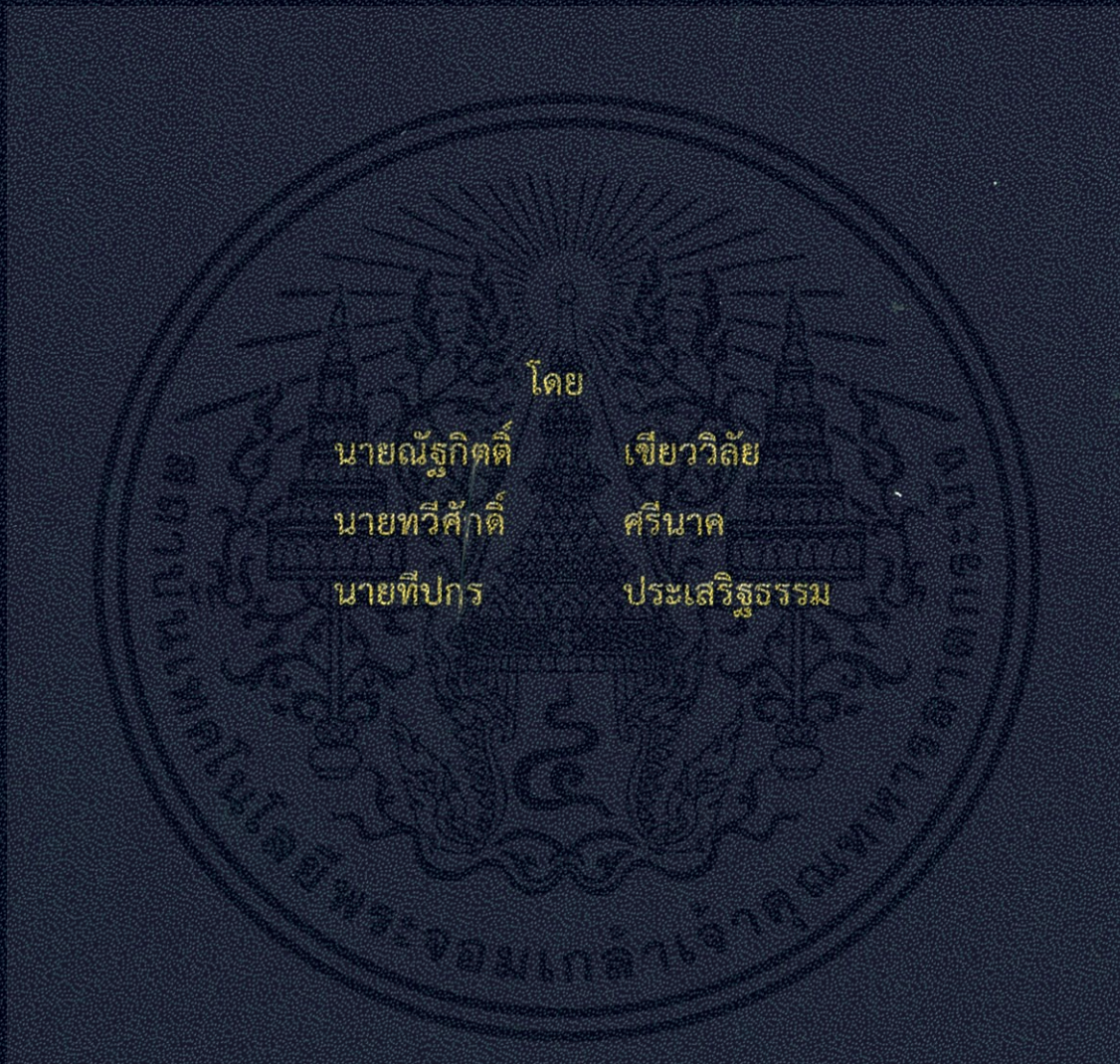


การศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศแถบกว้าง  
สำหรับโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์แบบไร้สาย  
A Study on Design and Fabrication of Broadband Antennas  
for Wireless Body Area Network



โดย

นายณัฐกิตติ์

เชียววิสัย

นายทวีศักดิ์

ศรีนาค

นายทีปกร

ประเสริฐธรรม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

การศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศแถบกว้าง

สำหรับโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์แบบไร้สาย

A Study on Design and Fabrication of Broadband Antennas

for Wireless Body Area Network



โดย

นายณัฐกิตติ์

เชียววิสัย

นายทวีศักดิ์

ศรีนาค

นายทีปกร

ประเสริฐธรรม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศแถบกว้าง

สำหรับโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์แบบไร้สาย

A Study on Design and Fabrication of Broadband Antennas  
for Wireless Body Area Network

โดย

นายณัฐกิตติ์ เขียววิสัย 52010310

นายทวิศักดิ์ ศรีนาค 52010403

นายทีปกร ประเสริฐธรรม 52010425

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สถาพร พรหมวงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล

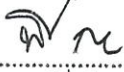
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

()

อาจารย์ที่ปรึกษา

15/12/56

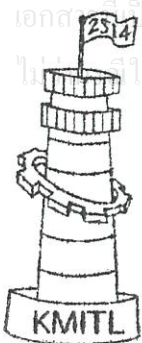
ปีการศึกษา 2555

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

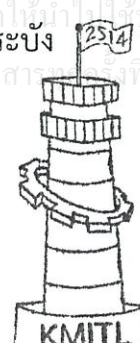
()

กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

15/12/56



วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering



วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศแถบกว้างสำหรับโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์แบบไร้สาย

A STUDY ON DESIGN AND FABRICATION OF BROADBAND ANTENNAS FOR WBAN

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐกิตติ์ เขียววิสัย 52010310
2. นายทวิศักดิ์ ศรีนาค 52010403
3. นายทีปกร ประเสริฐธรรม 52010425



(ดร.สธภาพ พรหมวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ.ดร.พิชญ สุพรรณกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา(ร่วม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปฏิญานិพนธ์เล่มนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือกรุณาที่ดีจาก ดร.สถาพร พรหมวงศ์ และผศ.พิชญ์ สุพรรณกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการซึ่งได้ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ ช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน รวมไปถึงให้ความรู้ ยืมอุปกรณ์ที่เป็น ประโยชน์ต่อการดำเนินงาน ทั้งนี้ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณบิดามารดาเป็นอย่างมากที่ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำปฏิญานิพนธ์ในครั้งนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโท และพี่ปริญญาเอกในห้องโปรเจกสำหรับคำแนะนำที่ดีมาโดยตลอด รวมทั้งคอยชี้แนะตรวจทานแก้ไขการทำงานตลอดมา

สุดท้ายขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ช่วยกันแบ่งเบางานและให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา ให้ปฏิญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

นายณัฐกิตต์ เขียววิสัย  
นายทวีศักดิ์ ศรีนาค  
นายทีปกร ประเสริฐธรรม  
ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศแถบกว้างสำหรับโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์แบบไร้สาย

A Study on Design and Fabrication of Broadband Antennas

for Wireless Body Area Network

โดย นายณัฐกิตติ์ เขียววิสัย 52010310  
 นายทวีศักดิ์ ศรีนาค 52010403  
 นายทีปกร ประเสริฐธรรม 52010425

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สถาพร พรหมวงศ์  
 ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล

#### บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศที่สามารถใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างสำหรับทดสอบการใช้งานบนโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งสายอากาศที่ใช้ในการรับ-ส่งโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์แบบไร้สาย ต้องมีคุณสมบัติที่ทำให้สัญญาณส่งผ่านได้ดี โดยมีความผิดเพี้ยนน้อย ดังนั้นเราควรรู้ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ โดยการประเมินผลจากประสิทธิภาพเพื่อศึกษาคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศว่าเหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานได้จริง

#### Abstract

This project presents the design and construction of micro-strip antenna for wideband signals. Used in wireless body area network (WBAN). Antennas which are used to transmit and receive WBAN signals must be able to accommodate its large bandwidth. Moreover, the signals should not be distorted too much when they pass through the antennas. Therefore, the transfer function of antennas should be known for the performance evaluation. We study the properties and parameters of the antenna that actually works and can be used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VIII
<b>บทที่ 1</b>	
<b>บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
<b>บทที่ 2</b>	
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	2
2.1 ลักษณะโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป	3
2.2 รูปแบบต่างๆของสายอากาศไมโครสตริป	4
2.3 รูปแบบการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริป	6
2.4 คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศที่สำคัญ	10
2.5 เทคโนโลยีการสื่อสารบรอดแบนด์	15
2.6 การสื่อสารไร้สายเครือข่ายบนร่างกายมนุษย์	18
<b>บทที่ 3</b>	
<b>การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์</b>	21
3.1 การคำนวณและการออกแบบ	21
3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป	24
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	28
3.4 การจัดเก็บผลการทดลอง	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4	
การจำลองและผลการทดสอบ	35
4.1 การจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม CST	35
4.2 ผลการทดลอง	40
4.3 ผลการทดลองบนร่างกายมนุษย์	48
4.4 อัตราขยายของสายอากาศ	63
บทที่ 5	
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผล	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป	3
2.2 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์	4
2.3 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสลีต	5
2.4 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบทราเวลลิงเวฟ	5
2.5 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริป	6
2.6 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งแกนร่วม	7
2.7 การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อผ่านช่องเปิด	8
2.8 การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อใกล้แผ่นไมโครสตริป	8
2.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ	10
2.10 โลบต่างๆของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ	11
2.11 เครือข่ายการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์	19
3.1 การออกแบบสายอากาศสำหรับใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz	21
3.2 จำลองการสร้างสายอากาศแบบที่ 1 ด้วยโปรแกรม CST microwave studio	25
3.3 จำลองการสร้างสายอากาศแบบที่ 2 ด้วยโปรแกรม CST microwave studio	25
3.4 จำลองการสร้างสายอากาศแบบที่ 3 ด้วยโปรแกรม CST microwave studio	26
3.5 สายอากาศจริงที่สร้างขึ้นมาทดสอบแบบที่ 1	26
3.6 สายอากาศจริงที่สร้างขึ้นมาทดสอบแบบที่ 2	27
3.7 สายอากาศที่สร้างขึ้นมาทดสอบแบบที่ 3	27
3.8 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์	29
3.9 ชุด calibrate	29
3.10 สายนำสัญญาณ	30
3.11 สายอากาศแบบไมโครสตริป	30
3.12 การทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศ	31
3.13 การทดสอบ Transfer function บนร่างกายมนุษย์	33
4.1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 1 จากโปรแกรม CST	35
4.2 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 2 จากโปรแกรม CST	36
4.3 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 3 จากโปรแกรม CST	36
4.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม CST	37
4.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม CST	37
4.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 3 ที่ได้จากโปรแกรม CST	38

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม CST	39
4.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม CST	39
4.9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 3 ที่ได้จากโปรแกรม CST	39
4.10 การตั้งอุปกรณ์การทดลองวัดคุณสมบัติของสายอากาศ	40
4.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 1 จากการทดสอบ	41
4.12 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 2 จากการทดสอบ	41
4.13 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 3 จากการทดสอบ	42
4.14 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 1 จากการทดสอบ	42
4.15 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 2 จากการทดสอบ	43
4.16 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 3 จากการทดสอบ	43
4.17 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 1 จากการทดสอบ	44
4.18 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 2 จากการทดสอบ	44
4.19 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 3 จากการทดสอบ	45
4.20 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบที่ 2 จากการทดลอง	46
4.21 การตั้งค่าอุปกรณ์การวัดสายอากาศบนร่างกายมนุษย์	47
4.22 ตัวอย่างตำแหน่งของสายอากาศตัวรับและตัวส่งบนร่างกายมนุษย์	48
4.23 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งศีรษะด้านหน้า	49
4.24 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งหัวไหล่ขวา	51
4.25 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งหัวไหล่ซ้าย	52
4.26 ผลการวัดผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งหน้าอก	53
4.27 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งหลัง	54
4.28 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งข้อมือขวา	55
4.29 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งข้อมือซ้าย	56
4.30 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งเอวขวา	57
4.31 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งเอวซ้าย	58
4.32 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งหัวเข่าขวา	59
4.33 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งหัวเข่าซ้าย	60
4.34 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งเท้าขวา	61
4.35 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ตำแหน่งเท้าซ้าย	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	สารบัญรูป(ต่อ)	หน้า
4.36	ผลการวัดขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ห้องป้อนกันการสะท้อนของคลื่น	63
4.37	ผลการวัดขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอน $S_{21}$ ที่ห้อง 305 ตึก 12 ชั้น	65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป	2
2.2 ข้อดีและข้อเสียของรูปแบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปด้วยวิธีต่างๆ	9
4.1 ค่าคุณสมบัติของสายอากาศ	45
4.2 ค่าความคลาดเคลื่อน	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการสื่อสารแบบไร้สายเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย ทำให้การติดต่อสื่อสารรับ-ส่งข้อมูลระหว่างกันง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้น เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการพัฒนาระบบสื่อสารแบบไร้สายให้มีความสามารถในการใช้งานได้ดีกว่า อีกทั้งโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจในการศึกษาเพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางทั้งในด้านการแพทย์และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี เช่น คอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ เป็นต้น ซึ่งโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์สามารถทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์เหล่านี้กับร่างกายเข้าถึงกันได้ ดังนั้นในปฏิญานีพนธ์นี้เป็นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่ย่านความถี่ 2.45 GHz สำหรับนำไปติดตั้งบนร่างกายมนุษย์เพื่อทำหน้าที่ในการรับ-ส่งและแพร่กระจายสัญญาณคลื่นวิทยุให้สามารถทำงานได้ดี

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิศวกรรมสายอากาศและการประยุกต์ใช้สายอากาศบนโครงข่ายร่างกายมนุษย์
2. ศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศให้ใช้ได้ในความถี่กว้างได้
3. ศึกษาวิเคราะห์ และประเมินผลสายอากาศเพื่อใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

### 1.3 ขอบเขตของปฏิญานีพนธ์

ศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่สามารถใช้งานได้ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และนำมาทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางสายอากาศด้วยเครื่อง Vector network analyzer และสามารถนำไปติดตั้งบนร่างกายมนุษย์เพื่อรับ-ส่งและแพร่กระจายคลื่นวิทยุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีลักษณะเป็นแบบระนาบ ใช้เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นโดยถูกนำมาใช้ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1953 โดย G.A. Deschamps เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำมากแต่มีข้อดีตรงที่ขนาดเล็กและเหมาะสมกับงานด้านความถี่สูง ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 Howell และ Munson มีการพัฒนาเทคนิค photo-etch ของฐานรองที่เป็นทองแดงหรือวัสดุไดอิเล็กตริกให้มีคุณสมบัติทางอุณหภูมิต่ำและทางกลศาสตร์ที่ดีขึ้นและมีค่าการสูญเสียต่ำ [3] จึงทำให้มีการพัฒนาและนำสายอากาศไมโครสตริปไปใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกันมาจนถึงในปัจจุบัน

สายอากาศไมโครสตริปเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานใช้งานอุปกรณ์เกี่ยวกับ ดาวเทียม หรือ อุปกรณ์อื่นๆที่ต้องอาศัยหลักอากาศพลศาสตร์ เนื่องจากสายอากาศแบบนี้มีน้ำหนักเบา บาง และง่ายต่อการติดตั้ง นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนรูปร่างให้โค้งงอได้ตามวัสดุที่จะนำไปติดตั้ง ซึ่งสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

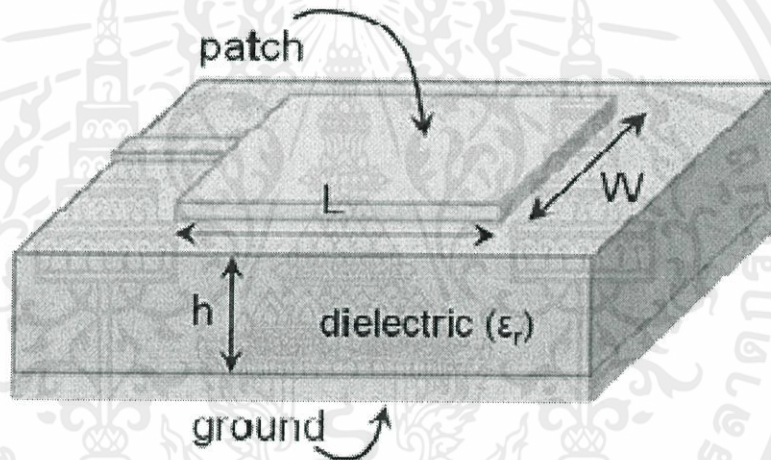
ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ทำได้ง่าย มีราคาถูกและสามารถนำไปต่อกับอุปกรณ์ตัวอื่นได้ง่าย	1. มีอัตราขยายต่ำ เพราะมีการสูญเสียมาก และมีแบนด์วิธแคบ
2. น้ำหนักเบา ปริมาณน้อย และมีลักษณะแบน เหมาะกับการนำไปใช้งาน	2. กักเก็บพลังงานได้น้อย ส่งพลังงานได้ต่ำ
3. สามารถออกแบบให้มีรูปร่างได้หลายแบบ และสามารถแพร่กระจายคลื่นได้หลายทิศทาง ขึ้นอยู่กับการป้อนสัญญาณ	3. ส่วนใหญ่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ระนาบเดียว ไม่สามารถกระจายคลื่นได้รอบทิศทาง
4. สามารถเปลี่ยนโพลาริเซชันได้ทั้งรูปแบบเส้นตรง และวงกลม ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการป้อนสัญญาณ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 ลักษณะโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป จะประกอบไปด้วยแผ่นโลหะตัวนำสองแผ่นวางขนานกันอยู่ และมีวัสดุที่ไม่เป็นสื่อกลางทางไฟฟ้าคั่นระหว่างแผ่นโลหะตัวนำทั้งสองแผ่น โดยแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนจะเป็นตัวแผ่กระจายคลื่น จะมีรูปร่างลักษณะต่างๆตามที่ผู้จัดทำได้ออกแบบ เช่น รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม เป็นต้น ส่วนมากจะเป็นแผ่นทองแดงหรือทองคำ ส่วนแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านล่างจะเป็นลักษณะแผ่นตัวนำทั้งแผ่น เรียกว่า แผ่นกราวด์ โดยตามทฤษฎีแผ่นกราวด์จะต้องมีขนาดที่ไม่จำกัด แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะทำให้แผ่นกราวด์มีขนาดอนันต์ได้ ดังนั้นในการออกแบบจึงไม่จำกัดขนาดของแผ่นกราวด์ว่าต้องมีขนาดเท่าไร แต่จะต้องใหญ่กว่าแผ่นตัวนำที่แผ่กระจายคลื่น สำหรับลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป [3]

### 2.1.1 แผ่นตัวนำ (Patch)

เป็นแผ่นโลหะที่บางมาก โดยปกติแล้วความหนาจะมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นที่อยู่ในอากาศมาก โดยการออกแบบรูปร่างและขนาดของแผ่นตัวนำจะทำให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นตามที่ต้องการ และรูปร่างของแผ่นตัวนำก็มีด้วยกันหลายอย่างเช่น สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า สามเหลี่ยม วงกลม วงรี หรือรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ เป็นต้น ซึ่งสำหรับรูปแบบของแผ่นตัวนำที่พบได้บ่อย ได้แก่ สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า และวงกลม เนื่องจากสามารถสร้างและคำนวณได้ง่ายกว่ารูปแบบอื่นๆ

### 2.1.2 สารตัวกลาง (Dielectric substrate)

มีลักษณะเป็นไดอิเล็กทริกจะใช้สารที่มีค่าเพอร์มิทิวติวิตีอยู่ระหว่าง 2.2 ถึง 12 ซึ่งสารที่มีความหนามากกว่าจะมีค่าเพอร์มิทิวติวิตีต่ำกว่า ความถี่ใช้งานมากกว่า และให้ประสิทธิภาพ

มากกว่าแต่จะทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนสารที่มีค่าเพอร์มิทิวตี้มากจะมีขนาดเล็ก แต่จะมีการสูญเสียมากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพต่อยกกว่าและให้ช่วงความถี่ใช้งานน้อยกว่าแต่จะเหมาะกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับคลื่นความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งสารตัวกลางที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ PTFE ซึ่งถูกสร้างอยู่ในโครงสร้างเสริมไฟเบอร์กลาส จะมีค่าเพอร์มิทิวตี้ประมาณ 2.5

### 2.1.3 ระนาบกราวด์ (Ground plane)

ระนาบกราวด์จะต้องกว้างกว่าแผ่นตัวนำมาก โดยจะติดอยู่อีกด้านหนึ่งของสารตัวกลาง และทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น

### 2.1.4 ส่วนป้อนสัญญาณ (Feed)

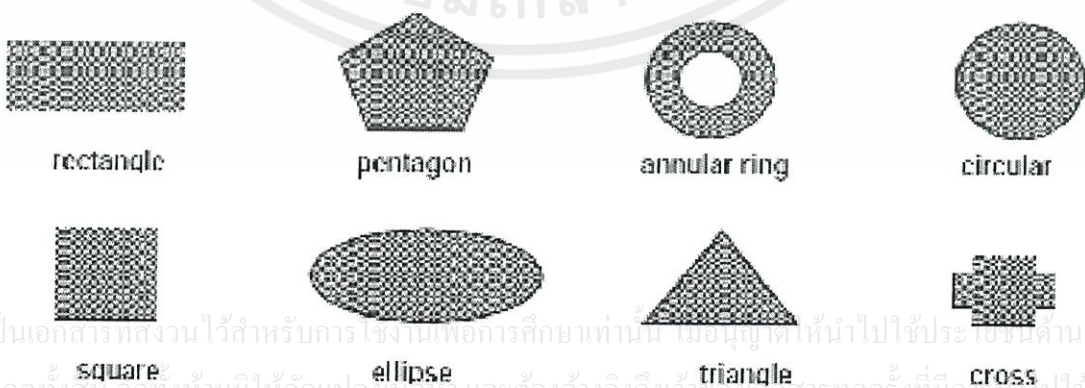
การป้อนสัญญาณจะใช้สายส่งสัญญาณชนิดต่างๆเป็นตัวป้อนสัญญาณให้สายอากาศ และสามารถปรับค่าแมทซิ่งเพื่อให้สายอากาศมีค่า 50 โอห์ม นอกจากนี้ยังใช้ปรับการโพลาไรเซชันได้อีกด้วย โดยตำแหน่งความยาวของส่วนป้อนสัญญาณจะมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่น

## 2.2 รูปแบบต่างๆของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปจะมีรูปร่างต่างๆ มากมาย โดยสามารถแบ่งสายอากาศแบบไมโครสตริปออกได้เป็น 3 ลักษณะ ได้แก่

### 2.2.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ (Microstrip patch antennas)

จะประกอบด้วยแผ่นตัวนำบางๆ ซึ่งมีรูปทรงทางเรขาคณิตอยู่บนแผ่นไดอิเล็กทริก ส่วนอีกด้านหนึ่งจะเป็นแผ่นกราวด์ โดยแผ่นตัวนำจะเป็นตัวกำหนดการแพร่กระจายของคลื่น ซึ่งจะมีรูปร่างลักษณะต่างกันตามการนำไปใช้งาน โดยแสดงดังรูปที่ 2.2

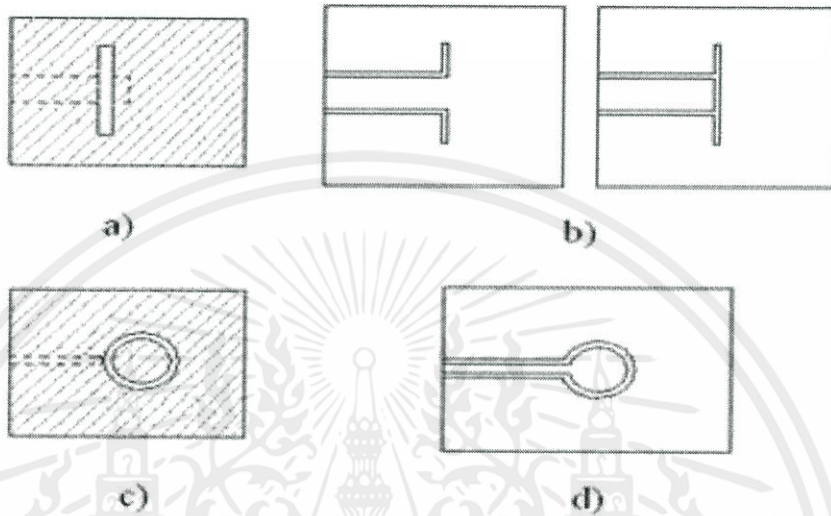


เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

รูปที่ 2.2 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ [3]

### 2.2.2 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบสล็อต (Microstrip slot antennas)

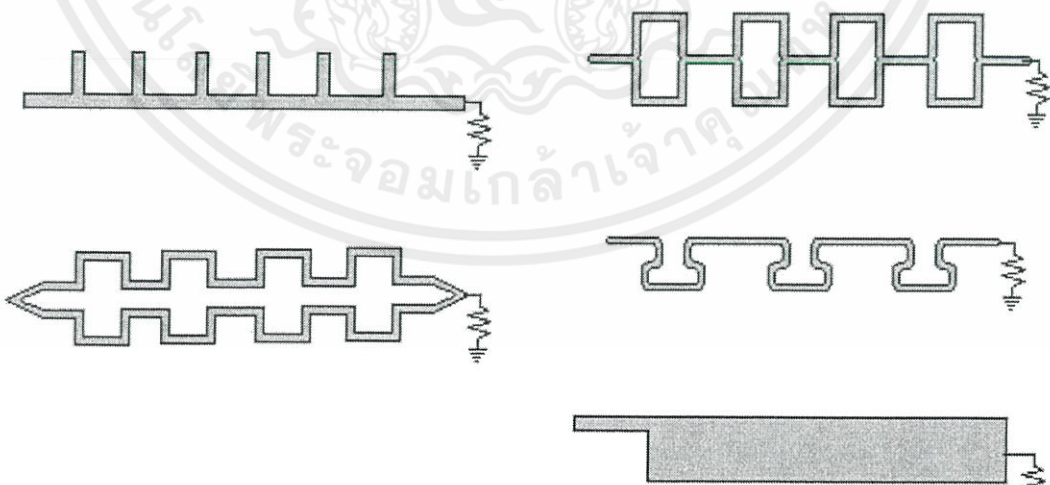
ประกอบด้วย สล็อตอยู่ในแผ่นกราวด์ ซึ่งจะต่อไมโครสตริปไลน์ สำหรับสล็อตนี้จะมีลักษณะเป็นทั้งสี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม หรือวงแหวน โดยแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสล็อต [3]

