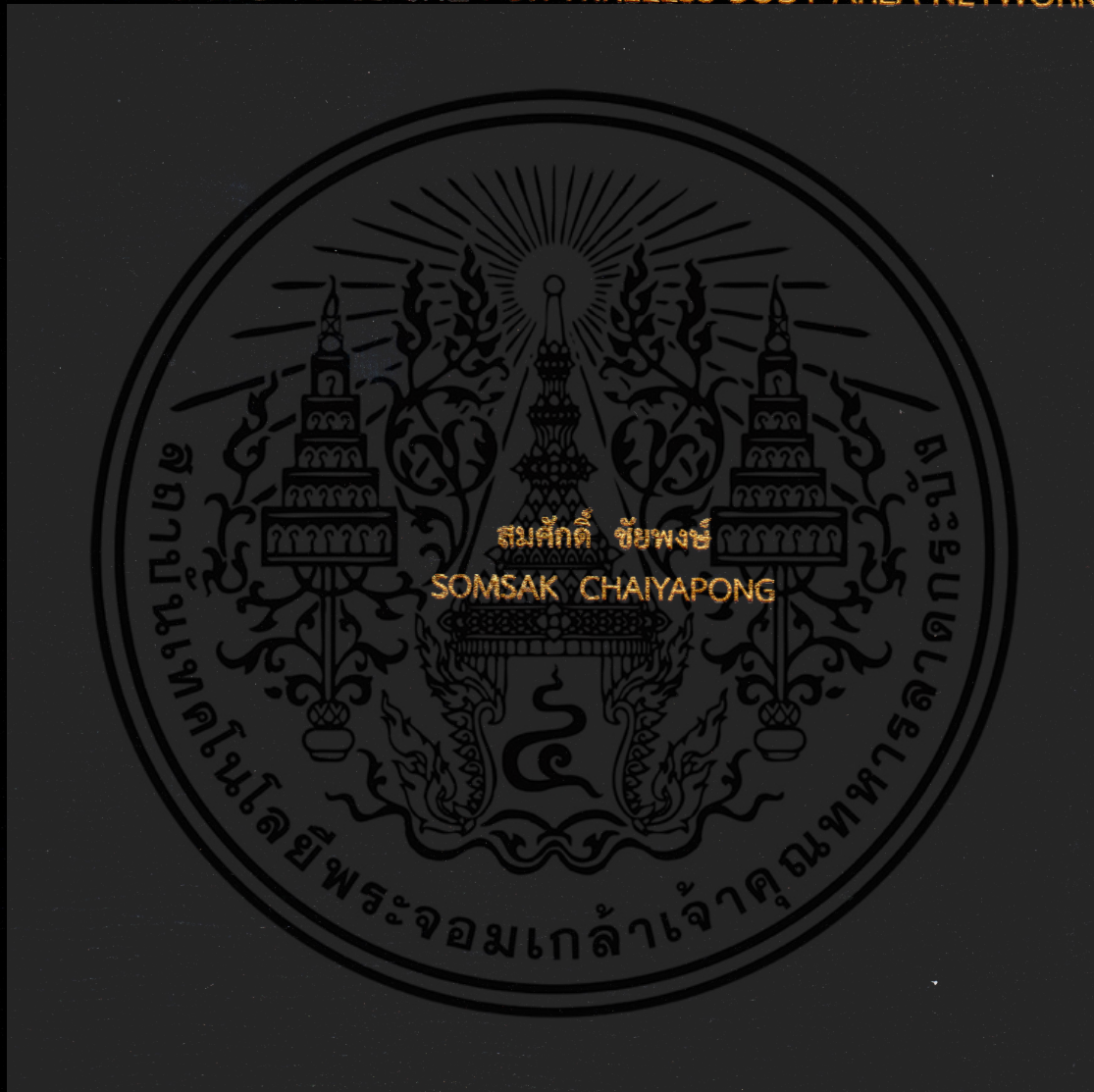


การจำลองการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งที่ 3 GHz ถึง 11 GHz  
สำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

ULTRA WIDEBAND TRANSMISSION MODEL  
AT 3 GHz TO 11 GHz FOR WIRELESS BODY AREA NETWORK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2559  
KMUTL-2016-EN-M-010-192

การจำลองการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งที่ 3 GHz ถึง 11 GHz  
สำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

ULTRA WIDEBAND TRANSMISSION MODEL  
AT 3 GHz TO 11 GHz FOR WIRELESS BODY AREA NETWORK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผูกขาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ULTRA WIDEBAND TRANSMISSION MODEL  
AT 3 GHZ TO 11 GHZ FOR WIRELESS BODY AREA NETWORK



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016  
KMITL-2016-EN-M-010-192

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

หัวข้อวิทยานิพนธ์    การจำลองการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งที่ 3 GHz ถึง 11 GHz สำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์  
Thesis Title        Ultra Wideband Transmission Model at 3 GHz to 11 GHz for Wireless Body Area Network  
นักศึกษา                นายสมศักดิ์ ชัยพงษ์  
รหัสประจำตัว        55611926  
ปริญญา                วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา            วิศวกรรมโทรคมนาคม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์    ดร.สถาพร พรหมวงศ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์        KMITL-2016-EN-M-010-192

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.ประยุทธ์	อัครเอกดาลิน	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกุล	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาศิพงษ์	
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวกา	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ    วันจันทร์ที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 11.00-13.00 น.  
สถานที่สอบ    ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ในเชิงพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ณ บดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งที่ 3 GHz ถึง 11 GHz สำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์
นักศึกษา	นายสมศักดิ์ ชัยพงษ์
รหัสประจำตัว	55611926
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. สถาพร พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

การศึกษาคูณลักษณะของช่องสัญญาณการส่งผ่านรูปคลื่นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบการสื่อสารวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband Impulse Radio: UWB-IR) ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งบนโครงข่ายไร้สายร่างกายมนุษย์ อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยร่างกายมนุษย์เป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของช่องสัญญาณโดยเฉพาะอย่างยิ่งการส่งผ่านรูปคลื่นแถบกว้างยิ่งระหว่างโครงข่ายไร้สายร่างกายไปยังร่างกาย (UWB-B2B) ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแบบแผนการประเมินผลเชิงการทดลองของรูปคลื่นการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งในแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายร่างกายไปยังร่างกาย โดยใช้ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์รูปคลื่นส่งผ่านช่องสัญญาณบนพื้นฐานสูตรการประยุกต์ของฟรีส และประเมินผลด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ กรุปดีเลย์ การสูญเสียเชิงวิถีภาพตัดขวางการประวิงกำลัง อัตราความผิดพลาดบิต และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งผลการศึกษาวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการออกแบบระบบการสื่อสารวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งระหว่างการส่งผ่านช่องสัญญาณโครงข่ายไร้สายบนร่างกายหนึ่งไปยังอีกร่างกายหนึ่ง

<b>Title</b>	Ultra Wideband Transmission Model at 3 GHz to 11 GHz For Wireless Body Area Network
<b>Student</b>	Mr. Somsak Chaiyapong
<b>Student ID</b>	55611926
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Sathaporn Promwong

### ABSTRACT

The channel characteristic is significantly important to design an ultra-wideband impulse radio (UWB-IR) communication. Currently, the UWB-IR technology has been applied for wireless body area network (WBAN). However, the body is a factor for rapidly changing the channel characteristic. In particular, an impulse radio transmission on wireless human body to human body. Therefore, this thesis presents an experimental evaluation of UWB-B2B transmission waveform in a channel measurement model. Whereby, an extension of Friis' transmission formula is used and analyzed. In order to evaluate the experimental result, magnitude and phase of the channel transfer function, group delay, path loss, power delay profile, bit error rate (BER) and correlation coefficient have been carried out in this thesis. These results are very useful to design the UWB-IR communicating for the wireless body to body applications.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาอาจารย์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ที่ให้การอนุเคราะห์และสนับสนุนงานวิจัย ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาและคอยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย ตลอดจนถ่ายทอดวิชาความรู้ความสามารถให้ศิษย์ได้เข้าใจได้อย่างเต็มที่ รวมทั้งคอยฝึกฝนอบรมสั่งสอนให้มีผู้วิจัยมีความสามารถในการทำวิจัยได้ดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้แนะนำและตรวจสอบแก้ไขทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่าน ที่ช่วยให้ความรู้ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางการวิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณพี่ๆ นักศึกษาปริญญาเอกและปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลือทางด้านเทคนิคในการใช้เครื่องมือต่างๆ อย่างเต็มที่ จนเป็นผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินการได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ รวมทั้งขอขอบคุณน้องๆ นักศึกษาห้องปฏิบัติการวิจัย UWB-RSLAB ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านการทดลองวัดผลจนเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ผู้ซึ่งสนับสนุนในทุกด้านของการศึกษา และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา ผู้วิจัยขอมอบความสำเร็จในครั้งให้กับท่านทั้งบิดาและมารดา ถ้าไม่มีท่านผู้วิจัยคงไม่มีวันนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สมศักดิ์ ชัยพงษ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 เทคโนโลยีการสื่อสารแบบกว้างยิ่ง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ประวัติความเป็นมา.....	5
2.3 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีแบบกว้างยิ่ง.....	7
2.4 ลักษณะของสัญญาณแบบกว้างยิ่ง.....	9
2.5 จุดเด่นของระบบการสื่อสารแบบแบบกว้างยิ่ง.....	11
2.5.1 มีความจุของช่องสัญญาณมาก.....	11
2.5.2 ใช้กำลังในการส่งต่ำ.....	12
2.5.3 มีโอกาสที่จะถูกดักฟังหรือตรวจจับได้ยาก.....	12
2.5.4 มีความต้านทานจากการถูกรบกวนสัญญาณ.....	12
2.5.5 มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก.....	13
2.5.6 มีความต้านทานต่อคลื่นหลายวิถี.....	13
2.5.7 มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลา.....	15
2.6 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแบบกว้างยิ่ง.....	15
2.7 มาตรฐานของระบบการสื่อสารแบบแบบกว้างยิ่ง.....	17
2.7.1 มาตรฐาน IEEE 802.15.3a.....	17
2.7.2 มาตรฐาน IEEE 802.15.4a.....	17
2.7.3 มาตรฐาน IEEE 802.15.6.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง .....	18
2.8.1 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายภายในอาคารสำนักงาน .....	18
2.8.2 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายภายในที่พักอาศัย .....	18
2.8.3 การประยุกต์ใช้กับงานโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์ .....	18
2.8.4 การประยุกต์ใช้งานในการค้นหาตำแหน่ง .....	18
2.9 สรุป .....	19
บทที่ 3 เทคโนโลยีโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ .....	20
3.1 กล่าวนำ .....	20
3.2 นิยามและข้อกำหนดของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ .....	21
3.2.1 นิยามของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ .....	22
3.2.2 ข้อกำหนดของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ .....	23
3.3 กฎข้อบังคับสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ .....	23
3.3.1 Medical Implanted Communication Service (MICS) .....	24
3.3.2 Industrial Scientific and Medical (ISM) .....	24
3.3.3 Wireless Medical Telemetry Services (WMTS) .....	24
3.3.4 Ultra Wide-Band (UWB) .....	24
3.4 แบบจำลองช่องสัญญาณสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ .....	25
3.5 การประยุกต์ใช้งานของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ .....	26
3.6 สรุป .....	28
บทที่ 4 หลักการวิเคราะห์โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ .....	29
4.1 กล่าวนำ .....	29
4.2 แบบจำลองการส่งผ่านสำหรับระบบ UWB-IR .....	29
4.2.1 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง .....	30
4.2.2 ช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง .....	32
4.2.3 การประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส .....	32
4.2.4 สัญญาณที่รับได้ .....	33
4.2.5 เครื่องรับสหสัมพันธ์ .....	34
4.2.6 สัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสหสัมพันธ์ .....	35
4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	36
4.3.1 ผลตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณ .....	36
4.3.2 การสูญเสียเชิงวิถี .....	36
4.3.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน .....	37
4.3.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ .....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5 อัตราขยายของสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง.....	38
4.3.6 อัตราความผิดพลาดบิต.....	39
4.4 สรุป.....	41
บทที่ 5 การวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งที่ประกอบด้วยร่างกายมนุษย์.....	42
5.1 กล่าวนำ.....	42
5.2 ระบบการวัดช่องสัญญาณ.....	42
5.2.1 แบบแผนการวัด.....	42
5.2.2 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ.....	43
5.2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด.....	46
5.3 เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลอง.....	46
5.3.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์.....	46
5.3.2 สายอากาศที่ใช้ในการทดลอง.....	47
5.4 การทดลองวัดช่องสัญญาณการส่งผ่าน B2B.....	50
5.5 สรุป.....	52
บทที่ 6 ผลการทดลองวิจัยและการอภิปราย.....	53
6.1 กล่าวนำ.....	53
6.2 ผลการทดลองของแบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ.....	53
6.2.1 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ.....	53
6.2.2 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ.....	59
6.2.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	60
6.2.4 รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสหสัมพันธ์.....	63
6.2.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	64
6.2.6 อัตราขยายของสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง.....	66
6.2.7 อัตราความผิดพลาดบิต.....	66
6.3 ผลการทดลองของแบบจำลองการวัดที่มุมต่าง ๆ.....	67
6.3.1 ขนาด เฟส และการประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณ.....	67
6.3.2 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ.....	72
6.3.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	73
6.3.4 รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสหสัมพันธ์.....	74
6.3.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	76
6.3.6 อัตราการขยายสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง.....	78
6.3.7 อัตราความผิดพลาดบิต.....	79
6.4 สรุป.....	80

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
7.1 กล่าวนำ.....	81
7.2 สรุปผลการทดลองวิจัย.....	81
7.2.1 การวิเคราะห์ผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกาย.....	81
7.2.2 การวิเคราะห์ผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มุมต่าง ๆ ของร่างกาย.....	82
7.2.3 สรุปผลการวิจัย.....	82
7.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยในอนาคต.....	83
เอกสารอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	90

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 จุดเด่นและประโยชน์ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง .....	15
2.2 การจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบ แถบกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	17
3.1 ความถี่ใช้งานสำหรับ WBAN และ WPAN ที่ยังไม่มีใบอนุญาต.....	24
3.2 ช่วงความถี่สำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์.....	25
3.3 รูปแบบการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ .....	25
5.1 ค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการทดลองวัด .....	46
6.1 ค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ตำแหน่งต่างๆ บนร่างกาย.....	59
6.2 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ .....	63
6.3 เพอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของรูปคลื่นแถบกว้างยิ่ง .....	65



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ความเป็นมาโดยย่อของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ..... 7
2.2	สัญญาณแถบแคบ ..... 8
2.3	สัญญาณแถบกว้างยิ่ง ..... 8
2.4	เปรียบเทียบระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่งกับระบบอื่นๆ ..... 9
2.5	หลักการพิจารณาสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ..... 10
2.6	ลักษณะของสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน ..... 11
2.7	เปรียบเทียบโครงสร้างระบบแถบกว้างยิ่งกับระบบแถบแคบ ..... 13
2.8	ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง ..... 14
2.9	สเปกตรัมมาร์คสำหรับการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นแถบกำลังงาน สำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ..... 16
2.10	การนำเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้งานเครือข่ายบนร่างกายมนุษย์ ..... 18
3.1	การเชื่อมต่อโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์กับโครงข่ายภายนอก ..... 20
3.2	เปรียบเทียบระยะเวลาการสื่อสารของเทคโนโลยีไร้สาย ..... 21
3.3	ช่วงความถี่สำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ..... 23
3.4	รูปแบบการสื่อสารสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ..... 26
3.5	การนำเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้งานโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์ ..... 27
3.6	การประยุกต์ใช้งานในการช่วยเหลือผู้พิการทางสายตาในการตรวจหาสัมภาระ ..... 28
4.1	แบบจำลองการส่งผ่านสำหรับระบบ UWB-IR ..... 29
4.2	รูปคลื่นสัญญาณการส่งผ่านของระบบแบบแถบกว้างยิ่ง ..... 31
4.3	สเปกตรัมสัญญาณการส่งผ่านของระบบแถบกว้างยิ่ง ..... 31
4.4	บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับสัมพันธ์สำหรับสัญญาณ UWB-IR ..... 34
4.5	ตัวอย่างภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน ..... 37
4.6	กราฟความน่าจะเป็นของอัตราความผิดพลาดบิต ..... 40
5.1	บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดลองวิจัย ..... 43
5.2	การออกแบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของร่างกาย ..... 44
5.3	การติดตั้งการวัดช่องสัญญาณของแบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของร่างกาย ..... 44
5.4	การติดตั้งการวัดของแบบจำลองการวัดที่มุมต่างๆ ..... 45
5.5	เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ..... 47
5.6	โครงสร้างของสายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยว ..... 48
5.7	สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $ S_{11} $ คุณสมบัติของสายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยว ..... 48
5.8	อัตราขยายของสายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยวที่ความถี่ 5.25 กิกะเฮิร์ต ..... 49
5.9	ตำแหน่งการวัดและลักษณะการวัดของแบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ..... 50
5.10	ลักษณะการวัดช่องสัญญาณและมุมการวัดของแบบจำลองการวัดที่มุมต่างๆ ..... 51
5.11	บล็อกไดอะแกรมของแบบแผนการวิจัยสำหรับการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งบนร่างกายมนุษย์ ..... 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

IX  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1	ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่แขนขวา..... 54
6.2	เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่แขนขวา ..... 54
6.3	ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่แขนซ้าย ..... 55
6.4	เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่แขนซ้าย ..... 55
6.5	ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวและขาด้านขวา ..... 56
6.6	เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวและขาด้านขวา ..... 56
6.7	ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวและขาด้านซ้าย ..... 57
6.8	เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวและขาด้านซ้าย ..... 57
6.9	ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวตรงกลาง ..... 58
6.10	เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวตรงกลาง ..... 58
6.11	การสูญเสียเชิงวิถีของแบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ..... 59
6.12	ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่แขนขวา ..... 60
6.13	ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่แขนซ้าย..... 60
6.14	ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่ลำตัวและขาด้านขวา..... 61
6.15	ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่ลำตัวและขาด้านซ้าย..... 62
6.16	ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่ลำตัวตรงกลาง..... 62
6.17	สัญญาณรูปคลื่นที่รับได้จากเครื่องรับสหสัมพันธ์ ..... 64
6.18	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบกว้างยิ่ง..... 65
6.19	อัตราการขยายในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง ..... 66
6.20	อัตราความผิดพลาดบิตในการส่งผ่านช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง..... 67
6.21	ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ไม่มีร่างกายมนุษย์..... 68
6.22	ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่มีร่างกายมนุษย์ ..... 69
6.23	เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ไม่มีร่างกายมนุษย์..... 69
6.24	เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่มีร่างกายมนุษย์..... 70
6.25	การประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ไม่มีร่างกายมนุษย์..... 71
6.26	การประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่มีร่างกายมนุษย์..... 71
6.27	เปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีกรณีมีและไม่มีร่างกายมนุษย์..... 72
6.28	ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่ไม่มีร่างกายมนุษย์ ..... 73
6.29	ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่มีร่างกายมนุษย์ ..... 74
6.30	สัญญาณรูปคลื่นที่รับได้กรณีไม่มีร่างกายมนุษย์..... 75
6.31	สัญญาณรูปคลื่นที่รับได้กรณีมีร่างกายมนุษย์..... 75
6.32	ตัวอย่างสัญญาณรูปคลื่นที่รับได้กรณีมีและไม่มีร่างกายมนุษย์ที่มุม 0 องศา ..... 76
6.33	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ ..... 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.34 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีมีร่างกายมนุษย์.....	77
6.35 อัตราการขยายสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์.....	78
6.36 อัตราการขยายสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งกรณีมีร่างกายมนุษย์.....	79
6.3.7 การเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตกรณีไม่มีและมีร่างกายมนุษย์.....	80



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงข่ายการส่งผ่านไร้สายบนร่างกายมนุษย์นั้นมีความสำคัญทั้งการประยุกต์ใช้ในการทางการแพทย์และไม่ใช้ทางการแพทย์ ซึ่งแตกต่างจากระบบไร้สายอื่นๆ ที่มีอยู่เนื่องจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์การสื่อสารอยู่ใกล้ชิดกับร่างกายมนุษย์มาก และร่างกายมนุษย์ก็มีความซับซ้อนกว่าการประยุกต์ใช้งานแบบอื่นๆ ด้วยเนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์ซึ่งประกอบไปด้วยไขมัน น้ำ ทำให้การแพร่กระจายคลื่นถูกลดทอนเร็วกว่าในแบบอวกาศว่าง ซึ่งส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณและเกิดการบิดเบี้ยวของข้อมูลข่าวสารได้ ดังนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเรื่องกำลังงาน สัญญาณที่ใช้ส่งผ่านช่องสัญญาณบนร่างกายมนุษย์ และวิธีการที่ใช้ในการประเมินผล เนื่องจากระดับกำลังงานที่ใช้มีผลต่อความปลอดภัยของร่างกายมนุษย์ รวมถึงการนำไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมจริงจะเกิดปัญหาเรื่องคลื่นหลายวิถี ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการใช้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband: UWB) มาใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มีผลต่อช่องสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง

ลักษณะเด่นที่ทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งถูกเลือกมาใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากเป็นสัญญาณวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband Impulse Radio: UWB-IR) ที่ใช้กำลังงานส่งต่ำ จึงส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์น้อยมาก และเนื่องจากมีแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่กว้างมาก จึงสามารถลดปัญหาที่เกิดจากคลื่นหลายวิถีได้ นอกจากนี้สัญญาณแถบกว้างยิ่งมีพัลส์ที่มีลักษณะทางโดเมนเวลาที่แคบมากๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากๆ เป็นผลทำให้มีความละเอียดในการแยกสัญญาณแต่ละวิถีได้มาก และสามารถคำนวณเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำกว่าระบบอื่นๆ ด้วยข้อดีต่างๆ ของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ทำให้สามารถนำมาใช้ในโครงข่ายพื้นที่ไร้สายบนร่างกายมนุษย์ได้เป็นอย่างดี

นอกจากสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่นำมาใช้แล้ว วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์แล้วแต่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้การขยายสูตรการส่งผ่านของฟรีสในการวิเคราะห์และประเมินผล ซึ่งแต่เดิมสูตรของฟรีสเหมาะสำหรับนำมาวิเคราะห์กับระบบการสื่อสารแบบแคบ ดังนั้นจึงต้องปรับมาใช้กับระบบวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง โดยคำนึงถึงรูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ในการส่งผ่านและเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ทางด้านภาครับ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการประยุกต์สูตรการส่งผ่านของฟรีสที่จะทำให้สามารถประเมินผลได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประเมินผลความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งและการจำลองช่องสัญญาณการสื่อสารแถบกว้างยิ่งบนร่างกาย ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะพิจารณาบนร่างกายคนเพียงคนเดียว คือ มีโหนดการรับส่งสัญญาณอยู่บนร่างกายคนเดียวกัน หรือมีโหนดใดโหนดหนึ่งอยู่ภายนอกร่างกาย แต่อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณจากคนหนึ่งไปยังอีกคนหนึ่งมีการนำไปใช้งานจริงทั้งทางการแพทย์และไม่ใช้ทางการแพทย์ เช่น การถ่ายโอนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์สวมใส่บนร่างกาย การตรวจวัดทางการแพทย์ ซึ่งเราไม่สามารถรู้ได้เลยว่ากรณีการรับส่งสองคนนี้จะส่งผลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทบต่อช่องสัญญาณเหมือนกรณีการรับส่งคนเดียวหรือไม่ มากน้อยเพียงใด และเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณขึ้นมากแค่ไหน ซึ่งการรู้ถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณและการผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นมีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะการใช้งานของตัวอุปกรณ์สื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งจะทำให้เราสามารถออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพระบบสื่อสารให้มีความเหมาะสมและปลอดภัยในการใช้งานได้

