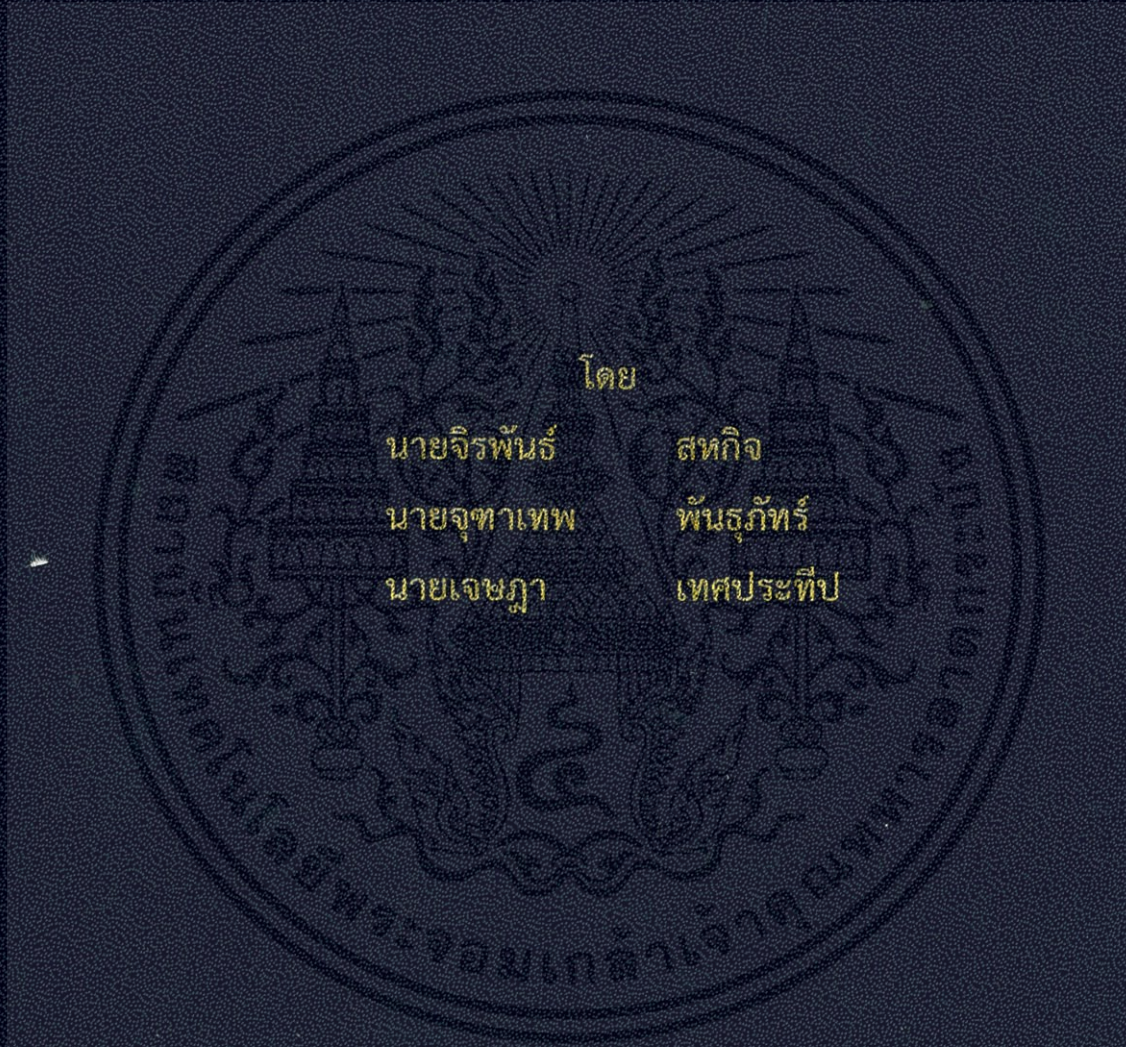


การจำลองและการวัดของช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์  
ด้วยกรณีมองเห็นในระดับสายตาและกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา  
MEASUREMENT AND MODELING OF WIRELESS BODY AREA NETWORK  
CHANNEL WITH LOS AND NLOS



โดย

นายจิรพันธ์	สทกิจ
นายจุฑาทาเทพ	พันธุภักดิ์
นายเจษฎา	เทศประทีป

ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555

การจำลองและการวัดของช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์  
ด้วยกรณีมองเห็นในระดับสายตาและกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา  
MEASUREMENT AND MODELING OF WIRELESS BODY AREA NETWORK  
CHANNEL WITH LOS AND NLOS



โดย  
นายจิรพันธ์ สหกิจ  
นายจุฑาทเทพ พันธุ์ภัทร์  
นายเจษฎา เทศประทีป

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

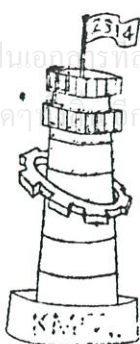
การจำลองและการวัดของช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์  
ด้วยกรณีมองเห็นในระดับสายตาและกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา  
MEASUREMENT AND MODELING OF WIRELESS BODY AREA NETWORK  
CHANNEL WITH LOS AND NLOS

โดย  
นายจิรพันธ์ สหกิจ 52010162  
นายจุฑาทาเทพ พันธุ์ภัทร์ 52010173  
นายเจษฎา เทศประทีป 52010183

อาจารย์ที่ปรึกษา  
ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา (ร่วม)  
ดร.สถาพร พรหมวงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555

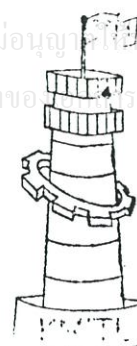


ผ่านการตรวจรับเล่มแล้ว

(.....)  
อาจารย์ที่ปรึกษา

8 / 03 / 2556

วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering



ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(.....)  
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

14 / 03 / 56

วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจำลองและการวัดของช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ด้วยกรณีมองเห็น  
ในระดับสายตาและกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา

MEASUREMENT AND MODELING OF WIRELESS BODY AREA NETWORK  
CHANNEL WITH LOS AND NLOS

ผู้จัดทำ

- |                 |            |          |
|-----------------|------------|----------|
| 1. นายจิรพันธ์  | สทกิจ      | 52010162 |
| 2. นายจุฑาทาเทพ | พันธุภัทร์ | 52010173 |
| 3. นายเจษฎา     | เทศประทีป  | 52010183 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล)



อาจารย์ที่ปรึกษา (ร่วม)

(ดร.สถาพร พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ไม่อาจเสร็จสมบูรณ์ได้ หากปราศจากคำแนะนำและคำปรึกษาที่ดีจาก ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล และดร.สถาพร พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ สำหรับคำปรึกษาที่ดี คำแนะนำแนวความคิด ช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดและอุปสรรคต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน การให้ยืมอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงาน รวมถึงให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีมาโดยตลอด ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโท และปริญญาเอกในห้องโปรเจก สำหรับคำแนะนำที่ดีมาโดยตลอด รวมทั้งคอยตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำงานเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ช่วยกันแบ่งเบางานและช่วยเหลือในด้านต่างๆ มาโดยตลอด รวมทั้งกำลังใจที่ช่วยให้งานสำเร็จลุล่วงไปได้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยให้กำลังใจและการสนับสนุนด้านงบประมาณในการทำงาน รวมถึงความห่วงใย ความเข้าใจ และแรงบันดาลใจที่ช่วยผลักดันให้เราทำงานได้เป็นอย่างดี

นายจिरพันธ์	สหกิจ
นายจุฑาทิเทพ	พันธุภักดิ์
นายเจษฎา	เทศประทีป
	ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองและการวัดของช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สาย  
บนร่างกายมนุษย์ด้วยกรณีมองเห็นในระดับสายตา  
และกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา

MEASUREMENT AND MODELING OF WIRELESS BODY  
AREA NETWORK CHANNEL WITH LOS AND NLOS

โดย นายจิรพันธ์ สหกิจ 52010162  
นายจุฑาทเทพ พันธุ์ภัทร์ 52010173  
นายเจษฎา เทศประทีป 52010183

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล  
ดร.สถาพร พรหมวงศ์

#### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันและอนาคตโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์จะถูกนำมาใช้ทางด้านการสื่อสารระยะสั้น ดังนั้นคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นมีความจำเป็นอย่างยิ่งจะต้องศึกษา ปริมาณนิพจน์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ในกรณีคลื่นที่อยู่ในระดับสายตาและในกรณีคลื่นที่ไม่ได้อยู่ในระดับสายตา สำหรับการวัดและการทดสอบได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์และสายอากาศแถบกว้างที่ได้สร้างขึ้น จากนั้นนำผลที่ได้จากการวัดมาประมวลเพื่อหาค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณบนร่างกายมนุษย์, การสูญเสียเชิงวิถี, ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน และอัตราการขยายในการส่งผ่านบนร่างกายมนุษย์ จากการศึกษาทดลองในโครงงานนี้จะทำให้รู้ว่าคุณลักษณะช่องสัญญาณโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์มีลักษณะอย่างไร และเทคนิคที่ได้นำเสนอจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการประเมินช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

#### ABSTRACT

Presently and in the future, wireless body area network (WBAN) is used for short-range communication. Therefore, the characteristics of propagation channels on the body are necessary to be analyzed. This thesis is to study about WBAN channel based on measurement, which considers the line of sight and non-line of sight cases. This thesis measures the transfer function ( $S_{21}$ ) using vector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

network analyzer (VNA) and wideband antenna is designed. Basic characteristics of the body area propagation channel are extracted from measurement data, which are path loss, power delay profile and transmission gain on the body. These results and technique are very useful for evaluation of WBAN channel.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	XV
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
	1.2 วัตถุประสงค์
	1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์
<b>บทที่ 2</b>	<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>
	2.1 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง
	2.2 สายอากาศไมโครสตริป
	2.3 คุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ
	2.4 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบบรรณาบร่วม
	2.5 ระบบการวัดช่องสัญญาณ
	2.6 การประยุกต์สูตรการส่งผ่านของฟรีส
	2.7 การวิเคราะห์ระบบแถบกว้างยิ่ง โดยใช้สูตรของฟรีส
	2.8 ทฤษฎีการสูญเสียเชิงวิถี
	2.9 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน
<b>บทที่ 3</b>	<b>การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์</b>
	3.1 การออกแบบ
	3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
	3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการทดลอง</b>
4.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศแบบ ไมโครสตริป 51
4.2	ผลจากการวัดช่องสัญญาณบนร่างกายกรณีมองเห็นในระดับสายตา กรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้า ร่างกาย และกรณีที่สายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง 59
4.3	ผลจากการวัดช่องสัญญาณบนร่างกายกรณีมองเห็นในระดับสายตา และกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ ด้านหลังร่างกาย 97
4.4	การวิเคราะห์คุณลักษณะช่องสัญญาณเนื่องจากผลกระทบทางร่างกาย ที่ตำแหน่งต่างๆ 120
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>
5.1	สรุปผล 129
5.2	ข้อเสนอแนะ 131
<b>บรรณานุกรม</b>	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สัญญาณเกาส์เซียน	5
2.2 ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง	9
2.3 เปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างระบบแถบกว้างยิ่งกับระบบแถบแคบ	10
2.4 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป	11
2.5 สายอากาศไมโครสตริปรูปแบบต่างๆ	12
2.6 ระบบโคออดิเนทของสายอากาศ	14
2.7 โครงสร้างสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวนด์ด้านล่าง	18
2.8 ระบบการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่โดยเครื่อง VNA และการแปลงสู่โดเมนเวลาโดยใช้ IFFT	22
2.9 ตัวอย่างภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน	26
3.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน	27
3.2 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบสายอากาศ	28
3.3 โครงสร้างสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวนด์ด้านล่าง	30
3.4 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ	31
3.5 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	31
3.6 ผลการจำลองค่า VSWR	32
3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 3.1 GHz, 6.85 GHz และ 10.6 GHz	33
3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.1 GHz, 6.85 GHz และ 10.6 GHz	34
3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเทียบกับสายอากาศ	35
3.10 แบบจำลองการวัดผล	36
3.11 กำหนดจุดสำหรับการวัดผลบนร่างกายมนุษย์กรณีที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับสายตา	37
3.12 การวัดผลบนร่างกายมนุษย์กรณีที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับสายตา	37
3.13 กำหนดจุดสำหรับการวัดผลบนร่างกายมนุษย์กรณีที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับสายตา	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 การวัดผลบนร่างกายมนุษย์กรณีที่สายอากาศมองไม่เห็นกันในระดับ สายตา	39
3.15 แบบจำลองจริงสำหรับการวัดผลบนร่างกายมนุษย์กรณีที่สายอากาศอยู่ใน พื้นที่ว่าง	40
3.16 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์	42
3.17 ชุด CALIBRATE	43
3.18 สายนำสัญญาณ	43
3.19 คอมพิวเตอร์	44
3.20 สายอากาศแบบไมโครสตริป	44
3.21 สายอากาศแบบกรวยคู่	45
3.22 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศกรวยคู่	45
3.23 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศกรวยคู่	46
3.24 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ไมโครสตริป	47
3.25 ระยะเวลาที่ยาวที่สุดของตัวสายอากาศไมโครสตริป	48
4.1 ผลการทดสอบ $S_{11}$ ของสายอากาศแบบไมโครสตริป	51
4.2 ผลการทดสอบ VSWR ของสายอากาศแบบไมโครสตริป	52
4.3 ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบไมโครสตริป	53
4.4 ผลการทดสอบค่าเฟสของสายอากาศแบบไมโครสตริป	53
4.5 ผลระหว่างการจำลองและการทดสอบค่า $S_{11}$ ของสายอากาศแบบ ไมโครสตริป	54
4.6 ผลระหว่างการจำลองและการทดสอบค่า VSWR ของสายอากาศแบบ ไมโครสตริป	55
4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 3.1 GHz, 6.85 GHz, 8 GHz และ 10.6 GHz	56
4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.1 GHz, 6.85 GHz, 8 GHz และ 10.6 GHz	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 6.85 GHz, 8 GHz และ 10.6 GHz กษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9	ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	60
4.10	เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	61
4.11	การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	61
4.12	ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งศีรษะและตำแหน่งหัวใจ กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	62
4.13	ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นแขน กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	63
4.14	ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งเอว กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	64
4.15	ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นขา กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	65
4.16	ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งข้อเท้า กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	66
4.17	ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	67
4.18	ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	68
4.19	เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	69
4.20	การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	70
4.21	ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งศีรษะและตำแหน่งหัวใจ กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นแขน กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	72
4.23 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งเอว กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	73
4.24 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นขา กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	74
4.25 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งข้อเท้า กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	75
4.26 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	76
4.27 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง	77
4.28 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง	78
4.29 การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง	78
4.30 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งศีรษะและตำแหน่งหัวใจ กรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง	79
4.31 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขน กรณีสายอากาศอยู่ ในพื้นที่ว่าง	80
4.32 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอว กรณีสายอากาศอยู่ใน พื้นที่ว่าง	81
4.33 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นขา กรณีสายอากาศอยู่ ในพื้นที่ว่าง	82
4.34 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งข้อเท้า กรณีสายอากาศอยู่ ในพื้นที่ว่าง	83
4.35 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง	84
4.36 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งศีรษะ กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	85
4.37 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งหัวใจ กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นแขนด้านขวา กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	86
4.39 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นแขนด้านซ้าย กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	87
4.40 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งเอวด้านขวา กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	87
4.41 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งเอวด้านซ้าย กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	88
4.42 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นขาขวา กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	88
4.43 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นขาซ้าย กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	89
4.44 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งข้อเท้าขวา กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	89
4.45 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งข้อเท้าซ้าย กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	90
4.46 ผลการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีในกรณีต่างๆที่ตำแหน่งต่างๆ บนร่างกายกรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	90
4.47 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งศีรษะ	91
4.48 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งหัวใจ	92
4.49 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งต้นแขนด้านขวา	92
4.50 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งเอวด้านขวา	93
4.51 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งต้นขาด้านขวา	93
4.52 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งข้อเท้าด้านขวา	94
4.53 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งศีรษะ	94
4.54 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหัวใจ	95
4.55 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งต้นแขนด้านขวา	95
4.56 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งเอวด้านขวา	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.57 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งต้นขาด้านขวา	96
4.58 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งข้อเท้าด้านขวา	97
4.59 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	98
4.60 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	99
4.61 การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	99
4.62 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งศีรษะและ ตำแหน่งหัวใจ กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ ด้านหลังร่างกาย	100
4.63 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นแขน กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	101
4.64 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งเอว กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	102
4.65 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นขา กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	103
4.66 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งข้อเท้า กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	104
4.67 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	105
4.68 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับ สายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	106
4.69 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดย สายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	107
4.70 การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่ง อยู่ด้านหลังร่างกาย	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.71	ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งศีรษะและตำแหน่งหัวใจกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	108
4.72	ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นแขนกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	109
4.73	ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งเอวกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	110
4.74	ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นขากรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	111
4.75	ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งข้อเท้ากรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	112
4.76	ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	113
4.77	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งศีรษะกรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	114
4.78	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งหัวใจกรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	115
4.79	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นแขนด้านขวากรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	115
4.80	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นแขนด้านซ้ายกรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	116
4.81	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งเอวด้านขวากรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	116
4.82	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งเอวด้านซ้ายกรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	117
4.83	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นขาขวากรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	177
4.84	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นขาซ้ายกรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.85 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งข้อเท้าขวา กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	118
4.86 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งข้อเท้าซ้าย กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	119
4.87 ผลการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีในกรณีต่างๆที่ตำแหน่งต่างๆบน ร่างกาย กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	119
4.88 เปรียบเทียบขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกัน กรณีมองเห็นกันในระดับสายตา	120
4.89 เปรียบเทียบขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกัน กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา	121
4.90 เปรียบเทียบเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกัน กรณีมองเห็นกันในระดับสายตา	122
4.91 เปรียบเทียบเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกัน กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา	122
4.92 การสูญเสียเชิงวิถีที่สายอากาศอยู่ตรงกันกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา	123
4.93 การสูญเสียเชิงวิถีที่สายอากาศอยู่ตรงกันกรณีมองไม่เห็นกันในระดับ สายตา	123
4.94 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่สายอากาศอยู่ตรงกันในกรณี มองเห็นกันในระดับสายตา	124
4.95 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่สายอากาศอยู่ตรงกันในกรณี มองไม่เห็นกันในระดับสายตา	124
4.96 เปรียบเทียบขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่ง ศีรษะ	126
4.97 เปรียบเทียบขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่ง หัวใจ	126
4.98 เปรียบเทียบขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้น แขนขวา	127
4.99 เปรียบเทียบขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งเอว ขวา	127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ มิใช่ผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.100	เปรียบเทียบขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้น ขาขวา	128
4.101	เปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีที่สายอากาศอยู่ตรงกัน กรณีมองเห็นกันใน ระดับสายตาและกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา	128



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร	6
3.1 ความสูงของสายอากาศและระยะห่างของสายอากาศด้านรับและด้านส่งตามแบบจำลองกรณีที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับสายตา	38
3.2 ความสูงของสายอากาศและระยะห่างของสายอากาศด้านรับและด้านส่งตามแบบจำลองกรณีที่สายอากาศมองไม่เห็นกันในระดับสายตา	40
3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดช่องสัญญาณ	41
4.1 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา	60
4.2 กำลังงานที่รับได้ในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	67
4.3 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา	68
4.4 กำลังงานที่รับได้ในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย	76
4.5 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง	77
4.6 กำลังงานที่รับได้ในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง	84
4.7 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	98
4.8 กำลังงานที่รับได้ในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	105
4.9 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	106
4.10 กำลังงานที่รับได้ในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย	113
4.11 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกันกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา	121
4.12 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกันกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.13	กำลังงานที่รับได้ในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยที่สายอากาศอยู่ตรงกัน	124
4.14	กำลังงานที่รับได้ในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยที่สายอากาศอยู่ตรงกัน	125



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วมีความก้าวหน้าอย่างไม่หยุดยั้ง ซึ่งมีบทบาททุกส่วนในชีวิตประจำวันดังที่เห็นได้จากการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น การสื่อสารภายในสำนักงาน การสื่อสารที่ประยุกต์ใช้ภายในบ้านพักอาศัย เป็นต้น บทบาทของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายกำลังเปลี่ยนไปเมื่อมีการนำมาประยุกต์ใช้กับการให้บริการทางด้านสุขภาพ และการนำเทคโนโลยีไร้สายเข้ามาใช้นั้นจะต้องคำนึงถึงหลายด้าน เช่น ด้านสุขภาพและความปลอดภัยด้านปัญหาในการรบกวนกันกับเทคโนโลยีอื่นๆ ความแม่นยำหรือความถูกต้องของระบบและราคาของเครื่องมือซึ่งจะต้องไม่แพงมากเกินไป เป็นต้น ดังนั้นปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra wideband technology: UWB) มาใช้ในระบบโครงข่ายพื้นที่ไร้สายบนร่างกายมนุษย์ (Wireless Body Area Network: WBAN)

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กำลังงานส่งต่ำจึงไม่เป็นอันตรายสำหรับการใช้งานกับร่างกายมนุษย์และไม่ไปรบกวนสัญญาณอื่นๆ เนื่องจากมีแบนด์วิดท์กว้างสำหรับทางภาครับจึงสามารถจัดปัญหาที่เกิดจากองค์ประกอบของการเกิดคลื่นหลายวิธีได้ โดยการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั้นนับได้ว่าเป็นวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารไร้สาย โดยมีการใช้แถบความถี่ในการส่งที่กว้างมากประกอบกับใช้กำลังส่งที่น้อย สัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งนี้มีความแตกต่างกับระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน 2 ประการคือ การส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนี้จะทำการส่งสัญญาณในลักษณะที่เป็นพัลส์ โดยไม่มีการนำเอาสัญญาณข้อมูลไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาห่ออีกประการหนึ่งคือสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจะมีสัดส่วนของแบนด์วิดท์ (fractional bandwidth) ในการส่งมากกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของแถบความถี่กลาง หรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz ซึ่งจะพบว่ามีค่ามากกว่าแถบความถี่ของระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเอาเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งนี้มาใช้กับระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) ซึ่งถูกกำหนดให้อยู่ในมาตรฐานของ IEEE 802.15.3a โดยจะเป็นลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ อาทิเช่น กล้องถ่ายรูปดิจิตอล กล้องถ่ายวิดีโอ วิทยุไอพริเจคเตอร์ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ฯลฯ ซึ่งจะเป็นการเชื่อมต่อที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงประมาณ 110 Mb/s ในระยะทาง 10 เมตรและมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นในระยะทางที่สั้นลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ในการนำระบบนี้ไปใช้งานจริงนั้นประสิทธิภาพของระบบอาจลดลงได้เนื่องจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณในการสื่อสาร เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ผงัง หน้าต่าง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งได้เช่นกันนั่นก็คือ

ร่างกายมนุษย์นั่นเอง เพราะมีความเป็นไปได้ที่ร่างกายมนุษย์จะไปรบกวนหรือบดบังเส้นทางการเดินทางของคลื่น ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบว่าร่างกายมนุษย์นั้นส่งผลอย่างไรต่อช่องสัญญาณในการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

เนื่องด้วยเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งนี้ถูกนำมาใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ที่อยู่ในอาคารซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศนั้นอาจจะถูกลดทอนกำลังงาน (power attenuation) โดยปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น ถูกลดทอนโดยผนังหรือกำแพงของอาคาร จากวัสดุอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงหรือแม้กระทั่งเกิดลักษณะของการจางหายแบบหลายวิถี (multipath fading หรือ small-scale fading) อันเนื่องมาจากการที่สิ่งกีดขวางต่างๆ รอบข้างส่งผลให้เกิดการสะท้อนและการหักเหของสัญญาณในหลายทิศทาง เป็นต้น ทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับได้ แต่ยังมีปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น นั่นก็คือ ผลจากร่างกายมนุษย์ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลถึงคุณภาพของช่องสัญญาณด้วยเช่นกัน ดังนั้นในปริญาพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในประเด็นของการถูกบดบังบนร่างกายมนุษย์ด้วยกรณีมองเห็นในระดับสายตาและกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับ ซึ่งสายอากาศที่ใช้ในการวัดช่องสัญญาณได้จัดทำสายอากาศแบบแถบกว้าง

สายอากาศมีส่วนสำคัญในการเป็นตัวกรองรูปร่างของสัญญาณพัลส์และมีผลอย่างมากต่อการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการเพิ่มความซับซ้อนวิธีการตรวจทางด้านเครื่องรับ นอกจากนี้การลดต้นทุนโดยการทำให้รูปร่างที่มีขนาดเล็กและประสิทธิภาพยังคงเหมือนเดิมคือสิ่งที่ต้องการสำหรับการประยุกต์ใช้การสื่อสารไร้สาย เพราะฉะนั้น การรู้ถึงการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นจากสายอากาศเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง

สายอากาศแบบแถบกว้างที่นำมาใช้วัดสัญญาณบนร่างกายสำหรับปริญาพนธ์นี้ได้จัดทำสายอากาศขึ้นมาโดยเลือกสายอากาศแบบไมโครสตริป ซึ่งสายอากาศดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติในการใช้งานในช่วงความถี่กว้าง ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้งานกับเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ และโครงข่ายการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์
- 2) เพื่อออกแบบสายอากาศสำหรับทดสอบการสื่อสารบนร่างกายมนุษย์และการวัดสัญญาณที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณ
- 3) เพื่อประเมินผลการรับส่งสัญญาณของสายอากาศของโครงข่ายสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ในกรณีมองเห็นในระดับสายตา และกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา

## 1.3 ขอบเขตของปริิญญานิพนธ์

ปริิญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในประเด็นของการถูกบดบังบนร่างกายมนุษย์ด้วยกรณีมองเห็นในระดับสายตาและกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตาโดยใช้สายอากาศแบบแถบกว้างที่ออกแบบและสร้างขึ้นในการวัดช่องสัญญาณ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ อันประกอบไปด้วยค่าการสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (Power Delay Profile) ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ (Magnitude) และเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

##### 2.1.1 ประวัติและความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งเริ่มต้นในปี คริสต์ศักราช 1901 โดยมารโกนี (Guglielmo Marconi) ได้ทำการส่งคลื่นวิทยุเพื่อใช้สื่อสารด้วยรหัสมอสโดยใช้เครื่องส่งสปาร์กเก็บส่งข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกต่อมาเทคโนโลยีที่ใช้สัญญาณพัลส์ได้ถูกนำมาใช้การทหารในรูปของอิมพัลส์เรดาร์ (impulse radars) จากนั้นในปี 1960 – 1990 เทคโนโลยีนี้ได้ถูกจำกัดการใช้งานในกองทัพทหารและแผนการปกครองที่เป็นความลับทางราชการ

ในปี 2000 เทคโนโลยีความถี่แถบกว้างยิ่งจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในเชิงพาณิชย์ คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission; FCC) อนุมัติให้ใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในเชิงพาณิชย์ จากนั้นในปี 2002 คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้อนุมัติรายงานและข้อบังคับฉบับที่หนึ่งสำหรับการใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในเชิงพาณิชย์

##### 2.1.2 หลักการพื้นฐานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นการสื่อสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีการส่งสัญญาณด้วยคลื่นแบบแถบความถี่หรือสเปกตรัมที่กว้าง และใช้สัญญาณที่มีรูปคลื่นสัญญาณปรากฏเพียงชั่วขณะแล้วหายไปโดยการส่งสัญญาณแบบพัลส์ (Pulse) ดังกล่าวต่อเนื่องกันในทางเวลาระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับวิทยุหรือเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณในทางเวลาที่แคบมาก ไม่เหมือนการสื่อสารแบบแนโรว์แบนด์ (Narrow band) ซึ่งใช้ในการสื่อสารไร้สาย เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบเครือข่ายเฉพาะที่ไร้สาย (Wireless LAN) จะใช้เทคนิคการผสมสัญญาณของรูปคลื่นสัญญาณวิทยุที่มีความต่อเนื่องทางเวลากับสัญญาณคลื่นพาหะที่มีความถี่ที่กำหนดเพื่อใช้ในการส่งและรับสัญญาณทำให้พลังงานของสัญญาณถูกรวมอยู่ในช่วงแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) แคบๆ ซึ่งสามารถถูกรบกวนได้ง่าย

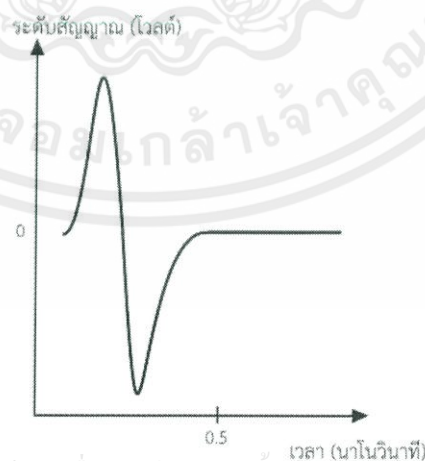
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งยังสามารถแบ่งออกเป็นแบบแถบความถี่ และแบบหลายแถบความถี่รวมทั้งใช้เรียกเทคนิคการใช้คลื่นพาร์ย่อยที่ไม่รบกวนกันจำนวนมากในการผสมสัญญาณที่เรียกว่า Multiband OFDM ซึ่งจะทำให้สามารถส่งข้อมูลพร้อม ๆ กันผ่านทางย่านความถี่ย่อย ๆ ที่อยู่ห่างกันได้โดยข้อดีในการใช้ Multiband OFDM คือมีความยืดหยุ่นสูงในการใช้งานย่านความถี่และลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนรวมไปถึงผลของสัญญาณสะท้อนจากหลายทิศทางหรือที่เราเรียกว่ามัลติ-พาร์ (Multi-path) อีกด้วย ซึ่งเป็นอีกเทคนิคที่ครอบคลุมการใช้ความถี่เป็นแถบกว้างมากโดยได้รับการกำหนดให้อยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.3a โดยมีย่านความถี่ที่ถูกกำหนดจาก Federal Communications Commission (FCC) อยู่ที่ 3.1-10.6 GHz พลังงานที่ใช้ใน multiband OFDM ที่ค่อนข้างต่ำ

### 2.1.3 ลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

สัญญาณแถบกว้างยิ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงรูปแบบของสัญญาณอุดมคติที่เรียกว่าสัญญาณอิมพัลส์โดยสัญญาณที่มีลักษณะเป็นรอบเดียว (monocycle) นิยมใช้ในการสร้างและจำลองสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ โดยทั่วไปสัญญาณแถบกว้างยิ่งแบบพัลส์จะใช้สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน (Gaussian) สัญญาณพัลส์แบบเชียร์ป (Chirp) หรือสัญญาณพัลส์แบบเวฟเล็ต (Wavelet) เป็นต้น

สัญญาณแถบกว้างยิ่งแบบพัลส์เดี่ยวซึ่งใช้สัญญาณพัลส์เดี่ยวแบบเกาส์เซียน (Gaussian monocycle) ดังรูปที่ 2.1 นั้นมีรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันของการกระจายค่าทางสถิติแบบเกาส์เซียน โดยมีค่าความถี่กลางและความกว้างของพัลส์เป็นส่วนแปรผกผันกับช่วงเวลาของพัลส์ ซึ่งแสดงสัญญาณพัลส์เดี่ยวแบบเกาส์เซียนในทางเวลาที่มีความกว้างพัลส์ประมาณ 500 พิโควินาที



รูปที่ 2.1 สัญญาณเกาส์เซียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะทางและเป็นข้อมูลให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 ข้อกำหนดของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา

ในปี ค.ศ. 1998 คณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งสหรัฐอเมริกาได้ออกประกาศเกี่ยวกับการตรวจสอบหรือ Notice of inquiry (NOI) โดยถึงแม้ว่าจะได้คาดการณ์ถึงระดับกำลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณที่มีระดับต่ำมากๆ แล้วก็ตาม ยังมีกลุ่มผู้ที่สนับสนุนในระบบเดิมที่มีใช้งานกันอยู่ได้ทำการต่อต้านการนำระบบแถบกว้างยิ่งมาใช้งานสำหรับการสื่อสารของพลเรือนซึ่งข้อเรียกร้องโดยมากจะเกี่ยวข้องกับการคาดการณ์ถึงการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดในแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด อาทิ แถบความถี่ในการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ แถบความถี่ที่สำรองไว้สำหรับคลื่นวิทยุทางดาราศาสตร์และระบบ GPS

ในเดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 ทาง FCC ได้ออกกฎสำหรับระบบแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง และยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของคำประกาศและระเบียบการฉบับที่หนึ่งได้เผยแพร่ต่อสาธารณชน เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 โดยการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายพลังงานสำหรับการใช้งานในประเภทระบบการสื่อสารนั้นจะถูกกำหนดค่าสัดส่วนของแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth) ไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 0.2 หรือแบนด์วิดท์รวมทั้งหมดต้องไม่ต่ำกว่า 500 MHz และกำหนดช่วงความถี่ใช้งานไว้ที่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดยข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานของระบบแถบกว้างยิ่งแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1 สำหรับใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร

ตารางที่ 2.1 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย คณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร

ความถี่ (MHz)	EIRP in dBm ภายในอาคาร	EIRP in dBm ภายนอกอาคาร
960 - 1610	-75.3	-75.3
1610 - 1990	-53.3	-63.3
1990 - 3100	-51.3	-61.3
3100 - 10600	-41.3	-41.3
สูงกว่า 10600	-51.3	-61.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 จุดเด่นของระบบแถบกว้างยิ่ง

ลักษณะของพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบที่ใช้ในเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารแถบแคบ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงประโยชน์ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่จะนำมาใช้ในการสื่อสารไร้สายดังนี้

#### 1) มีความจุของช่องสัญญาณมาก

จุดเด่นที่สำคัญของการมีแบนด์วิดท์ที่กว้างสำหรับพัลส์แถบกว้างยิ่งคือการทำให้ความจุของช่องสัญญาณมากขึ้น โดยความจุของช่องสัญญาณหรืออัตราการส่งข้อมูลจะบอกถึงขนาดของข้อมูลทั้งหมดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณการสื่อสารต่อหนึ่งวินาที ซึ่งขนาดความจุที่มากของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งสามารถพิจารณาได้จากสูตรของแฮนนอน (Hartley-Shannon) ดังสมการที่ 2.1

$$c = B \log_2 (1 + \text{SNR}) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$c$  คือ ค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุด

$B$  คือ แบนด์วิดท์

$\text{SNR}$  คือ อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

จากสมการจะเห็นว่าค่าความจุของช่องสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแบนด์วิดท์มีมากขึ้น เพราะฉะนั้นสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มีแบนด์วิดท์มากถึง 7.5 GHz จึงทำให้มีอัตราการส่งข้อมูลในระดับหลายร้อยเมกะบิตต่อวินาที (Mbps) แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal communications commission: FCC) ได้จำกัดกำลังส่งของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไว้ จึงทำให้สามารถที่จะส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงในระยะสั้นๆ เท่านั้น ทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นตัวเลือกที่น่าจับตามองสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายระยะสั้นที่มีความเร็วสูง เช่นโครงข่ายพื้นที่ไร้สายส่วนบุคคล (WPANs)

#### 2) ใช้กำลังในการส่งต่ำ

จากข้อกำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดให้กำลังงานในการส่งสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้นมีค่าสูงสุดไม่เกิน -41.3 dBm/MHz ทำให้สัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้นมีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับต่ำโดยอยู่ในระดับของสัญญาณระบบรบกวน (Noise floor) จึงทำให้ระบบอื่นมองว่าสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแถบกว้างยิ่งนี้เป็นสัญญาณรบกวนเลยถูกกำจัดออกไปทำให้สัญญาณของแถบกว้างยิ่งไม่มีผลกระทบกับระบบอื่นๆ

### 3) มีโอกาสที่จะถูกดักฟังหรือตรวจจับได้ยาก

เนื่องจากมีกำลังเฉลี่ยในการส่งที่ต่ำทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างยิ่งมีความสามารถในการถูกดักฟังและตรวจจับได้ยาก การส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งที่ต่ำทำให้ผู้ดักฟังจะต้องอยู่ใกล้กับตัวส่งสัญญาณมาก (ประมาณ 1 เมตร) เพื่อที่จะสามารถตรวจจับข่าวสารที่ส่งได้นอกจากนั้นพัลส์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งเป็นการมอดูเลตทางเวลา (time modulation) ด้วยรหัสเฉพาะสำหรับภาคส่งและภาครับนั้นๆ การมอดูเลตทางเวลาของแถบกว้างยิ่งที่มีพัลส์ที่แคบมากๆ จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการส่งสัญญาณ เนื่องจากการที่จะตรวจจับพัลส์ในระดับพิโกวินาทีโดยที่ไม่รู้ว่ามีมันจะมาถึงเมื่อไหร่เป็นเรื่องที่แทบจะเป็นไปไม่ได้เลย ฉะนั้นเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจึงเป็นเทคโนโลยีที่มีความปลอดภัยมากยากต่อการดักฟังและตรวจจับ การสื่อสารที่ต้องการจุดเด่นในข้อนี้คือการสื่อสารของกองทัพและแผนการปกครอง

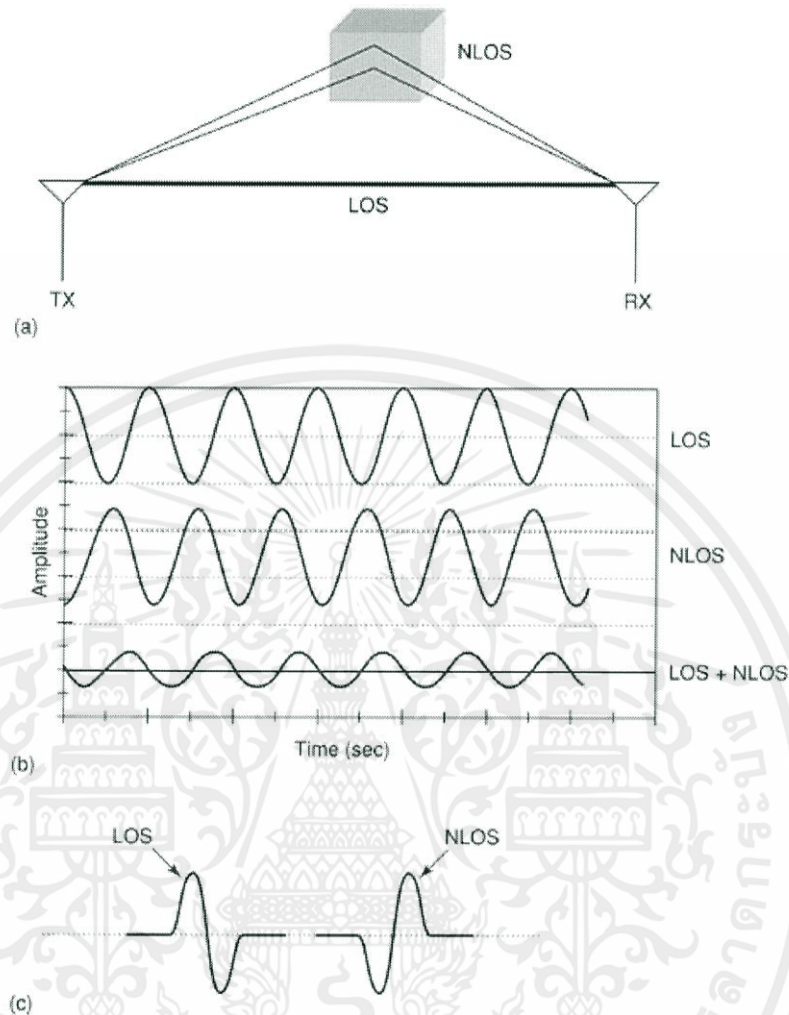
### 4) มีความต้านทานจากการถูกรบกวนสัญญาณ

หากเปรียบเทียบกับแถบความถี่ของการสื่อสารแถบแคบแล้ว แถบความถี่ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่งนั้นครอบคลุมช่วงของความถี่ที่มากกว่าในระดับหลายกิกะเฮิรตซ์ (GHz) การมีความถี่ที่หลากหลายของสัญญาณแถบกว้างยิ่งทำให้มีความต้านทานต่อการถูกรบกวนสัญญาณไม่ว่าจะเป็นการรบกวนโดยตั้งใจหรือไม่ตั้งใจ เพราะไม่มีใครที่ทำการรบกวนสัญญาณคนไหนที่สามารถรบกวนสัญญาณในทุกความถี่ของแถบความถี่กว้างยิ่งได้ในครั้งเดียว ฉะนั้นถ้าความถี่บางความถี่ถูกรบกวนแถบกว้างยิ่งก็ยังมีเหลือช่วงความถี่อีกมากมายที่ยังไม่ถูกใช้

### 5) มีความต้านทานต่อช่องสัญญาณหลายวิถี

การเกิดช่องสัญญาณหลายวิถีเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการสื่อสารไร้สาย ซึ่งเป็นผลมาจากการสะท้อนของสัญญาณการสื่อสารจากหลายๆ ทิศทางที่วัสดุต่างๆ เช่น อาคาร โต๊ะ เพดาน หรืออุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น เส้นทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับโดยตรงเรียกว่า เส้นระดับสายตา (Line of Sight: LOS) ส่วนสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนจากพื้นผิววัสดุต่างๆไม่เป็นเส้นระดับสายตา (Non Line of Sight: NLOS) โดยรูปที่ 2.3 แสดงช่องทางการเกิดคลื่นหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง [4]

(a) การเกิดช่องสัญญาณหลายวิถีในการสื่อสารไร้สาย

(b) ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบ

(c) ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบกว้างยิ่ง

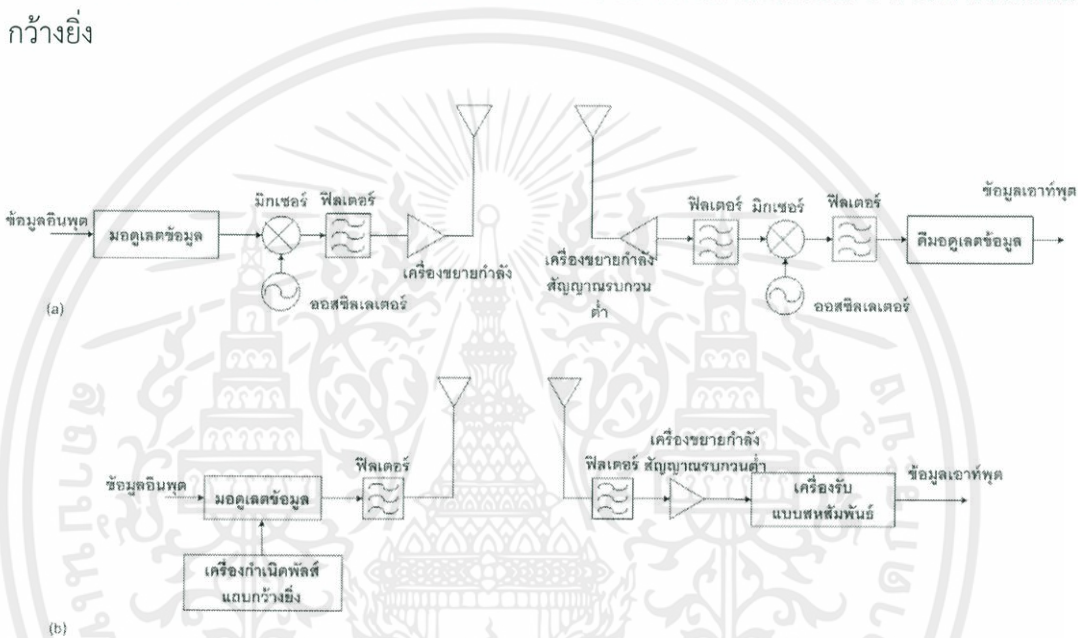
จากรูปที่ 2.2 ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีสำหรับสัญญาณแถบแคบจะเกิดขึ้นค่อนข้างมากกว่าสัญญาณแถบกว้างยิ่ง เนื่องจากการรวมกันแบบต่างเฟส (Out of phase) ของสัญญาณที่มาจาก เส้นระดับสายตา (LOS) และไม่เป็นเส้นระดับสายตา (NLOS) ทำให้ระดับของแอมพลิจูดลดลงมาก แต่ในเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งการส่งพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากๆ ทำให้เทคโนโลยีนี้ได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณหลายวิถีน้อยกว่า เนื่องจากช่วงเวลาการส่งผ่านของพัลส์ของแถบกว้างยิ่งช่วงเวลาสั้นกว่านาโนวินาที ทำให้พัลส์ที่เกิดจากการสะท้อนมีโอกาสน้อยมาก

ที่จะไปถึงพร้อมกับพัลส์ที่เป็นเส้นระดับสายตา (LOS) นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก

เทคโนโลยีแถบกว้างยังเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ต้องการคลื่นพาห์ (Carrier less)

นั่นหมายความว่าไม่ต้องมีการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเหมือนกับในเทคโนโลยีแถบแคบและ เทคโนโลยีแถบกว้าง การสื่อสารที่ปราศจากคลื่นพาห์มีความต้องการส่วนประกอบต่างๆน้อยกว่า การสื่อสารที่มีการมอดูเลตเข้ากับสัญญาณพาห์ ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้โครงสร้างของเทคโนโลยี แถบกว้างยังมีความซับซ้อนน้อยกว่าและมีราคาในการสร้างถูกกว่าเทคโนโลยีแถบแคบ รูปที่ 2.3 เป็นการเปรียบเทียบบล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบแคบ กับเทคโนโลยีแถบ กว้างยิ่ง



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบโครงสร้างของระหว่างระบบแถบกว้างยิ่งกับระบบแถบแคบ [4]

- a) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบแคบ
- b) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

จากรูปที่ 2.3 ภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีโครงสร้างที่ง่ายกว่าระบบแถบแคบ เนื่องจากการสื่อสารแถบกว้างยิ่งที่ใช้พัลส์ที่มีกำลังส่งต่ำจะไม่จำเป็นต้องมีตัวขยายกำลัง (Power amplifier: PA) ในภาคส่ง และจากการที่การสื่อสารแถบกว้างยิ่งไม่มีการใช้สัญญาณพาห์ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้มิกเซอร์ (Mixer) และออสซิลเลเตอร์ (Oscillators) ในการแปลงความถี่พาห์ไปเป็นแถบความถี่ที่ต้องการทั้งในภาครับและภาคส่ง