### 2.2.3 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบทราเวลลิงเวฟ (Microstrip traveling-wave antenna)

จะประกอบด้วย ตัวนำที่มีลักษณะเป็นคาบหรือเส้น ตามความยาว TEM โดยจะต่อกับความต้านทาน ซึ่งเป็นโหลดเพื่อทำการปรับแมทซ์ โดยมีรูปร่างแสดงดังรูปที่ 2.4



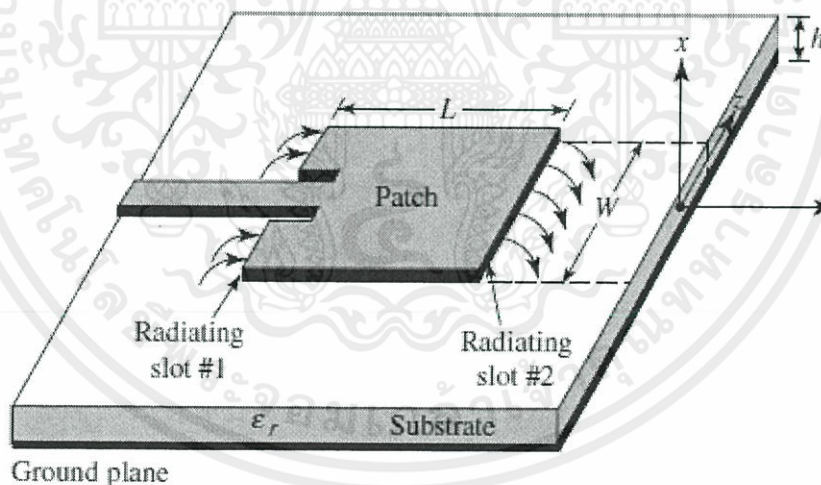
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามรูปที่ 2.4 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบทราเวลลิงเวฟ [3] นำไปใช้

## 2.3 รูปแบบการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริป จะมีองค์ประกอบการแผ่พลังงานอยู่ที่ด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกและอีกด้านหนึ่งนั้นจะเป็นระนาบกราวด์ การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปนั้นมีด้วยกัน 4 วิธี

### 2.3.1 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริป (Microstrip transmission line feed)

เป็นการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป การป้อนแบบนี้เป็นแบบที่สร้างและวิเคราะห์ได้ง่าย โดยการทำการป้อนสัญญาณเข้าไปยังขอบของแผ่นแผ่พลังงาน สายส่งไมโครสตริปที่ใช้ป้อนสัญญาณจะทำจากแผ่นนำไฟฟ้าเดียวกันกับแผ่นไมโครสตริป สายส่งไมโครสตริปจะมีความกว้างน้อยมากเมื่อเทียบกับแผ่นไมโครสตริป การป้อนสัญญาณแบบนี้จะทำให้การสร้างและการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Matching impedance) ได้ง่าย โดยการควบคุมการวางตำแหน่งของการป้อนสัญญาณ เมื่อความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เกิดคลื่นผิว (Surface wave) และการแผ่พลังงานปลอมเทียม (Spurious radiation) เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5

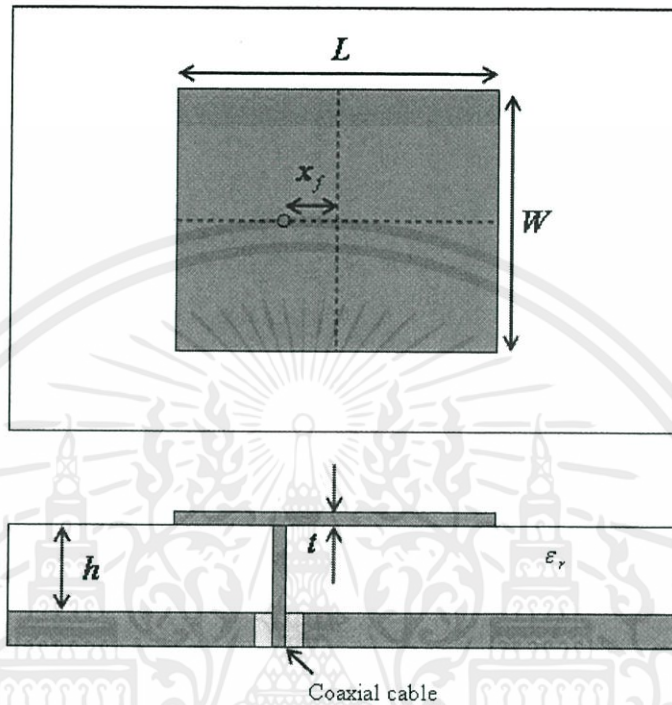


รูปที่ 2.5 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริป [3]

### 2.3.2 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งแกนร่วม (Coaxial feed)

เป็นการป้อนสัญญาณโดยใช้สายโคแอกเซียล (Coaxial) หรือหัวต่อ (Connector) สอดทะลุจากด้านหลังมายังแผ่นไมโครสตริป หรือบางครั้งเรียกว่าการป้อนสัญญาณผ่านโพรบ (Probe feed) การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศนั้นจะใช้สายส่งแกนร่วมต่อกับแผ่นไมโครสตริปและตัวนำภายนอกของสายส่งแกนร่วมต่อระนาบกราวด์ (Ground plane) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 การป้อน

สัญญาณแบบนี้มีการสร้างและการแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ง่ายโดยเลือกตำแหน่งของการป้อนสัญญาณที่เหมาะสม แต่ยังมีข้อเสียอยู่ที่การวิเคราะห์ทำได้ยากในกรณีที่ความหนาของวัสดุฐานรองมาก

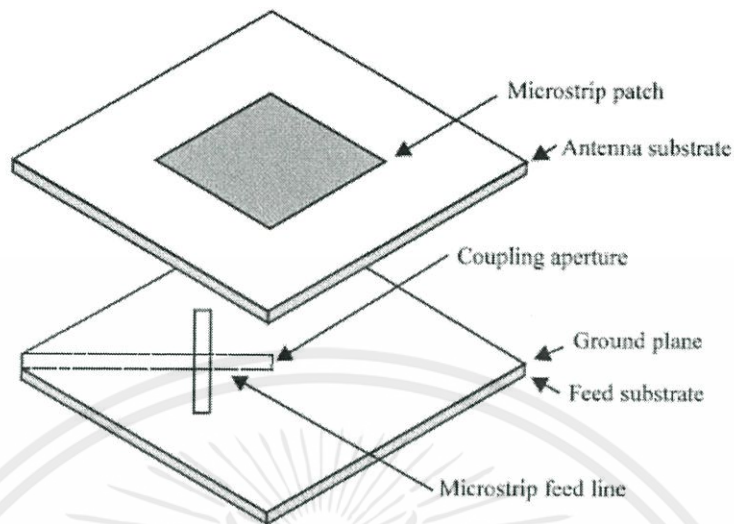


รูปที่ 2.6 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งแกนร่วม [3]

### 2.3.3 การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อผ่านช่องเปิด (Aperture coupling feed)

เป็นการป้อนสัญญาณที่ไม่ต้องสัมผัสกับแผ่นไมโครสตริปโดยใช้ช่องเปิดเป็นตัวเชื่อมต่อ ซึ่งมีแผ่นไมโครสตริปอยู่ด้านบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกและมีระนาบกราวน์อยู่ด้านล่าง และที่ระนาบกราวน์จะมีช่องเปิด (Slot) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ด้วย ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างแผ่นไมโครสตริปกับสายส่งไมโครสตริป ช่องเปิดนี้จะวางตัวอยู่กึ่งกลางของแผ่นไมโครสตริป ส่วนสายส่งไมโครสตริปจะอยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองอีกอันหนึ่ง ซึ่งจะไม่มีการวางกราวน์ ส่วนขนาดของช่องเปิดจะมีขนาดเล็กกว่าแผ่นไมโครสตริปเพื่อไม่ให้ช่องเปิดเลื่อนไปเกิดเรโซแนนซ์ (Resonance) ที่ความถี่สูงกว่าความถี่ที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 2.7

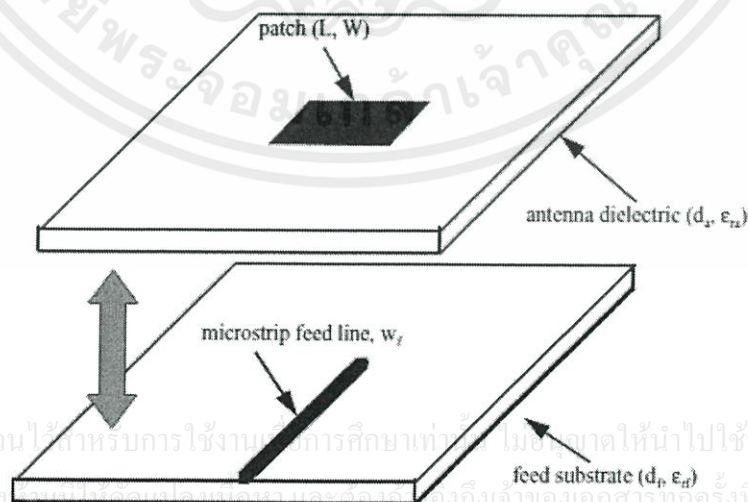
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อผ่านช่องเปิด [3]

### 2.3.4 การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อใกล้แผ่นไมโครสตริป (Proximity coupling feed)

เป็นการป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริปวางระหว่างวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกสองตัวโดยวัสดุฐานรองส่วนบนมีแผ่นไมโครสตริปติดอยู่และมีระนาบกราวนอยู่ด้านล่าง การป้อนสัญญาณแบบนี้โดยทั่วไปจะมีความกว้างแถบสูงถึงประมาณร้อยละ 13 อย่างไรก็ตามการสร้างการป้อนสัญญาณแบบนี้ทำได้โดยการปรับความยาวของสายท่อนสั้น (Stub) ของการป้อนและอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของแผ่นไมโครสตริป เมื่อใช้สายส่งไมโครสตริปเป็นตัวป้อนสัญญาณ สายส่งจะอยู่บนพื้นผิวตัวนำเดียวกันกับแผ่นไมโครสตริปและต่อสัมผัสกันโดยตรงในด้านใดด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อใกล้แผ่นไมโครสตริป [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปข้อดีและข้อเสียของรูปแบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศในรูปแบบต่างๆ  
 ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของรูปแบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปด้วยวิธีต่างๆ

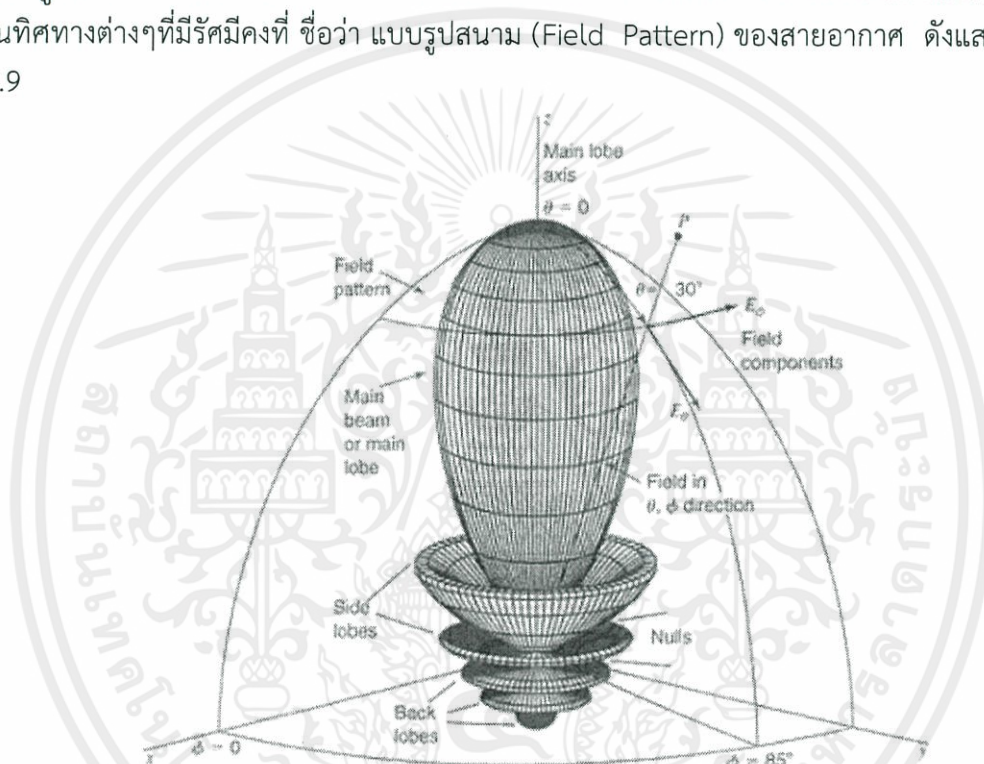
วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Microstrip transmission line feed	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การแพร่กระจายคลื่นเป็นกลุ่มก้อน</li> <li>- มีการโพลาริเซชันที่ดี</li> <li>- การแมทซ์อิมพีแดนซ์ทำได้โดยการเลื่อนตำแหน่งโพรบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีการแพร่กระจายคลื่นที่เป็นแบบปลอมปน</li> <li>- ต้องใส่สตริปไลน์ภายในแผ่นแพร่กระจายคลื่น</li> </ul>
2. Coaxial feed	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเลื่อนตำแหน่งโพรบจะกระตุ้นให้เกิดการรวมกันของโหมด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อิมพีแดนซ์จะมีค่ามากเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนา</li> </ul>
3. Aperture coupling feed	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีการแพร่กระจายคลื่นปลอมปนจากจุดป้อน</li> <li>- ไม่ต้องเชื่อมต่อสัญญาณ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องออกแบบให้ใช้กับหลายๆชิ้นเท่านั้น</li> <li>- ยากในการออกแบบรูปร่าง</li> </ul>
4. Proximity coupling feed	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีกระแสไฟตรงบริเวณระหว่างจุดป้อนและแผ่นแพร่กระจายคลื่น</li> <li>- ใช้กับสายอากาศที่มีแผ่นแพร่กระจายคลื่นที่มีวัสดุฐานรองหนาหรือแผ่นป้อนที่มีวัสดุฐานรองบางมาก</li> <li>- สามารถเลือกองศาได้โดยอิสระในการแมทซ์หรือการปรับแต่ง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีการแพร่กระจายคลื่นโดยตรงจากบริเวณที่มีการคับปลิง</li> <li>- ยากในการออกแบบรูปร่าง</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศที่สำคัญ

### 2.4.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

เป็นรูปแบบที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นโดยส่วนใหญ่แบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคำนวณในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far field) ซึ่งคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้น เพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีคงที่ เรียกว่าแบบรูปกำลังงานของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆที่มีรัศมีคงที่ ชื่อว่า แบบรูปสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ [1]

### 2.4.2 โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation lobe)

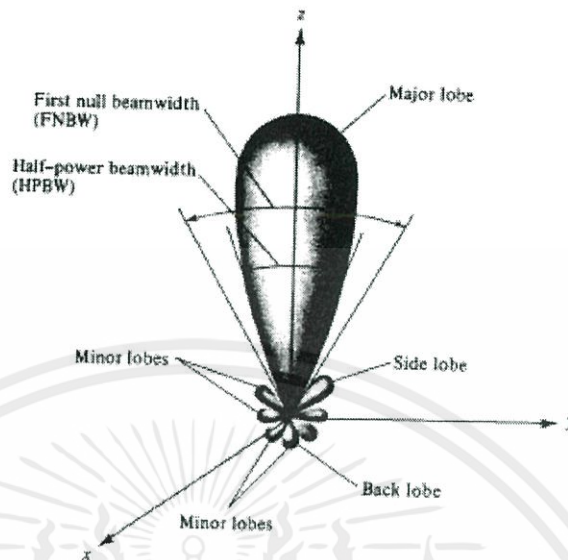
โอบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation lobe) เป็นส่วนหนึ่งของการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณโดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

โอบหลัก (Major lobe หรือ Main lobe) เป็นโอบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุดมีโอบหลักอยู่ในทิศทาง  $\theta=0$

โอบย่อย (Minor lobe) ได้แก่ โอบอื่นๆ นอกจากโอบหลัก

โอบข้าง (Side lobe) เป็นโอบย่อยที่ติดกับโอบหลักและอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียว

โอบหลัง (Back lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโอบหลัก ปกติแล้วโอบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โลบต่างๆของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ [1]

สายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโบลเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับของโบลย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในโบลที่กำลังติดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโบลหลัก ซึ่งเรียกว่าอัตราส่วนไซด์โบล (Side Lobe Ratio) หรือระดับของไซด์โบล (Side lobe level: SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โบลน้อยกว่า -20 dB

#### 2.4.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

คือกำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน โดยแสดงคุณสมบัติของสายอากาศเกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ( $U$ ) สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น กับกำลังสองของระยะทาง ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$U = r^2 W_{\text{rad}} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $W_{\text{rad}}$  คือ ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น ( $\text{w/m}^2$ )

$r^2$  คือ กำลังสองของระยะทางความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้ ดังสมการที่

2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปใช้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U(\theta, j) = \frac{r^2}{2\eta} \left[ |E_\theta(r, \theta, j)|^2 + |E_j(r, \theta, j)|^2 \right]$$

$$\gg \frac{1}{2\eta} \left[ |E_\theta(\theta, j)|^2 + |E_j(\theta, j)|^2 \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ  $E_\theta, E_j$  คือ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$\eta$  คือ อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

แบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน ซึ่งกำลังงานทั้งหมดนี้หาได้โดยการหาปริพันธ์ของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นตามสมการ (2.1) และ (2.2) ตลอดมุมตัน  $4\pi$  ทั้งหมด จะได้สมการ (2.3)

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta dj \quad (2.3)$$

#### 2.4.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) คือค่าไดเรกทิฟเกน (Directive gain) โดยไดเรกทิฟเกน คืออัตราส่วนของความเข้มการแพร่กระจายนั้นต่อความเข้มการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้สำหรับอ้างอิง ดังสมการที่ 2.4 ซึ่งค่าสภาพเจาะจงคลื่นในทิศทางทิศทางก็คืออัตราส่วนการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส ดังสมการที่ 2.5

$$D_g = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.4)$$

$$D_o = \frac{U_{\text{max}}}{U_o} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $D_g$  คือ ค่าไดเรกทิฟเกน

$D_o$  คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

$U$  คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

$U_o$  คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส

$U_{\text{max}}$  คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด

$P_{\text{rad}}$  คือ กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก P rad คือ กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด

จากสมการที่ 2.4 และ 2.5 ค่าไดเรกทิฟเฟนและค่าไดเรกทิวิตีของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเป็น 1 เพราะว่าค่าของ  $U$ ,  $U_{\max}$  และ  $U_0$  มีค่าที่เท่ากัน มีการแพร่กระจายกำลังออกไปในทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับสายอากาศแบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากกว่า 1 เสมอ และสามารถหาค่าไดเรกทิฟเฟนและค่าไดเรกทิวิตี ในหน่วย dB ได้จากสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$D_g(\text{dB}) = 10\log_{10} D_g \quad (2.6)$$

$$D_o(\text{dB}) = 10\log_{10} D_o \quad (2.7)$$

#### 2.4.5 แบนด์วิดท์

แบนด์วิดท์ (Bandwidth : BW ) ของสายอากาศจะถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่เป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ อิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น, ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น เป็นต้น ทำให้ค่าเหล่านี้อยู่ในค่าที่สามารถใช้งานได้ สำหรับสายอากาศแบนด์กว้าง มักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้าน ดังสมการที่ 2.8

$$\%BW = \left( \frac{f_H - f_L}{f_r} \right) \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อ  $f_H$  คือ ความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูง

$f_L$  คือ ความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำ

$f_r$  คือ ความถี่กลาง

สายอากาศไมโครสตริปจะมีข้อจำกัดเรื่องความกว้างของแถบความถี่ซึ่งเป็นข้อเสียอย่างหนึ่งของสายอากาศไมโครสตริป เพราะมีค่าประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็สามารถที่จะเพิ่มความกว้างของแถบความถี่ได้โดยเพิ่มความเป็นตัวนำให้กับสายอากาศ อาจจะทำเป็นช่องในตัวสายอากาศ หรือเพิ่มอุปกรณ์ที่เป็นตัวนำเข้าไปเพื่อให้การแมทซ์ของการแพร่กระจายคลื่นกับสายนำสัญญาณดีขึ้น

#### 2.4.6 ลำคลื่น (Beamwidth)

ลำคลื่นหรือบีมวิดท์ คือ การวัดความกว้างของลำคลื่น เพื่ออธิบายถึงค่าการชี้ทิศทางของสายอากาศได้ดีโดยกำหนดให้มีหน่วยเป็นมุมที่คิดจากกรณีจุดซึ่งค่าพลังงานในการแพร่กระจายคลื่นลดลงครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุดหรือจุดที่ค่าความเข้มของสนามเหลืออยู่ที่ 0.707 เท่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด บีมวิดท์ของสายอากาศไมโครสตริปสามารถเพิ่มได้โดยเลือกขนาดของสายอากาศที่เล็กลง

ดังนั้นขนาดกว้างของสายอากาศและความยาวของสายอากาศจึงเล็กน้อย สำหรับความถี่เรโซแนนซ์ อาจจะต้องเลือกใหม่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันความกว้างของลำคลื่นหลัก จะต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงเป็นผลให้อัตราการขยายลดลงแต่จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ

#### 2.4.7 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และค่าประสิทธิภาพสายอากาศของสายอากาศ แต่สภาพเจาะจงทิศทางเป็นค่าที่อธิบายถึงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น และถ้าค่าประสิทธิภาพไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ อัตราขยายจะน้อยกว่าสภาพเจาะจงทิศทางดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$\text{Gain} = \eta \times D \quad (2.9)$$

เมื่อ  $D$  คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

$\eta$  คือ ค่าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ

สำหรับอัตราการขยายของสายอากาศจะถูกอ้างอิงกับสายอากาศมาตรฐาน หรือ สายอากาศไอโซโทรปิก โดยที่สายอากาศไอโซโทรปิกจะมีการแพร่กระจายคลื่นที่เท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งสายอากาศไอโซโทรปิกเป็นสายอากาศทางอุดมคติที่ไม่มีจริง แต่มีประโยชน์ในการนำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศที่มีอยู่จริง เช่น อัตราการขยายของสายอากาศมีค่า 3 dB เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไอโซโทรปิก จะได้เป็น 3 dBi

#### 2.4.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและกำลังงานการสะท้อน

อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage standing wave ratio : VSWR) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงว่าสัญญาณจะถูกสะท้อนกลับก่อนที่จะแพร่กระจายคลื่นโดยสายอากาศมากน้อยแค่ไหน ดังแสดงในสมการที่ 2.10 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและกำลังงานการสะท้อน (Reflected power) มีการวัดที่ต่างกัน โดยส่วนใหญ่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะถูกกำหนดที่ 1.5:1 หรือน้อยกว่าในบางแบนด์วิดท์

#### 2.4.9 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป จะต้องใช้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะเพื่อกำหนดรูปร่างและขนาดของสายอากาศความกว้าง (W) , ความยาว (L) ของแผ่นแพทช์ให้ได้ตามที่ต้องการ ดังแสดงตามสมการที่ 2.10, 2.11 และ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกข้อหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ (2.10)

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \ln \left( \frac{8H}{W} + \frac{W}{4H} \right)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{W}{H} \leq 1 \quad \text{โดยที่} \quad W = w + \frac{t}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{2h}{t} \right) + 1 \right], \quad H = h - 2t$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{H}{W}}} + 0.4 \left( 1 - \frac{W}{H} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \left\{ \frac{W}{H} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W}{H} + 1.444 \right) \right\}^{-1} \quad (2.12)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{W}{H} \geq 1 \quad \text{โดยที่} \quad \epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12 \frac{H}{W}}}$$

## 2.5 เทคโนโลยีการสื่อสารบรอดแบนด์ (Broadband communications)

การสื่อสารบรอดแบนด์คือการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้าง ใช้ในการเรียกระบบสื่อสารทั้งในสาขาโทรคมนาคมและสาขาสื่อสารข้อมูลคอมพิวเตอร์ ที่มีความสามารถในการให้บริการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลด้วยอัตราการส่งข้อมูลความเร็วสูงหรือข้อมูลที่มีปริมาณมาก มีความสามารถในการสื่อสารข้อมูลประเภทต่างๆ ได้มากกว่าหนึ่งชนิดเช่น เสียง ภาพ วิดีทัศน์ หรือข้อมูลอักษรในเวลาเดียวกันในลักษณะที่เรียกว่าสื่อประสม ระบบสื่อสารบรอดแบนด์ถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบกับความแตกต่างจากระบบสื่อสารแถบความถี่แคบ ทั้งในด้านการใช้งานแถบความถี่ของสัญญาณที่กว้างกว่า อัตราการส่งข้อมูลด้วยความเร็วที่สูงกว่าหรือปริมาณข้อมูลมากกว่า และการนำไปประยุกต์ใช้ สำหรับรองรับในการให้บริการสื่อสารข้อมูลประเภทต่างๆ ได้หลายรูปแบบ เทคโนโลยีการสื่อสารบรอดแบนด์ แบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ แบบส่งข้อมูลผ่านสายนำสัญญาณชนิดต่าง ๆ และแบบไร้สายผ่านคลื่นวิทยุ

