *ZigBee Wireless Networking*, Burlington, MA.: Newnes, 2008.
- [17] "IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 15.4: Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) - Amendment 6: TV White Space Between 54 MHz and 862 MHz Physical Layer," in IEEE P802.15.4m/D4, Oct 2013.
- [18] K. T. Le, designing a ZigBee-ready ieee 802.15.4-compliant radio transceiver. chipcon, 11/2004.
- [19] ภาคย์ สนธเสาวภาคย์. "การพัฒนาระบบประมวลผลข้อมูลของสถานะแวดล้อมร่วมกับโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย." , สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, 2557.

- [20] R. Yuce Mehmet and Y.Khan Jamil, *Wireless Body Area Networks: Technology, Implementation, and Applications*, Dec 02 2012.
- [21] K. S. Kwak, M. A. Ameen, D. Kwak, C. Lee and H. Lee, "A study on proposed IEEE 802.15 WBAN MAC protocols." *2009 9th International Symposium Communications and Information Technology*. 2009.
- [22] S. Ullah, M. Imran, and M. Alnuem, "A Hybrid and Secure Priority-Guaranteed Mac Protocol for Wireless Body Area Network." *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2014.
- [23] M. Somasundaram and R. Sivakumar, "Security in wireless body area networks: A survey." *in International Conference on Advancements in Information Technology*, 2011.
- [24] S. Ullah, M. Mohaisen, and M. A. Alnuem, "A review of ieee 802.15. 6 mac, phy, and security specifications." *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2013.
- [25] M. Toorani, "On vulnerabilities of the security association in the ieee 802.15.6 standard." *Financial Cryptography and Data Security*. 2015.
- [26] A. J. Weiss, "Direct position determination of narrowband radio frequency Transmitters," *IEEE Sig. Processing Lett*, pp. 513–516, May 2004.
- [27] Caffery J. J. *Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems*. Boston: Kluwer Academic. 1999.
- [28] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," *Proc. IRE*, Vol. 34, no 5, pp. 254 - 256, May 1946.
- [29] F. Nekoogar, "Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications," New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- [30] J. Sangthong, P. Supanakoon and S. Promwong, "Study on Indoor Localization Using UWB Fingerprinting," *The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD 2010)*, pp. 1223-1227, Nong Khai, Thailand, Mar 4-6, 2010.

- [31] X. Zhu, W. Qu, T. Qiu, L. Zhao, M. Atiqzaman and D. O. Wu, "Indoor Intelligent Fingerprint-Based Localization: Principles, Approaches and Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2634 - 2657, Fourthquarter 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.3014304.
- [32] H. Laitinen, J. Lahtenmaki and T. Nordstrom, "Database correlation method for GSM location," *IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference, Spring 2001*. Proceedings (Cat. No.01CH37202), 2001, pp. 2504-2508 vol.4, doi: 10.1109/VETECS.2001.944052.
- [33] R. Olyazadeh. Least Square Approach on Indoor Positioning Measurement Techniques : Geomundus, 2012.
- [34] M. Choi and B. Jang. "An Accurate Fingerprinting based Indoor Positioning Algorithm." *International Journal of Applied Engineering Research*. (2017) : 86-90.
- [35] C. Mark, B. Grill, "An Efficient Implementation of the Algorithm 'CLEAN'," *Astron. Astrophys*, vol. 89, pp. 377-378, 1980.
- [36] C. Buccella M. Feliziani and G. Manzi, "Detection and localization of defects in shielded cables by time-domain measurements with UWB pulse injection and clean algorithm postprocessing," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 46, no. 4, pp. 597-605, Nov. 2004.
- [37] D. Arpasin and S. Promwong, "Evaluation of UWB-Body Area Network by Using CLEAN Algorithm," *2013 International Conference on Engineering, Applied Science, and Technology (ICEAST 2013)*, August 21-24, 2013, Bangkok, Thailand
- [38] W. Li, X. Hu and T. Jiang, "Path Loss Models for IEEE 802.15.4 Vehicle-to-Infrastructure Communications in Rural Areas," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 3865-3875, Oct. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.
- [39] L. Yang and G.B. Giannakis, "Ultra-wideband communications: An idea whose time has come." *IEEE Signal Process, Mag*, vol. 2, No.6, pp. 26-54, Nov. 2004.