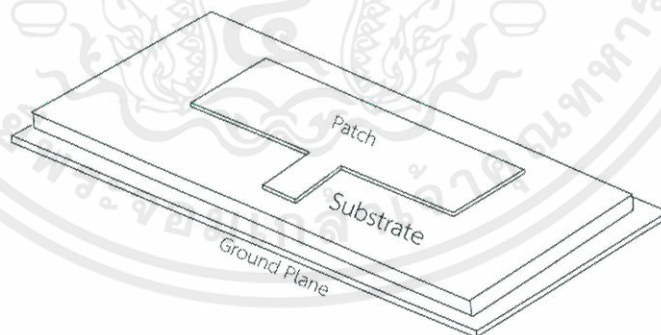
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna)

สายอากาศแบบไมโครสตริปได้เริ่มถูกใช้งานครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2513 แม้ว่าแนวความคิดครั้งแรกจะเกิดขึ้นโดย G.A. Deschamps ตั้งแต่เมื่อปี พ.ศ. 2496 และถูกจดสิทธิบัตรไปตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2498 สาเหตุที่ในช่วงแรกไม่มีการพัฒนาไปใช้งาน เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำมาก มีข้อดีคือ ขนาดเล็ก อาจกล่าวได้ว่าสายอากาศชนิดนี้เป็นการพัฒนารูปแบบหนึ่งของสายอากาศเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ขนาดเล็กเช่น โทรศัพท์มือถือ ลักษณะอุปกรณ์จึงแบนคล้ายกับแผ่นทองแดงทั่วไป

### 2.2.1. โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

ปัจจุบันสายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในย่านความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ น้ำหนักเบา ใช้พื้นที่น้อยและมีลักษณะแบนราบ ซึ่งเหมาะกับการติดตั้งที่แบนราบไปกับพื้นผิว สามารถใช้ร่วมกับกับ Microwave Integrated Circuit (MICs) ทำงานได้ 2 ถึง 3 ความถี่พร้อมๆ กัน มีความแข็งแรงเมื่อนำมายึดกับพื้นผิวทำให้ง่ายต่อการออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือที่เราเรียกว่าแพทช์ (Patch) ซึ่งเป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระนาบกราวด์ที่มีความบาง (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าเป็นซับสเตรท (Substrate) ของสารไดอิเล็กตริก



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า สายอากาศไมโครสตริปสามารถสร้างได้จากการใช้แผ่นวงจรพิมพ์สองหน้า โดยด้านบนใช้กรวดกีดแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปต่างๆ และวงจรป้อนเอกสารนี้เป็น สัญญาณได้ตามต้องการและตัวนำด้านล่างใช้เป็นระนาบแสงเงา (Ground Plane) ซึ่งกล่าวคือ ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศไมโครสตริปทั่วไปจะมีส่วนประกอบหลักๆ ได้แก่ แผ่นไมโครสตริป วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก ระบายแสงเงา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

แผ่นไมโครสตริป เป็นแผ่นโลหะบางๆทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นและสามารถออกแบบให้มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปได้หลายรูปแบบ จะขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานหรือจุดประสงค์ของการสร้าง เช่น รูปสี่เหลี่ยม รูปสามเหลี่ยม รูปวงกลม เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5

วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก เป็นสารที่คั่นระหว่างไมโครสตริปกับระบายแสงเงา ตัวอย่างวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก เช่น เทฟลอน (Teflon) และอีพอกซี (Epoxy) เป็นต้น โดยขนาดและชนิดของวัสดุฐานรองจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่การใช้งาน แต่โดยส่วนมากจะมีลักษณะบางนั่นเอง

ระบายแสงเงา เป็นแผ่นนำไฟฟ้าที่อยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก ซึ่งทำหน้าที่เป็นระบายสร้างเงาหรือกราวด์เพลนให้กับแผ่นไมโครสตริป ซึ่งในทางอุดมคติจะมีขนาดใหญ่มากเป็นอนันต์



รูปที่ 2.5 สายอากาศไมโครสตริปรูปแบบต่างๆ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 ลักษณะการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริบ

สายอากาศไมโครสตริบจะมีองค์ประกอบการแผ่พลังงานอยู่ที่ด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก และอีกด้านหนึ่งนั้นจะเป็นระนาบแสงเงา ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริบนั้นสามารถป้อนได้หลายวิธี แต่มี 4 วิธีที่ใช้ทั่วไป คือ

วิธีที่ 1 คือการป้อนสัญญาณเข้าไปยังสายอากาศโดยใช้สายส่งไมโครสตริบ (Microstrip Transmission Line Feed) เป็นการป้อนสัญญาณที่สามารถสร้างและวิเคราะห์ได้ง่าย โดยการป้อนสัญญาณเข้าไปที่ขอบของแผ่นไมโครสตริบ สายส่งที่ใช้ป้อนสัญญาณทำจากแผ่นตัวนำเดียวกับแผ่นไมโครสตริบ สายส่งไมโครสตริบจะมีความกว้างน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นไมโครสตริบ การป้อนสัญญาณแบบนี้จะทำให้การสร้างและการแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ง่ายโดยการควบคุมการวางตำแหน่งของการป้อนสัญญาณ การป้อนสัญญาณแบบนี้สามารถสร้างพร้อมกับแผ่นไมโครสตริบจึงทำให้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก

วิธีที่ 2 คือการป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งแกนร่วมส่ง (Coaxial Feed) เป็นการป้อนสัญญาณโดยใช้สายโคแอกเซียล (Coaxial) หรือหัวต่อ (Connector) สอดทะลุจากด้านหลังมายังแผ่นไมโครสตริบ หรือบางครั้งเรียกว่าการป้อนสัญญาณแบบนี้ว่า การป้อนสัญญาณผ่านโพรบ (Probe Feed)

วิธีที่ 3 คือการป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อผ่านช่องเปิด (Aperture Coupling Feed) เป็นการป้อนสัญญาณที่ไม่ต้องสัมผัสกับแผ่นไมโครสตริบโดยใช้ช่องเปิดเป็นตัวเชื่อมต่อ ซึ่งมีแผ่นไมโครสตริบอยู่ด้านบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกและมีระนาบสร้างเงาอยู่ที่ด้านล่าง และที่ระนาบสร้างเงานี้จะมีช่องเปิด (Slot) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ด้วย ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างแผ่นไมโครสตริบกับสายส่งไมโครสตริบ ช่องเปิดดังกล่าวนี้จะวางตัวอยู่กึ่งกลางของแผ่นไมโครสตริบ ส่วนสายส่งไมโครสตริบจะอยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองอีกอันหนึ่งซึ่งจะไม่มีระนาบแสงเงา ส่วนขนาดของช่องเปิดนั้นจะมีขนาดเล็กกว่าแผ่นไมโครสตริบเพื่อไม่ให้ช่องเปิดเลื่อนไปเกิดเรโซแนนซ์ (Resonance) ที่ความถี่สูงกว่าความถี่ที่ต้องการ

วิธีที่ 4 คือการป้อนสัญญาณโดยใช้วิธีการการเชื่อมต่อใกล้แผ่นไมโครสตริบ (Proximity Coupling Feed) เป็นการป้อนสัญญาณเข้าสายอากาศโดยการใช้อย่างน้อย 2 แผ่นไมโครสตริบระหว่างวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกทั้งสองตัว โดยวัสดุฐานรองส่วนด้านบนจะมีแผ่นไมโครสตริบติดอยู่ และมีระนาบสร้างเงาอยู่ที่ด้านล่าง การป้อนสัญญาณแบบนี้มีข้อดีที่ทำให้ความ

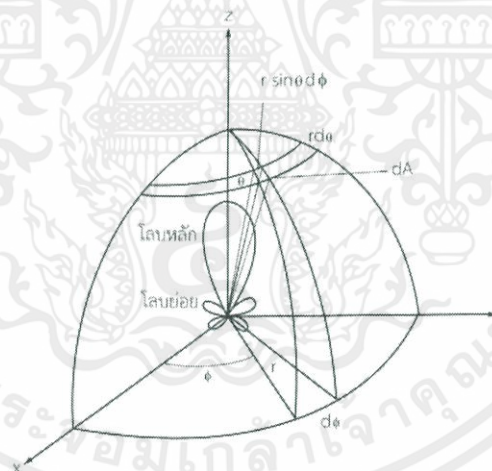
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่หวังผลกำไร หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 คุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ

สายอากาศชนิดต่าง ๆ ที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไปมีคุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องพิจารณาประกอบการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศเพื่อช่วยในการตัดสินใจและประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานต่างๆ มากมาย โดยมีส่วนสำคัญดังนี้

### 2.3.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศ คือ การแสดงโดยเส้นที่สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการแพร่กระจายของสายอากาศตามฟังก์ชันของสเปสโคออดิเนท (Space coordinates) ส่วนมากในกรณีของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นนี้จะกำหนดการคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far-field) และแสดงให้เห็นเช่นเดียวกับฟังก์ชันตามทิศทางของโคออดิเนท คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยความเข้มของสนาม (Field strength), เฟส (Phase) หรือโพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่



รูปที่ 2.6 ระบบโคออดิเนทของสายอากาศ

จากรูปที่ 2.6 แสดงถึงระบบโคออดิเนทที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น การใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ เรียกว่า รูปแบบกำลังงานของสายอากาศและกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีที่เรียกว่า สนามการแพร่กระจาย (Field pattern) ของสายอากาศนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio)

อัตราส่วนระหว่างแรงดันค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในคลื่นนิ่งเรียกว่า อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) ดังสมการที่ (2.2)

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.2)$$

$\Gamma$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน (Voltage Reflection Coefficients) ซึ่งสามารถหาได้จากอัตราส่วนผลต่างและผลรวมระหว่างโหนดกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ดังสมการที่ (2.3)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$V_r$  คือแรงดันสะท้อนกลับ

$V_i$  คือแรงดันตกกระทบ

$Z_L$  คือโหนดอิมพีแดนซ์

$Z_0$  คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

### 2.3.3 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหนด เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่แมตช์กัน การสูญเสียย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับ VSWR ซึ่งเป็นการแสดงการแมตช์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับสายอากาศตามสมการ โดยการสูญเสียย้อนกลับสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4

$$S_{11} = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (\text{dB}) \quad (2.4)$$

สำหรับการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายส่งและสายอากาศ เมื่อ  $\Gamma = 0$  ค่าความสูญเสียย้อนกลับเป็นอนันต์ แสดงว่าไม่มีกำลังงานสะท้อนกลับ ในทำนองเดียวกันเมื่อ  $\Gamma = 1$  ค่าความสูญเสียย้อนกลับจะเป็น 0 dB ซึ่งแสดงว่ากำลังงานสะท้อนกลับหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่รวมประสิทธิภาพการสูญเสียที่สายอากาศและในโครงสร้างของสายอากาศ การสูญเสียต่างๆหาได้จากการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตช์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ และการสูญเสียจากตัวนำและฉนวน โดยประสิทธิภาพรวมของสายอากาศสามารถเขียนเป็นสมการที่ 2.5

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.5)$$

$e_t$  ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ

$e_r = (1 - |\Gamma|^2)$  ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตช์กัน

$e_c$  ประสิทธิภาพของตัวนำ

$e_d$  ประสิทธิภาพของฉนวน (dielectric)

โดยทั่วไป  $e_c$  และ  $e_d$  จะรวมเป็นตัวเดียวกันตามสมการที่ 2.6

$$e_{cd} = e_c e_d = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (2.6)$$

$R_r$  คือความต้านทานจากการแผ่พลังงานคลื่นออกไป

$R_L$  คือความต้านทานที่โหลด

### 2.3.5 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากไดเรกทิวิตีโดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ไดเรกทิวิตีแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น การคิดอัตราขยายของสายอากาศวัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง โดยอัตราขยายของสายอากาศส่ง คือกำลังสองของอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง หรือแสดงในรูปของอัตราส่วนของค่ากำลังงานที่ต้องใช้ในการส่งของสายอากาศทั้งสอง เพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาดเท่ากัน (ณ จุดเดียวกัน) ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด หรืออัตราขยายของ

สายอากาศรับ คืออัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพล หรือแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือ กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศในปริมาณที่เท่ากัน

อัตราขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้นั้นมีค่าเท่ากับผลคูณอัตราส่วนความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อ (หาร) กำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่กำหนดทิศทางไว้ โดยทั่วไปคิดอัตราขยายกำลังในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุดตามสมการที่ 2.7

$$\text{Gain} = \frac{4\pi U(\theta, j)}{P_{in}} \quad (2.7)$$

### 2.3.6 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance)

พิจารณาสายอากาศเสมือนเป็นชิ้นส่วนหนึ่งในวงจรไฟฟ้า เมื่อต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณเพื่อป้อนพลังงานให้กับสายอากาศ พลังงานจะไหลเข้าสู่สายอากาศที่ละน้อยเนื่องจากการต้านทานการไหลของพลังงานที่เรียกว่าอิมพีแดนซ์หรือความต้านทานเชิงซ้อนเกิดขึ้น อิมพีแดนซ์ดังกล่าวจะปรากฏที่ขั้วของสายอากาศ เรียกว่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า ( $Z_{in}$ ) ดังสมการที่ 2.8

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.8)$$

$X_{in}$  คือความต้านทานเชิงจินตภาพที่ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานในบริเวณสนามใกล้สายอากาศโดยไม่แผ่กระจายออกไป และ  $R_{in}$  ประกอบด้วยสองส่วนคือ  $R_r$  หมายถึงความต้านทานพลังงานคลื่นที่แผ่ออกไปโดยสายอากาศและ  $R_L$  หมายถึงความต้านทานที่ไหลลง ซึ่งรวมถึงความต้านทานจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความร้อน สารไดอิเล็กตริก และตัวนำ

### 2.3.7 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศเป็นช่วงของความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดี ซึ่งช่วงความถี่ถูกกำหนดโดย  $VSWR \cong 2$  หรือพิจารณาจากการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ระดับ -10 dB ดังสมการที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$BW(\%) = \frac{f_u}{f_l} \times 100 \quad (2.9)$$

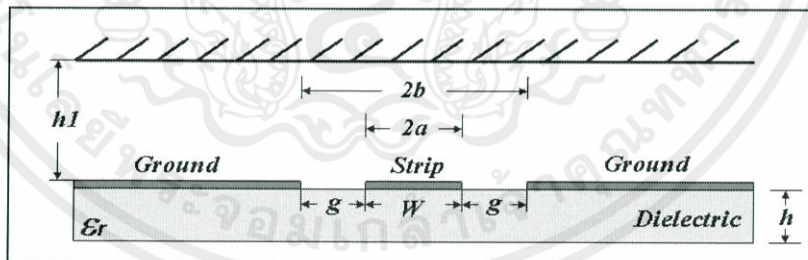
โดยที่ BW คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศ  
 $f_u$  คือ ขอบความถี่สูงของย่านความถี่  
 $f_l$  คือ ขอบความถี่ต่ำของย่านความถี่

## 2.4 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม

สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมถูกคิดค้นโดย Wen ในปี ค.ศ. 1969 ในที่นี้กล่าวถึงสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง (Coplanar Waveguide)

### 2.4.1 ลักษณะของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่างประกอบด้วยเส้นตัวนำที่เรียกว่า สตรีป (Strip) อยู่ตรงกลางด้านบนบนของวัสดุฐานรอง (Substrate) ที่เป็นฉนวน โดยมีความกว้างของสตรีปคือ  $w$  ด้านข้างทั้งสองด้านของสตรีปมีร่อง (Slot) คั่นอยู่ระหว่างระนาบกราวด์กับสตรีปตามลำดับ ความกว้างระหว่างสตรีปถึงระนาบกราวด์ (ความกว้างร่อง) คือ  $g$  และมีความหนาของฐานรองไดอิเล็กทริกคือ  $h$  ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง [7]

การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมจะให้วิธีแบบ Quasi static ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของวิธีการส่งคงรูป (Conformal mapping) โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้การหาค่าความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำที่กระจายอยู่บนสายนำสัญญาณการวิเคราะห์แบบนี้สามารถหาค่าคุณลักษณะพื้นฐานต่างๆ ของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมได้ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณสามารถหาได้จากผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าของครึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบด้านบนซึ่งอยู่ในอากาศกับครึ่งระนาบด้านล่างซึ่งอยู่ในชั้นของไดอิเล็กตริก (Dielectric layer) โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการส่งคงรูปเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric constant) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance) จะอยู่ในเทอมอัตรส่วนของกรอนิทกรัลงรีแบบสมบูรณ์ขั้นแรก (Complete elliptic integral of the first kind) โดยกำหนดให้

$C$  คือค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณ

$C^a$  คือค่าความจุไฟฟ้าในลักษณะเดียวกับ  $C$  แต่จะแทนไดอิเล็กตริกทั้งหมดด้วยอากาศ จะได้ว่า

$$\epsilon_{re} = \frac{C}{C^a} \quad (2.10)$$

$$V_p = \frac{C}{\epsilon_{re}} \quad (2.11)$$

$$\lambda_g = \frac{C}{f\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.12)$$

$$Z_0 = \frac{1}{C V_p} = \frac{C}{C\sqrt{\epsilon_{re}} C^a} \quad (2.13)$$

$\epsilon_{re}$  หมายถึงสภาพยอมสัมพันธ์ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

$V_p$  หมายถึงความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ

$\lambda_g$  หมายถึงความยาวคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ

$C$  หมายถึงความเร็วของสนามไฟฟ้าในอวกาศว่าง

$Z_0$  หมายถึงอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณจะใช้วิธีการส่งคงรูป ซึ่งในที่นี้จะไม่ขอกล่าวถึงวิธีการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณ แต่จะพิจารณาเฉพาะการหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณหาได้จากสมการ

$$Z_0 = \frac{30\pi K'(k_1)}{\sqrt{\epsilon_{re}} K(k_1)} \quad (2.14)$$

ค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพหาได้จาก

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (2.15)$$

โดยที่

$$q = \frac{1}{2} \left[ \frac{K(k_2)K'(k_1)}{K'(k_2)K(k_1)} \right] \quad (2.16)$$

เมื่อ  $q$  หมายถึง ตัวประกอบการคูณ และ

$$k_1 = \frac{a}{b} \quad (2.17)$$

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi/2h)}{\sinh(\pi/2h)} \quad (2.18)$$

$$k_3 = \frac{\tanh(\pi/2h_1)}{\tanh(\pi/2h_1)} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = \frac{S}{2} \quad (2.20)$$

$$b = \frac{(2W + S)}{2} \quad (2.21)$$

## 2.5 ระบบการวัดช่องสัญญาณ

ในการวัดช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งยั้งนั้นจะใช้การวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่ (frequency domain, FD) โดยใช้เทคนิคการกวาดความถี่ (frequency sweeping) ซึ่งวิธีการนี้ ผลตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณนั้นจะถูกบันทึกโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ (VNA) โดยจะเหมือนกับการวัดพารามิเตอร์  $S_{21}$  หรือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient) ซึ่งในการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่นั้นสัญญาณวิทยุจะถูกสร้างขึ้นและรับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ที่ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่จัดการเกี่ยวกับการวัดทั้งหมดโดยสัญญาณที่ใช้ตรวจสอบนั้นจะเป็นกลุ่มของสัญญาณแถบแคบรูปไซน์ (sinusoid) ซึ่งทำการกวาดตลอดแถบความถี่ที่ต้องการพิจารณาประกอบกับการใช้สายอากาศแถบกว้าง โดยในการจำลองช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งยั้งนั้นสามารถที่จะทำได้ในส่วนของการประมวลผลข้อมูลและเมื่อใช้วิธีการวัดสัญญาณในโดเมนความถี่ช่วงเวลาของช่องสัญญาณที่ทำการวัดต้องถูกกำหนดให้คงที่เพื่อรักษาเงื่อนไขของช่องสัญญาณในช่วงการกวาดความถี่ โดยที่ค่าสูงสุดของเวลาการกวาดความถี่ถูกจำกัดโดยเวลาร่วมกัน (coherence time) ของช่องสัญญาณ ถ้าเวลาการกวาดนานกว่าเวลาร่วมกันของช่องสัญญาณแล้วช่องสัญญาณอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาในการกวาดความถี่สำหรับการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนั้นจำเป็นต้องใช้เทคนิควิธีการอื่นเข้ามาทำการตรวจสอบแทน ซึ่งประสิทธิภาพของการวัดในโดเมนความถี่นั้นจะถูกกำหนดโดยค่าสูงสุดของเวลาประวิงของช่องสัญญาณ ซึ่งขอบเขตด้านบนของเวลาประวิงที่ตรวจพบ สามารถกำหนดโดยจำนวนจุดของความถี่ที่ใช้ในการกวาดแต่ละครั้งและแบนด์วิดท์ ซึ่งนิยามตามสมการที่ 2.22

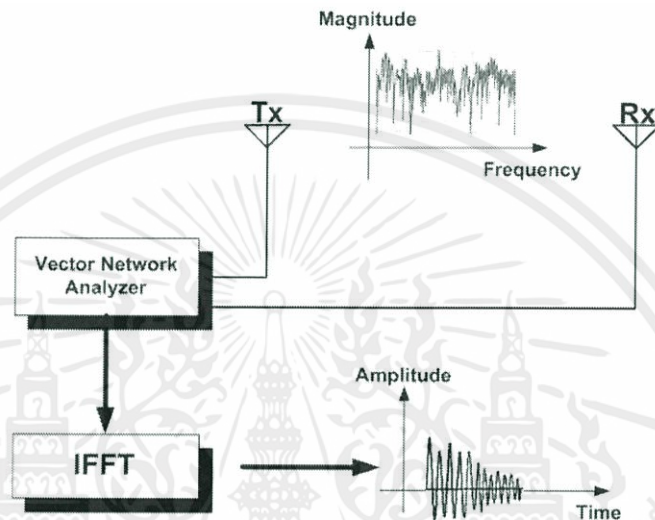
$$\tau_{\max} = (N_{\text{smp}} - 1) / B \quad (2.22)$$

โดยที่

$N_{\text{smp}}$  คือ จำนวนจุดความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดสัญญาณโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์นั้นผลที่ได้คือผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณจากนั้นจะใช้ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (inverse fast Fourier transform, IFFT) ในการแปลงข้อมูลการวัดในโดเมนความถี่ให้อยู่ในรูปแบบของโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่โดยเครื่อง VNA [8] และการแปลงสู่โดเมนเวลาโดยใช้ IFFT

## 2.6 การประยุกต์สูตรการส่งผ่านของฟรีส

ในระบบสื่อสารไร้สาย สัญญาณที่กำหนดขึ้นจากภาคส่งที่จะต้องนำไปป้อนเข้าสายอากาศ เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) สำหรับแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณซึ่งโดยทั่วไปก็คืออากาศ เมื่อสัญญาณเดินทางมาถึงภาครับก็จะมีสายอากาศรับสัญญาณซึ่งทำหน้าที่กลับกันจากภาคส่ง คือทำการแปลงสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากลับเป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกครั้ง ในการศึกษาเรื่องการแพร่กระจายสัญญาณจะเริ่มพิจารณาจากแหล่งแพร่สัญญาณแบบทุกทิศทาง (Isotropic radiator) โดยในการส่งคลื่นสัญญาณผ่านอวกาศว่างนั้น มักจะนิยามให้ค่าการสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่าง (Free space path loss) มีค่าเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังงานของสัญญาณที่ถูกส่งออกมา ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.23 โดยสมการความสัมพันธ์ที่ได้จะเรียกกันทั่วไปว่าสมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังผู้อื่น เว้นแต่ผู้จัดทำ  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้ใช้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (2.23)$$

$P_R$  คือ กำลังงานของสัญญาณที่รับได้

$P_T$  คือ กำลังงานของสัญญาณที่ส่งออกมา

$G_R$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

$G_T$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง

$\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่น ซึ่ง  $\lambda = \frac{c}{f}$

$c$  คือ ความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/s)

$f$  คือ ความถี่ของสัญญาณ (Hz)

$d$  คือ ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ (m)

ค่าการสูญเสียกำลังงานของสัญญาณในอวกาศว่างโดยทั่วไปแล้วจะคิดค่าเป็นหน่วยของเดซิเบล (dB) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} L_{dB} &= 10\log(P_T) - 10\log(P_R) \\ &= 32.44 + 20\log(f) + 20\log(d) - 10\log(G_T) - 10\log(G_R) \end{aligned} \quad (2.24)$$

โดยที่  $d$  มีหน่วยเป็น km และ  $f$  มีหน่วยเป็น MHz จากสมการนี้จะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียของสัญญาณจะเพิ่มตามระยะทางและค่าความถี่ของคลื่นสัญญาณ ถ้า  $P_T$  เป็นจุดกำเนิดกำลังงาน (Point source) แล้วความหนาแน่นกำลังงานของสัญญาณที่ตำแหน่งห่างออกไป  $d$  จะมีค่าเท่ากับ

$$p(d) = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad \text{วัตต์/ตารางเมตร} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโทษตามกฎหมายหากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้ในการทำธุรกิจที่มีการนำไปใช้

## 2.7 การวิเคราะห์ระบบแถบกว้างยิ่ง โดยใช้สูตรของฟรีส

ในการศึกษาถึงการแพร่กระจายของสัญญาณในระบบ UWB โดยในระบบแถบแคบ (Narrowband) โดยปรกตินั้นจะถูกกำหนดโดยใช้สูตรของฟรีส แต่ว่ามันไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับการส่งสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่ง โดยในสูตรนั้นนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของความถี่ แต่อย่างไรก็ตามรูปร่างของสัญญาณนั้นอาจจะผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจาก คุณสมบัติในการตอบสนองความถี่ของสายอากาศโดยได้มีการปรับปรุงสมการของฟรีส เพื่อวิเคราะห์ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

โดยให้สัญญาณอินพุตแทนด้วย  $v_i(t)$  และทำการคอนโวลูชันสัญญาณอินพุตด้วยสัญญาณที่ใช้ในการกรองความถี่ที่แทนด้วย  $h_i(t)$  ดังนี้

$$v_i(t) = E_i \delta(t) * h_i(t) \quad (2.26)$$

ซึ่ง

$$\int_{-\infty}^{\infty} h_i^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |H_i(f)|^2 df = 1 \quad (2.27)$$

การปรับปรุง Friis' formula เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเป็น จะได้เป็นดังนี้

$$H_{\text{Friis}}(f) = H_f \cdot H_t \cdot H_r \quad (2.28)$$

$$H_{\text{e-Friis}}(f) = H_f H_i \cdot H_t \cdot H_r \quad (2.29)$$

เมื่อ

$H_f$  = ฟังก์ชันการส่งผ่านสัญญาณในอวกาศ

$H_r$  = ฟังก์ชันการส่งผ่านสัญญาณของสายอากาศตัวรับ

$H_t$  = ฟังก์ชันการส่งผ่านสัญญาณของสายอากาศตัวส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสำหรับกรณี ไอโซโทรปิก

$$H_{e\text{-Friis',Iso}}(f) = H_f H_i \quad (2.30)$$

## 2.8 ทฤษฎีการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss)

ในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นเป้าหมายหลักของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นคือการคาดการณ์ถึงค่าความสูญเสียกำลังงานของสัญญาณ  $PL$  เนื่องจากการแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณโดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างระดับกำลังงานที่ใช้ส่งและระดับกำลังงานที่รับได้ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบล (Decibel) ดังแสดงในสมการที่ 2.31

$$PL[\text{dB}] = 20 \log \left[ \frac{v_t(t)}{v_r(t)} \right] \quad (2.31)$$

โดยที่  $v_t$  คือ ระดับสัญญาณที่ใช้ส่ง  
 $v_r$  คือ ระดับสัญญาณที่รับได้

โดยในการวิเคราะห์การสูญเสียของกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่ง  $PL_{UWB}$  นั้นจะพิจารณาที่กำลังงานสูงสุดของสัญญาณที่ใช้ส่งและกำลังสูงสุดของสัญญาณที่รับได้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทาง ( $d$ ) โดยมีนิยามเป็นไปตามสมการที่ 2.32 และ 2.33 ตามลำดับ

$$PL_{UWB}(d)[\text{dB}] = 20 \log \left[ \frac{\max |v_t(t)|}{\max |v_r(t,d)|} \right] \quad (2.32)$$

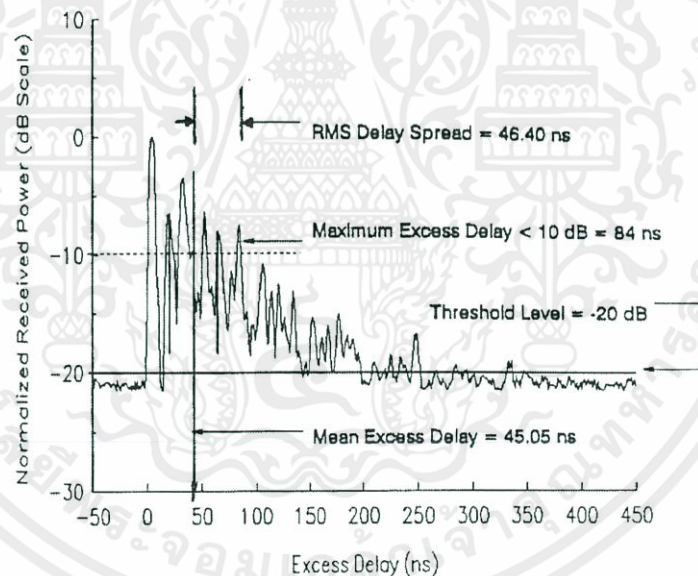
โดยในสมการที่ 2.32 ได้กำหนดให้ขนาดของสัญญาณที่ใช้ส่งมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$PL_{UWB}(d)[\text{dB}] = -20 \log \left[ \max |v_r(t,d)| \right] \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (Power delay profile: PDP)

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่นิยมนำมาวิเคราะห์เพื่อแสดงให้เห็นถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับที่เวลาต่าง ๆ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสัญญาณที่มีการสะท้อนในหลายทิศทางหรือที่เรียกว่าสัญญาณหลายวิถีโดยจะเรียกว่า ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน ซึ่งตัวอย่างของค่าการประวิงเวลาได้แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อเวลาที่เข้ามาถึงและนอกจากนั้นยังสามารถนำไปพิจารณาถึงผลการกระจายทางเวลา (Time dispersion) อันประกอบไปด้วย ค่าเฉลี่ยของเวลาประวิง (Mean excess delay) และ ค่าการแผ่ของเวลาประวิง (RMS delay spread) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



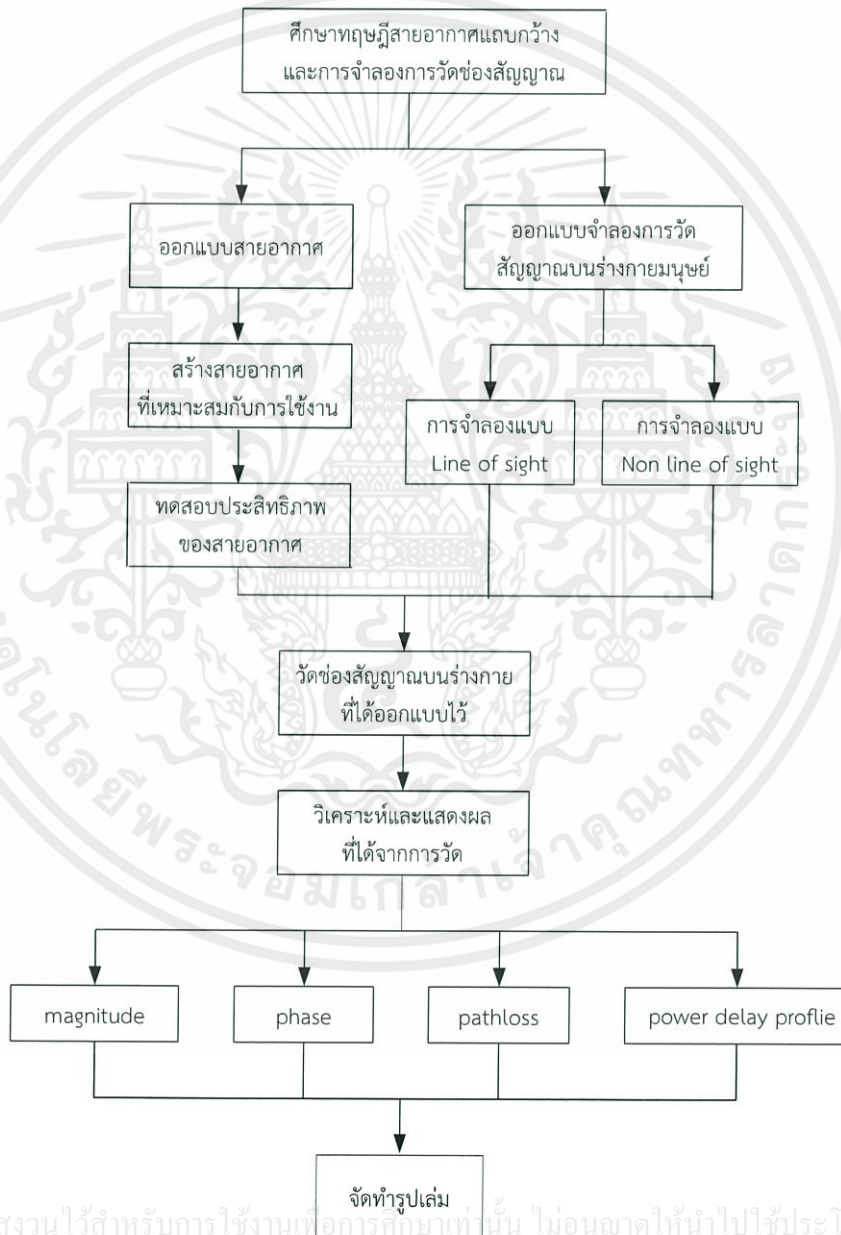
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบและการจัดทำปฏิญานิพนธ์

การศึกษาคุณลักษณะช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์มีการดำเนินการ  
ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน

### 3.1 การออกแบบ

การออกแบบการศึกษาคุณลักษณะของช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ นั้น มีการดำเนินการออกแบบโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การออกแบบสายอากาศ และการออกแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1.1 การออกแบบสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศ เป็นการศึกษาลักษณะของสายอากาศที่เหมาะสมกับการใช้งานบนร่างกายมนุษย์ พร้อมทั้งออกแบบสายอากาศโดยให้สายอากาศสามารถรับส่งคลื่นได้รอบทิศทางในแนวระนาบ ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบสายอากาศ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบสายอากาศ

##### 3.1.1.1 การเลือกชนิดสายอากาศ

การเลือกชนิดของสายอากาศนั้น สำหรับปริภูมิตำแหน่งนี้จะเลือกโดยพิจารณาจากจุดประสงค์เป็นหลัก ซึ่งจุดประสงค์หลักของปริภูมิตำแหน่งนี้คือ ศึกษาคุณลักษณะของช่องสัญญาณบนร่างกายมนุษย์ ดังนั้นจึงมีวิธีการดำเนินการเลือกชนิดสายอากาศ ดังนี้

##### 1) เลือกสายอากาศแบบรอบทิศทาง

เนื่องจากในการวัดช่องสัญญาณบนร่างกาย ต้องวัดหลายตำแหน่ง ดังนั้นจึงเลือก “สายอากาศแบบรอบทิศทาง” สายอากาศแบบรอบทิศทางสามารถรับส่งคลื่นได้ดีในทุกตำแหน่งบนร่างกาย

##### 2) เลือกสายอากาศที่สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่กว้าง

สำหรับปริภูมิตำแหน่งนี้ใช้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ซึ่งมีช่วงความถี่อยู่ในย่านกว้าง ดังนั้นสายอากาศที่สร้างขึ้นนั้นจึงต้องรองรับการทำงานในย่านความถี่กว้างด้วย

##### 3) เลือกสายอากาศที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา

เนื่องจากปริภูมิตำแหน่งนี้ ต้องติดสายอากาศแนบกับร่างกายในส่วนต่างๆ และมีการเคลื่อนย้ายสายอากาศไปยังจุดวัดที่ตำแหน่งต่างๆบนร่างกาย สายอากาศที่ใช้

จึงควรมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักไม่มากจนเกินไป ดังนั้นลักษณะที่เหมาะสมควรจะเป็นสายอากาศแบบเป็นแผ่น

#### 4) เลือกสายอากาศที่สามารถหาวัสดุได้ และไม่แพงจนเกินไป

จากทั้งสี่ข้อที่ผ่านมา สายอากาศที่เหมาะสมสำหรับโครงการนี้ควรจะเป็น “สายอากาศไมโครสตริป” ซึ่งมีคุณสมบัติครบทั้งสี่ข้อที่ต้องการ

#### 3.1.1.2 การออกแบบและคำนวณค่าสายอากาศ

1) กำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการ สำหรับปริญญาโทปีนี้เลือกช่วงความถี่เท่ากับ 3.1-10.6 GHz ตามมาตรฐานช่วงความถี่ที่ได้กำหนดไว้โดยของคณะกรรมการกิจการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC)

2) เลือกและกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในการออกแบบสายอากาศตามวัสดุที่หาได้ โดยสายอากาศจะสร้างจากแผ่นวงจรชนิด FR-4 ที่มีค่าไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.3 ความหนาของแผ่นฉนวนชั้นไดอิเล็กตริก ( $h$ ) เท่ากับ 1.6 มม. ความหนาของชั้นตัวนำ ( $t$ ) เท่ากับ 0.035 มม. และมีค่าความสูญเสียแทนเจนต์ ( $\tan \delta$ ) 0.002

3) หารัศมีแผ่นตัวนำรูปทรงกลมหรือส่วนที่ใช้ส่งคลื่น

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}}$$

หาค่า  $F$  ได้

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_0 \times \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{8.791 \times 10^9}{3.1 \times 10^9 \times \sqrt{4.3}} = 1.37$$

จะได้

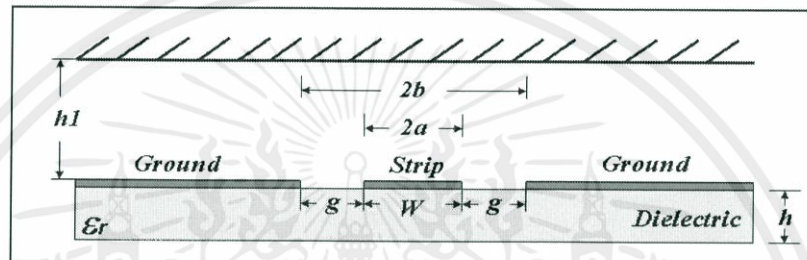
$$a = \frac{1.37}{\left\{ 1 + \frac{2 \times 0.16}{\pi \times 4.3 \times 1.37} \left[ \ln \left( \frac{\pi \times 1.37}{2 \times 0.16} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}}$$

$$a = 1.32 \text{ เซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4) ออกแบบสายนำสัญญาณและกราวด์

การออกแบบสายนำสัญญาณเพื่อให้แมตซ์กับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ 50 โอห์ม ในปริภูมิตวินนี้ได้ออกแบบสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง เนื่องจากง่ายต่อการปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ 50 โอห์ม โดยมีความกว้างของสตริปคือ  $w$  ด้านข้างทั้งสองด้านของสตริปมีร่อง (Slot) คั่นอยู่ระหว่างระนาบกราวด์กับสตริปตามลำดับ ความกว้างระหว่างสตริปถึงระนาบกราวด์ (ความกว้างร่อง) คือ  $g$  และมีความหนาของฐานรองไดอิเล็กทริกคือ  $h$  ดังรูปที่ 3.3



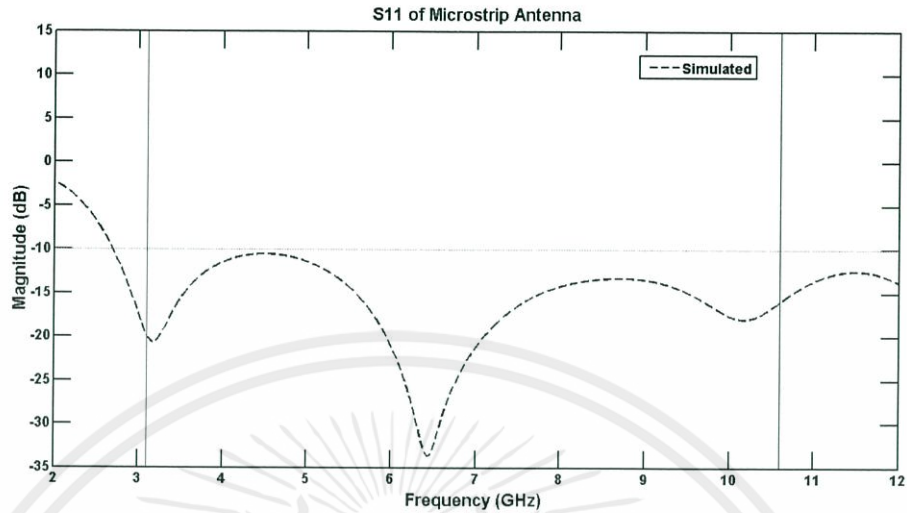
รูปที่ 3.3 โครงสร้างสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

#### 3.1.1.3 การจำลองสายอากาศ

จากการออกแบบและคำนวณค่าสายอากาศแบบไมโครสตริป ทำให้ทราบค่าโครงสร้างของสายอากาศโดยคร่าวๆ แต่ยังไม่ทราบถึงคุณสมบัติโดยรวม จึงต้องนำค่าดังกล่าวมาสร้างเป็นสายอากาศจำลอง สำหรับปริภูมิตวินนี้เป็นการจำลองสายอากาศจากโปรแกรมจำลองสายอากาศ (CST Microwave Studio) หากค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ ต้องทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์บางอย่างของโครงสร้าง เช่น ความยาวสายส่ง ความกว้างสายส่ง รัศมีของแผ่นตัวนำทรงกลม รวมทั้งความกว้างความยาวของกราวด์ เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีขึ้นก่อนนำไปสร้างชิ้นจริง ผลจากการจำลองสายอากาศถูกแสดง ดังนี้

1) ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficient) ของสายอากาศไมโครสตริปแสดงใน รูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

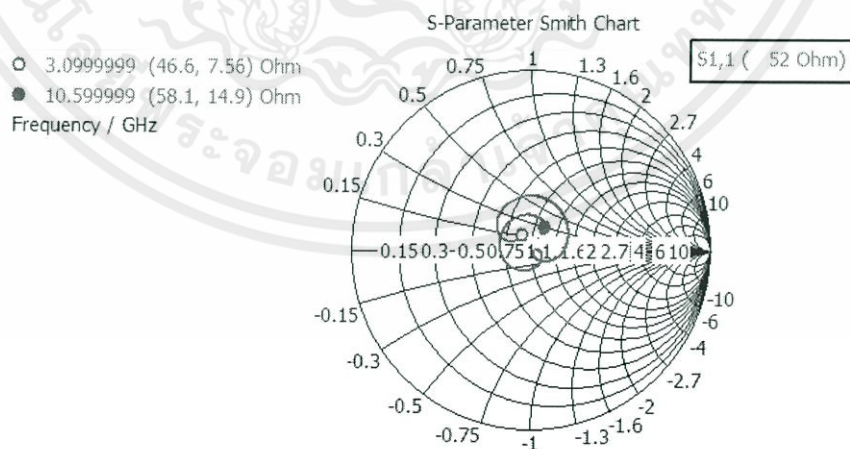


รูปที่ 3.4 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ

จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 3.1 GHz มีค่าเท่ากับ -21 dB และที่ความถี่ 10.6 GHz มีค่าเท่ากับ -15 dB ส่วนที่ความถี่อื่นๆระหว่างช่วง 3.1-10.6 GHz ก็มีค่าต่ำกว่า -10 dB นั้นแสดงว่าสายอากาศแบบไมโครสตริปนี้สามารถแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่ 3.1-10.6 GHz ได้ ดังนั้นสายอากาศดังกล่าวจึงสามารถใช้งานในช่วงความถี่นี้ได้

2) ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบไมโครสตริป

ดังรูปที่ 3.5



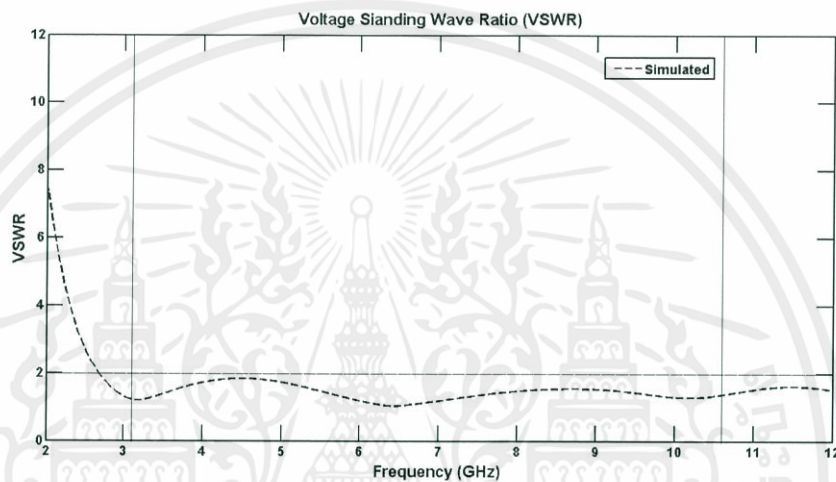
รูปที่ 3.5 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปในรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 3.1 GHz ค่าอิมพีแดนซ์ มีค่าเท่ากับ  $46.6+7.56i$  โอห์ม, ที่ความถี่ 10.6 GHz ค่าอิมพีแดนซ์ มีค่าเท่ากับ  $58.1+14.9i$  โอห์ม  $S_{11}$  มีค่า 52 โอห์ม

3) ผลการจำลองค่า VSWR ของสายอากาศไมโครสตริป ดังรูปที่

3.6



รูปที่ 3.6 ผลการจำลองค่า VSWR

จากรูปที่ 3.6 จะพบว่าความถี่ที่นำไปใช้ได้ต้องมีค่า VSWR น้อยกว่า 2 ดังนั้นค่าความถี่ที่ใช้ได้นั้นจะครอบคลุมความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz

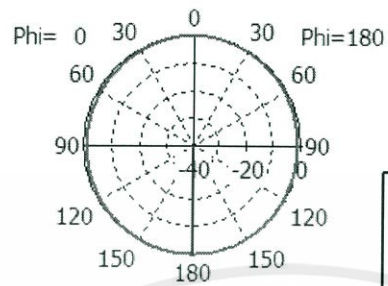
4) ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปต้องคำนึงถึงย่านความถี่ที่ใช้งานด้วย ในปฏิญานพนธ์เล่มนี้ใช้ช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ดังนั้นในการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจึงต้องวัดสามความถี่ คือ ความถี่ต้น 3.1 GHz, ความถี่กลาง 6.85 GHz และความถี่ปลาย 10.6 GHz ผลที่ได้จากการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นดังนี้

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่ความถี่ต้น 3.1 GHz, ความถี่กลาง 6.85 GHz และความถี่ปลาย 10.6 GHz ถูกแสดงดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P-Field(r=1m) Abs (Phi=0)

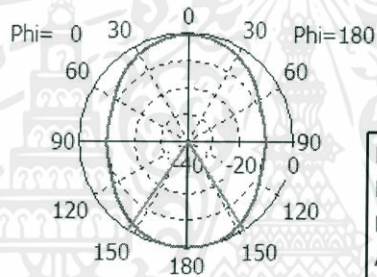


farfield (f=3.1) [1]

Frequency = 3.1  
Main lobe magnitude = 0.0 dB  
Main lobe direction = 180.0 deg.