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการประเมินผลการทดลองของรูปคลื่นการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งจากคนหนึ่งไปยังอีกคนหนึ่ง (Ultra Wideband: UWB-B2B) เพื่อศึกษาผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มีผลต่อช่องสัญญาณการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง การผิดเพี้ยนของรูปคลื่นการส่งผ่าน และประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มีผลต่อช่องสัญญาณการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งโดยพิจารณาบนพื้นฐานการส่งผ่านของฟรีส [1] ซึ่งได้พิจารณารูปคลื่นที่ใช้ส่งผ่านและการรับแบบสหสัมพันธ์ (Correlation Receiver) เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer: VNA) เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัดและบันทึกผล ส่วนสายอากาศที่ใช้ในการประเมินผลการวัดเป็นสายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยว (Meander Line Antenna) ได้ใช้เป็นสายอากาศด้านรับและสายอากาศด้านส่ง โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาเทคโนโลยีวิทยุแบบอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งสำหรับโครงข่ายพื้นที่ไร้สายบนร่างกายมนุษย์บนมาตรฐาน IEEE 802.15.6 [2]
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์บนพื้นฐานของสูตรการส่งผ่านของฟรีส (Friis' Transmission Formula) ให้มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง
4. เพื่อออกแบบจำลองการทดลอง วัดช่องสัญญาณและทดสอบการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งที่ประกอบด้วยร่างกายมนุษย์
5. เพื่อศึกษาและพิจารณาใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สำหรับการประเมินผลการทดลองของรูปคลื่นการส่งผ่าน UWB-B2B
6. เพื่อวิเคราะห์และประเมินผลคุณลักษณะของช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งจากร่างกายหนึ่งไปยังอีกร่างกายหนึ่ง ตามแบบแผนการจำลองวิจัยที่ได้นำเสนอ

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ด้วยงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากร่างกายมนุษย์ที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งบนพื้นฐานของการวัด ช่องสัญญาณในที่นี้เป็นช่องสัญญาณระหว่างร่างกายคือมีการส่งสัญญาณจากคนหนึ่งไปยังอีกคนหนึ่ง ซึ่งแต่เดิมนั้นจะพิจารณาผลกระทบจากร่างกายมนุษย์เพียงคนเดียว ดังนั้น คุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ได้นำมาจะแตกต่างกัน รวมทั้งความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นน่าจะไม่เหมือนเดิม รวมถึงการรู้ถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณและการผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นมีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะการใช้งานของตัวอุปกรณ์สื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งจะทำให้เราสามารถออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบสื่อสารให้มีความเหมาะสมและปลอดภัยในการใช้งานได้ ดังนั้นวิธีการประเมินผล จึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการออกแบบและการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งสามารถประเมินผลได้โดยนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญบนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีสและทางด้านรับได้ ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สองแบบมาเปรียบเทียบกับระหว่างเครื่องรับแบบสัญญาณที่รับได้และเครื่องรับแบบไอโซทรอปิกเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ และความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้น ผลจากการวิจัยสามารถนำมาทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้เหมาะสมกับการใช้งานและประยุกต์ใช้งานกับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของร่างกายมนุษย์ที่มีผลต่อช่องสัญญาณการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งบนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส แต่อย่างไรก็ตามสูตรของฟรีสไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบการส่งผ่านวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งได้โดยตรง เนื่องจากสูตรการส่งผ่านของฟรีสอยู่ในรูปของกำลังหรือในโดเมนความถี่ เหมาะสมกับความถี่บางช่วงเท่านั้น เราจึงต้องปรับปรุงสมการการส่งผ่านของฟรีสให้เหมาะสมกับระบบสื่อสารแถบกว้าง โดยคำนึงถึงรูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ในการส่งผ่านและเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ทางด้านภาครับ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการประยุกต์สูตรการส่งผ่านของฟรีส ที่จะทำให้สามารถประเมินผลได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ โดยเฉพาะการประเมินผลความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มีผลต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งได้นำวิธีการวิเคราะห์และประเมินผลดังกล่าวมาใช้ในการพิจารณาผล ในการวัดช่องสัญญาณได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์และใช้สายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยว โดยทำการวัดตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 11 GHz ครอบคลุมช่วงความถี่ที่กำหนดให้ใช้งานในการสื่อสารโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communication Commission: FCC) คือ ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz การวัดนั้นได้ออกแบบจำลองการวัด 2 แบบคือ แบบจำลองการวัดในตำแหน่งต่างๆ บนร่างกายมนุษย์ และแบบจำลองการวัดที่มุมต่างๆ ของร่างกายมนุษย์ จากนั้นนำช่องสัญญาณที่ได้มาทดสอบการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง ลักษณะวิธีการวัดที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้กำหนดขึ้นเพื่อศึกษาคุณลักษณะของช่องสัญญาณ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ และประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณตาม

#### 1.5 ขอบเขตการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของร่างกายมนุษย์ในตำแหน่งต่างๆ และมุมการบิดบังของร่างกายที่มีผลต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง โดยทำการออกแบบจำลองการวัด วัดช่องสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจริงและทดสอบการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง การวิเคราะห์ผลที่ได้จะแสดงในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ อันประกอบไปด้วยขนาด เฟส และเวลาประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ การสูญเสียเชิงวิถี ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสหสัมพันธ์ ค่าความผิดเพี้ยน อัตราขยายการส่งผ่านสัญญาณแถบกว้างยิ่ง และอัตราความผิดพลาดบิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

จากแนวคิดและหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการศึกษาสำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็น 7 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ ซึ่งประกอบไปด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งประกอบด้วยประวัติความเป็นมา หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง จุดเด่นของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ข้อกำหนดและมาตรฐานของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง

บทที่ 3 กล่าวถึงโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งประกอบด้วยนิยามและข้อกำหนดของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ กฎข้อบังคับสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งจะกล่าวถึงการจัดสรรช่วงความถี่ในการใช้งาน หัวข้อต่อไปก็คือแบบจำลองช่องสัญญาณสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ และการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองการส่งผ่านและหลักการวิเคราะห์ ในเรื่องของแบบจำลองการส่งผ่านจะกล่าวถึง สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง ช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง การประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านสัญญาณของพริส สัญญาณที่รับได้ เครื่องรับในระบบแถบกว้างยิ่ง สัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสหสัมพันธ์ ส่วนในเรื่องของหลักการวิเคราะห์จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ การสูญเสียเชิงวิถี ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานสัมพันธ์สหสัมพันธ์ อัตราการขยายของสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง และอัตราความผิดพลาดบิต

บทที่ 5 กล่าวถึงการวัดช่องสัญญาณและแบบจำลองการวัด ได้แก่ ระบบการวัดช่องสัญญาณ เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลอง การจัดเก็บผลและประมวลผลการทดลอง โดยในส่วนของระบบการวัดช่องสัญญาณจะกล่าวถึง แบบแผนการวัด แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด

บทที่ 6 นำเสนอผลการทดลองวิจัยและการอภิปรายผล ซึ่งแบ่งเป็น ผลการทดลองของแบบจำลองการทดลอง 2 แบบ โดยแบบจำลองแรกเป็นการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบในตำแหน่งต่างๆ ของร่างกาย ส่วนแบบจำลองที่สองเป็นการวิเคราะห์ผลในมุมต่างๆ ที่หมุนรอบร่างกายมนุษย์ ผลที่ได้จะเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีที่มีร่างกายมนุษย์และกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์

บทที่ 7 กล่าวถึงสรุปผลการทดลองวิจัยและข้อเสนอแนะจากการศึกษาการประเมินผลการทดลองของรูปคลื่นการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง

## บทที่ 2

# เทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

### 2.1 กล่าวนำ

การสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งเป็นระบบที่มีการส่งสัญญาณในลักษณะเป็นพัลส์สั้นๆ มีช่วงเวลาของพัลส์แคบมากและใช้กำลังงานในการส่งสัญญาณมีค่าต่ำ ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับการสื่อสารไร้สายเพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้งาน เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีความละเอียดทางโดเมนเวลาสูงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เทคโนโลยีนี้มีความเที่ยงตรงสูงมากเช่นกัน ด้วยสาเหตุอันเนื่องมาจากแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของระบบแถบกว้างยิ่งกว้างมาก อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการทะลุทะลวงสิ่งกีดขวางได้ดี ยกตัวอย่างเช่น กำแพง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป สัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่ง มีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz หรือมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 จากสูตรการหาค่าความจุของช่องสัญญาณตามที่แชนนอน (Shannon) ได้กล่าวไว้ แสดงให้เห็นว่า ระบบแถบกว้างยิ่ง เมื่อแบนด์วิดท์กว้างจะทำให้มีค่าความจุของช่องสัญญาณมาก ทำให้ส่งข้อมูลได้ในปริมาณที่มากขึ้น สามารถรองรับผู้ใช้งานได้จำนวนมากตามไปด้วย จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นการส่งสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งนั้นจะทำการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณคลื่นวิทยุในลักษณะที่เป็นอิมพัลส์ โดยไม่มีการนำเอาสัญญาณข้อมูลไปมอดูเลตกับสัญญาณพาห้ ฉะนั้นเทคนิคของระบบนี้จึงไม่จำเป็นต้องใช้มิกเซอร์ ทำให้สร้างระบบได้ง่าย ซึ่งหมายความว่า สามารถสร้างระบบทั้งภาคส่งและภาครับให้มีราคาถูกลง ต้นทุนต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารแบบดั้งเดิมที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency: RF)

### 2.2 ประวัติความเป็นมา

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งไม่ใช่เทคโนโลยีที่ใหม่ ต้นกำเนิดของ UWB มีมาตั้งแต่กว่าร้อยปีมาแล้วหรือกล่าวได้ว่าการสื่อสารทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเริ่มต้นมาพร้อมกับ UWB ในปลายคริสต์ศตวรรษที่ 18 วิธีที่ง่ายที่สุดสำหรับการสร้างสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือการสร้างพัลส์สั้นๆ ขึ้นมาโดยการใช้แหล่งกำเนิดแบบสปาร์กแก๊ป ตัวอย่างเช่น ข้อมูลที่เป็นแม่เหล็กไฟฟ้าครั้งแรกในการทดลองของ Hertz รวมทั้งการทดลองของมาร์โคนี (Marconi) โดยการส่งรหัสมอส (Morse Code) ต่อเนื่องข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณสปาร์กแก๊ป (Spark Gap Generator) ซึ่งสร้างขึ้นโดยริกกี (Righi) โดยใช้หลักการการทำให้เกิดแรงดันสูงระหว่างช่องว่างของตัวนำสัญญาณหรือสปาร์กแก๊ป (Spark Gap) เป็นผลให้อากาศบริเวณนั้นเกิดการแตกตัว กระแสไฟฟ้าจึงสามารถเดินทางผ่านอากาศได้ ต่อมาได้มีการนำวิธีดังกล่าว ทำให้เกิดสัญญาณคลื่นวิทยุรูปพัลส์ เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลเป็นตัวอักษร และยังมีนักทฤษฎีที่สำคัญคนหนึ่งชื่อว่า Sommerfield ได้วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของพัลส์สั้นที่เกิดจากครึ่งแผ่นระนาบ (Half-Plane) ซึ่งได้มาเป็นหลักการพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นของ UWB [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามหลักจากปี ค.ศ. 1910 เป็นต้นมา ความสนใจส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปยังการพัฒนาการสื่อสารแบบช่วงความถี่แคบ (Narrowband) เนื่องจากการสื่อสารช่วงความถี่กว้างจะให้ประสิทธิภาพสเปกตรัม (Spectral Efficiency) ของสัญญาณที่เกิดจากตัวส่งแบบ Spark-Gap นั้นต่ำ และยังมีอัตราบิต (Bit Rate) ที่ต่ำอีกด้วยหรืออาจจะกล่าวได้ว่าสัญญาณเหล่านี้มีตัวประกอบการแผ่กระจายออก (Spreading Factor) ที่กว้าง ซึ่งในเวลานั้นยังไม่มีใครรู้วิธีที่จะนำการแผ่กระจายออกของสัญญาณมาใช้งานอย่างไร ทำให้ดูเหมือนว่าจะไม่เพียงพอสำหรับการใช้งาน ในทางกลับกันการสื่อสารแบบช่วงความถี่แถบแคบซึ่งได้นำมาใช้ในการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplex: FDM) ได้แสดงให้เห็นว่าเป็นเรื่องง่ายที่จะส่งสัญญาณหลายสัญญาณพร้อมกันในช่วงความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงทำให้การศึกษาค้นคว้า UWB ไม่มีความก้าวหน้ามากนัก

จากนั้นในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการศึกษาวิจัย UWB อย่างจริงจังอีกครั้ง โดยได้นำมาใช้สำหรับเรดาร์ทางการทหารซึ่งในครั้งนี้นับว่าสำคัญไม่ได้อยู่ที่ประสิทธิภาพสเปกตรัม แต่จะมุ่งเน้นพัฒนาความละเอียดทางด้านตำแหน่ง (Spatial Resolution) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าต้องการเพิ่มความแม่นยำของเวลาที่ใช้งาน สำหรับการส่งสัญญาณจากเรดาร์ตัวส่งไปยังวัตถุที่ระบุและส่งกลับมายังตัวรับ ในการศึกษาที่เริ่มจากการพิจารณาองค์ประกอบทางฟิสิกส์ พบว่าต้องส่งสัญญาณเรดาร์แบบพัลส์ที่สั้นกว่าเดิม ส่วนประกอบของระบบเรดาร์แบบ UWB คือการออกแบบกำลังงานสูง และเครื่องกำเนิดพัลส์สั้น (Short-Pulse Generator)

การสื่อสารแบบ UWB เริ่มได้รับความสนใจอีกครั้งในปี ค.ศ. 1970 เวลานั้นจะเรียกว่าการสื่อสารเบสแบนด์ (Baseband) หรือแบบปราศจากคลื่นพาห์ (Carrier-Free) และประมาณปี ค.ศ. 1973 ได้มีการยอมรับกันว่าสัญญาณแบบพัลส์สั้นที่แผ่ขยายสัญญาณตลอดสเปกตรัมที่กว้างนั้นไม่ได้รับผลกระทบจากการแทรกสอดของสัญญาณช่วงความถี่แถบแคบและไม่มีการแทรกสอดสัญญาณช่วงความถี่แคบเหล่านั้นด้วย แต่มีปัญหาในเรื่องการแทรกสอดแบบ Multiple-Access (Multiple Access Interference: MAI) ของการไม่ซิงโครไนซ์ (Unsynchronized) ของผู้ใช้ ทำให้ในปี ค.ศ. 1970 ถึงปี ค.ศ. 1980 การสื่อสาร UWB ยังคงได้รับการศึกษาค้นคว้าอย่างต่อเนื่องในส่วนทางการทหาร และในปี ค.ศ. 1990 ปัญหาเรื่อง MAI ก็ได้รับการแก้ไขโดยริเริ่มจากหลักการวิทยุอิมพัลส์แบบ Time-Hopping (Time Hopping Impulse Radio: TH-IR) โดย Win และ Scholtz ที่แสดงให้เห็นว่าสัญญาณวิทยุอิมพัลส์สามารถยังคงรองรับจำนวนมากไว้ได้โดยใช้การกำหนดเวลาการส่งผ่านแบบสุ่มเทียม (Pseudorandom) ไปยังพัลส์จากผู้ใช้ที่แตกต่างกัน จากการศึกษาดังกล่าวบวกกับความก้าวหน้าในการออกแบบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดความสนใจที่จะนำ UWB มาใช้ในเชิงพาณิชย์

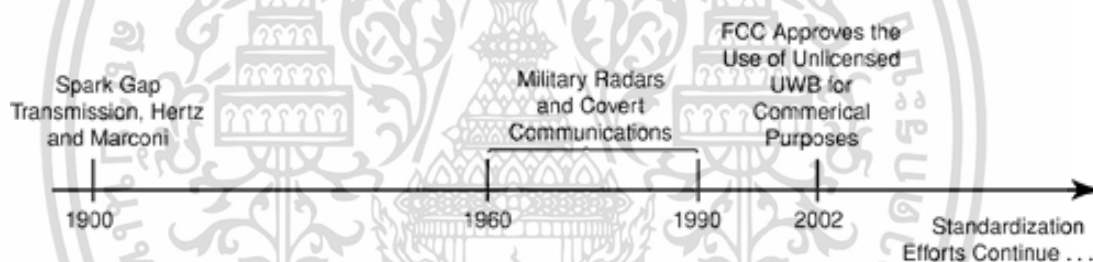
อุปสรรคที่สำคัญสำหรับการนำ UWB ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ก็คือความถี่ที่มีอยู่ในธรรมชาติที่จัดสรรให้ใช้อยู่ทั่วโลกนั้นจะกำหนดให้เป็นแบบช่วงความถี่แถบแคบสำหรับการใช้งานอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่ระบบ UWB ได้ฝ่าฝืนข้อกำหนดดังกล่าวเนื่องจากมีการแพร่กระจายคลื่นตลอดช่วงความถี่ที่กว้างอาจจะครอบคลุมช่วงความถี่ที่มีการกำหนดใช้งานอย่างอื่นด้วย ดังนั้นจึงมีการอนุญาตให้สามารถใช้งาน UWB ได้โดยที่การใช้งาน UWB ไม่ไปแทรกสอดกับการใช้งานอย่างอื่น จนในที่สุดในปี ค.ศ. 2002 ทางคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission: FCC) ได้อนุญาตให้การใช้ UWB สามารถใช้ได้ที่ย่านความถี่ระหว่าง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz นอกจากนี้ยังมีการกำหนดมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ของชั้นกายภาพสำหรับการสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไร้สายที่มีค่า Throughput สูงบนพื้นฐานของ UWB ขึ้นมา รวมทั้งมาตรฐาน IEEE 802.15.4a สำหรับการพัฒนาข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะที่ใช้ร่วมกันกับอุปกรณ์ UWB

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา งานวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสาร UWB ได้มีจำนวนมากขึ้นซึ่งมีหัวข้อที่ทำการวิจัยที่แตกต่างกันออกไป เช่น การประเมินช่องสัญญาณและการซิงโครไนซ์ (Synchronization) [4, 5] การติดตั้งเพื่อนำไปใช้งานจริงของระบบวิทยุอิมพัลส์และการติดตั้งอื่นที่เกี่ยวข้อง [6-8] การใช้งาน UWB ร่วมกับ MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) [9, 10] นอกจากนี้งานวิจัยทางด้านสายอากาศ UWB ก็ได้รับความสนใจเช่นเดียวกันเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งาน

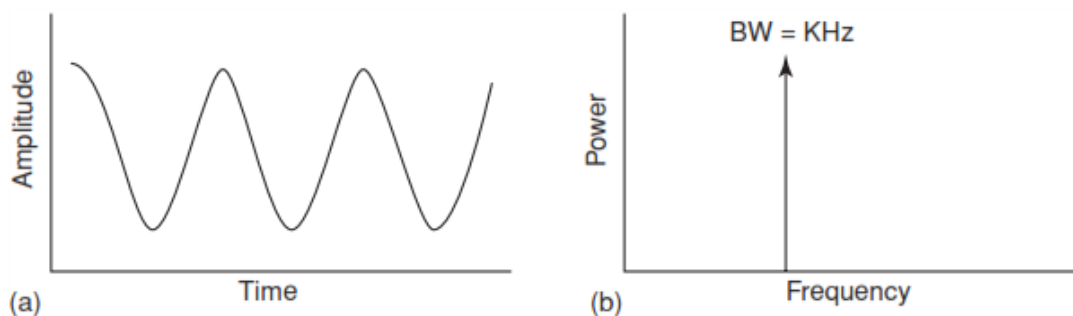
อย่างไรก็ตามประโยชน์ของการใช้แบนด์วิดท์ที่กว้างและความสามารถในการใช้งานแบบหลายผู้ใช้โดยการส่งพัลส์แม่เหล็กไฟฟ้าก็ยังไม่เกิดขึ้นในตอนนั้น จากนั้นประมาณ 15 ปีต่อมาการสื่อสารที่ใช้พัลส์ในการส่งสัญญาณได้รับการผลักดันให้ใช้ในทางการทหารในรูปของอิมพัลส์เรดาร์ (Impulse Radars) จากนั้นในปี 1960 – 1990 เทคโนโลยีนี้ได้ถูกจำกัดการใช้งานในกองทัพทหารและแผนการปกครองที่เป็นความลับทางราชการ เช่น การสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยที่สูง อย่างไรก็ตามในตอนนี้อำนาจของไมโครโพรเซสเซอร์และสวิตช์ตัดต่อความเร็วสูงในเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ได้ทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งพร้อมสำหรับการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งความเป็นมาโดยย่อของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความเป็นมาโดยย่อของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง [11]

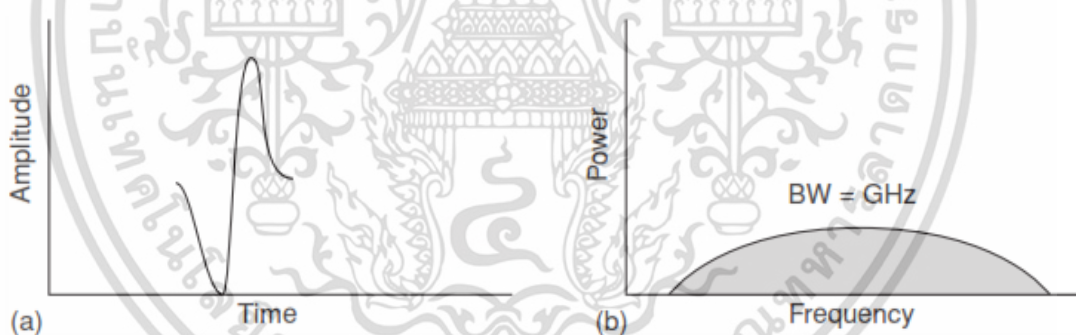
### 2.3 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

การสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ (Narrow Band Communication) นิยมใช้ในการสื่อสารไร้สาย เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็ม (Global System for Mobile Communication: GSM) ระบบเครือข่ายเฉพาะที่ไร้สายหรือแลนไร้สาย (Wireless LAN: WLAN) ซึ่งใช้เทคนิคการผสมสัญญาณวิทยุที่มีความต่อเนื่องทางเวลากับสัญญาณคลื่นพาหะที่มีความถี่ที่กำหนดเพื่อใช้ในการส่งและรับสัญญาณ ทำให้พลังงานของสัญญาณถูกรวมอยู่ในช่วงแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์แคบๆ ซึ่งสามารถถูกรบกวนและถูกตรวจจับสัญญาณได้ง่าย รูปที่ 2.2 แสดงสัญญาณแถบแคบในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่