### 2.5.1 เทคโนโลยีการสื่อสารบรอดแบนด์ผ่านสายนำสัญญาณ

#### 2.5.1.1 บีไอเอสดีเอ็น หรือไอเอสดีเอ็นแถบกว้าง (Broadband ISDN: B-ISDN)

เป็นเทคโนโลยีโครงข่ายบริการสื่อสารร่วมแบบดิจิทัล ซึ่งเป็นเทคโนโลยีบรอดแบนด์ยุคเริ่มแรกที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1988 เพื่อให้บริการทั้งข้อมูลเสียง ภาพ และ ข้อมูลอักษร เทคโนโลยีนี้ได้ถูกกำหนดขึ้นเป็นมาตรฐานโดยคณะกรรมการที่ปรึกษาด้านโทรเลขและโทรศัพท์สากล (International Telegraph and Telephone Consultative Committee: CCITT) และได้เปลี่ยนชื่อเป็นสหพันธ์โทรคมนาคม ระหว่างประเทศ ส่วนงานมาตรฐาน ได้กำหนดนิยามความหมายของคำว่า บรอดแบนด์ คือ บริการหรือระบบที่มีความต้องการช่องสื่อสารข้อมูล

สามารถรองรับ อัตราการส่งข้อมูลที่สูงกว่าอัตราการส่งข้อมูลขั้นพื้นฐาน (Primary rate) โดยอัตราการส่งข้อมูลขั้นพื้นฐานตามมาตรฐานไอเอสดีเอ็นคือ 1.544 หรือ 2.048 เมกกะบิต/วินาที

บีไอเอสดีเอ็นได้กำหนดให้เครือข่ายเอทีเอ็ม (Asynchronous transfer Mode: ATM) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีแบบการสลักกลุ่มข้อมูลประเภทหนึ่ง ได้รับเลือกให้เป็นเทคโนโลยีหลักในการสร้างเครือข่ายบีไอเอสดีเอ็น โดยเทคโนโลยีเครือข่ายเอทีเอ็มใช้เทคนิคการส่งกลุ่มข้อมูลที่มีขนาดเล็กและมีขนาดคงที่โดยเรียกว่าเซลล์ (Cell) ทำให้สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงและมีค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูลต่ำและเครือข่ายเอทีเอ็มมีการประยุกต์ใช้เทคนิคสำหรับการควบคุมการคับคั่งของการส่งข้อมูล (Congestion control) และการควบคุมการไหลของข้อมูล (Flow control) ในเครือข่ายและสามารถเลือกใช้สื่อส่งสัญญาณในการส่งข้อมูลได้เป็นอิสระ ซึ่งทำให้สามารถใช้สื่อส่งสัญญาณชนิดต่างๆ เช่น สายตีเกลียวคู่ เส้นใยนำแสง

### 2.5.1.2 ระบบเครือข่ายเส้นใยนำแสง (Fiber optical network)

การสื่อสารข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงเป็นเทคโนโลยีการแปลงสัญญาณข้อมูลดิจิทัลให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณแสงเพื่อส่งข้อมูลผ่านสื่อส่งสัญญาณชนิดเส้นใยนำแสง การสื่อสารด้วยแสงมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนข้อมูลที่มีปริมาณมากด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่สูงมาก ซึ่งมากกว่าสายนำสัญญาณชนิดสายตีเกลียวคู่และสายเคเบิลชนิดโคแอกเซียล (Coaxial) เส้นใยนำแสงมีความเหมาะสม สำหรับใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างจุดที่ห่างกันไกล เป็นระยะทางหลายกิโลเมตร และด้วยวงจรขยายสัญญาณแสงที่เรียกว่าวงจรขยายเส้นใยนำแสงแบบเออโรเบียมโดป (Erbium-doped fiber amplifier) ทำให้สัญญาณแสงเดินทางไปได้เป็นระยะทางไกลโดยไม่ต้องลงทุนทางด้านอุปกรณ์ทวนสัญญาณจำนวนมาก ราคาของเส้นใยนำแสงในระยะเริ่มแรกที่มีการนำมาใช้งานนั้นมีราคาสูงจึงยังไม่ถูกนำไปใช้เชื่อมต่อไปยังเครื่องลูกข่ายทั่วไป ทำให้มีการติดตั้งเครือข่ายเส้นใยนำแสงจำกัดอยู่เฉพาะภายในเครือข่ายหลัก (Backbone network) ของผู้ให้บริการ (Service provider) เท่านั้น จนกระทั่งในปี พ.ศ.2551 ได้มีการเชื่อมต่อสายเส้นใยนำแสงไปยังเครื่องลูกข่ายโดยใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า เอพทีทีเฮช (Fiber-to-the-home: FTTH) เช่น ประเทศญี่ปุ่น และเกาหลีใต้ เส้นใยนำแสงสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่ แบบโหมดเดี่ยว (Single mode fiber) เส้นใยนำแสงชนิดนี้แกนกลางจะมีขนาด 9 ไมโครเมตร และมีการกระจายของแสงต่ำทำให้สามารถส่งข้อมูลไปได้ไกลและสามารถสื่อสารข้อมูลได้ด้วยอัตราความเร็วสูง เนื่องจาก มีความกว้างแถบความถี่มาก สำหรับแบบที่สองคือแบบหลายโหมด (Multimode fiber) มีขนาดของแกนกลางที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว โดยมีขนาด 50 หรือ 62.5 ไมโครเมตร ทำให้สามารถส่งแสงที่ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันได้หลายความยาวคลื่นเส้นใยนำแสงในแบบหลายโหมดมีราคาต่ำกว่า เส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว และมีการกระจายของแสงมากกว่าทำให้สัญญาณถูกลดทอนไปได้มาก และมีความกว้างแถบความถี่ที่กว้างน้อยกว่าเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว ทำให้เส้นใยนำแสงแบบหลายโหมดสามารถสื่อสารข้อมูลได้เป็นระยะทางที่น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1.3 สายผู้เช่าดิจิทัล หรือดีเอสแอล

เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารบรอดแบนด์ที่ใช้ส่งนำสัญญาณชนิดสายตีเกลียวคู่ซึ่งถูกใช้สำหรับให้บริการโทรศัพท์มาให้บริการข้อมูลโดยการส่งข้อมูลจะใช้แถบความถี่ที่อยู่เหนือขึ้นไปจากแถบความถี่เสียงพูดของบริการโทรศัพท์ โดยมีความถี่ตั้งแต่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป ระบบดีเอสแอลสามารถสื่อสารข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงในระดับเมกกะบิตต่อวินาที ซึ่งมากกว่าการสื่อสารข้อมูลด้วยอุปกรณ์โมเด็มปกติที่ทำงานในแถบความถี่เสียงและส่งข้อมูลได้ไม่เกิน 56 กิโลบิต/วินาที ทำให้ระบบดีเอสแอลเป็นที่นิยมเนื่องจากการติดตั้งระบบดีเอสแอลที่เครื่องลูกข่าย มีความสะดวกเพราะไม่จำเป็นต้องทำการติดตั้งสายนำสัญญาณใหม่ ระบบดีเอสแอลสามารถให้บริการโทรศัพท์ปกติและการส่งข้อมูลพร้อมกันได้ในเวลาเดียวกัน เนื่องจากการใช้แถบความถี่ที่ใช้ในการส่งเสียงพูดแยกจากข้อมูลทำให้รองรับบริการทั้งสองประเภทพร้อมกันในเวลาเดียวกันและเนื่องจากดีเอสแอลเป็นการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (point-to-point) โดยใช้สายตีเกลียวคู่ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องลูกข่ายกับระบบเครือข่าย ทำให้อัตราเร็วในการส่งข้อมูลในแต่ละเครื่องลูกข่ายมีความเร็วคงที่ เทคโนโลยีดีเอสแอลมีอัตราการส่งข้อมูล จากเครื่องลูกข่ายไปยังชุมสาย (Upstream) น้อยกว่าอัตราการส่งข้อมูลจากชุมสายกลับมาที่ลูกข่าย (Downstream) ซึ่งเหมาะกับการประยุกต์ใช้กับอินเทอร์เน็ต

### 2.5.2 เทคโนโลยีการสื่อสารบรอดแบนด์แบบไร้สาย

#### 2.5.2.1 เทคโนโลยีไวแมกซ์ (Worldwide interoperability for Microwave Access: WiMAX)

เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายชนิดหนึ่ง ที่พัฒนาโดยสถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์หรือ ไอทริปเปิลอี (IEEE: Institute of electrical and Electronic Engineers) โดยเรียกว่ามาตรฐาน IEEE 802.16 ซึ่งกำหนดให้ใช้แถบความถี่วิทยุกว้างในระดับเมกกะเฮิร์ตซ์ในการสื่อสารข้อมูลคอมพิวเตอร์ความเร็วสูงในระดับหลายเมกกะบิตต่อวินาที ในทางทฤษฎีไวแมกซ์มีศักยภาพในการให้บริการข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงถึงระดับ 75 เมกกะบิต/วินาที ไวแมกซ์มีพื้นที่ให้บริการครอบคลุมรัศมีในช่วง 10 กิโลเมตรขึ้นไป นอกจากนี้ทางไอทริปเปิลอีได้กำหนดมาตรฐานหลายชุดเพื่อรองรับการใช้งานของเครื่องลูกข่ายที่ไม่เคลื่อนที่ (Fixed subscriber) และเครื่องลูกข่ายเคลื่อนที่ได้ (Mobile subscriber) เทคโนโลยีไวแมกซ์สามารถใช้ความถี่ในช่วง 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ ไปจนถึงช่วงความถี่ 66 กิกะเฮิร์ตซ์ แต่ลักษณะการใช้งานในแต่ละช่วงความถี่จะแตกต่างกัน ในระบบที่ใช้ความถี่สูงมากกว่า 11 กิกะเฮิร์ตซ์ เหมาะสำหรับการใช้งานในลักษณะที่สายอากาศของเครื่องส่งและเครื่องรับไม่มีสิ่งกีดขวางการเดินทางของสัญญาณ หรือมีการเดินทางของสัญญาณเป็นเส้นตรง (Line-of-sight) ถ้าหากต้องการให้สัญญาณสื่อสารสามารถไปถึงผู้ใช้ภายในอาคาร หรือสายอากาศระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับมีสิ่งกีดขวางหรือสัญญาณไม่ได้เดินทางเป็นเส้นตรง (Non-line-of-sight) จะใช้ความถี่ที่ต่ำกว่า 11 กิกะเฮิร์ตซ์ ช่วงความถี่ในการใช้งานจริงมีอยู่สามช่วงความถี่ได้แก่ 2.50 ถึง 2.69 กิกะเฮิร์ตซ์ 3.40 ถึง 3.60 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งทั้งสองช่วงความถี่นี้จะต้องมีการขอใบอนุญาตในการใช้งาน สำหรับช่วงความถี่ 5.725 ถึง 5.850 กิกะเฮิร์ตซ์ เป็นช่วงความถี่สากลที่ไม่จำเป็นต้องมีการขอใบอนุญาต เทคนิคที่ใช้ในการผสมสัญญาณของไวแมกซ์คือ โอ

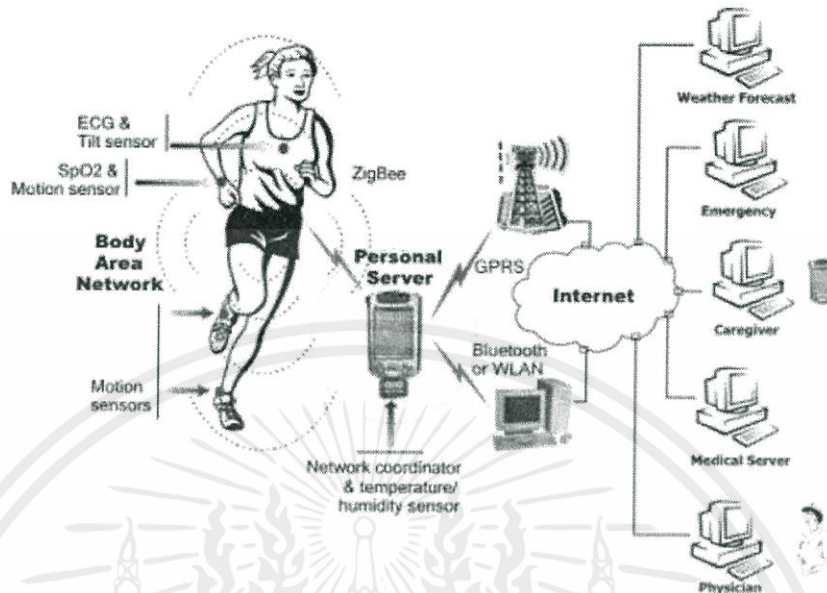
เอฟดีเอ็ม ซึ่งเหมือนกับในระบบบีพีแอล แต่ไอแมกซ์เป็นการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สาย การส่งสัญญาณระหว่างสถานีฐานกับเครื่องลูกข่ายเป็นไปได้ในสองลักษณะ คือในระบบการสื่อสารสองทางแบบแบ่งเวลา (Time division duplex: TDD) นั่นคือ สัญญาณระหว่างเครื่องลูกข่าย กับสถานีฐานจะผลัดกันส่งที่คนละเวลาบนแถบความถี่เดียวกัน หรือการสื่อสารสองทาง แบบแบ่งความถี่ (Frequency division duplex: FDD) ซึ่งสัญญาณระหว่างเครื่องลูกข่ายกับสถานีฐานจะส่งพร้อมกัน แต่ใช้คนละแถบความถี่

#### 2.5.2.2 เครื่องข่ายเซลลูลาร์บรอดแบนด์

เกิดจากการพัฒนาของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งเดิมถูกใช้งานเฉพาะสำหรับการสื่อสารข้อมูลเสียงพูดเช่นเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่สากลตามมาตรฐานจีเอสเอ็ม (Global system for mobile communications: GSM) หรือมาตรฐานซีดีเอ็มเอ (Code division multiple access: CDMA) ซึ่งได้มีการพัฒนาจากเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์จนทำให้สามารถรองรับการสื่อสารข้อมูล ด้วยอัตราความเร็วสูงขึ้น รองรับการส่งข้อมูลชนิดสื่อประสม (Multimedia) มีความสามารถในการรองรับข้อมูลที่มีอัตราความเร็วสูง ถึง 2 เมกกะบิต/วินาที สำหรับเครือข่ายที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำในระดับคนเดินเท้า และที่ความเร็ว 348 กิโลบิต/วินาที สำหรับเครือข่ายที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เช่นอยู่บนรถไฟ หรือรถยนต์ส่วนบุคคล

## 2.6 การสื่อสารไร้สายเครือข่ายบนร่างกายมนุษย์

จากการมีระบบการสื่อสารเครือข่ายบนร่างกายมนุษย์หรือเครือข่ายกายสัมผัส (Body area network :BAN) ขึ้นเพื่อทำหน้าที่เป็นโครงข่ายการสื่อสารสำหรับอวัยวะต่างๆของร่างกายมนุษย์ เนื่องจากที่ผ่านมามีการสื่อสารของมนุษย์กับโลกภายนอกจะเกี่ยวข้องกับอวัยวะหลักเพียง 3 ชิ้น คือ ตา หู และปาก เช่น ดูหนัง ฟังเพลง เล่นอินเทอร์เน็ต และคุยโทรศัพท์ แต่วันนี้เทคโนโลยี เครือข่ายบนร่างกายมนุษย์มุ่งเน้นไปที่อวัยวะทุกชิ้นส่วนของร่างกายให้สามารถสื่อสารเชื่อมต่อกับโลกภายนอกได้ ดังนั้นโครงข่ายสื่อสารไร้สายเครือข่ายบนร่างกายมนุษย์ (Wireless body area network : WBAN) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 นี้จึงเป็นประโยชน์โดยตรงต่อวงการวิชาการทางแพทย์ สำหรับการรักษาดูแลสุขภาพ การตรวจวัดสมรรถนะของร่างกาย การติดตามเฝ้าดูอาการผู้ป่วย แพทย์ประจำตัวผู้ป่วยสามารถเฝ้าระวังและวิเคราะห์อาการของผู้ป่วยได้ตลอดเวลา ด้วยการตรวจดูสัญญาณที่ส่งผ่านทางอินเทอร์เน็ตสามารถช่วยให้การตัดสินใจในการให้การรักษาแก่ผู้ป่วยมีความถูกต้องมากขึ้นได้ และยังเป็นประโยชน์ต่อการใช้ชีวิตประจำวันได้ เช่น การเฝ้าดูการออกกำลังกาย การเล่นเกมเสมือนจริง การควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในบ้านซึ่งไม่ต้องใช้สายต่อเชื่อม อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานทางด้านการระบุตำแหน่งได้อีกด้วย เช่น การระบุตำแหน่งนักดับเพลิงที่ทำการดับเพลิงอยู่ภายในอาคาร การระบุตำแหน่งทหารที่อยู่ในสนามรบ เป็นต้น



รูปที่ 2.11 เครือข่ายการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ [4]

## 2.6.1 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานการสื่อสารไร้สายเครือข่ายบนร่างกายมนุษย์

### 2.6.1.1 มาตรฐาน IEEE 802.15

มาตรฐาน IEEE 802.15 ได้ตั้งคณะกรรมการกลุ่ม 6 (TG6: Task Group 6) ขึ้นในเดือนพฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2007 หรือที่เรียกว่า IEEE 802.15.6 เพื่อพัฒนาร่างมาตรฐานสำหรับการสื่อสารไร้สาย มาตรฐานดังกล่าวนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบชั้นโพรโทคอล MAC (Medium access control) สำหรับโครงข่ายสื่อสารไร้สายระยะใกล้ที่รองรับได้ทั้งการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์และที่มิใช่ทางการแพทย์ เป้าหมายที่กำหนดไว้คือการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้กำลังไฟต่ำและสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราที่สูงถึง 100 เมกกะบิต/วินาทีสำหรับใช้สวมใส่ ใช้ติดกับร่างกาย หรือฝังอยู่ในร่างกาย ในร่างมาตรฐานฉบับล่าสุดกำหนดให้ใช้ได้กับย่านความถี่ทั้งแถบความถี่แคบ (narrowband) และแถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra wideband: UWB) ในย่านของแถบความถี่แคบประกอบด้วย แถบความถี่ MICS (Medical implant communication service) (402–405 เมกกะเฮิร์ตซ์) แถบความถี่ ISM (Industrial, scientific and medical) (900 เมกกะเฮิร์ตซ์ และ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์) และ แถบความถี่แคบในย่านอื่น ๆ ในย่านของแถบความถี่กว้างยิ่งให้ใช้แบนด์วิดท์ที่กว้าง 499.2 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดค่าความถี่กลางไว้ที่ 4492.8 เมกกะเฮิร์ตซ์ และ 7987.2 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยในปัจจุบันนักวิจัยจำนวนมากเริ่มหันมาให้ความสนใจกับการออกแบบโพรโทคอล MAC ที่สามารถรองรับคุณภาพของการส่งสัญญาณผ่านการสื่อสารไร้สายเครือข่ายบนร่างกายมนุษย์ให้เป็นประโยชน์ มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1.2 มาตรฐาน IEEE 802.11b

มาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary code keying) ร่วมกับ DSSS (Directs Sequence spread spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 เมกะบิตต่อวินาที ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ เป็นย่านความถี่ที่เรียกว่า ISM (Industrial scientific and medical) ซึ่งถูกจัดสรรไว้อย่างสากลสำหรับการใช้งานอย่างสาธารณะด้านวิทยาศาสตร์ การแพทย์ และอุตสาหกรรม โดยอุปกรณ์ที่ใช้งานในย่านความถี่นี้ เช่น IEEE 802.11, Bluetooth, โทรศัพท์ไร้สาย ซึ่งส่วนใหญ่อุปกรณ์ IEEE 802.11 ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะเป็นอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และใช้เครื่องหมายการค้าที่รู้จักกันดีในนามว่า Wi-Fi



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

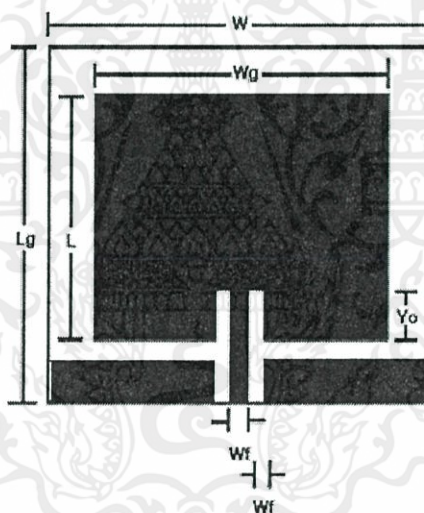
### บทที่ 3

#### การออกแบบและจัดทำปริญญาบัตร

ปริญญาบัตรนี้เป็นการออกแบบสายอากาศแถบกว้าง เพื่อนำมาทดสอบการใช้งานสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ โดยในการออกแบบนั้นจะต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 ค่าคือ ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง และความหนาของสารตัวกลาง

#### 3.1 การคำนวณและการออกแบบ

สายอากาศที่ออกแบบเป็นสายอากาศไมโครสตริปโดยออกแบบให้ใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยใช้สารแบบอีพ็อกซีเป็นสารตัวกลาง ซึ่งมีค่าเพอร์มิตติวิตีเท่ากับ 4.3 และมีความหนาของสารตัวกลางเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร และใช้การเชื่อมต่อสัญญาณกับแผ่นแพร่กระจายคลื่นด้วยการป้อนสัญญาณแบบสายส่งไมโครสตริป



รูปที่ 3.1 การออกแบบสายอากาศสำหรับใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz

#### 3.1.1 ขนาดของแพทช์สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

การออกแบบขนาดของแพทช์สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม จะเป็นการคำนวณหาความกว้าง  $W$  และความยาว  $L$  ของส่วนแพร่กระจายคลื่นโดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบคือ ความถี่ที่ใช้ทดสอบ:  $f$  ค่าเพอร์มิตติวิตี:  $\epsilon_r$  และความหนาของสารตัวกลาง:  $h$  โดยใช้สมการในการออกแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.1.1.1 ความกว้างของส่วนแพร่กระจายคลื่น

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $W$  คือ ความกว้างของส่วนแพร่กระจายคลื่น

$c$  คือ ความเร็วคลื่นในสุญญากาศ เท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที

แทนค่า  $f$ ,  $\epsilon_r$ ,  $c$  ลงในสมการที่ (3.1)

จะได้ค่า  $W$  เท่ากับ 37.6 มิลลิเมตร

## 3.1.1.2 คำนวณหาความยาวของส่วนแพร่กระจายคลื่น

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/w}} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\epsilon_{\text{eff}}$  คือ ค่าคงตัวประสิทธิภาพ

แทนค่า  $\epsilon_r$ ,  $h$ ,  $W$  ลงในสมการที่ (3.2)

จะได้ค่า  $\epsilon_{\text{eff}}$  เท่ากับ 3.99 F/m

$$\Delta L = (h)0.412 \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3)\left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258)\left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \quad (3.3)$$

แทนค่า  $\epsilon_{\text{eff}}$  ในสมการที่ (3.3)

จะได้ค่า  $\Delta L$  เท่ากับ 0.74 มิลลิเมตร

คำนวณหาความยาวของส่วนแพร่กระจายคลื่นโดยใช้สมการที่ (3.4)

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L \quad (3.4)$$

เมื่อ  $L_{\text{eff}}$  คือ ความยาวของส่วนแพร่กระจายคลื่น

ดังนั้นจะได้ขนาดความยาวของส่วนแพร่กระจายคลื่นเท่ากับ 29.17 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป

ในการป้อนสัญญาณไปยังสายอากาศ จะใช้สายส่งในการป้อนสัญญาณเป็นแบบสายส่งไมโครสตริปโดยจะคำนวณขนาดของความกว้างของสายส่งได้ดังนี้

$$\text{เมื่อ } \frac{w_f}{h} \geq 1$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \left\{ \frac{w_f}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{w_f}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1} \quad (3.5)$$

แทนค่า  $Z_0 = 50$  โอห์ม,  $\epsilon_{\text{eff}} = 3.99$  F/m ในสมการที่ (3.5)

ดังนั้นจะได้ค่า  $w_f$  เท่ากับ 2.61 มิลลิเมตร

### 3.1.3 ความยาวของ inset-feed

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{\frac{Z_0}{Z_1}} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $y_0$  คือ ความยาวของ inset-feed

$Z_0$  คือ เอพท์พูทอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม

$Z_1$  คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง

เมื่อ  $Z_1 = \sqrt{Z_i \times Z_0}$  โดย  $Z_i$  เท่ากับ 243 โอห์ม

ดังนั้น  $Z_1$  เท่ากับ 110 โอห์ม

$L$  คือความยาวของส่วนแพร่กระจายคลื่น

แทนค่า  $Z_1, Z_0, L$  ลงในสมการที่ (3.6)

จะได้ค่าความยาว inset-feed เท่ากับ 7.7 มิลลิเมตร

### 3.1.4 ความยาวของสายส่งไมโครสตริป

สามารถคำนวณความยาวของสายส่งไมโครสตริปได้จากการใช้โปรแกรม

เอกสารนี้ TexLine วิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมซึ่งมีค่าเท่ากับ 16 มิลลิเมตร มอนูญาเตีให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 ขนาดของระนาบกราวน์

ความกว้างและความยาวของระนาบกราวน์หาได้จาก

$$W_g = 6h + W \quad (3.7)$$

$$L_g = 6h + L \quad (3.8)$$

เมื่อ  $W_g$  คือ ความกว้างของระนาบกราวน์

$L_g$  คือ ความยาวของระนาบกราวน์

ดังนั้นจะได้ขนาดระนาบกราวน์ ความกว้างเท่ากับ 47.2 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 38.77 มิลลิเมตร