Theta / Degree vs. dB

P-Field(r=1m) Abs (Phi=0)

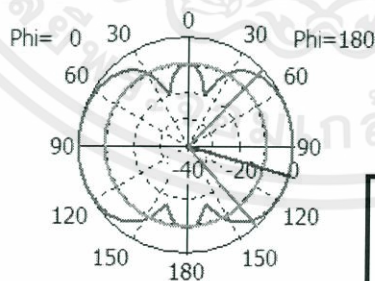


farfield (f=6.85) [1]

Frequency = 6.85  
Main lobe magnitude = 0.0 dB  
Main lobe direction = 180.0 deg.  
Angular width (3 dB) = 66.4 deg.

Theta / Degree vs. dB

P-Field(r=1m) Abs (Phi=0)



farfield (f=10.6) [1]

Frequency = 10.6  
Main lobe magnitude = 0.0 dB  
Main lobe direction = 106.0 deg.  
Angular width (3 dB) = 94.2 deg.  
Side lobe level = -9.3 dB

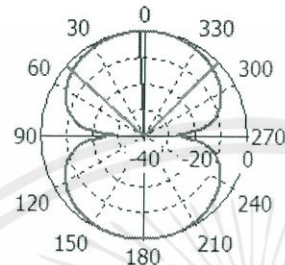
Theta / Degree vs. dB

## รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนบุคคลเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ที่ความถี่ 3.1 GHz, 6.85 GHz และ 10.6 GHz  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต้น 3.1 GHz, ความถี่กลาง 6.85 GHz และความถี่ปลาย 10.6 GHz ถูกแสดงดังรูปที่ 3.8

P-Field(r=1m) Abs (Theta=90)

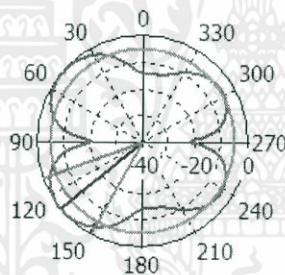


farfield (f=3.1) [1]

Frequency = 3.1  
Main lobe magnitude = 0.0 dB  
Main lobe direction = 3.0 deg.  
Angular width (3 dB) = 93.6 deg.

Phi / Degree vs. dB

P-Field(r=1m) Abs (Theta=90)

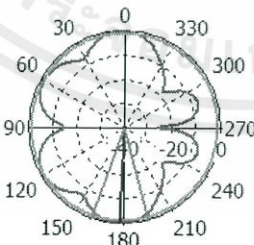


farfield (f=6.85) [1]

Frequency = 6.85  
Main lobe magnitude = 0.0 dB  
Main lobe direction = 130.0 deg.  
Angular width (3 dB) = 41.6 deg.  
Side lobe level = -4.7 dB

Phi / Degree vs. dB

P-Field(r=1m) Abs (Theta=90)



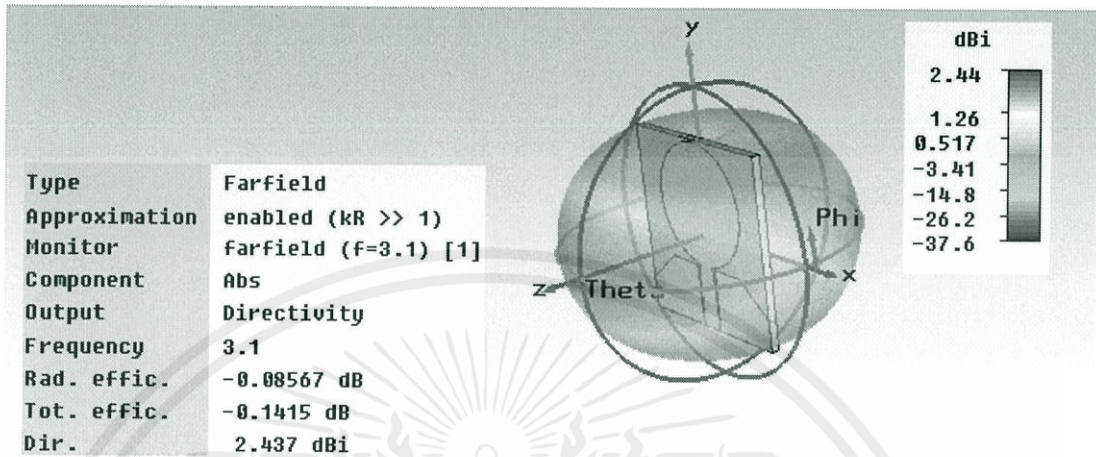
farfield (f=10.6) [1]

Frequency = 10.6  
Main lobe magnitude = 0.0 dB  
Main lobe direction = 178.0 deg.  
Angular width (3 dB) = 35.0 deg.  
Side lobe level = -1.1 dB

Phi / Degree vs. dB

รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็ก  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อเทียบกับสายอากาศ



รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเทียบกับสายอากาศ

จากรูป 3.9 เห็นว่าเมื่อนำกราฟโพลาร์ทั้งสองของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า รูปที่ 3.7 และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็ก รูปที่ 3.8 มาตั้งฉากซึ่งกันและกันก็จะได้กราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เป็นสามมิติ เมื่อนำมาวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่าสายอากาศดังกล่าวมีทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นรอบตัวสายอากาศ

จากผลการจำลองสายอากาศแบบไมโครสตริป จะเห็นได้ว่าผลของการจำลองจะทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ความถี่ 3.1 GHz, 6.85 GHz และ 10.6 GHz เนื่องจากเป็นสายอากาศแบบแถบกว้าง จึงมีแบนด์วิดท์เป็นช่วงกว้าง การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จึงไม่สามารถพิจารณาเฉพาะความถี่ศูนย์กลางได้อย่างสายอากาศแถบความถี่แคบ ดังนั้นสายอากาศนี้จึงพิจารณาที่ความถี่ 3 ช่วงเพื่อให้สามารถพิจารณาค่าพารามิเตอร์ได้ครอบคลุมทั้งแถบความถี่

#### 3.1.1.4 สร้างและทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ

จากการจำลองสายอากาศแบบไมโครสตริป ทำให้ทราบค่าโครงสร้างต่างๆ ของสายอากาศรวมทั้งคุณสมบัติโดยรวมเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในหัวข้อนี้จึงต้องนำค่าดังกล่าวมาสร้างเป็นสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ใช้ติดบนร่างกาย เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติในขั้นตอนต่อไปได้ สำหรับการสร้างสายอากาศแบบไมโครสตริปนั้นมีวิธีสร้าง ดังนี้

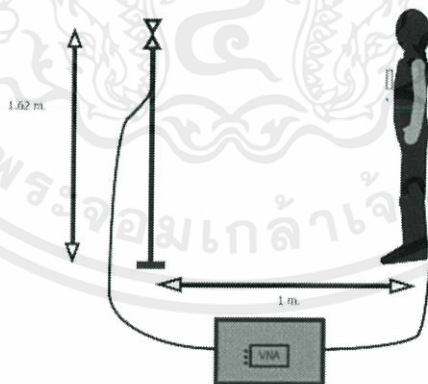
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) นำค่าต่างๆของโครงสร้างของสายอากาศที่ได้จากการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองสายอากาศ CST MICROWAVE STUDIO มาสร้างด้วยขนาดจริง
- 2) นำแบบที่สร้างขึ้นจากข้อที่ 1) สร้างลงบนแผ่น FR4 ที่มีความหนา 1.6 มิลลิเมตร และมีความหนาของทองแดงประมาณ 0.035 มิลลิเมตร
- 3) หลังจากได้แผ่นสายอากาศแล้ว ให้บัดกรีขั้วต่อชนิด SMA 50 โอห์มกับสายนำสัญญาณของสายอากาศ
- 4) ทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่สร้างขึ้นในเรื่องของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็นหลักโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer: VNA) เมื่อคุณสมบัติในเรื่องดังกล่าวผ่านแล้วให้สร้างสายอากาศคู่เหมือนของสายอากาศนั้นอีกอันหนึ่ง เพื่อใช้วิเคราะห์คุณสมบัติอื่นๆต่อไป

### 3.1.2 การออกแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ

#### 3.1.2.1 รูปแบบการวัดผลการทดลอง

ในออกแบบการวัดผลการทดลองในปริภูมิงานนี้ได้แบ่งแบบจำลองการวัดเป็น 3 แบบ คือ แบบที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับสายตา แบบที่สายอากาศมองไม่เห็นกันในระดับสายตา และแบบที่สายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่างซึ่งจะมีรูปแบบดังนี้



รูปที่ 3.10 แบบจำลองการวัดผล

- 1) แบบจำลองการวัดผลกรณีที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับ

สายตา (line of sight) รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดผลแบบจำลองนี้จะใช้สายอากาศภาคส่งตั้งอยู่ด้านหน้าของร่างกายซึ่งห่างออกไป 1 เมตร และสายอากาศภาครับติดด้านหน้าของร่างกายในจุดต่างๆที่กำหนดไว้รวม 10 จุด ซึ่งในแต่ละจุดจะติดไว้ในส่วนต่างๆของร่างกายตามตารางที่ 3.1 โดยให้สายอากาศทางด้านภาครับหันออกจากร่างกายและอยู่ตามจุดที่กำหนดไว้ดังรูปที่ (3.10) และรูปที่ (3.11)



รูปที่ 3.11 กำหนดจุดสำหรับการวัดผลบนร่างกายมนุษย์กรณี  
ที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับสายตา



รูปที่ 3.12 การวัดผลบนร่างกายมนุษย์กรณี  
ที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับสายตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

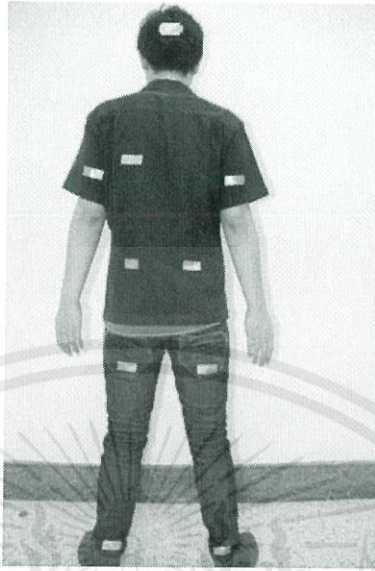
ตารางที่ 3.1 ความสูงของสายอากาศและระยะห่างของสายอากาศด้านรับและด้านส่งตาม  
แบบจำลองกรณีที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับสายตา

จุดที่	ความสูงของสายอากาศด้านรับจากพื้น (เซนติเมตร)	ระยะห่างของสายอากาศด้านรับ และด้านส่ง (เซนติเมตร)
1	162	100
2	120	108.6
3	115	112
4	115	112
5	100	118.1
6	100	118.1
7	70	136.4
8	70	136.4
9	15	157.7
10	15	157.7

2) แบบจำลองการวัดผลกรณีที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับ  
สายตา (non line of sight)

ในการวัดผลแบบจำลองนี้ จะใช้สายอากาศภาคส่งตั้งอยู่  
ด้านหน้าของร่างกายซึ่งห่างออกไป 1 เมตร และสายอากาศภาครับติดตั้งด้านหลังของร่างกายในจุด  
ต่างๆที่กำหนดไว้รวม 10 จุด ซึ่งในแต่ละจุดจะติดตั้งในส่วนต่างๆของร่างกายตามตารางที่ 3.2 โดย  
ให้สายอากาศภาครับหันเข้าร่างกายและอยู่ตามจุดที่กำหนดไว้ดังรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 กำหนดจุดสำหรับการวัดผลบนร่างกายมนุษย์กรณีที่  
สายอากาศมองไม่เห็นกันในระดับสายตา



รูปที่ 3.14 การวัดผลบนร่างกายมนุษย์กรณีที่  
สายอากาศมองไม่เห็นกันในระดับสายตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ความสูงของสายอากาศและระยะห่างของสายอากาศด้านรับและด้านส่งตามแบบจำลองกรณีที่สายอากาศมองไม่เห็นกันในระดับสายตา

จุดที่	ความสูงของสายอากาศด้านรับจากพื้น (เซนติเมตร)	ระยะห่างของสายอากาศด้านรับ และด้านส่ง (เซนติเมตร)
1	162	100
2	120	108.6
3	115	112
4	115	112
5	100	118.1
6	100	118.1
7	70	136.4
8	70	136.4
9	15	157.7
10	15	157.7

3) แบบจำลองการวัดผลกรณีที่สายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง  
ในการวัดผลแบบจำลองนี้ จะใช้สายอากาศภาคส่งและรับติดตั้ง  
ทั้งในระดับความสูงและระยะห่างเท่าเดิมตามแบบจำลองทั้งสองก่อนหน้านี้ แต่จะไม่มีร่างกาย  
มนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้องในการวัดช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แบบจำลองจริงสำหรับการวัดผลบนร่างกายมนุษย์กรณีที่สายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

การออกแบบพารามิเตอร์ในการจำลองการวัดช่องสัญญาณ ในลักษณะที่ช่องสัญญาณมีการสะท้อนของสัญญาณ มีการกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดดังตารางที่ 3.3 โดยเลือกช่วงความถี่เป็น 3 GHz – 11 GHz เนื่องจากต้องการให้ครอบคลุมช่วงความถี่ของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง จำนวนจุดความถี่เป็น 801 จุด เนื่องจากเป็นจำนวนจุดสูงสุดที่เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์สามารถวัดได้ ซึ่งจำนวนจุดยิ่งมากจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดมากขึ้น ลักษณะการวางสายอากาศในแนวตั้ง เนื่องจากสายอากาศที่ใช้ทั้งภาครับและภาคส่งให้แบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางในแนวระนาบ ดังนั้นจึงเลือกวางสายอากาศในแนวตั้ง เพื่อให้ง่ายต่อการติดตั้ง ประเภทของสายอากาศภาคส่งจะใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ เนื่องจากต้องการสายอากาศที่มีเกนสูงในการส่งสัญญาณ ส่วนประเภทของสายอากาศภาครับจะใช้สายอากาศไมโครสตริป ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.1.1.1 นั้นเอง

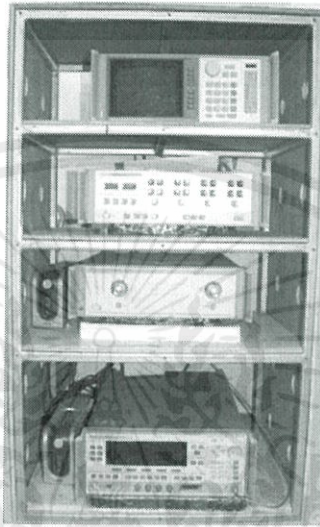
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดช่องสัญญาณ

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดสอบ
ช่วงความถี่	3 – 11 GHz
ประเภทสายอากาศส่ง	สายอากาศแบบกรวยคู่
ประเภทสายอากาศรับ	สายอากาศแบบไมโครสตริป
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
การวางสายอากาศด้านส่ง	แนวตั้ง
การวางสายอากาศด้านรับ	แนวตั้ง
ความสูงของสายอากาศด้านส่ง	1.62 เมตร
ความสูงของสายอากาศด้านรับ	เปลี่ยนตามตำแหน่งบนร่างกาย
จำนวนจุดที่วัดบนร่างกาย	10 จุด
ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งกับร่างกาย	1 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์



รูปที่ 3.16 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

จากรูปที่ 3.16 จะเห็นว่าเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์มีอุปกรณ์อื่นๆ ประกอบอยู่ด้วยโดยรายชื่อเครื่องที่ประกอบอยู่เมื่อเรียงลำดับจากบนลงล่าง คือ

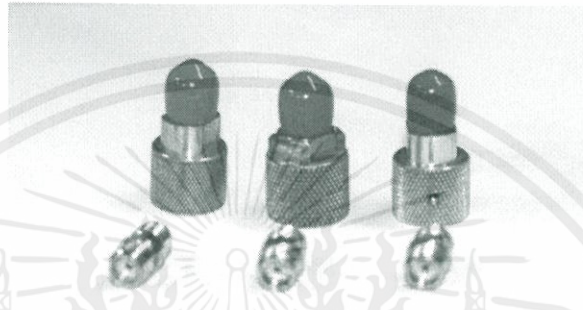
- 1) จอแสดงผล (Monitor)
- 2) ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-Parameter Test)
- 3) เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองพอร์ต (Network Analyzer)
- 4) เครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Synthesized Sweeper)

ระบบของการทดสอบนั้นองค์ประกอบสำคัญในการทดสอบช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นจะใช้เครื่องทดสอบเฉพาะซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น HP-8510C ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-parameter test set) รุ่น HP-8514B และเครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesized sweeper) รุ่น HP-83620A เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.16 ซึ่งจะถูกรวบรวมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ที่เชื่อมต่อผ่านช่องสื่อสารแบบ GPIB (General purpose interface bus) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่สามารถทดสอบสัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ต ซึ่งในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบแบบสองพอร์ตโดยพอร์ตที่หนึ่งคือพอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ส่วนพอร์ตสองจะใช้ในการรับสัญญาณ โดยที่ปลายของพอร์ตทั้งสองจะถูกต่อด้วยสายอากาศ และทำการทดสอบในโดเมนความถี่ก่อนที่จะถูกนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ชุด Calibrate

ชุด Calibrate ดังรูปที่ 3.17 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับ calibrate กับสายนำสัญญาณ เพื่อไม่ให้สายนำสัญญาณไปมีผลต่อการวัดสายอากาศ หรือเป็นการกำจัดสัญญาณรบกวนออกจากสายนำสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วย open, short และ load 50 โอห์ม



รูปที่ 3.17 ชุด Calibrate

### 3.2.3 สายนำสัญญาณ

สายนำสัญญาณ ดังรูปที่ 3.18 เป็นสายสัญญาณที่ปลายด้านหนึ่งถูกเชื่อมเข้ากับพอร์ตของเครื่องวิเคราะห์โคจรข่ายแบบเวกเตอร์ และปลายอีกด้านหนึ่งเชื่อมต่อเข้ากับสายอากาศ เพื่อใช้ในการวัดสัญญาณ โดยจะต่อสายนำสัญญาณเข้ากับพอร์ตของเครื่องวิเคราะห์โคจรข่ายแบบเวกเตอร์ ทั้งสองพอร์ต ซึ่งพอร์ตที่หนึ่งเป็นพอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ส่วนพอร์ตสองจะใช้ในการรับสัญญาณ



รูปที่ 3.18 สายนำสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 คอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.19 จะใช้สำหรับเก็บข้อมูลจากการวัดสัญญาณหรือเก็บข้อมูลที่ถูกระบุแสดงบนจอมอนิเตอร์ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์นี้จะเชื่อมผ่านช่องสื่อสารแบบ GPIB ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถทดสอบสัญญาณในโครงข่ายแบบหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ตได้

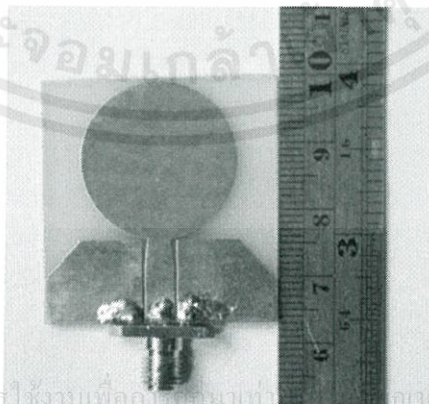


รูปที่ 3.19 คอมพิวเตอร์

### 3.2.5 สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ

#### 1) สายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปดังรูปที่ 3.20 เป็นสายอากาศที่สร้างขึ้นตอบสนองความถี่กว้าง ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในความถี่ย่านตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว ใช้ในการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ และใช้เป็นตัวรับสัญญาณบนร่างกาย

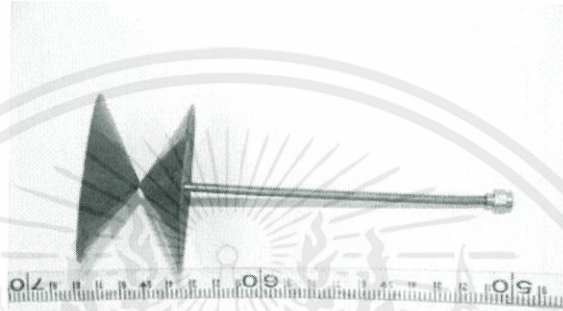


รูปที่ 3.20 สายอากาศแบบไมโครสตริป

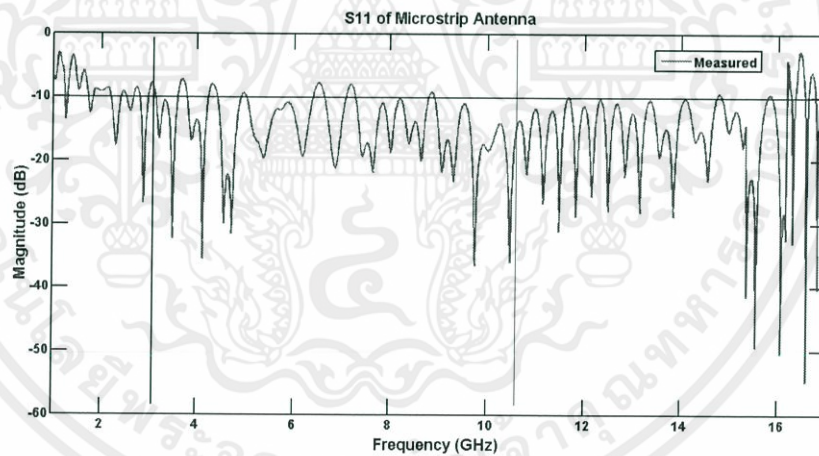
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น หากท่านใดต้องการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) สายอากาศแบบกรวยคู่

สายอากาศแบบกรวยคู่ดังรูปที่ 3.21 เป็นสายอากาศที่ตอบสนองความถี่กว้าง ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในความถี่ย่านตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว ใช้เป็นตัวส่งสัญญาณไปยังสายอากาศรับบนร่างกาย มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ดังรูปที่ 3.22 และ 3.23

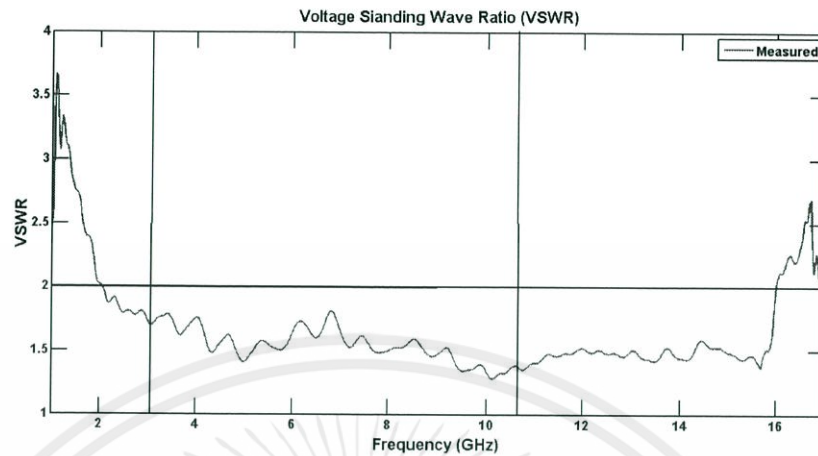


รูปที่ 3.21 สายอากาศแบบกรวยคู่



รูปที่ 3.22 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศกรวยคู่

### 3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

ในการจัดเก็บผลการทดลองนี้จะแบ่งการจัดเก็บผลการทดลองออกเป็น 5 ส่วนคือ การจัดเก็บผลการทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริป การจัดเก็บผลการวัดช่องสัญญาณในลักษณะที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับสายตา การจัดเก็บผลการวัดช่องสัญญาณในลักษณะที่สายอากาศมองไม่เห็นกันในระดับสายตา การจัดเก็บผลการวัดช่องสัญญาณในลักษณะที่สายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง และการจัดเก็บผลการวัดช่องสัญญาณในลักษณะรอบทิศทาง สำหรับการจัดเก็บผลจะใช้สัญญาณส่งในช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz

#### 3.3.1 การจัดเก็บผลการทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศแบบไมโครสตริป

การจัดเก็บผลคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป มีวิธีการดำเนินการและการจัดเก็บผล โดยแยกวิธีการตามพารามิเตอร์ที่จะทำการจัดเก็บผล ดังนี้

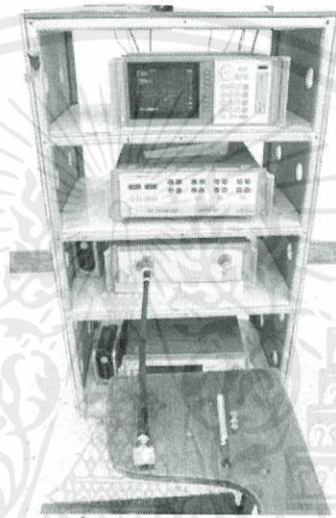
3.3.1.1 การจัดเก็บผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ค่าอิมพีแดนซ์ และเฟสของสายอากาศ มีขั้นตอนการทดสอบ ดังต่อไปนี้

1) เปิดเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ โดยเริ่มเปิดจากเครื่องสังเคราะห์ความถี่ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองพอร์ต ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย และจอแสดงผล ตามลำดับ พร้อมตั้งค่าช่วงความถี่ จำนวนจุด และค่าอื่นๆของตัวเครื่อง

2) นำหัว Calibrate ต่อเข้ากับสายนำสัญญาณของพอร์ตที่ 1 แล้ว โดยเริ่มจาก Open, Short และ Load 50 โอห์ม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 2) นำหัว Calibrate ต่อเข้ากับสายนำสัญญาณของพอร์ตที่ 1 แล้ว โดยเริ่มจาก Open, Short และ Load 50 โอห์ม ตามลำดับ

- พอร์ตที่ 1
- 3) นำสายอากาศแบบไมโครสตริปต่อเข้ากับสายนำสัญญาณของ
  - 4) จัดเก็บผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ค่าอิมพีแดนซ์ และเฟสของสายอากาศไมโครสตริป
  - 5) วิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของสายอากาศไมโครสตริป



รูปที่ 3.24 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป

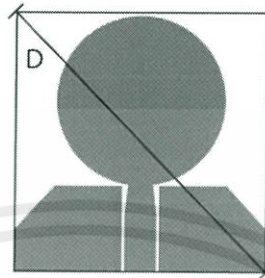
3.3.1.2 การจัดเก็บผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยการทดสอบดังกล่าวมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) คำนวณหาสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริป โดยการคำนวณหาสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปนั้น ต้องดูจากขนาดของสายอากาศว่ามีมิติที่ยาวที่สุด (D) มาใช้คำนวณค่าสนามระยะไกล ซึ่งเมื่อได้ค่าสนามระยะไกลแล้ว การติดตั้งสายอากาศจะติดตั้งไกลกว่าระยะของสนามระยะไกลเล็กน้อย

ทำการวัดเส้นทแยงมุมของสายอากาศเป็นระยะที่ยาวที่สุดของตัวสายอากาศ เนื่องจากความแผ่สายอากาศบางมากจึงไม่นำมาพิจารณา ได้ D มีค่าเท่ากับ 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.24 คำนวณหาระยะของสนามระยะไกลจะได้ 0.18 เมตร ดังการคำนวณต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{3 \times 10^8}{10.6 \times 10^9} = 0.0283m$  ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{farfield} = \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \times (5 \times 10^{-2})^2}{0.0283} = 0.18m$$



รูปที่ 3.25 ระยะที่ยาวที่สุดของตัวสายอากาศไมโครสตริป

2) ติดตั้งสายอากาศไมโครสตริปคู่เหมือนเป็นสายอากาศตัวส่ง และตัวรับสัญญาณ โดยวางในระนาบสนามไฟฟ้า คือวางสายอากาศในแนวตั้งฉากกับพื้นโลก ให้ระดับความสูงของสายอากาศเท่ากัน และหันหน้าเข้าหากัน โดยให้มีระยะห่างกันเป็นสองเท่าของสนามระยะไกลที่ได้คำนวณ เนื่องจากสะดวกต่อการติดตั้งสายอากาศ ดังนั้นจะวางสายห่างกัน 0.35 เมตร และใช้การ Calibrate แบบ Full two-port สำหรับการเก็บค่าพารามิเตอร์

3) หมุนสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ตัวรับทีละ 5 องศา

4) จัดเก็บผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไมโครสตริป โดยในขณะที่หมุนสายอากาศทีละ 5 องศา ให้ทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์  $S_{21}$  ที่ความถี่ต้น 3.1 GHz ความถี่กลาง 6.85 GHz และความถี่ปลาย 10.6 GHz

5) ทำซ้ำข้อที่ 1 – 2 อีกครั้งแต่จะทำการติดตั้งสายอากาศแบบไมโครสตริปใหม่ โดยวางสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก คือวางสายอากาศในแนวขนานกับพื้นโลก ให้ระดับความสูงของสายอากาศเท่ากัน หันหน้าเข้าหากัน และระยะห่าง 0.35 เมตร

6) หมุนสายอากาศไมโครสตริปที่ตัวรับทีละ 5 องศา

7) จัดเก็บผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป โดยในขณะที่หมุนสายอากาศทีละ 5 องศา ให้ทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์  $S_{21}$  ที่ความถี่ 3.1 GHz ความถี่ 6.85 GHz และความถี่ 10.6 GHz

8) นำข้อมูลที่บันทึกค่ามาพลอตกราฟดูแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

9) จากข้อ 7) นำข้อมูลที่บันทึกค่ามาคำนวณหาค่าอัตราขยายจาก

สมการที่ 3.1

$$G_{or} + G_{or} = 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายใน (ไม่อนุญาตให้เผยแพร่) หากนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10) จัดเก็บผลอัตราขยายที่ความถี่ต้น 3.1 GHz ความถี่กลาง 6.85 GHz และความถี่ปลาย 10.6 GHz ของสายอากาศไมโครสตริป

### 3.3.2 การจัดเก็บผลการวัดช่องสัญญาณในลักษณะที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับสายตา (line-of-sight)

- 1) ติดตั้งสายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศที่ใช้ส่งสัญญาณที่ความสูง 1.62 เมตร และติดตั้งสายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณติดไว้ด้านหลังในตำแหน่งต่างๆของร่างกายโดยใช้การ Calibrate แบบ Full two-port สำหรับการเก็บค่าพารามิเตอร์
- 2) ให้ระยะห่างระหว่างคนยืนและขาตั้งของสายอากาศตัวส่งห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร โดยให้คนยืนหันหน้าเข้าหาสายอากาศตัวส่งเสมอ
- 3) เปลี่ยนตำแหน่งสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้เป็นตัวรับสัญญาณไปยังตำแหน่งต่างๆ พร้อมกับวัดค่าพารามิเตอร์ในตำแหน่งต่างๆ
- 4) จัดเก็บผลการทดลอง และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หา magnitude, phase, path loss และ power delay profile ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB

### 3.3.3 การจัดเก็บผลการวัดช่องสัญญาณในลักษณะที่สายอากาศมองไม่เห็นกันในระดับสายตา (non line-of-sight)

- 1) ติดตั้งสายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศที่ใช้ส่งสัญญาณที่ความสูง 1.62 เมตร และติดตั้งสายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณติดไว้ด้านหลังในตำแหน่งต่างๆของร่างกาย โดยใช้การ Calibrate แบบ Full two-port สำหรับการเก็บค่าพารามิเตอร์
- 2) ให้ระยะห่างระหว่างคนยืนและขาตั้งของสายอากาศตัวส่งห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร โดยให้คนยืนหันหน้าเข้าหาสายอากาศตัวส่งเสมอ
- 3) เปลี่ยนตำแหน่งสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ใช้เป็นตัวรับสัญญาณไปยังตำแหน่งต่างๆ พร้อมกับวัดค่าพารามิเตอร์ในตำแหน่งต่างๆ ซึ่งได้แก่ส่วนศีรษะ หัวใจ ต้นแขน ด้านซ้ายและขวา เอวด้านซ้ายและขวา ต้นขาด้านซ้ายและขวา ข้อเท้าด้านซ้ายและขวา
- 4) จัดเก็บผลการทดลอง และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หา magnitude, phase, path loss และ power delay profile ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การจัดเก็บผลการวัดช่องสัญญาณในลักษณะที่สายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

- 1) ติดตั้งสายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศที่ใช้ส่งสัญญาณที่ความสูง 1.62 เมตร และติดตั้งสายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่รับสัญญาณติดในพื้นที่ว่างโดยไม่มีตัวคนเข้ามาเกี่ยวข้อง และมีตำแหน่งของสายอากาศเหมือนกับกรณีที่สายอากาศมองเห็นและไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยใช้การ Calibrate แบบ Full two-port สำหรับการเก็บค่าพารามิเตอร์
- 2) ให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร ตามแนวขนานกับพื้นโลกโดยให้สายอากาศตัวรับหันหน้าเข้าหาสายอากาศตัวส่งเสมอ
- 3) เปลี่ยนตำแหน่งสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ใช้เป็นตัวรับสัญญาณไปยังตำแหน่งต่างๆ พร้อมกับวัดค่าพารามิเตอร์ในตำแหน่งต่างๆ
- 4) จัดเก็บผลการทดลอง และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หา magnitude, phase, path loss และ power delay profile ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB

### 3.3.5 การจัดเก็บผลการวัดช่องสัญญาณในลักษณะรอบทิศทาง

- 1) ติดตั้งสายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศที่ใช้ส่งสัญญาณที่ความสูง 1.62 เมตร และติดตั้งสายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่รับสัญญาณติดไว้ด้านหน้าในตำแหน่งต่างๆของร่างกาย โดยใช้การ Calibrate แบบ Full two-port สำหรับการเก็บค่าพารามิเตอร์
- 2) ให้ระยะห่างระหว่างคนยืนและขาตั้งของสายอากาศตัวส่งห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร หลังจากนั้นบันทึกผลโดยเปลี่ยนมุมทุกๆ 5 องศา
- 3) เปลี่ยนตำแหน่งสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้เป็นตัวรับสัญญาณไปยังตำแหน่งต่างๆบนร่างกาย และทำซ้ำในข้อ 2
- 4) จัดเก็บผลการทดลองและนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หา magnitude และ phase ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

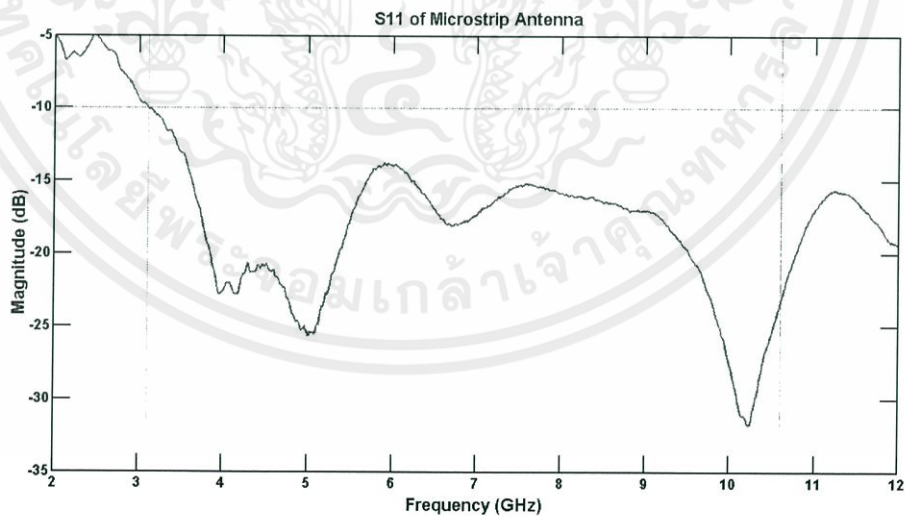
### ผลการทดลอง

จากการออกแบบการจัดเก็บผลการวัดและการจำลองของช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ด้วยกรณีมองเห็นในระดับสายตา กรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา และกรณีที่สายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่างในบทที่ 3 ได้มีการดำเนินการจัดเก็บผลการทดสอบ โดยแบ่งเป็น ผลการทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพสายอากาศแบบไมโครสตริป ผลจากการวัดช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย และกรณีสายอากาศส่งอยู่ตรงกันกับสายอากาศรับในตำแหน่งต่างๆของร่างกาย ซึ่งแต่ละกรณีจะประกอบไปด้วยแบบมองเห็นกันในระดับสายตา และแบบไม่สามารถมองเห็นกันในระดับสายตา

#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศแบบไมโครสตริป

จากการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแบบไมโครสตริป ได้ผลการทดสอบ ดังนี้

##### 4.1.1 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแบบไมโครสตริป



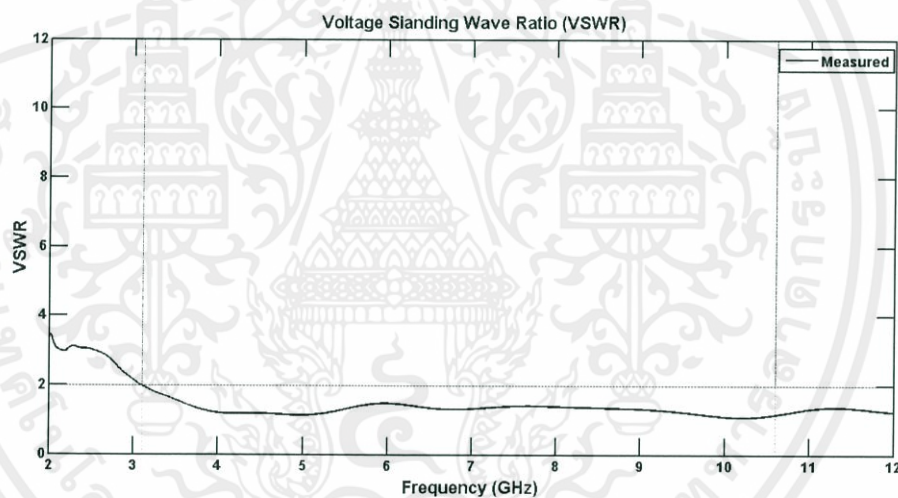
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบ  $S_{11}$  ของสายอากาศแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศแบบไมโครสตริป ดังรูปที่ 4.1 พบว่า ผลการทดสอบช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 12 GHz มีค่าต่ำกว่า -10 dB นั้นหมายความว่าสายอากาศแบบไมโครสตริปนั้นสามารถแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่ 3.1 – 10.6 GHz ได้ ดังนั้นสายอากาศดังกล่าวจึงสามารถใช้งานในช่วงความถี่นี้ได้

#### 4.1.2 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศแบบไมโครสตริป

จากการทดสอบพารามิเตอร์ VSWR ของสายอากาศแบบไมโครสตริป ดังรูปที่ 4.2 พบว่า ผลการทดสอบช่วงความถี่ 3.1 - 12 GHz มีค่าต่ำกว่า 2 นั้นหมายความว่าสายอากาศแบบไมโครสตริปนั้นสามารถแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่ 3.1 - 10.6 GHz ได้ ดังนั้นสายอากาศดังกล่าวจึงสามารถใช้งานในช่วงความถี่นี้ได้



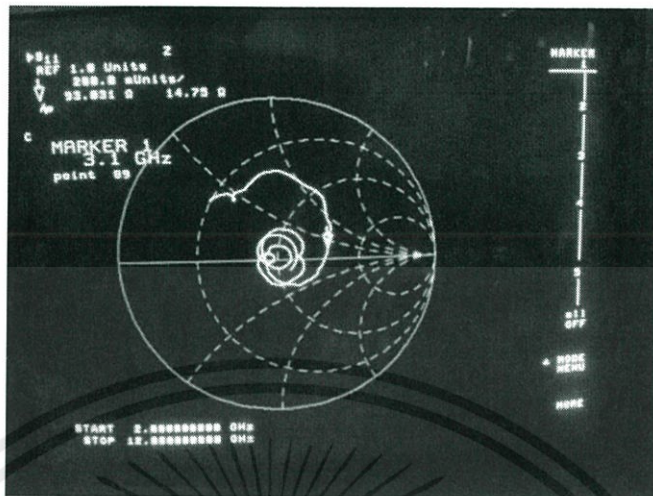
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบ VSWR ของสายอากาศแบบไมโครสตริป

#### 4.1.3 ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบไมโครสตริป

จากการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบไมโครสตริปได้ผลการทดสอบดังรูป

ที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

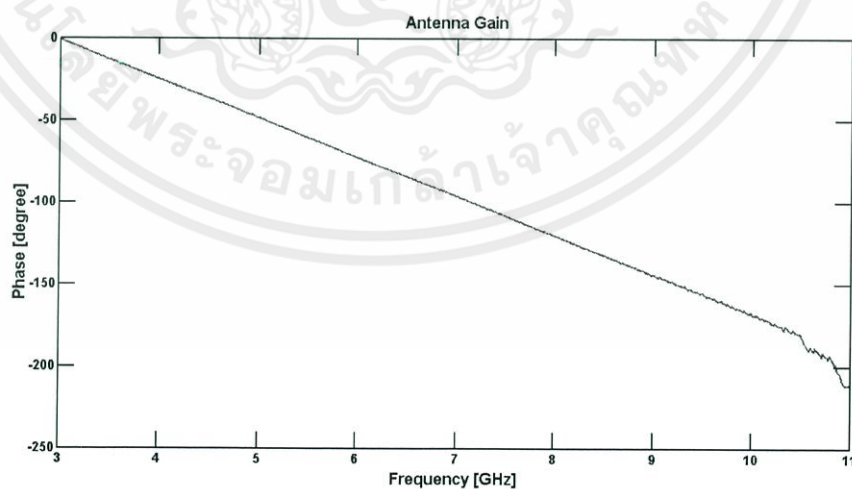


รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบไมโครสตริป

จากรูปที่ 4.3 การทดสอบค่าของอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบไมโครสตริป แสดงให้เห็นในช่วงของความถี่ 2 – 12 GHz จะพบว่าในช่วงความถี่ประมาณ 3 – 12 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอยู่ในระดับของเส้นประวงกลมที่ 2 จากด้านในหรือมีค่าอิมพีแดนซ์อยู่ที่ 50 โอห์ม นั่นเอง ดังนั้นสายอากาศแบบไมโครสตริปจึงค่อนข้างจะแมตซ์หรือสามารถแพร่กระจายคลื่นได้โดยมีการสะท้อนกลับของสัญญาณเพียงเล็กน้อย

#### 4.1.4 ผลการทดสอบค่าเฟสของสายอากาศแบบไมโครสตริป

จากการทดสอบค่าเฟสของสายอากาศแบบไมโครสตริปได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.4



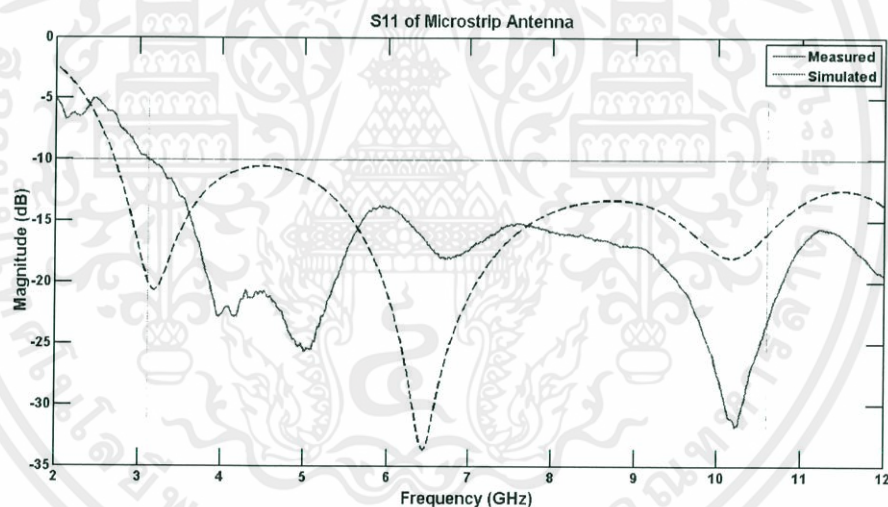
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าเฟสของสายอากาศแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 การทดสอบค่าเฟสของสายอากาศแบบไมโครสตริป จากผลการทดสอบ นำมาวิเคราะห์ผล พบว่า ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึงประมาณ 10 GHz มีความเป็นเชิงเส้น เนื่องจากสายอากาศสามารถรับส่งคลื่นได้ดีในช่วงนี้ แต่ในช่วงความถี่ประมาณ 10 GHz – 11 GHz มีสัญญาณรบกวนอยู่ ซึ่งพบว่าสาเหตุมาจากการวัด เช่น การ Calibrate เครื่องมือวัด หรือ สายนำสัญญาณที่ใช้มีปัญหาในช่วงความถี่นั้นๆ เป็นต้น