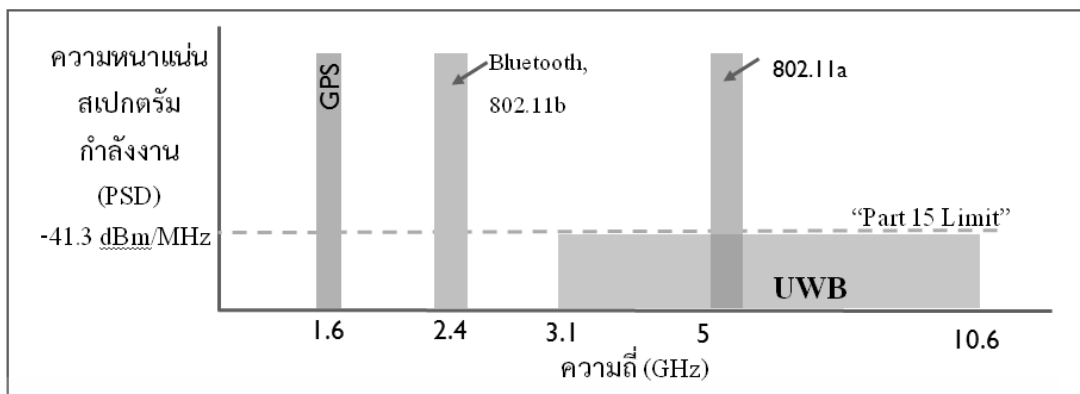
รูปที่ 2.2 สัญญาณแถบแคบ (a) โดเมนเวลา (b) โดเมนความถี่ [11]

สำหรับอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-Wideband) ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้าง (Wideband Communication) นั้นจะใช้สัญญาณที่มีรูปคลื่นสัญญาณปรากฏเพียงชั่วขณะหรือเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณในทางเวลาที่แคบมาก โดยอยู่ในระดับนาโนวินาที (Nano Second: ns) หรือที่ระดับพิโควินาที (Pico Second: ps) มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับสัญญาณในอุดมคติที่เรียกว่าสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse Signal) โดยระบบอัลตราไวด์แบนด์ในการส่งและรับสัญญาณนั้น ไม่ใช่คลื่นพาห้ (Carrierless) ในการผสมสัญญาณเหมือนในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ แต่จะเป็นการส่งสัญญาณที่มีรูปคลื่นของพัลส์ที่มีรูปคลื่นซึ่งไม่ต่อเนื่องในทางเวลาด้วยอัตราการส่งพัลส์ในระดับจำนวนหลายร้อยล้านพัลส์ต่อหนึ่งวินาที ในการส่งและรับสัญญาณ ซึ่งทำให้พลังงานของสัญญาณถูกกระจายอยู่ในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมาก ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นที่มาของชื่ออัลตราไวด์แบนด์



รูปที่ 2.3 สัญญาณแถบกว้างยิ่ง (a) โดเมนทางเวลาและ (b) โดเมนความถี่ [11]

สามารถแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างมีการกระจายกำลังงานของสัญญาณอยู่ในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมากในระดับกิกะเฮิรตซ์กับสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ ที่มีการกระจายกำลังงานของสัญญาณอยู่ในช่วงแถบความถี่แคบได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่งกัระบบอื่นๆ [12]

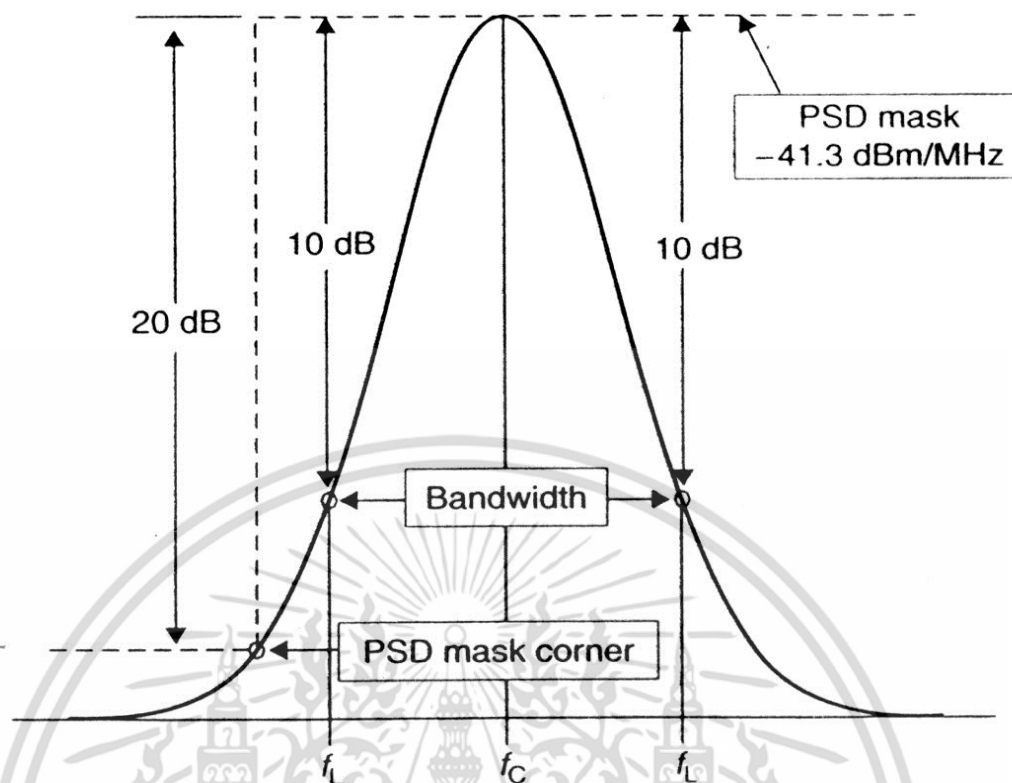
## 2.4 ลักษณะของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

จากคำจำกัดความของ FCC ได้กำหนดไว้ว่าสัญญาณแถบกว้างยิ่งจะต้องมีแบนด์วิดท์มากกว่า 500 MHz หรือมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ [13] แบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเป็นองค์ประกอบที่ใช้สำหรับแบ่งประเภทสัญญาณ เช่น Narrowband Wideband หรือ Ultra-Wideband สมการที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วน

$$B_f = \frac{BW}{f_c} \times 100\% = \frac{(f_h - f_l)}{(f_h + f_l)/2} \times 100\% = 2 \frac{(f_h - f_l)}{f_h + f_l} \times 100\% \quad (2.1)$$

เมื่อ  $f_h$  และ  $f_l$  เป็นค่าสูงสุดและต่ำสุดความถี่คัตออฟ (ที่ระดับ -10 dB)

ลักษณะเฉพาะโดยทั่วไปของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง คือกำหนดให้อยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz ตามมาตรฐานโดยตัวแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งนั้นต้องทำการออกแบบและตรวจสอบเพื่อรับรองว่าการแพร่กระจายคลื่นในช่วงแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 20 dB ลงมาจากระดับสูงสุดของสเปกตรัมที่กำหนดไว้ต้องอยู่ภายในแถบความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่ง และค่าแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดโดยวัดที่ระดับต่ำลงมา 10 dB จากระดับสูงสุดของการแพร่กระจายเท่ากับ 500 MHz โดยระดับสูงสุดที่อนุญาตให้การแพร่กระจายกำลังงานสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นถูกกำหนดไว้ที่ -41.3 dBm/MHz ดังรูปที่ 2.5

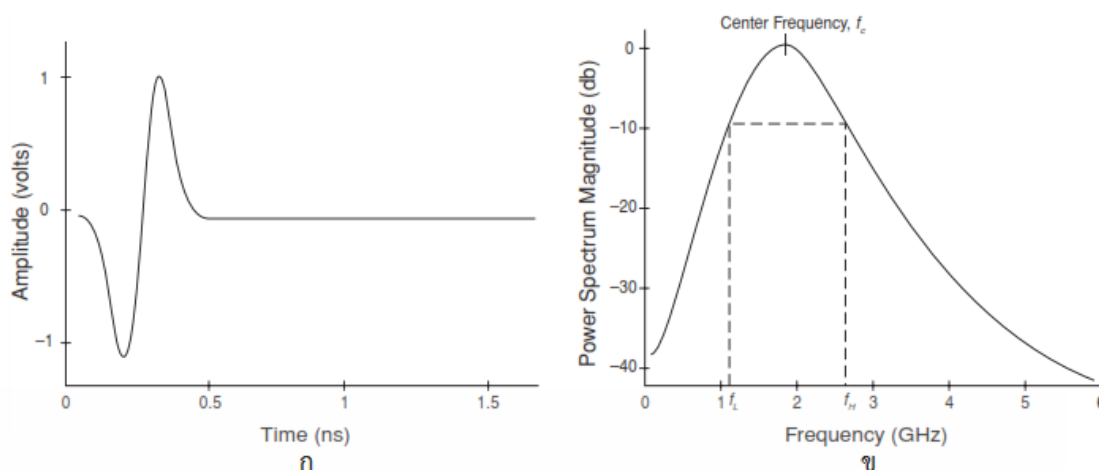


รูปที่ 2.5 หลักการพิจารณาสัญญาณแถบกว้างยิ่ง [14]

ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานกำหนดใช้รูปแบบของสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งจึงมีหลายๆสถาบันที่กำลังศึกษาวิจัยข้อมูลในเรื่องของสัญญาณที่จะใช้ส่งในระบบแถบกว้างยิ่งในอนาคต ซึ่งโดยทั่วไปสัญญาณแถบกว้างยิ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงรูปแบบของสัญญาณอุดมคติที่เรียกว่าสัญญาณอิมพัลส์ โดยสัญญาณที่มีลักษณะเป็นรอบเดียว (Monocycle) นิยมใช้ในการสร้างและจำลองสัญญาณแถบกว้างยิ่ง โดยทั่วไปสัญญาณแถบกว้างยิ่งแบบพัลส์จะใช้สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน (Gaussian) สัญญาณพัลส์แบบ chirp (Chirp) หรือ สัญญาณพัลส์แบบเวฟเล็ต (Wavelet) เป็นต้น รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนในโดเมนเวลาและความถี่ เกาส์เซียนรอบเดียวที่เป็นอนุพันธ์อันดับแรกของสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$P(t) = \frac{t}{\tau} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $t$  คือเวลา และ  $\tau$  คือ ค่าคงที่การหน่วงของเวลา



รูปที่ 2.6 ลักษณะของสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน (ก) โดเมนเวลา (ข) โดเมนความถี่ [11]

จากรูปที่ 2.6 แสดงสัญญาณพัลส์เดี่ยวแบบเกาส์เซียนในทางเวลาที่มีความกว้างพัลส์ประมาณ ๕๐๐ พิโควินาที และในโดเมนความถี่ที่มีความถี่กลางที่ 2 GHz โดยมีความถี่คutoffต่ำสุดและสูงสุดที่ -10 dB ประมาณ 1.2 GHz และ 2.8 GHz ตามลำดับ ซึ่งทำให้มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วน 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าต่ำสุดของแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนที่กำหนดโดย FCC

$$B_f = 2 \times \frac{(2.8 - 1.2)}{2.8 + 1.2} \times 100\% = 80\% \quad (2.3)$$

ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของสัญญาณตามแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนได้ดังนี้

Narrowband	$B_f < 1\%$
Wideband	$1\% < B_f < 20\%$
Ultra-Wideband	$B_f > 20\%$

สำหรับตัวอย่าง เทคโนโลยี 802.11 และบลูทูธ มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วน 0.8 เปอร์เซ็นต์ และ 0.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

## 2.5 จุดเด่นของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ลักษณะของพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบที่ใช้ในเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารแถบแคบ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงประโยชน์ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่จะนำมาใช้ในการสื่อสารไร้สาย [11]

### 2.5.1 มีความจุของช่องสัญญาณมาก

จุดเด่นที่สำคัญของการมีแบนด์วิดท์ที่กว้างสำหรับพัลส์แถบกว้างยิ่งคือการทำให้ความจุของช่องสัญญาณมากขึ้น โดยความจุของช่องสัญญาณหรืออัตราการส่งข้อมูลจะบอกถึงขนาดของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณการสื่อสารต่อหนึ่งวินาที ซึ่งขนาดความจุที่มากของระบบการสื่อสารแถบกว้างยังสามารถพิจารณาได้จากสูตรของแฮนนอน (Hartley-Shannon) ดังสมการที่ 2.4

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $C$  คือค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุด  
 $B$  คือแบนด์วิดท์  
 $SNR$  คืออัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

จากสมการจะเห็นว่าค่าความจุของช่องสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแบนด์วิดท์มีมากขึ้น เพราะฉะนั้นสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มีแบนด์วิดท์มากถึง 7.5 GHz จึงทำให้มีอัตราการส่งข้อมูลในระดับหลายร้อยเมกะบิตต่อวินาที (Mbps) แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก FCC ได้จำกัดกำลังส่งของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไว้ จึงทำให้สามารถที่จะส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงในระยะสั้นๆ เท่านั้น ทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นตัวเลือกที่น่าจับตามองสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายระยะสั้นที่มีความเร็วสูง เช่นโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPANs)

### 2.5.2 ใช้กำลังในการส่งต่ำ

จากข้อกำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดให้กำลังงานในการส่งสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้นมีค่าสูงสุดไม่เกิน -41.3 dBm/MHz ทำให้สัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้นมีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับต่ำโดยอยู่ในระดับของสัญญาณรบกวน (Noise Floor) จึงทำให้ระบบอื่นมองว่าสัญญาณของแถบกว้างยิ่งนี้เป็นสัญญาณรบกวนเลยถูกกำจัดออกไป ทำให้สัญญาณของแถบกว้างยิ่งไม่มีผลกระทบต่อระบบอื่นๆ

### 2.5.3 มีโอกาสที่จะถูกดักฟังหรือตรวจจับได้ยาก

เนื่องจากมีกำลังเฉลี่ยในการส่งที่ต่ำ ทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างยิ่งมีความสามารถในการถูกดักฟังและตรวจจับได้ยาก การส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งที่ต่ำทำให้ผู้ดักฟังจะต้องอยู่ใกล้กับตัวส่งสัญญาณมาก (ประมาณ 1 เมตร) เพื่อที่จะสามารถตรวจจับข่าวสารที่ส่งได้ นอกจากนั้นพัลส์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งเป็นการมอดูเลตทางเวลา (Time Modulation) ด้วยรหัสเฉพาะสำหรับภาคส่งและภาครับนั้นๆ การมอดูเลตทางเวลาของแถบกว้างยิ่งที่มีพัลส์ที่แคบมากๆ จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการส่งสัญญาณ เนื่องจากการที่จะตรวจจับพัลส์ในระดับพิโกวินาที (Pico Second) โดยที่ไม่รู้ว่ามันจะมาถึงเมื่อไหร่เป็นสิ่งที่แทบจะเป็นไปไม่ได้เลย ฉะนั้นเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจึงเป็นเทคโนโลยีที่มีความปลอดภัยมาก ยากต่อการดักฟังและตรวจจับ การสื่อสารที่ต้องการจุดเด่นในข้อนี้คือการสื่อสารของกองทัพและการปกครอง

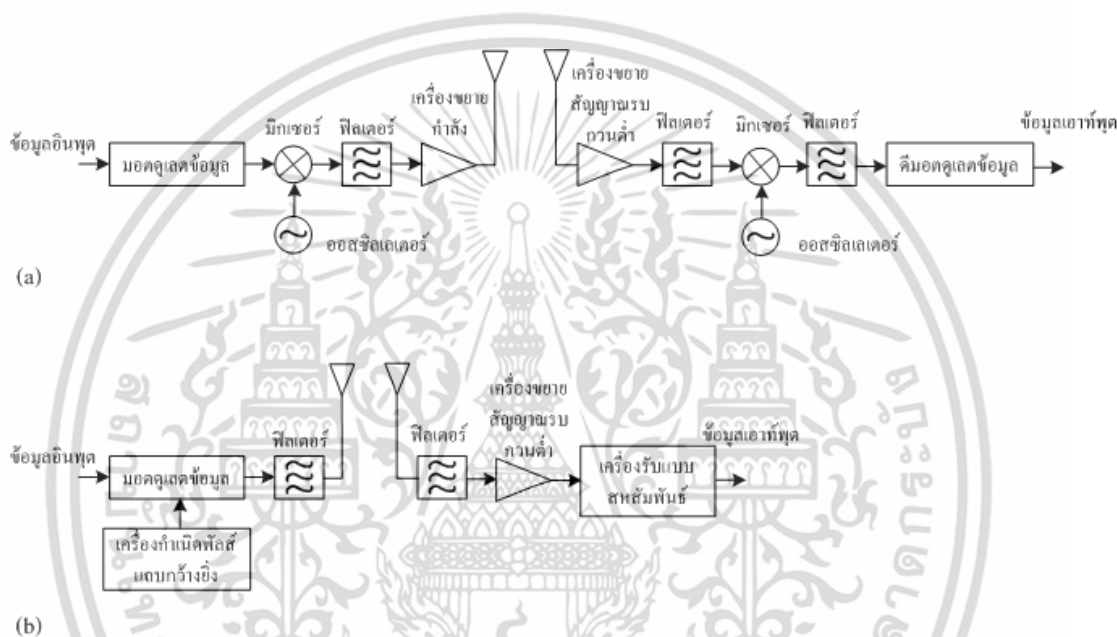
### 2.5.4 มีความต้านทานจากการถูกรบกวนสัญญาณ

หากเปรียบเทียบกับแถบความถี่ของการสื่อสารแถบแคบแล้ว แถบความถี่ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่งนั้นครอบคลุมช่วงของความถี่ที่มากกว่าในระดับหลายกิกะเฮิร์ต (GHz) การมีความถี่ที่หลากหลายของสัญญาณแถบกว้างยิ่งทำให้มีความต้านทานต่อการถูกรบกวนสัญญาณไม่ว่าจะเป็นการรบกวนโดยตั้งใจหรือไม่ตั้งใจ เพราะว่าไม่มีผู้ที่ทำกรบกวนสัญญาณคนไหนที่สามารถรบกวน

สัญญาณในทุกความถี่ของแถบความถี่กว้างยิ่งได้ในครั้งเดียว ฉะนั้นถ้าความถี่บางความถี่ถูกรบกวน แถบกว้างยิ่งก็ยิ่งเหลือช่วงความถี่อีกมากมายที่ยังไม่ถูกใช้

### 2.5.5 มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ต้องการคลื่นพาห์ (Carrier Less) นั้นหมายความว่าไม่ต้องมีการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเหมือนกับในเทคโนโลยีแถบแคบและเทคโนโลยีแถบกว้าง การสื่อสารที่ปราศจากคลื่นพาห์มีความต้องการส่วนประกอบต่างๆ น้อยกว่าการสื่อสารที่มีการมอดูเลตเข้ากับสัญญาณพาห์ ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้โครงสร้างของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าและมีราคาในการสร้างถูกกว่าเทคโนโลยีแถบแคบ รูปที่ 2.7 เป็นการเปรียบเทียบบล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบแคบกับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบโครงสร้างระบบแถบกว้างยิ่งกับระบบแถบแคบ [15]

a) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบแคบ

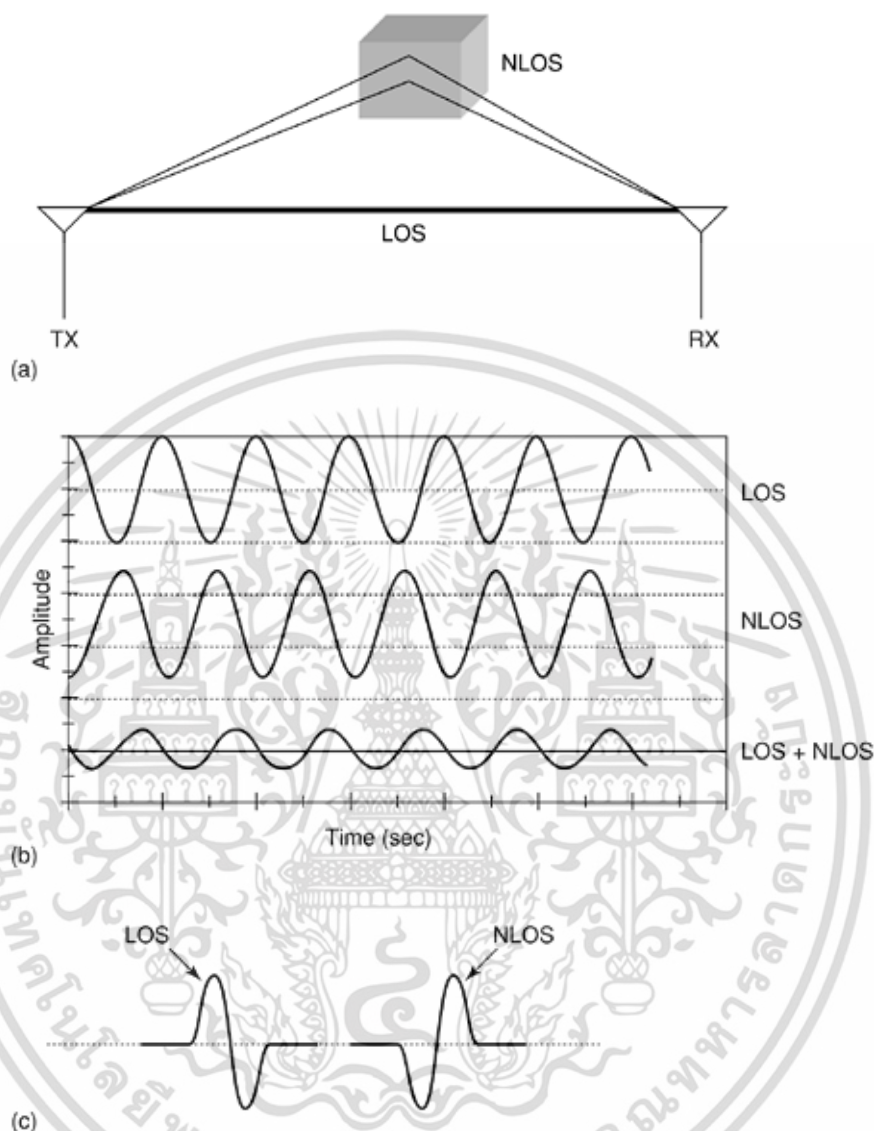
b) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

จากรูปที่ 2.7 ภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีโครงสร้างที่ง่ายกว่าระบบแถบแคบ เนื่องจากการสื่อสารแถบกว้างยิ่งที่ใช้พัลส์ที่มีกำลังส่งต่ำจะไม่จำเป็นต้องมีตัวขยายกำลัง (Power Amplifier: PA) ในภาคส่ง และจากการที่การสื่อสารแถบกว้างยิ่งไม่มีการใช้สัญญาณพาห์ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้มิกเซอร์ (Mixer) และออสซิลเลเตอร์ (Oscillators) ในการแปลงความถี่พาห์ไปเป็นแถบความถี่ที่ต้องการทั้งในภาครับและภาคส่ง

### 2.5.6 มีความต้านทานต่อคลื่นหลายวิถี

เป็นที่รู้กันว่าการเกิดช่องสัญญาณหลายวิถีเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการสื่อสารไร้สาย ซึ่งเป็นผลมาจากการสะท้อนของสัญญาณการสื่อสารจากหลายๆ ทิศทางที่วัสดุต่างๆ เช่น อาคาร โดม เพดาน หรืออุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น เส้นทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับโดยตรงเรียกว่า เส้นระดับสายตา (Line of Sight: LOS) ส่วนสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนจากพื้นผิววัสดุต่างๆ จะ