## 3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

ในการสร้างสายอากาศไมโครสตริป จะนำค่าของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณมาจำลองการทำงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST microwave studio เมื่อได้ขนาดรูปร่างของสายอากาศที่ดีที่สุดแล้วจึงนำไปวาดลงบนโปรแกรม Protel เพื่อทำการวาดขนาดจริงและนำไปสร้างชิ้นงานเพื่อวัดคุณสมบัติของสายอากาศต่อไป

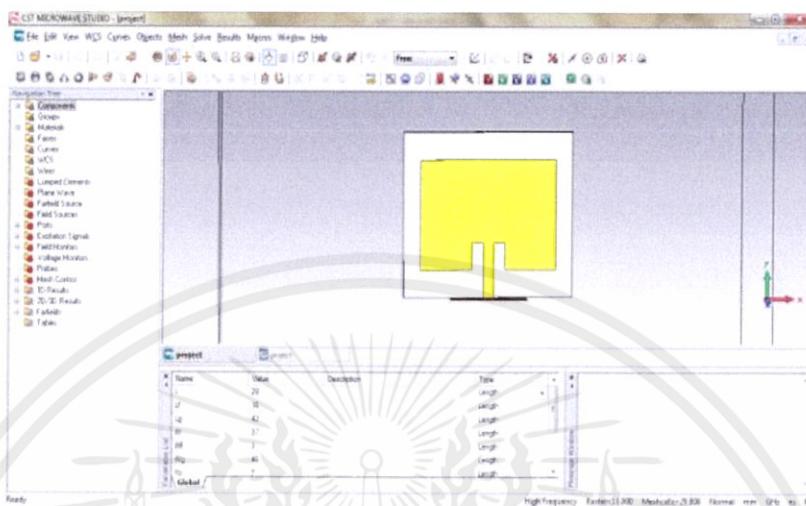
### 3.2.1 จำลองการทำงานของสายอากาศ

การจำลองการทำงานของสายอากาศจะใช้โปรแกรม CST microwave studio ในการสร้างสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางสายอากาศ เช่น ความสูญเสียย้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง อินพุทอิมพีแดนซ์ อัตราขยาย และรูปแบบการกระจายคลื่น ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ซึ่งใช้พารามิเตอร์ในการออกแบบดังนี้

ความถี่ที่ใช้งาน	2.45	GHz
ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง	4.3	
ความหนาของสารตัวกลาง	1.60	มิลลิเมตร
ความกว้างของส่วนแพร่กระจายคลื่น	37.60	มิลลิเมตร
ความยาวของส่วนแพร่กระจายคลื่น	29.17	มิลลิเมตร
ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป	2.61	มิลลิเมตร
ความยาวของสายส่งไมโครสตริป	16	มิลลิเมตร
ความกว้างของระนาบกราวน์	47.20	มิลลิเมตร
ความยาวของระนาบกราวน์	38.77	มิลลิเมตร

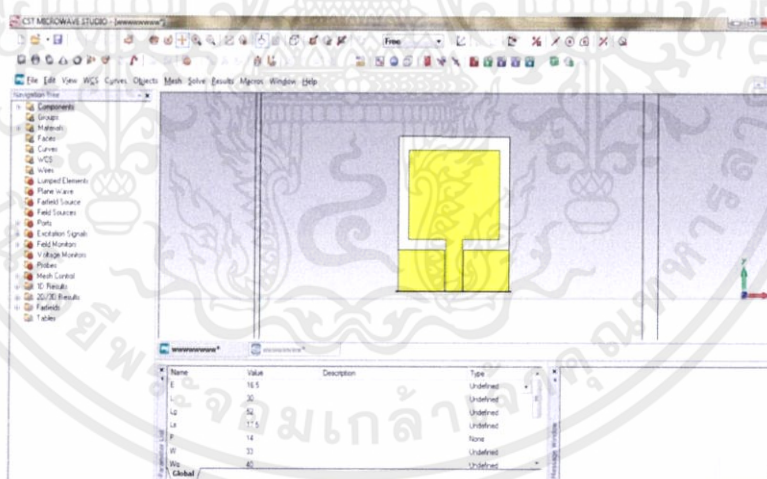
ความยาวของ inset-feed

7.70 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 จำลองการสร้างสายอากาศแบบที่ 1 ด้วยโปรแกรม CST microwave studio

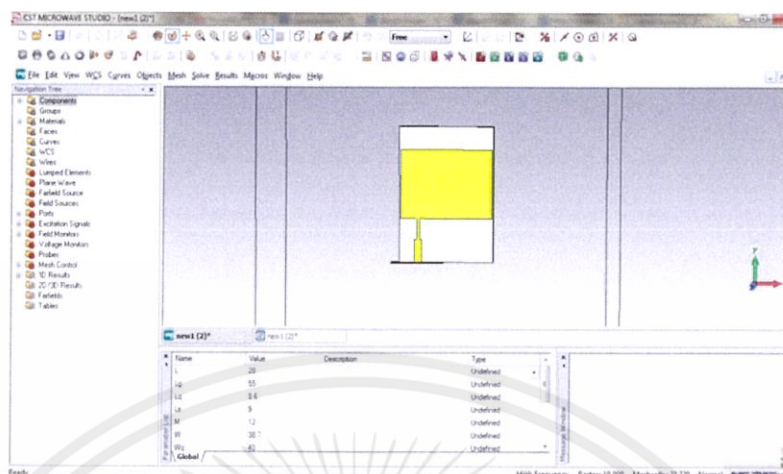
จากรูปที่ 3.2 เป็นการจำลองการทำงานของสายอากาศไมโครสตริปแบบที่ 1 โดยออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio



รูปที่ 3.3 จำลองการสร้างสายอากาศแบบที่ 2 ด้วยโปรแกรม CST microwave studio

จากรูปที่ 3.3 เป็นการจำลองการทำงานของสายอากาศไมโครสตริปแบบที่ 2 โดยออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 จำลองการสร้างสายอากาศแบบที่ 3 ด้วยโปรแกรม CST microwave studio

จากรูปที่ 3.4 เป็นการจำลองการทำงานของสายอากาศไมโครสตริปแบบที่ 3 โดยออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

จากสายอากาศที่ได้ออกแบบจากโปรแกรม CST microwave studio ทั้ง 3 รูปแบบแล้วนำมาวาดลายสายอากาศด้วยโปรแกรม Altium designer แล้วจึงนำมาสร้างสายอากาศเพื่อนำมาใช้ทดสอบการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.5, 3.6 และ 3.7



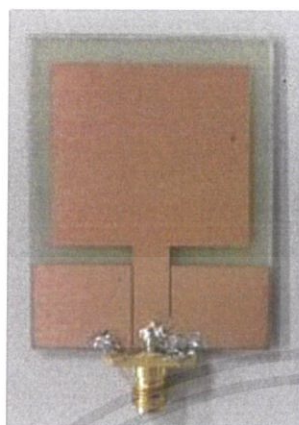
(ก) ด้านหน้า



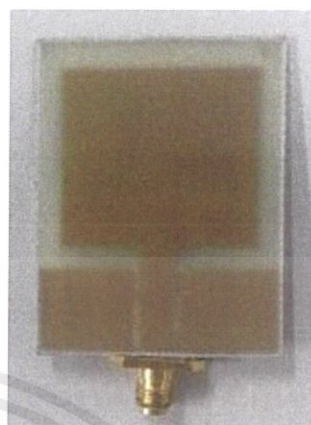
(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 3.5 สายอากาศจริงที่สร้างขึ้นมาทดสอบแบบที่ 1

จากรูปที่ 3.5 เป็นการออกแบบสายอากาศแบบที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นทองแดง 2 หน้า และมีการป้อนสัญญาณที่กึ่งกลางของแผ่นตัวนำ โดยมีการเจาะสล๊อตที่กึ่งกลางแผ่นตัวนำเชื่อมต่อกับเส้นการป้อนสัญญาณเพื่อขยายแบนด์วิดท์



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 3.6 สายอากาศจริงที่สร้างขึ้นมาทดสอบแบบที่ 2

จากรูปที่ 3.6 เป็นการออกแบบสายอากาศแบบที่ 2 ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นทองแดงแบบหน้าเดียวเพื่อขยายแบนด์วิดท์การทำงาน และมีการบ่อนสัญญาณที่กึ่งกลางของแผ่นตัวนำและลดขนาดของแผ่นตัวนำและขนาดของวัสดุฐานรองจากแบบที่ 1 เพื่อให้ได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ดีขึ้น



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 3.7 สายอากาศที่สร้างขึ้นมาทดสอบแบบที่ 3

จากรูปที่ 3.7 เป็นการออกแบบสายอากาศแบบที่ 3 ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นทองแดงแบบ 2 หน้าและมีการบ่อนสัญญาณที่ด้านซ้ายของแผ่นตัวนำเพื่อให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีการเลื่อนความถี่ไปทางด้านขวาเพื่อให้ได้ความถี่ที่ 2.45 GHz และลดขนาดของวัสดุฐานรองในด้านกว้างให้มีขนาดเท่ากับแผ่นตัวนำเพื่อให้ได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสายอากาศที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ทำขึ้นเพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้ว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างไร อีกทั้งยังเป็นการแก้ไขสายอากาศให้ได้ค่าการทดสอบที่ดีขึ้น เมื่อมีการออกแบบครั้งต่อไป เพื่อเป็นการหาสายอากาศที่มีผลการทดสอบที่ดีที่สุดในการนำไปใช้งาน

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

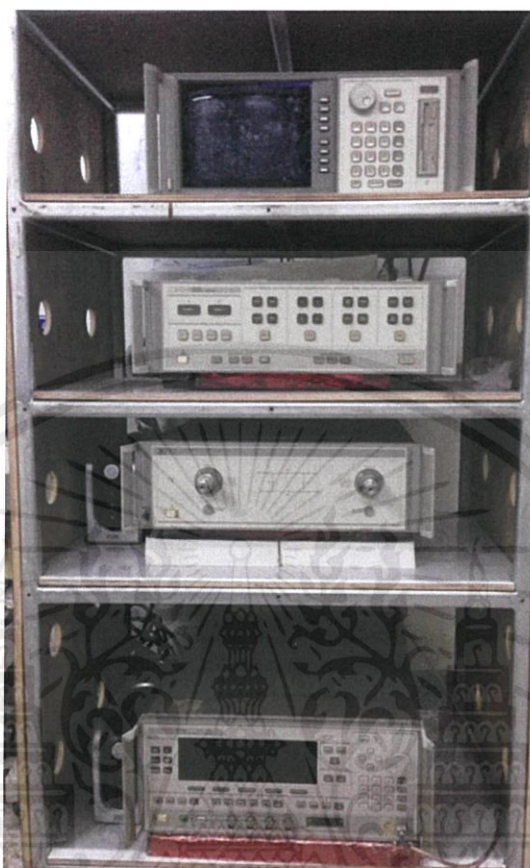
#### 3.3.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector network analyzer)

เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนั้นจะประกอบด้วยอุปกรณ์อื่นๆ รวมอยู่ด้วย โดยดังรูปที่ 3.8 จะเรียงลำดับอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการทดลองจากบนลงล่าง คือ

- 1) จอแสดงผล (Monitor)
- 2) ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-Parameter test)
- 3) เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองพอร์ต (Network analyzer)
- 4) เครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Synthesized sweeper)

องค์ประกอบสำคัญในการทดสอบช่องสัญญาณแบบแถบกว้างนั้น จะใช้เครื่องทดสอบซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น HP-8510C, ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-Parameter test set) รุ่น HP-8514B และเครื่องสังเคราะห์ความถี่ รุ่น HP-83620A เป็นอุปกรณ์หลักในการทดลองซึ่งจะถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ที่เชื่อมต่อผ่านช่องสื่อสารแบบ GPIB (General purpose interface bus) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่สามารถทดสอบสัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ต ซึ่งในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบโดยที่หนึ่งพอร์ตจะใช้ในการส่งสัญญาณ ส่วนพอร์ตสองจะใช้ในการรับสัญญาณ โดยที่ปลายของพอร์ตทั้งสองจะถูกต่อด้วยสายอากาศ และทำการทดสอบในโดเมนความถี่ก่อนที่จะนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



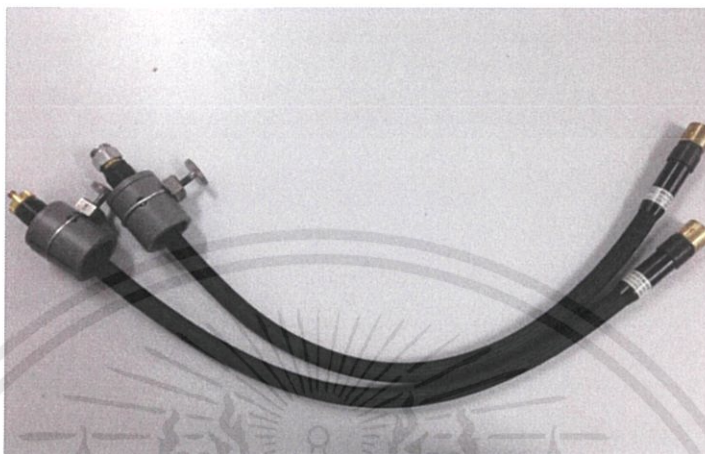
รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

3.3.2 ชุด calibrate ดังรูปที่ 3.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.9 ชุด calibrate  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

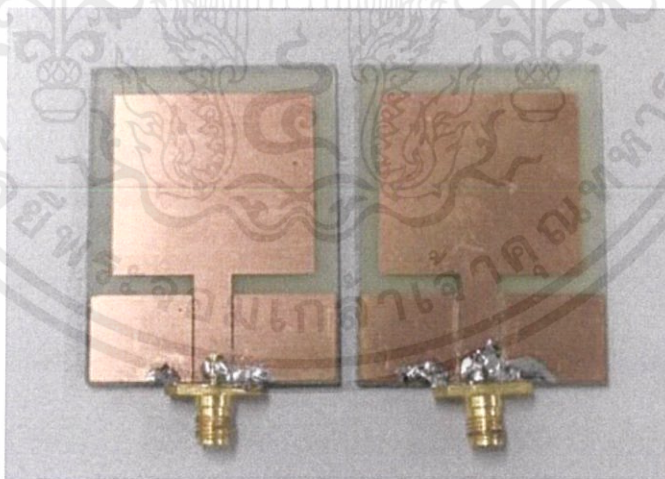
### 3.3.3 สายนำสัญญาณ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 สายนำสัญญาณ

### 3.3.4 สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ เราจะใช้สายอากาศคู่เหมือนที่เราได้ทำการสร้างขึ้น ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในความถี่ 2.45 GHz มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว และใช้เป็นตัวรับ-ส่งสัญญาณบนร่างกาย



รูปที่ 3.11 สายอากาศแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การจัดเก็บผลการทดลอง

การจัดเก็บผลการทดลองจะประกอบไปด้วยการวัดและการทดสอบหลักๆ อยู่สองอย่าง คือ การจัดเก็บผลการทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เราต้องการ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น และการจัดเก็บผลการทดสอบการรับ-ส่งผ่านสัญญาณบนร่างกายมนุษย์

#### 3.4.1 การจัดเก็บผลการทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศ

การจัดเก็บผลการทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริป มีวิธีการดำเนินงาน ดังนี้

- 1) ทำการคาร์ริเบรทเครื่อง Vector network analyzer ด้วยชุดคาร์ริเบรท เนื่องจากเราต้องการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ที่ประมาณ 2.45 GHz เราจึงทำการเลือกช่วงความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 2 GHz และความถี่สุดท้าย 3 GHz
- 2) ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่เราต้องการวัดเข้ากับเครื่อง Vector network analyzer เพื่อที่จะทำการหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศต่อไป
- 3) เมื่อทำการเชื่อมต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องแล้ว จากนั้นทำการทดสอบการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป
- 4) ทดสอบการหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Return loss), ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป
- 5) จัดเก็บผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศต่อไป



รูปที่ 3.12 การทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศ

### 3.4.2 การจัดเก็บผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

การจัดเก็บผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มีขั้นตอนวิธีการทดสอบดังนี้

1) คำนวณหาสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริป ดังสมการที่ 3.9 โดยหา ส่วนของสายอากาศที่มีความยาวมากที่สุด (D) ซึ่งเส้นทแยงมุมเป็นมิติที่มีความยาวมากที่สุด

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda_{\min}} ; \lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} \quad (3.9)$$

ทำการวัดค่า D จากสายอากาศได้เท่ากับ 0.0052 เมตร หาค่า  $\lambda_{\min}$  ได้เท่ากับ 0.1224 เมตร คำนวณหาระยะของสนามระยะไกลได้ 0.0442 เมตร

2) ทำการติดตั้งสายอากาศไมโครสตริปคู่เหมือนให้เป็นสายอากาศตัวส่งและตัวรับ สัญญาณ โดยวางในระนาบสนามไฟฟ้า คือ วางสายอากาศในแนวตั้งฉากกับพื้นโลก หันหน้าเข้าหากัน และให้ระดับความสูงเท่ากัน โดยมีระยะห่างให้มากกว่าระยะสนามระยะไกล

3) หมุนสายอากาศที่ตัวรับทีละ 5 องศา จากนั้นจัดเก็บผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป โดยบันทึกค่าพารามิเตอร์  $S_{21}$  ในขณะที่หมุนสายอากาศ ทีละ 5 องศา ที่ความถี่ 2.45 GHz

4) ทำการติดตั้งสายอากาศใหม่ โดยการวางสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก คือ วางสายอากาศในแนวขนานกับพื้นโลก ที่ระดับความสูงเท่ากันทั้งสายอากาศรับและส่ง และหันหน้าเข้าหากัน

5) หมุนสายอากาศที่เป็นตัวรับทีละ 5 องศา จากนั้นจัดเก็บผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

6) นำข้อมูลที่บันทึกมาพลอตกราฟดูแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จากนั้น คำนวณค่าอัตราขยาย จากสมการที่ 3.10

$$G_{ot} + G_{or} = 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 การจัดเก็บผลการทดสอบ Transfer function บนร่างกายมนุษย์

สำหรับการจัดเก็บผลการทดสอบหาค่า Transfer function บนร่างกายมนุษย์ มีวิธีการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

- 1) ทำการ calibrate เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ โดยใช้การ calibrate แบบ Full two-port สำหรับเก็บค่าพารามิเตอร์  $S_{21}$
- 2) เชื่อมต่อสายอากาศคู่เหมือนเข้ากับเครื่อง โดยสายอากาศที่เป็นตัวส่งเชื่อมเข้ากับพอร์ต 1 และตัวรับต่อเข้ากับพอร์ต 2
- 3) ทำการติดตั้งสายอากาศบนร่างกาย โดยที่สายอากาศตัวส่งเราจะทำการติดตั้งไว้ที่บริเวณหน้าท้อง ส่วนสายอากาศที่เป็นตัวรับเราจะทำการติดตั้งไว้ที่จุดต่างๆตามร่างกายทั้งหมด 13 จุด ได้แก่ ศีรษะด้านหน้า-ด้านหลัง, หัวไหล่ข้างซ้าย-ขวา, ข้อมือซ้าย-ขวา, เอวข้างซ้าย-ขวา, หัวเข่าข้างซ้าย-ขวา, ตาตุ่มข้างซ้าย-ขวา และบริเวณกลางอก
- 4) จัดเก็บผลการทดสอบ จากตำแหน่งต่างๆบนร่างกายทั้ง 13 จุด แล้วนำผลมาวิเคราะห์หาค่าฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  และเฟสต่อไป



รูปที่ 3.13 การทดสอบ Transfer function บนร่างกายมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 การจัดเก็บผลการทดสอบผลกระทบของสัญญาณ WiFi

ในการทดสอบการส่งผ่านสัญญาณนั้น ย่อมมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนอื่นๆ ที่อยู่โดยรอบ เพื่อทำการวิเคราะห์หว่าสัญญาณที่ได้นั้นมาจากสายอากาศโดยแท้จริงมีค่าเท่ากับเท่าไร จึงทำการทดลองหาอัตราขยายของสายอากาศทั้งตัวส่งและตัวรับในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ ภายในห้องเรียน 305 ตึก 12 ชั้น และ ห้องป้องกันการสะท้อนของคลื่น (Chamber room) โดยใช้สมการการส่งผ่านของฟรีสในการคำนวณดังแสดงในสมการที่ 3.10

$$G_t + G_r = 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \quad (3.10)$$

เมื่อ  $G_t, G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ  
 $P_t, P_r$  คือ กำลังของตัวส่งและตัวรับ  
 $R$  คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

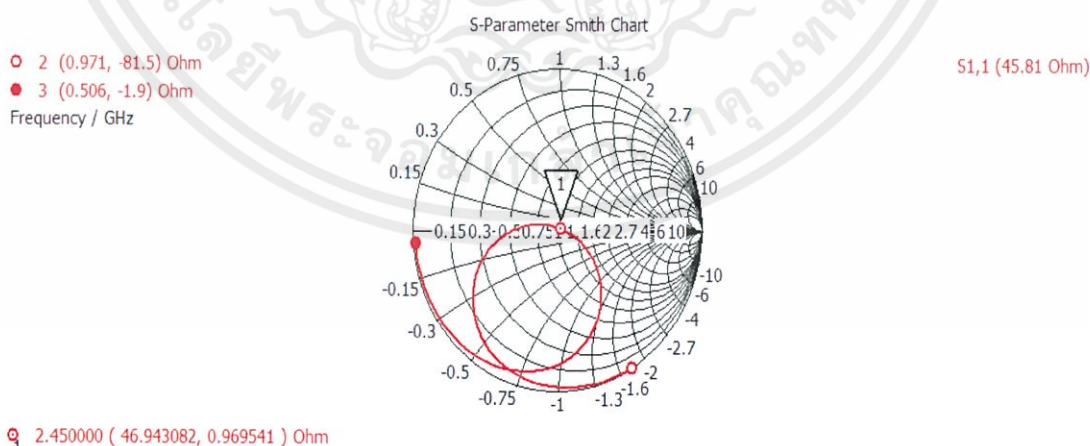
### การจำลองและผลการทดสอบ

#### 4.1 การจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม CST

สำหรับการวิเคราะห์สายอากาศนั้น จะมีพารามิเตอร์สำคัญที่เราจะต้องพิจารณา เช่น อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage standing wave ratio) ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return loss) และค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) ของสายอากาศโดยการวิเคราะห์จะนำขนาดของสายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่ไวด์แบนด์ที่ได้จากการคำนวณในบทที่แล้วมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าต่างๆ ด้วยโปรแกรม CST และทำการปรับแต่งขนาดเพื่อให้ได้ผลดีที่สุด แล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST มาสร้างสายอากาศต่อไป

##### 4.1.1 พิจารณาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

สายอากาศไมโครสตริปจะมีส่วนที่เป็นสายส่งไมโครสตริป (Strip line) ซึ่งมีค่าความกว้าง และความยาวที่ส่งผลต่ออิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ โดยอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับการออกแบบสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ 50 โอห์มเพื่อให้สัญญาณไม่เกิดการสะท้อน ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม CST จะพิจารณาอิมพีแดนซ์ของสายอากาศทั้ง 3 แบบที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz ดังรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3

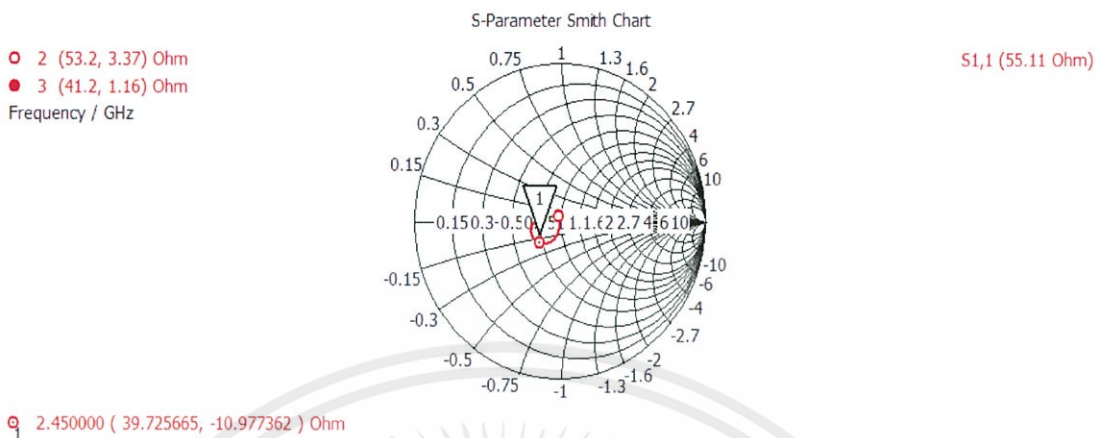


รูปที่ 4.1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 1 จากโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

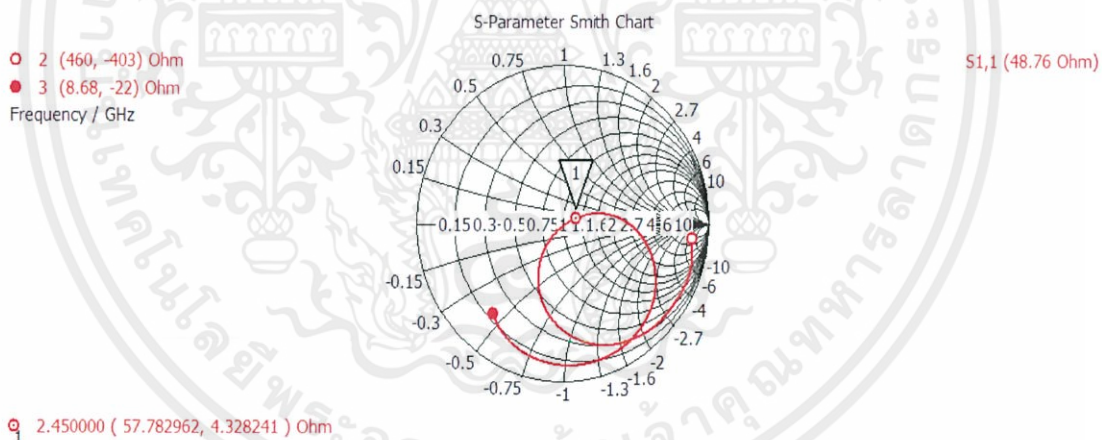
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 1 ที่ได้จากการจำลองการทำงานจากโปรแกรม CST microwave studio ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 46.943 โอห์ม