#### 4.1.5 ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) ระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบของสายอากาศแบบไมโครสตริป

จากผลระหว่างการจำลองและการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแบบไมโครสตริป ดังรูปที่ 4.5 พบว่า มีลักษณะที่แตกต่างกัน แต่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานทั้ง 2 แบบ ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดในการสร้างสายอากาศหรือการวัดผล

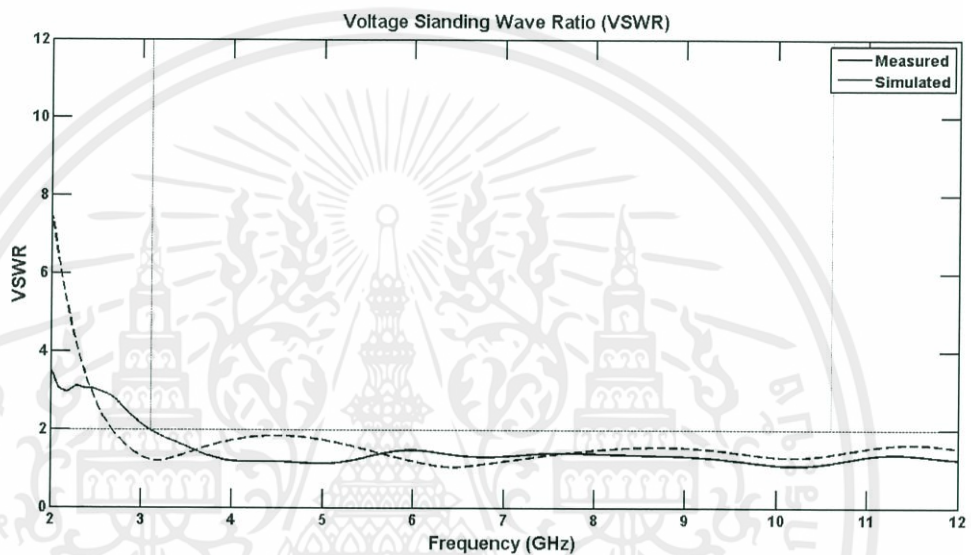


รูปที่ 4.5 ผลระหว่างการจำลองและการทดสอบค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.6 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบของสายอากาศแบบไมโครสตริป

จากผลระหว่างการจำลองและการทดสอบค่า VSWR ของสายอากาศแบบไมโครสตริป ดังรูปที่ 4.6 พบว่า มีลักษณะที่แตกต่างกันเล็กน้อย แต่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานทั้ง 2 แบบ ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดในการสร้างสายอากาศ หรือการวัดผล



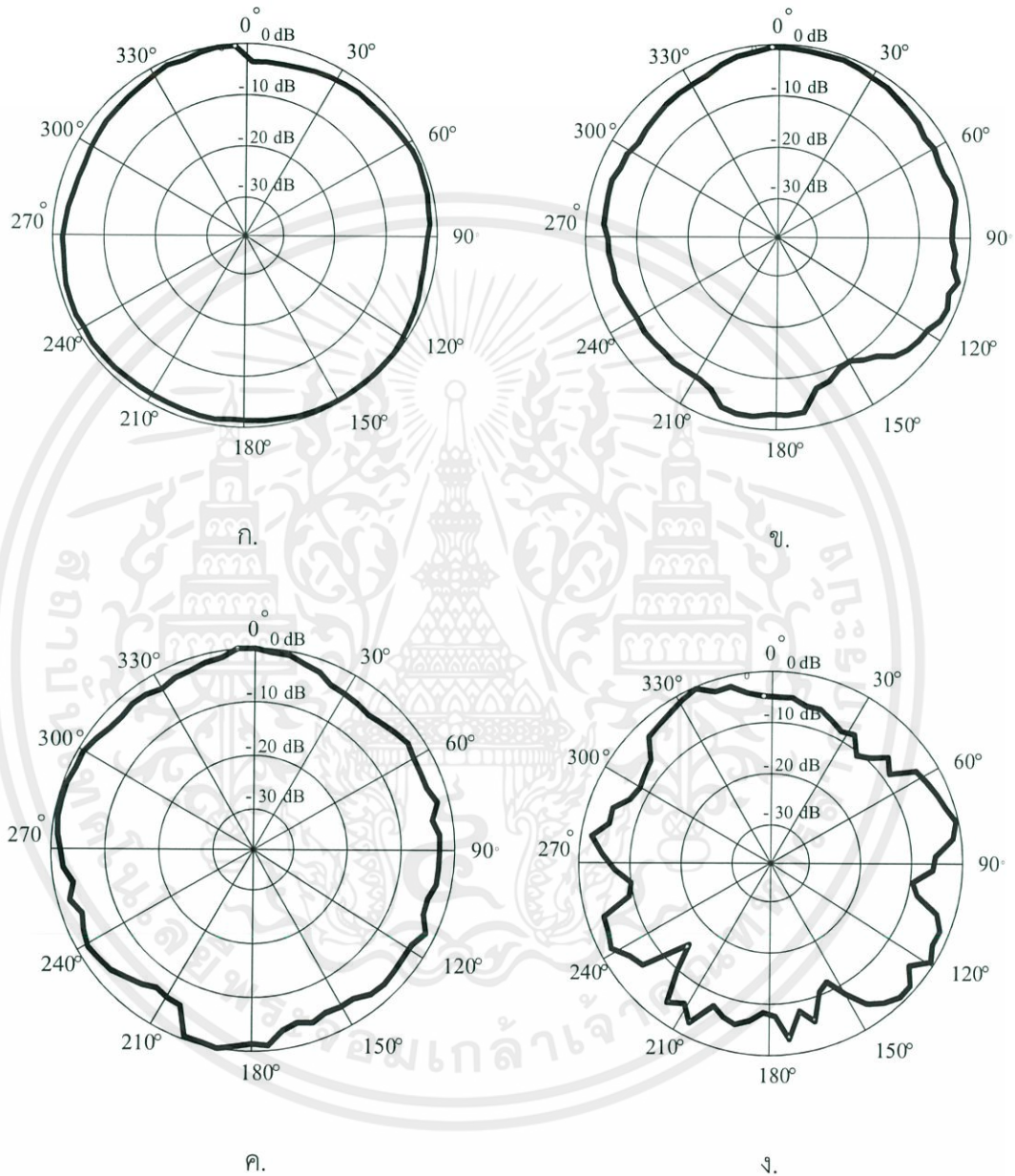
รูปที่ 4.6 ผลระหว่างการจำลองและการทดสอบค่า VSWR ของสายอากาศแบบไมโครสตริป

#### 4.1.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไมโครสตริป

จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ความถี่ต้น 3.1 GHz ความถี่กลาง 6.85 GHz และความถี่ปลาย 10.6 GHz พบว่าสายนำสัญญาณที่ใช้มีปัญหาตั้งแต่ช่วงความถี่ 9 GHz ขึ้นไป จึงไม่สามารถวัดผลที่แท้จริงที่ความถี่ 10.6 GHz ได้ ดังนั้นผู้ทดลองจึงวัดสัญญาณที่ความถี่ 8 GHz ซึ่งเป็นความถี่สูงสุดที่ใช้ได้แทน โดยได้ผลการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ผลการทดสอบเมื่อวางสายอากาศแบบไมโครสตริปในระนาบสนามไฟฟ้านั้นคือวงแนวขนานกับพื้นโลก ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ก. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 3.1 GHz

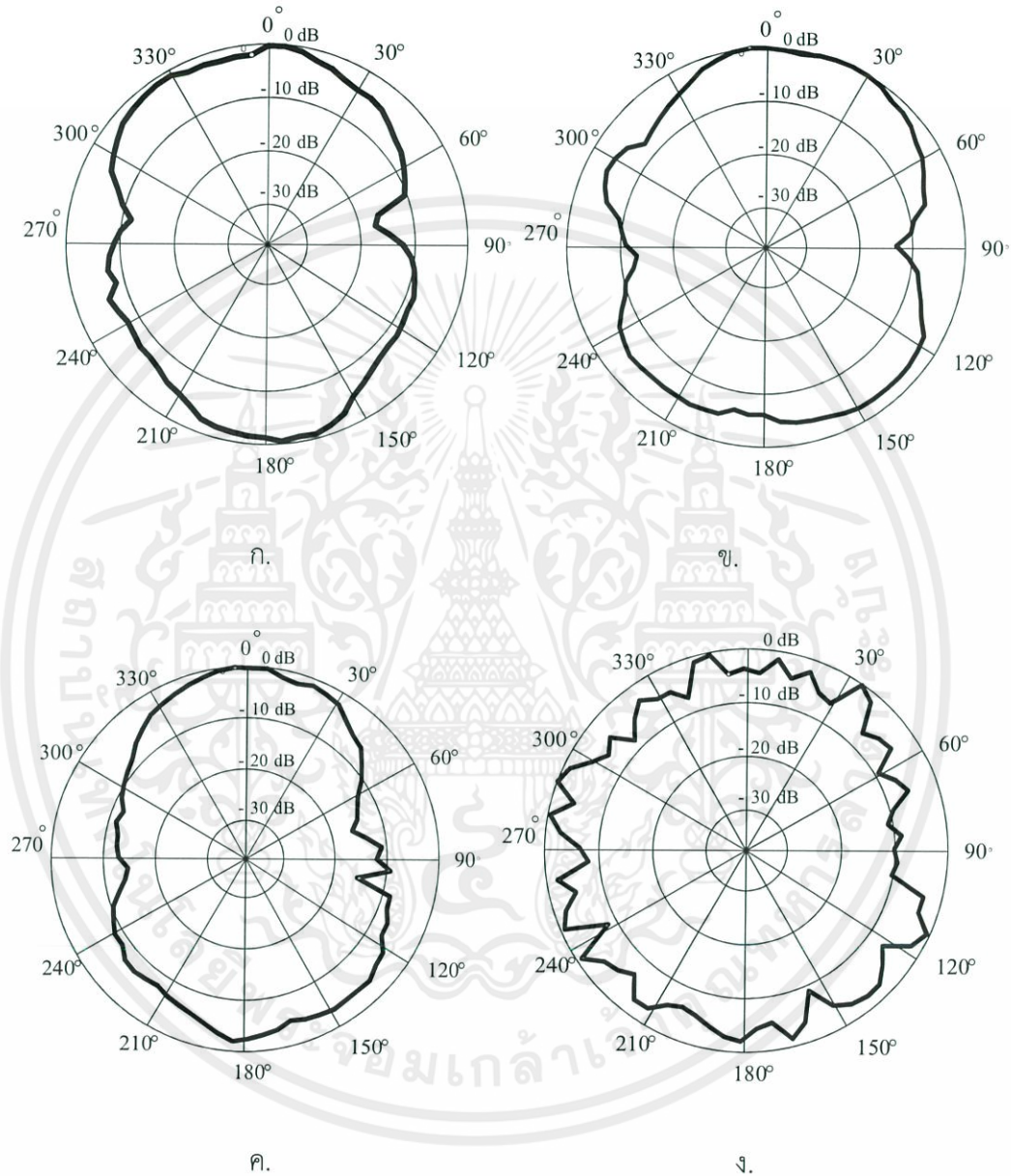
ข. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 6.85 GHz

ค. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 8 GHz

ง. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 10.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ผลการทดสอบเมื่อวางสายอากาศแบบไมโครสตริปในระนาบสนามแม่เหล็ก นั่นคือวางแนวตั้งฉากกับพื้นโลก ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ก. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.1 GHz

ข. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 6.85 GHz

ค. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 8 GHz

ง. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นสังกัด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ผลอัตราขยายที่ความถี่ต้น 3.1 GHz ความถี่กลาง 6.85 GHz ความถี่ 8 GHz และความถี่ปลาย 10.6 GHz ของสายอากาศไมโครสตริป

อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่ 3.1 GHz สามารถคำนวณได้ดังนี้

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

เมื่อ  $G_t = G_r$ ;

$$2G_r = 20 \log \left( \frac{4\pi \times 0.35}{3 \times 10^8 / 3.1 \times 10^9} \right) - 37.7$$

$$G_r = -2.275$$

อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่ 6.85 GHz สามารถคำนวณได้ดังนี้

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

$$2G_r = 20 \log \left( \frac{4\pi \times 0.35}{3 \times 10^8 / 6.85 \times 10^9} \right) - 35.5$$

$$G_r = 2.268$$

อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่ 8 GHz สามารถคำนวณได้ดังนี้

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

$$2G_r = 20 \log \left( \frac{4\pi \times 0.35}{3 \times 10^8 / 8 \times 10^9} \right) - 36.4$$

$$G_{0r} = 2.492$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่ 10.6 GHz สามารถคำนวณได้ดังนี้

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

$$2G_r = 20 \log \left( \frac{4\pi \times 0.35}{3 \times 10^8 / 10.6 \times 10^9} \right) - 47$$

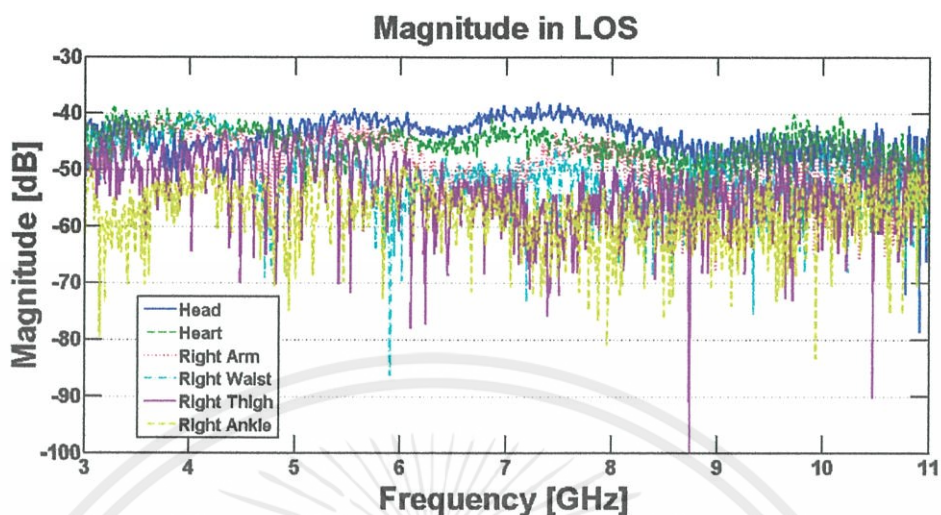
$$G_r = -3.171$$

#### 4.2 ผลจากการวัดช่องสัญญาณบนร่างกายกรณีมองเห็นในระดับสายตา และกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย และกรณีที่สายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

จากการออกแบบจำลองในการวัดช่องสัญญาณกรณีมองเห็นในระดับสายตา กรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา กรณีที่สายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง และการรับสัญญาณรอบทิศทาง ซึ่งในแต่ละกรณีจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ-ส่งเป็นระยะ 1 เมตร โดยจะนำข้อมูลที่ได้ออกการวัดมาทำการวิเคราะห์สัญญาณและเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างแบบจำลอง เพื่อศึกษาขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ (Magnitude) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน (Phase) การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน

##### 4.2.1 ผลจากการวัดช่องสัญญาณบนร่างกายกรณีมองเห็นในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

การวัดช่องสัญญาณบนร่างกายกรณีมองเห็นในระดับสายตาจะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างจุดต่างๆ ของด้านหน้าร่างกายมนุษย์ ได้แก่ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน การสูญเสียเชิงวิถี และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.9 - 4.12 และตารางที่ 4.1 - 4.2



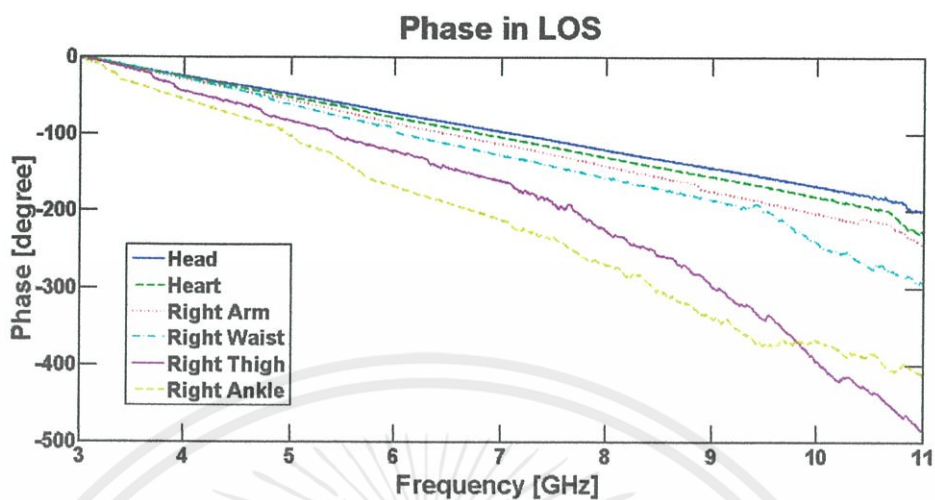
รูปที่ 4.9 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

ตารางที่ 4.1 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา

ตำแหน่ง	Max Magnitude (dB)	Min Magnitude (dB)	Mean Magnitude (dB)
ศีรษะ	-38.0499	-78.6576	-58.3538
หัวใจ	-39.0079	-63.7854	-51.3967
ต้นแขนขวา	-38.9678	-70.7617	-54.8648
ต้นแขนซ้าย	-40.1688	-67.9464	-54.0576
เอวขวา	-38.1249	-76.7048	-57.4149
เอวซ้าย	-39.3687	-86.2169	-62.7928
ต้นขาขวา	-42.2544	-81.5969	-61.9257
ต้นขาซ้าย	-41.143	-104.469	-72.8062
ข้อเท้าขวา	-46.1478	-82.0223	-64.0851
ข้อเท้าซ้าย	-45.5993	-83.249	-64.4242

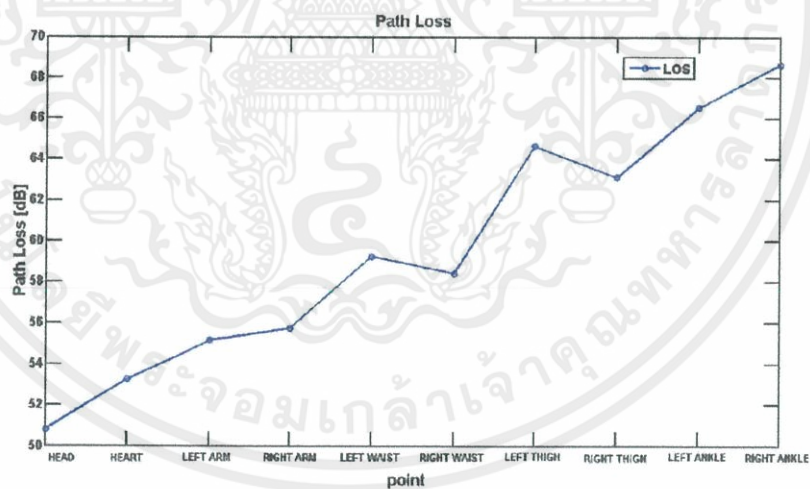
จากรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.1 จะพบว่าขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา ที่ตำแหน่งศีรษะจะมีค่ามากที่สุดประมาณ -38 เดซิเบล และที่ตำแหน่งต้นขาจะมีค่าน้อยที่สุดประมาณ -104 เดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

จากรูปที่ 4.10 จะพบว่าเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองเห็นในระดับสายตานั้น ที่ตำแหน่งศีรษะจะมีความเป็นเชิงเส้นมากกว่าตำแหน่งอื่นๆ ส่วนในตำแหน่งต้นขาและข้อเท้าจะไม่ค่อยเป็นเส้นตรง เนื่องจากอยู่ไกลกว่าบริเวณอื่นๆ มาก

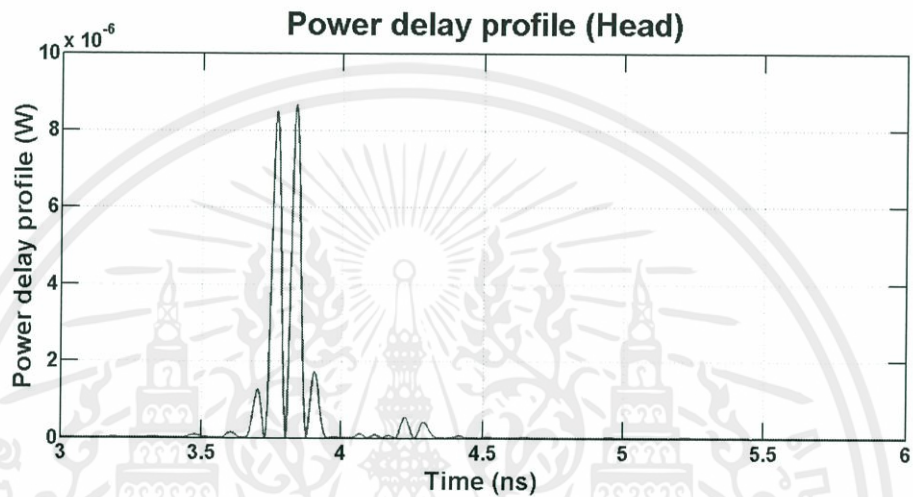


รูปที่ 4.11 การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

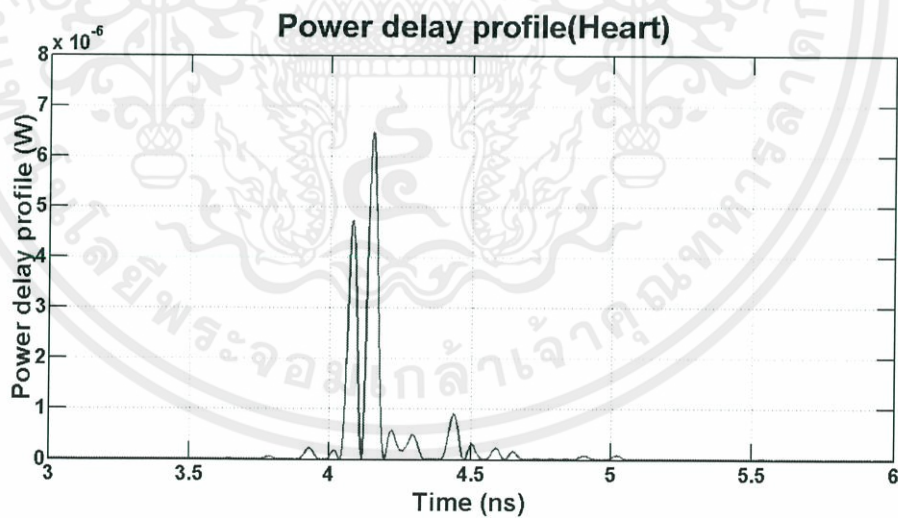
จากรูปที่ 4.11 จะพบว่าค่าของการสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตามีค่ามากขึ้นตามระยะทางที่มากขึ้น โดยที่ตำแหน่งศีรษะมีการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 51 เดซิเบล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ตำแหน่งข้อเท้ามีการสูญเสียเชิงวิถึประมาณ 69 เดซิเบล ซึ่งค่าของการสูญเสียเชิงวิถึมีค่าลดลงตามระยะทางที่มากขึ้น

ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ตามตำแหน่งต่างๆบนร่างกายแสดงดังรูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.16



ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งศีรษะ

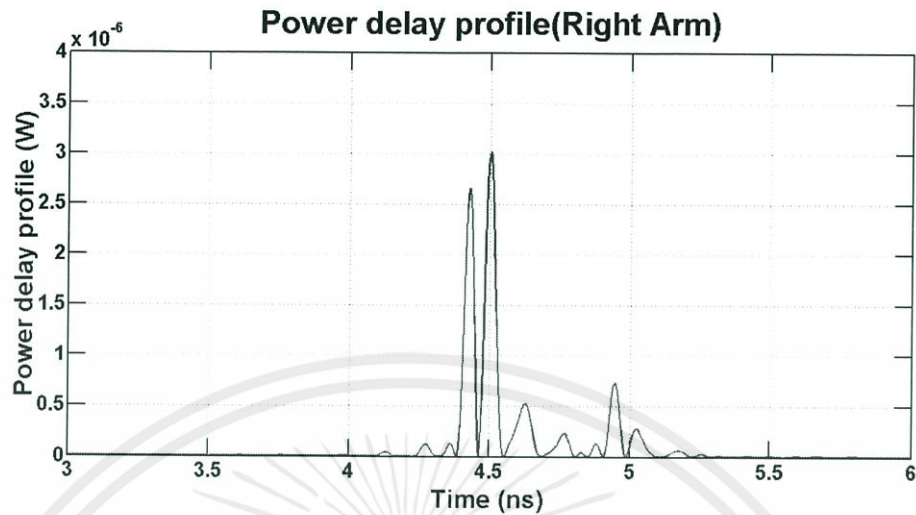


ข. ระดับกำลังงานที่รับได้ของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งหัวใจ

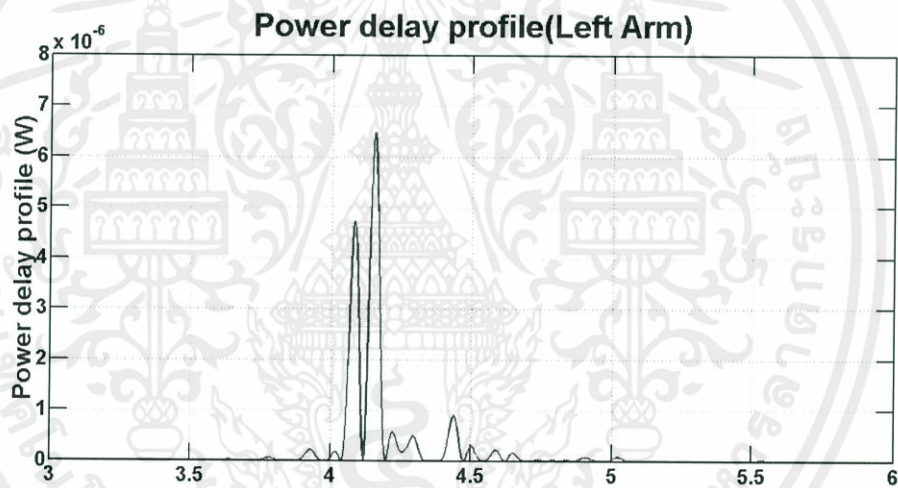
รูปที่ 4.12 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งศีรษะและตำแหน่งหัวใจ

กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญัตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



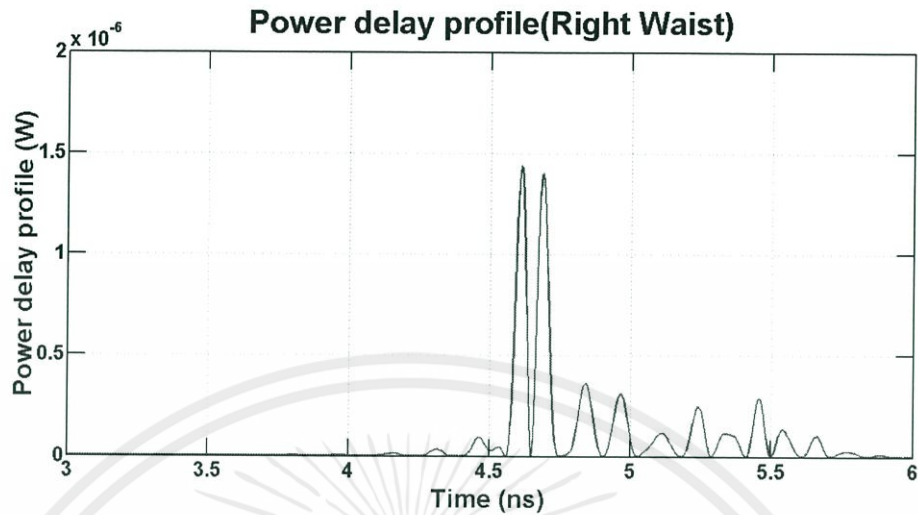
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขนขวา



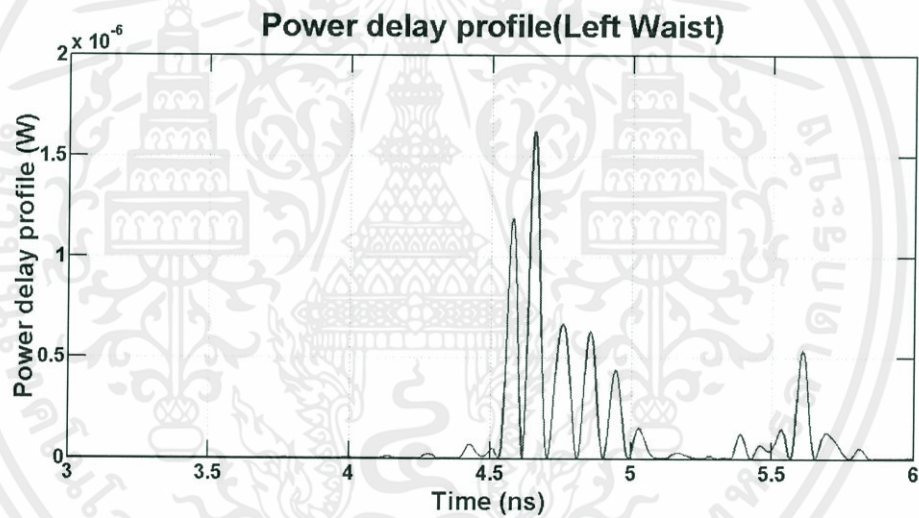
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขนซ้าย

รูปที่ 4.13 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นแขน  
กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



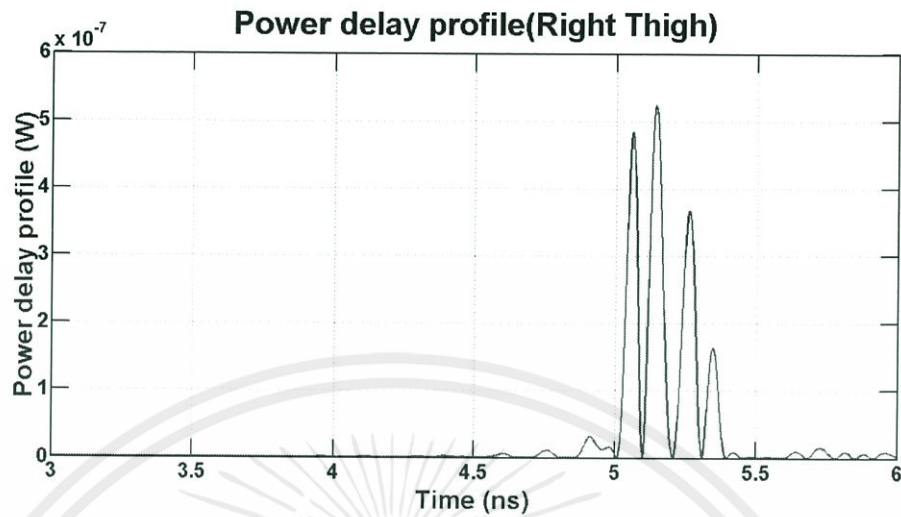
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอวขวา



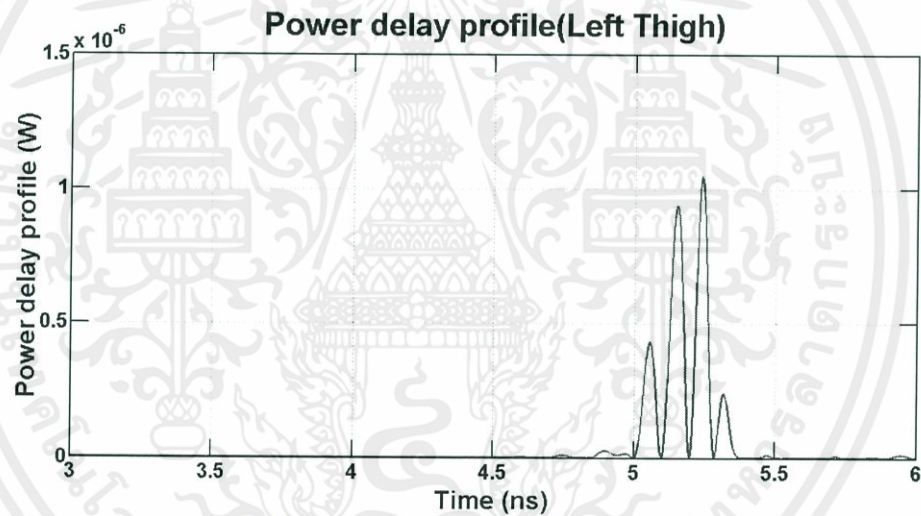
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอวซ้าย

รูปที่ 4.14 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งเอว  
กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



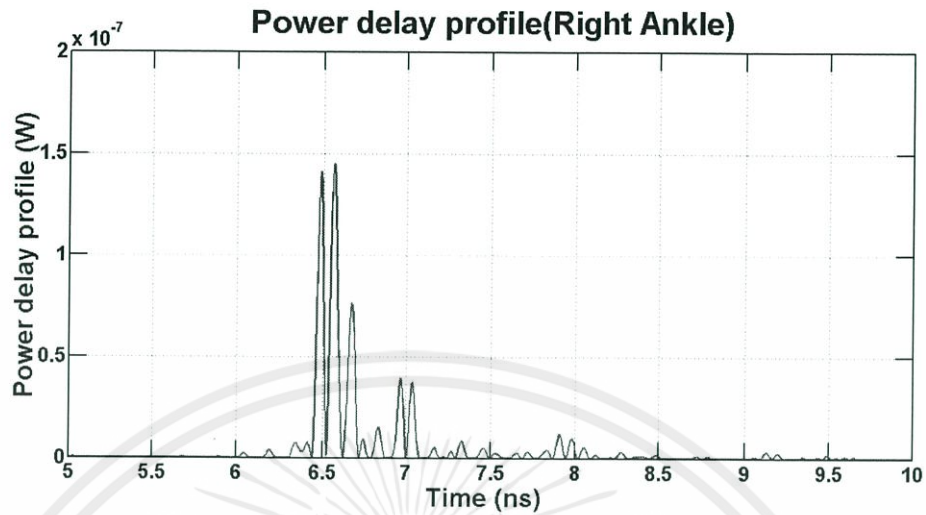
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นขาขวา



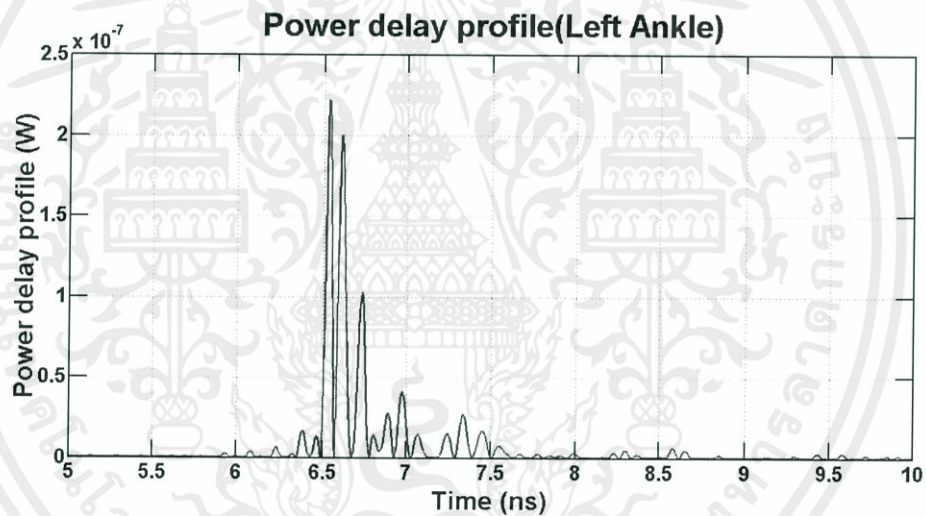
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นขาซ้าย

รูปที่ 4.15 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นขา  
กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



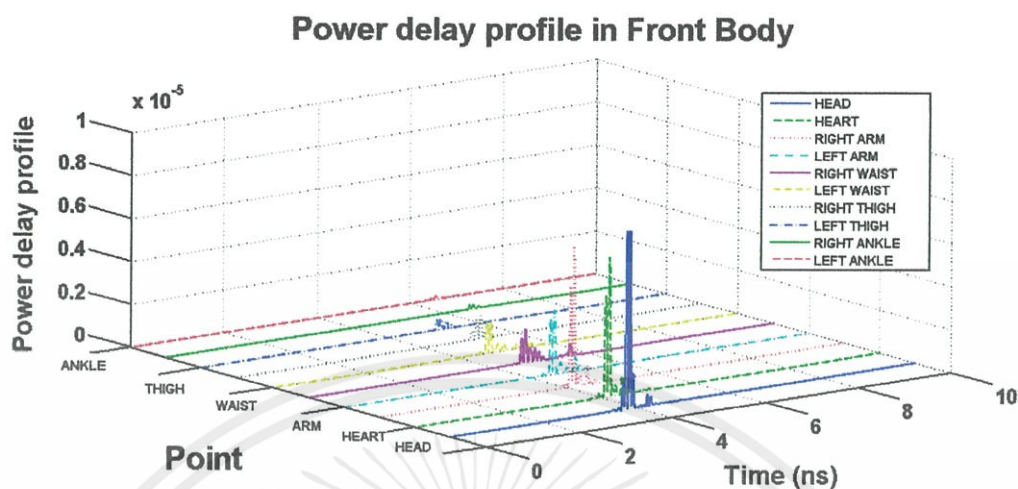
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่ได้รับได้ในตำแหน่งข้อเท้าขวา



ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่ได้รับได้ในตำแหน่งข้อเท้าซ้าย

รูปที่ 4.16 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่ได้รับบนร่างกายในตำแหน่งข้อเท้า  
กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลกำลังงานที่รับได้ในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

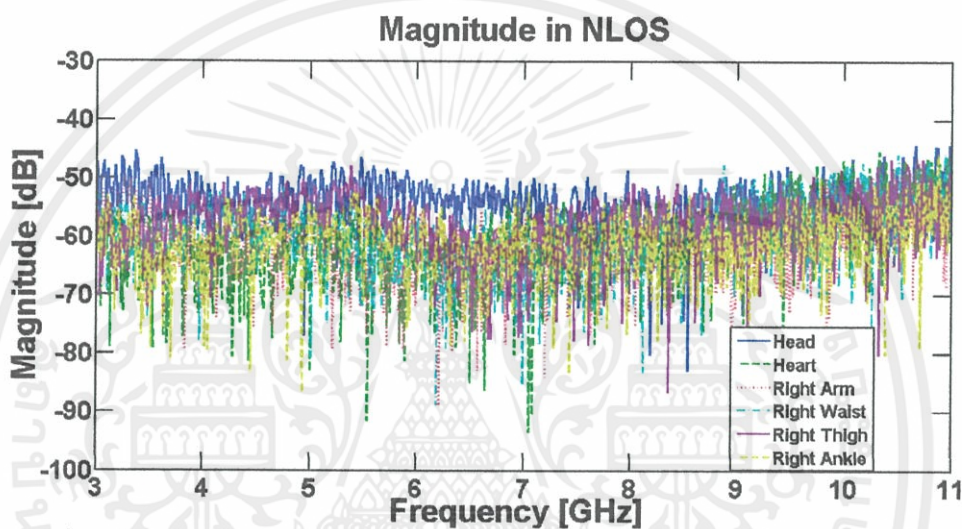
ตำแหน่ง	กำลังงาน( $\mu\text{W}$ )
ศีรษะ	8.2974
หัวใจ	6.4864
ต้นแขนซ้าย	6.4864
ต้นแขนขวา	2.9931
เอวซ้าย	1.5767
เอวขวา	1.4370
ต้นขาขวา	1.0475
ต้นขาซ้าย	0.52160
ข้อเท้าซ้าย	0.22179
ข้อเท้าขวา	0.4475

จากรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา มีระดับของสัญญาณที่ต่างกันตามตำแหน่งบนร่างกาย โดยตำแหน่งศีรษะจะมีระดับสัญญาณสูงสุด รองมาคือ ตำแหน่งหัวใจ ต้นแขน เอว ต้นขา และข้อเท้าตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากระดับสัญญาณมีค่าแปรผันตามระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการวัดช่องสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศ ส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

การวัดช่องสัญญาณบนร่างกายกรณีมองไม่เห็นในระดับสายตาจะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างจุดต่างๆ ทางด้านหลังร่างกายมนุษย์ ได้แก่ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน การสูญเสียเชิงวิถี และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน ซึ่งแสดงรูปที่ 4.18 - 4.26 และตารางที่ 4.3 - 4.4



รูปที่ 4.18 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

ตารางที่ 4.3 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา

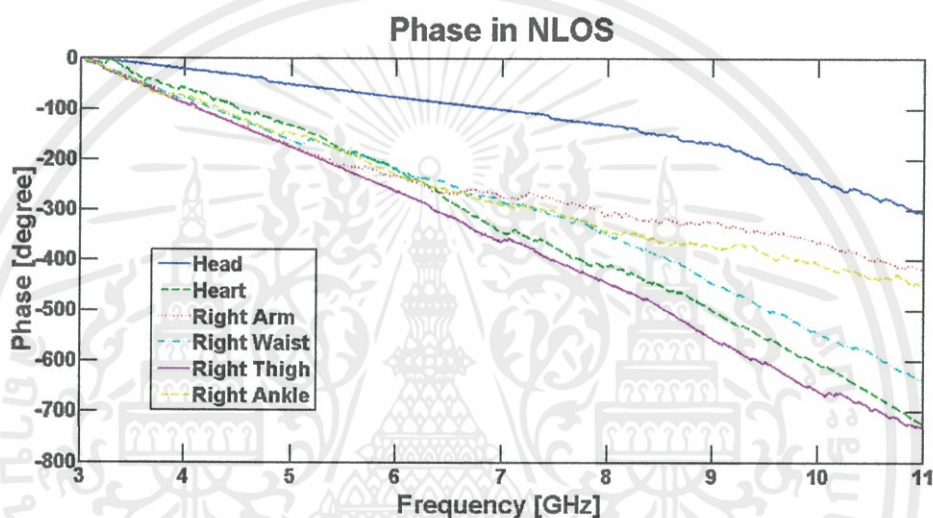
ตำแหน่ง	Max Magnitude (dB)	Min Magnitude (dB)	Mean Magnitude (dB)
ศีรษะ	-44.1642	-44.1642	-44.1642
หัวใจ	-45.2689	-45.2689	-45.2689
ต้นแขนขวา	-48.2789	-48.2789	-48.2789
ต้นแขนซ้าย	-46.2492	-46.2492	-46.2492
เอวขวา	-43.7203	-43.7203	-43.7203
เอวซ้าย	-45.6022	-45.6022	-45.6022
ต้นขาขวา	-44.7519	-44.7519	-44.7519
ต้นขาซ้าย	-46.6653	-46.6653	-46.6653

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... การศึกษาที่... โยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา (ต่อ)

ข้อเท้าขวา	-48.4542	-48.4542	-48.4542
ข้อเท้าซ้าย	-45.7502	-45.7502	-45.7502

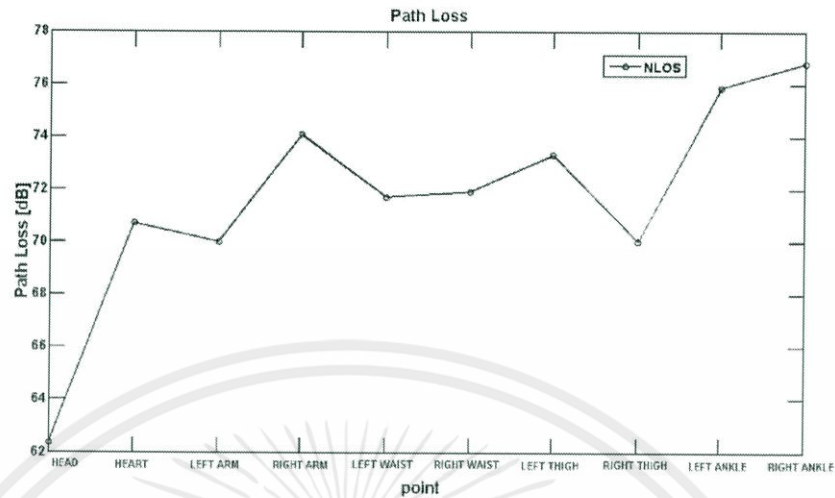
จากรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.3 จะพบว่าขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา ที่ตำแหน่งศีรษะจะมีค่ามากที่สุดประมาณ -44 เดซิเบล ส่วนที่ตำแหน่งข้อเท้าจะมีค่าน้อยที่สุดประมาณ -48 เดซิเบล



รูปที่ 4.19 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

จากรูปที่ 4.19 จะพบว่าเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตานั้น จะมีความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่ากรณีมองเห็นกันในระดับสายตา เนื่องจากการบดบังของร่างกายมีผลต่อเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

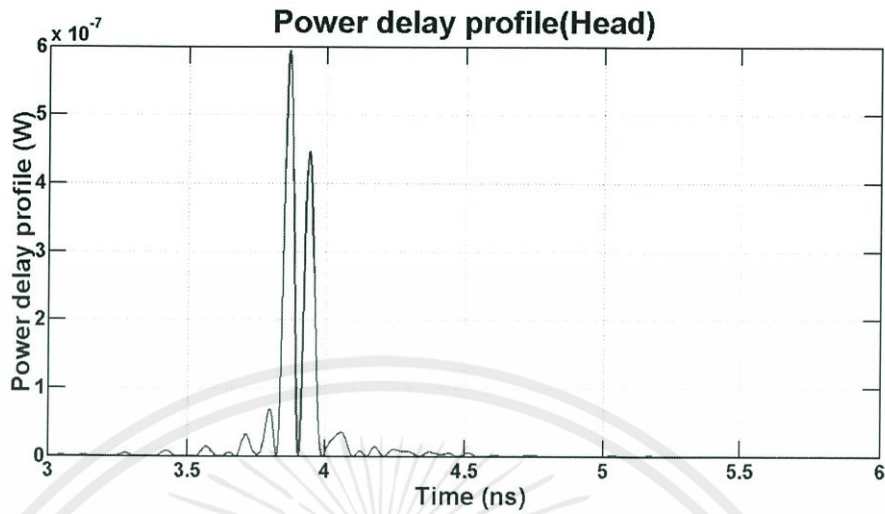


รูปที่ 4.20 การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา  
โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