ไม่เป็นเส้นระดับสายตา (Non Line of Sight: NLOS) โดยรูปที่ 2.8 แสดงช่องการเกิดคลื่นหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง



รูปที่ 2.8 ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง [15]

- การเกิดช่องสัญญาณหลายวิถีในการสื่อสารไร้สาย
- ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบ
- ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบกว้างยิ่ง

จากรูปที่ 2.8 ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีสำหรับสัญญาณแถบแคบจะเกิดขึ้นค่อนข้างมากกว่าสัญญาณแถบกว้างยิ่ง เนื่องจากการรวมกันแบบต่างเฟส (Out of Phase) ของสัญญาณที่มาจาก LOS และ NLOS ทำให้ระดับของแอมพลิจูดลดลงมาก แต่ในเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งการส่งพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากๆ ทำให้เทคโนโลยีนี้ได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณหลายวิธีน้อยกว่าเนื่องจากช่วงเวลาการส่งผ่านของพัลส์ของแถบกว้างยิ่งช่วงเวลาสั้นกว่านาโนวินาที (Nano Second: ns) ทำให้พัลส์ที่เกิดจากการสะท้อนมีโอกาสน้อยมากที่จะไปถึงพร้อมกับพัลส์ที่เป็น LOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.7 มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลา

ด้วยพัลส์ที่มีลักษณะทางโดเมนเวลาที่แคบมากๆ หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากๆ นั้นหมายถึง ระบบคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมจังหวะและค่านวนเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่าระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global Positioning System: GPS) และระบบคลื่นวิทยุแบบอื่นๆ อีกทั้งด้วยคุณสมบัติในการแพร่กระจายผ่านวัสดุได้ดี จึงทำให้สัญญาณแถบกว้างยิ่ง ที่มีการมอดูเลตทางเวลาถูกนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ระยะสั้น เช่นในการช่วยเหลือชีวิตและปฏิบัติการป้องกันอาชญากรรม เช่นเดียวกับการใช้ในโรงงานสำรวจและในอุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่ เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 จุดเด่นและประโยชน์ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง [11]

จุดเด่น	ประโยชน์
ช่องสัญญาณมีความจุมาก	ช่องสัญญาณที่มีความจุมากสามารถรองรับการแสดงผลไฟล์วิดีโอที่มีความละเอียดสูง
ใช้กำลังส่งต่ำ	ไม่ไปรบกวนกับระบบอื่นๆ
มีโอกาสดังจะถูกดักฟังหรือตรวจจับได้ยาก	เพิ่มความปลอดภัย เหมาะกับการใช้ในกองทัพและงานด้านความมั่นคง
มีความต้านทานจากการถูกรบกวนสัญญาณ	มีความน่าเชื่อถือได้เมื่อนำไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่มีกลุ่มที่ไม่หวังดี
มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน	ทำให้มีขนาดเล็ก สร้างได้ง่าย และมีราคาถูก
มีความต้านทานต่อช่องสัญญาณหลายวิถี	ให้สัญญาณที่มีกำลังสูงกว่า ในสภาวะแวดล้อมที่มีผลการสะท้อนมาก

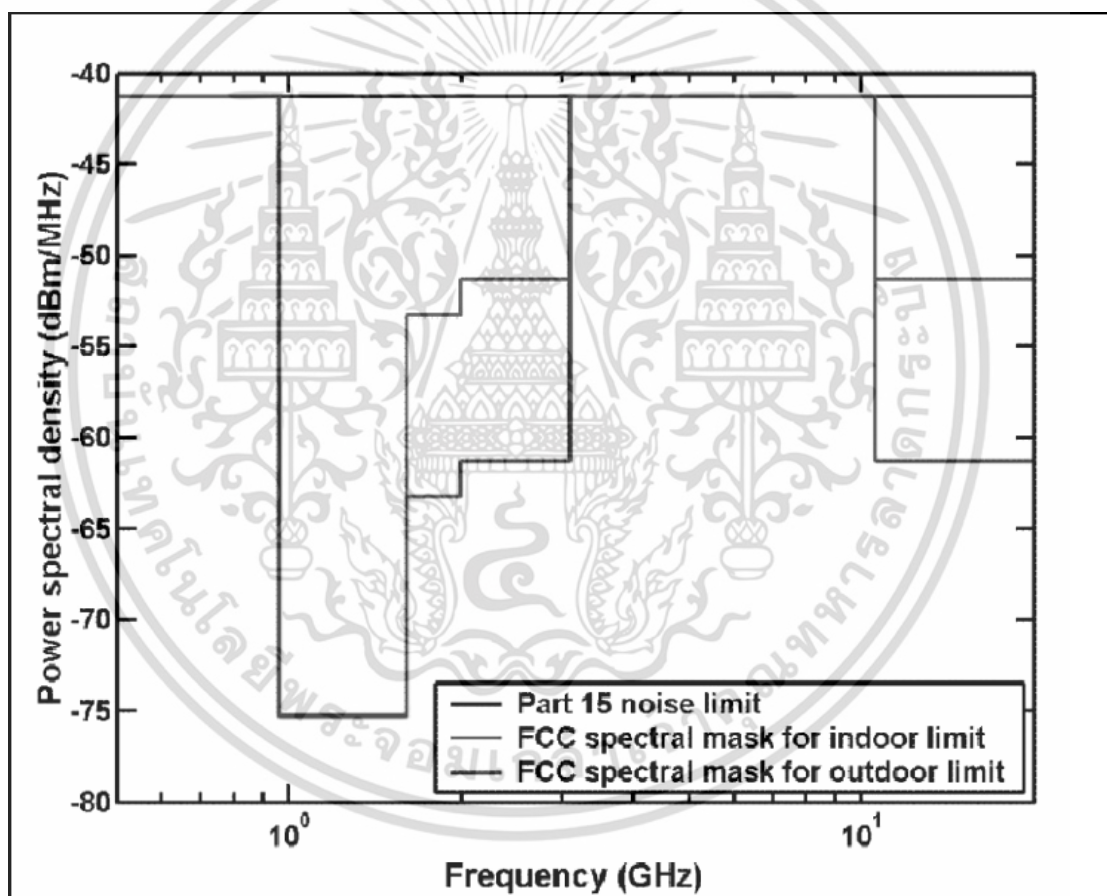
### 2.6 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ในระบบแถบกว้างยิ่งได้มีข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง คือการจัดสรรความถี่ในการใช้งาน โดยในประเทศสหรัฐอเมริกาจะถูกกำหนดโดย FCC เช่นเดียวกับกับในยุโรปก็ได้มีการหาข้อตกลงการจัดสรรคลื่นความถี่ และการแทรกสอดของคลื่นวิทยุแถบกว้างยิ่ง โดยสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standard Institute: ETSI) หรือ สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU) สำหรับในประเทศญี่ปุ่นได้มีการกำหนดจัดสรรความถี่ในการใช้งาน โดยกระทรวงพาณิชย์ และการสื่อสารภายในประเทศ (Ministry of Internal Affairs and Communications: MIC) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ข้อกำหนดตามแบบของ FCC โดยมีประวัติความเป็นมาและข้อกำหนดดังนี้

FCC ได้ออกประกาศในปี ค.ศ.1998 เกี่ยวกับการตรวจสอบหรือ (Notice of Inquiry: NOI) โดยถึงแม้ว่าจะได้คาดการณ์ถึงระดับกำลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณที่มีระดับต่ำมากๆ แล้วก็ตาม ยังมีกลุ่มผู้ที่สนับสนุนในระบบเดิม ที่มีใช้งานกันอยู่ได้ทำการต่อต้านการนำระบบแถบกว้างยิ่งมาใช้งานสำหรับการสื่อสารของพลเรือน ซึ่งเรียกร้องโดยมากจะเกี่ยวข้องกับการคาดการณ์ถึงการเพิ่มขึ้นของระดับการสอดแทรกในแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น แถบความถี่ในการกระจายสัญญาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โทรทัศน์แถบความถี่ที่สำรองไว้ สำหรับคลื่นวิทยุทางดาราศาสตร์ และระบบ GPS โดยที่องค์กรบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกาหรือ (Federal Aviation Administration: FAA) ได้แสดงความเป็นห่วงต่อการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบความปลอดภัยในกิจการการบินและทิศทางในการค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องส่งในระบบแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกัน

FCC ได้ออกกฎสำหรับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเมื่อ 14 กุมภาพันธ์ ค.ศ.2002 ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานฉบับที่หนึ่ง สำหรับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง และยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยกำหนดสเปกตรัมมาร์ค (Spectral Mask) สำหรับการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC แสดงดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.9 สเปกตรัมมาร์คสำหรับการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นแถบกำลังงานสำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.2** การจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบ แลกกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC [17]

ความถี่	ภายในอาคาร	ภายนอกอาคาร
	EIRP	EIRP
960 MHz – 1.61 GHz	-75.3 dBm	-75.3 dBm
1.61 GHz – 1.99 GHz	-53.3 dBm	-63.3 dBm
1.99 GHz – 3.1 GHz	-51.3 dBm	-61.3 dBm
3.1 GHz – 10.6 GHz	-41.3 dBm	-41.3 dBm
สูงกว่า 10.6 GHz	-51.3 dBm	-51.3 dBm

## 2.7 มาตรฐานของระบบการสื่อสารแบบแลกเปลี่ยนยิ่ง

มาตรฐานของระบบแลกเปลี่ยนยิ่งมีอยู่ 3 มาตรฐาน คือ IEEE 802.15.3a ใช้สำหรับโครงข่าย พื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network: WPAN) ระยะทางไกลอัตราการส่ง ข้อมูลสูง IEEE 802.15.4a ใช้สำหรับ WPAN ระยะทางไกลอัตราการส่งข้อมูลต่ำ และ IEEE 802.15.6 ใช้ สำหรับระบบโครงข่ายพื้นที่ร่างกายไร้สาย (Wireless Body Area Network: WBAN)

### 2.7.1 มาตรฐาน IEEE 802.15.3a

มาตรฐาน IEEE 802.15.3a ได้พยายามปรับปรุงอัตราการส่งของมาตรฐาน IEEE 802.15.3 ให้ สูงขึ้นโดยการนำเอาเทคโนโลยีแลกเปลี่ยนยิ่ง มาใช้ ซึ่งมีจุดประสงค์จะนำมาใช้กับ WPAN โดยมีระยะ ทางการใช้งานถึง 10 m ที่อัตราการส่งข้อมูล 110 Mbps และที่ระยะทางไกลคือประมาณ 2 m สามารถมีอัตราการส่งข้อมูลได้สูงถึง 480 Mbps [18] แต่เกิดปัญหาเนื่องจากไม่สามารถตกลงกันได้ว่าจะ เลือกลงใช้เทคโนโลยีไหนระหว่างการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉากหลายแถบ (Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing: MB-OFDM) กับแลกเปลี่ยนยิ่งลำดับตรง (Direct Sequence Ultra Wideband: DS-UWB) ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากสองบริษัทพันธมิตร และใน เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2006 มาตรฐานนี้ได้ถูกยกเลิกไป

### 2.7.2 มาตรฐาน IEEE 802.15.4a

มาตรฐาน IEEE 802.15.4a ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีแลกเปลี่ยนยิ่ง มาประยุกต์ใช้สำหรับ WPAN โดยปรับปรุงให้มีระยะทางการใช้งานที่ไกลขึ้นได้ถึงประมาณ 100 เมตร โดยลดอัตราการส่งข้อมูล ลง มีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่นาน รวมทั้งมีราคาถูกลง สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบ โครงข่ายการตรวจจับไร้สาย และระบบการหาตำแหน่งที่มีความเที่ยงตรงสูง การส่งสัญญาณมีพื้นฐาน อยู่บนเทคนิคการส่งพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์แคบมากประมาณได้เป็นอิมพัลส์ จึงเป็นที่มาของชื่อ แลกเปลี่ยนยิ่ง [19]

### 2.7.3 มาตรฐาน IEEE 802.15.6

มาตรฐาน IEEE 802.15.6 เป็นมาตรฐานที่ตั้งขึ้นมาใหม่สำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับ WBAN โดยมีการใช้งานสำคัญคือตรวจสุขภาพร่างกายของผู้ป่วย วินิจฉัยโรค รวมทั้งควบคุมเชื้อโรค WBAN ทำงานบริเวณใกล้กับ ติดอยู่กับ หรือภายในร่างกายของมนุษย์ โดยมีการใช้งานส่งข้อมูลระหว่างโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในร่างกาย และส่งข้อมูลจากร่างกายไปยังอุปกรณ์ การประยุกต์ใช้ทั้งทางด้านการแพทย์หรือด้านอื่น [20]

## 2.8 การประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

ระบบแถบกว้างยิ่งนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบทั้งการประยุกต์ใช้ในสำนักงาน ในที่พักอาศัย ดังนี้

### 2.8.1 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายภายในอาคารสำนักงาน

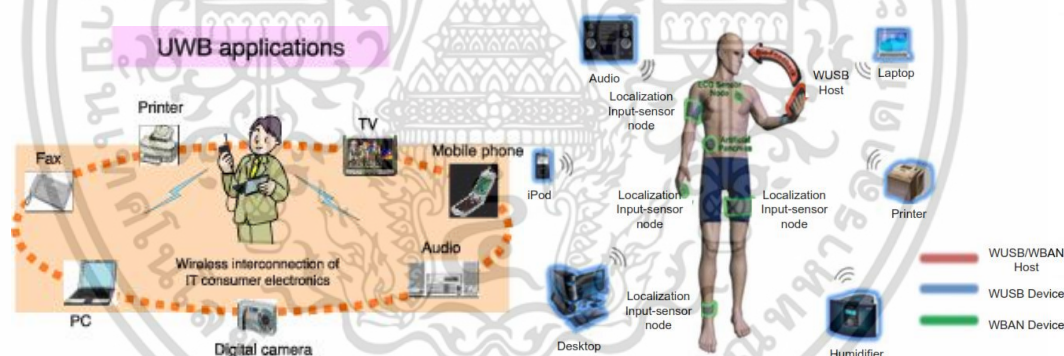
การนำเทคโนโลยีแบบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้งานในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ภายในอาคารสำนักงาน ซึ่งระบบการสื่อสารแบบไร้สายระยะสั้นมีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลสูง เพื่อรองรับระบบมัลติมีเดียที่ใช้ในอาคารสำนักงาน

### 2.8.2 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายภายในที่พักอาศัย

เป็นการนำเทคโนโลยีแบบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้งานในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ภายในที่พักอาศัย เช่น คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เครื่องเล่นดีวีดี ทีวี กล้องดิจิทัล ดังรูปที่ 2.10 เป็นต้น

### 2.8.3 การประยุกต์ใช้งานกับโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์

เป็นการนำเทคโนโลยีแบบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้งานในการเชื่อมต่อกับอวัยวะต่างๆ ของร่างกายมนุษย์ เพื่อให้อวัยวะของร่างกายสามารถสื่อสารกับโลกภายนอกได้ ซึ่งมีประโยชน์ทั้งทางการแพทย์และการสื่อสารในชีวิตประจำวัน ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การนำเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้งาน [21]

### 2.8.4 การประยุกต์ใช้งานในการค้นหาตำแหน่ง

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบเรดาร์ เพราะเป็นเทคโนโลยีที่มีราคาต้นทุนต่ำ เนื่องจากระบบเรดาร์เป็นระบบที่ซึ่งมีความต้องการของตลาดในอนาคต สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัตถุ ตรวจสอบเพื่อหลีกเลี่ยงการชน การตรวจจับความเร็วบนถนน ใช้เป็นระบบรักษาความปลอดภัยส่วนบุคคลในการตรวจสอบการเคลื่อนที่ในพื้นที่ที่เราต้องการความปลอดภัยสูงหรือพื้นที่ที่ต้องการความเข้มงวดในการตรวจสอบสูง ประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบทะลุผ่านวัสดุที่ใช้ทำอาคารเช่น ไม้ อิฐ อิฐบล็อก ไฟเบอร์ พลาสติก และคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งหรือ Ultra Wideband ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง จุดเด่นของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง รวมถึงการกำหนดกฎเกณฑ์ในการใช้งาน ข้อบังคับต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นช่วงความถี่ที่ใช้งานซึ่งจะสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ของระบบ ระดับกำลังงานที่แพร่กระจายทั้งภายในและภายนอกอาคาร ที่กำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา รวมถึงรูปแบบของสัญญาณที่จะนำมาใช้ในระบบแถบกว้างยิ่งที่ได้แบ่งตามประเภทต่างๆ เช่น พัลส์แบบเกาส์ พัลส์แบบเกาส์โมโนไซเคิลและพัลส์แบบเกาส์ดับเลต เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงมาตรฐานของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งและการประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเป็นองค์ความรู้เบื้องต้นของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี

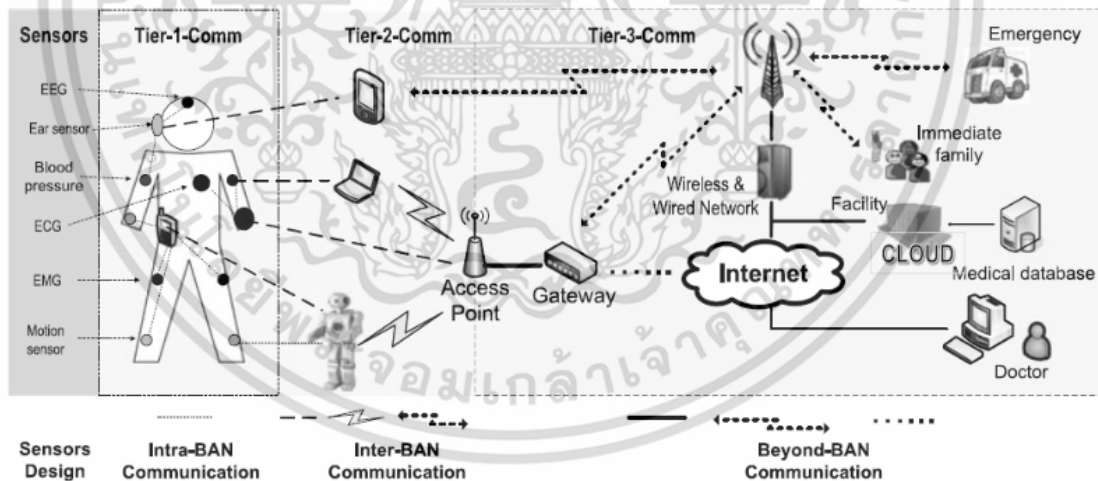


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เทคโนโลยีโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

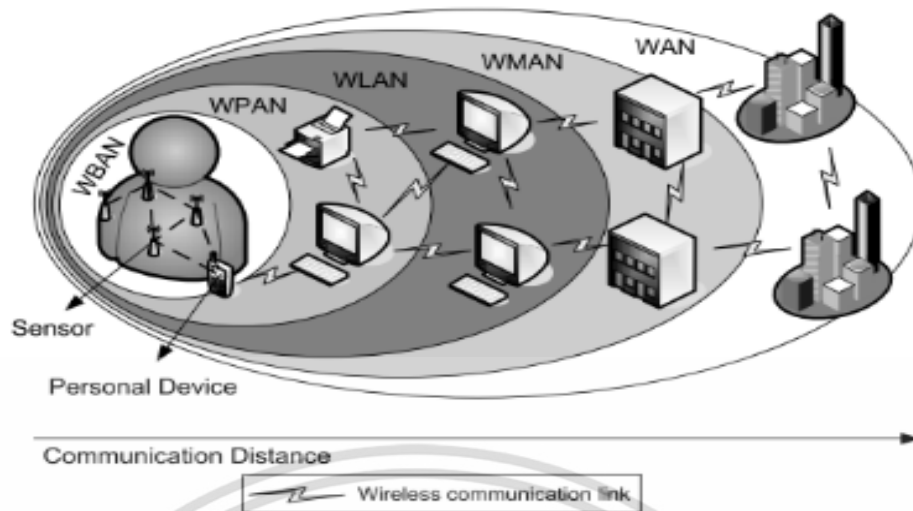
### 3.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารโครงข่ายไร้สายได้พัฒนาอย่างรวดเร็วและได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำให้สามารถผลิตอุปกรณ์สื่อสารที่มีขนาดเล็ก รองรับกับมาตรฐานการสื่อสารแบบใหม่คือ โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ (Wireless Body Area Network: WBAN) เพื่อเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการติดต่อสื่อสารเช่นการสื่อสารส่วนบุคคล การสื่อสารระยะสั้นระหว่างอุปกรณ์ภายในอาคารสำนักงานและบ้านพักอาศัย โครงข่ายบนร่างกายมนุษย์ ได้ถูกกล่าวถึงครั้งแรกในส่วนของโครงข่ายส่วนบุคคล (Personal Area Network: PAN) โดย Prof. Zimmermann ได้รับการยกย่องในการสร้างสรรค์แนวคิดเรื่องโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์ โดยมีพื้นฐานจากงานของเขาที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology: MIT) และที่บริษัทไอบีเอ็ม เขาได้พูดถึงการรวมกันของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่มีขนาดเล็ก และการเชื่อมต่อการสื่อสารไร้สายระยะสั้น การเชื่อมต่อนั้นถูกสร้างขึ้นผ่านการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ใกล้เคียงน้อยกว่า 3 เมตร ในปี 2004 โครงข่ายบนร่างกายมนุษย์ ได้อธิบายสภาพแวดล้อมรวมถึงบริเวณที่ใกล้ที่สุดซึ่งก็คือส่วนหนึ่งของร่างกายมนุษย์ รูปที่ 3.1 จะแสดงการเชื่อมต่อโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์กับโครงข่ายภายนอก



รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์กับโครงข่ายภายนอก [22]

ขอบเขตของระบบการสื่อสารไร้สายอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยจะเห็นว่าโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ได้นำเสนอวิธีการของการสื่อสารระยะสั้นเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่อยู่รอบๆ ร่างกายมนุษย์โดยคำนึงถึงความปลอดภัยของร่างกายด้วย โดยสามารถนำมาใช้กับการสื่อสารทางการแพทย์ การดูแลสุขภาพ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในร่างกายมนุษย์



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบระยะการสื่อสารของเทคโนโลยีไร้สาย [22]

ระบบการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์และระบบสื่อสารไร้สายส่วนบุคคล มีเทคโนโลยีและแนวคิดที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีส่วนที่แตกต่างกันเช่น อุปกรณ์ของสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ สามารถอยู่บนร่างกายหรือภายในร่างกายมนุษย์ได้โดยมีความปลอดภัยกับอวัยวะและชิ้นส่วนของร่างกายมนุษย์ ในส่วนของช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ได้ถูกนำเสนอด้วยคุณลักษณะที่แตกต่างกับการสื่อสารไร้สายส่วนบุคคล เนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์ที่เป็นตัวกลางซึ่งประกอบไปด้วยไขมัน น้ำ ทำให้การแพร่กระจายถูกลดทอนเร็วกว่าในแบบอวกาศว่าง และรูปแบบของสายอากาศอาจจะมีผลกระทบกับร่างกายมนุษย์ วิศวกรหรือนักออกแบบต้องเผชิญกับงานที่ท้าทายความสามารถในการสร้างหรือออกแบบอุปกรณ์ เช่น ต้องอยู่ในกฎระเบียบข้อบังคับ รูปแบบช่องสัญญาณ การใช้พลังงานที่ต่ำ ผลกระทบของอุณหภูมิ สายอากาศและการสูญเสียบนร่างกายมนุษย์ การสื่อสารที่มีประสิทธิภาพ อัตราการส่งข้อมูลที่เหมาะสม และมีความน่าเชื่อถือสูง เป็นต้น