รูปที่ 4.2 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 2 จากโปรแกรม CST

จากรูปที่ 4.2 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 2 ที่ได้จากการจำลองการทำงานจากโปรแกรม CST microwave studio ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 39.77 โอห์ม



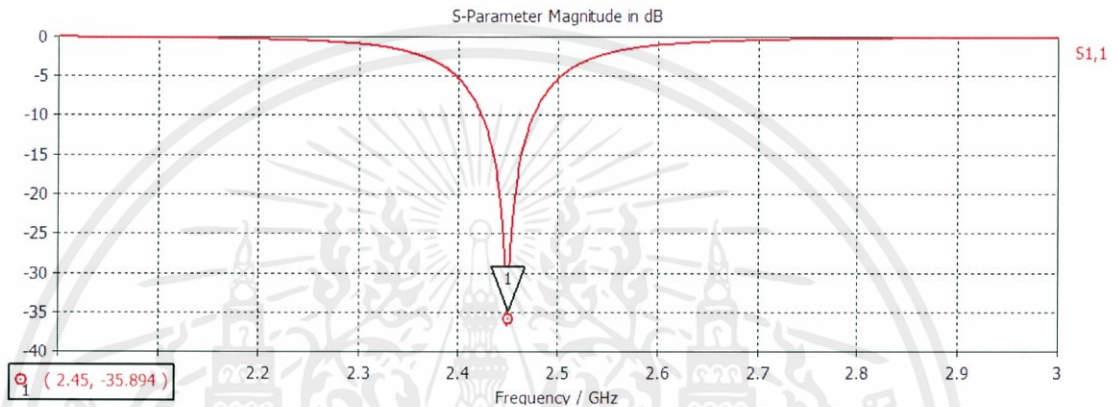
รูปที่ 4.3 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 3 จากโปรแกรม CST

จากรูปที่ 4.3 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 3 ที่ได้จากการจำลองการทำงานจากโปรแกรม CST microwave studio ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 57.78 โอห์ม

จากรูปที่ 4.1-4.3 คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการคือ 50 โอห์ม ซึ่งหมายถึงเครื่องส่งกับสายอากาศแมทซ์กันพอดี และจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST พบว่าสายอากาศทั้ง 3 แบบมีค่าไม่เท่ากับ 50 โอห์ม โดยสายอากาศแบบที่ 1 จะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุดคือ 46.94 โอห์ม ซึ่งยังสามารถใช้งานได้ แต่สายอากาศแบบที่ 2 และ 3 มีค่าอิมพีแดนซ์คลาดเคลื่อนไปจาก 50 โอห์มมาก ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้

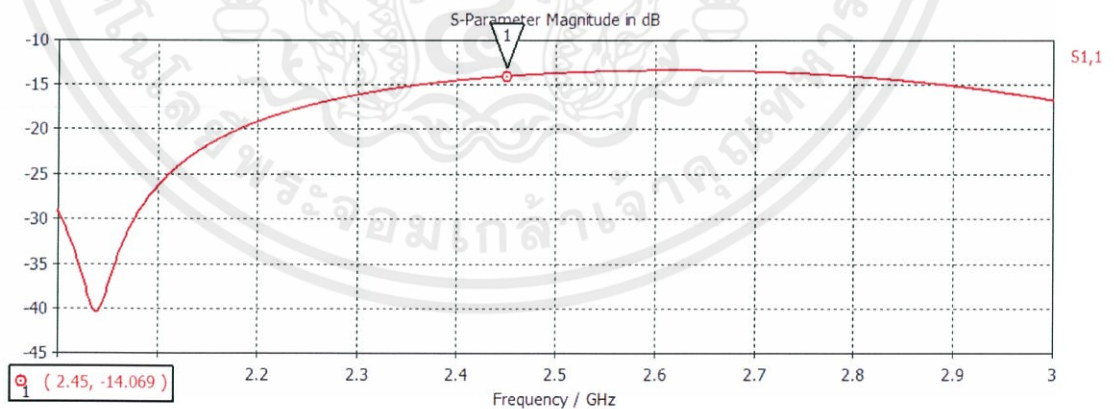
#### 4.1.2 พิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์อินพุทของสายอากาศจนได้ค่าตามที่ต้องการแล้ว ในส่วนต่อไปที่จะพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ซึ่งในการพิจารณาค่าดังกล่าวก็ต้องพิจารณาที่ความถี่ที่ใช้งานคือ 2.45 GHz ดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม CST

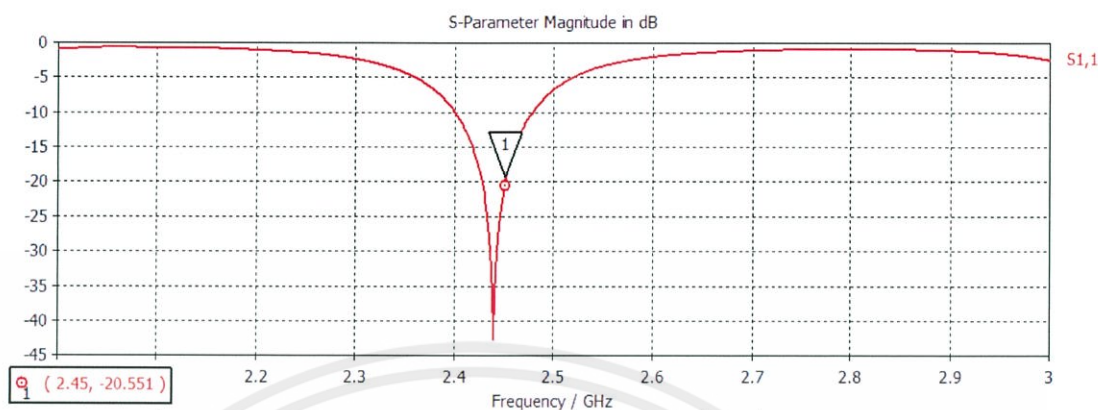
จากรูปที่ 4.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 1 ที่ได้จากการจำลองการทำงาน จากโปรแกรม CST microwave studio ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -35.89 dB



รูปที่ 4.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม CST

จากรูปที่ 4.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 2 ที่ได้จากการจำลองการทำงาน จากโปรแกรม CST microwave studio ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -14.069 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 3 ที่ได้จากโปรแกรม CST

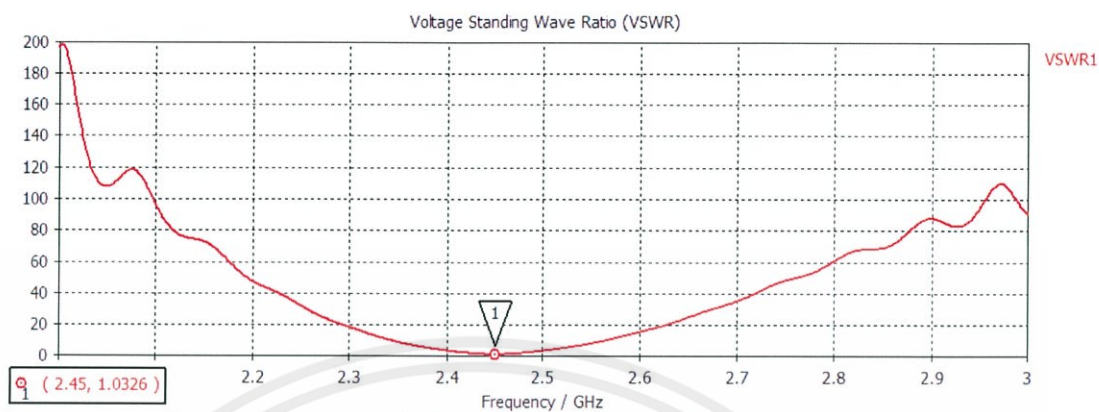
จากรูปที่ 4.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 3 ที่ได้จากการจำลองการทำงานจากโปรแกรม CST microwave studio ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -20.551 dB

จากรูปที่ 4.4-4.6 คือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST microwave studio ที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งหมายถึงค่ากำลังงานที่เครื่องส่ง ส่งไปที่สายอากาศและสะท้อนกลับมายังเครื่องส่ง โดยค่าการสูญเสียย้อนกลับที่สามารถใช้งานได้ต้องมีค่าน้อยกว่า -10 dB ซึ่งจากรูปที่ 4.4-4.6 พบว่าสายอากาศทั้ง 3 แบบมีค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่า -10 dB ทั้งหมด แสดงว่าสายอากาศทั้ง 3 แบบสามารถใช้งานได้โดยสายอากาศแบบที่ 1 จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ -35.894 dB

#### 4.1.3 พิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR)

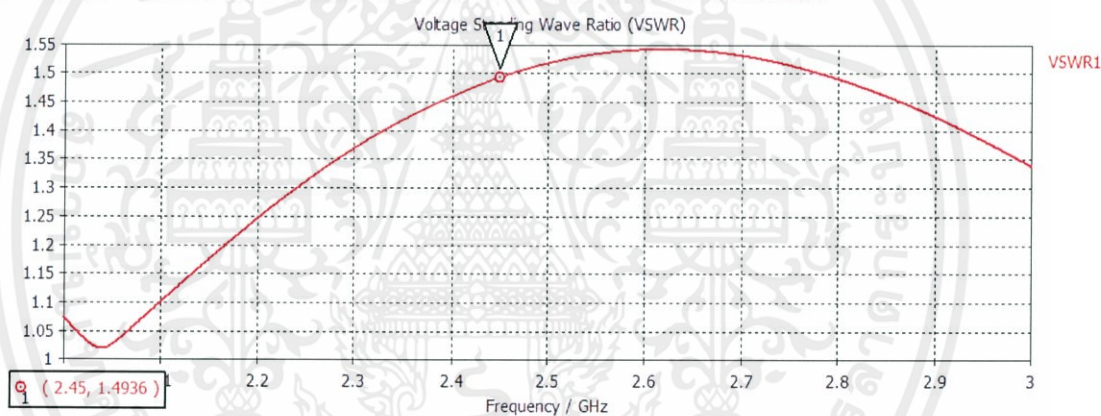
อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage standing wave ratio) คือค่าแรงดัน  $V_{\max}$  ของคลื่นนิ่งและแรงดัน  $V_{\min}$  ของคลื่นที่ได้มาจากการบวกกันของคลื่นกระทบ และคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงกันและตรงข้ามกันตามลำดับ โดยการนำอัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุดก็จะเรียกว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันโดยในการพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันนี้ ไม่ควรมีค่าสูงกว่า 2 และจะให้ดีควรมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 1.5 ซึ่งแสดง VSWR ได้ตามที่แสดงดังรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



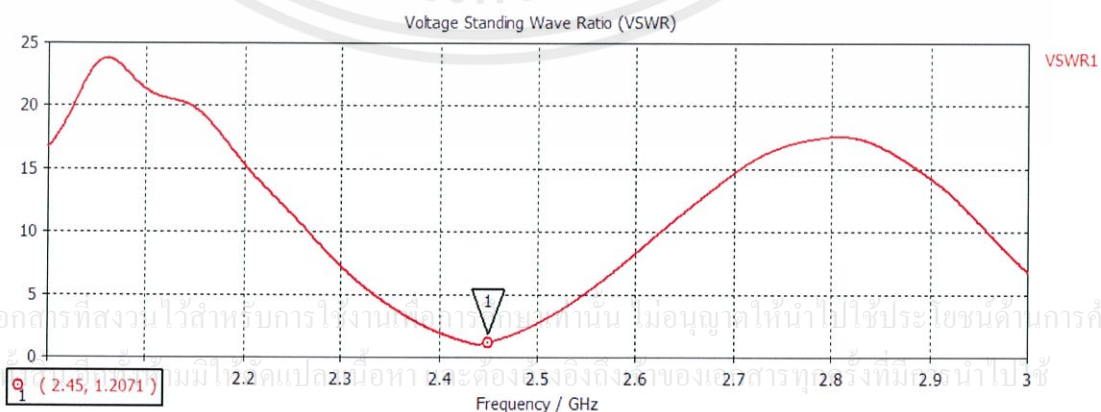
รูปที่ 4.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม CST

รูปที่ 4.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 1 ที่ได้จากการจำลองการทำงานจากโปรแกรม CST microwave studio ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 1.03261



รูปที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม CST

รูปที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 2 ที่ได้จากการจำลองการทำงานจากโปรแกรม CST microwave studio ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 1.4936



รูปที่ 4.9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 3 ที่ได้จากโปรแกรม CST

รูปที่ 4.9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 3 ที่ได้จากการจำลองการทำงานจากโปรแกรม CST microwave studio ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 1.2071

จากรูปที่ 4.7-4.9 คือค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากคลื่นที่เครื่องส่ง ส่งไปยังสายอากาศและสะท้อนกลับมายังเครื่องส่ง ทำให้เกิดการซ้อนทับกันระหว่างคลื่นที่ส่งออกไป และคลื่นที่สะท้อนกลับมาโดยเรียกว่าคลื่นนิ่ง ซึ่งจะต้องมีค่าอัตราส่วนน้อยกว่า 2 และจากรูปที่ 4.7-4.9 พบว่าสายอากาศทั้ง 3 แบบมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งน้อยกว่า 2 ทั้งหมด แสดงว่าสามารถใช้งานได้โดยสายอากาศแบบที่ 1 จะมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งดีที่สุดคือ 1.0326

## 4.2 ผลการทดลอง

เนื่องจากเราได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปมาทั้งหมด 3 รูปแบบ จึงต้องนำมาทำการทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ เพื่อจะดูว่าสายอากาศตัวไหนเหมาะสมมากที่สุดกับการนำไปใช้งาน โดยดูจากค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่วัดได้จากสายอากาศแต่ละตัว ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เรานำมาเป็นเงื่อนไขในการเลือกสายอากาศนั้น ได้แก่ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss), ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance), แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ซึ่งโดยการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศสามารถตั้งอุปกรณ์การทดลองได้ดังรูปที่ 4.10



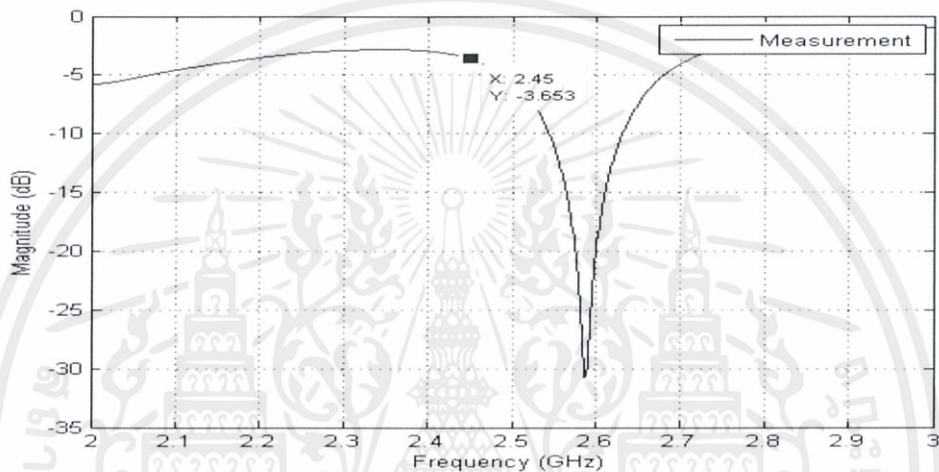
รูปที่ 4.10 การตั้งอุปกรณ์การทดลองวัดคุณสมบัติของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่ควรนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ

เราจะทำการทดสอบทั้ง 3 สายอากาศที่ได้ออกแบบและสร้างมา เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันว่าสายอากาศตัวใดมีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากที่สุดในการนำไปทดสอบบนร่างกายต่อไป

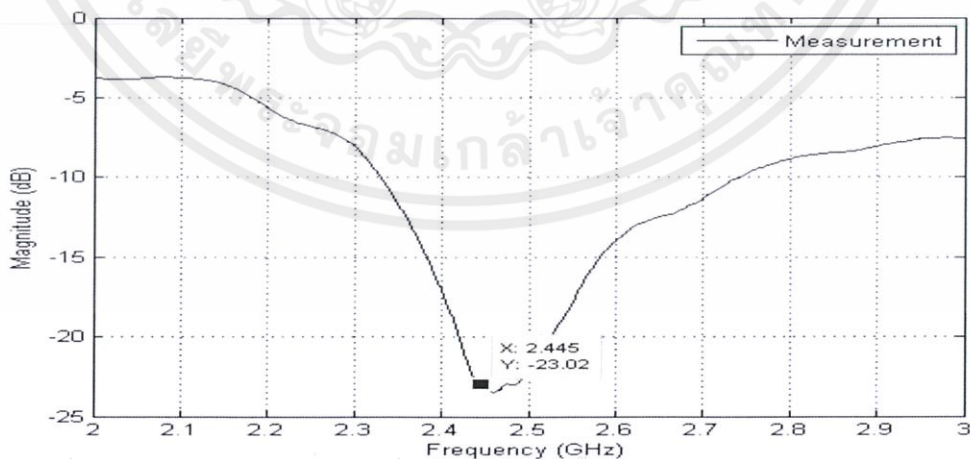
#### 4.2.1 การทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss)

ในการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ สายอากาศจะสามารถใช้งานได้จะต้องมีค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่า -10 dB ซึ่งในการทดสอบจะใช้ค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  ในการวิเคราะห์สายอากาศทั้ง 3 แบบและหาสายอากาศที่ดีที่สุดสำหรับนำไปทดลองบนร่างกายมนุษย์ต่อไป ซึ่งค่า  $S_{11}$  ที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13



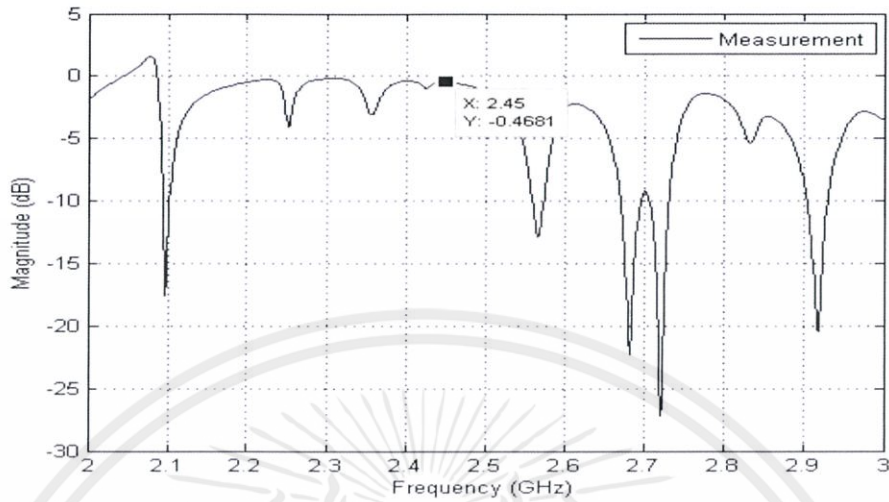
รูปที่ 4.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 1 จากการทดสอบ

รูปที่ 4.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 1 ที่ได้จากการทดลอง ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -3.653 dB



รูปที่ 4.12 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 2 จากการทดสอบ

รูปที่ 4.12 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 2 ที่ได้จากการทดลอง ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -23.02 dB

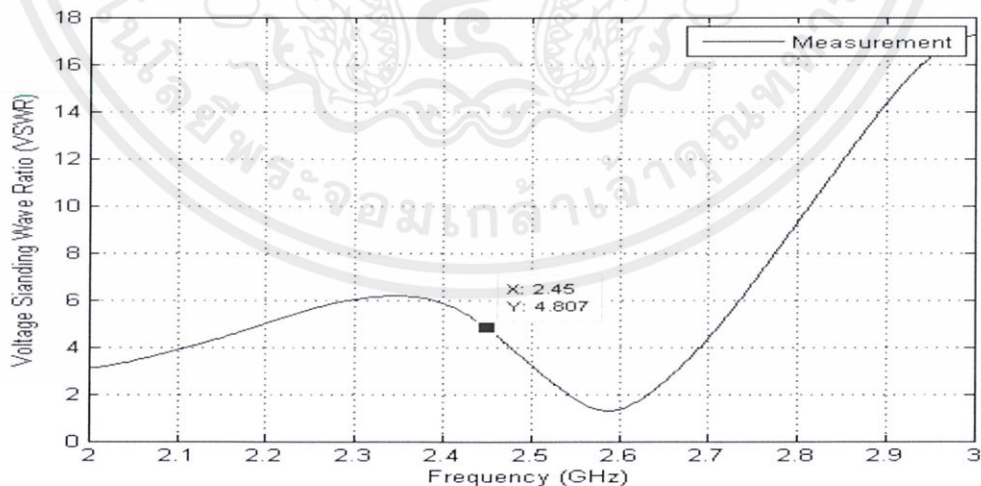


รูปที่ 4.13 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 3 จากการทดสอบ

รูปที่ 4.13 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบที่ 3 ที่ได้จากการทดลอง ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -0.4681 dB

#### 4.2.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ 2.45 GHz จากการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16

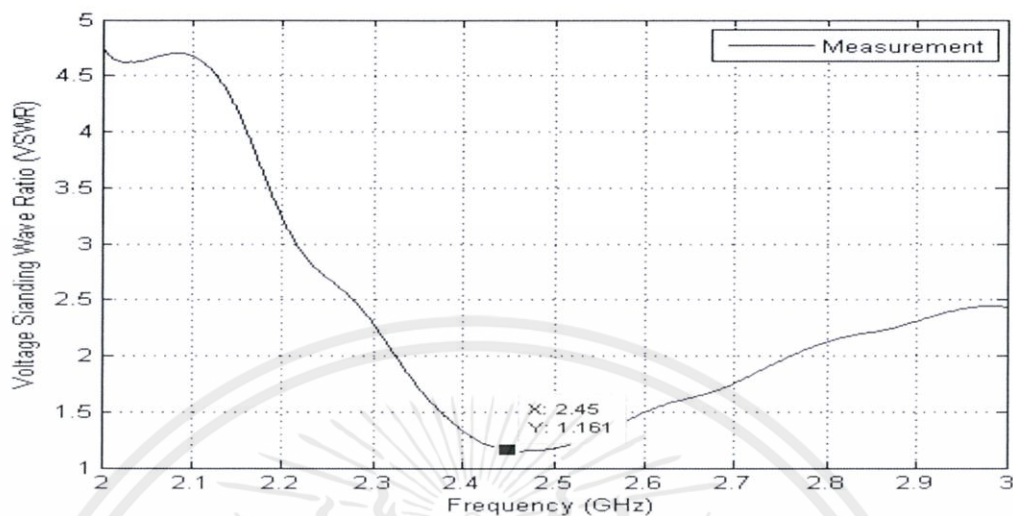


รูปที่ 4.14 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 1 จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

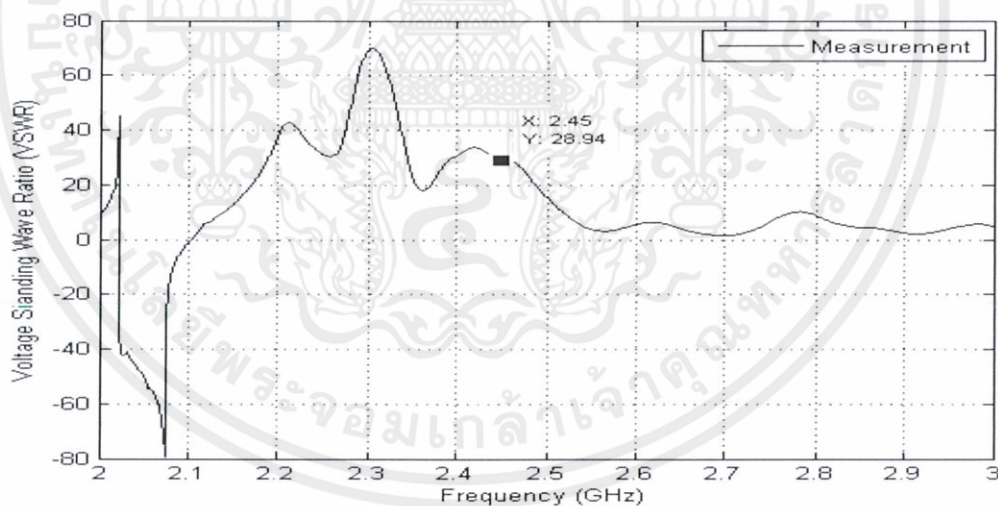
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 4.14 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 1 ที่ได้จากการทดลอง ที่ความถี่ 2.45

GHz มีค่าเท่ากับ 4.807



รูปที่ 4.15 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 2 จากการทดสอบ

รูปที่ 4.15 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 2 ที่ได้จากการทดลอง ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 1.161