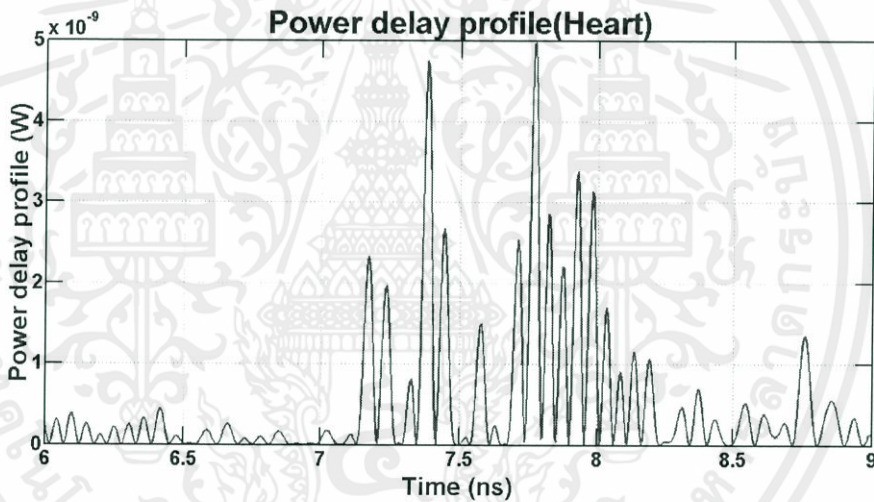
จากรูปที่ 4.20 จะพบว่าค่าของการสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา มีค่ามากขึ้นตามระยะทางที่มากขึ้น โดยที่ตำแหน่งศีรษะมีการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 62 เดซิเบล ส่วนที่ตำแหน่งข้อเท้ามีการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 77 เดซิเบล ซึ่งมีการสูญเสียเชิงวิถีมากกว่ากรณีมองเห็นกันในระดับสายตาอย่างเห็นได้ชัด

ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ตามตำแหน่งต่างๆบนร่างกายแสดงดังรูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



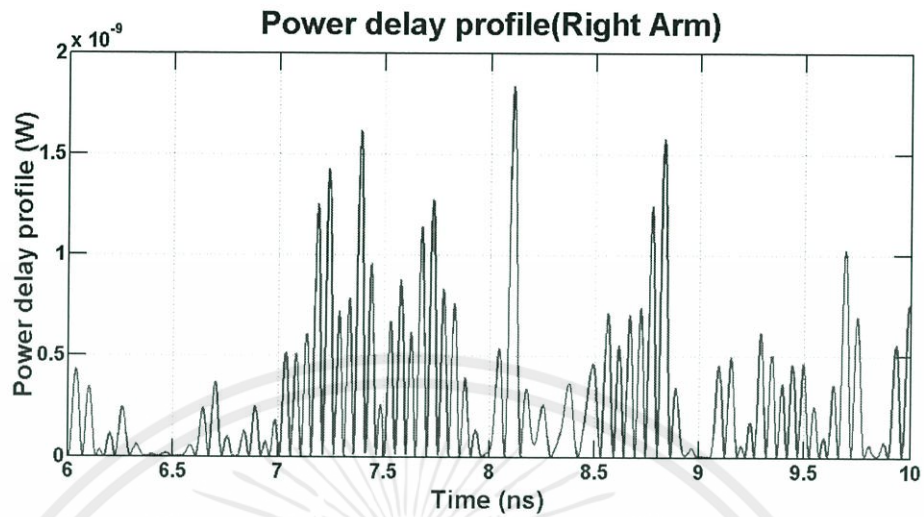
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งศีรษะ



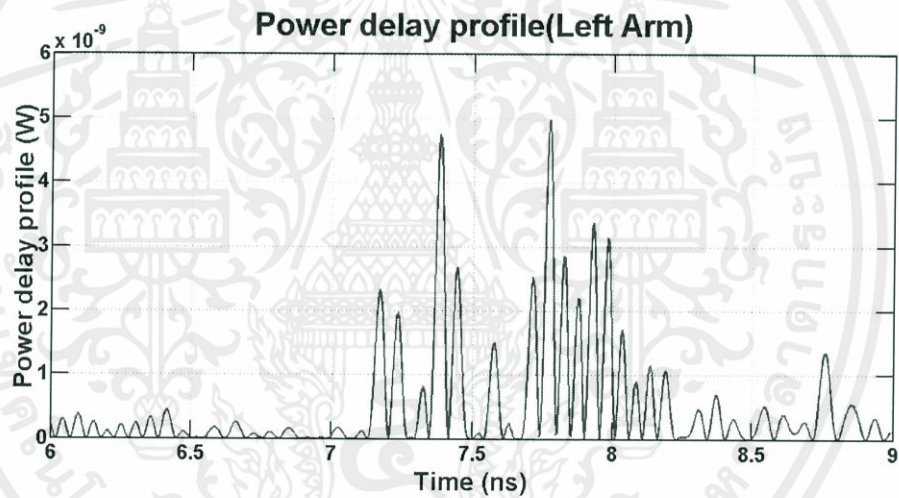
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งหัวใจ

รูปที่ 4.21 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งศีรษะและตำแหน่งหัวใจ  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



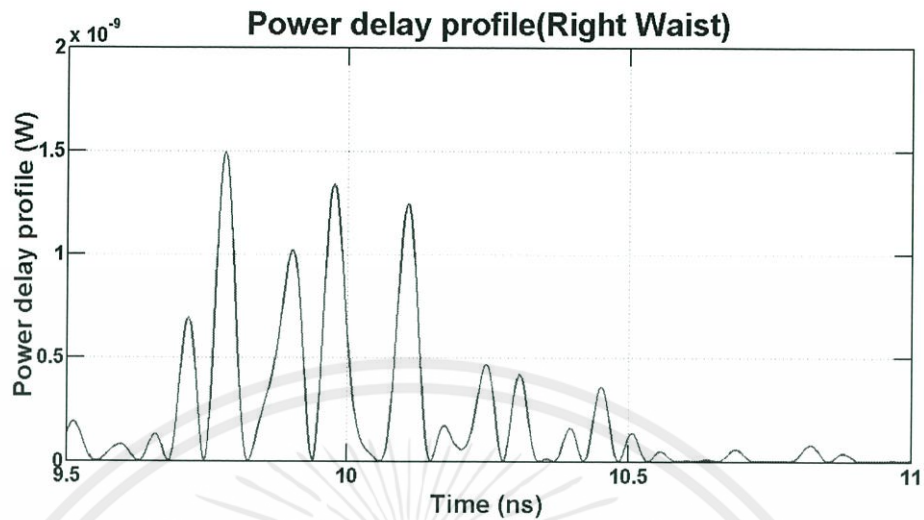
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขนขวา



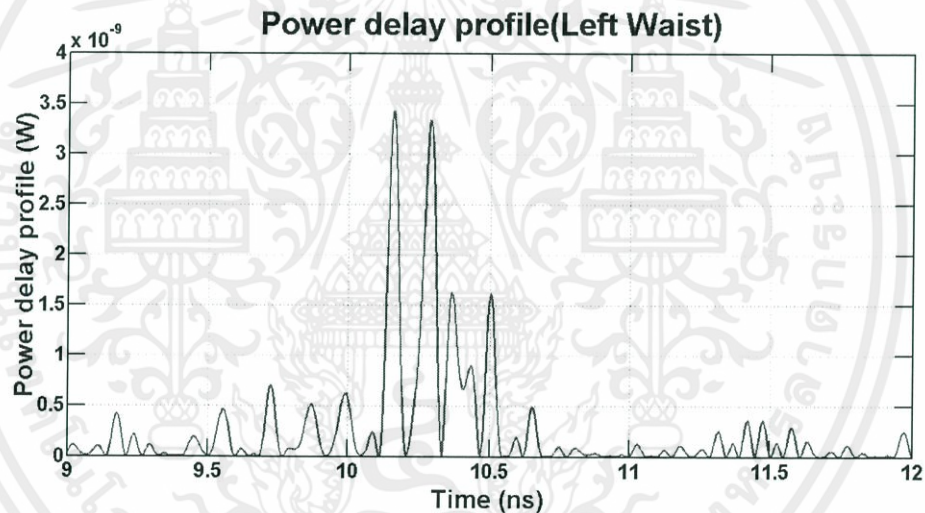
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขนซ้าย

รูปที่ 4.22 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นแขน  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



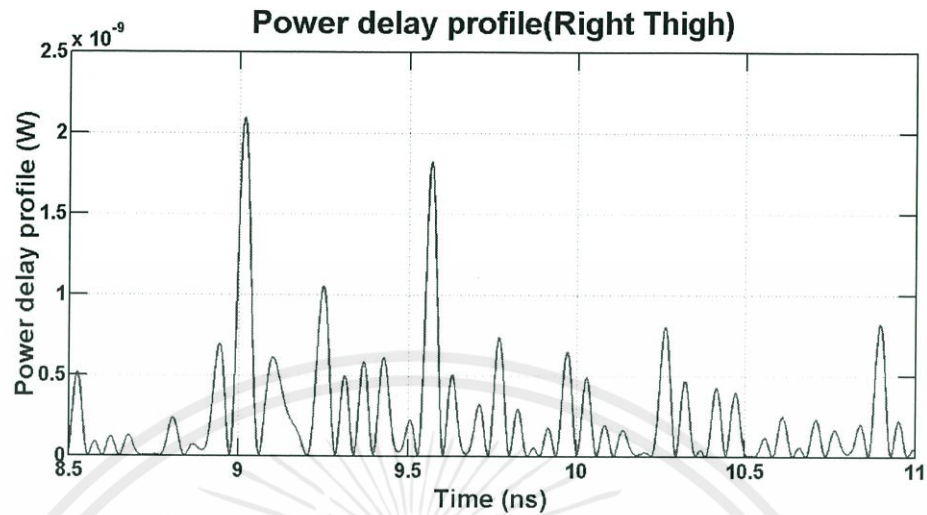
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอวขวา



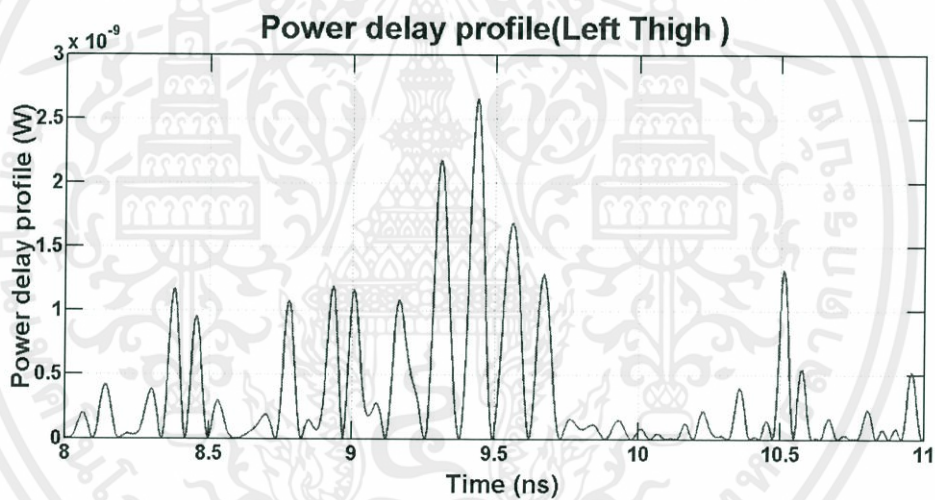
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอวซ้าย

รูปที่ 4.23 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งเอว  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



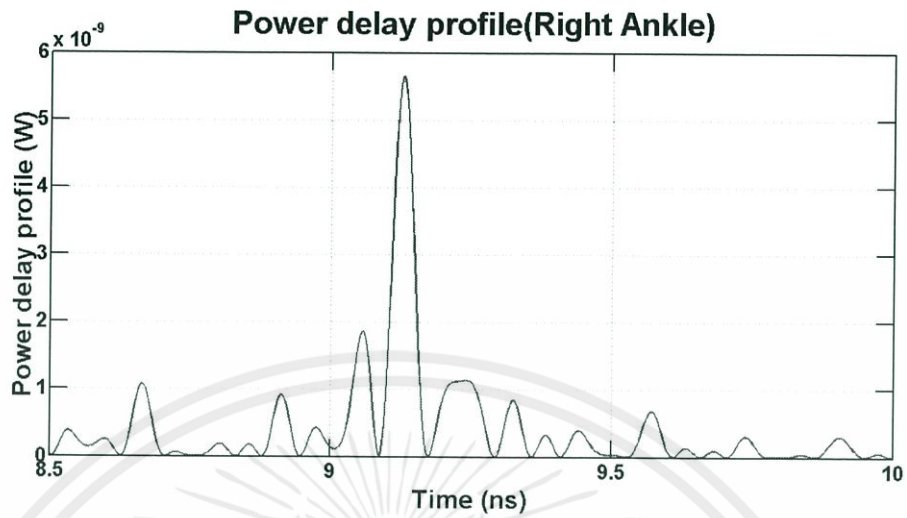
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นขาขวา



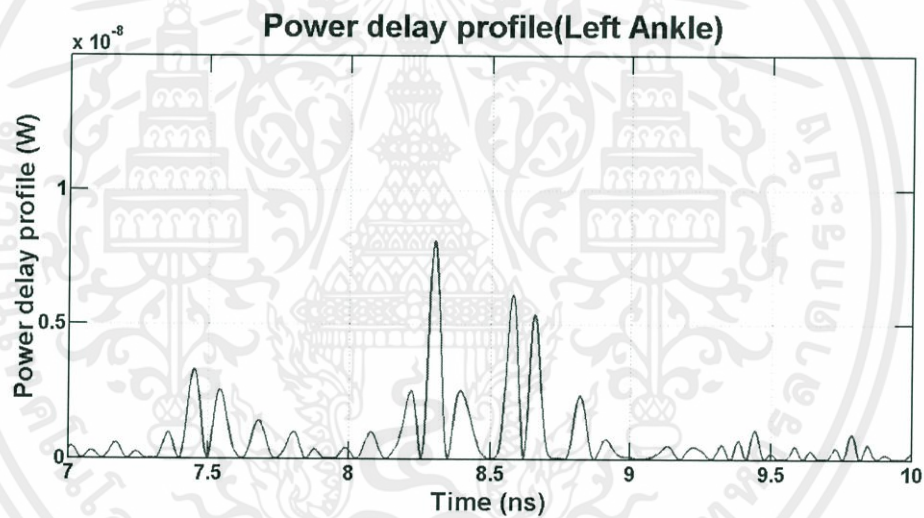
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นขาซ้าย

รูปที่ 4.24 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นขา  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งข้อเท้าขวา

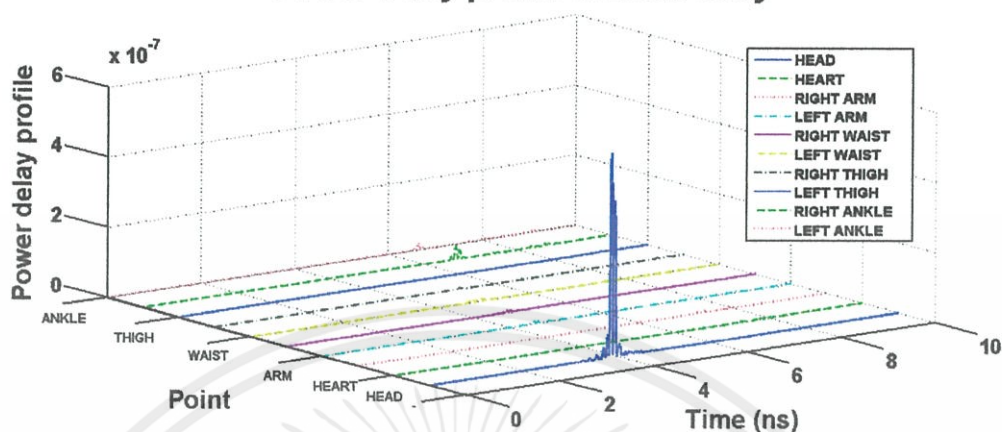


ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งข้อเท้าซ้าย

รูปที่ 4.25 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในร่างกายในตำแหน่งข้อเท้า  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Power delay profile in Back Body



รูปที่ 4.26 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

ตารางที่ 4.4 กำลังงานที่รับได้ในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

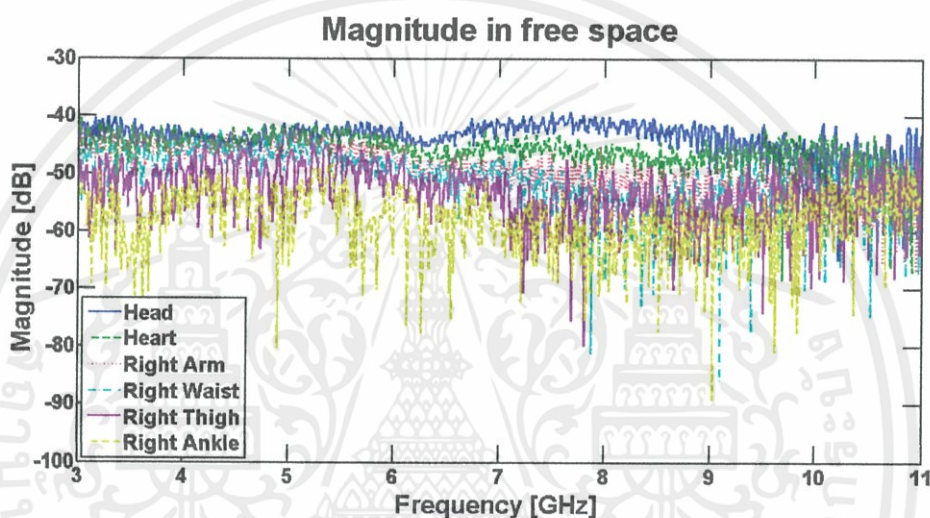
ตำแหน่ง	กำลังงาน ( $\mu\text{W}$ )
ศีรษะ	581.83
หัวใจ	4.9603
ต้นแขนซ้าย	4.9603
ต้นแขนขวา	7.0805
เอวซ้าย	5.4336
เอวขวา	8.7127
ต้นขาขวา	5.8833
ต้นขาซ้าย	2.0467
ข้อเท้าซ้าย	39.216
ข้อเท้าขวา	21.939

จากรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.4 แสดงผลภาพตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณนั้น จะนำมาใช้เปรียบเทียบกันเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากรูปจะเห็นว่าในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา มีระดับของสัญญาณที่น้อยมาก เนื่องจากผลของร่างกายมนุษย์ทำให้เกิดการจางหายหลายวิธีมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ผลการวัดช่องสัญญาณในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

การวัดช่องสัญญาณกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง เป็นการวัดสัญญาณโดยไม่มีร่างกายมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างจุดที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างสายอากาศรับ-ส่ง ได้แก่ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน การสูญเสียเชิงวิถี และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน ซึ่งแสดงรูปที่ 4.27 - 4.35 และตารางที่ 4.5 - 4.6

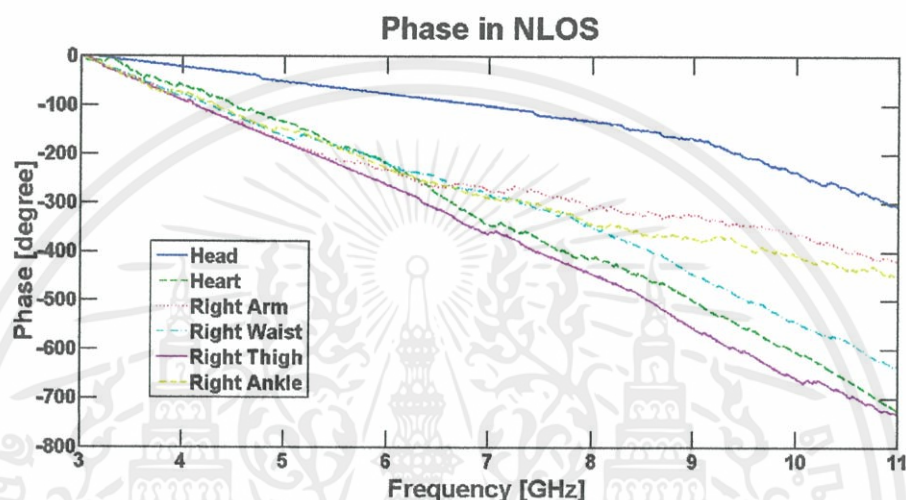


รูปที่ 4.27 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

ตารางที่ 4.5 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

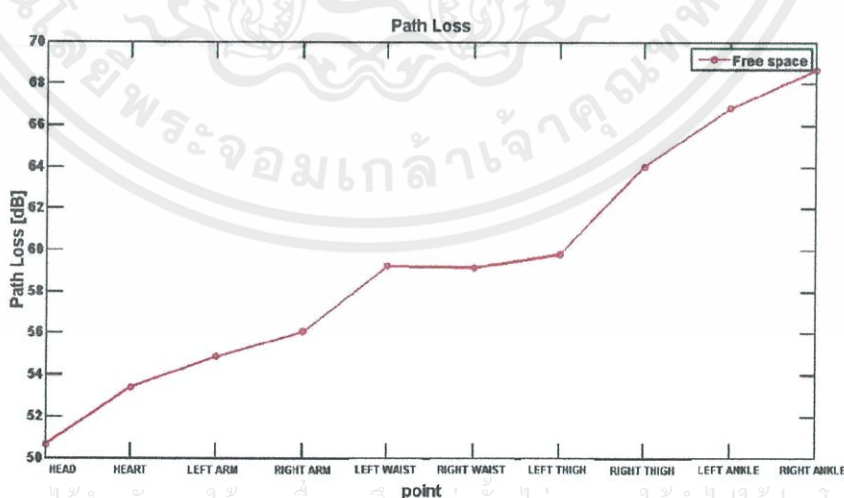
ตำแหน่ง	Max Magnitude (dB)	Min Magnitude (dB)	Mean Magnitude (dB)
ศีรษะ	-39.1784	-64.8024	-51.9904
หัวใจ	-40.3983	-68.2635	-54.3309
ต้นแขนขวา	-41.3699	-67.0178	-54.1939
ต้นแขนซ้าย	-41.6278	-66.9035	-54.2657
เอวขวา	-42.0363	-76.7894	-59.4129
เอวซ้าย	-42.6014	-85.687	-64.1442
ต้นขาขวา	-44.7985	-80.5703	-62.6844
ต้นขาซ้าย	-44.8642	-79.7925	-62.3284
ข้อเท้าขวา	-46.6833	-82.3106	-64.497
ข้อเท้าซ้าย	-46.2232	-89.0849	-67.6541

จากรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.5 จะพบว่าขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่างนั้น ที่ตำแหน่งศีรษะจะมีค่ามากที่สุดประมาณ -39 เดซิเบล รองลงมาคือตำแหน่งหัวใจ ต้นแขน เอว ต้นขา และข้อเท้าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา จะพบว่าขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณใกล้เคียงกัน แต่จะมีระดับสัญญาณจะดีกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 4.28 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

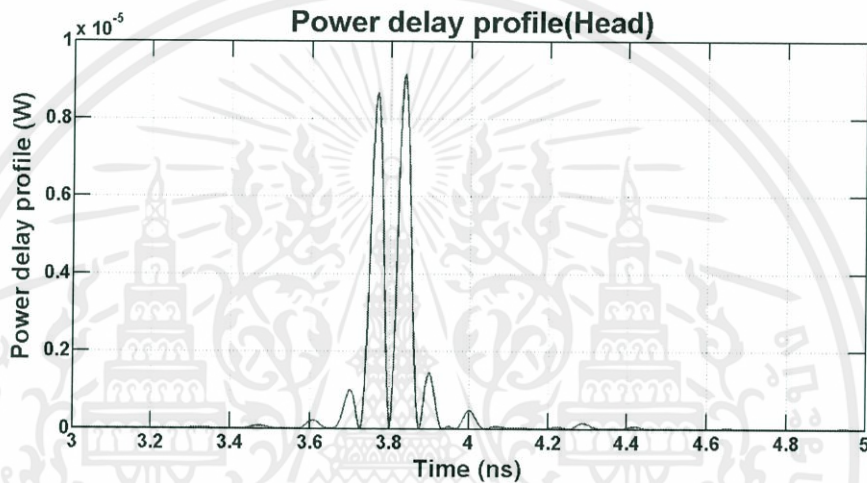
จากรูปที่ 4.28 จะพบว่าเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่างนั้น จะมีความเป็นเชิงเส้นใกล้เคียงกับกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยที่ตำแหน่งศีรษะ หัวใจ และต้นแขน จะมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด



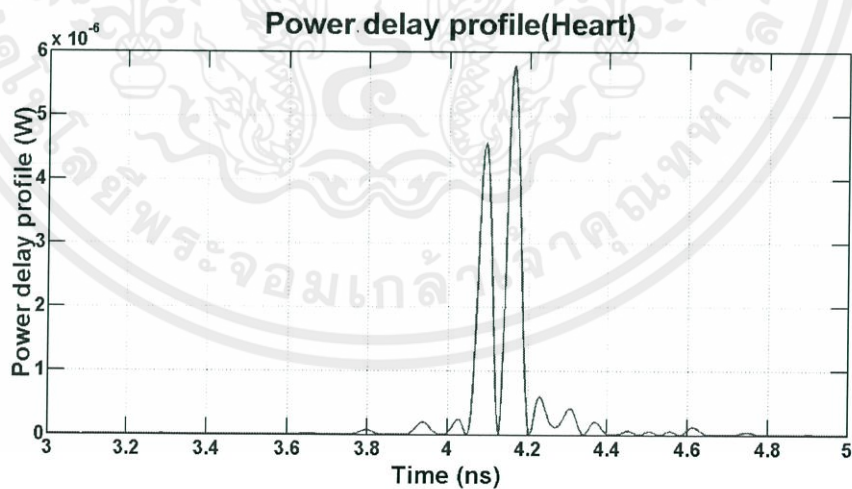
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.29 การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.29 จะพบว่าค่าของการสูญเสียเชิงวิถีในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่างมีค่ามากขึ้นตามระยะทางที่มากขึ้น โดยที่ตำแหน่งศรีษะมีการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 51 เดซิเบล ส่วนที่ตำแหน่งข้อเท้ามีการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 68 เดซิเบล ซึ่งมีค่าการสูญเสียเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่มากขึ้น

ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ตามตำแหน่งต่างๆบนร่างกายแสดงดังรูปที่ 4.30 ถึงรูปที่ 4.34



ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งศรีษะ

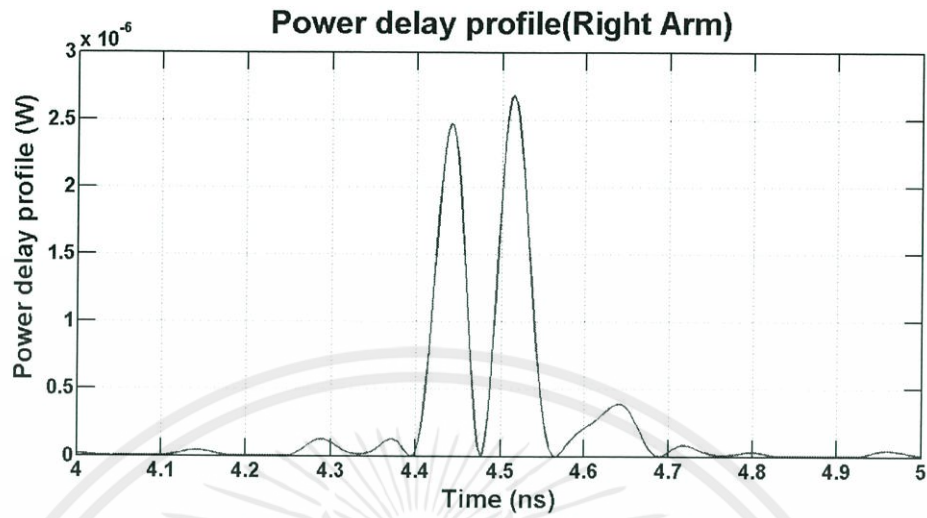


ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งหัวใจ

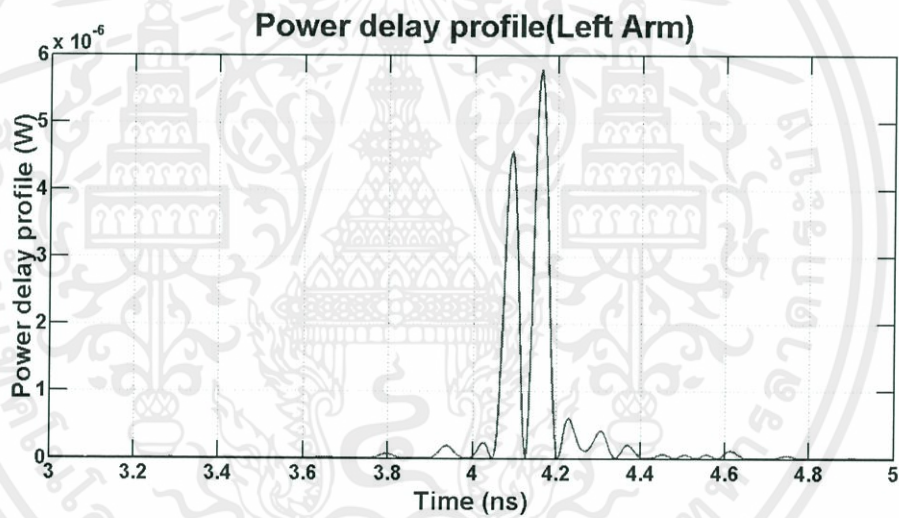
เอกสารนี้เป็นเอกสารร่างงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการตัดสินใจใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม

รูปที่ 4.30 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งศรีษะและตำแหน่งหัวใจ

กรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง



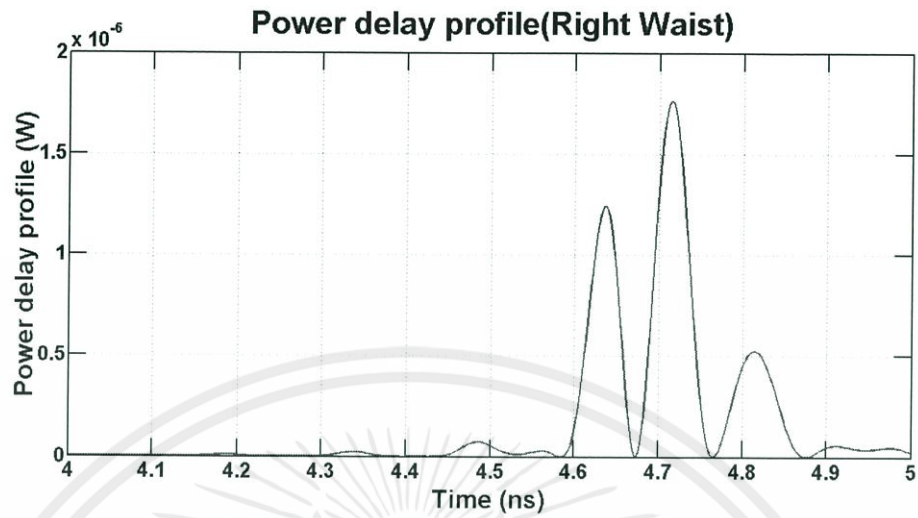
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขนขวา



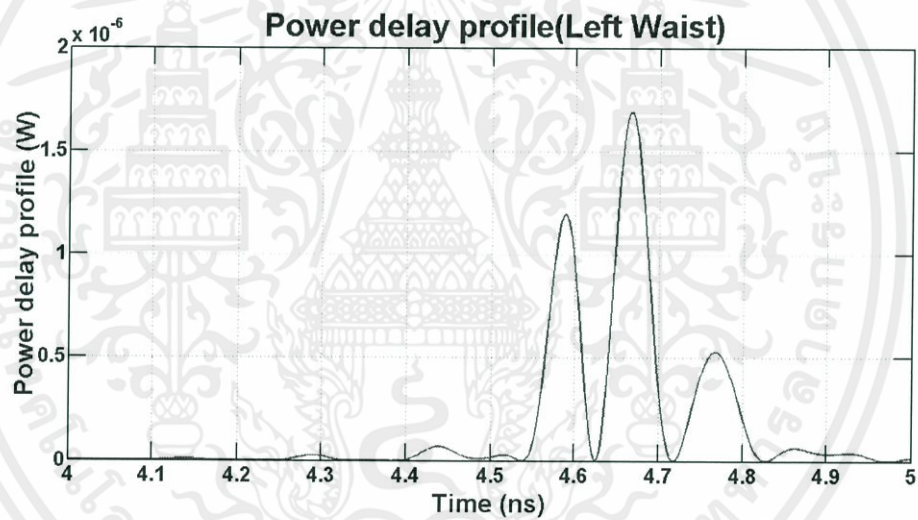
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขนซ้าย

รูปที่ 4.31 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขน กรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



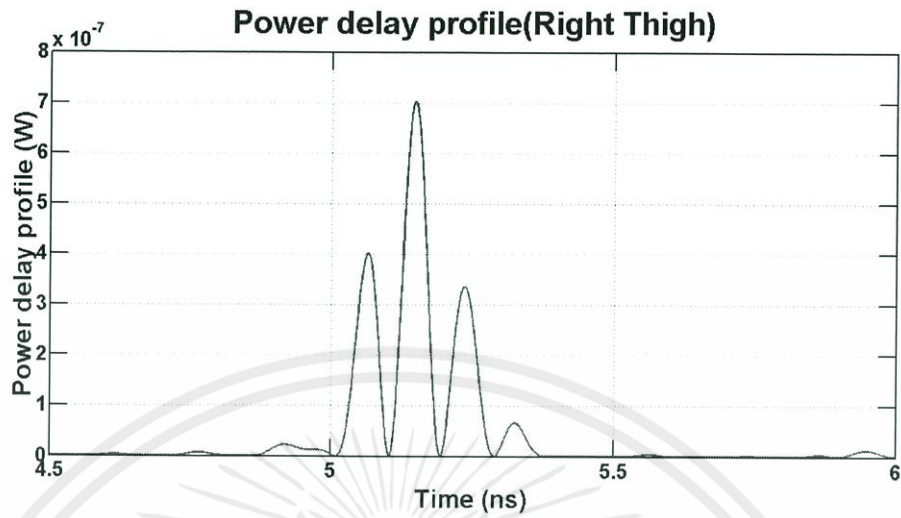
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอวขวา



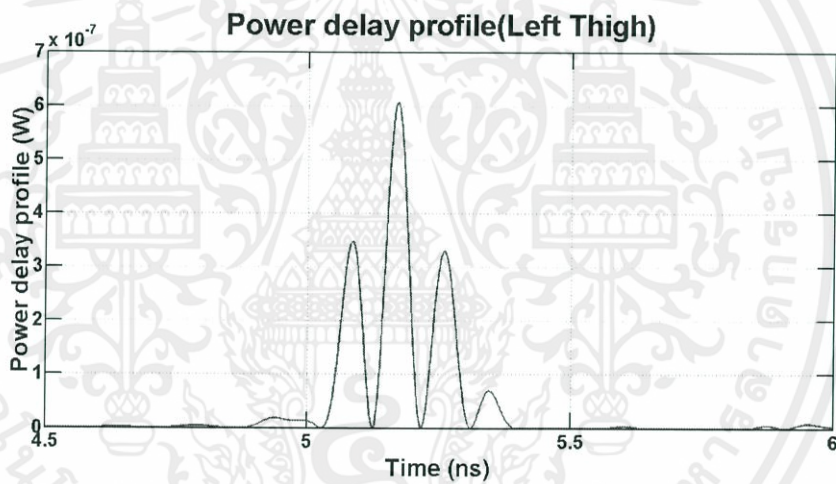
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอวซ้าย

รูปที่ 4.32 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอว กรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



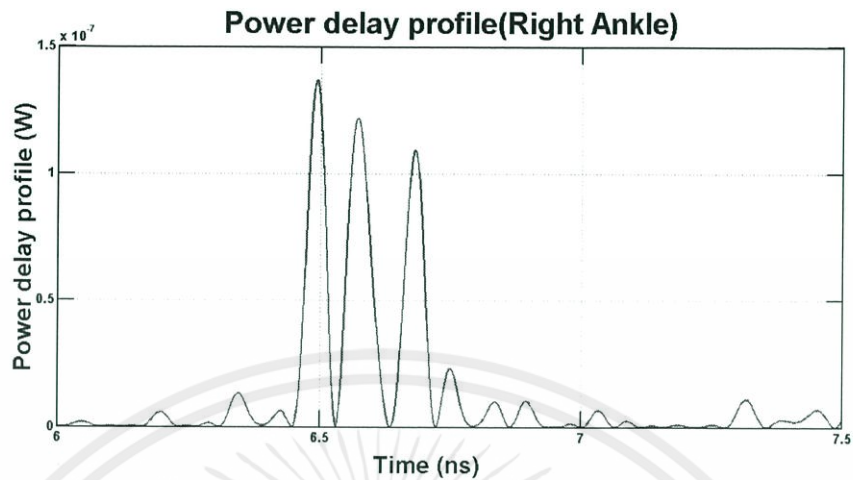
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นขาขวา



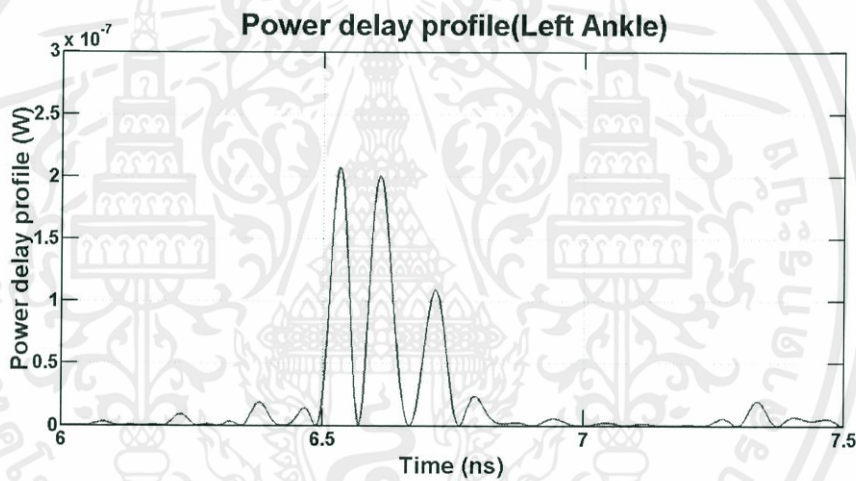
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นขาซ้าย

รูปที่ 4.33 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นขา กรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



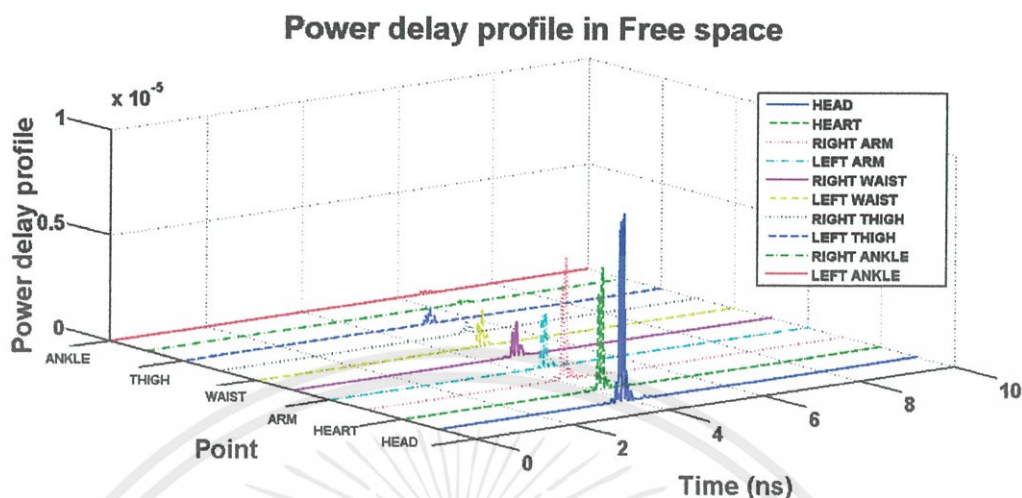
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งข้อเท้าขวา



ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งข้อเท้าซ้าย

รูปที่ 4.34 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งข้อเท้า กรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลกำลังงานที่รับได้ในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง

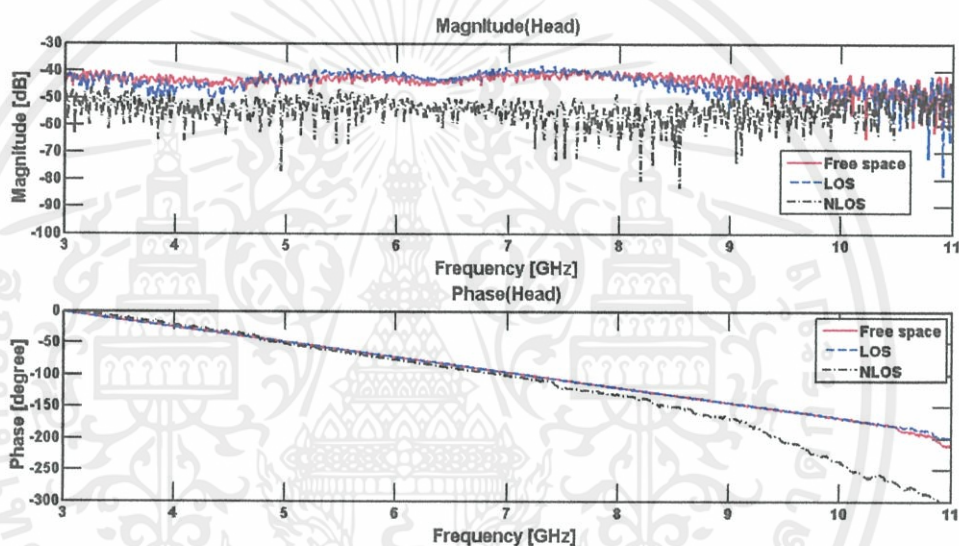
ตำแหน่ง	กำลังงาน( $\mu\text{W}$ )
ศีรษะ	8.9112
หัวใจ	5.7818
ต้นแขนซ้าย	5.7818
ต้นแขนขวา	2.6023
เอวซ้าย	1.6604
เอวขวา	1.7239
ต้นขาขวา	0.60286
ต้นขาซ้าย	0.68718
ข้อเท้าซ้าย	0.20716
ข้อเท้าขวา	0.13515

จากรูปที่ 4.35 และตารางที่ 4.6 แสดงภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ จะเห็นได้ว่าในกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่างมีระดับของสัญญาณที่ต่างกันตามตำแหน่งบนร่างกายโดยตำแหน่งศีรษะจะมีระดับสัญญาณสูงสุด รองมาคือ ตำแหน่งหัวใจ ต้นแขน เอว ต้นขา และข้อเท้าตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากระยะทางมีความห่างมากที่ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

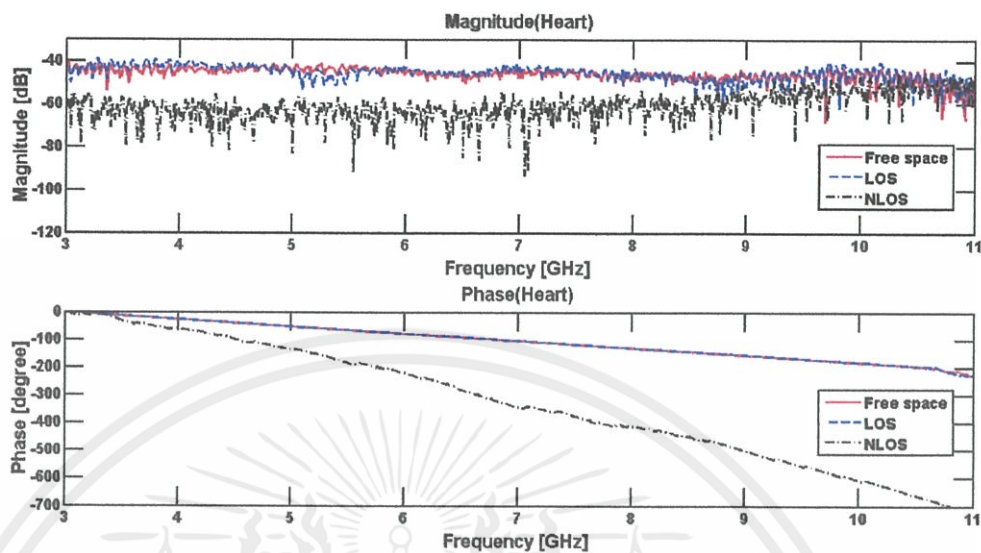
#### 4.2.4 ผลการเปรียบเทียบขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน และการสูญเสียเชิงวิถี ระหว่างกรณีต่างๆในแต่ละตำแหน่งบนร่างกาย โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน จะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณและระดับกำลังงานหรือระดับเฟสของสัญญาณที่รับได้ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณีต่างๆ บนจุดต่างๆบนร่างกายทั้ง 10 จุด ตามรูปที่ 4.36 - 4.46 ดังนี้

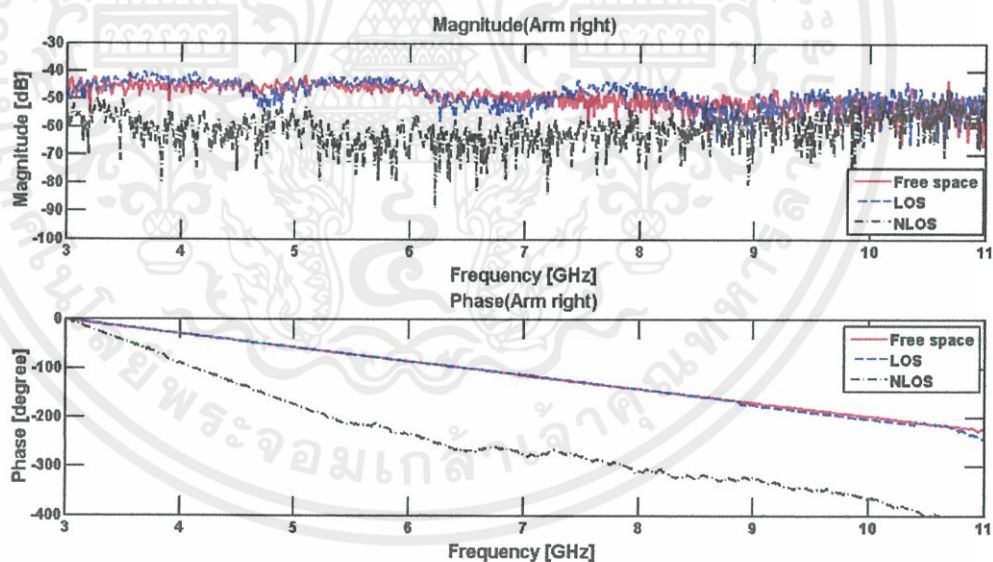


รูปที่ 4.36 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งศีรษะ กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