### 3.2 นิยามและข้อกำหนดของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

หลังจากประสบความสำเร็จของมาตรฐานโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network: WPAN) WG 15 ของ IEEE 802 จึงได้เริ่มงานวิจัยใหม่ เพราะฉะนั้น WNG SC จึงได้ถูกจัดตั้งขึ้นมาในปี 2006 โดย WNG SC ได้เลือกรายการเทคโนโลยีที่ต้องการวิจัยจาก WG 15 Member [23] ดังนี้

1. กำลังงานต่ำมากและใช้พลังงานน้อยอย่างมีประสิทธิภาพ
2. โครงข่ายบนร่างกายมนุษย์ (Body Area Network: BAN)
3. เทคโนโลยี MIMO สำหรับ WPAN
4. Software-Defined Radio
5. Mobile, Nomadic Mesh Network
6. Heterogeneous WPAN Interoperability and Internet Working
7. Wireless System Coexistence and Dynamic Mitigation Techniques

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีเหล่านี้ BAN ได้รับความสนใจจากสมาชิกเป็นจำนวนมาก กลุ่มในการเริ่มงานของ BAN มีชื่อว่า an Interest Group of BAN (IG-BAN) ได้ถูกจัดตั้งในปี 2006 ซึ่งโดยปกติแล้วได้รับการอนุมัติจาก IEEE 802 Executive Committee (EC) สำหรับเป็นกลุ่มการศึกษาวิจัย ต่อมาในปี 2007 ได้รับการอนุมัติเป็นกลุ่มงาน (Task Group: TG)

### 3.2.1 นิยามของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

คำนิยามที่สมบูรณ์ของโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์ให้โดย TG6 [24] เป็นมาตรฐานสำหรับการสื่อสารไร้สายระยะสั้นในบริเวณรอบๆ หรือด้านในร่างกายมนุษย์ (แต่ไม่จำกัดจำนวนคน) สามารถใช้งานได้กับคลื่นความถี่สาธารณะสำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ (Industrial Sciences Medicine: ISM) ซึ่งได้รับการอนุมัติจากหน่วยงานทางการแพทย์นานาชาติและหน่วยงานกำกับดูแล รวมทั้งรองรับคุณภาพการบริการ (Quality of Service: QoS) กำลังงานต่ำมาก อัตราการรับส่งข้อมูล 10 Mbps เป็นข้อเรียกร้องสำหรับคุณสมบัติของ BAN โดยจะต้องไม่มีการแทรกสอดของสัญญาณอื่นๆ มาตรฐานนี้พิจารณาผลกระทบของสายอากาศที่ติดอยู่บนร่างกายมนุษย์ (ทั้งชาย หญิง คนผอม คนอ้วน ฯลฯ) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะ (Specific Absorption Rate: SAR) ของเนื้อเยื่อร่างกายที่ได้รับ และพิจารณาคุณลักษณะผลจากการเคลื่อนที่ของร่างกาย

การวิจัยเกี่ยวกับ WBAN เป็นการศึกษาลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้กับหรือภายในร่างกายมนุษย์ ความซับซ้อนของโครงสร้างเนื้อเยื่อและรูปร่างของมนุษย์ ทำให้ยากต่อการสร้างแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีสำหรับ BAN ในขณะที่สายอากาศสำหรับใช้ใน BAN นั้นจะวางอยู่บนพื้นผิวหรือภายในร่างกายมนุษย์โดยจะต้องคำนึงถึงผลกระทบของร่างกายต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ซึ่งสามารถแบ่งประเภทการเชื่อมต่อของแบบจำลองช่องสัญญาณสำหรับ BAN ได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. Implant Node: โหนดจะฝังอยู่ด้านในร่างกายมนุษย์
2. Body Surface Node: โหนดจะอยู่บนพื้นผิวของมนุษย์หรือห่างจากพื้นผิวมากที่สุด 2 เซนติเมตร
3. External Node: โหนดมีการเชื่อมต่อจากภายนอกมายังพื้นผิวของมนุษย์ (มีระยะไม่เกิน 5 เมตรจากร่างกายมนุษย์)

สำหรับการสื่อสารบนพื้นผิวร่างกาย (Body Surface Communication) ระยะระหว่างโหนดส่งและโหนดรับควรพิจารณาระยะทางรอบร่างกายด้วย สำหรับการสื่อสารในกรณีที่โหนดส่งหรือรับสัญญาณโหนดใดโหนดหนึ่งอยู่ห่างออกไปจากร่างกาย (External Node) ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับสัญญาณควรอยู่ในบริเวณรอบๆ หรือภายในร่างกายที่ระยะ 3 เมตร แต่ในบางกรณีระยะสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์สามารถห่างได้ 5 เมตร

ข้อจำกัดกำลังงานสูงสุดสำหรับอุปกรณ์บนร่างกายในทางการแพทย์ควรพิจารณาจากพื้นที่และข้อกำหนดระหว่างประเทศ [25] ส่วนข้อจำกัดกำลังงานสูงสุดสำหรับ MICS [26, 27] เป็นดังนี้

1. European Telecommunications Standards Institute: ETSI กำหนดให้กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด 25 uW ERP (Effective Radiation Power)
2. FCC & ITU-R กำหนดให้กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด 25 uW EIRP (Effective Isotropic Radiation Power) ซึ่งมีค่าประมาณ 2.2 dB ต่ำกว่าระดับ ERP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดกำลังงานการแพร่กระจายคลื่น 25 uW นี้นำไปใช้กับระดับสัญญาณที่อยู่ภายนอก ร่างกายมนุษย์ (ระบบการแพร่กระจายทั้งหมด) แต่ถ้าฝังอยู่ในร่างกายได้อนุญาตให้ระดับกำลังงานสูงขึ้นเพื่อชดเชยการสูญเสียจากร่างกาย โดยมีช่วงความถี่ของอุปกรณ์ที่ฝังอยู่ในร่างกาย 402-405 MHz ได้ระบุรายละเอียดไว้ใน [28]

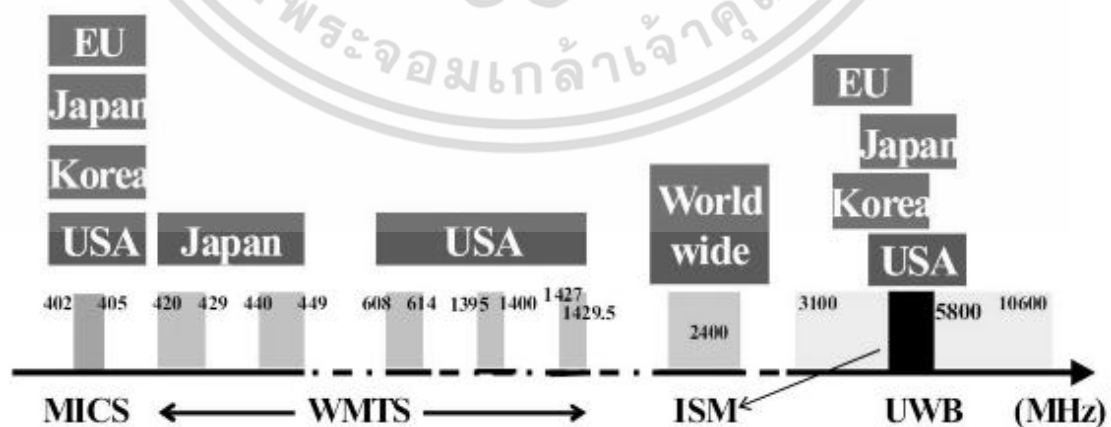
### 3.2.2 ข้อกำหนดของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

TG6 ได้กำหนดขอบเขตที่กว้างขึ้นของการใช้งาน ไม่ใช่แค่เพียงทางการแพทย์และการดูแลสุขภาพอย่างเดียวนั้น แต่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในด้านอื่นๆ อีกมากมาย ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์จึงมีอยู่หลากหลาย ไม่สามารถนำมา กล่าวได้ทั้งหมด ดังนั้นจะกล่าวเฉพาะข้อกำหนดทางเทคนิคที่สำคัญของ TG6 ดังนี้

1. จำนวนของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทางการแพทย์มี 6 โหนด แต่สามารถมีได้ถึง 256 โหนด
2. อัตราเร็วข้อมูลตั้งแต่ 10 kbps ถึง 10 Mbps
3. ช่วงการส่งผ่านไม่เกิน 3 เมตร
4. สามารถทำงาน บนร่างกาย ภายใต้อเสื้อผ้า หรือบนผิวหนัง
5. ลักษณะช่องสัญญาณจะขึ้นอยู่กับสภาพของร่างกาย เช่น การดูดซึม หรือผลจากสุขภาพ
6. ระดับพลังงานของอุปกรณ์แต่ขึ้นอยู่กับระดับต่ำ 0.1 - 1 mW
7. ใช้พลังงานน้อย
8. รองรับคุณภาพการบริการหรือ Quality of Service (QoS)
9. ความปลอดภัยของข้อมูล เช่น Authentication, Data Integrity and Encryption

### 3.3 กฎข้อบังคับสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

การจัดสรรช่วงความถี่เป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญที่สุดของกฎข้อบังคับ โดยทั่วไปแล้วความถี่ใช้งานสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์เป็นข้อกำหนดโดยผู้ออกกฏการสื่อสาร ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละประเทศ รูปที่ 3.3 แสดงความถี่บางช่วงที่ใช้งานสำหรับ WBAN ในแต่ละประเทศ ซึ่งมีการจัดสรรช่วงความถี่ดังนี้



รูปที่ 3.3 สเปกแถบความถี่สำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 Medical Implanted Communication Service (MICS)

ในปี 1998 กลุ่มงานสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุของสหภาพโทรคมนาคมนานาชาติ (International Telecommunication Union's Radio Sector: ITU-R) กำหนดช่วงความถี่ 402-405 MHz ใช้สำหรับการสื่อสารภายในร่างกาย โดยหลายประเทศใช้ช่วงความถี่เดียวกัน [30] อุปกรณ์ที่ใช้ในช่วงความถี่นี้สามารถรองรับการใช้งานแบนด์วิดท์ได้ 300 kHz แต่ไม่รองรับในเรื่องอัตราการส่งข้อมูลสูง

### 3.3.2 Industrial Scientific and Medical (ISM)

การใช้งานแถบความถี่สเปกตรัมแต่ก่อนไม่ได้ถูกใช้ในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามปัจจุบันนี้ถูกใช้เป็นมาตรฐานในเชิงพาณิชย์โดยช่วงความถี่ดังกล่าวถูกกำหนดโดย ITU-R [31] ซึ่งประเทศต่างๆ จะมีข้อกำหนดการใช้งานที่แตกต่างกัน อุปกรณ์ที่ใช้งานในช่วงความถี่นี้รองรับอัตราการรับส่งข้อมูลสูง และสามารถใช้ได้ทั่วโลก

### 3.3.3 Wireless Medical Telemetry Services (WMTS)

FCC ได้กำหนดช่วงความถี่ใช้งานใน USA [32] สำหรับวัตถุประสงค์ใช้ในการควบคุมทางไกลสำหรับการรักษาสุขภาพ อย่างไรก็ตามแถบความถี่นี้ไม่สามารถใช้งานได้ในยุโรป

### 3.3.4 Ultra Wide-Band (UWB)

เป็นระบบการสื่อสารที่ใช้ความถี่มากกว่า 500 MHz ในการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่งใช้รูปคลื่นพัลส์แคบมากในการส่งข้อมูลข่าวสาร ทำให้มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง FCC ได้กำหนดช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz โดยเริ่มแรกนั้นสามารถใช้งานได้เฉพาะสหรัฐอเมริกาและสิงคโปร์ แต่หลังจากนั้นในปี 2007 ประกาศให้สามารถใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้ในอังกฤษ

ระบบการสื่อสารไร้สายสามารถใช้งานได้โดยยังไม่มีใบอนุญาต อย่างไรก็ตามการจัดสรรคลื่นความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาตจะไม่เหมือนกันทุกประเทศ ในตารางที่ 3.1 แสดงช่วงความถี่ที่อนุญาตใช้งานสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ (WBANs) และโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPANs)

ตารางที่ 3.1 ความถี่ใช้งานสำหรับ WBAN และ WPAN ที่ยังไม่มีใบอนุญาต

Name	Band [MHz]	Max Tx Power [dBm EIRP]	Comment
MICS	402.0-405.0.0	-16	Worldwide
ISM	433.1-434.8	+7.85	Europe
ISM	868.0-868.6	+11.85	Europe
ISM	902.8-928.0	+36 w/spreading	Not in Europe
ISM	2400.0-2483.5	+36 w/spreading	Worldwide
ISM	5725.0-5875.0	+36 w/spreading	Worldwide
WMTS	608.0-614.0	+10.8	US only
WMTS	1395.0-1400.0	+22.2	US only
WMTS	1427.0-1432.0	+22.2	US only
UWB	100.0-960.0		US only
UWB	3100.0-10600.0	-41.3	US, UK and Singapore

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 แบบจำลองช่องสัญญาณสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการจำลองช่องสัญญาณของมาตรฐาน IEEE802.15.6 (Body Area Network: BAN) TG6 ได้พัฒนา BAN สำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์และไม่ใช้ทางการแพทย์ ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ภายในหรือบนพื้นผิวของร่างกายมนุษย์ แบบจำลองจะกล่าวถึงคุณลักษณะโดยทั่วไปของการสูญเสียเชิงวิถีของอุปกรณ์บนร่างกาย โดยคำนึงถึงการบดบังอันเนื่องมาจากร่างกายมนุษย์หรือสิ่งกีดขวางบริเวณใกล้ๆ ร่างกายมนุษย์และท่าทางของมนุษย์ ซึ่งมีช่วงความถี่และลักษณะการวัดที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ช่วงความถี่สำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

Description	Frequency Band
Implant	402-405
On-Body	13.5MHz
On-Body	5-50 MHz (HBC)
On-Body	400 MHz
On-Body	600 MHz
On-Body	900 MHz
On-Body	2.4 GHz
On-Body	3.1-10.6 GHz

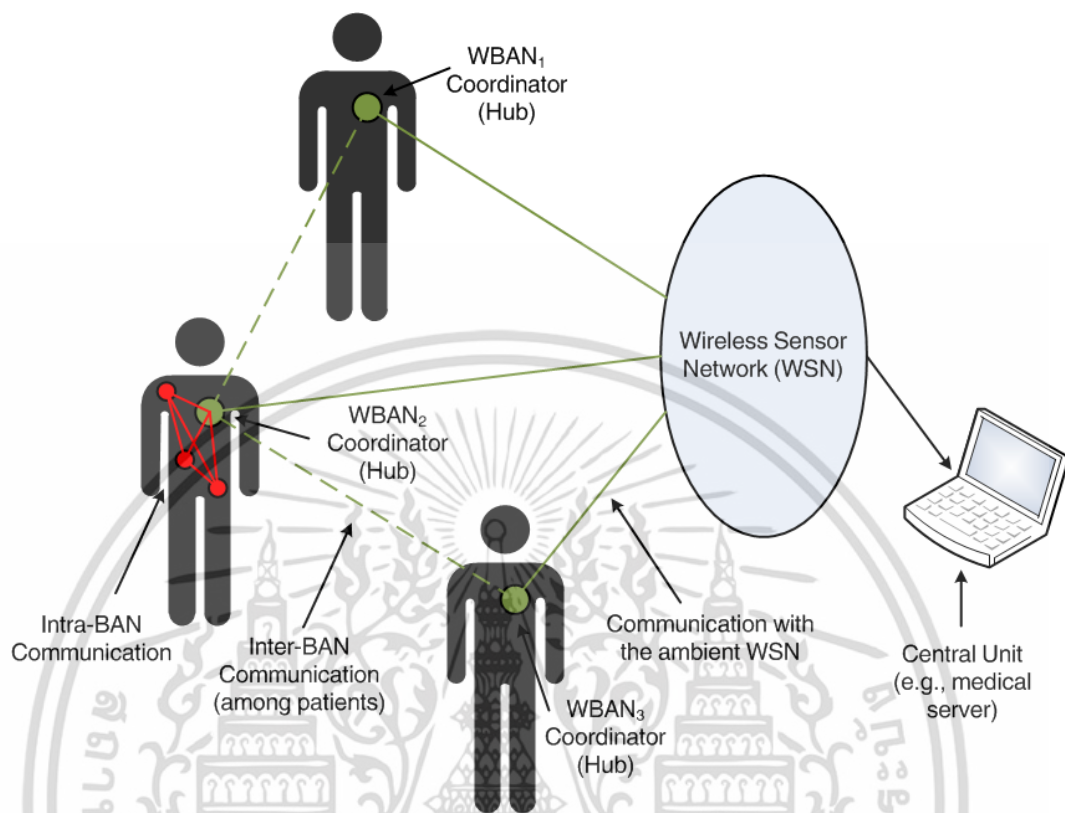
โครงสร้างของแบบจำลองสำหรับการสื่อสารบนพื้นผิวร่างกายและภายในร่างกายนั้นไม่เหมือนกัน สถานการณ์ต่างๆ ได้ระบุไว้ใน IEEE802.15.6 [33] ซึ่งมีรายละเอียดและช่วงความถี่ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รูปแบบการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์

Scenario	Description	Frequency Band	Channel Model
S1	Implant to Implant	402-405 MHz	CM1
S2	Implant to Body Surface	402-405 MHz	CM2
S3	Implant to External	402-405 MHz	CM2
S4	Body Surface to Body Surface (LOS)	13.5, 50, 400, 600, 900 MHz 2.4, 3.1-10.6 GHz	CM3
S5	Body Surface to Body Surface (NLOS)	13.5, 50, 400, 600, 900 MHz 2.4, 3.1-10.6 GHz	CM3
S6	Body Surface to External (LOS)	900 MHz 2.4, 3.1-10.6 GHz	CM6
S7	Body Surface to External (NLOS)	900 MHz 2.4, 3.1-10.6 GHz	CM7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะทางจากอุปกรณ์ภายนอกร่างกายนั้นสามารถอยู่ห่างจากร่างกายได้มากที่สุด 5 เมตร  
ลักษณะการเชื่อมต่อการสื่อสารสามารถดูได้จากรูปที่ 3.4



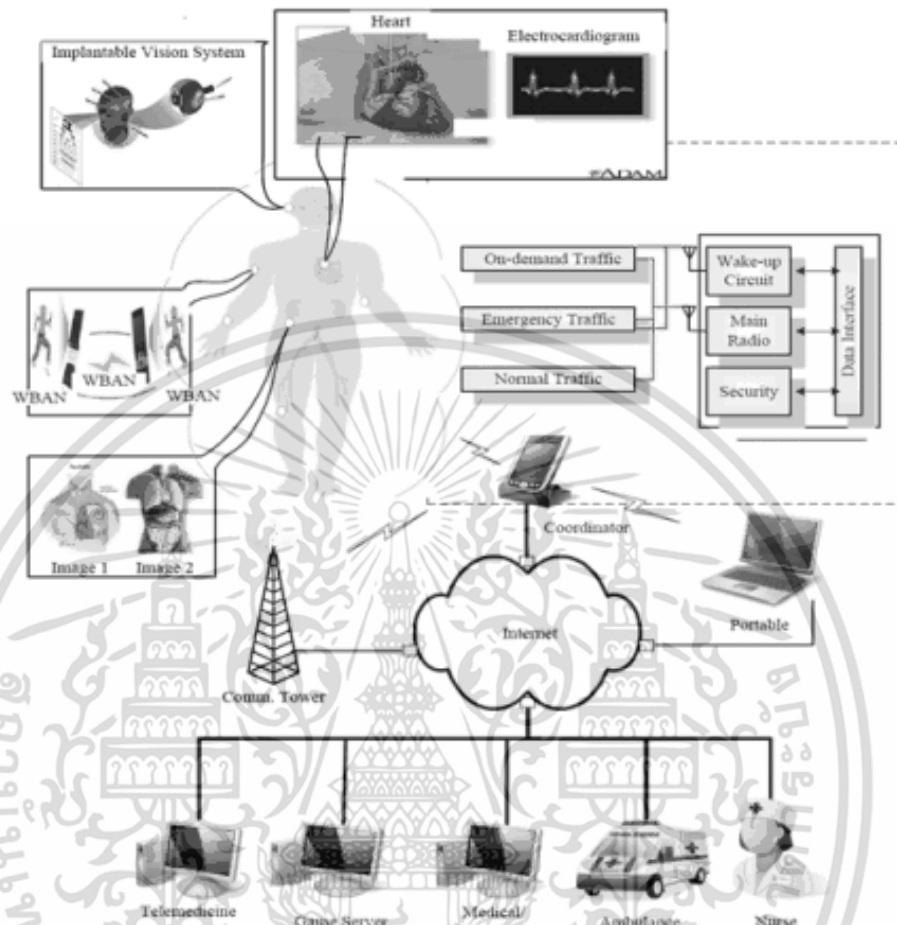
รูปที่ 3.4 การสื่อสารรูปแบบใหม่และการประยุกต์สำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ [34]

### 3.5 สำหรับการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

ในการประยุกต์ใช้งานของโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์แบบไร้สายโดยส่วนใหญ่จะใช้สำหรับการรักษาดูแลสุขภาพ การตรวจวัดสมรรถนะของร่างกาย การติดตามเฝ้าดูอาการผู้ป่วย โดยจะมีการติดตั้งเซนเซอร์ตำแหน่งต่างๆ ของร่างกายมนุษย์ โดยที่อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถส่งสัญญาณข้อมูลกลับมายังผู้ใช้งาน หรือแพทย์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์อาการ หรือเฝ้าระวังอาการของผู้ป่วย เพื่อป้องกันและทำให้ตรวจพบโรคก่อนได้ ในช่วงสองสามปีที่ผ่านมาได้มีการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดสุขภาพ ตรวจสอบรูปคลื่น ตรวจสอบสิ่งผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้น การตรวจวิเคราะห์คลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบพกพาที่มีการใช้เซนเซอร์ที่มีราคาแพงและซับซ้อน ถึงแม้จะได้รับการยอมรับในวงกว้างในระบบปัจจุบันก็ตาม แต่ยังคงถูกจำกัดด้วยราคาและการใช้งาน ระบบการตรวจสอบทางการแพทย์ส่วนบุคคลมีการใช้เพื่อเก็บข้อมูลเพียงอย่างเดียว ส่วนการประมวลผลและการวิเคราะห์นั้นถูกดำเนินการแบบออฟไลน์ ทำให้อุปกรณ์ใช้งานได้ไม่ต่อเนื่องและอาจทำให้มีความผิดปกติในการตรวจสอบทางการแพทย์ ระบบที่ประกอบไปด้วยเซนเซอร์จำนวนมากเพื่อใช้ในการฟื้นฟูสภาพร่างกายมีการเชื่อมต่อสายไฟระหว่างตัวเซนเซอร์กับระบบตรวจสอบ สายไฟดังกล่าวอาจทำให้ผู้ป่วยไม่สามารถทำกิจกรรมบางอย่างได้อย่างสะดวกสบาย ส่งผลทำให้มีผลกระทบกับข้อมูลที่วัดได้ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุผลนี้เองทำให้มีการสร้างระบบตรวจสอบสุขภาพร่างกายแบบไร้สายซึ่งใช้ในระบบ WBAN เป็นต้น ดังรูปที่ 3.5