- [40] S. R. SAUNDERS. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. NJ. : John Wiley & Sons Inc., 2007
- [41] ภาณุพงษ์ พวงนาค จิรายุ ธรรมแสง, “การหาตำแหน่งของบุคคลภายในอาคารด้วยสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [42] Y. L. Kuo and K. L. Wong, "Printed double-T monopole antenna for 2.4/5.2 GHz dual-band WLAN operations," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 9, pp. 2187-2192, Sept 2003.
- [43] S. R. Saunders. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. NJ.: John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [44] S. Promwong, W. Hachitani, G. S. Ching and J. Takada, "Characterization of ultra-wideband antenna with human body," IEEE International Symposium on Communications and Information Technology, 2004. ISCIT 2004., 2004, pp. 1213-1217 vol.2, doi: 10.1109/ISCIT.2004.
- [45] T. A. Milligan, Modern antenna design. John Wiley & Sons, 2005.
- [46] A. D. Khaleel, “Design and Simulation Microstrip Patch Antenna Using CST Microwave Studio.” The National University of Malaysia.
- [47] Keysight. Product Fact Sheet Keysight E5061B Network Analyzer 5 Hz to 3 GHz - Technical Overview, 2017.
- [48] C. A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [49] J. A. Richards, *Radio wave propagation an introduction for the non-specialist*. Springer Science & Business Media, 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับสำหรับตำแหน่งของสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์  
ทางด้านหน้า

ตำแหน่งที่	พิกัดตำแหน่งของ สายอากาศภาครับบน ร่างกายมนุษย์ (x, y)	ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (ไมโครวัตต์)	
		เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น	เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น
1	(1, 1)	6.44	25.81
2	(1, 2)	3.90	23.68
3	(1, 3)	2.06	28.80
4	(1, 4)	2.28	31.53
5	(1, 5)	2.49	37.40
6	(1, 6)	7.20	37.27
7	(1, 7)	9.02	30.00
8	(2, 1)	7.42	31.34
9	(2, 2)	7.35	46.26
10	(2, 3)	12.87	54.47
11	(2, 4)	7.58	50.79
12	(2, 5)	5.18	51.35
13	(2, 6)	7.56	42.22
14	(2, 7)	13.06	44.71
15	(3, 1)	12.15	53.80
16	(3, 2)	17.50	58.39
17	(3, 3)	14.10	46.63
18	(3, 4)	14.64	48.96
19	(3, 5)	14.80	50.16
20	(3, 6)	14.22	49.24
21	(3, 7)	11.48	49.78
22	(4, 1)	12.25	44.17
23	(4, 2)	13.67	45.84
24	(4, 3)	16.78	59.78
25	(4, 4)	20.01	68.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับสำหรับตำแหน่งของสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์  
ทางด้านหน้า (ต่อ)

ตำแหน่งที่	พิกัดตำแหน่งของ สายอากาศภาครับบน ร่างกายมนุษย์ (x, y)	ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (ไมโครวัตต์)	
		เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น	เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น
26	(4, 5)	12.21	51.42
27	(4, 6)	7.10	40.74
28	(4, 7)	5.24	48.62
29	(5, 1)	15.85	53.49
30	(5, 2)	10.35	35.79
31	(5, 3)	14.10	46.63
32	(5, 4)	17.79	57.74
33	(5, 5)	14.08	52.48
34	(5, 6)	6.80	51.86
35	(5, 7)	6.91	45.80
36	(6, 1)	7.64	33.24
37	(6, 2)	5.86	33.20
38	(6, 3)	6.16	39.78
39	(6, 4)	9.09	45.71
40	(6, 5)	5.63	49.23
41	(6, 6)	5.31	45.21
42	(6, 7)	5.46	26.27
43	(7, 1)	6.42	25.33
44	(7, 2)	3.80	22.57
45	(7, 3)	2.05	27.96
46	(7, 4)	2.37	32.99
47	(7, 5)	2.57	37.40
48	(7, 6)	7.30	35.97
49	(7, 7)	9.08	30.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับสำหรับตำแหน่งของสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์  
ทางด้านหลัง