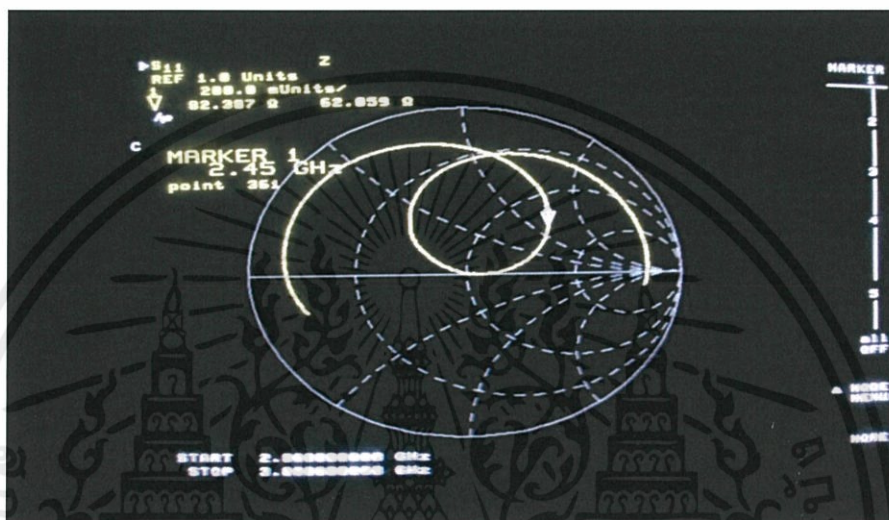
รูปที่ 4.16 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 3 จากการทดสอบ

รูปที่ 4.16 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบที่ 3 ที่ได้จากการทดลอง ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 28.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

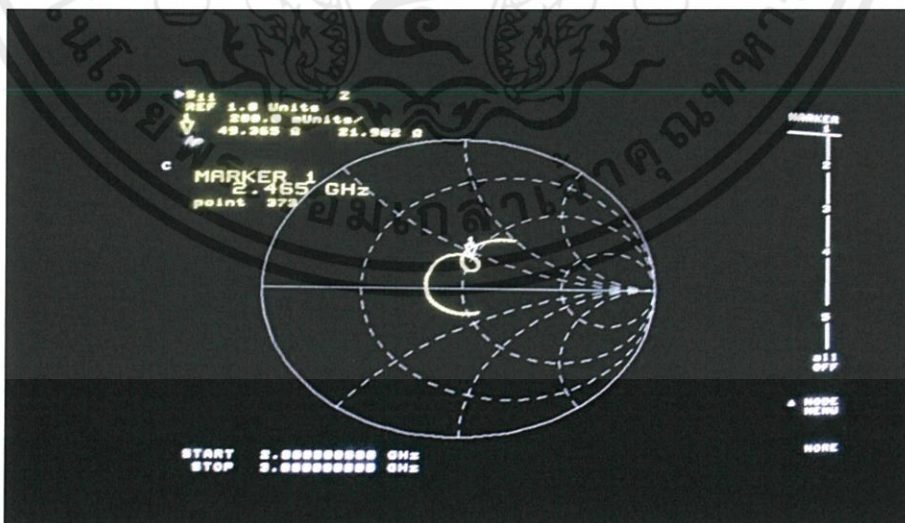
### 4.2.3 การทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

การทดสอบหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป สามารถหาได้โดยการอ่าน Smith chart จากเครื่อง Vector network analyzer ที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศทั้ง 3 แบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17, 4.18 และ 4.19



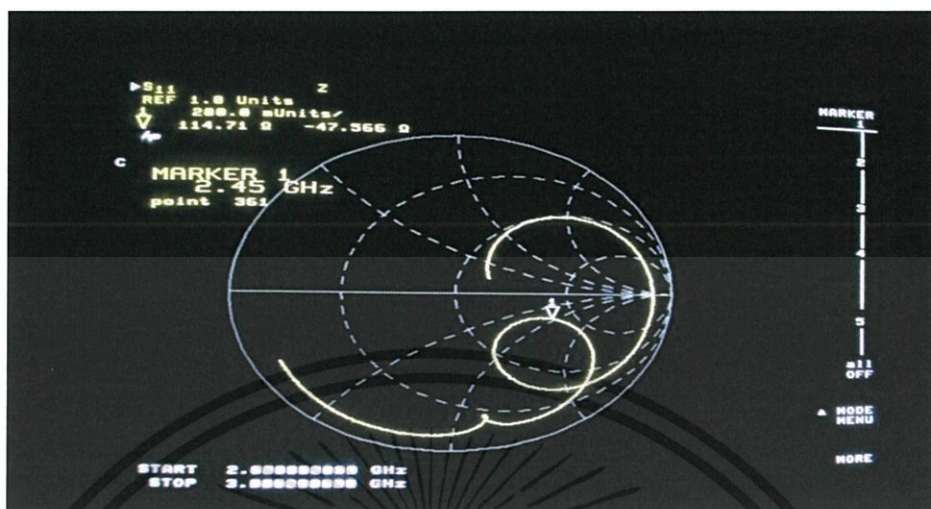
รูปที่ 4.17 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 1 จากการทดสอบ

รูปที่ 4.17 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 1 ที่ได้จากการทดลอง ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 82.387 โอห์ม



รูปที่ 4.18 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 2 จากการทดสอบ

รูปที่ 4.18 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 2 ที่ได้จากการทดลอง ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 49.365 โอห์ม



ที่ 4.19 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 3 จากการทดสอบ

รูปที่ 4.19 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบที่ 3 ที่ได้จากการทดลอง ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 114.71 โอห์ม

จากการทดลองวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศทั้ง 3 แบบ ซึ่งประกอบด้วย ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติของสายอากาศ

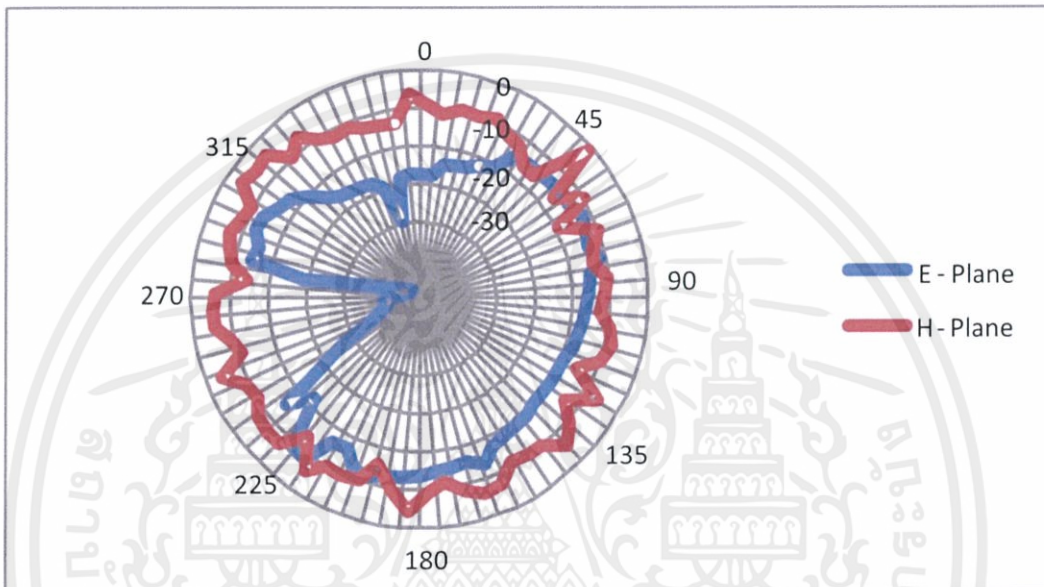
ชนิดของสายอากาศ	ค่าคุณสมบัติของสายอากาศ		
	การสูญเสียย้อนกลับ	อัตราส่วนคลื่นนิ่ง	อิมพีแดนซ์
แบบที่ 1	-3.653 dB	4.807	83.387 โอห์ม
แบบที่ 2	-23.02 dB	1.161	49.365 โอห์ม
แบบที่ 3	-0.468 dB	28.94	114.71 โอห์ม

จากตารางที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่า ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าดีที่สุดเมื่อใช้สายอากาศแบบที่ 2 คือ -23.02 dB ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าดีที่สุดเมื่อใช้สายอากาศแบบที่ 2 คือ 1.161 และค่าอิมพีแดนซ์มีค่าดีที่สุดเมื่อใช้สายอากาศแบบที่ 2 คือ 49.365 โอห์ม ดังนั้น สายอากาศแบบที่ 2 จะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด จึงเหมาะสมในการนำไปทดลองบนร่างกายมนุษย์ต่อไป

#### 4.2.4 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งเนื่องจากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าสายอากาศที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดคือสายอากาศแบบที่ 2 ดังนั้นในการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจึงทำการทดลองเฉพาะสายอากาศแบบที่ 2 เท่านั้น โดยค่ารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการคือมีลักษณะเป็นแบบ

omnidirectional หรือ แพร่กระจายรอบทิศทาง ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองที่ระยะห่างของสายอากาศตัวส่งและตัวรับเป็นระยะ farfield คือ 50 เซนติเมตรและตัวสายอากาศส่งและรับสูงเท่ากับ 120 เซนติเมตร โดยรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบที่ 2 จากการทดลอง

จากรูปที่ 4.20 คือ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบที่ 2 ที่ความถี่ 2.45 GHz จากการทดลอง โดยแสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ระนาบ E-Plane และ H-Plane ซึ่งผลการทดลองที่ระนาบ H-Plane มีลักษณะแพร่กระจายคลื่นออกทุกทิศทางเหมือนกับ omnidirectional ตามที่ต้องการ แต่ระนาบ E-plane จะไม่แพร่กระจายทุกทิศทาง โดยที่ประมาณมุม 270 องศา ถึง 225 องศา จึงมีลักษณะไม่เป็นแบบ omnidirectional

#### 4.2.5 ความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบสายอากาศทั้ง 3 แบบ และจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST microwave studio และทำการสร้างขึ้นมาเพื่อนำมาทดสอบค่าพารามิเตอร์ การสูญเสียย้อนกลับ อิมพีแดนซ์ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง สามารถหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากที่ออกแบบได้ จากสมการที่ 4.2 และสามารถแสดงค่าความคลาดเคลื่อนได้ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ค่าความคลาดเคลื่อน (%) =  $\frac{|\text{ค่าที่ออกแบบได้} - \text{ค่าที่ได้จากการทดลอง}|}{\text{ค่าที่ออกแบบได้}} \times 100$  รังที่มีการนำไป (4.2)

ตารางที่ 4.2 ค่าความคลาดเคลื่อน

ชนิดของสายอากาศ	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)		
	การสูญเสียย้อนกลับ	อัตราส่วนคลื่นนิ่ง	อิมพีแดนซ์
แบบที่ 1	89.82	365.52	75.50
แบบที่ 2	63.62	22.27	24.13
แบบที่ 3	97.72	2297.48	98.53

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของสายอากาศทั้ง 3 แบบจะพบว่าทุกค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศซึ่งได้แก่ การสูญเสียย้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์สายอากาศแบบที่ 2 จะมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศแบบที่ 2 มีค่าผลการทดลองใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองการทำงานของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST microwave studio มากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการทดลองบนร่างกายมนุษย์

ในการทดลองบนร่างกายมนุษย์จะใช้สายอากาศ 2 ตัวติดบนร่างกายเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวส่งและตัวรับสัญญาณโดยจะทำการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศตัวส่งให้คงที่ และทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศตัวรับไปยังตำแหน่งต่างๆ บนร่างกายตามที่ได้กำหนดไว้และทำการวัดค่าพารามิเตอร์  $S_{21}$  ขนาดและเฟส ที่ความถี่ 2.45 GHz ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.18 และ 4.19



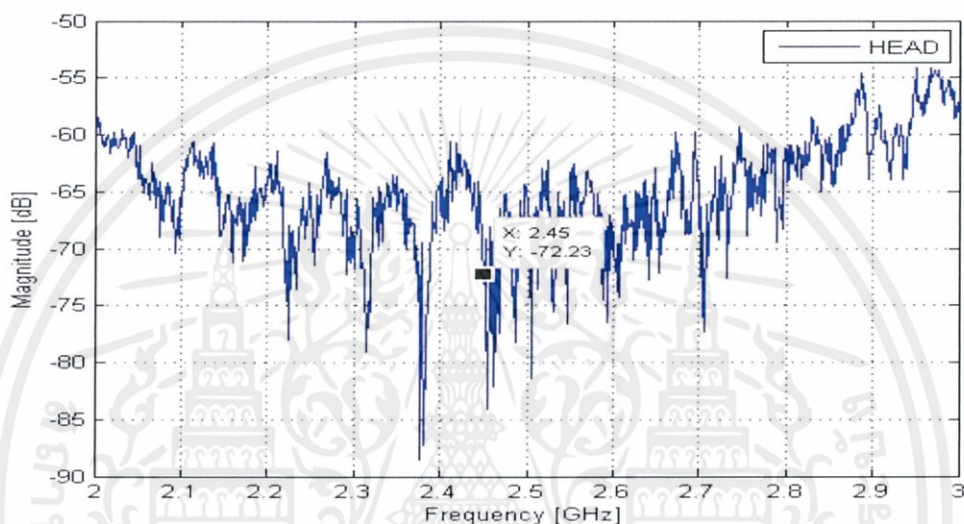
รูปที่ 4.18 การวัดสายอากาศบนร่างกายมนุษย์



รูปที่ 4.19 ตัวอย่างตำแหน่งของสายอากาศตัวรับและตัวส่งบนร่างกายมนุษย์

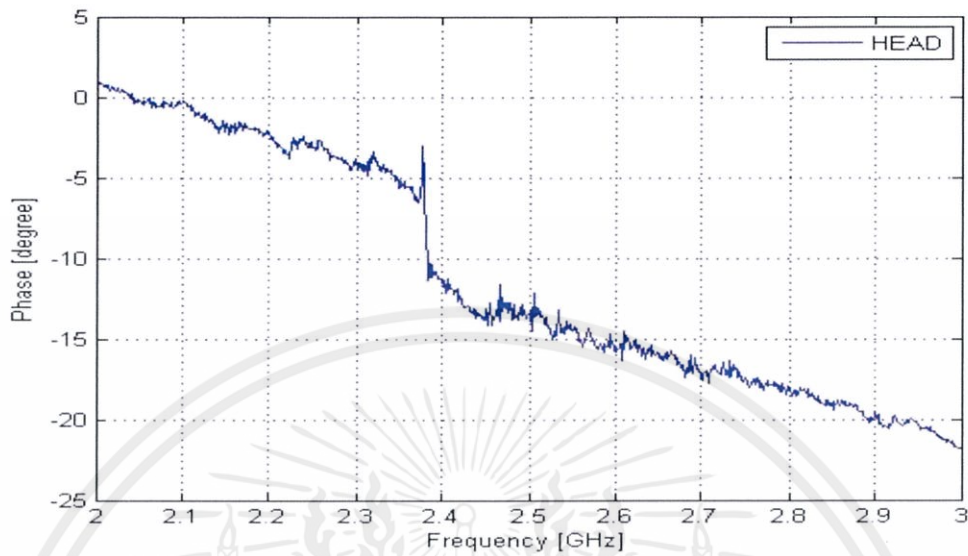
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ... หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา... การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์  $S_{21}$  และเฟสจะใช้ผู้ทดลองที่มีส่วนสูง 170 เซนติเมตร น้ำหนัก 72 กิโลกรัม ซึ่งทำการติดตั้งตัวสายอากาศส่งให้คงที่ไว้บริเวณกึ่งกลางของลำตัว โดยสูงจากพื้น 90 เซนติเมตร และตัวสายอากาศรับย้ายบริเวณไปทั่วร่างกายทั้ง 13 จุด คือ ศีรษะด้านหน้า, หัวไหล่ขวา, หัวไหล่ซ้าย, หน้าอก, หลัง, ข้อมือขวา, ข้อมือซ้าย, เอวขวา, เอวซ้าย, หัวเข่าขวา, หัวเข่าซ้าย, ข้อเท้าขวา และข้อเท้าซ้าย โดยสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์  $S_{21}$  และเฟสได้ดังแสดงในรูปที่ 4.20 - 4.32 ตามลำดับ



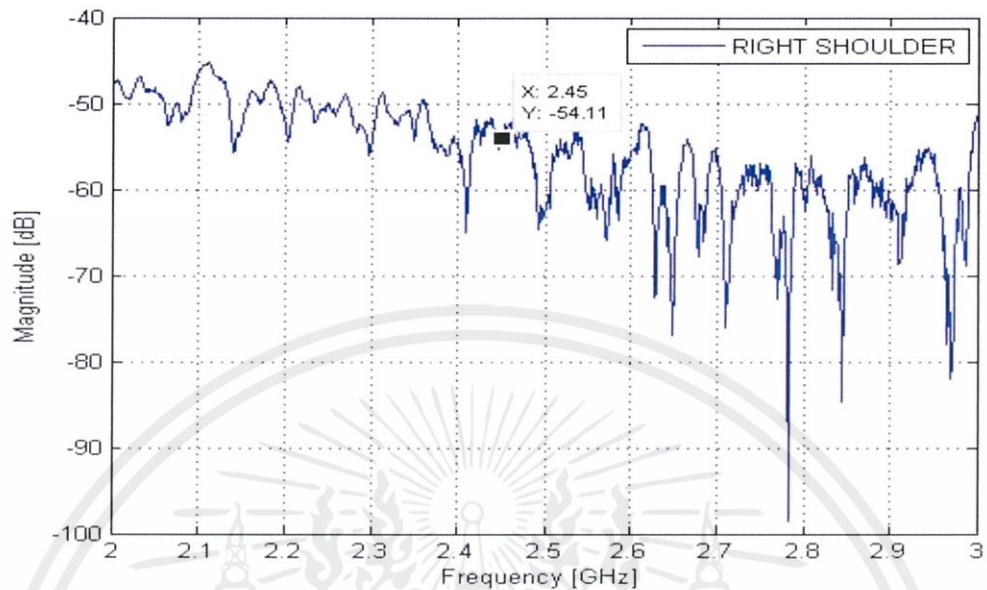
(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งศีรษะด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

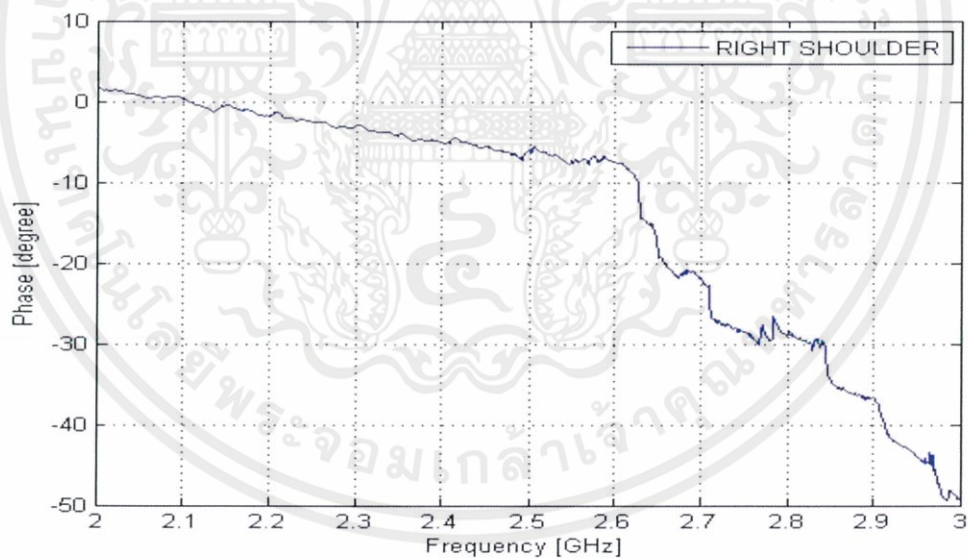


(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งศีรษะด้านหน้า  
รูปที่ 4.20 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งศีรษะด้านหน้า  
จากรูปที่ 4.20 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ  
-72.23 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนอง  
ทางเฟสของสายอากาศที่เป็นเชิงเส้นแต่มีสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 2.3 – 2.4 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



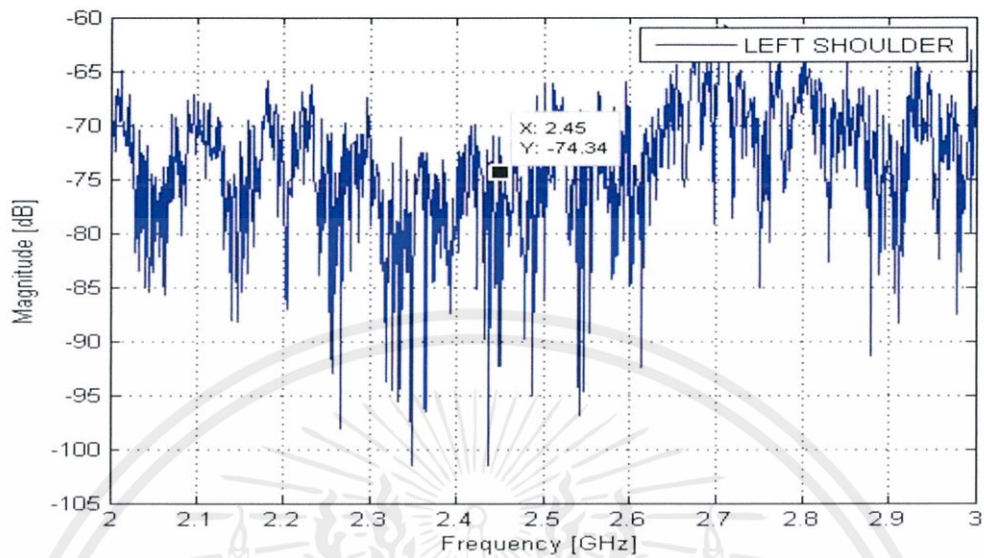
(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหัวไหล่ขวา



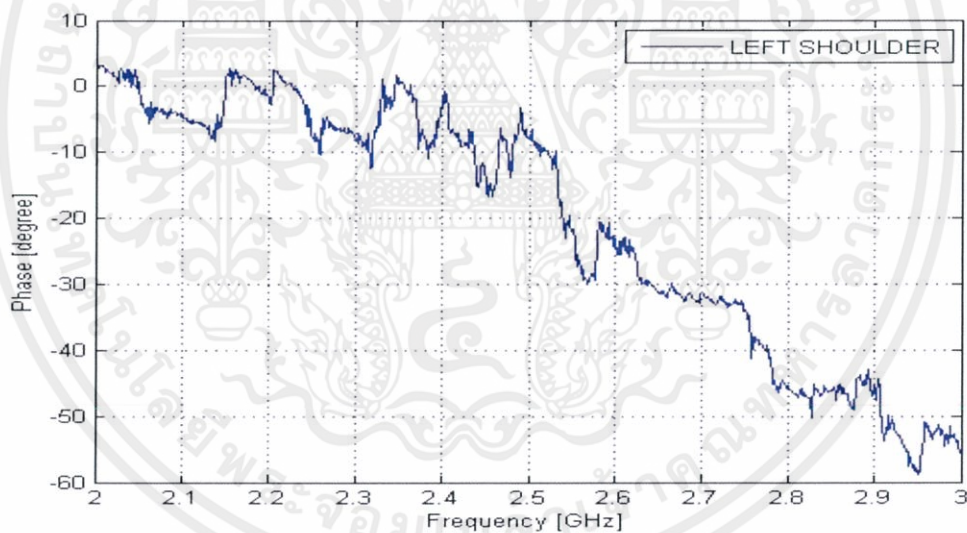
(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหัวไหล่ขวา

รูปที่ 4.21 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งหัวไหล่ขวา

จากรูปที่ 4.21 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ -54.11 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของสายอากาศที่เป็นเชิงเส้นแต่มีสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 2.6 – 3.0 GHz



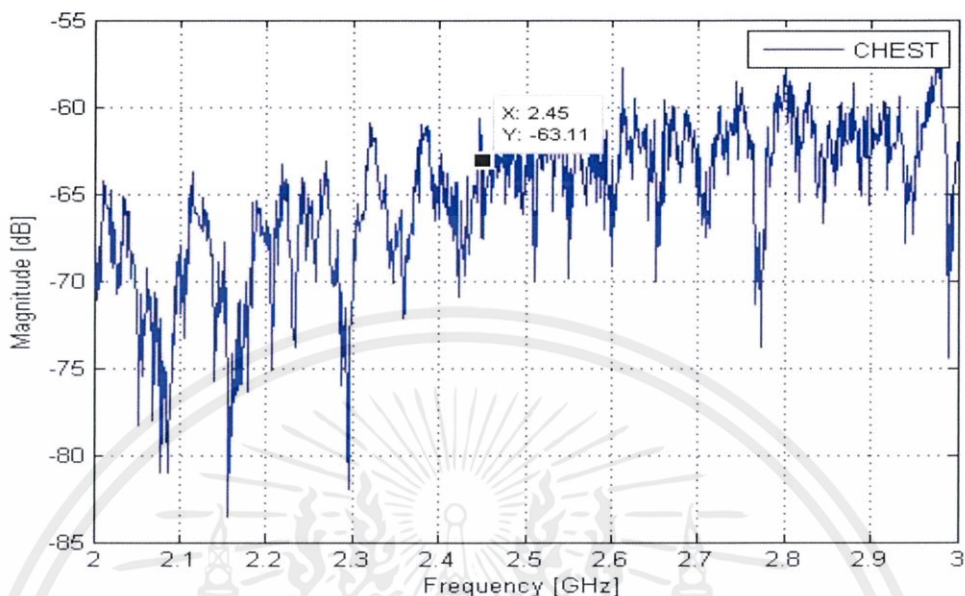
(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหัวไหล่ซ้าย



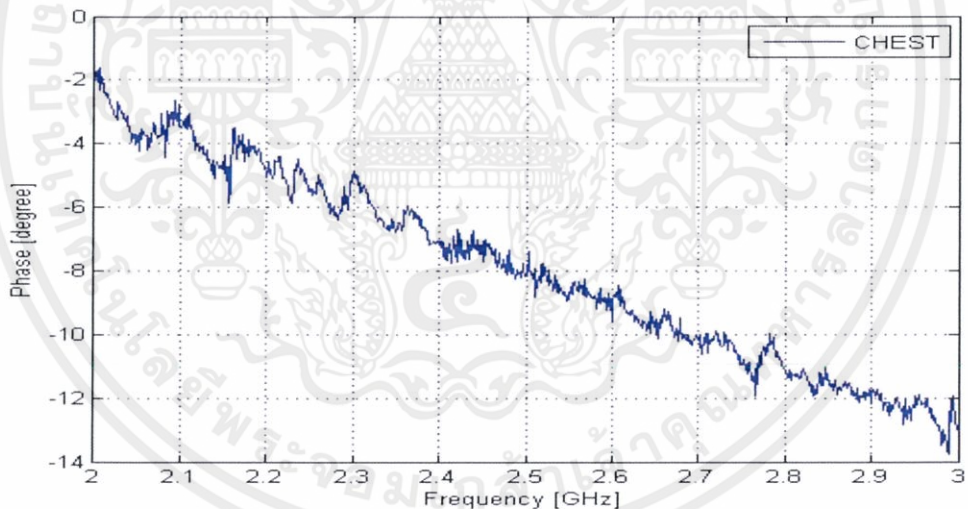
(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหัวไหล่ซ้าย