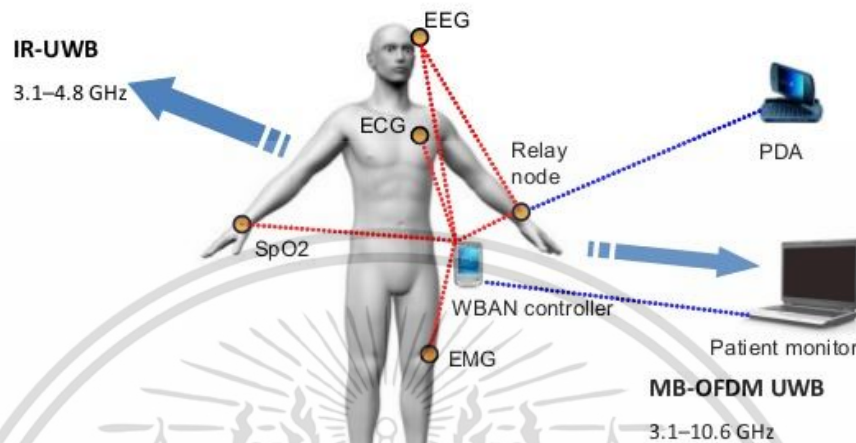


รูปที่ 3.5 การนำเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้งานโครงข่ายบนร่างกายมนุษย์ [35]

มีการประยุกต์ใช้งานมากมายและมีการใช้รูปแบบที่ช่วยให้มีความสะดวกสบายมากขึ้นโดยการใช้ WBAN ดังรูปที่ 3.6 แสดงถึงการประยุกต์ใช้งานในการช่วยเหลือผู้ที่มีความพิการทางสายตา เครื่องมือตรวจวัดได้ถูกติดกับสิ่งของต่างๆ ของผู้ที่มีความพิการทางสายตา จากนั้นต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นของระยะห่างของเครื่องมือตรวจวัดกับเครื่องรับสัญญาณ หากผู้พิการทางสายตาสัมผัสของไว้หรืออยู่ห่างจากค่าที่ได้กำหนดไว้ เครื่องรับสัญญาณจะส่งสัญญาณเตือน นอกจากนี้ยังมีกล้องที่ติดกับผู้พิการทางสายตา เช่น แว่นตา หรือไม้เท้า ภาพวิดีโอจะถูกถ่ายโดยกล้องและถูกส่งไปยังเครื่องรับที่ติดอยู่ที่ผู้พิการทางสายตา โดยภาพที่ถ่ายได้จะถูกแปลงให้เป็นเสียง เพื่อนำทางให้กับผู้พิการทางสายตา หลักการที่คล้ายคลึงกันสามารถนำมาใช้ช่วยเหลือผู้พิการด้านการพูด โดยใช้เซนเซอร์ที่ติดที่มือ เพื่อหากการเคลื่อนไหวของมือ โดยข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์จะถูกเปลี่ยนให้เป็นเสียงพูดและในรูปแบบอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## UWB radio interfaces for on-body sensor network



รูปที่ 3.6 การประยุกต์ใช้งานในการช่วยเหลือผู้พิการทางสายตาในการตรวจหาสัมภาระ [35]

จากที่กล่าวในข้างต้น เทคโนโลยีโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจและการพัฒนาอย่างรวดเร็วและจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน

### 3.6 สรุป

สำหรับในบทนี้เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งประกอบด้วยความเป็นมา และข้อกำหนดของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ กฎข้อบังคับสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ มาตรฐานต่าง ๆ (IEEE 802.15.6) อย่างไรก็ตามในแต่ละประเทศออกข้อกำหนดสำหรับการใช้งานที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยอ้างอิงจาก FCC รวมทั้งได้กล่าวถึงรูปแบบการสื่อสารของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ แบบจำลองช่องสัญญาณสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ และการประยุกต์ใช้งานของโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

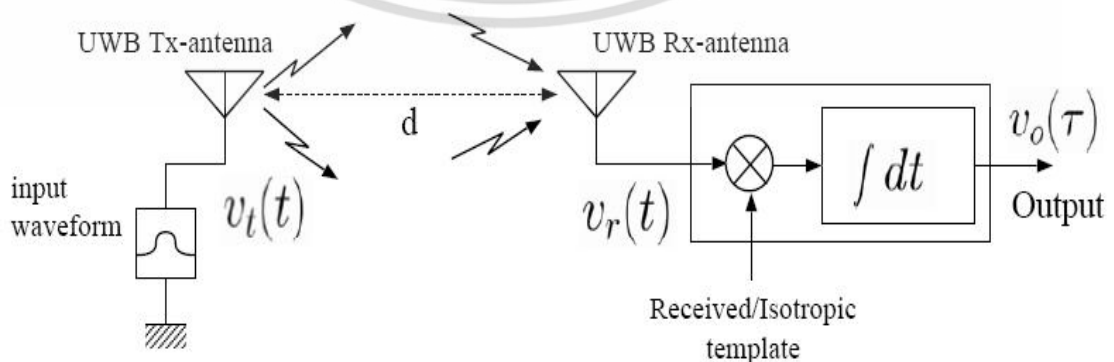
# หลักการวิเคราะห์โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์

### 4.1 กล่าวนำ

การสื่อสารวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งเป็นการสื่อสารไร้สายที่จำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบในปัจจุบันต่างๆ ที่ส่งต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไม่ว่าจะเป็นรูปแบบของสัญญาณที่แตกต่างไปจากเดิม ระดับของกำลังงาน แม้กระทั่งเวลาประวิงที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าเหล่านี้มีความสำคัญที่จะต้องนำมาวิเคราะห์ช่องสัญญาณของระบบการสื่อสาร โดยที่เมื่อระบบทำการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ สิ่งแวดล้อมโดยรอบหรือช่องสัญญาณจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณการสื่อสาร จึงจำเป็นต้องมีวิธีการวิเคราะห์ระบบ เพื่อประเมินผลคุณลักษณะของช่องสัญญาณ การส่งผ่านช่องสัญญาณ และนำไปสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารให้ดียิ่งขึ้น

### 4.2 แบบจำลองการส่งผ่านสำหรับระบบ UWB-IR

ในการส่งผ่านสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งนั้นจะมีลักษณะแตกต่างจากการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุโดยทั่วไปเนื่องจากการส่งสัญญาณในโดเมนทางเวลาและสัญญาณที่ใช้ในการส่งผ่านนั้นไม่มีการมอดูเลชันกับสัญญาณพาหะก่อนทำการส่งสัญญาณออกผ่านสายอากาศทางด้านส่ง เนื่องจากตามข้อกำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดให้ใช้ความถี่ในย่าน 3.1 กิกะเฮิรต ถึง 10.6 กิกะเฮิรต ซึ่งมีแถบความถี่กว้างมาก ในกระบวนการการส่งสัญญาณนั้นเริ่มจากการสร้างสัญญาณที่ใช้ในการส่งผ่านเป็นสัญญาณอินพุทเวฟฟอร์ม ส่งผ่านไปยังสายอากาศด้านส่ง ผ่านช่องสัญญาณไปยังสายอากาศทางด้านรับ เมื่อสัญญาณเดินทางมาถึงสายอากาศทางด้านรับแล้วจากนั้นสัญญาณที่ได้ผ่านกระบวนการส่งผ่านโดยพิจารณาทางด้านรับเป็นแบบสหสัมพันธ์ (Correlation Receiver) เพื่อให้ค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มีค่าสูงมากที่สุด จากนั้นจึงมาถึงขั้นตอนของการตรวจจับสัญญาณและนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับความสอดคล้องระหว่างในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติต่อไป ซึ่งกระบวนการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งดังกล่าวสามารถดูได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองการส่งผ่านสำหรับระบบ UWB-IR [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง

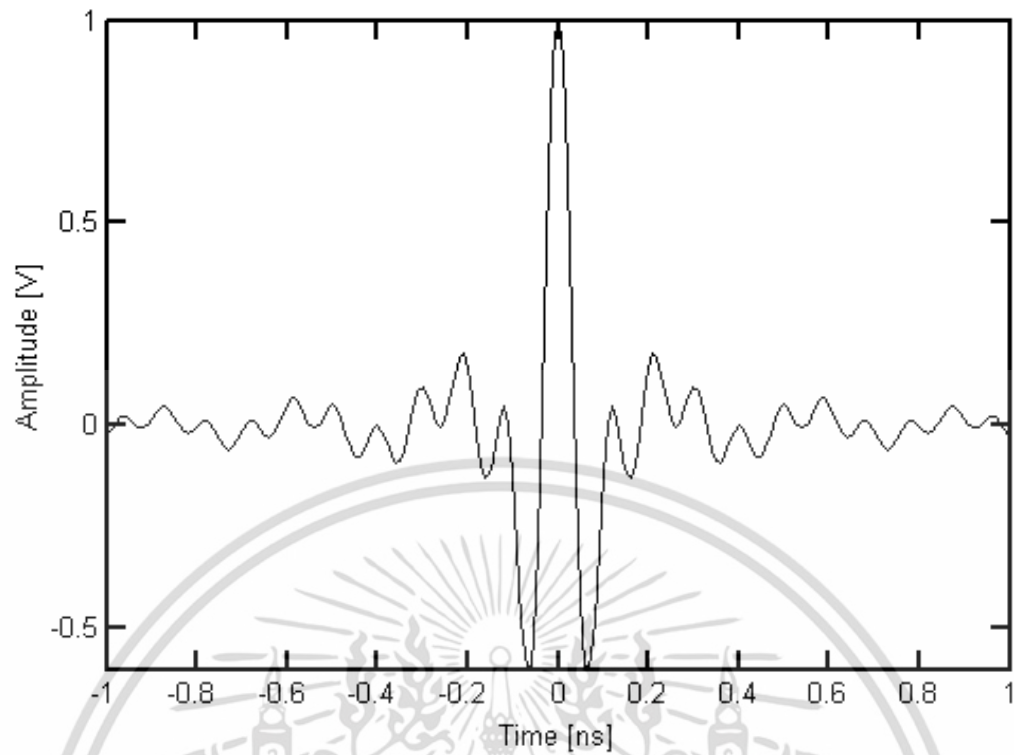
รูปคลื่นสัญญาณส่งสามารถใช้ในการทดสอบความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณการรับของระบบการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งได้ แต่ผลของความผิดเพี้ยนของสัญญาณรูปคลื่นนั้นจะเห็นได้ชัดเจนมากเมื่อความกว้างของแถบความถี่นั้นกว้างขึ้น ดังนั้นจะพิจารณาตลอดช่วงความถี่ของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ที่กำหนดขึ้นโดย FCC [13] โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม (Rectangular Pass Band Waveform) มีช่วงแถบความถี่ตั้งแต่ 3.1 กิกะเฮิร์ต ถึง 10.6 กิกะเฮิร์ต มีความถี่ศูนย์กลางและแบนด์วิดท์รวมเท่ากับ 6.85 GHz และ 7.5 GHz รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ใช้วิเคราะห์มีนิยามดังสมการที่ (4.1) และฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมแสดงดังสมการที่ (4.2)

$$v_t(t) = \frac{1}{f_b} [f_{\max} \text{sinc}(2f_{\max}t) - f_{\min} \text{sinc}(2f_{\min}t)] \quad (4.1)$$

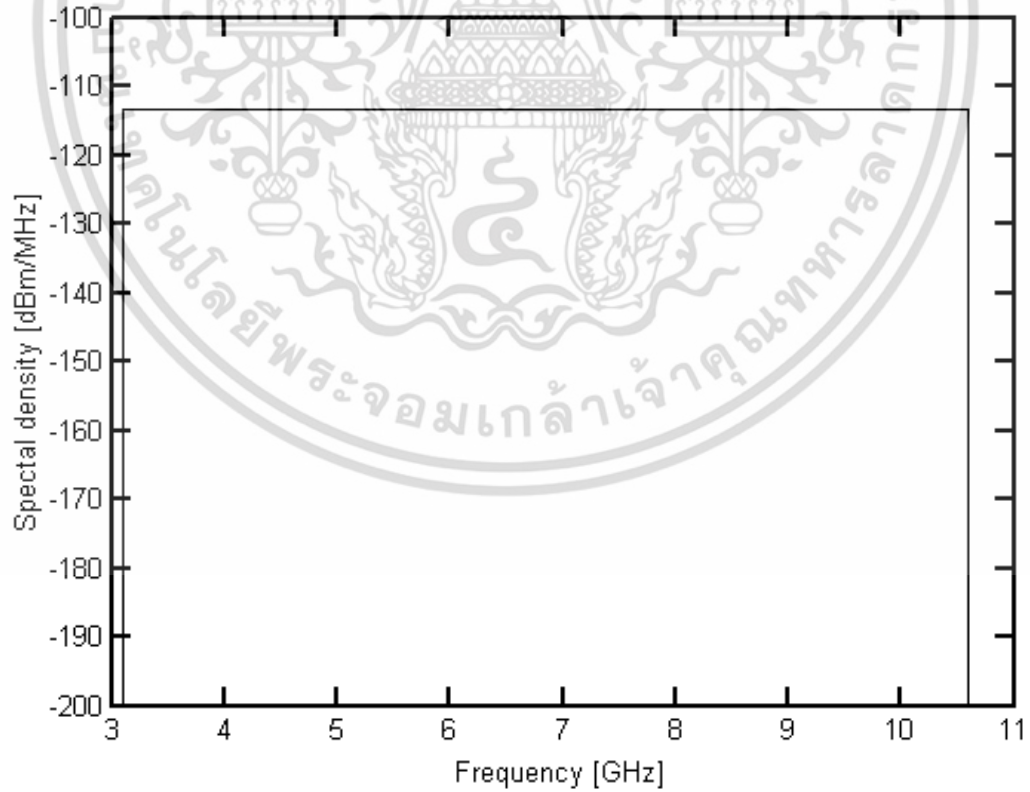
$$V_t(f) = \begin{cases} \frac{A}{2f_b} & \|f| - f_c| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & \|f| - f_c| > \frac{f_b}{2} \end{cases} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $A$  คือ แอมพลิจูดสูงสุด  $f_b$  คือ แบนด์วิดท์รวม  $f_c$  คือ ความถี่ศูนย์กลาง  
 $f_{\min}$  คือ ความถี่ต่ำสุด  $f_{\max}$  คือ ความถี่สูงสุด

รูปคลื่นนี้มีความหนาแน่นสเปกตรัมเป็นรูปสี่เหลี่ยมทั้งในด้านความถี่บวกและความถี่ลบ โดยความหนาแน่นสเปกตรัมจะมีขนาดคงที่เท่ากับ  $A/2f_b$  อยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่  $-f_{\max}$  ถึง  $-f_{\min}$  และ  $f_{\min}$  ถึง  $f_{\max}$  และจะมีเฟสเป็นศูนย์ รูปคลื่นนี้เป็นรูปคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งในอุดมคติ ดังนั้นจึงใช้พิจารณาหาขอบจำกัดสูงสุดที่เป็นไปได้ของแบนด์วิดท์มากที่สุด แอมพลิจูดมากที่สุด และกำลังมากที่สุดของรูปคลื่นแบบแถบกว้างยิ่ง รูปคลื่นนี้จะมีคุณสมบัติแบบฟังก์ชันคู่ และมีส่วนประกอบกระแสตรง (DC) เป็นศูนย์ รูปที่ 4.2 แสดงถึงรูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ในโดเมนเวลาโดยแกน X แสดงถึงค่าของเวลาและแกน Y แสดงถึงขนาดของแอมพลิจูดที่ใช้ในการส่งผ่านระบบวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งมีค่าเท่ากับ 1 โวลต์ รูปที่ 4.3 แสดงถึงความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของรูปคลื่นที่ใช้ในการส่งผ่านระบบวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่ โดยมีแกน X แสดงถึงค่าความถี่และแกน Y แสดงถึงค่าความหนาแน่นสเปกตรัมในหน่วยของ dBm/MHz



รูปที่ 4.2 รูปคลื่นสัญญาณการส่งผ่านของระบบแบบแถบกว้างยิ่ง [11]



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมสัญญาณการส่งผ่านของระบบแถบกว้างยิ่ง [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

ช่องสัญญาณที่ใช้ในวิเคราะห์เราได้พิจารณาช่องสัญญาณสองชนิด คือ ช่องสัญญาณในอวกาศว่างและช่องสัญญาณที่ได้จากการวัดจริง เพื่อเปรียบเทียบความผิดเพี้ยน โดยช่องสัญญาณในอวกาศว่างสามารถหาได้จากสูตรการส่งผ่านอวกาศว่างของฟรีส [1] ดังสมการที่ (4.3) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับช่องสัญญาณแถบแคบ โดยพิจารณาในรูปแบบจำนวนจริง ในความถี่ที่กำหนด ส่วนช่องสัญญาณที่ได้จากการวัดจริงจะรวมในส่วนของสายอากาศทางด้านส่งและเข้าเข้ามาพิจารณาด้วย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

$$G_r(f) = \frac{c^2}{16\pi^2 f^2 d^2} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $d$  เป็นระยะทาง และ  $c$  เป็นความเร็วแสง

เนื่องจากสูตรของฟรีสเหมาะสมกับความถี่บางช่วงเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับการส่งสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่ง ดังนั้น จึงได้มีการประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านอวกาศว่างของฟรีสในรูปแบบเชิงซ้อน [37-39] หรือเรียกว่าฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณอวกาศว่าง  $H_f(f)$  สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.4)

$$H_f(f) = \frac{c}{4\pi d |f|} e^{-j2\pi f d/c} \quad (4.4)$$

สมการนี้เป็นไปตามคุณสมบัติของความสมเหตุสมผล (Causality) ซึ่งจะมีค่าที่ความถี่บวกเป็นสังยุคเชิงซ้อน (Complex Conjugate) ของค่าที่ความถี่ลบ

#### 4.2.3 การประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส

ในระบบสื่อสารไร้สายสัญญาณที่ต้องการจะส่งจะถูกป้อนไปยังสายอากาศเพื่อที่จะแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อคลื่นสัญญาณผ่านอากาศมาถึงภาครับสายอากาศก็จะทำหน้าที่แปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากลับเป็นสัญญาณไฟฟ้าเช่นเดิม ดังนั้น ช่องสัญญาณจากการวัดจริงนอกจากอวกาศว่างแล้วจะรวมในส่วนของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเข้าไปด้วย สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis' Transmission Equation) [1] ได้ถูกนำมาพิจารณาใช้ในระบบแบบแถบแคบซึ่งมีค่าเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังงานของสัญญาณที่ถูกลงออกมาดังสมการที่ (4.5)

$$G_{\text{Friis}}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} = G_t(f)G_r(f)G_f(f) \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $P_t(f)$  และ  $P_r(f)$  คือ กำลังของสัญญาณด้านส่งและกำลังของสัญญาณด้านรับ  $G_t(f)$  และ  $G_r(f)$  เป็นอัตราขยายของสัญญาณด้านส่งและสัญญาณด้านรับในรูปของเดซิเบล ส่วน  $G_f(f)$  คือ อัตราขยายของช่องสัญญาณในอวกาศว่าง ซึ่งหาได้จากสมการ 4.3 ที่ผ่านมา

จากสมการที่ (4.5) สามารถปรับปรุงสมการการส่งผ่านของฟรีสให้เหมาะสมกับระบบสื่อสาร แถบกว้างเช่นเดียวกับสมการที่ (4.3) โดยเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการถ่ายโอนดังนี้

$$H_c(f, d) = \frac{V_r(f)}{V_t(f)} = H_f(f, d) H_t(f) H_r(f) \quad (4.6)$$

เมื่อ  $V_t$  และ  $V_r$  เป็นแรงดันของสัญญาณที่ส่งและรับ

$H_t$  และ  $H_r$  เป็นฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของสายอากาศส่งและรับ

$d$  เป็นระยะทางระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ

#### 4.2.4 สัญญาณที่รับได้

ต่อมาได้มีการพัฒนาสมการมาใช้คำนวณรูปคลื่นการส่งผ่าน โดยการเพิ่มฟังก์ชันการส่งผ่านของสัญญาณส่ง [35-36] เพื่อใช้ในการหาค่าความผิดพลาดของสัญญาณทางด้านรับ สัญญาณที่รับได้ในโดเมนความถี่หรือความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้นั้น สามารถวิเคราะห์หาได้จากการนำฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง  $V_t(f)$  คูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ  $H_c(f)$  สัญญาณที่รับได้ในโดเมนความถี่หรือความหนาแน่นของสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้  $V_r(f)$  สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H_c(f) \quad (4.7)$$

และกรณีการส่งผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างจะเรียกว่าการส่งผ่านแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{r\text{-iso}}(f) = V_t(f) \cdot H_f(f) \quad (4.8)$$

สำหรับสัญญาณที่รับได้ในโดเมนเวลานั้น สามารถหาได้โดยใช้การแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับ (Inverse Fourier Transform) ของความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ สัญญาณที่รับได้ในโดเมนเวลาของ  $v_r(t)$  และ  $v_{r\text{-iso}}(t)$  สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

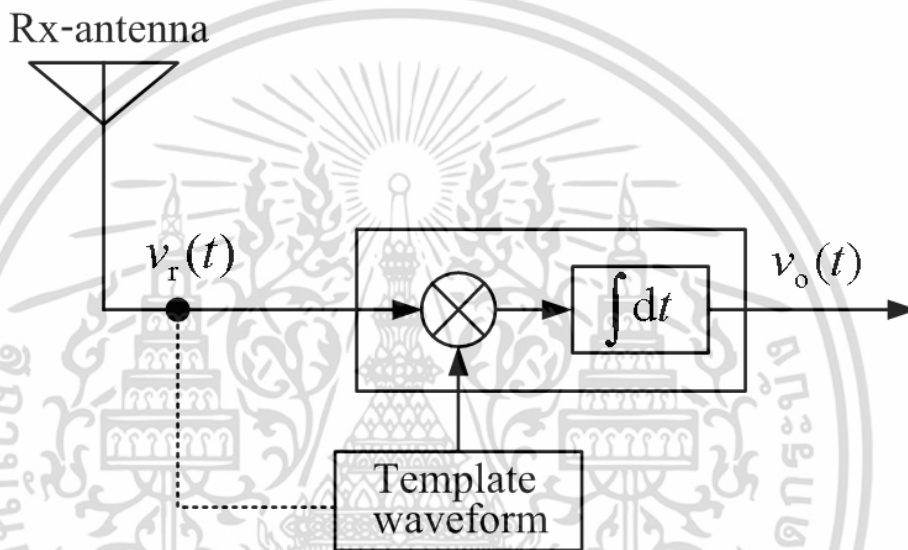
$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{i2\pi ft} df \quad (4.9)$$

$$v_{r\text{-iso}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{r\text{-iso}}(f) e^{i2\pi ft} df \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 เครื่องรับสหสัมพันธ์