ตำแหน่งที่	พิกัดตำแหน่งของ สายอากาศภาครับบน ร่างกายมนุษย์ (x, y)	ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (ไมโครวัตต์)	
		เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น	เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น
1	(1, 1)	0.08	0.67
2	(1, 2)	0.10	0.96
3	(1, 3)	0.14	0.85
4	(1, 4)	0.15	0.67
5	(1, 5)	0.19	0.84
6	(1, 6)	0.14	1.15
7	(1, 7)	0.07	0.56
8	(2, 1)	0.13	0.67
9	(2, 2)	0.14	0.58
10	(2, 3)	0.05	0.27
11	(2, 4)	0.03	0.43
12	(2, 5)	0.12	1.34
13	(2, 6)	0.35	1.96
14	(2, 7)	0.16	1.58
15	(3, 1)	0.10	0.78
16	(3, 2)	0.05	0.55
17	(3, 3)	0.02	0.23
18	(3, 4)	0.15	0.92
19	(3, 5)	0.11	1.03
20	(3, 6)	0.37	2.02
21	(3, 7)	0.33	1.90
22	(4, 1)	0.03	0.56
23	(4, 2)	0.15	1.12
24	(4, 3)	0.11	0.86
25	(4, 4)	0.06	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับสำหรับตำแหน่งของสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์  
ทางด้านหลัง (ต่อ)

ตำแหน่งที่	พิกัดตำแหน่งของ สายอากาศภาครับบน ร่างกายมนุษย์ (x, y)	ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (ไมโครวัตต์)	
		เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น	เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น
26	(4, 5)	0.08	0.66
27	(4, 6)	0.28	1.26
28	(4, 7)	0.42	2.00
29	(5, 1)	0.02	0.18
30	(5, 2)	0.01	0.69
31	(5, 3)	0.05	1.39
32	(5, 4)	0.10	1.24
33	(5, 5)	0.17	1.04
34	(5, 6)	0.15	0.70
35	(5, 7)	0.19	1.04
36	(6, 1)	0.06	0.40
37	(6, 2)	0.02	0.24
38	(6, 3)	0.07	0.69
39	(6, 4)	0.18	1.40
40	(6, 5)	0.08	0.54
41	(6, 6)	0.05	0.30
42	(6, 7)	0.02	0.39
43	(7, 1)	0.07	0.41
44	(7, 2)	0.04	0.50
45	(7, 3)	0.08	0.66
46	(7, 4)	0.04	0.47
47	(7, 5)	0.06	0.46
48	(7, 6)	0.12	0.63
49	(7, 7)	0.05	0.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การสูญเสียเชิงวิถีสำหรับตำแหน่งของสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า

ตำแหน่งที่	พิกัดตำแหน่งของ สายอากาศภาครับบน ร่างกายมนุษย์ (x, y)	การสูญเสียเชิงวิถี (เดซิเบล)	
		เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น	เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น
1	(1, 1)	51.00	45.87
2	(1, 2)	50.72	46.55
3	(1, 3)	50.45	45.35
4	(1, 4)	50.05	44.56
5	(1, 5)	49.34	44.32
6	(1, 6)	49.88	44.53
7	(1, 7)	50.65	45.43
8	(2, 1)	49.61	44.68
9	(2, 2)	48.49	43.35
10	(2, 3)	47.68	42.64
11	(2, 4)	48.03	42.94
12	(2, 5)	48.01	42.89
13	(2, 6)	49.12	43.75
14	(2, 7)	48.84	43.50
15	(3, 1)	47.80	42.69
16	(3, 2)	47.49	42.34
17	(3, 3)	48.51	43.31
18	(3, 4)	48.29	43.10
19	(3, 5)	48.30	43.00
20	(3, 6)	48.41	43.08
21	(3, 7)	48.11	43.08
22	(4, 1)	48.80	43.55
23	(4, 2)	48.53	43.39
24	(4, 3)	47.51	42.23
25	(4, 4)	46.99	41.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียเชิงวิถีสำหรับตำแหน่งของสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหน้า (ต่อ)