รูปที่ 4.22 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งหัวไหล่ซ้าย

จากรูปที่ 4.22 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ  $-74.34$  dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า  $-10$  dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของเอกสตรนีที่สายอากาศที่เป็นเชิงเส้นแต่มีสัญญาณรบกวน การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหน้าอก



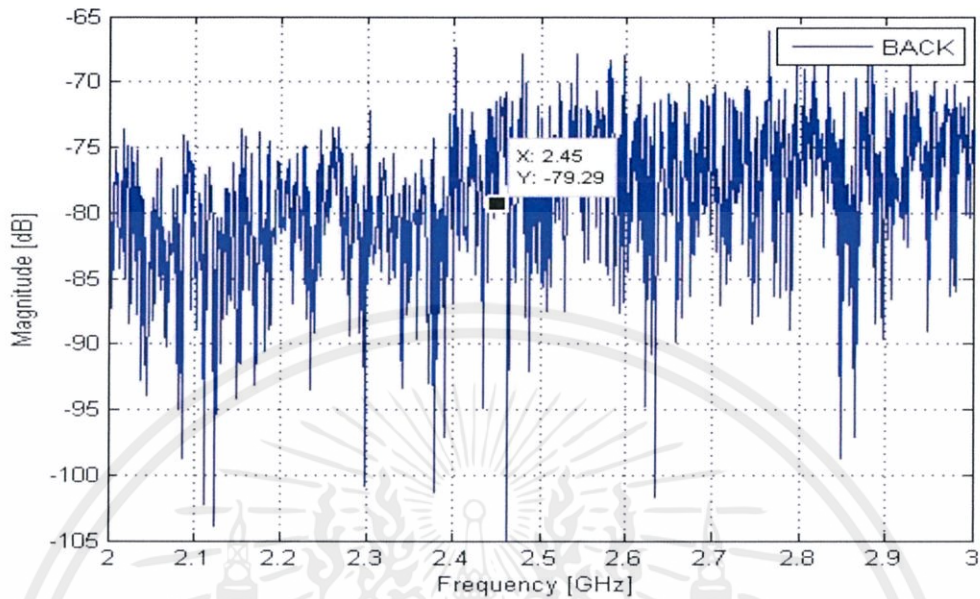
(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหน้าอก

รูปที่ 4.23 ผลการวัดผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งหน้าอก

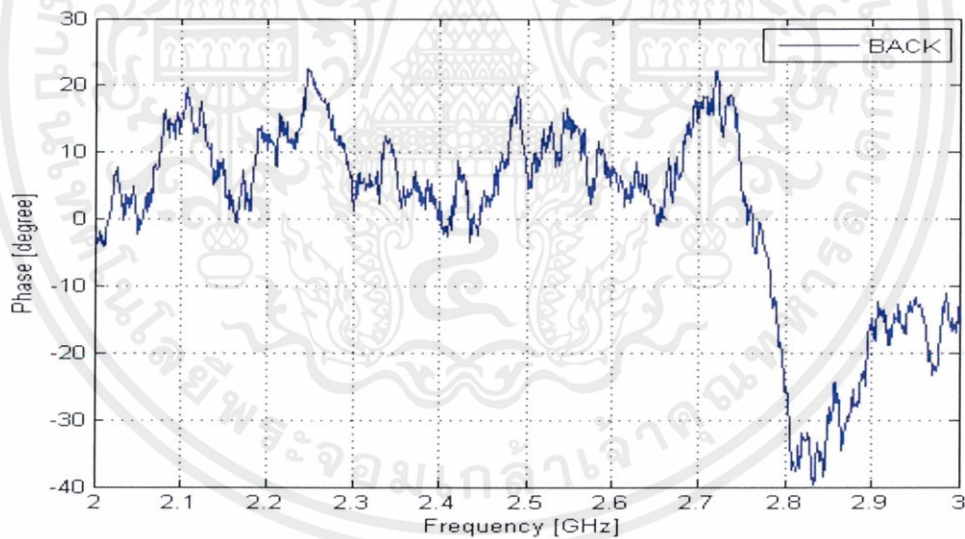
จากรูปที่ 4.23 พบว่าค่า magnitude จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ -66.11 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของสายอากาศที่เป็นเชิงเส้น

เนื่องจากรับสัญญาณได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหลัง

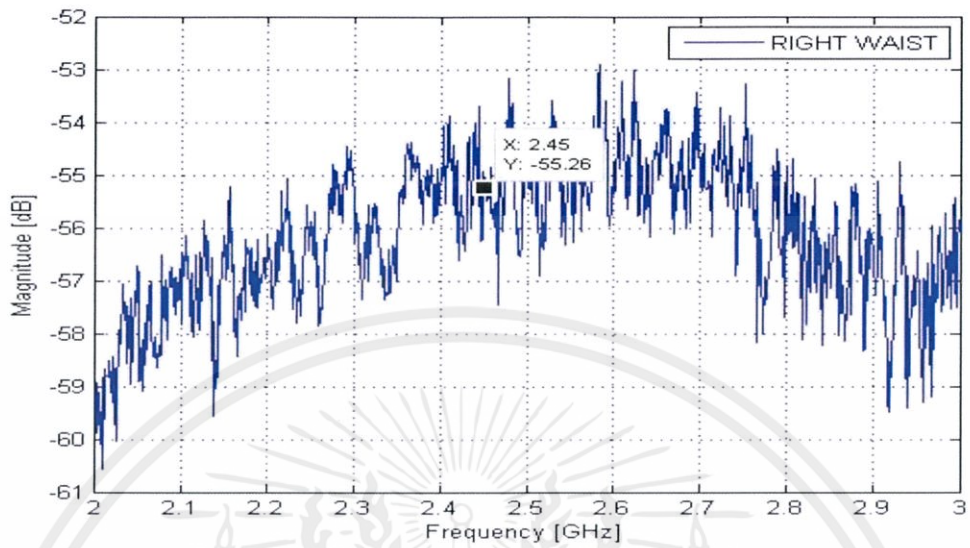


(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหลัง

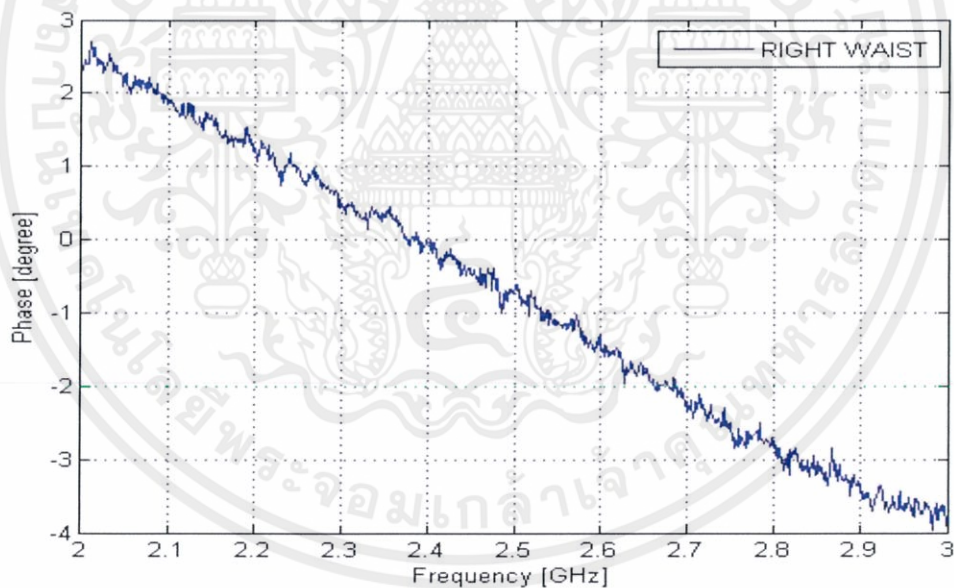
รูปที่ 4.24 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งหลัง

จากรูปที่ 4.24 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ  $-79.29$  dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า  $-10$  dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของสายอากาศที่ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากมีสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ ห้ามมิให้เผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งข้อมือขวา



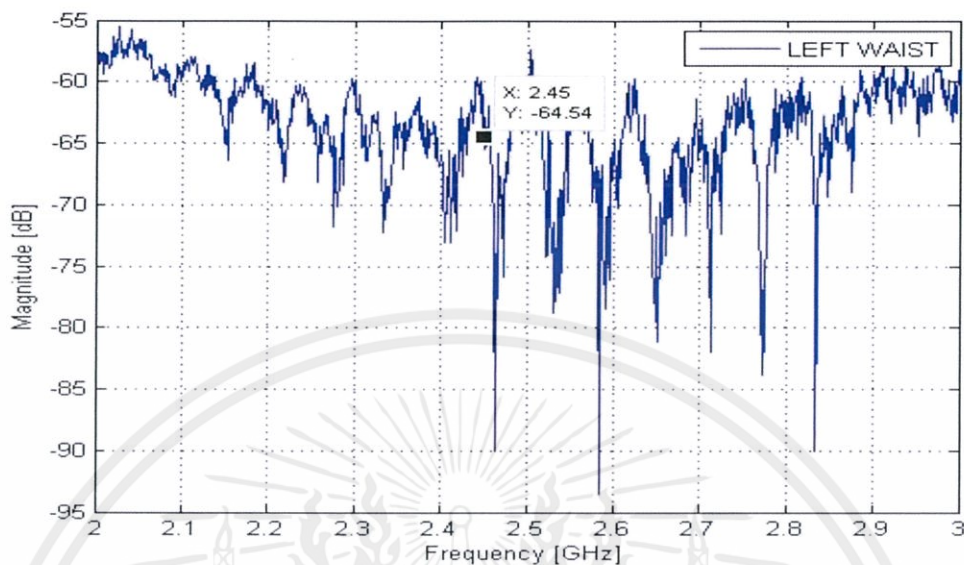
(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งข้อมือขวา

รูปที่ 4.25 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งข้อมือขวา

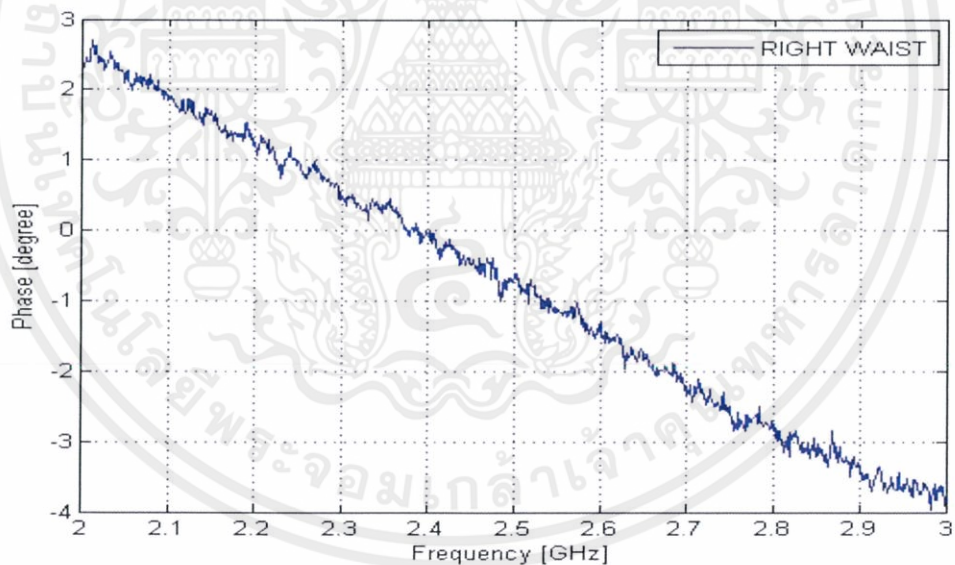
จากรูปที่ 4.25 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ -55.26

dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของสายอากาศที่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากรับสัญญาณได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้งาน หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งข้อมือซ้าย

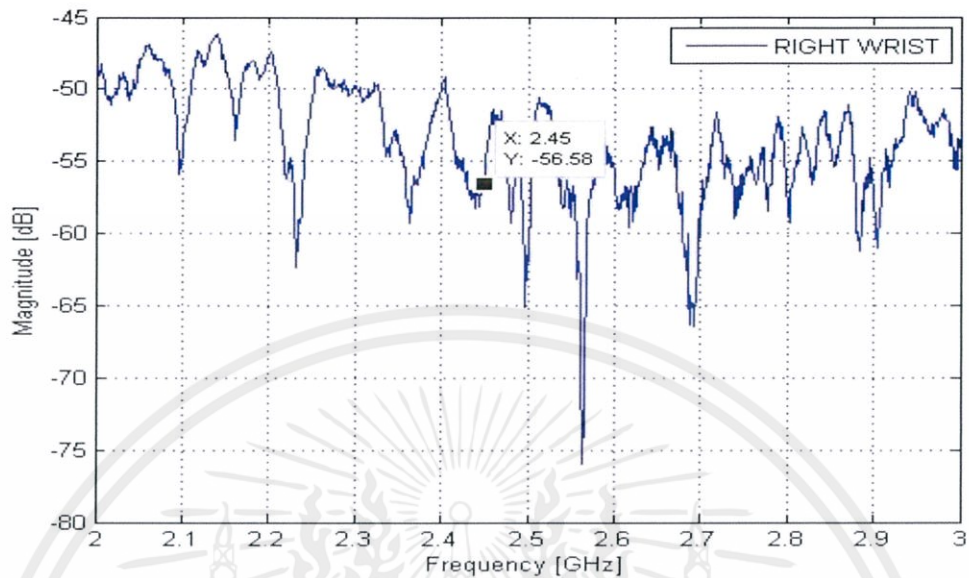


(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งข้อมือซ้าย

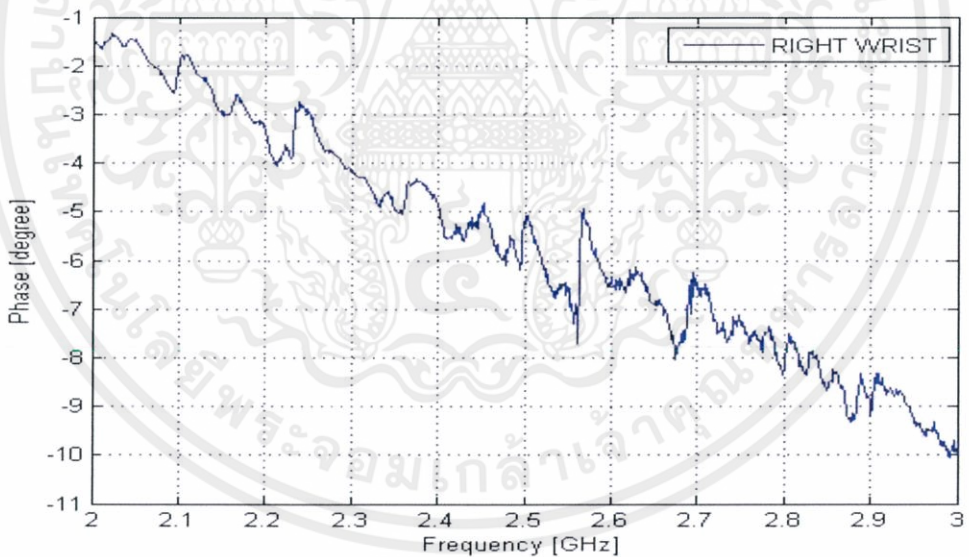
รูปที่ 4.26 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งข้อมือซ้าย

จากรูปที่ 4.26 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ -64.54 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของสายอากาศที่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากรับสัญญาณได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งเอวขวา

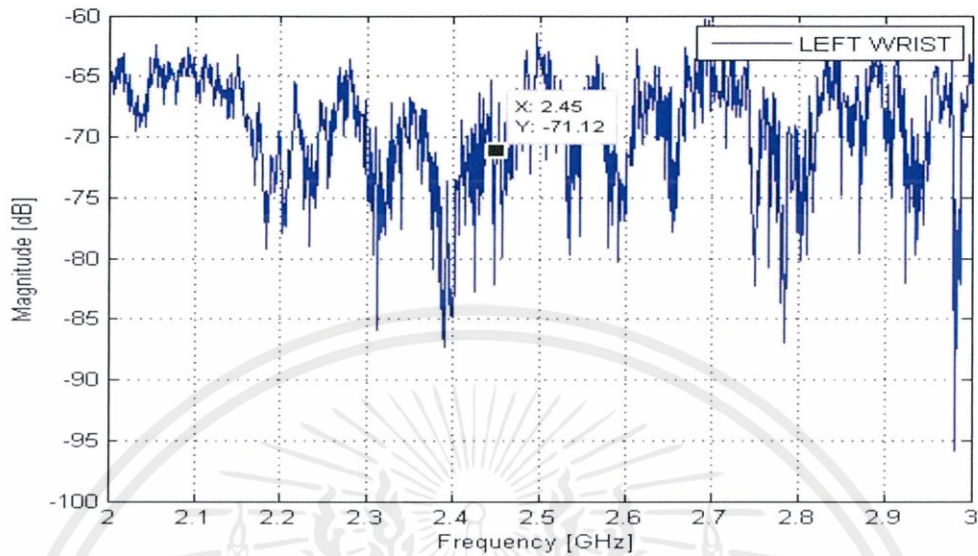


(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งเอวขวา

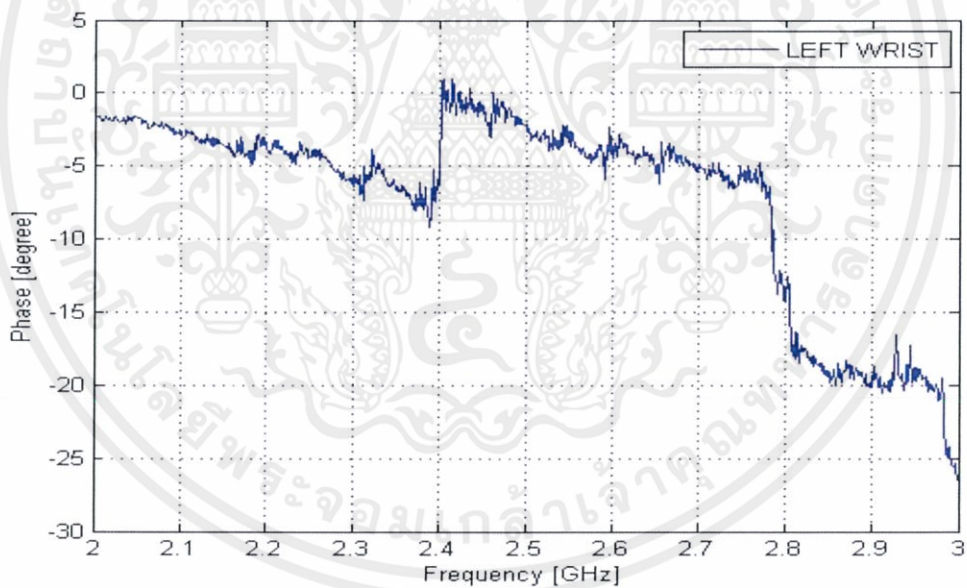
รูปที่ 4.27 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งเอวขวา

จากรูปที่ 4.27 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ -56.58 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของสายอากาศเป็นเชิงเส้นแต่มีสัญญาณรบกวนเล็กน้อย

ไม่ว่ากรณีใดๆ พึงสัน อภิศร ก็มีเหตุผลเบื้องหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



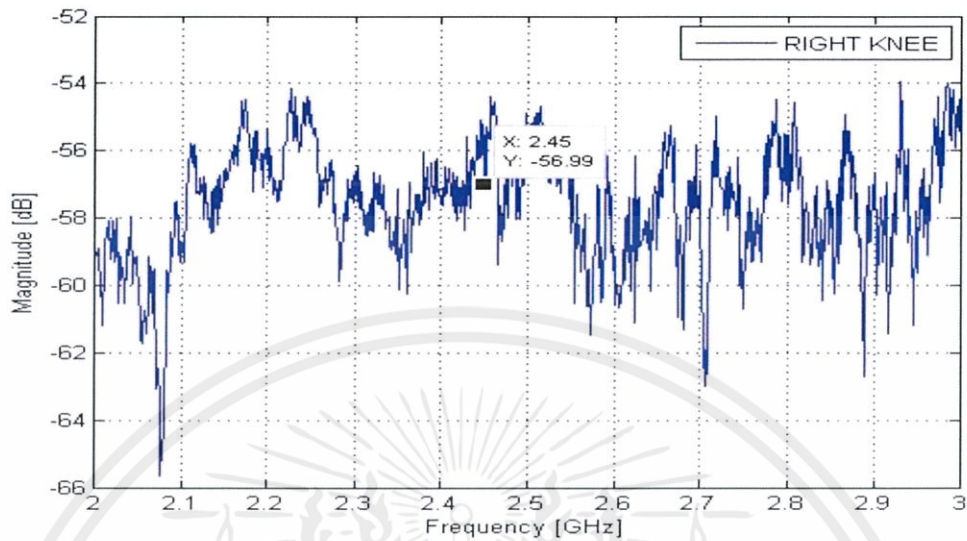
(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งเอวซ้าย



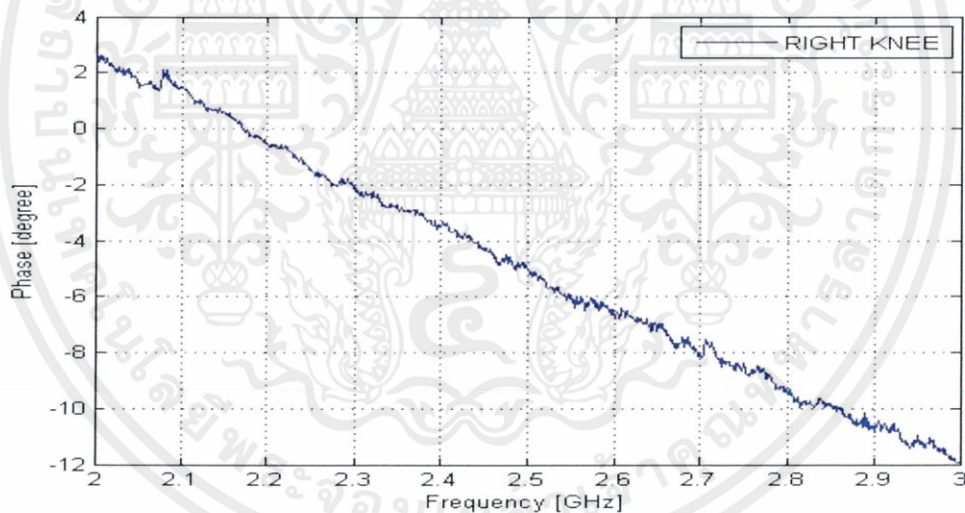
(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งเอวซ้าย

รูปที่ 4.28 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งเอวซ้าย

จากรูปที่ 4.28 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ -71.12 เดกสารถัดไปซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของรอกซ์ไม่ว่ากรณีใดก็ตามสายอากาศที่เป็นเชิงเส้นแต่มีสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 2.4 – 2.8 GHz



(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหัวเข้าขวา

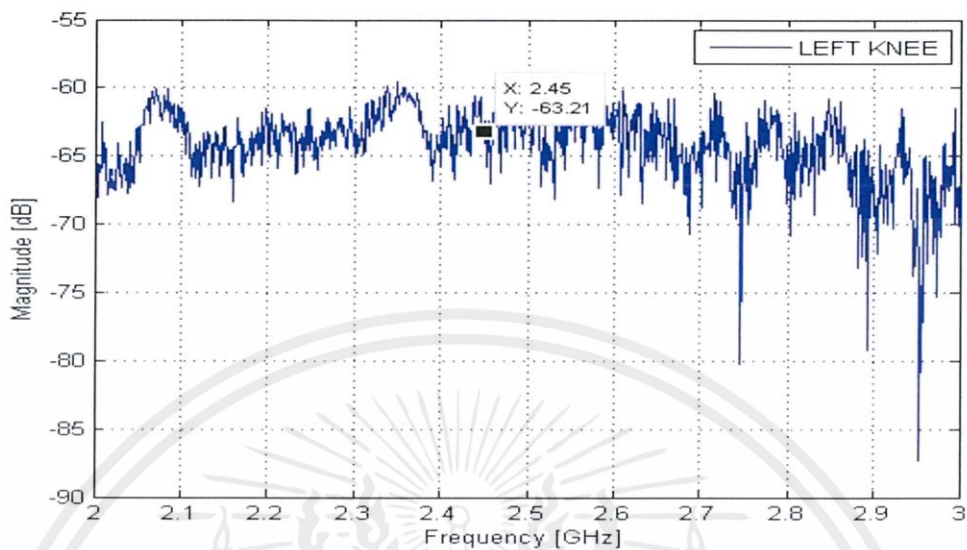


(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหัวเข้าขวา

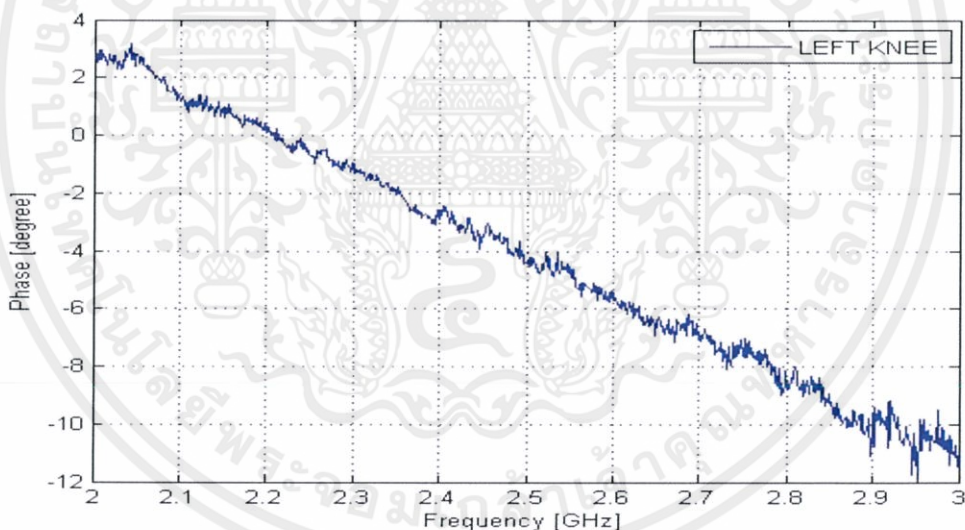
รูปที่ 4.29 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งหัวเข้าขวา