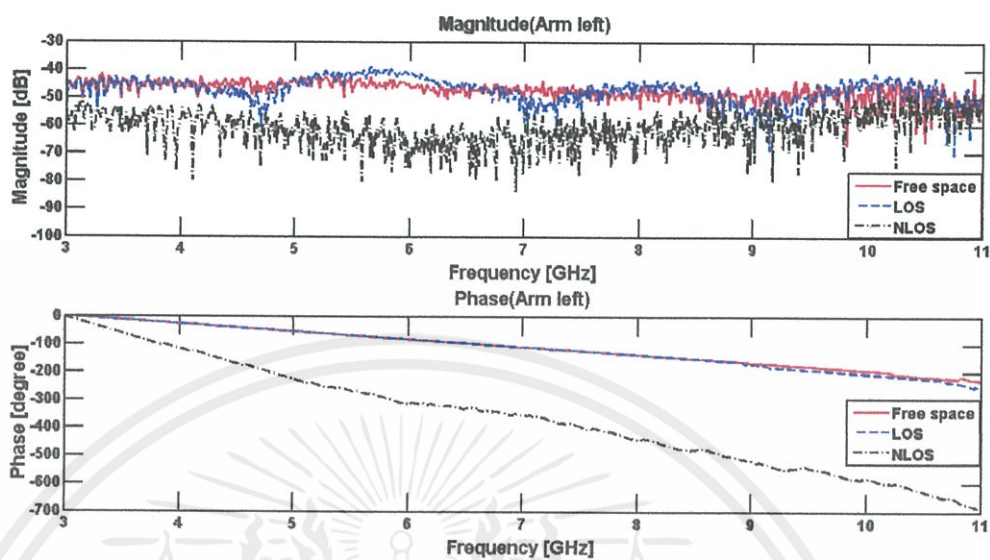


รูปที่ 4.37 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งหัวใจ  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

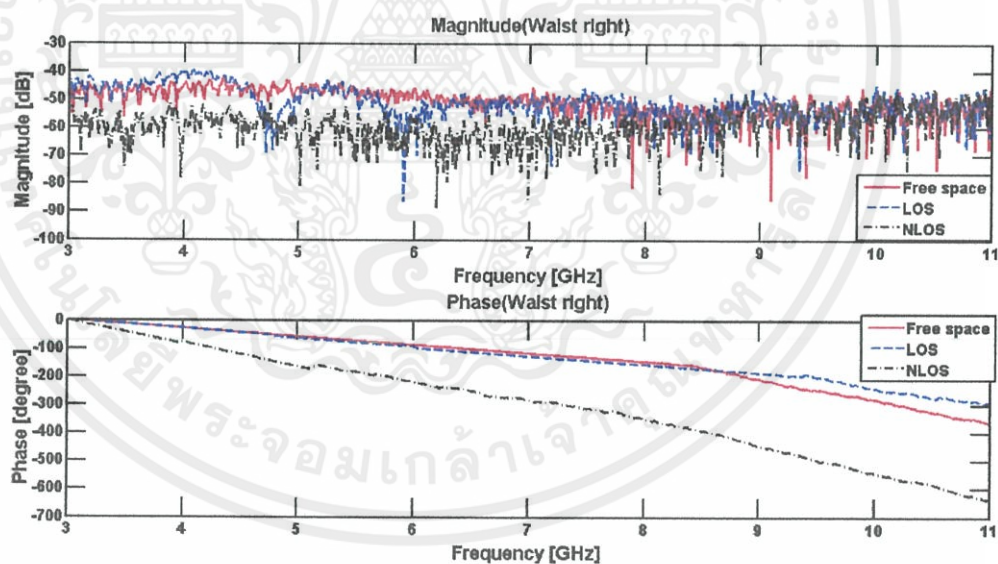


รูปที่ 4.38 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นแขนด้านขวา  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

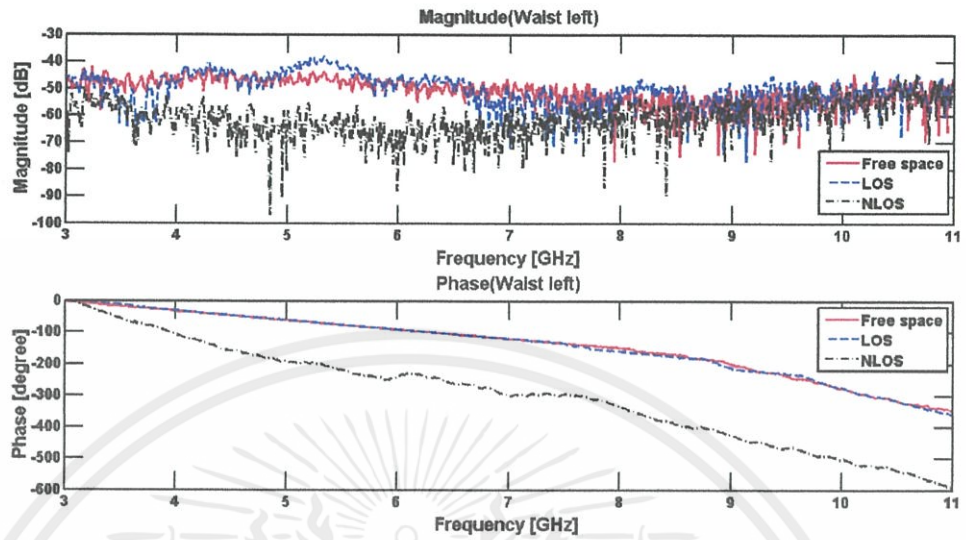


รูปที่ 4.39 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นแขนด้านซ้าย  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

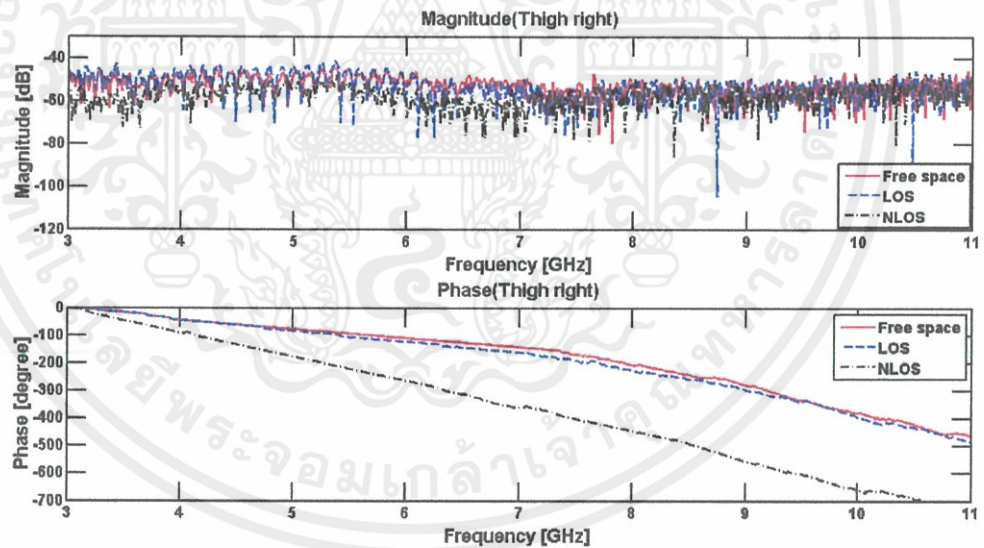


รูปที่ 4.40 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งเอวด้านขวา  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

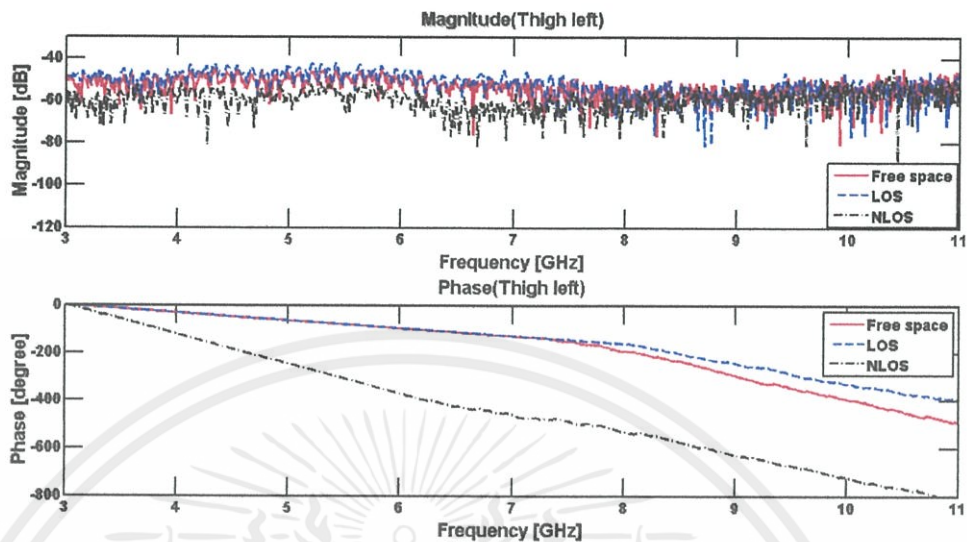


รูปที่ 4.41 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งเอวด้านซ้าย  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

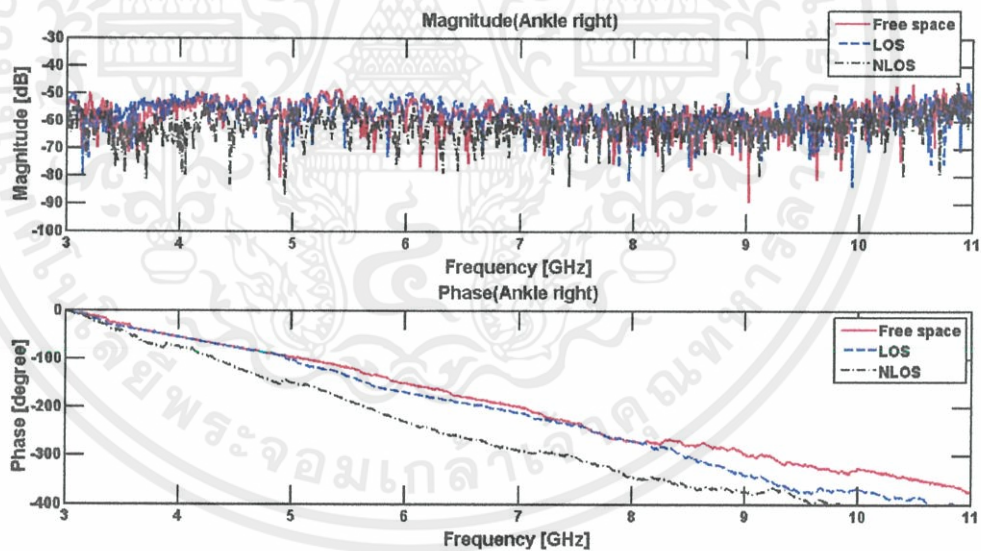


รูปที่ 4.42 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นขาขวา  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

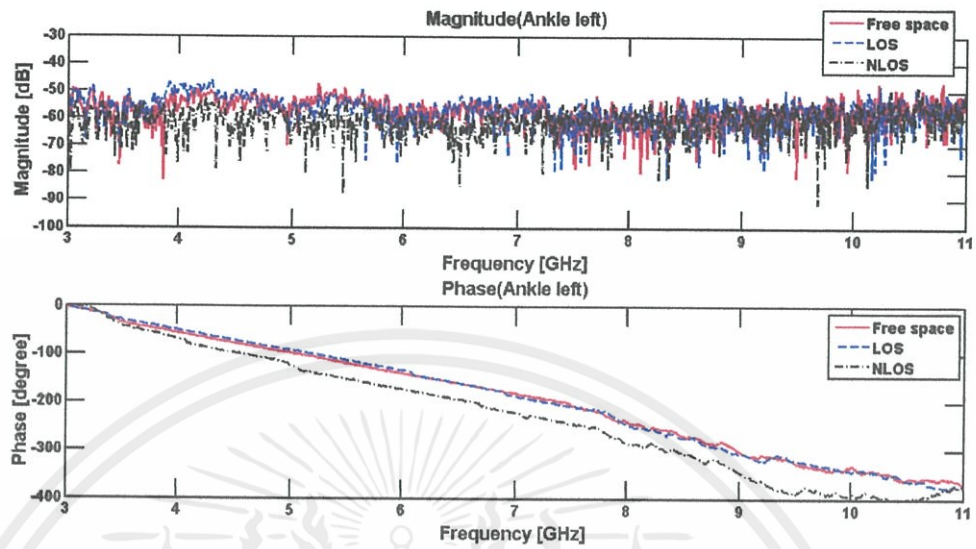


รูปที่ 4.43 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นขาซ้าย  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย



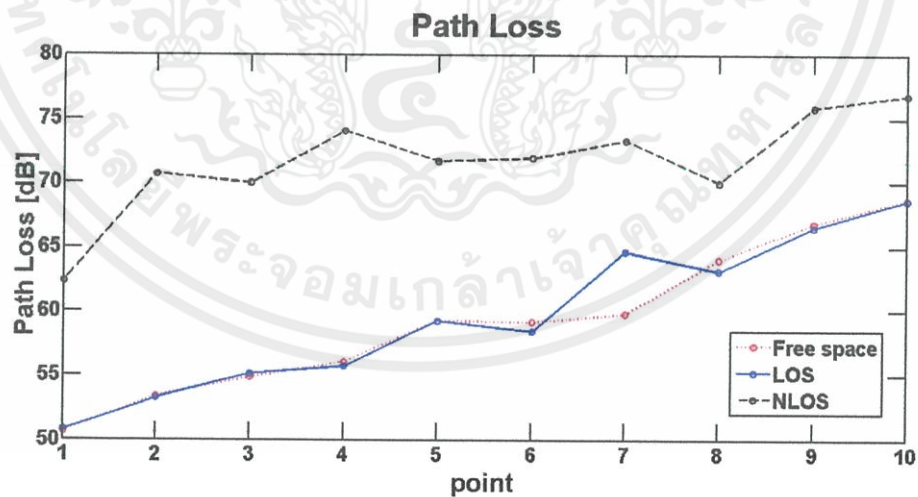
รูปที่ 4.44 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งข้อเท้าขวา  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งข้อเท้าซ้าย  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

การสูญเสียเชิงวิถีนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียเชิงวิถีและจุดที่วัดผล เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณีมองเห็นในระดับสายตา กรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา และกรณีที่สายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง บนจุดต่างๆบนร่างกายทั้ง 10 จุด ตามรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ผลการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีในกรณีต่างๆที่ตำแหน่งต่างๆ  
บนร่างกายกรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกาย

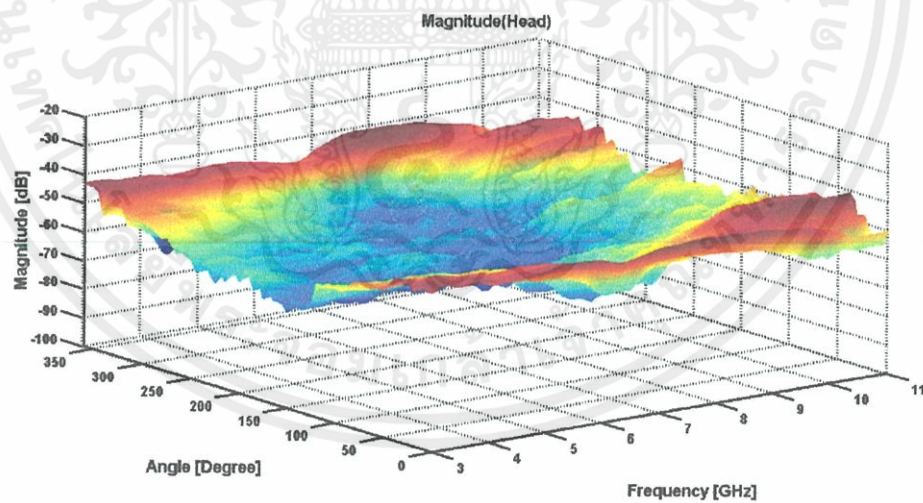
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.46 จะเห็นว่า การสูญเสียเชิงวิถีในตำแหน่งต่างๆบนร่างกาย ในแต่ละกรณี พบว่าในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา และกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่างมีการสูญเสียเชิงวิถีใกล้เคียงกันมาก โดยกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่างจะมีการสูญเสียเชิงวิถีน้อยกว่าเล็กน้อย ส่วนกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาจะมีการสูญเสียเชิงวิถีมากที่สุดเนื่องจากเกิดการบดบังสัญญาณของร่างกาย

#### 4.2.5 ผลการทดสอบสัญญาณรอบทิศทาง

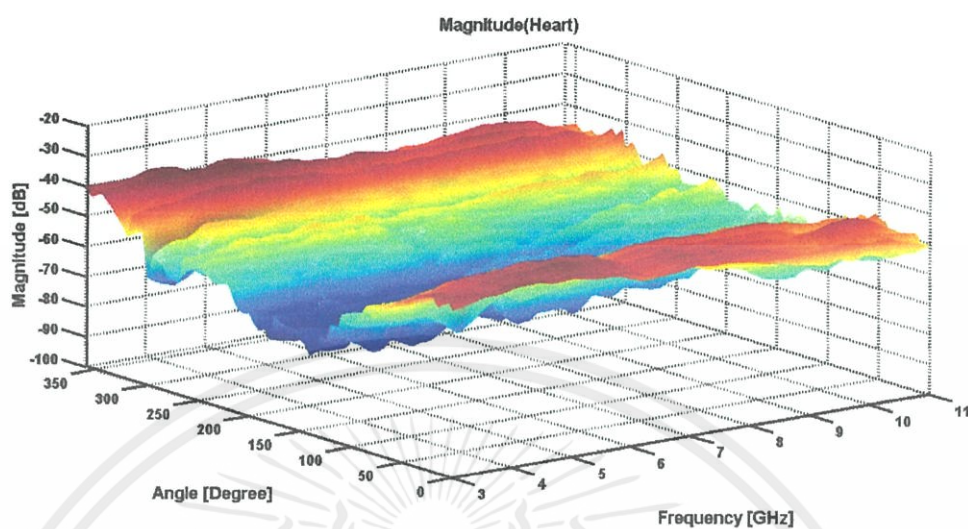
ในการทดสอบรับสัญญาณรอบทิศทางได้ทำการทดสอบโดยติดตั้งสายอากาศตัวรับไว้ในจุดต่างๆ บนร่างกาย 6 จุดได้แก่ ศีรษะ หัวใจ ต้นแขนขวา เอวด้านขวา ต้นขาด้านขวา และข้อเท้า ด้านขวา ซึ่งร่างกายคนยืนจะอยู่ห่างจากสายอากาศส่งเป็นระยะ 1 เมตร และทำการหมุนตัวไปในมุมต่างๆครั้งละ 5 องศา ตั้งแต่ 0 องศาถึง 360 องศา เพื่อนำมาวิเคราะห์หาขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ (Magnitude) และเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน (Phase) ในมุมต่างๆ รอบตัว ซึ่งจะแสดงตามจุดต่างๆบนร่างกายดังนี้

1) ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณรอบทิศทางในตำแหน่งต่างๆบนร่างกาย ดังรูปที่ 4.47 ถึง 4.52

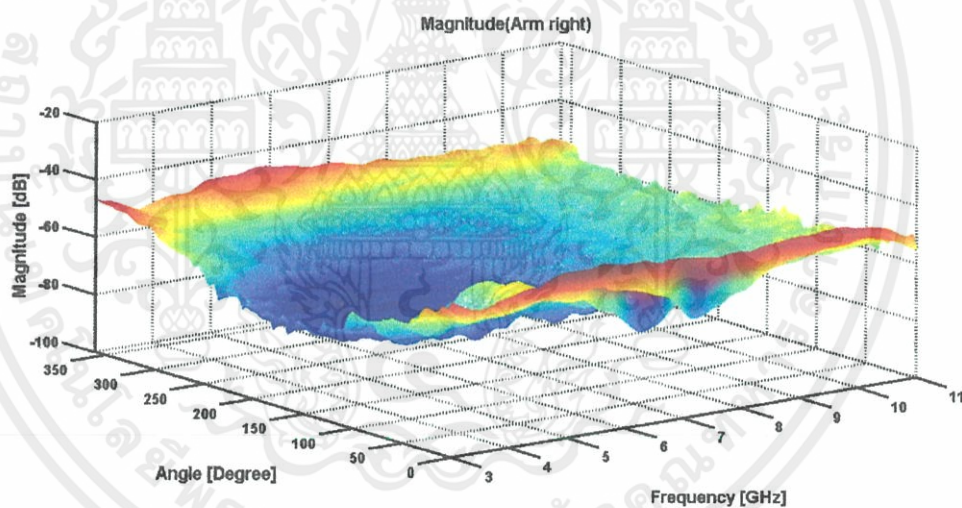


รูปที่ 4.47 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งศีรษะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

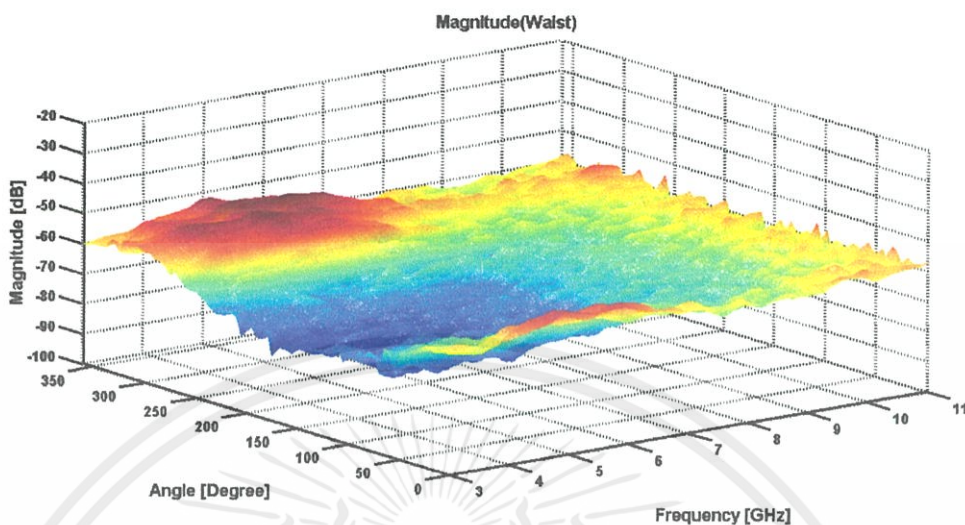


รูปที่ 4.48 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งหัวใจ

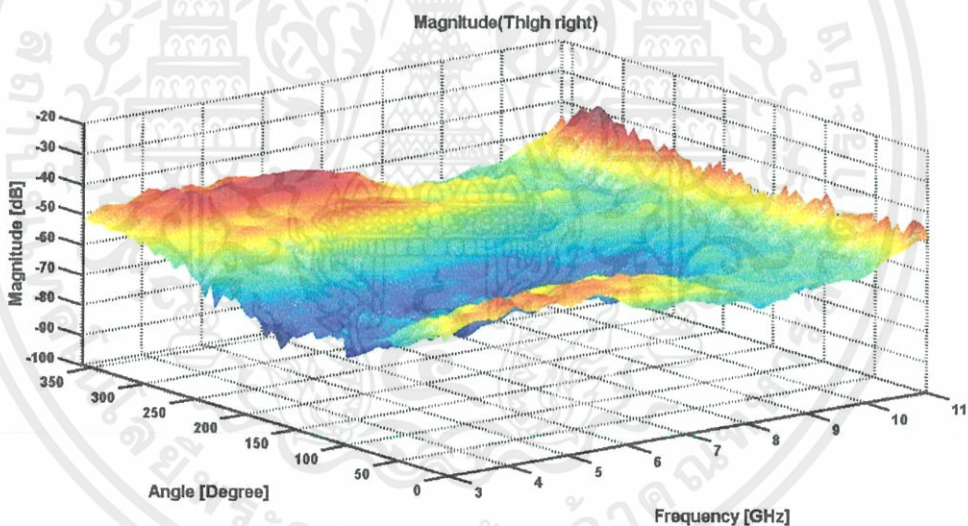


รูปที่ 4.49 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งต้นแขนด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

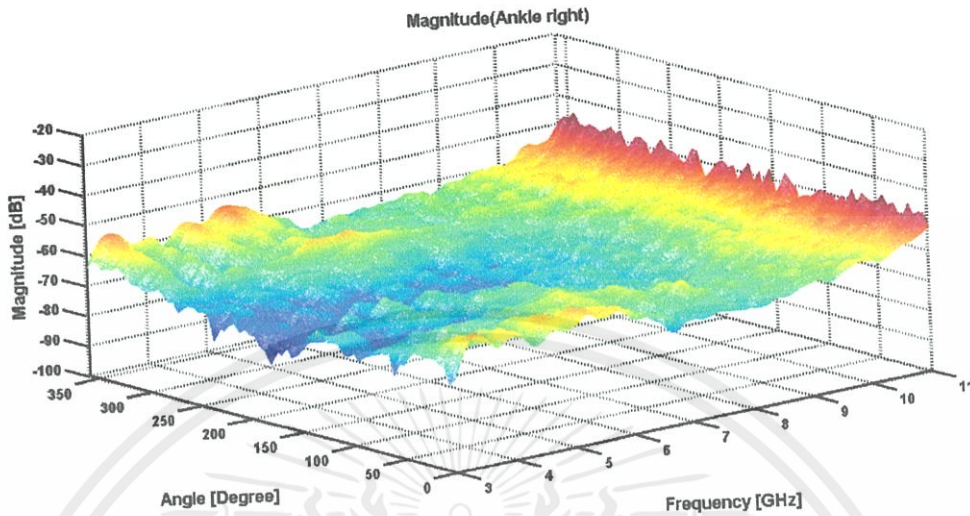


รูปที่ 4.50 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งเวอดด้านขวา



รูปที่ 4.51 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งต้นขาด้านขวา

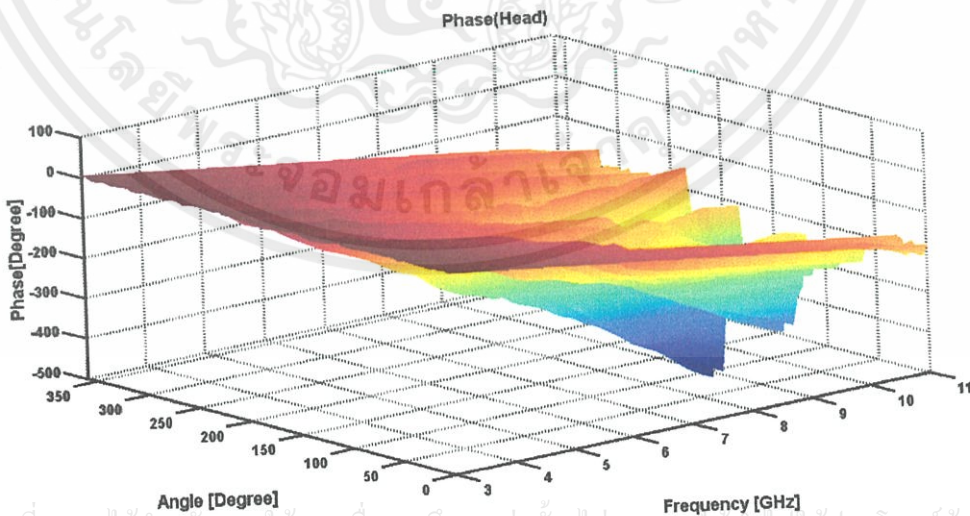
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.52 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนในตำแหน่งข้อเท้าด้านขวา

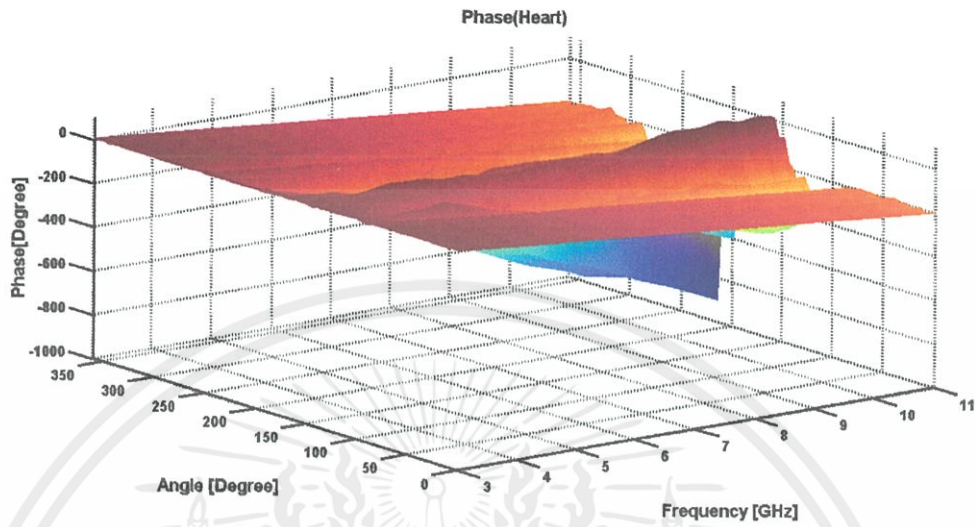
จากรูปที่ 4.47 - 4.52 แสดงผลขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งต่างๆบนร่างกาย จะพบว่าในช่วงมุม 0 องศา ระดับสัญญาณจะมีค่าสูงและจะลดลงต่ำสุดในช่วงมุม 180 องศา และค่อยเพิ่มระดับสัญญาณขึ้นจนมากที่สุดที่มุม 360 องศา โดยที่ตำแหน่งศีรษะจะมีขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณดีที่สุดในตำแหน่งหัวใจ ต้นแขน เอว ต้นขา และข้อเท้าตามลำดับ

2) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณรอบทิศทางที่ตำแหน่งต่างๆ บนร่างกายแสดงได้ดังรูปที่ 4.53 ถึง 4.58

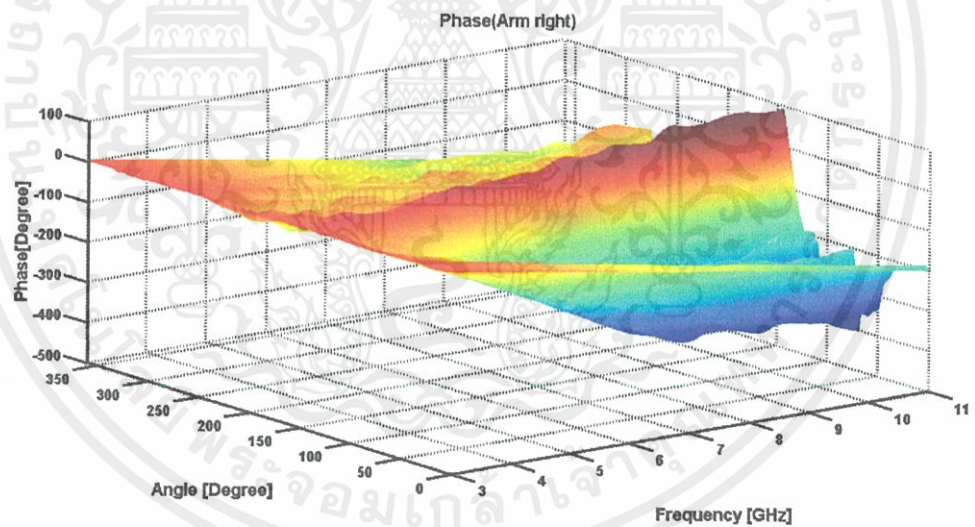


รูปที่ 4.53 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งศีรษะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์ลงนอกราย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

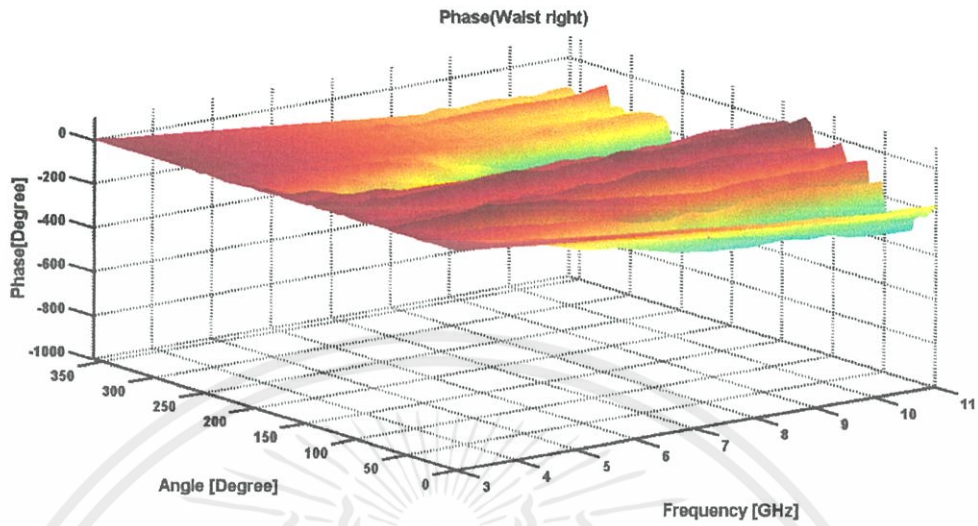


รูปที่ 4.54 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งหัวใจ

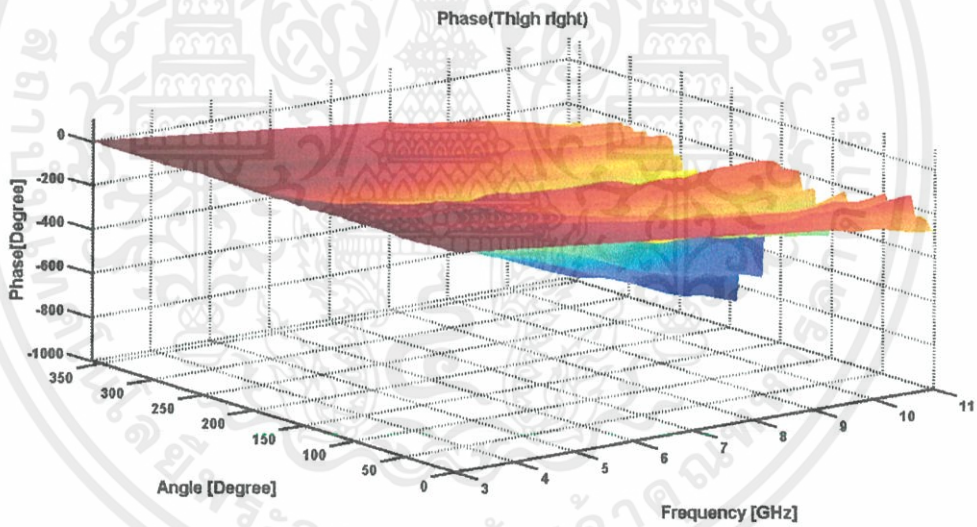


รูปที่ 4.55 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งต้นแขนด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

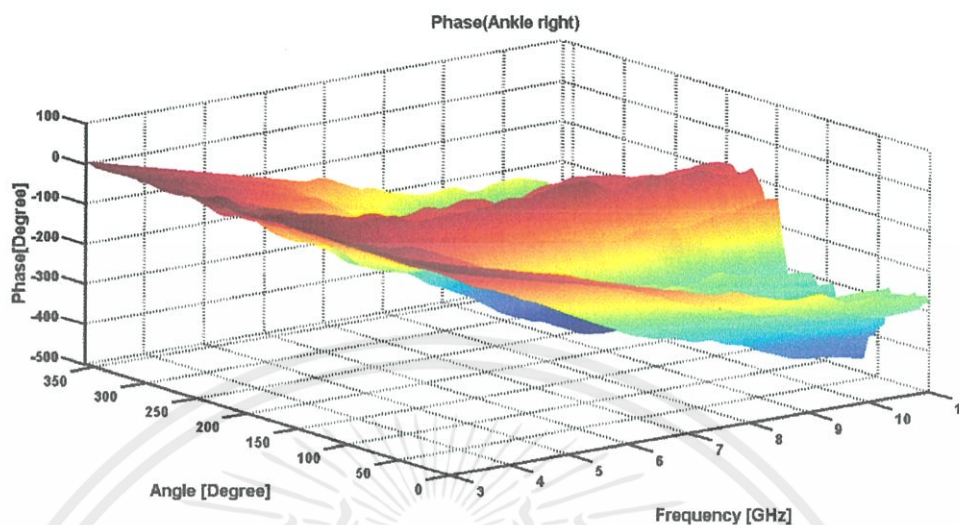


รูปที่ 4.56 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งเอวด้านขวา



รูปที่ 4.57 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งต้นขาด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.58 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งข้อเท้าด้านขวา

จากรูปที่ 4.43 - 4.58 แสดงผลเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่งต่างๆบนร่างกาย จะพบว่าในช่วงมุม 0 องศา หรือ 360 องศา หรือช่วงที่สามารถรับสัญญาณได้มากจะมีความเป็นเชิงเส้นมาก ส่วนช่วงที่ไม่มีสัญญาณหรือรับสัญญาณได้น้อยจะมีความเป็นเชิงเส้นน้อย เนื่องจากเกิดการบดบังของร่างกาย ได้แก่ช่วงมุม 180 องศา

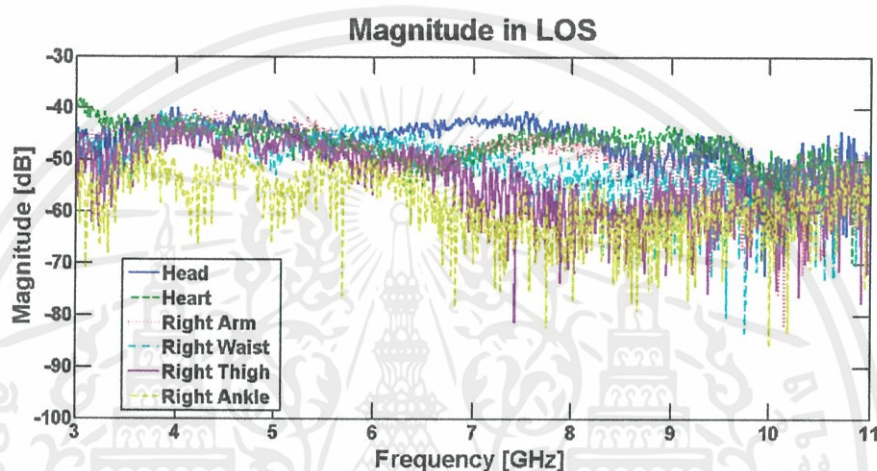
#### 4.3 ผลจากการวัดช่องสัญญาณบนร่างกายกรณีมองเห็นในระดับสายตา และกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

จากการออกแบบจำลองในการวัดช่องสัญญาณกรณีมองเห็นในระดับสายตา และกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย เป็นการวัดเพื่อทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณว่ามีคุณสมบัติเหมือนหรือแตกต่างกับกรณีที่สายอากาศส่งอยู่ด้านหน้าร่างกายหรือไม่ ซึ่งในแต่ละกรณีจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ-ส่งเป็นระยะ 1 เมตร โดยจะนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์ ฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ (Magnitude) เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน (Phase) การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 ผลจากการวัดช่องสัญญาณบนร่างกายกรณีมองเห็นในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

การวัดช่องสัญญาณบนร่างกายกรณีมองเห็นในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย จะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งต่างๆ ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.59 - 4.67 และตารางที่ 4.7 - 4.8 ดังนี้



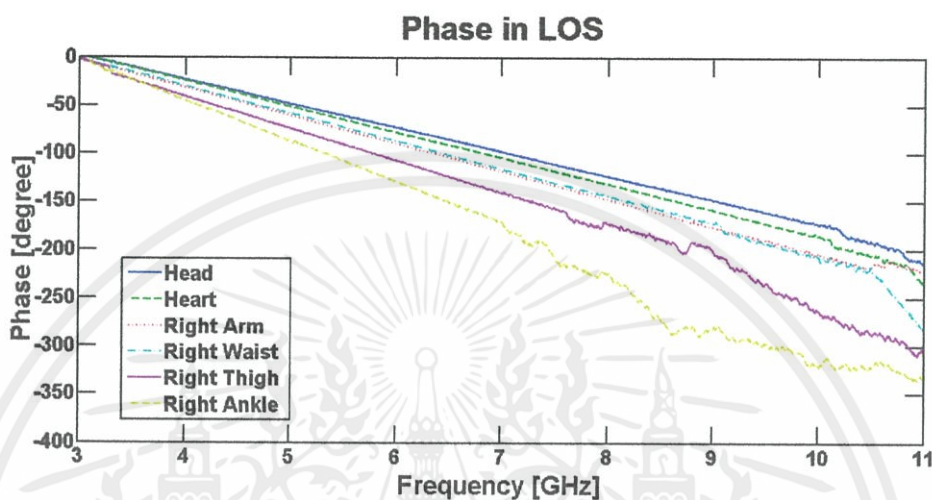
รูปที่ 4.59 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

ตารางที่ 4.7 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

ตำแหน่ง	Max Magnitude (dB)	Min Magnitude (dB)	Mean Magnitude (dB)
ศีรษะ	-39.739	-72.1901	-55.9646
หัวใจ	-38.252	-69.6193	-53.9357
ต้นแขนขวา	-38.1488	-77.8683	-58.0086
ต้นแขนซ้าย	-40.0092	-82.0893	-61.0493
เอวขวา	-40.3272	-90.9582	-65.6427
เอวซ้าย	-40.5311	-83.3294	-61.9303
ต้นขาขวา	-41.7444	-81.7827	-61.7636
ต้นขาซ้าย	-41.1424	-81.351	-61.2467
ข้อเท้าขวา	-45.7574	-80.2546	-63.006
ข้อเท้าซ้าย	-46.5177	-85.7001	-66.1089

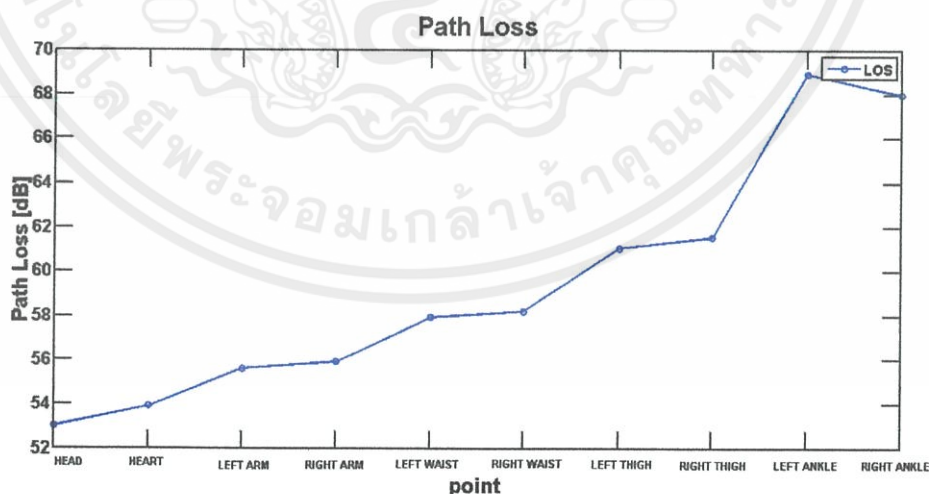
เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

จากรูปที่ 4.59 และตารางที่ 4.7 จะพบว่าขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา ที่ตำแหน่งศีรษะจะมีค่ามากที่สุดประมาณ -39 เดซิเบล และข้อเท้ามีค่าน้อยที่สุดประมาณ -41 เดซิเบล



รูปที่ 4.60 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

จากรูปที่ 4.60 จะพบว่าเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองเห็นในระดับสายตานั้น ที่ตำแหน่งศีรษะจะมีความเป็นเชิงเส้นมากกว่าตำแหน่งอื่นๆ ส่วนในตำแหน่งต้นขาและข้อเท้าจะไม่ค่อยเป็นเส้นตรง เนื่องจากอยู่ไกลกว่าบริเวณอื่นๆมาก

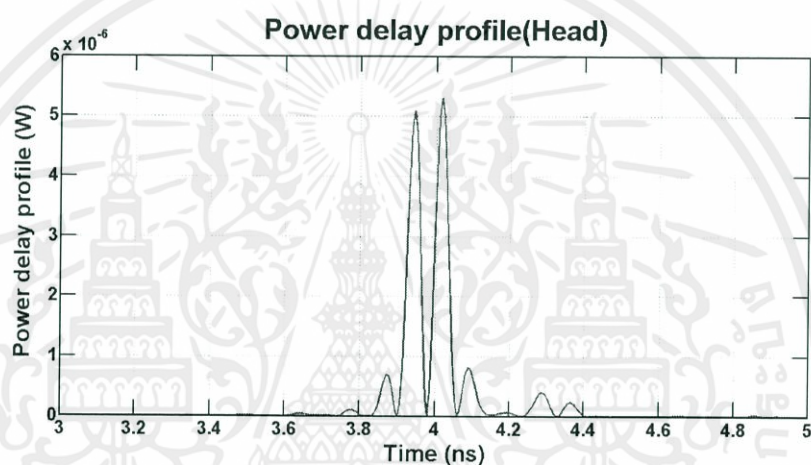


รูปที่ 4.61 การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา

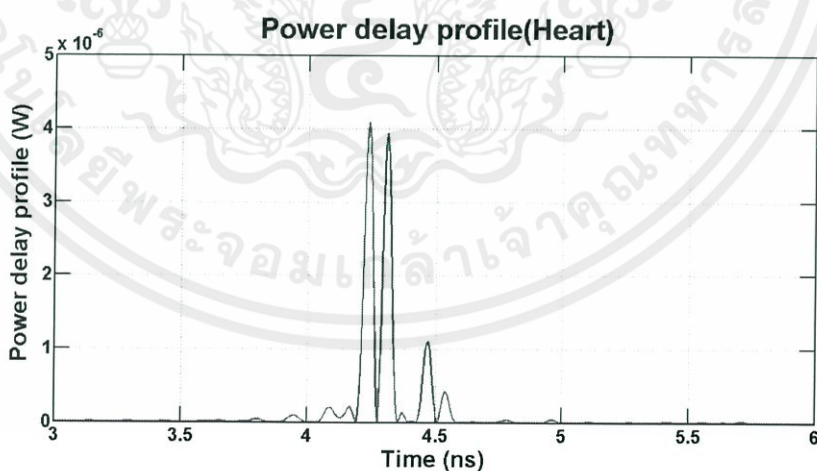
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่ใช่ว่าจะเผยแพร่โดยไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.61 จะพบว่าค่าของการสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตามีค่ามากขึ้นตามระยะทางที่มากขึ้น โดยที่ตำแหน่งศรีษะมีการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 53 เดซิเบล ส่วนที่ตำแหน่งข้อเท้ามีการสูญเสียเชิงวิถีประมาณ 69 เดซิเบล ซึ่งค่าของการสูญเสียเชิงวิถีมีค่าลดลงตามระยะทางที่มากขึ้น

ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ตามตำแหน่งต่างๆบนร่างกายแสดงดังรูปที่ 4.62 ถึงรูปที่ 4.66

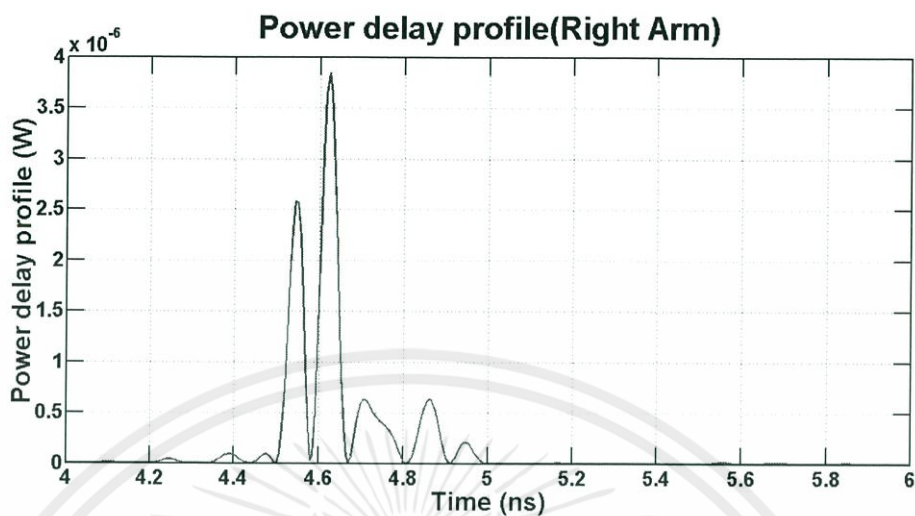


ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งศรีษะ

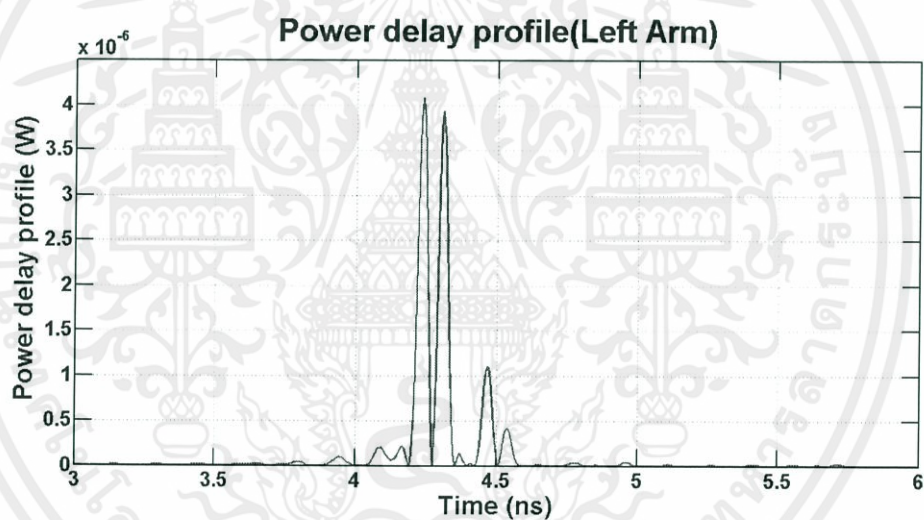


ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งหัวใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้  
รูปที่ 4.62 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งศรีษะและตำแหน่งหัวใจการกำ  
กรณมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย



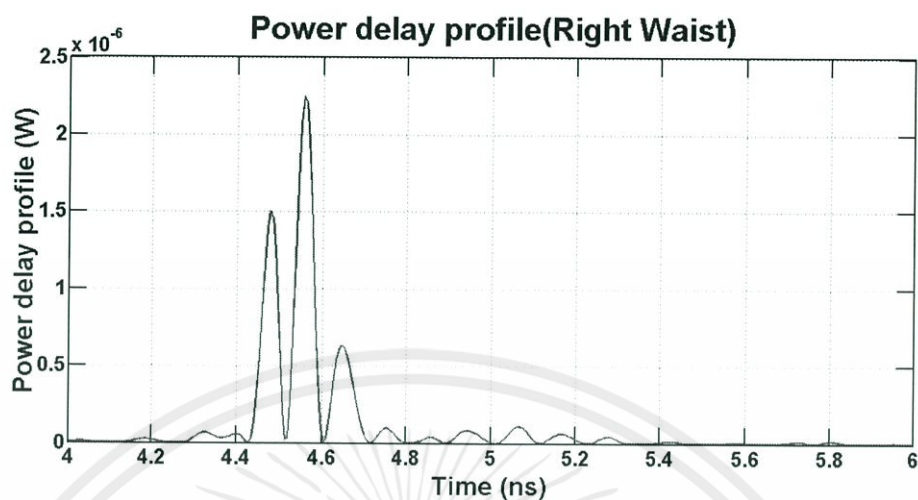
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขนขวา



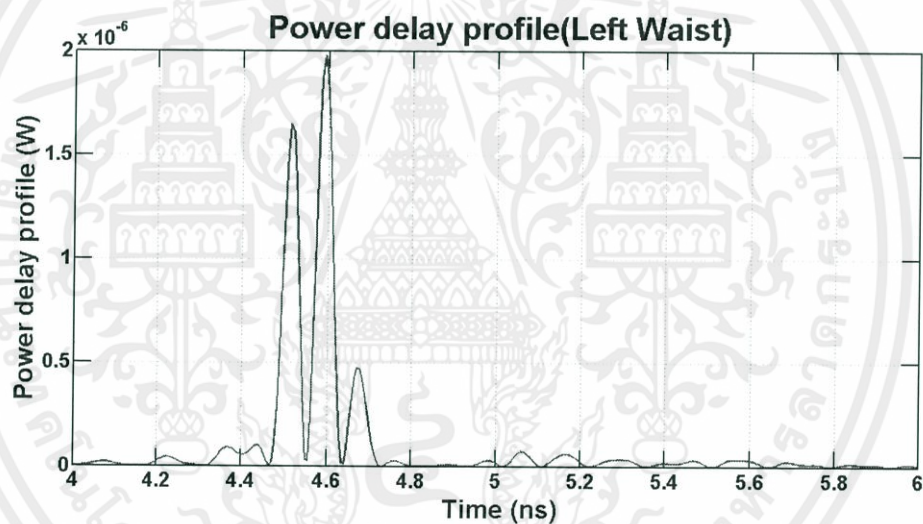
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขนซ้าย

รูปที่ 4.63 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นแขน  
กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



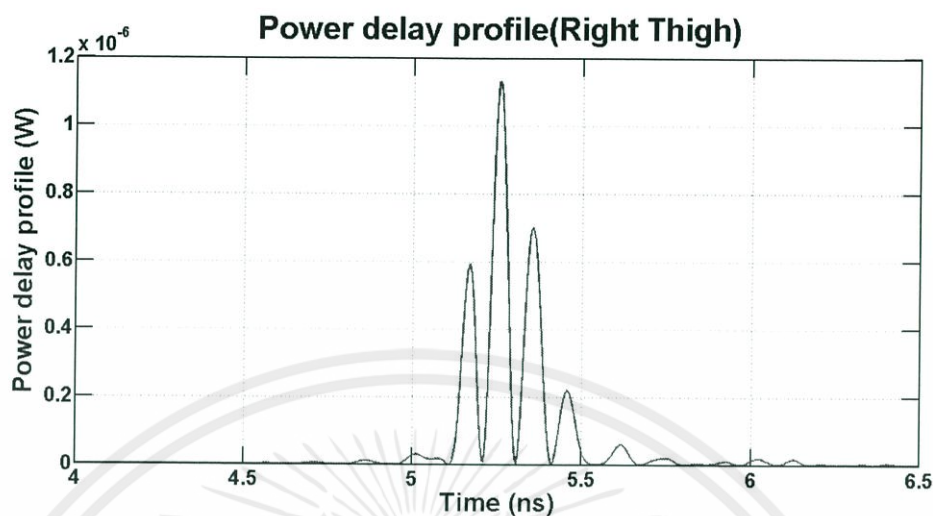
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอวขวา



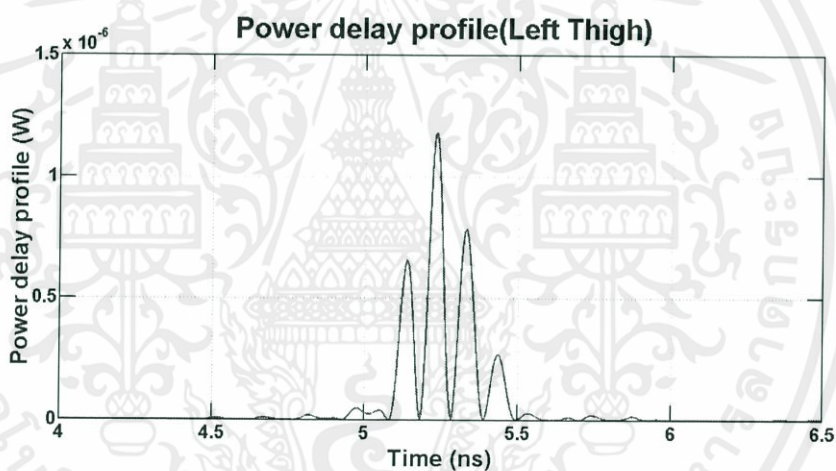
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอวซ้าย

รูปที่ 4.64 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งเอว  
กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



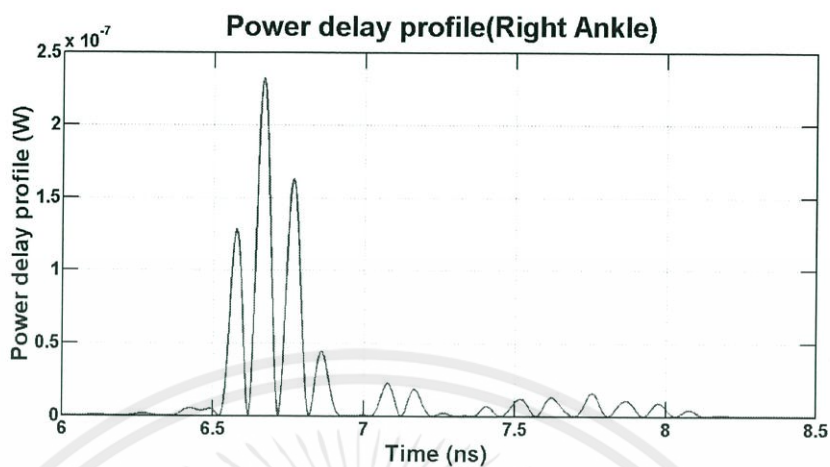
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่ได้รับในตำแหน่งต้นขาขวา



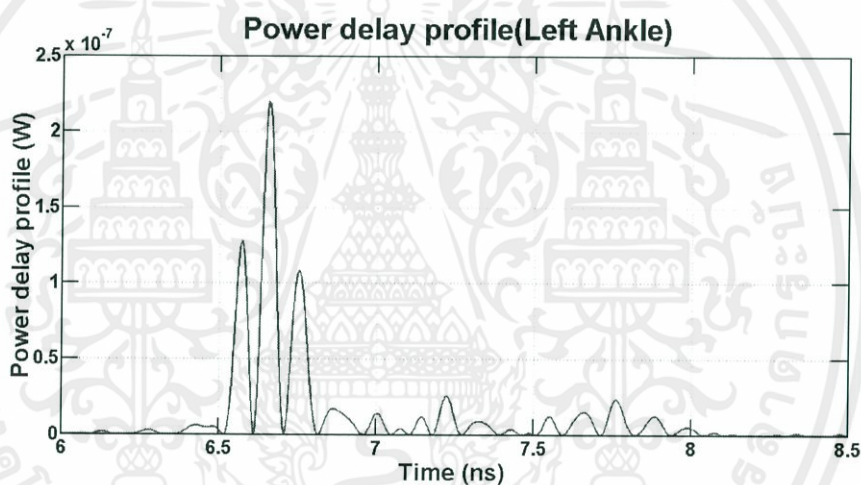
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่ได้รับในตำแหน่งต้นขาซ้าย

รูปที่ 4.65 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่ได้รับบนร่างกายในตำแหน่งต้นขา  
กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



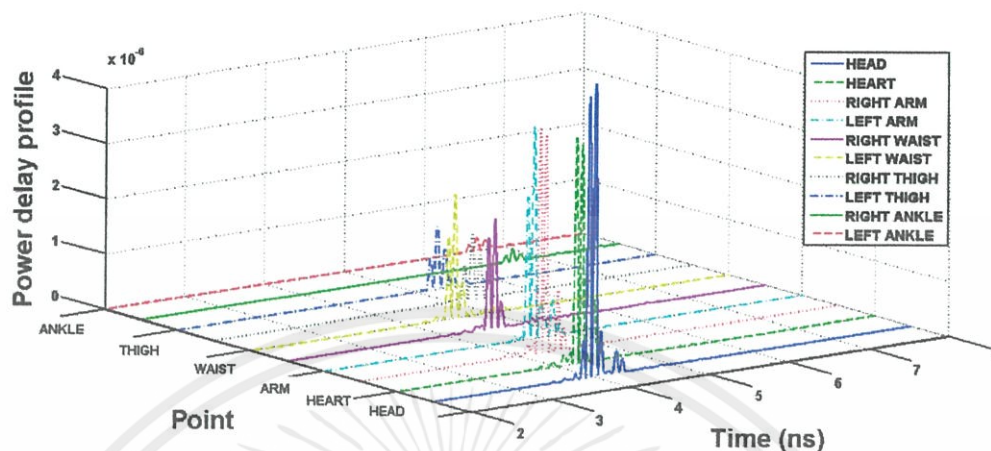
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งข้อเท้าขวา



ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งข้อเท้าซ้าย

รูปที่ 4.66 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งข้อเท้า  
กรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.67 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

ตารางที่ 4.8 กำลังงานที่รับได้ในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

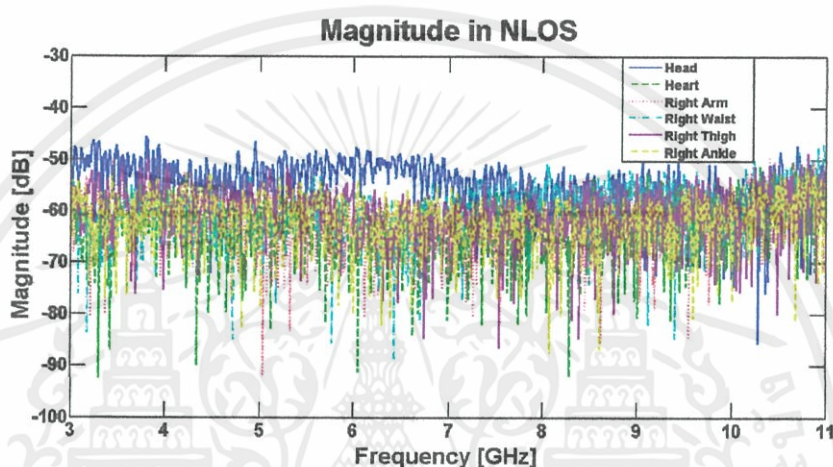
ตำแหน่ง	กำลังงาน( $\mu\text{W}$ )
ศีรษะ	5.1716
หัวใจ	4.0589
ต้นแขนซ้าย	4.0589
ต้นแขนขวา	3.8208
เอวซ้าย	1.9662
เอวขวา	2.2497
ต้นขาขวา	1.1851
ต้นขาซ้าย	1.1150
ข้อเท้าซ้าย	0.21819
ข้อเท้าขวา	0.22751

จากรูปที่ 4.67 และตารางที่ 4.8 แสดงภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ จะเห็นได้ว่าในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา มีระดับของสัญญาณที่ต่างกันตามตำแหน่งบนร่างกายโดยตำแหน่งศีรษะจะมีระดับสัญญาณสูงสุด รองมาคือ ตำแหน่งหัวใจ ต้นแขน เอว ต้นขา และข้อเท้าตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากระดับสัญญาณมีค่าแปรผันตามระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 ผลการวัดช่องสัญญาณบนร่างกายในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

การวัดช่องสัญญาณบนร่างกายกรณีมองไม่เห็นในระดับสายตาจะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างจุดต่างๆ ของด้านหลังร่างกายมนุษย์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.68 - 4.76 และตารางที่ 4.9 - 4.10 ดังนี้

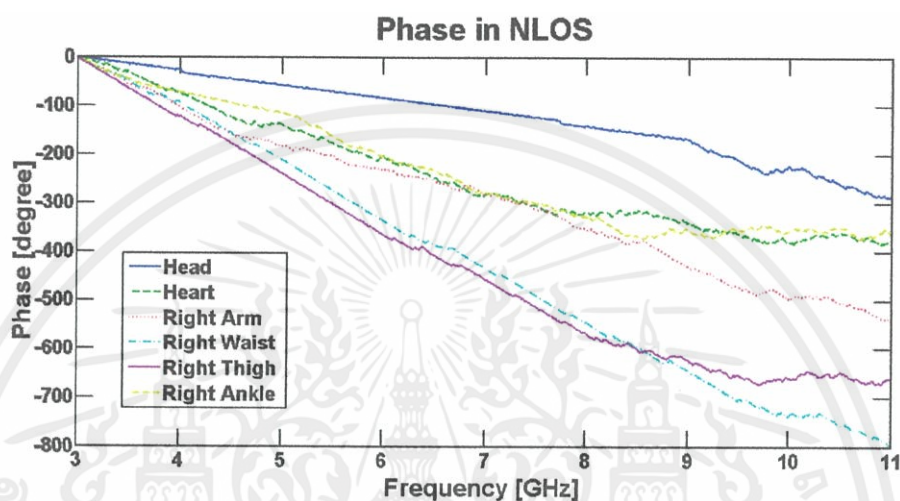


รูปที่ 4.68 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

ตารางที่ 4.9 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

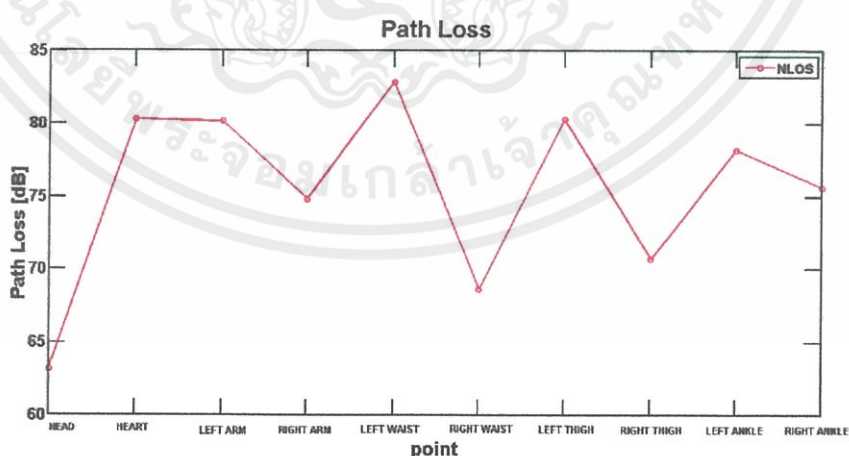
ตำแหน่ง	Max Magnitude (dB)	Min Magnitude (dB)	Mean Magnitude (dB)
ศีรษะ	-45.5579	-85.5768	-65.5674
หัวใจ	-50.5114	-92.376	-71.4437
ต้นแขนขวา	-49.8585	-88.4288	-69.1437
ต้นแขนซ้าย	-48.2976	-92.2812	-70.2894
เอวขวา	-50.5957	-97.0661	-73.8309
เอวซ้าย	-46.8366	-89.1377	-67.9872
ต้นขาขวา	-48.4045	-88.6029	-68.5037
ต้นขาซ้าย	-48.6022	-86.5425	-67.5724
ข้อเท้าขวา	-49.3716	-94.182	-71.7768
ข้อเท้าซ้าย	-51.1659	-87.4336	-69.2998

จากรูปที่ 4.68 และตารางที่ 4.9 จะพบว่าขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา ที่ตำแหน่งศีรษะจะมีค่ามากที่สุดประมาณ  $-45$  เดซิเบล และตำแหน่งข้อเท้ามีค่าน้อยที่สุดประมาณ  $-51$  เดซิเบล เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา จะพบว่าขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณน้อยกว่า



รูปที่ 4.69 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

จากรูปที่ 4.69 จะพบว่าเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตานั้น จะมีความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่ากรณีมองเห็นกันในระดับสายตา เนื่องจากการบิดบังของร่างกายมีผลต่อเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน

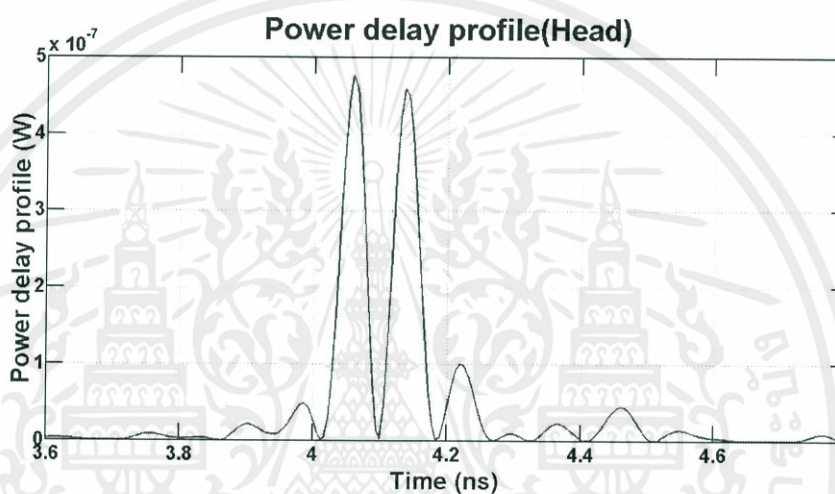


รูปที่ 4.70 การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

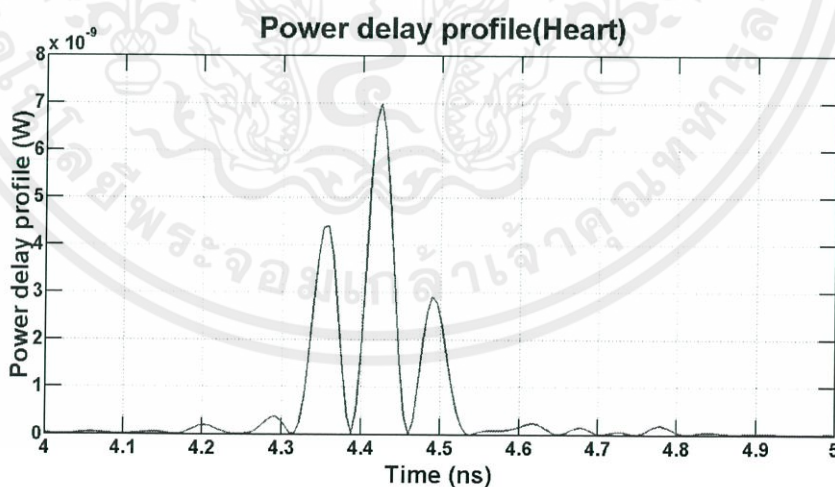
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่ใช่ว่าจะประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.70 จะพบว่าค่าของการสูญเสียเชิงวิถึในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา มีการสูญเสียโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณลำตัวจะมีการบดบังสัญญาณมากกว่า บริเวณอื่นๆ ส่วนในบริเวณขาจะมีระยะห่างจากสายอากาศส่งมาก ทำให้มีการสูญเสียเชิงวิถึมากกว่าๆกับในบริเวณลำตัว

ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ตามตำแหน่งต่างๆบนร่างกายแสดงดังรูปที่ 4.71 ถึงรูปที่ 4.75



ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งศีรษะ

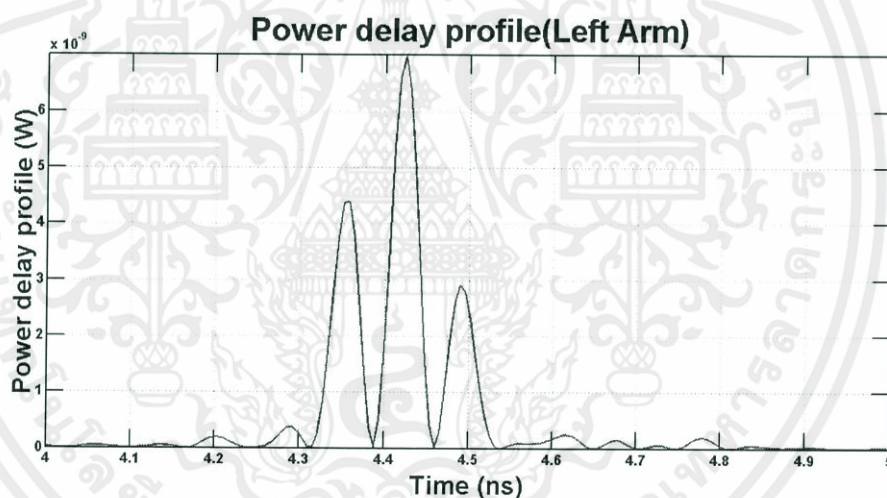


ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งหัวใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.71 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งศีรษะและตำแหน่งหัวใจ การคำนวณการคำนวณมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย



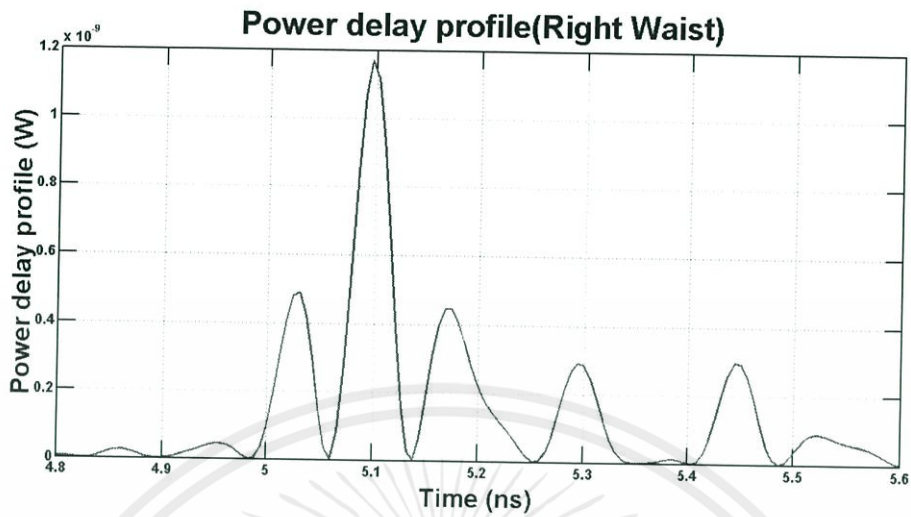
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขนขวา



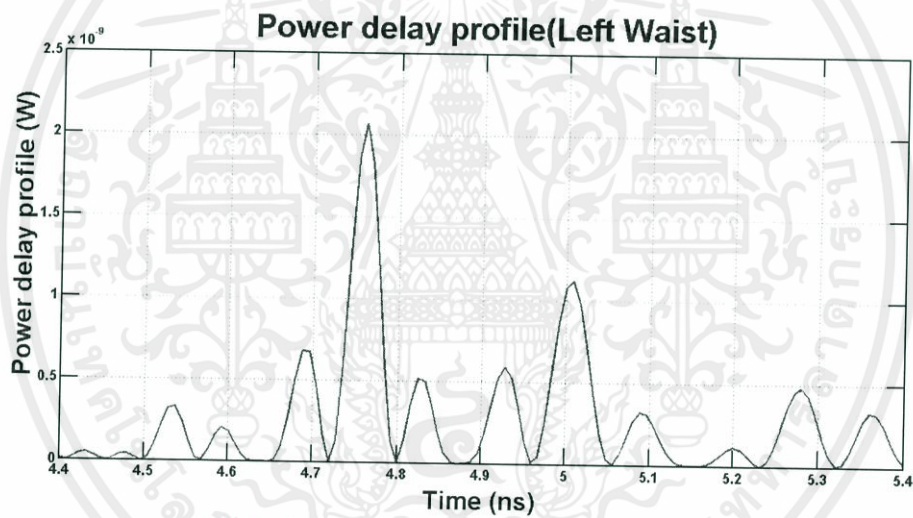
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นแขนซ้าย

รูปที่ 4.72 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นแขน  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



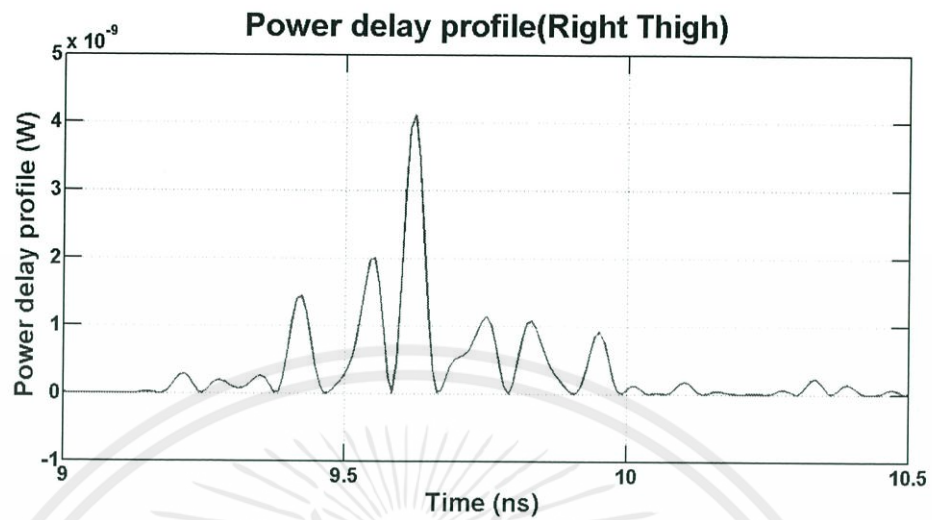
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอวขวา



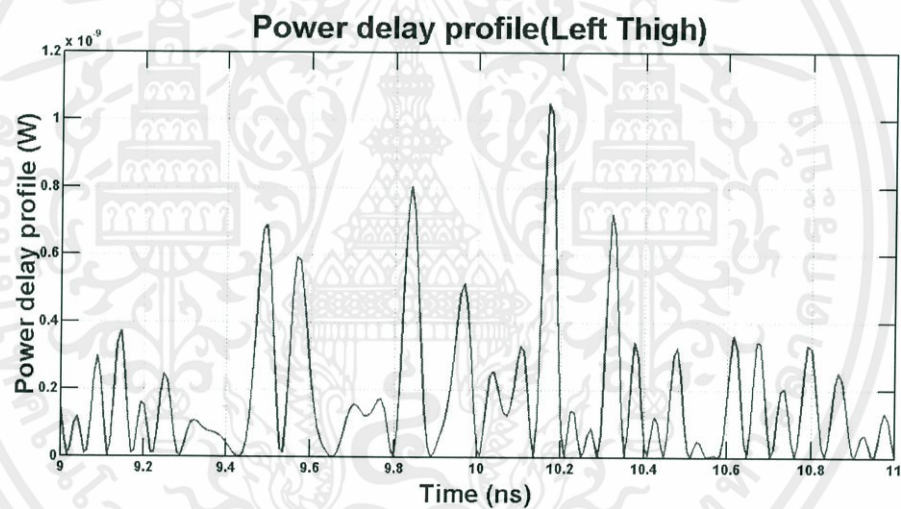
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งเอวซ้าย

รูปที่ 4.73 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งเอว  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



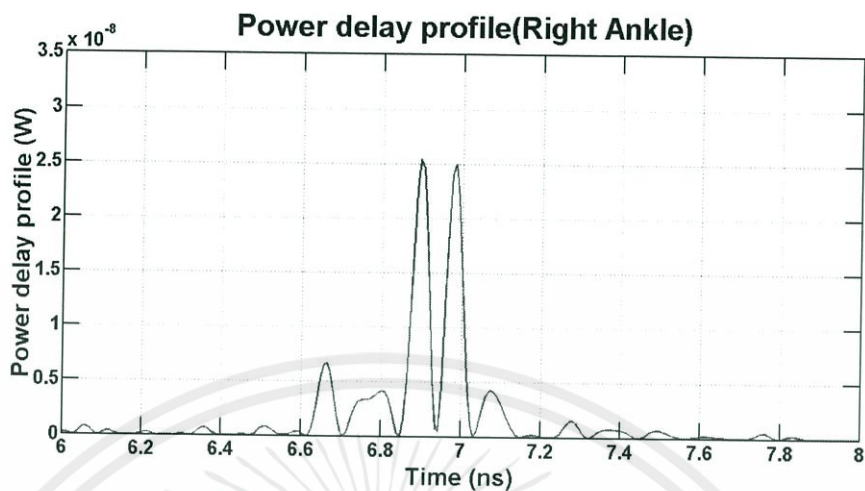
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นขาขวา



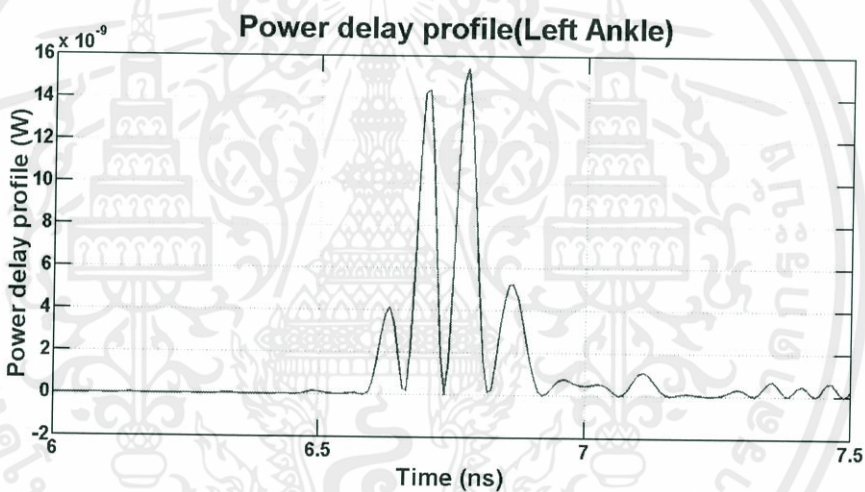
ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งต้นขาซ้าย

รูปที่ 4.74 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้บนร่างกายในตำแหน่งต้นขา  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



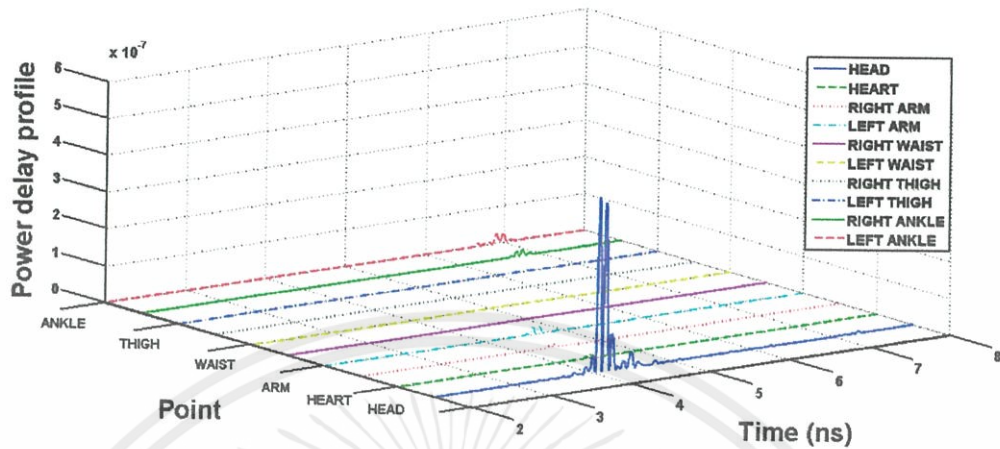
ก. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งข้อเท้าขวา



ข. ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่งข้อเท้าซ้าย

รูปที่ 4.75 ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในร่างกายในตำแหน่งข้อเท้า  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.76 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา โดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

ตารางที่ 4.10 กำลังงานที่รับได้ในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

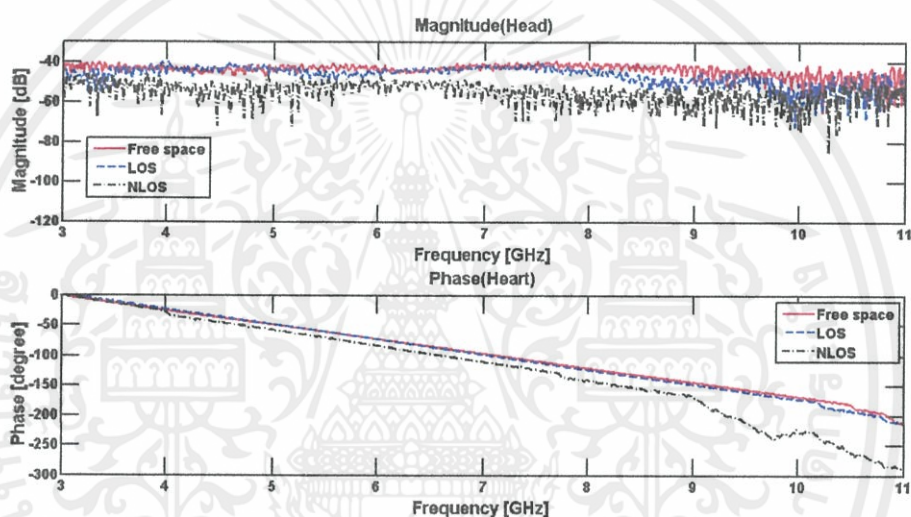
ตำแหน่ง	กำลังงาน( $\mu\text{W}$ )
ศีรษะ	477.33
หัวใจ	6.8449
ต้นแขนซ้าย	6.8449
ต้นแขนขวา	18.923
เอวซ้าย	2.0701
เอวขวา	1.2688
ต้นขาขวา	0.80296
ต้นขาซ้าย	4.1306
ข้อเท้าซ้าย	15.117
ข้อเท้าขวา	25.538

จากรูที่ 4.76 ตารางที่ 4.10 แสดงผลภาพตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณนั้น จะนำมาใช้เปรียบเทียบกันเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตามีระดับของสัญญาณที่น้อยมาก เนื่องจากผลของร่างกายมนุษย์ทำให้เกิดการจางหายหลายวิถีมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

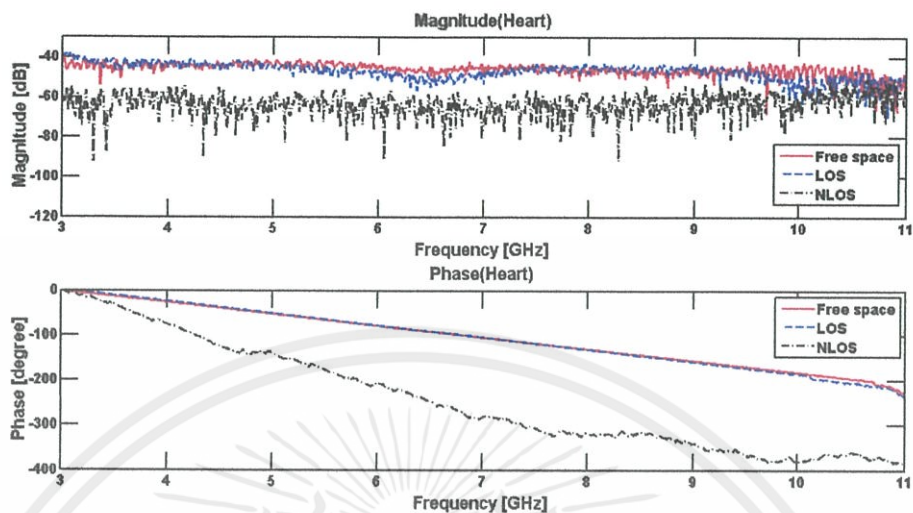
#### 4.3.3 ผลการเปรียบเทียบขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน และการสูญเสียเชิงวิถี ระหว่างกรณีต่างๆในแต่ละตำแหน่งบนร่างกายโดยสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน จะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณและระดับกำลังงานหรือระดับเฟสของสัญญาณที่รับได้ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณีต่างๆ บนจุดต่างๆบนร่างกายทั้ง 10 จุด ตามรูปที่ 4.77 - 4.87 ดังนี้

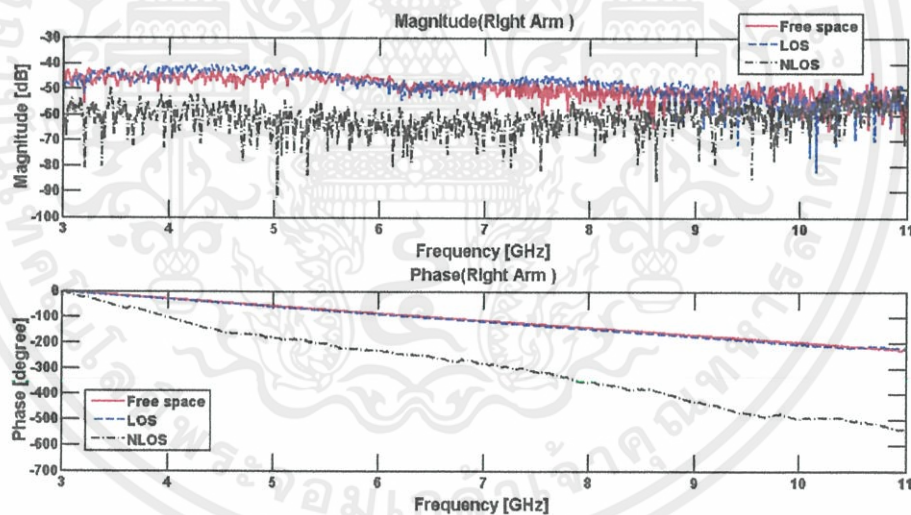


รูปที่ 4.77 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งศีรษะ กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

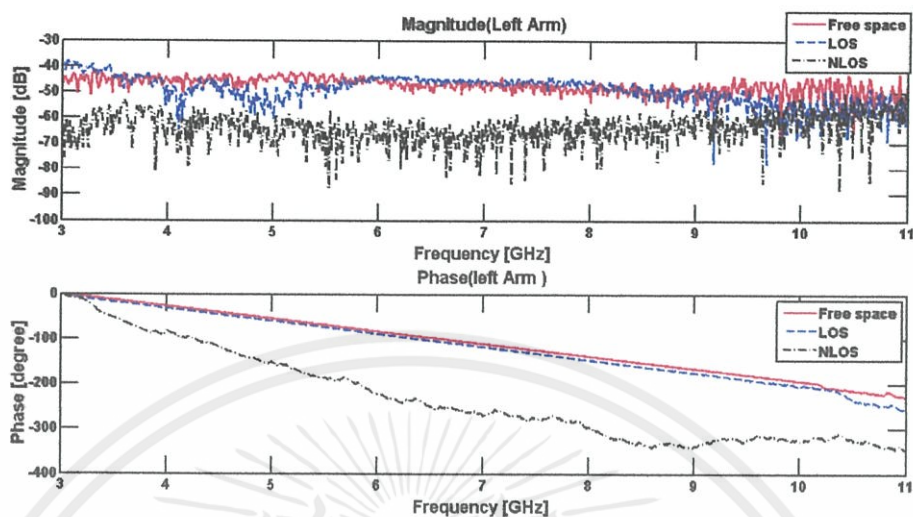


รูปที่ 4.78 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งหัวใจ  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

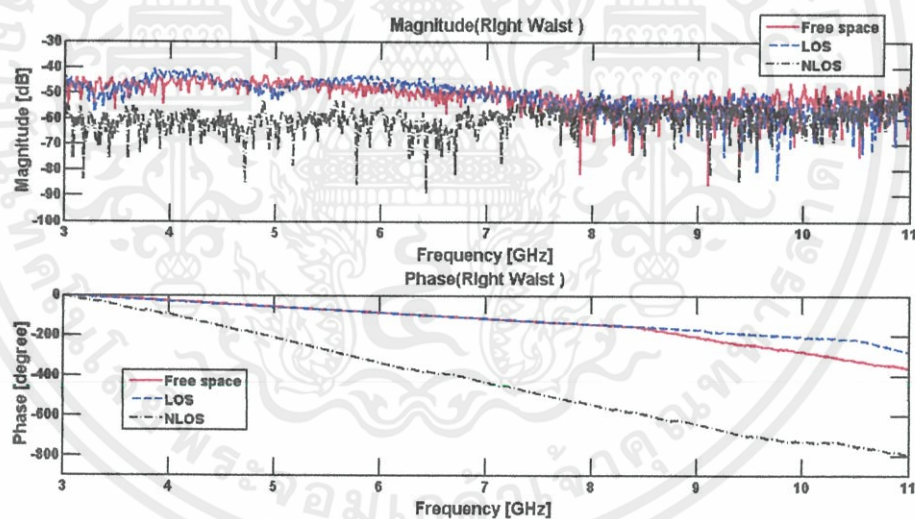


รูปที่ 4.79 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นแขนด้านขวา  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