เครื่องรับสัญญาณในระบบ UWB นั้นโดยปกติแล้วจะใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ [40-41] ทำหน้าที่เป็นตัวที่ทำให้สัญญาณมีอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนมากที่สุด ซึ่งหลักการของเครื่องรับประเภทนี้จะทำการนำเอาสัญญาณข่าวสารที่ส่งผ่านช่องสัญญาณมาทำการเปรียบเทียบกับรูปคลื่นต้นแบบ (Template Waveform) เพื่อทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทั้ง 2 โดยทำการคูณกันระหว่างรูปคลื่นที่รับได้กับรูปคลื่นต้นแบบ และทำการอินทิเกรตเอาที่พุดของกระบวนการออกมาอยู่ในรูปของค่าคงที่ค่าหนึ่ง ในกระบวนการคูณกันและการอินทิเกรตเกิดขึ้นระหว่างช่วงเวลาของลูกคลื่นพัลส์ ซึ่งเริ่มทำกระบวนการโดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเวลาของรูปคลื่นที่รับได้และรูปคลื่นต้นแบบที่ตรงกัน แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับสหสัมพันธ์สำหรับสัญญาณ UWB-IR [36]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ โดยกำหนดให้ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนระหว่างอินพุตและเอาต์พุตคงที่ สำหรับรูปคลื่นต้นแบบที่นำมาใช้พิจารณานั้นมีสองแบบ คือ รูปคลื่นต้นแบบสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Template) และรูปคลื่นต้นแบบสัญญาณไอโซทรอปิก (Isotropic Template)

เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้รูปคลื่นต้นแบบสัญญาณที่รับได้นั้นจะรวมคุณลักษณะความถี่ของสายอากาศและการแพร่กระจายในอวกาศว่างเข้าไปด้วย โดยมีความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณแม่แบบเป็นสังยุคเชิงซ้อนของ  $V_r(f)$  ดังนั้นฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้รูปคลื่นต้นแบบสัญญาณที่รับได้  $H_{wm}(f)$  สามารถเขียนได้เป็น

$$H_{wm}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} V_r^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_r(f)|^2 df}} \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้รูปคลื่นต้นแบบสัญญาณไอโซทรอปิกนั้นเหมาะสมสำหรับสายอากาศไอโซทรอปิก โดยมีความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณแม่แบบเป็นฟังก์ชันของ  $V_{r\text{-iso}}(f)$  ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณแบบไอโซทรอปิกเป็นสัญญาณแม่แบบ  $H_{wc}(f)$  สามารถเขียนได้เป็น

$$H_{wc}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} V_{r\text{-iso}}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_{r\text{-iso}}(f)|^2 df}} \quad (4.12)$$

#### 4.2.6 สัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสหสัมพันธ์

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้รูปคลื่นต้นแบบสัญญาณที่รับได้  $V_o(f)$  สามารถคำนวณได้โดยนำความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้  $V_r(f)$  คูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้รูปคลื่นต้นแบบสัญญาณที่รับได้ดังสมการที่ (4.13)

$$V_o(f) = V_r(f) \cdot H_{wm}(f) \quad (4.13)$$

และสามารถหาค่ารูปคลื่นเอาต์พุตของเครื่องรับสหสัมพันธ์  $v_o(t)$  โดยการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับ ดังสมการที่ (4.14)

$$v_o(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_o(f) e^{j2\pi ft} df \quad (4.14)$$

ส่วนความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้รูปคลื่นต้นแบบสัญญาณไอโซทรอปิก  $V_{o\text{-iso}}(f)$  สามารถคำนวณได้โดยนำความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณไอโซทรอปิก  $V_{r\text{-iso}}(f)$  คูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้รูปคลื่นต้นแบบสัญญาณไอโซทรอปิก  $H_{wc}(f)$  ดังสมการที่ (4.15)

$$V_{o\text{-iso}}(f) = V_{r\text{-iso}}(f) \cdot H_{wc}(f) \quad (4.15)$$

และสามารถหารูปคลื่นในโดเมนเวลาของสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับสหสัมพันธ์ในกรณีใช้รูปคลื่นต้นแบบสัญญาณไอโซทรอปิก  $v_{o\text{-iso}}(t)$  ได้ดังสมการ (4.16)

$$v_{o\text{-iso}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{o\text{-iso}}(f) e^{j2\pi ft} df \quad (4.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ผลที่ได้จากการวัดจะถูกนำไปประมวลผลผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 ผลตอบสนองความถี่ของสัญญาณ

การวัดช่องสัญญาณโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์สิ่งที่จะต้องทำความเข้าใจก็คือระบบและสัญญาณ จะมีปริมาณทางกายภาพที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบเรียกว่า สัญญาณอินพุต (Input Signal) และจะมีปริมาณทางกายภาพบางอย่างออกมาจากระบบซึ่งเรียกว่า สัญญาณเอาต์พุต (Output Signal) หรือผลตอบสนอง (Response) ของระบบ ผลที่ได้จากการวัดจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณซึ่งแปรผันตรงกับฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency Transfer function) หรือ  $H(\omega)$  ของช่องสัญญาณโดยฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวนี้จะแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยระดับสัญญาณที่ส่งผ่าน (Magnitude) และผลตอบสนองทางเฟส (Phase) ของสัญญาณ ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวนี้จะเป็นสิ่งที่ใช้แสดงถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกับฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณนั้นกำหนดตามสมการที่ (4.17)

$$S_{21}(\omega) \propto H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (4.17)$$

โดย  $Y(\omega)$  คือ เอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่  
 $X(\omega)$  คือ อินพุตของระบบในโดเมนความถี่

#### 4.3.2 การสูญเสียเชิงวิถี

ในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นเป้าหมายหลักของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นคือการคาดการณ์ถึงค่าความสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss:  $PL$ ) เนื่องจากการแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณโดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างระดับกำลังงานที่ใช้ส่งและระดับกำลังงานที่รับได้ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบล (Decibel) ดังแสดงในสมการที่ (4.18)

$$L_{dB} = 20 \log \left( \frac{v_r(t)}{v_t(t)} \right) \quad (4.18)$$

โดยที่  $v_t$  คือ ระดับสัญญาณที่ใช้ส่ง  
 $v_r$  คือ ระดับสัญญาณที่รับได้

โดยในการวิเคราะห์การสูญเสียของกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่ง  $PL_{LWB}$  นั้นจะพิจารณาที่ กำลังงานสูงสุดของสัญญาณที่ใช้ส่งและกำลังสูงสุดของสัญญาณที่รับได้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทาง ( $d$ ) โดยมีนิยามเป็นไปตามสมการที่ (4.19) และ (4.20) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$PL_{UWB}(d)[dB] = 20 \log \left[ \frac{\max |v_i(t)|}{\max |v_r(t,d)|} \right] \quad (4.19)$$

โดยในสมการที่ (4.19) ได้กำหนดให้ขนาดของสัญญาณที่ใช้ส่งมีค่าเท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้นสามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

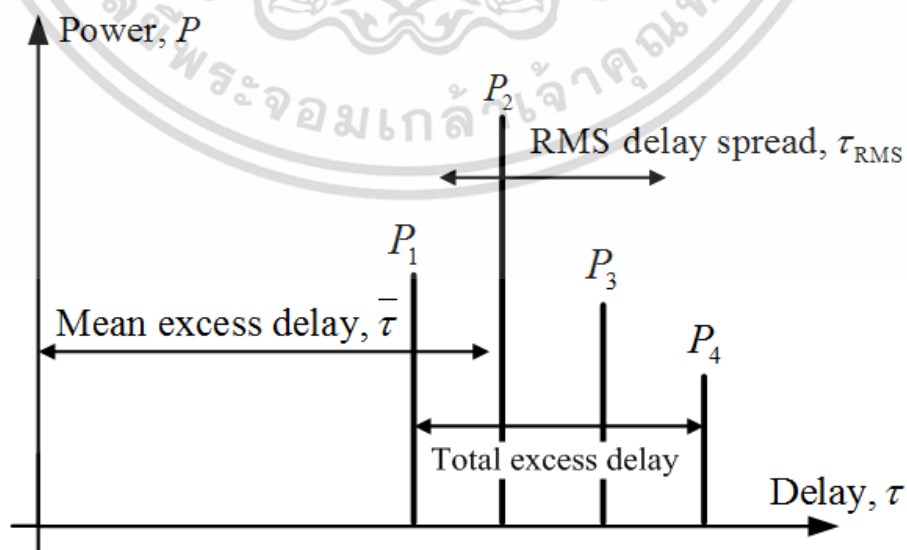
$$PL_{UWB}(d)[dB] = -20 \log \left[ \max |v_r(t,d)| \right] \quad (4.20)$$

### 4.3.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน

เป็นการแสดงให้เห็นถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามาถึงภาครับที่เวลาต่างๆ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสัญญาณที่มีการสะท้อนในหลายทิศทางหรือที่เรียกว่าสัญญาณหลายวิถี โดยจะเรียกว่า ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (Power Delay Profile: PDP) ตัวอย่างของ PDP ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2 \tau_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n P(\tau_i) \tau_i}{\sum_{i=1}^n P(\tau_i)} \quad (4.21)$$

- โดยที่
- $a_i$  คือ ระดับของสัญญาณเส้นทางที่  $i$
  - $\tau_i$  คือ เวลาประวิงที่เกิดขึ้นของสัญญาณเส้นทางที่  $i$
  - $P(\tau_i)$  คือ กำลังงานของสัญญาณเส้นทางที่  $i$



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ค่าความผิดพลาดของรูปสัญญาณที่รับได้นั้นสามารถวิเคราะห์และแสดงให้เห็นโดยการพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ข้าม (Cross Correlation) ที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณแบบไอโซทรอปิก และสัญญาณที่รับได้กับค่าสูงสุดของค่าสัมบูรณ์รากที่สองของผลคูณระหว่าง ค่าอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) ของสัญญาณไอโซทรอปิกและสัญญาณที่รับได้โดยสมการที่นิยามถึงค่าดังกล่าว แสดงให้เห็นตามสมการที่ (4.22) ถึงสมการที่ (4.25) ตามลำดับ การสหสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นสัญญาณ 2 สัญญาณสามารถนำมาใช้หาความผิดพลาดของสัญญาณทั้งสองได้ โดยจะรู้ว่าสัญญาณทั้งสองมีความผิดพลาดแตกต่างกันมากน้อยแค่ไหน ซึ่งการประเมินผลความผิดพลาดของสัญญาณถูกนำไปใช้สำหรับทดสอบสายอากาศแถบกว้างยิ่ง [43-44] โดยการสหสัมพันธ์รูปคลื่นส่งและรูปคลื่นที่รับได้

$$C = \frac{\max |r_{ab}(\tau)|}{\max \sqrt{r_a(\tau)r_b(\tau)}} \quad (4.22)$$

โดยสมการที่นิยามค่าสหสัมพันธ์ข้ามคือ

$$r_{ab}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_{o\text{-iso}}(\tau)v_o(t+\tau)dt \quad (4.23)$$

และสมการที่นิยามค่าอัตสหสัมพันธ์คือ

$$r_a(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_{o\text{-iso}}(\tau)v_{o\text{-iso}}(t+\tau)dt \quad (4.24)$$

$$r_b(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_o(\tau)v_o(t+\tau)dt \quad (4.25)$$

โดยที่  $v_{o\text{-iso}}(\tau)$  คือ สัญญาณไอโซทรอปิก

$v_o(\tau)$  คือ สัญญาณที่รับได้

#### 4.3.5 อัตราขยายช่องสัญญาณการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ [44]

ในวิทยานิพนธ์นี้ อัตราการขยายการส่งผ่านนิยามเป็นแอมพลิจูดสูงสุดของเอาต์พุตเครื่องรับสหสัมพันธ์ที่พิจารณาสายอากาศที่ใช้งานจริงนอร์แมลไลซ์ด้วยคู่สายอากาศไอโซทรอปิกทั้งคู่ จากการนอร์แมลไลซ์ของสัญญาณแม่แบบ ค่าของอัตราการขยายที่ได้นี้แสดงอัตราการขยายของอัตราส่วน SNR ดังนั้นอัตราการขยายการส่งผ่านของกรณีต้นแบบสัญญาณที่รับได้  $G_{wm}$  แสดงได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_{wm}(t) = 20 \log \left[ \frac{\max \left| \int_{-\infty}^{\infty} v_r(t) h_{wm}(t-\tau) dt \right|}{\max \left| \int_{-\infty}^{\infty} v_{r-iso}(t) h_{wc}(t-\tau) dt \right|} \right] \quad (4.26)$$

ในทำนองเดียวกันอัตราการขยายการส่งผ่านของกรณีต้นแบบสัญญาณไอโซทรอปิก  $G_{wc}$  สามารถเขียนเป็น

$$G_{wc}(t) = 20 \log \left[ \frac{\max \left| \int_{-\infty}^{\infty} v_r(t) h_{wc}(t-\tau) dt \right|}{\max \left| \int_{-\infty}^{\infty} v_{r-iso}(t) h_{wc}(t-\tau) dt \right|} \right] \quad (4.27)$$

ความแตกต่างระหว่างอัตราการขยายการส่งผ่านของกรณีต้นแบบสัญญาณที่รับได้และกรณีต้นแบบไอโซทรอปิกจะเป็นการระบุปริมาณความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น ซึ่งจะเห็นว่าอัตราการขยายการส่งผ่านที่เหมาะสมที่สุดของสัญญาณ UWB - IR ไม่สามารถเป็นเพียงการคูณกันระหว่างอัตราการขยายของสายอากาศ ดังนั้นจึงแตกต่างจากสูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีสแบบดั้งเดิม

#### 4.3.6 อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate: BER)

กรณีการสื่อสารระบบแอนะล็อก (Analog) พารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการพิจารณาคือ อัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน ส่วนในกรณีการสื่อสารของระบบดิจิทัลจะพิจารณาอัตราส่วนพลังงานเฉลี่ยบิตต่อความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของสัญญาณรบกวน [45] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.28)

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \cdot \frac{B}{R_b} \quad (4.28)$$

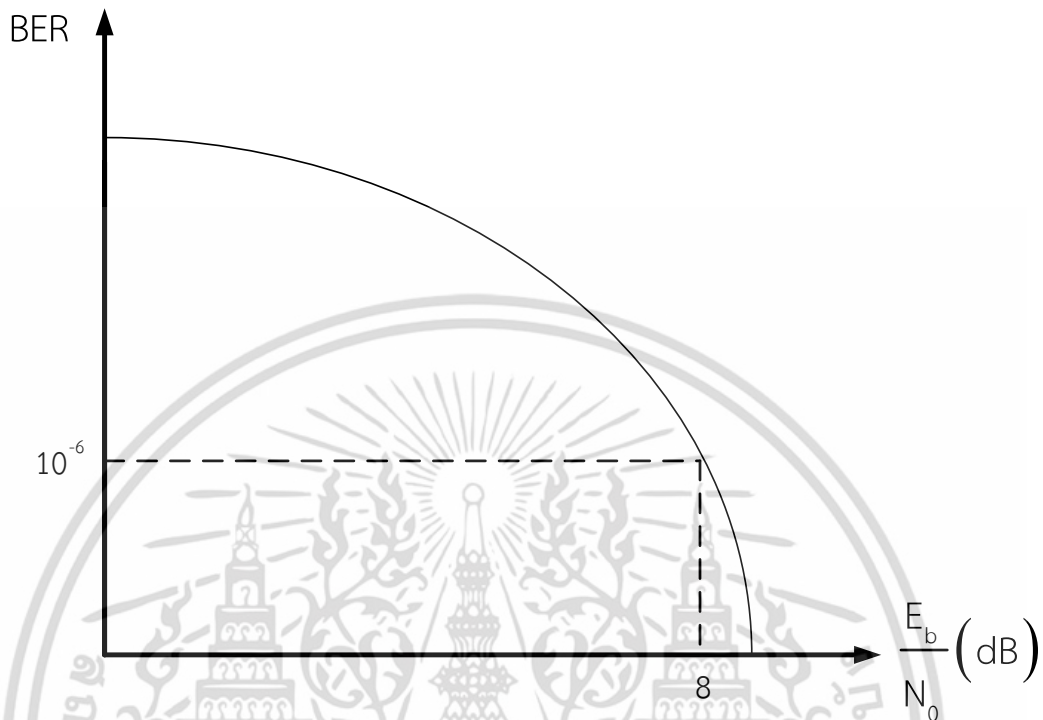
เมื่อ  $B$  คือ แบนด์วิดท์ของระบบ

$R_b$  คือ อัตราเร็วบิต

ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารดิจิทัลนั้นขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลที่รับได้ ซึ่งระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งก็เป็นการสื่อสารแบบดิจิทัล ดังนั้นการที่จะสามารถรู้ได้ว่าระบบมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดจะต้องมีพารามิเตอร์ที่มาเป็นเครื่องยืนยันว่าระบบนั้นเป็นอย่างไร ซึ่งจะแสดงในรูป BER ซึ่งเป็นค่าทางสถิติที่นิยามมาจากค่าความน่าจะเป็นที่เกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้คือเมื่อค่าอัตราส่วนพลังงานเฉลี่ยต่อบิตต่อความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นจะทำให้ BER ลดลง ดังรูปที่ 4.6 เช่นเครื่องส่งส่งข้อมูล 1000000 บิต ปรากฏว่าข้อมูลที่รับได้มีข้อมูลที่ผิดเพียง 1 บิต แสดงว่าค่าอัตราความผิดพลาดของบิตมีค่าเท่ากับ  $1/1000000$  หรือ  $10^{-6}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นต้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) และอัตราความผิดพลาดของบิตมีความผกผันซึ่งกันและกัน



รูปที่ 4.6 ความน่าจะเป็นและอัตราความผิดพลาดบิต

วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้แบบแผนการมอดูเลตแบบขั้นต่างกัน ซึ่งเป็นการมอดูเลตทางแอมพลิจูดของสัญญาณพัลส์ไบนารี (Bi-Phase Pulse Amplitude: BPAM) [46] โดยสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $C$ ) ดังสมการที่ 4.29 ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของสัญญาณทั้งสองได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$BER = Q\left(\sqrt{2\left(\frac{E_b}{N_0}\right)C}\right) \quad (4.29)$$

โดยที่  $E_b$  คือ พลังงานเฉลี่ยต่อบิต (J/bit)

$N_0$  คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของสัญญาณรบกวน (dBm/MHz)

$Q(x)$  คือ ฟังก์ชันความน่าจะเป็นความผิดพลาดของบิตข้อมูล สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt, \quad x \geq 0 \quad (4.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 สรุป

สำหรับในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งประกอบไปด้วยกันหลายฟังก์ชันคือ สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งโดยใช้สัญญาณแถบผ่านสี่เหลี่ยม ช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง การประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส สัญญาณที่รับได้ เครื่องรับในระบบแถบกว้างยิ่ง และสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสหสัมพันธ์ ผลที่ได้จากการวัดจะนำมาหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณแถบกว้างบนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส (โดยได้พิจารณาใช้การประยุกต์สูตรของฟรีส) [44] และนอกจากนี้ยังได้พิจารณานำเสนอเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ที่มีความเหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงมากที่สุด และเครื่องรับแบบไอโซทรอปิกเพื่อประเมินผลความผิดพลาดของรูปคลื่นที่ใช้ในการส่งผ่าน ส่วนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ การสูญเสียเชิงวิถี ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน สมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ รูปคลื่นที่รับจากเครื่องรับสหสัมพันธ์ อัตราขยายการส่งผ่าน และอัตราความผิดพลาดบิต พารามิเตอร์เหล่านี้ได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ อันเนื่องมาจากผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ และสามารถประเมินผลประสิทธิภาพการส่งผ่านได้

## บทที่ 5

# การวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านแถบกว้างยิ่ง ที่ประกอบด้วยร่างกายมนุษย์

### 5.1 กล่าวนำ

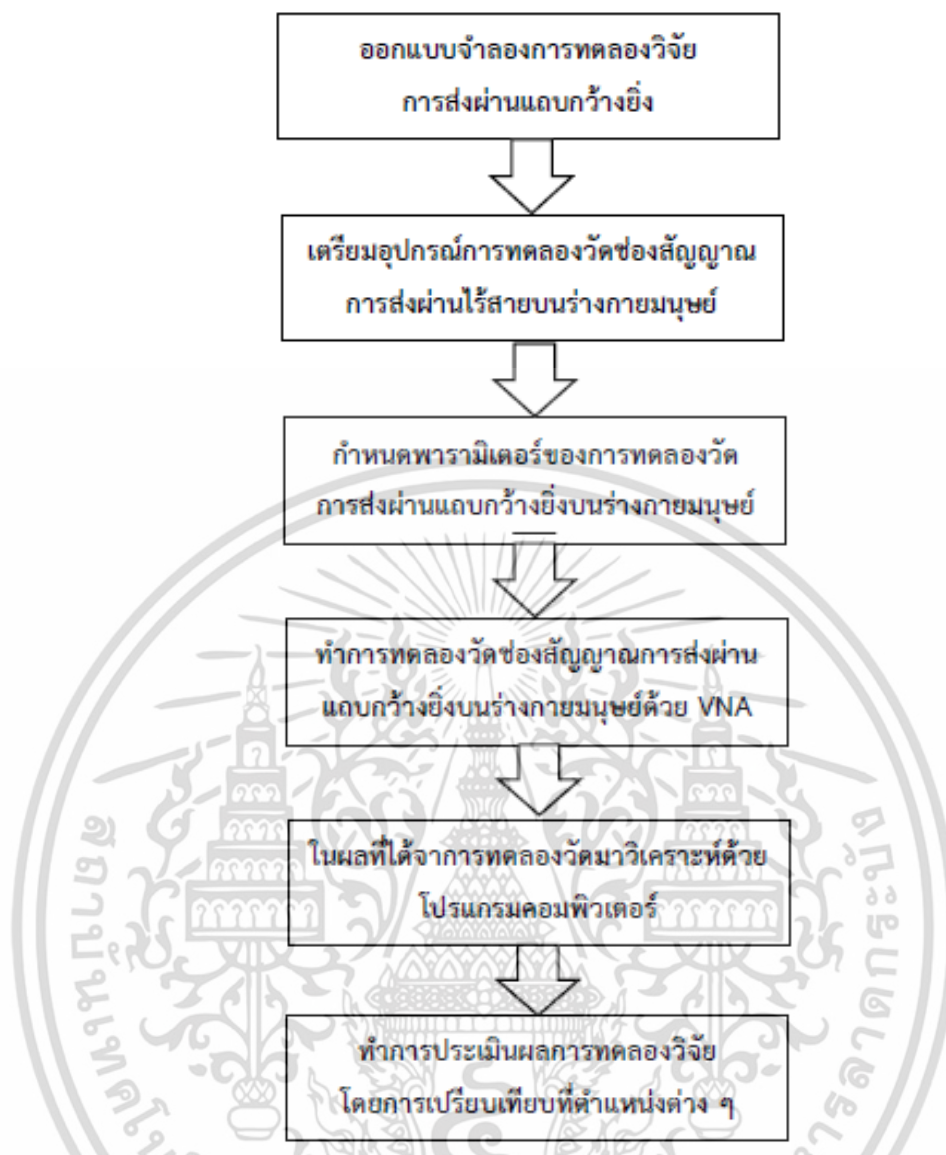
แบบแผนขบวนการและขั้นตอนในการทดลองวิจัยซึ่งเป็นการตรวจสอบผลการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สาย โดยทั่วไปจะมีการพิจารณาโดยการตรวจสอบจากการวัดโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งเป็นการตรวจสอบบนโดเมนความถี่ โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมจริง โดยได้ออกแบบจำลองการวัดเป็น 2 แบบ คือ แบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของร่างกาย และแบบจำลองการวัดที่มุมต่างๆ ของร่างกาย

### 5.2 ระบบการวัดช่องสัญญาณ

การวัดช่องสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งจะไม่เหมือนระบบแถบแคบ โดยเฉพาะพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ในระบบการวัดช่องสัญญาณนี้จะประกอบไปด้วยแบบแผนการวัด แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