จากรูปที่ 4.29 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ -56.99 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของสายอากาศเป็นเชิงเส้น เนื่องจากปรับสัญญาณได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



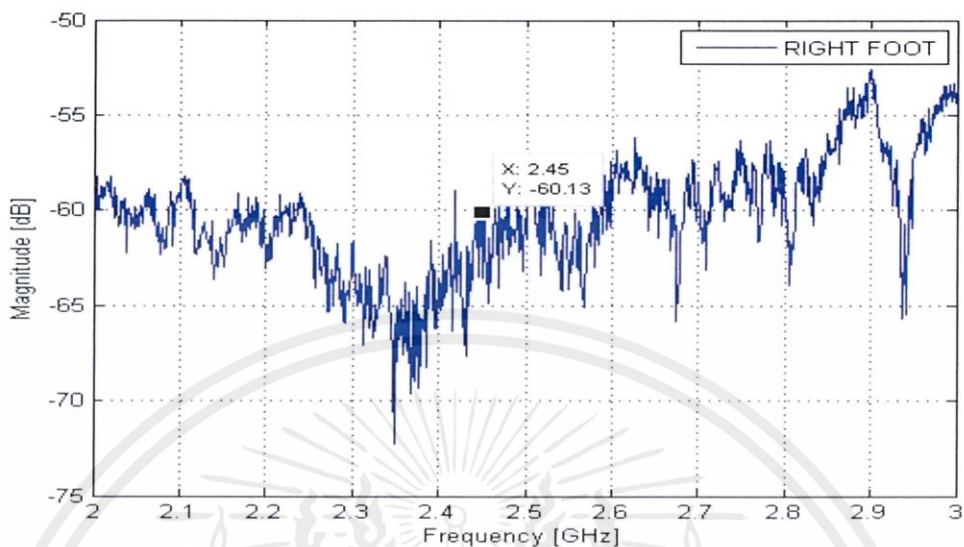
(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหัวเข้าซ้าย



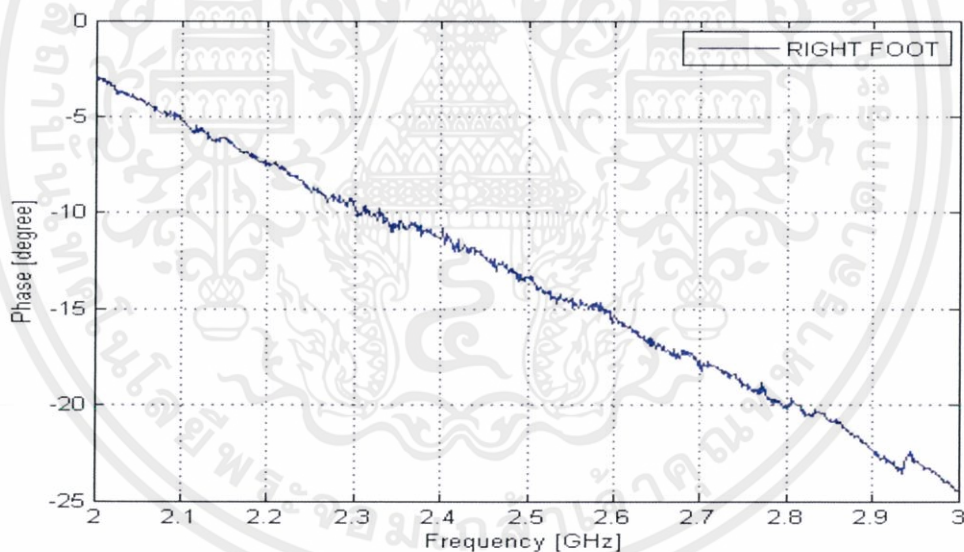
(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหัวเข้าซ้าย

รูปที่ 4.30 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งหัวเข้าซ้าย

จากรูปที่ 4.30 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ -63.21 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของสายอากาศเป็นเชิงเส้น เนื่องจากปรับสัญญาณได้ดีเท่านั้น ไม่นอนญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



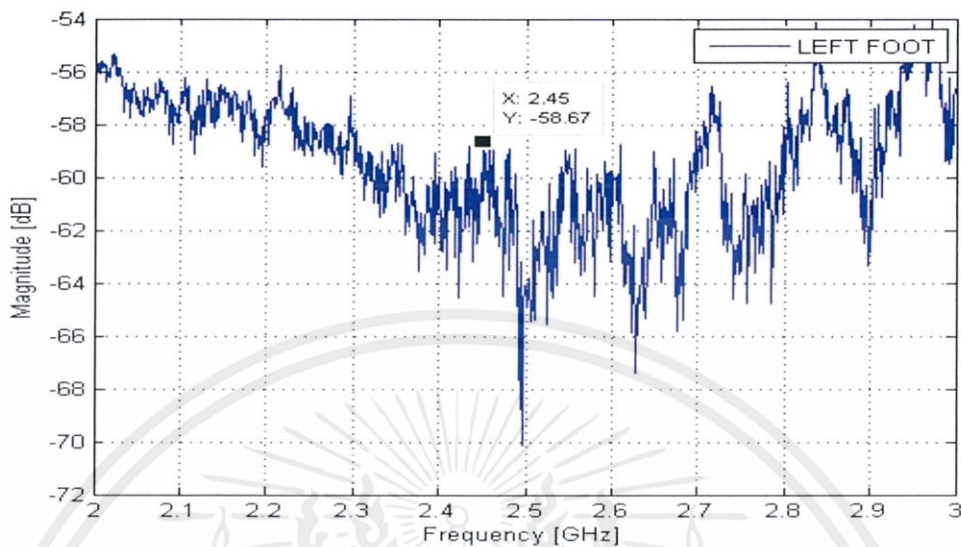
(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งเท้าขวา



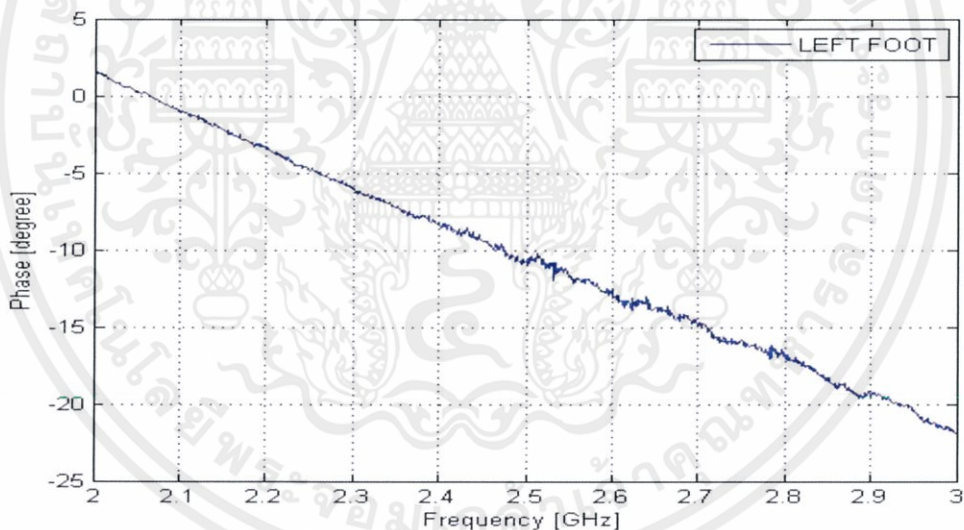
(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งเท้าขวา

รูปที่ 4.32 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งเท้าขวา

จากรูปที่ 4.32 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ -60.13 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของสายอากาศเป็นเชิงเส้น เนื่องจากปรับสัญญาณได้ดี  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งเท้าซ้าย



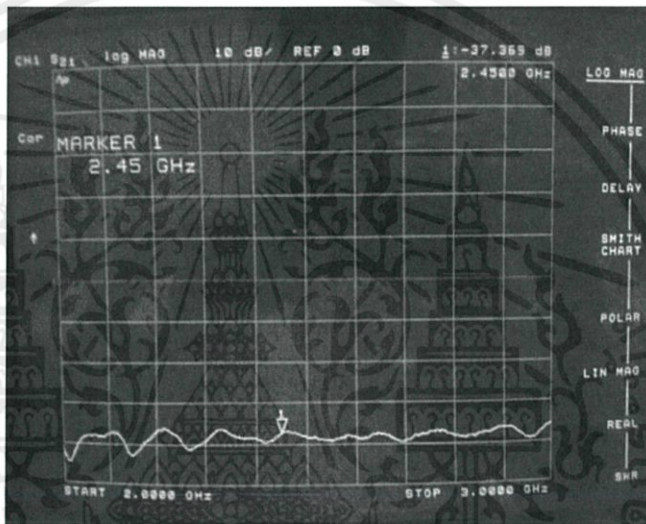
(ข) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งเท้าซ้าย

รูปที่ 4.31 ผลการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ตำแหน่งเท้าซ้าย

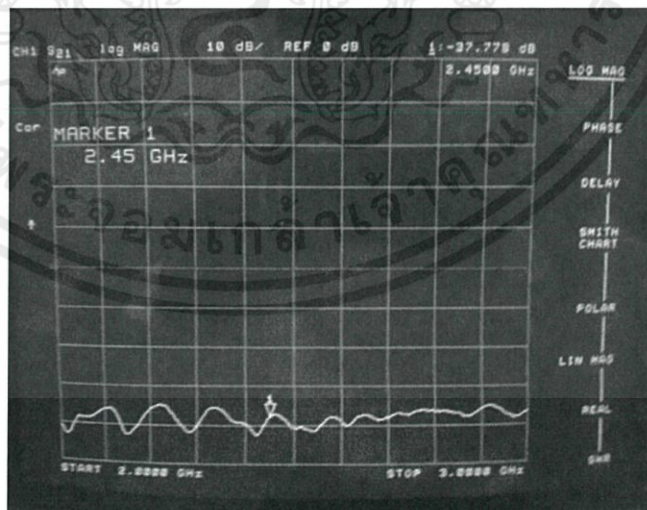
จากรูปที่ 4.31 พบว่าค่า magnitude ที่ความถี่ 2.45 GHz จากรูป (ก) มีค่าเท่ากับ -58.67 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้และจากรูป (ข) แสดงถึงผลตอบสนองทางเฟสของเอกสารนี้เป็นสายอากาศเป็นเชิงเส้น เนื่องจากรับสัญญาณได้ดีศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 อัตราขยายของสายอากาศ

ในการทดสอบหาอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศไมโครสตริปคู่เหมือน เราจะทำการทดสอบ โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับเท่ากับ 50 เซนติเมตรและสูงขึ้นมาจากพื้น 120 เซนติเมตร โดยจะทำการทดลองสภาพแวดล้อม 2 ครั้งเพื่อทำการสลับหน้าที่ระหว่างสายอากาศส่งและรับ ซึ่งจะทดลองเพื่อทดสอบค่าพารามิเตอร์  $S_{21}$  ของสายอากาศ และจากการทดลองสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์  $S_{21}$  ได้ดังรูปที่ 4.32 และ 4.33



(ก) เมื่อ A เป็นสายอากาศส่ง B เป็นสายอากาศรับ



(ข) เมื่อ A เป็นสายอากาศรับ B เป็นสายอากาศส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.32 ผลการวัดขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ห้องป้อนกันการสะท้อนของคลื่น  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.32 สามารถวัดค่าพารามิเตอร์  $S_{21}$  เมื่อ A เป็นสายอากาศส่งและ B เป็นสายอากาศรับได้เท่ากับ  $-37.369$  dB เมื่อ A เป็นสายอากาศรับและ B เป็นสายอากาศส่งได้เท่ากับ  $-37.778$  dB ซึ่งเป็นอัตราขยายรวมของสายอากาศแบบเดียวกัน 2 ตัว ดังนั้นสามารถหาอัตราขยายของสายอากาศแต่ละตัวได้ดังนี้

กรณี A เป็นสายอากาศส่ง และ B เป็นสายอากาศรับ

$$\text{โดยใช้สมการที่ 3.10 } G_t + G_r = 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log \left( \frac{P_r}{P_t} \right) = -37.369$$

จะได้  $G_t, G_r$  เท่ากับ  $-18.68$  dB

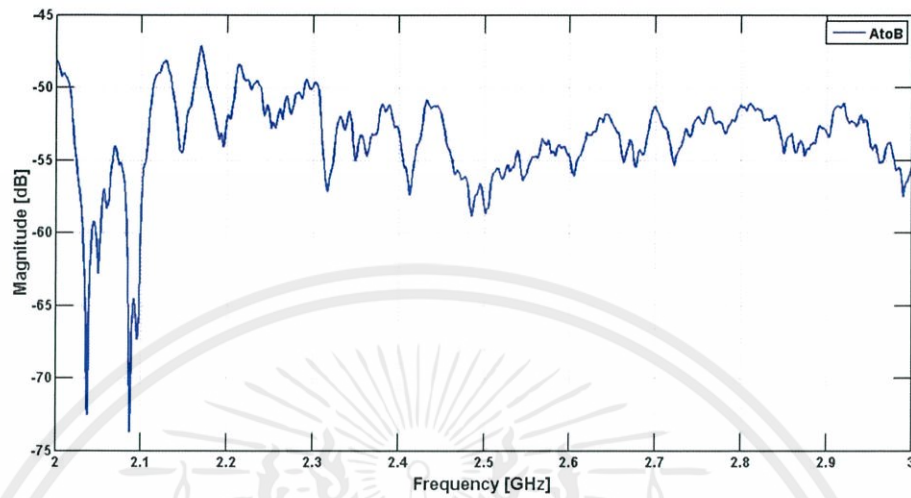
กรณี A เป็นสายอากาศรับ และ B เป็นสายอากาศส่ง

$$\text{โดยใช้สมการที่ 3.10 } G_t + G_r = 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log \left( \frac{P_r}{P_t} \right) = -37.778$$

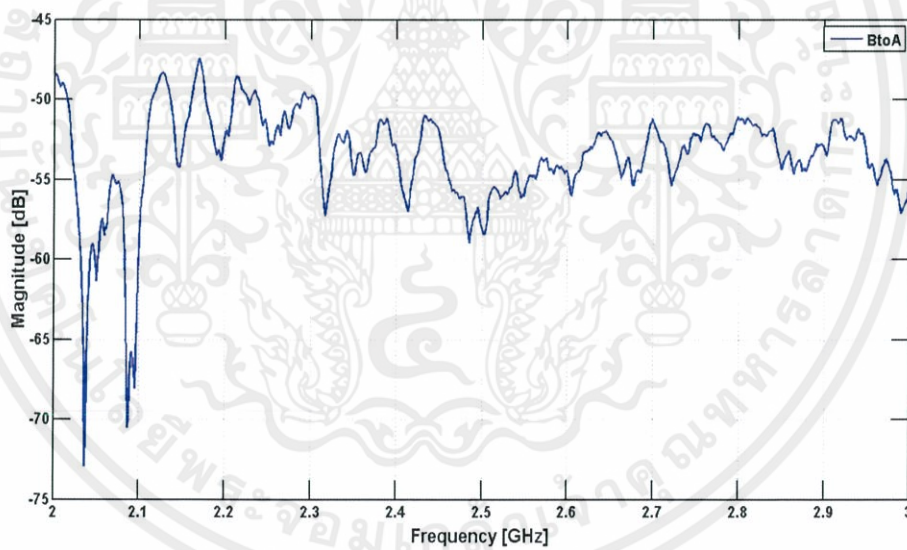
จะได้  $G_t, G_r$  เท่ากับ  $-18.89$  dB

ดังนั้นเมื่อเฉลี่ยแล้วสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศแต่ละตัวมีอัตราขยายเท่ากับ  $-18.79$  dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เมื่อ A เป็นสายอากาศส่ง B เป็นสายอากาศรับ



(ข) เมื่อ A เป็นสายอากาศรับ B เป็นสายอากาศส่ง

รูปที่ 4.33 ผลการวัดขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่ห้อง 305 ตึก 12 ชั้น

จากรูปที่ 4.33 สามารถวัดค่าพารามิเตอร์  $S_{21}$  เมื่อ A เป็นสายอากาศส่งและ B เป็นสายอากาศรับได้เท่ากับ  $-55.72$  dB เมื่อ A เป็นสายอากาศรับและ B เป็นสายอากาศส่งได้เท่ากับ  $-55.38$  dB ดังนั้นสามารถหาอัตราขยายของสายอากาศแต่ละตัวได้ดังนี้

กรณี A เป็นสายอากาศส่ง และ B เป็นสายอากาศรับ

$$\text{โดยใช้สมการที่ 3.10 } G_t + G_r = 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log\left(\frac{P_r}{P_t}\right) = -55.72$$

จะได้  $G_t, G_r$  เท่ากับ  $-27.86$  dB

กรณี A เป็นสายอากาศรับ และ B เป็นสายอากาศส่ง

$$\text{โดยใช้สมการที่ 3.10 } G_t + G_r = 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log\left(\frac{P_r}{P_t}\right) = -55.38$$

จะได้  $G_t, G_r$  เท่ากับ  $-27.69$  dB

ดังนั้นเมื่อเฉลี่ยแล้วสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศแต่ละตัวมีอัตราขยายเท่ากับ  $-27.78$  dB

สรุปได้ว่าสายอากาศแต่ละตัวเมื่อไม่มีสัญญาณรบกวนจาก WiFi หรือทดลองที่ห้องป้องกันการสะท้อนของคลื่นจะสามารถมีอัตราขยายได้เท่ากับ  $-18.79$  dB แต่เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอก เช่น สัญญาณ WiFi จากเครื่อง access point หรือการทดลองที่ห้อง 305 ตึก 12 สายอากาศแต่ละตัวจะมีอัตราขยายลดเหลือเท่ากับ  $-27.69$  dB

ดังนั้นสัญญาณ WiFi จึงมีผลกระทบต่อสายอากาศเมื่อทำการทดลองที่ไม่อยู่ในห้องป้องกันการสะท้อนของคลื่น ซึ่งทำให้อัตราขยายของสายอากาศลดลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษา ออกแบบ และสร้างสายอากาศแถบกว้างสำหรับโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์แบบไร้สาย โดยใช้สายอากาศไมโครสตริปแบบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำงานได้ในย่านความถี่ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz) และมีรูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกลแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional) ในระนาบสายอากาศ สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศนั้นใช้วิธีการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST เพื่อช่วยในการสร้างสายอากาศให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศได้ผลตามที่ต้องการมากขึ้น โดยใช้วัสดุที่ใช้เป็นแผ่น FR4 มีความหนา 1.6 มิลลิเมตรเป็นวัสดุฐานรอง และใช้ระนาบทองแดงที่ติดกับแผ่น FR4 เป็นส่วนของการแผ่กระจายคลื่น และระนาบกราวด์ ซึ่งได้ออกแบบไว้ด้วยกัน 3 แบบ ในการวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศด้วยเครื่อง Vector network analyzer โดยเลือกช่วงความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 2 GHz และความถี่สุดท้าย 3 GHz เมื่อพิจารณาค่าสูญเสียย้อนกลับ, ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์พบว่าสายอากาศในแบบที่ 1 และแบบที่ 3 ไม่สามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากมีค่าคุณลักษณะของสายอากาศไม่ตรงตามที่กำหนดไว้ ส่วนในแบบที่ 2 ซึ่งเป็นแบบที่มีคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศดีที่สุดจึงเลือกนำไปใช้งานในการทดสอบโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์แบบไร้สายต่อไป

ในการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปสำหรับโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์แบบไร้สาย โดยการใช้สายอากาศไมโครสตริปที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 ตัว ทั้งตัวส่ง และตัวรับสัญญาณ โดยทำการติดตั้งตัวสายอากาศส่งให้คงที่ ไว้บริเวณกึ่งกลางของลำตัวของผู้ทำการทดสอบซึ่งสูงจากพื้น 90 เซนติเมตร และย้ายสายอากาศตัวรับบริเวณไปต่างๆ ทั่วร่างกายทั้งหมด 13 จุด คือ ศีรษะด้านหน้า, หัวไหล่ขวา, หัวไหล่ซ้าย, หน้าอก, หลัง, ข้อมือขวา, ข้อมือซ้าย, เอวขวา, เอวซ้าย, หัวเข่าขวา, หัวเข่าซ้าย, ข้อเท้าขวา และข้อเท้าซ้าย และทำการวัดค่าการส่งผ่าน  $S_{21}$  พบว่าจุดที่มีการรับส่งที่ดีที่สุดคือ ตำแหน่งไหล่ขวาเพราะรับมีสัญญาณได้แรงที่สุด และจุดที่รับสัญญาณได้อ่อนที่สุดคือตำแหน่งหลัง

การเปลี่ยนแปลงของขนาดและเฟสของการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอน  $S_{21}$  ที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดของร่างกายเกิดจากรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ เนื่องจากตำแหน่งที่ติดตั้งตัวรับบริเวณไหล่ซ้ายอยู่ในตำแหน่งที่มีการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศตัวส่งที่น้อย ระยะห่างระหว่างแต่ละตำแหน่งตัวส่งและตัวรับบนร่างกายโดยในตำแหน่งที่มีระยะห่างจากน้อยจะรับสัญญาณได้ดีกว่าตำแหน่งที่มีระยะห่างมากเนื่องจากการสูญเสียในอากาศมีน้อยกว่า รวมทั้งร่างกายมนุษย์สังเกตได้จากตำแหน่งหน้าอก และตำแหน่งหลัง โดยตำแหน่งหน้าอกสามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าเนื่องมาจากตำแหน่งหลังถูกร่างกายมนุษย์บัง และการรบกวนจากสัญญาณ Wireless ที่มาจากบริเวณโดยรอบที่ทำการทดสอบซึ่งส่งผลให้เกิดการคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมาพบว่า รูปร่างที่แตกต่างกันในส่วนของความกว้าง และความยาวของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะเป็นส่วนสำคัญที่จะกำหนดความถี่ และความยาวของสายส่งไมโครสตริป ซึ่งเป็นส่วนในการป้อนสัญญาณจะมีส่วนสำคัญในการเกิดแม่ตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี และพารามิเตอร์ของสายอากาศจะเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญในลำดับถัดมาที่ใช้ในการปรับแต่ง เพื่อให้เกิดการแม่ตซ์อิมพีแดนซ์และความถี่รวมทั้งแบนด์วิดท์ตามที่ต้องการ ซึ่งจากการวิเคราะห์สายอากาศที่ได้ออกแบบมาทำให้ทราบว่าแบบที่มีส่วนการแผ่กระจายคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยม และมีระนาบกราวด์อยู่ด้านหน้าเกิดแบนด์วิดท์ได้กว้างกว่า แบบที่มีส่วนการแผ่กระจายคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยม และมีระนาบกราวด์อยู่ด้านหลังซึ่งเกิดแบนด์วิดท์แคบมากจนไม่สามารถครอบคลุมย่านความถี่ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g (2.4-2.4835 GHz) ได้

ดังนั้นในออกแบบสายอากาศในอนาคตต่อไป จึงควรที่จะออกแบบรูปร่างของสายอากาศให้มีความซับซ้อนไม่มากนัก โดยต้องมีพารามิเตอร์ของสายอากาศเพียงพอที่จะทำให้สามารถปรับแต่งให้ได้คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศตามที่ต้องการ และในบางรูปแบบอาจมีการเสริมหรือเพิ่มขึ้นส่วนตัวนำหรือช่องเปิดเข้าไปในสายอากาศเพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ดียิ่งขึ้นไปอีกทั้งนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการออกแบบใช้งาน และในการออกแบบสายอากาศ วัสดุฐานรอง FR4 ที่ใช้นั้นไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานในความถี่ที่สูง เพราะจะสามารถเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นได้ง่าย ถ้าต้องการสร้างสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง จึงควรใช้วัสดุฐานรองเป็นเทฟลอน (Teflon) ในการสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Balanis, Constantine A. Antenna theory. 3<sup>rd</sup> ed. Hoboken, NY. : John Wiley, 2005.
- [2] Elliott, Robert S. Antenna theory and design. Hoboken, NY. : John Wiley, 2003.
- [3] Bahl, I.J. Microstrip antennas, Dedham, MA. :Artech House, 1982.
- [4] Croq, F. , and Pozar, D. (1992). Multifrequency Operation of Microstrip Antennas Using Aperture Coupled Parallel Resonators. IEEE Transactions on Antennas and Propagation AP-40(11): 1367-1374.
- [5] Dahele, J. S. , Lee, K. F. , and Wong, D. P. (1987). Dual Frequency Stacked Annular-Ring Microstrip Antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. AP-35(11): 1281-1285.
- [6 ]Yang, K. , and Wong, K. (2001). Dual-Band Circularly-Polarized Square Microstrip Antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 49(3): 377-381.
- [7] รังสรรค์ วงศ์สรรค์และชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์(ม.ป.ป.). คู่มือการทดลองพื้นฐานของสายอากาศ. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้