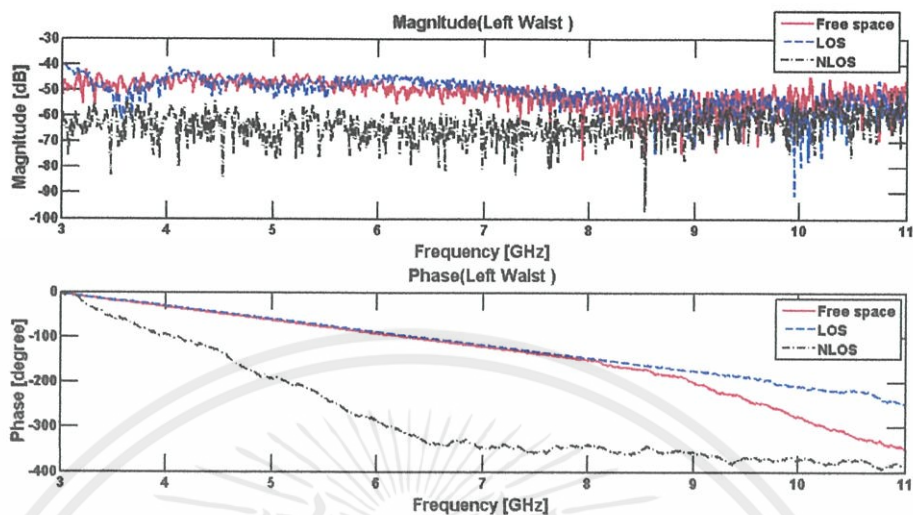


รูปที่ 4.80 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นแขนด้านซ้าย  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

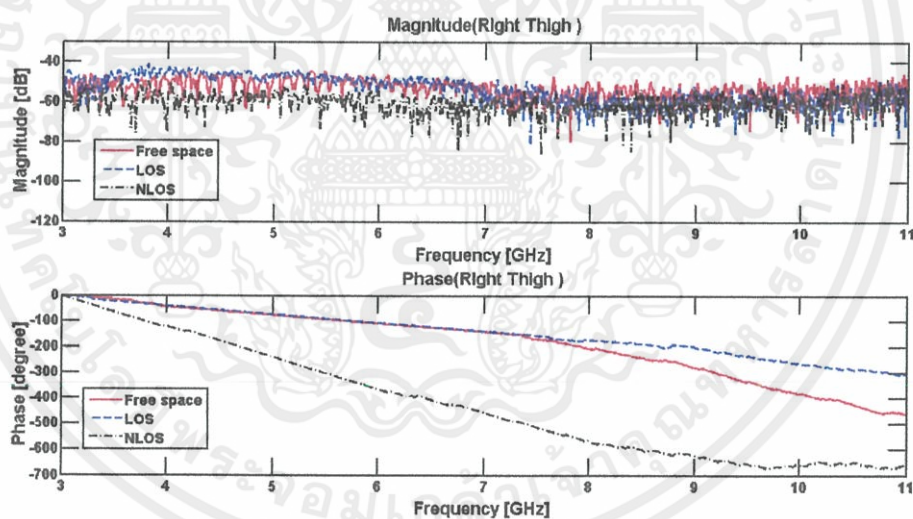


รูปที่ 4.81 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งเอวด้านขวา  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

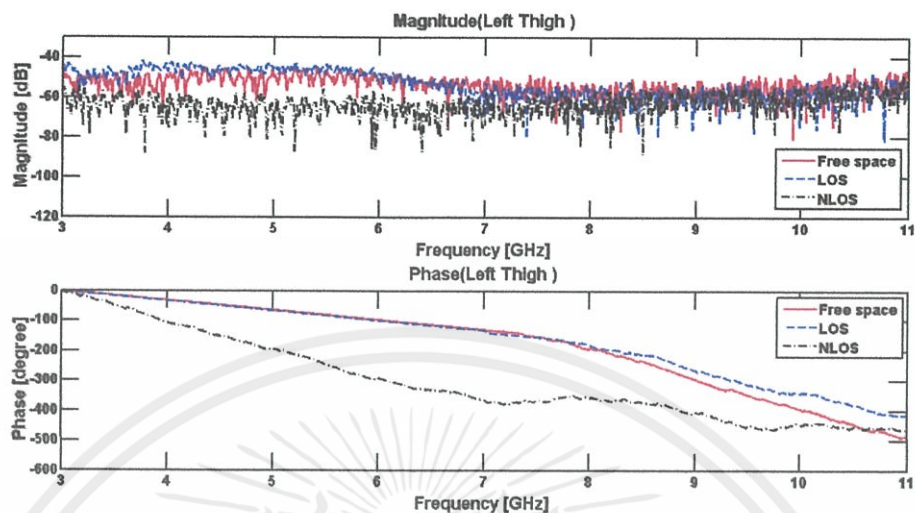


รูปที่ 4.82 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งเอวด้านซ้าย  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

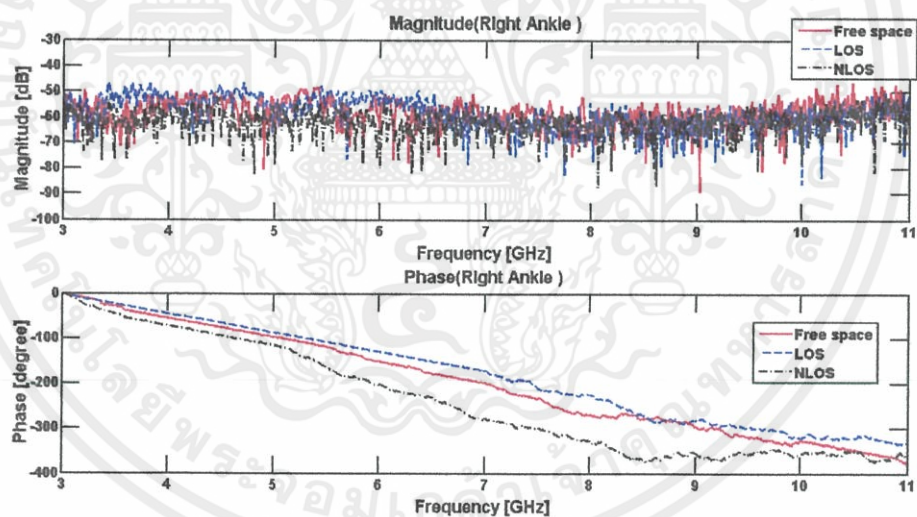


รูปที่ 4.83 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นขาขวา  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

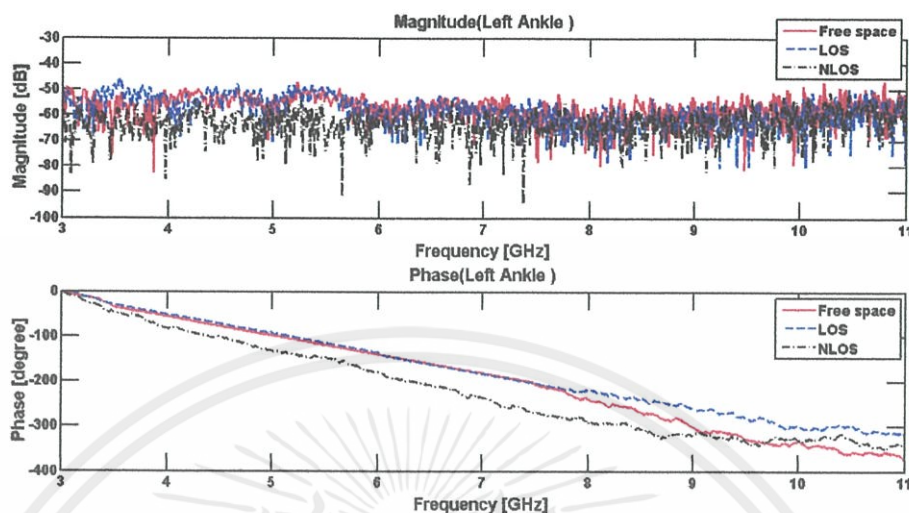


รูปที่ 4.84 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นขาซ้าย  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย



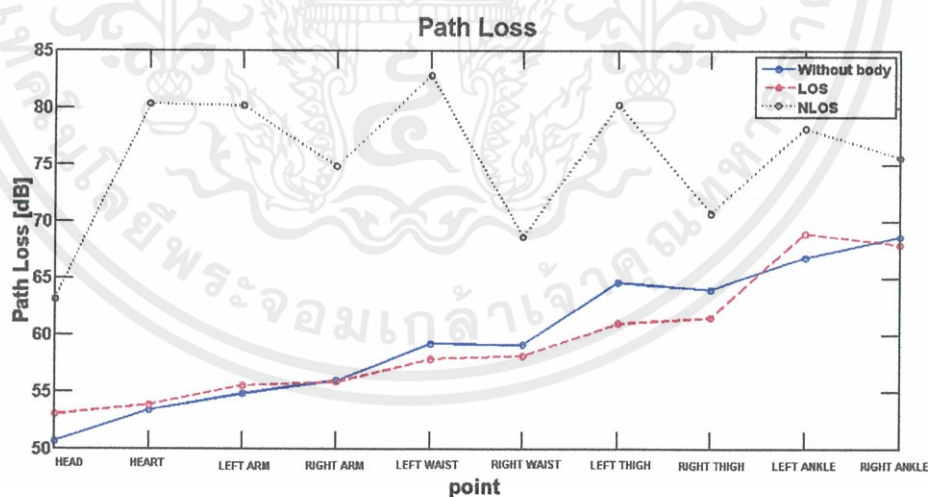
รูปที่ 4.85 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งข้อเท้าขวา  
กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.86 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งข้อเท้าซ้าย กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

การสูญเสียเชิงวิถีนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียเชิงวิถีและจุดที่วัดผล เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณีมองเห็นในระดับสายตา กรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา และกรณีที่สายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่าง บนจุดต่างๆบนร่างกายทั้ง 10 จุดตามรูปที่ 4.87



รูปที่ 4.87 ผลการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงวิถีในกรณีต่างๆที่ตำแหน่งต่างๆบนร่างกาย กรณีสายอากาศส่งอยู่ด้านหลังร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

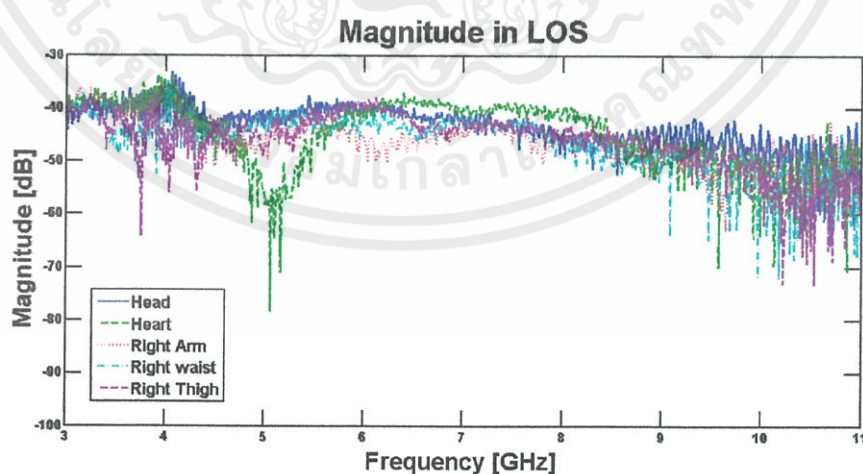
จากรูป 4.87 จะเห็นว่าการสูญเสียเชิงวิถีในตำแหน่งต่างๆบนร่างกาย ในแต่ละกรณีพบว่าในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา และกรณีสายอากาศอยู่ในพื้นที่ว่างมีการสูญเสียเชิงวิถีใกล้เคียงกันมาก โดยกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาจะมีการสูญเสียเชิงวิถีมากที่สุดเนื่องจากเกิดการบดบังสัญญาณของร่างกาย

#### 4.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะช่องสัญญาณเนื่องจากผลกระทบทางร่างกายที่ตำแหน่งต่างๆ

ผลการทดลองนี้ได้จากการวัดช่องสัญญาณกรณีมองเห็นในระดับสายตา และกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา ซึ่งแต่ละกรณีจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ-ส่งเป็นระยะ 1 เมตร และกำหนดให้สายอากาศรับและส่งอยู่ตรงกันเสมอในแต่ละตำแหน่ง คือ ตำแหน่งศีรษะ หัวใจ แขน เอว และขา เพื่อจะนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์สัญญาณและเปรียบเทียบผลที่ได้ว่าขนาดเนื้อเยื่อ ความหนาของร่างกายแต่ละส่วนมีผลอย่างไรต่อสัญญาณ

##### 4.4.1 ผลการวัดช่องสัญญาณบนร่างกายที่สายอากาศส่ง-รับอยู่ตรงกันในการมองเห็นกันในระดับสายตา และมองไม่เห็นกันในระดับสายตา

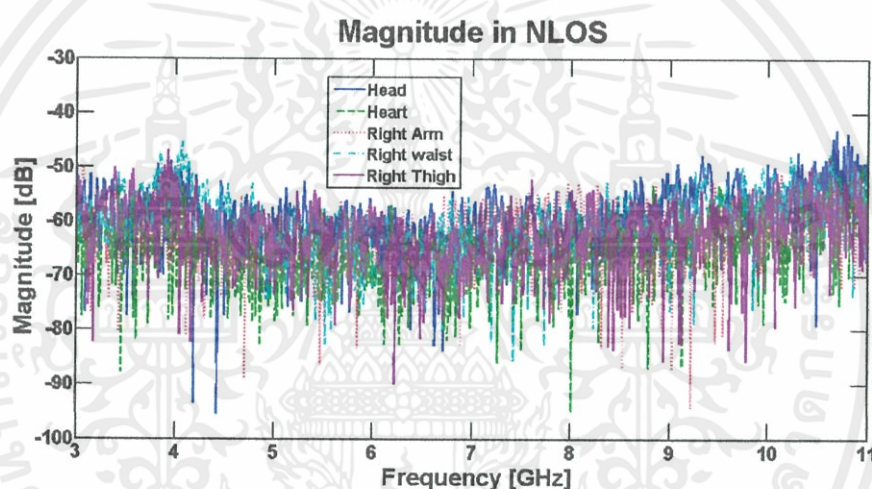
การวัดช่องสัญญาณบนร่างกายกรณีมองไม่เห็นในระดับสายตาจะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างจุดต่างๆ ของด้านหลังร่างกายมนุษย์ ได้แก่ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน การสูญเสียเชิงวิถี และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน ซึ่งแสดงรูปที่ 4.88 - 4.95 ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.88 เปรียบเทียบขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกันด้านการก้ำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาของเอกสารนี้ไปใช้เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกัน  
กรณีมองเห็นกันในระดับสายตา

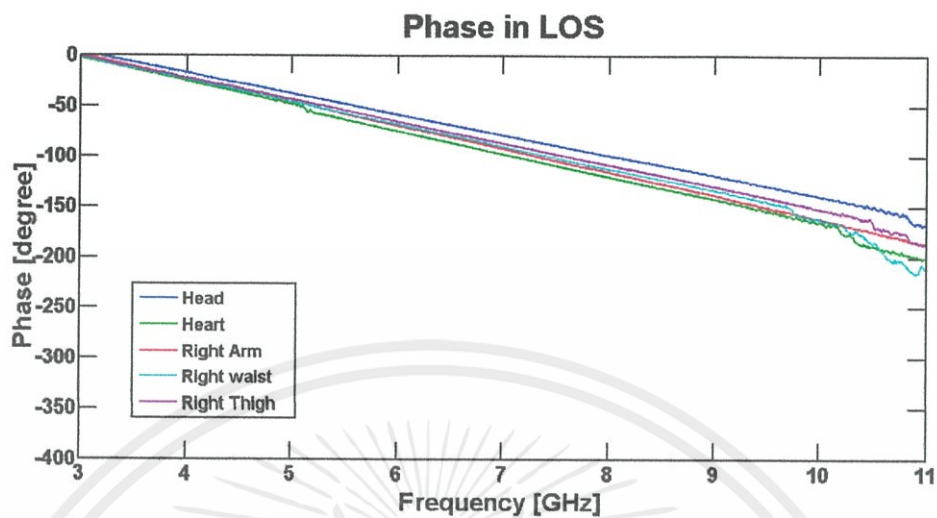
	MAX Magnitude (dB)	MIN Magnitude (dB)	MEAN Magnitude (dB)
ศีรษะ	-33.1375	-65.0906	-49.1141
หัวใจ	-33.4621	-78.3296	-55.8959
ต้นแขน	-34.4382	-63.0947	-48.7665
เอว	-34.9589	-71.8573	-53.4081
ต้นขา	-37.4851	-73.1649	-55.325



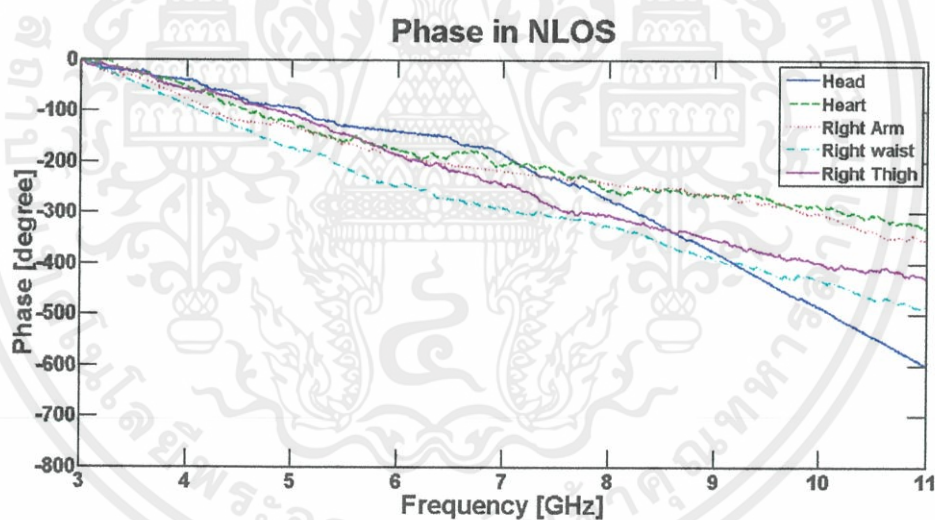
รูปที่ 4.89 เปรียบเทียบขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกัน  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา

ตารางที่ 4.12 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกัน  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา

	MAX Magnitude (dB)	MIN Magnitude (dB)	MEAN Magnitude (dB)
ศีรษะ	-42.9323	-95.3919	-69.1621
หัวใจ	-49.7988	-95.1085	-72.4537
ต้นแขน	-47.818	-94.3243	-71.0712
เอว	-45.2783	-85.7633	-65.5208
ต้นขา	-46.7426	-89.8806	-68.3116

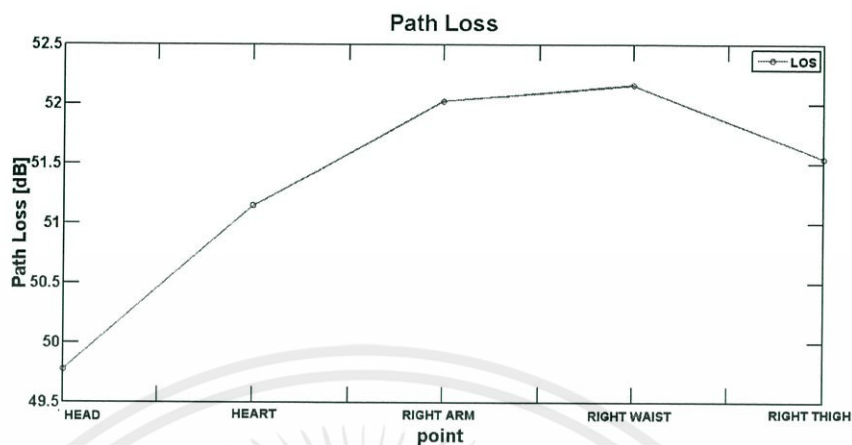


รูปที่ 4.90 เปรียบเทียบเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกัน  
กรณีมองเห็นกันในระดับสายตา

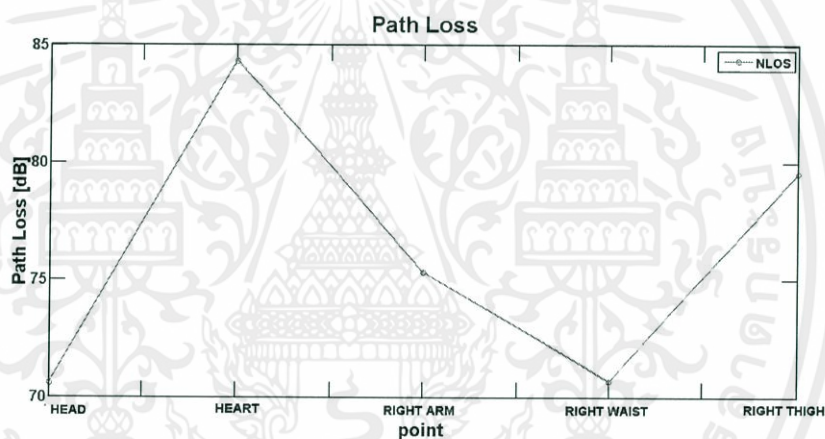


รูปที่ 4.91 เปรียบเทียบเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่สายอากาศอยู่ตรงกัน  
กรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

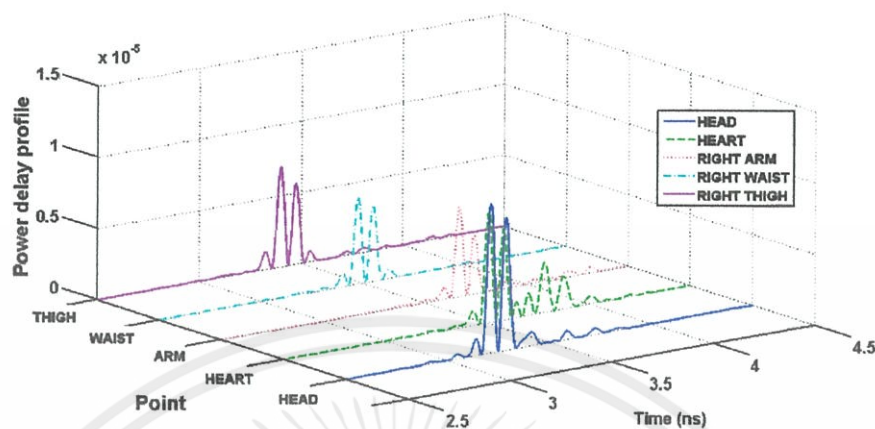


รูปที่ 4.92 การสูญเสียเชิงวิถีที่สายอากาศอยู่ตรงกันกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา



รูปที่ 4.93 การสูญเสียเชิงวิถีที่สายอากาศอยู่ตรงกันกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา

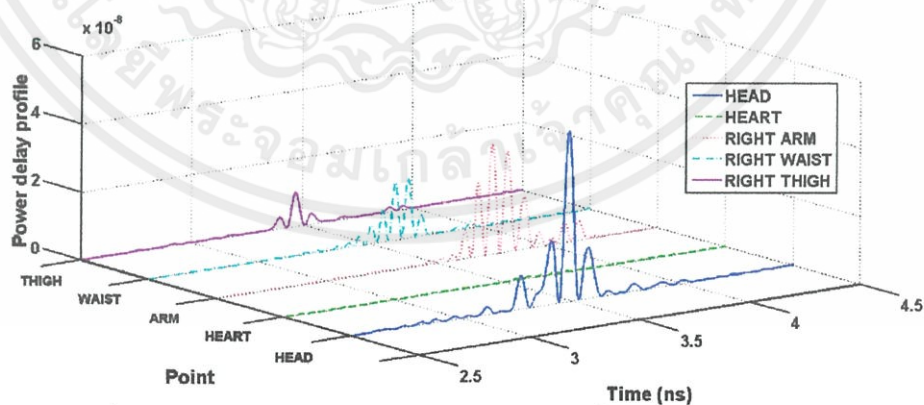
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.94 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่สายอากาศอยู่ตรงกัน  
ในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตา

ตารางที่ 4.13 กำลังงานที่ได้รับได้ในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาโดยที่สายอากาศอยู่ตรงกัน

ตำแหน่ง	กำลังงาน( $\mu\text{W}$ )
ศีรษะ	10.540
หัวใจ	7.6821
ต้นแขนขวา	6.2770
เอว	6.0823
ต้นขาขวา	7.0150



รูปที่ 4.95 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่สายอากาศอยู่ตรงกัน

ในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเชิงการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้ดูแลให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 กำลังงานที่รับได้ในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาโดยที่สายอากาศอยู่ตรงกัน

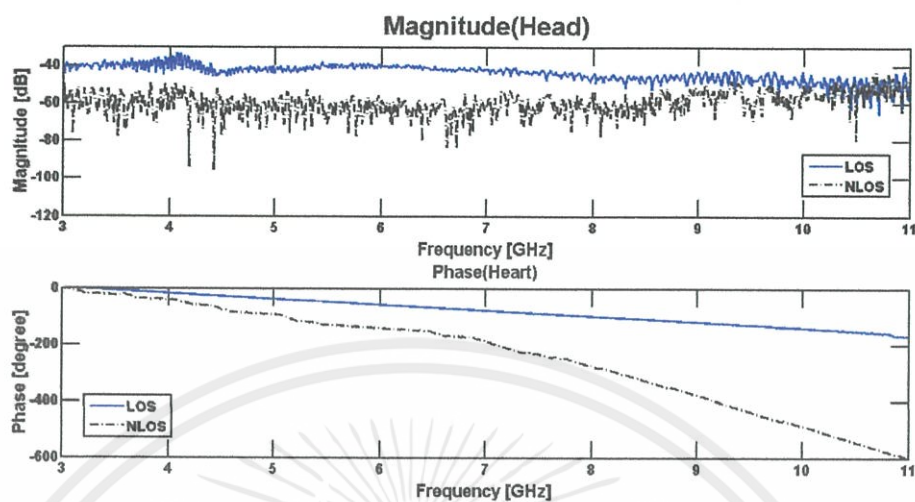
ตำแหน่ง	กำลังงาน( $\mu\text{W}$ )
ศีรษะ	49.478
หัวใจ	1.5763
ต้นแขนขวา	31.921
เอว	17.658
ต้นขาขวา	9.8534

จากรูปที่ 4.88 – 4.95 จะพบว่าสัญญาณในกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาจะมีคุณภาพดีกว่ากรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา สำหรับกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตานั้นที่ตำแหน่งศีรษะจะรับสัญญาณได้ดีที่สุดเนื่องจากบริเวณศีรษะอาจจะมีมวลเนื้อที่น้อยกว่าเพราะส่วนใหญ่เป็นกระดูกและเยื่อหุ้มสมองซึ่งอยู่ด้านหลังตัวรับจึงไม่ค่อยมีผลมากนัก ส่วนเอวเป็นตำแหน่งรับสัญญาณได้น้อยที่สุดเนื่องจากความหนาของร่างกายที่ช่วงท้องและลำตัวมีผลต่อสัญญาณที่รับได้

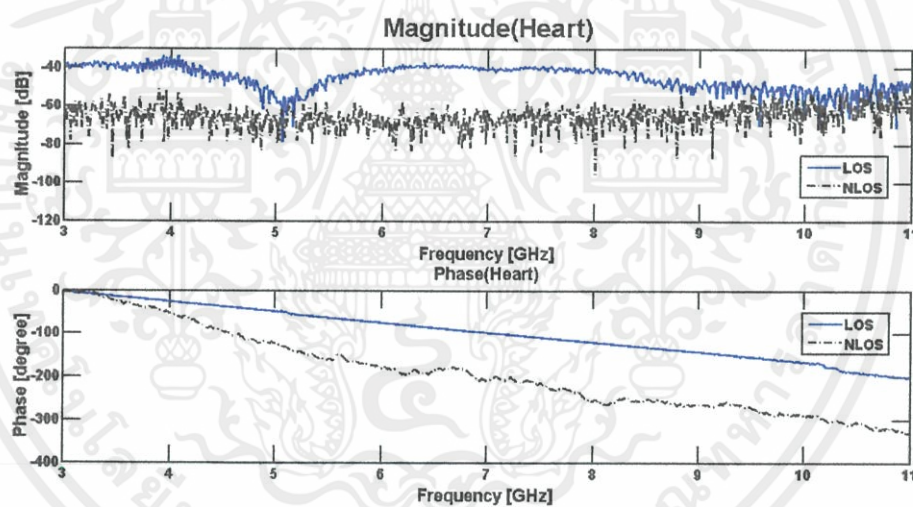
ส่วนกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตาหรือมีร่างกายมาบดบังนั้นที่ตำแหน่งศีรษะจะมีสัญญาณผ่านได้ดีที่สุดเนื่องจากอาจเป็นเพราะบริเวณศีรษะมีความกว้างของอวัยวะน้อยที่สุดทำให้คลื่นเดินทางผ่านไปยังตัวรับสัญญาณได้ดีกว่า ส่วนบริเวณหัวใจเป็นตำแหน่งที่มีสัญญาณผ่านได้น้อยที่สุดเนื่องจากความหนาของกล้ามเนื้อบริเวณหน้าอกที่มีมากกว่าและขนาดความกว้างของหน้าอก รวมไปถึงช่วงไหล่ ทำให้สัญญาณบางส่วนที่เลี้ยวผ่านร่างกายไปยังตัวรับที่อยู่ด้านหลังรับสัญญาณได้น้อยลง ส่วนตำแหน่งร่างกายที่มีผลต่อสัญญาณลงมาจากตำแหน่งศีรษะคือต้นแขน เอว และต้นขาตามลำดับซึ่งเกิดจากความกว้างและความหนาของร่างกาย

#### 4.4.2 การเปรียบเทียบขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน การสูญเสียเชิงวิถี ระหว่างกรณีต่างๆในแต่ละตำแหน่งบนร่างกาย

การเปรียบเทียบขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน และการสูญเสียเชิงวิถี ระหว่างกรณีต่างๆในแต่ละตำแหน่งบนร่างกายแสดงดังรูปที่ 4.96 – 4.101

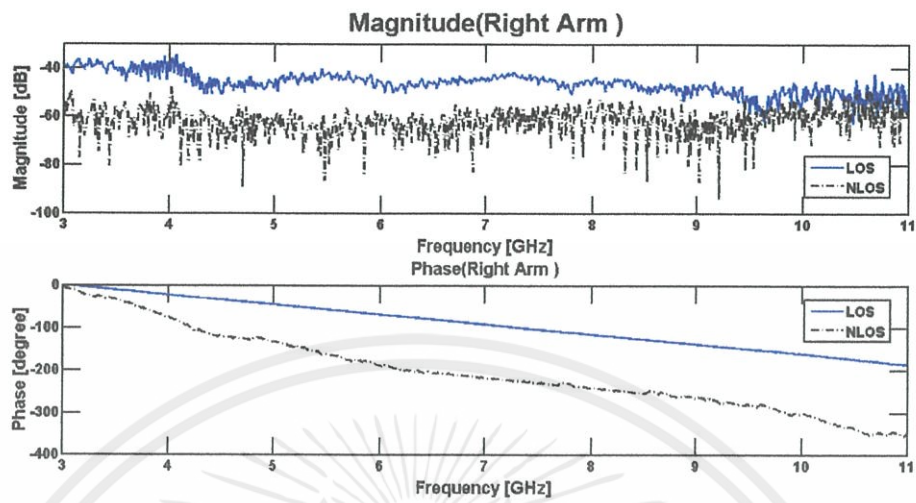


รูปที่ 4.96 เปรียบเทียบขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งศีรษะ

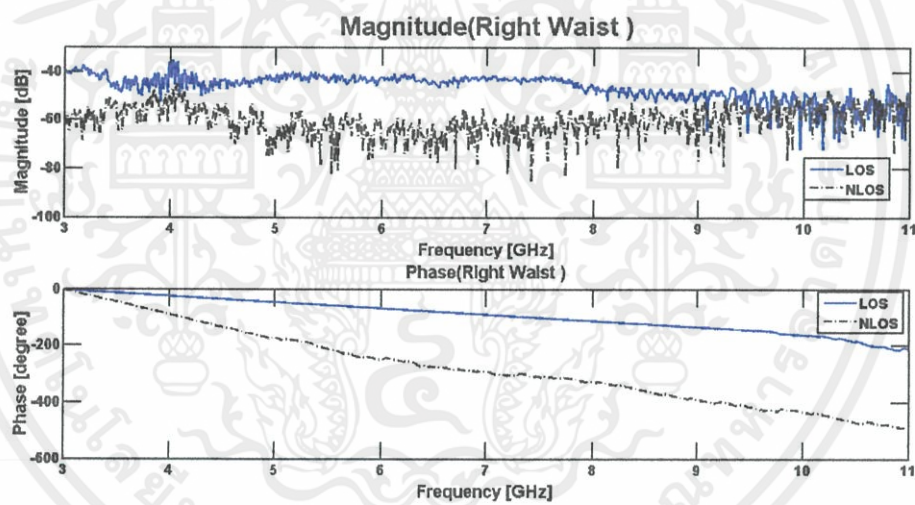


รูปที่ 4.97 เปรียบเทียบขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งหัวใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

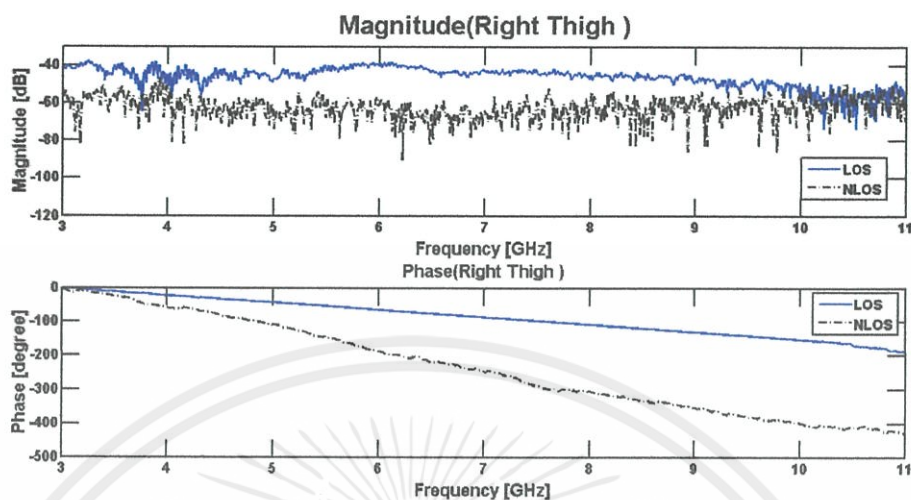


รูปที่ 4.98 เปรียบเทียบขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นแขนขวา

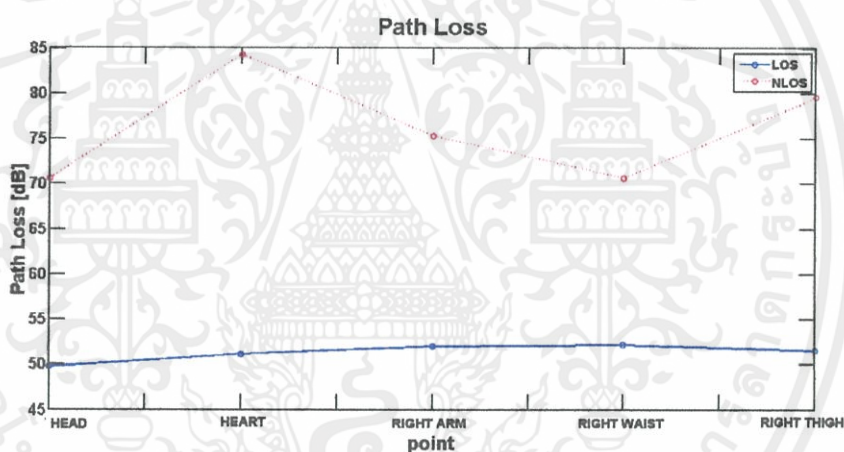


รูปที่ 4.99 เปรียบเทียบขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งเอวขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.100 เปรียบเทียบขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณที่ตำแหน่งต้นขาขวา



รูปที่ 4.101 เปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีที่สายอากาศอยู่ตรงกัน กรณีมองเห็นกันในระดับสายตา และกรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา

จากรูปที่ 4.96 – 4.101 จะพบว่าสัญญาณในกรณีมองเห็นกันในระดับสายตาจะมีคุณภาพดีกว่ากรณีมองไม่เห็นกันในระดับสายตา ซึ่งจะเห็นได้จากระดับสัญญาณของฟังก์ชันการถ่ายโอนมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด รวมทั้งเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนมีลักษณะความเป็นเชิงเส้นมากกว่ามาก และเมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียเชิงวิถีจะพบว่าในกรณีที่สายอากาศมองเห็นกันในระดับสายตาจะมีค่าการสูญเสียใกล้เคียงกัน ส่วนในกรณีสายอากาศมองไม่เห็นกันในระดับสายตาจะมีค่าการสูญเสียมากกว่ามากโดยเฉพาะในตำแหน่งหัวใจจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีสูงที่สุด เนื่องจากมีขนาดและความหนาของร่างกายมากกว่าตำแหน่งอื่น จึงทำให้เกิดการบดบังสัญญาณและดูดซับสัญญาณเอกสารนี้เป็นมากกว่าจุดอื่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาถึงคุณลักษณะช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งในสถานะแวดล้อมภายในอาคาร โดยอาศัยการตรวจสอบบนพื้นฐานการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งได้จำลองการวัดที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน 2 แบบคือ แบบที่มองเห็นในระดับสายตาและแบบที่ไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา โดยใช้สายอากาศ 2 ชนิดในการทดสอบคือสายอากาศแบบกรวยคู่และสายอากาศแบบไมโครสตริปโดยทำการวิเคราะห์ผลการวัดด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้คือ การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ (Magnitude) และเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน (Phase) สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผล

1) จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศในบทที่ 4 พบว่าสายอากาศแบบไมโครสตริปที่สร้างขึ้นนี้ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทุกทิศทางในช่วงความถี่ที่นำไปใช้งาน เฟสเป็นเชิงเส้น ส่วนประสิทธิภาพของสายอากาศพบว่าดีพอใช้ โดยรวมแล้วสามารถสรุปได้ว่า สายอากาศแบบไมโครสตริปนี้สามารถใช้งานในช่วงความถี่ 3.1 – 10.6 GHz ได้

2) จากการวิเคราะห์ช่องสัญญาณกรณีมองเห็นในระดับสายตา ในการตรวจสอบถึงคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในแบบจำลองการวัดภายในห้อง โดยใช้สายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศภาครับติดบนร่างกาย ในจุดต่างๆที่กำหนดไว้รวม 10 จุด ซึ่งในแต่ละจุดจะติดไว้ในส่วนต่างๆของด้านหน้าร่างกาย โดยให้ด้านรับของสายอากาศหันหน้าเข้าหาสายอากาศภาคส่งซึ่งจะวางห่างออกไปจากร่างกายในระยะ 1 เมตร แล้วส่งคลื่นผ่านสายอากาศภาคส่งมายังภาครับ บันทึกผลที่วัดได้นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล สามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณส่วนใหญ่เกิดจากระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างในส่วนต่างๆ ของร่างกาย เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณ ซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียเชิงวิถี ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน และระดับกำลังงานที่รับได้ในเวลาต่างๆ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง เมื่อนำมาอ้างอิงกับผลการวิเคราะห์ทำให้เห็นว่าผลที่ได้จากบริเวณที่มีระยะห่างของสายอากาศมากจะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากกว่าในบริเวณที่มี

ระยะห่างของสายอากาศน้อย ซึ่งจะเห็นได้จากค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุดอยู่บริเวณตำแหน่งที่มีระยะห่างที่น้อย และค่าของการสูญเสียเชิงวิถีที่สูงที่สุดส่วนใหญ่อยู่ตรงตำแหน่งที่มีระยะห่างที่สูงที่สุด หรือสังเกตได้จากขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนจะพบว่าบริเวณตำแหน่งที่มีระยะห่างน้อยจะมีขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสูงกว่าบริเวณที่ระยะห่างมาก และสังเกตได้จากเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนจะพบว่าบริเวณตำแหน่งที่มีระยะห่างน้อยจะมีความเป็นเชิงเส้นกว่าบริเวณที่ระยะห่างมาก

3) จากการวิเคราะห์ช่องสัญญาณกรณีไม่สามารถมองเห็นในระดับสายตา ในการตรวจสอบถึงคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในแบบจำลองการวัดภายในห้อง โดยใช้สายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศภาครับติดบนร่างกายในจุดต่างๆที่กำหนดไว้รวม 10 จุด ซึ่งในแต่ละจุดจะติดไว้ในส่วนต่างๆของด้านหลังร่างกาย โดยให้ด้านรับของสายอากาศและร่างกายหันหน้าเข้าหาสายอากาศภาคส่งซึ่งจะวางห่างออกไปจากร่างกายในระยะ 1 เมตร แล้วส่งคลื่นผ่านสายอากาศภาคส่งมายังภาครับ บันทึกผลที่วัดได้นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล สามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณส่วนใหญ่เกิดจากระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสอง ที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างในส่วนต่างๆของร่างกาย เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณ ซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียเชิงวิถี ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสัญญาณ เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน และระดับกำลังงานที่รับได้ในเวลาต่างๆ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง เมื่อนำมาอ้างอิงกับผลการวิเคราะห์ทำให้เห็นว่าผลที่ได้จากบริเวณที่มีระยะห่างของสายอากาศมากจะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากกว่าในบริเวณที่มีระยะห่างของสายอากาศน้อย ซึ่งจะเห็นได้จากค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ต่ำที่สุดอยู่บริเวณตำแหน่งที่มีระยะห่างที่น้อย และค่าของการสูญเสียเชิงวิถีที่สูงที่สุดส่วนใหญ่อยู่ตรงตำแหน่งที่มีระยะห่างที่สูงที่สุด หรือสังเกตได้จากขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนจะพบว่าบริเวณตำแหน่งที่มีระยะห่างน้อยจะมีขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนสูงกว่าบริเวณที่ระยะห่างมาก และสังเกตได้จากเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนจะพบว่าบริเวณตำแหน่งที่มีระยะห่างน้อยจะมีความเป็นเชิงเส้นกว่าบริเวณที่ระยะห่างมาก

ดังนั้นเราสามารถหาข้อสรุปได้ว่า ร่างกายมนุษย์นั้นมีผลต่อการส่งสัญญาณของคลื่นวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง สังเกตได้จากเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองใน 2 กรณี จะพบว่าเมื่อมีร่างกายบดบังสัญญาณนั้นจะทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณมากขึ้น ส่งผลให้ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนลดลง ความเป็นเชิงเส้นของเฟสน้อยลง เกิดการสูญเสียเชิงวิถีมากขึ้น รวมทั้งกำลังงานที่รับได้จะลดลง ซึ่งค่าการสูญเสียสัญญาณนี้อาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น อวัยวะและองค์ประกอบต่างๆภายในร่างกาย ประกอบไปด้วย กระดูก เนื้อเยื่อ เลือด น้ำ เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ อาจทำให้เกิดการรบกวนการส่งผ่านของสัญญาณได้ เช่น การเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนของกรมการศึกษานานาชาติไทย ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสะท้อน การดูดกลืน การจางหาย เป็นต้น จึงส่งผลให้สัญญาณเกิดการสูญเสียขึ้น นอกจากนี้แล้ว ปัจจัยภายนอกก็ยังสามารถให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณได้อีกไม่น้อย เช่น ผนังห้อง พื้น ฝ้า กระจก โต๊ะ ฯลฯ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในปฏิญานิพนธ์นี้ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลแล้ว ผลการทดลองที่ได้ข้างต้นยังมีข้อผิดพลาดอยู่ ซึ่งอาจเกิดจากการออกแบบจำลองที่อาจจะยังไม่ดีเท่าที่ควร ผู้ทดลองขาดประสบการณ์ในการใช้เครื่องมือและการวัดผลการทดลอง หรือเกิดจากสิ่งแวดล้อมในห้องที่ใช้ในการทดลองทั้งอุณหภูมิและอุปกรณ์ต่างๆ อาจทำให้สัญญาณที่ส่งมาสะท้อนไปหักล้างกันทำให้เกิดการสูญหายของสัญญาณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] ณพิเชฐ วัฒนกิจ, และพิศาล ผดุงศิลป์. *สายอากาศ UWB สำหรับโครงข่ายส่วนบุคคล*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [2] ณยศ ลิขิตเอกราช, และอิทธิพล รัตนภรณ์. *สายอากาศไมโครสตริปย่านความถี่กว้าง*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [3] ประเมษฐ วิสุทธธรรม, และรัชพงษ์ พรวิริยางกูร. *สายอากาศไมโครสตริป*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540.
- [4] นายยุทธนา ตียวรรณท์. การสูญเสียในการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งระหว่างสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคาร สำหรับระบบการสื่อสารระยะสั้น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [5] นายสนธิ เตียวัฒน์. การออกแบบและวิเคราะห์เครื่องรับสัญญาณแม่แบบสำหรับระบบวิทยุ อิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [6] Apichit Pradabphon, Monchai Chamchoy, Pichaya Supanakoon, Sathaporn Promwong and Jun-ichi Takada. "The Impacts of Body Shadowing on UWB Propagation in an Indoor Environment" Electrical Engineering Conference. 27<sup>th</sup>, vol.2, Sep. 2004. pp. 461-464.
- [7] Bhohe, A. U. and C. L. Holloway, "Wide-band slot antennas with CPW-feed line: hybride and log-periodic design," IEEE Trans. Antennas Propagat, Vol. 52, No. 10, 2545-2554, 2004.
- [8] Ian O., Matti H. and Jari I, UWB Theory and Applications, England : John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [9] K. Siwiak, "Ultra-Wide Radio : Introducing a New Technology," 2001spring IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC), Plenary session, pp. 1088-1093, May 2001.
- [10] S. Promwong, P. Supanakoon and J. Takada. "Waveform Distortion and Transmission Gain on Ultra Wideband Impulse Radio." IEICE TRANS. COMMUN., Vol. E93-B, No. 10, pp. 2644-2650, October 2010.

- [11] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications Principles And Practice*, United States of America : Prentice-Hall PTR, inc. 2002.
- [12] Y. Tiyanon, S. Promwong, P. Supanakoon, N. Sukutamanti, R. Muanglua, "Experimental Study of Indoor/Outdoor Propagation Loss for Ultra Wideband impulse Radio System," *ECTI-CON 2006*, pp. 650-653, May 2006.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้