ตำแหน่งที่	พิกัดตำแหน่งของ สายอากาศภาครับบน ร่างกายมนุษย์ (x, y)	การสูญเสียเชิงวิถี (เดซิเบล)	
		เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบ คลิน	เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบ คลิน
26	(4, 5)	48.09	42.89
27	(4, 6)	49.16	43.90
28	(4, 7)	48.27	43.13
29	(5, 1)	48.00	42.72
30	(5, 2)	49.71	44.46
31	(5, 3)	48.51	43.31
32	(5, 4)	47.50	42.39
33	(5, 5)	48.11	42.80
34	(5, 6)	48.18	42.85
35	(5, 7)	48.59	43.39
36	(6, 1)	49.84	44.78
37	(6, 2)	50.01	44.79
38	(6, 3)	49.22	44.00
39	(6, 4)	48.61	43.40
40	(6, 5)	48.17	43.08
41	(6, 6)	48.60	43.45
42	(6, 7)	51.01	45.81
43	(7, 1)	51.03	45.96
44	(7, 2)	51.80	46.47
45	(7, 3)	50.68	45.53
46	(7, 4)	50.15	44.82
47	(7, 5)	49.48	44.27
48	(7, 6)	49.65	44.44
49	(7, 7)	50.37	45.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การสูญเสียเชิงวิถีสำหรับตำแหน่งของสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง

ตำแหน่งที่	พิกัดตำแหน่งของ สายอากาศภาครับบน ร่างกายมนุษย์ (x, y)	การสูญเสียเชิงวิถี (เดซิเบล)	
		เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น	เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น
1	(1, 1)	69.38	61.72
2	(1, 2)	68.19	60.18
3	(1, 3)	68.04	60.70
4	(1, 4)	68.10	61.76
5	(1, 5)	66.78	60.76
6	(1, 6)	65.67	59.39
7	(1, 7)	70.12	62.54
8	(2, 1)	68.11	61.75
9	(2, 2)	67.95	62.38
10	(2, 3)	72.96	65.64
11	(2, 4)	71.40	63.67
12	(2, 5)	65.16	58.72
13	(2, 6)	64.57	57.07
14	(2, 7)	65.14	58.01
15	(3, 1)	67.11	61.10
16	(3, 2)	70.65	62.59
17	(3, 3)	74.82	66.34
18	(3, 4)	68.28	60.38
19	(3, 5)	68.16	59.85
20	(3, 6)	63.95	56.94
21	(3, 7)	64.88	57.21
22	(4, 1)	71.31	62.56
23	(4, 2)	67.26	59.51
24	(4, 3)	68.75	60.67
25	(4, 4)	71.77	62.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียเชิงวิถีสําหรับตำแหน่งของสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง (ต่อ)

ตำแหน่งที่	พิกัดตำแหน่งของ สายอากาศภาครับบน ร่างกายมนุษย์ (x, y)	การสูญเสียเชิงวิถีสําหรับตำแหน่งของสายอากาศภาครับบนร่างกายมนุษย์ทางด้านหลัง (ต่อ)	
		เมื่อไม่ผ่านอัลกอริทึมแบบ คลิน	เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบ คลิน
26	(4, 5)	70.98	61.83
27	(4, 6)	65.57	59.01
28	(4, 7)	63.78	56.98
29	(5, 1)	74.88	67.55
30	(5, 2)	70.01	61.60
31	(5, 3)	65.44	58.56
32	(5, 4)	65.48	59.05
33	(5, 5)	65.85	59.82
34	(5, 6)	68.22	61.56
35	(5, 7)	67.23	59.81
36	(6, 1)	71.46	64.03
37	(6, 2)	73.61	66.30
38	(6, 3)	68.13	61.59
39	(6, 4)	64.50	58.54
40	(6, 5)	70.33	62.66
41	(6, 6)	73.19	65.27
42	(6, 7)	70.91	64.08
43	(7, 1)	69.84	63.88
44	(7, 2)	69.15	63.00
45	(7, 3)	67.93	61.80
46	(7, 4)	71.25	63.24
47	(7, 5)	71.69	63.37
48	(7, 6)	69.19	62.00
49	(7, 7)	73.26	64.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้