#### 5.2.1 แบบแผนการวัด

ในการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งเป็นการวัดค่าของฟังก์ชันการส่งผ่านในโดเมนความถี่โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (VNA) ได้กำหนดให้ทำงานในโหมดการวัดผลตอบสนองแบบสองพอร์ต เมื่อพอร์ต 1 เป็นพอร์ตเครื่องส่ง (Tx) และพอร์ต 2 เป็นพอร์ตเครื่องรับ (Rx) สายอากาศที่ใช้ในการทดลองวัดนี้ได้ใช้สายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยว (Meander Line) ซึ่งคุณสมบัติของสายอากาศนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป และมีขั้นตอนการทดลองวิจัยดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดลองวิจัย

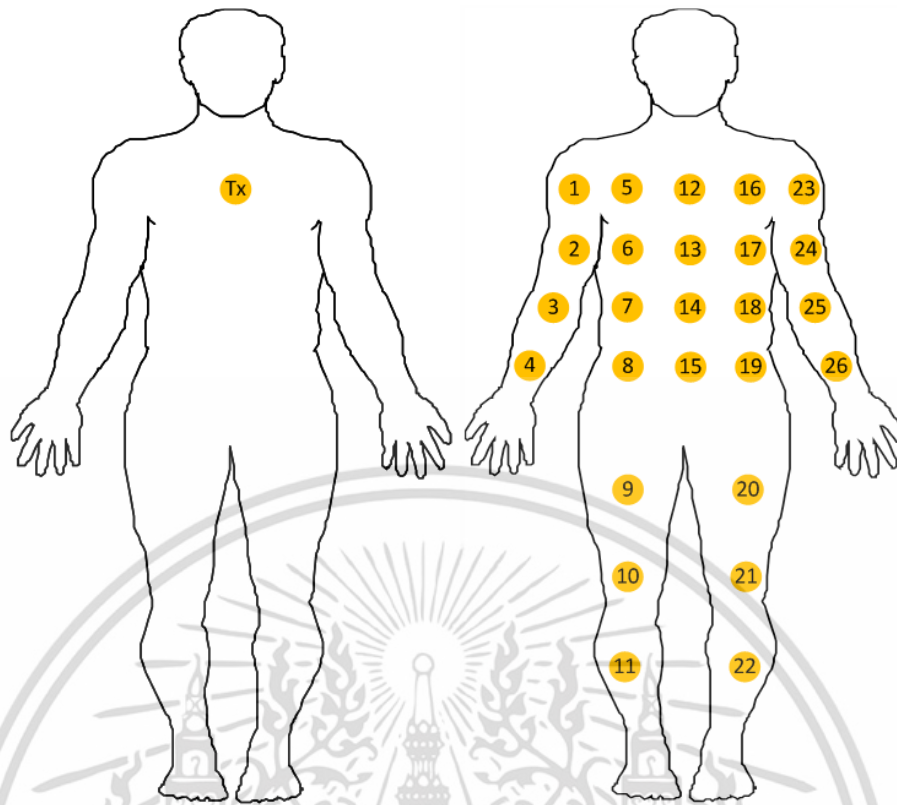
### 5.2.2 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ

ในการออกแบบวัดผลการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งแบบจำลองการวัดเป็น 2 แบบ ดังนี้

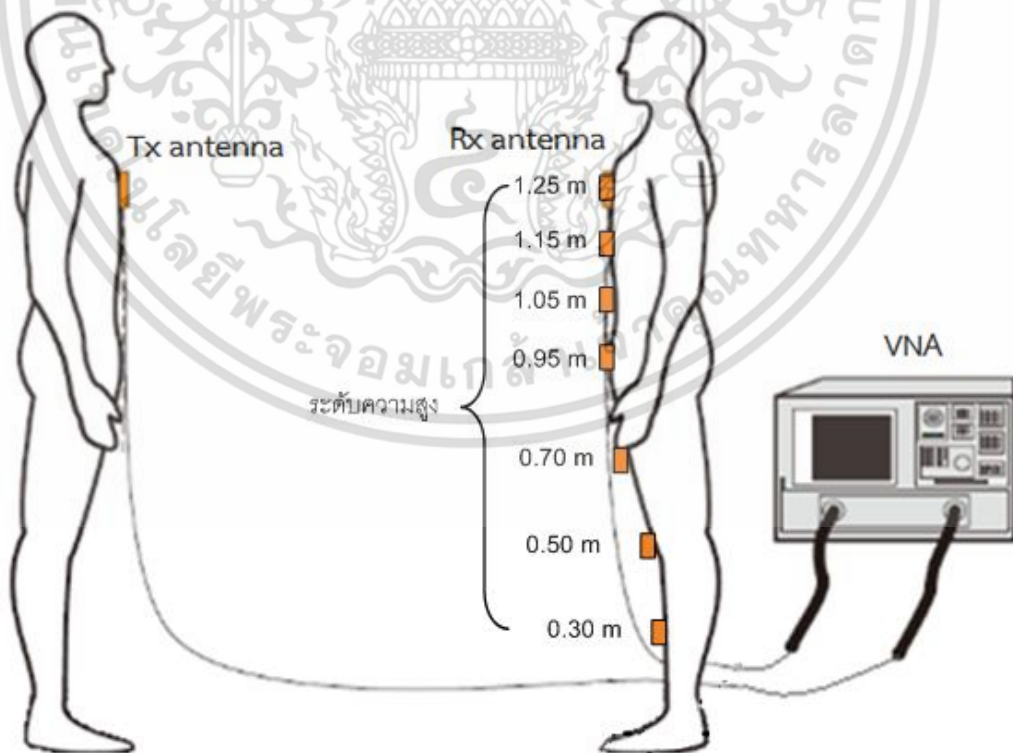
#### 5.2.2.1 แบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของร่างกาย

แบบจำลองการวัดนี้เป็นการทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่นบนร่างกายมนุษย์ในตำแหน่งต่างๆ บนร่างกายมนุษย์โดยที่สายอากาศด้านส่งยึดติดอยู่กับที่บริเวณกึ่งกลางหน้าอก ส่วนสายอากาศรับจะติดในตำแหน่งต่างๆ ของร่างกายอีกคนหนึ่ง รวมทั้งหมด 26 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งระยะห่างระหว่างตำแหน่งในส่วนแขนและลำตัวจะวางห่างกัน 10 เซนติเมตร ส่วนบริเวณขาจะวางห่างกัน 20 เซนติเมตร โดยที่ระยะระหว่างสายอากาศส่งและรับอยู่ห่างกัน 1 เมตร ส่วนการติดตั้งการวัดของแบบจำลองนี้แสดงดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



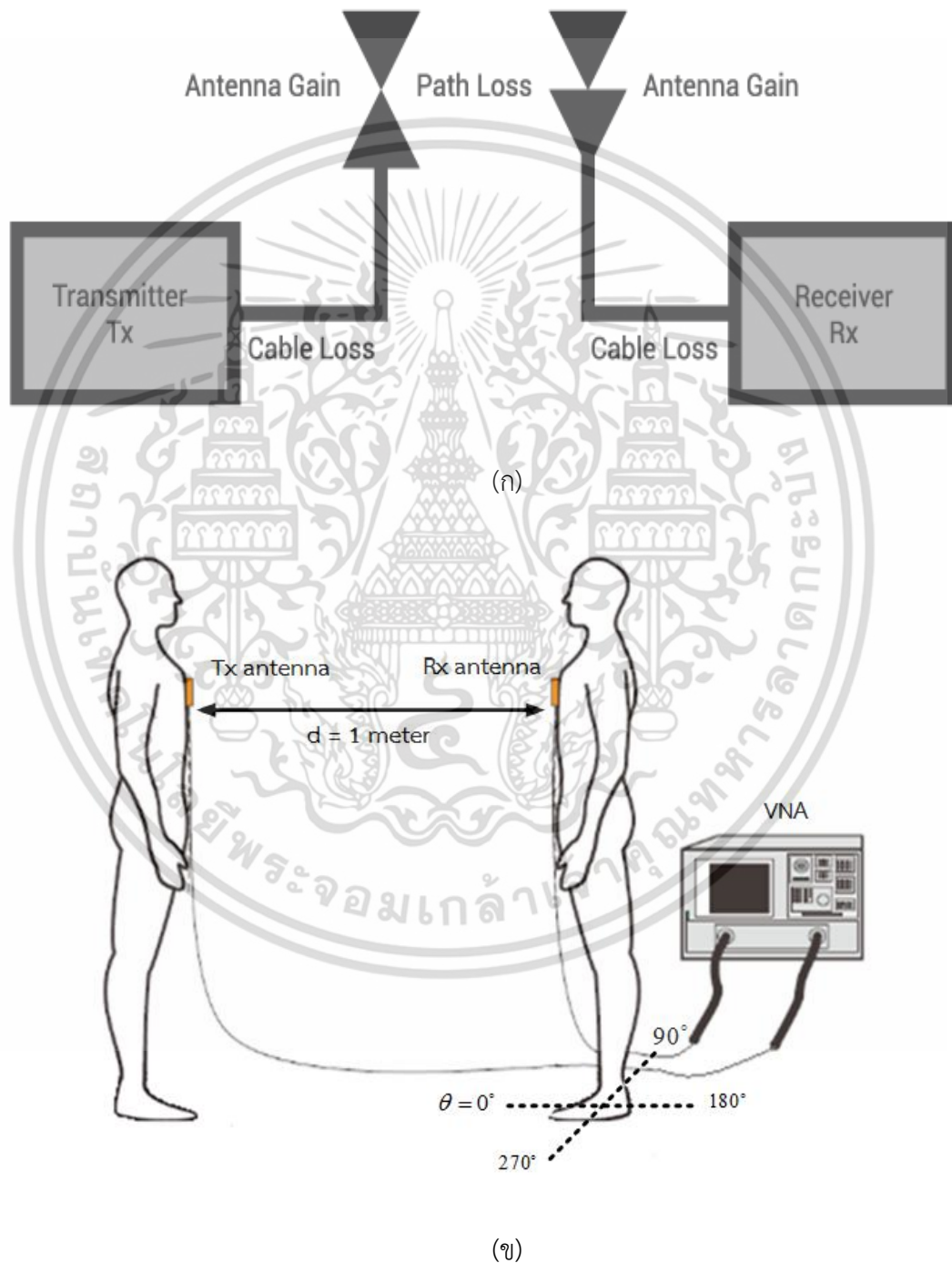
รูปที่ 5.2 การออกแบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของร่างกาย



รูปที่ 5.3 การติดตั้งการวัดช่องสัญญาณของแบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของร่างกาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2.2 แบบจำลองการวัดที่มุมต่างๆ ของร่างกาย

แบบจำลองการวัดนี้เป็นการวัดการแพร่กระจายคลื่นที่มุมต่างๆ รอบร่างกายมนุษย์ ซึ่งเปรียบเทียบกับใน 2 กรณีคือ กรณีที่ไม่มีร่างกายมนุษย์ และกรณีมีร่างกายมนุษย์ มีรูปแบบการวัด ดังรูปที่ 5.4 การติดตั้งสายอากาศจะให้สายอากาศทั้งฝั่งรับและฝั่งส่งอยู่ตำแหน่งเดียวกันสูงจากพื้น 1.25 เมตรและวางห่างกัน 1 เมตร โดยจะทำการหมุน 10 องศาต่อการวัด 1 ครั้ง การหมุนจะหมุน ตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา



รูปที่ 5.4 การติดตั้งการวัดของแบบจำลองการวัดที่มุมต่างๆ (ก) กรณีไม่มีร่างกาย (ข) กรณีมีร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด

ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ แสดงให้เห็นในตารางที่ 5.1 โดยมีช่วงความถี่เป็น 3 GHz – 11 GHz เพื่อให้ครอบคลุมช่วงความถี่ของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง จำนวนจุดความถี่ที่ใช้ในแบบจำลองการทดลองวัดนี้เป็น 801 จุดเนื่องจากเป็นความละเอียดสูงสุดของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่สามารถกำหนดได้ ลักษณะการวางสายอากาศในแนวตั้ง เนื่องจากสายอากาศที่ใช้ทั้งภาครับและภาคส่งให้แบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางในแนวระนาบเดียว

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการทดลองวัด

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	3.0 - 11.0 กิกะเฮิรต์
จำนวนจุดของความถี่	801 จุด
ความสูงของสายอากาศด้านส่ง	1.25 เมตร
ความสูงของสายอากาศด้านรับ	0.3 - 1.25 เมตร
ชนิดของสายอากาศด้านส่ง	สายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยว
ชนิดของสายอากาศด้านรับ	(meander line antenna)
การวางแนวของสายอากาศ	แนวตั้ง
ความสูงของตัวคน	168 และ 170 เซนติเมตร
น้ำหนักของตัวคน	51 และ 53 กิโลกรัม

### 5.3 เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่สำคัญสำหรับการทดลองวิจัย ได้แก่ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ และสายอากาศที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 5.3.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

ในระบบการวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งประกอบไปด้วย จอแสดงผล (Monitor) ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (S-Parameter Test Set) เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Network Analyzer) และเครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Frequency Synthesized Sweeper) ตามลำดับจากบนลงล่าง เป็นอุปกรณ์หลักในการทดลอง ซึ่งจะถูกรวมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ที่เชื่อมต่อผ่านช่องสื่อสารแบบ GPIB (General Purpose Interface Bus) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่สามารถตรวจวัดสัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ต ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการตรวจวัดแบบสองพอร์ตโดยพอร์ตที่หนึ่งคือพอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (Tx) ส่วนพอร์ตสองจะใช้ในการรับสัญญาณ (Rx) โดยที่ปลายของพอร์ตทั้งสองจะถูกต่อด้วยสายอากาศ และทำการวัดในโดเมนความถี่ก่อนที่จะถูกนำผลการวัดไปวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

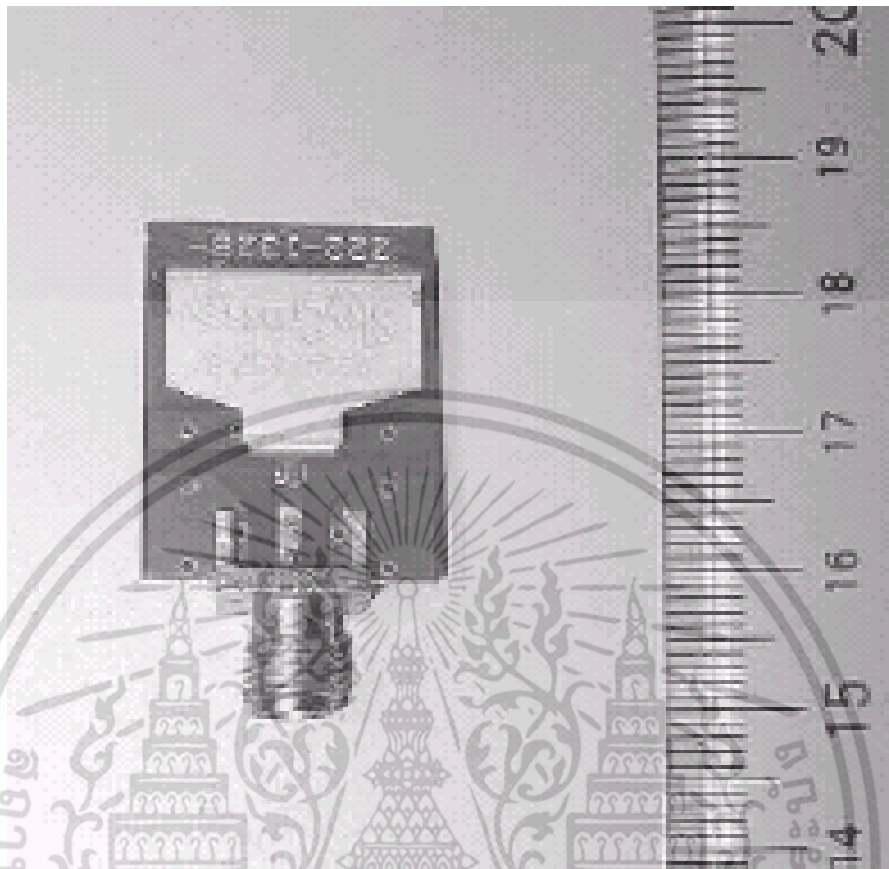


รูปที่ 5.5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (VNA)

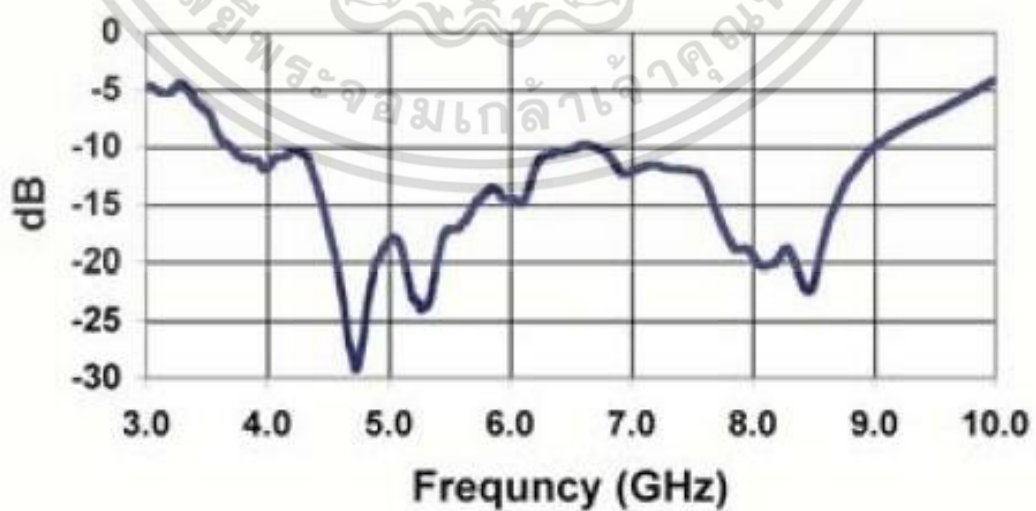
### 5.3.2 สายอากาศที่ใช้ในการทดลอง

ในการตรวจวัดช่องสัญญาณแบบไร้สายนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำคัญอีกอย่างหนึ่งซึ่งเรียกว่าสายอากาศ (Antenna) ซึ่งช่วยในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายผ่านอากาศไปยังสายอากาศทางด้านรับแล้วเปลี่ยนกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าตามเดิม โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้สายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยว (Meander Line Antenna: MLA) ทั้งด้านภาคส่งและรับ เป็นสายอากาศเชิงพาณิชย์ที่ออกแบบโดยบริษัทสกายครอส [47] ประเทศสหรัฐอเมริกา คุณสมบัติของสายอากาศเป็นสายอากาศที่ตอบสนองความถี่ได้กว้างสามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ตามข้อกำหนดย่านความถี่การใช้งานของระบบแถบกว้างยิ่งของ FCC มีขนาดของสายอากาศเล็ก เฟสมีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงความถี่ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบตัวตามแนวตั้งของสายอากาศ โดยรูปที่ 5.6 5.7 และ 5.8 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างของสายอากาศ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และอัตราขยายของสายอากาศที่มุมต่างๆ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

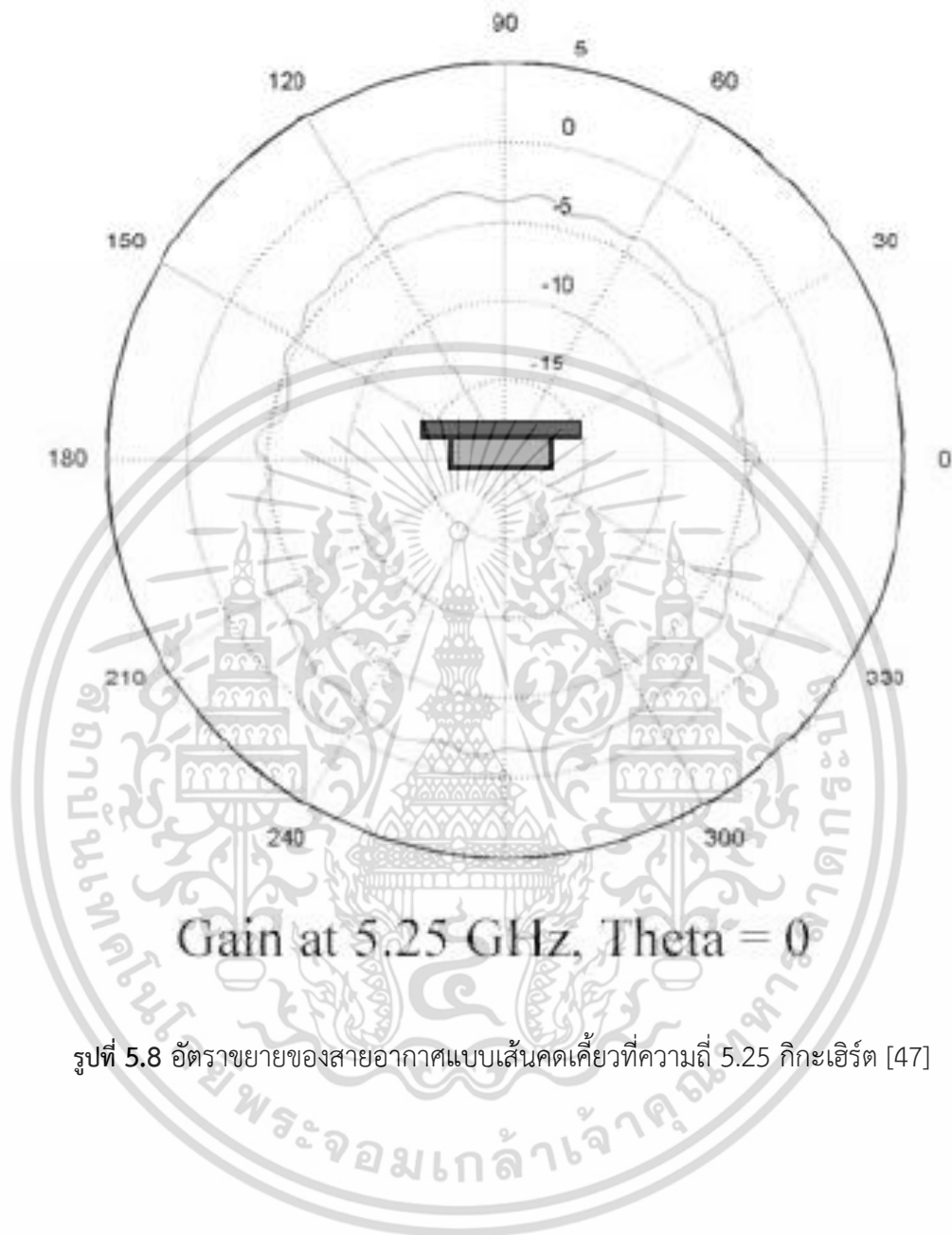


รูปที่ 5.6 โครงสร้างของสายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยว [43]



รูปที่ 5.7 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $|S_{11}|$  คุณสมบัติของสายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยว [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 อัตราขยายของสายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยวที่ความถี่ 5.25 กิโลเฮิร์ต [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4 การทดลองวัดช่องสัญญาณการส่งผ่าน B2B

การทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่ง จะทำการเก็บผลของช่องสัญญาณ 2 ส่วน คือ ผลการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของร่างกาย และผลการวัดที่มุมต่างๆ ของร่างกาย โดยลักษณะการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 5.9 ตำแหน่งการวัดและลักษณะการวัดของแบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ

(ก) ตำแหน่งของสายอากาศรับ

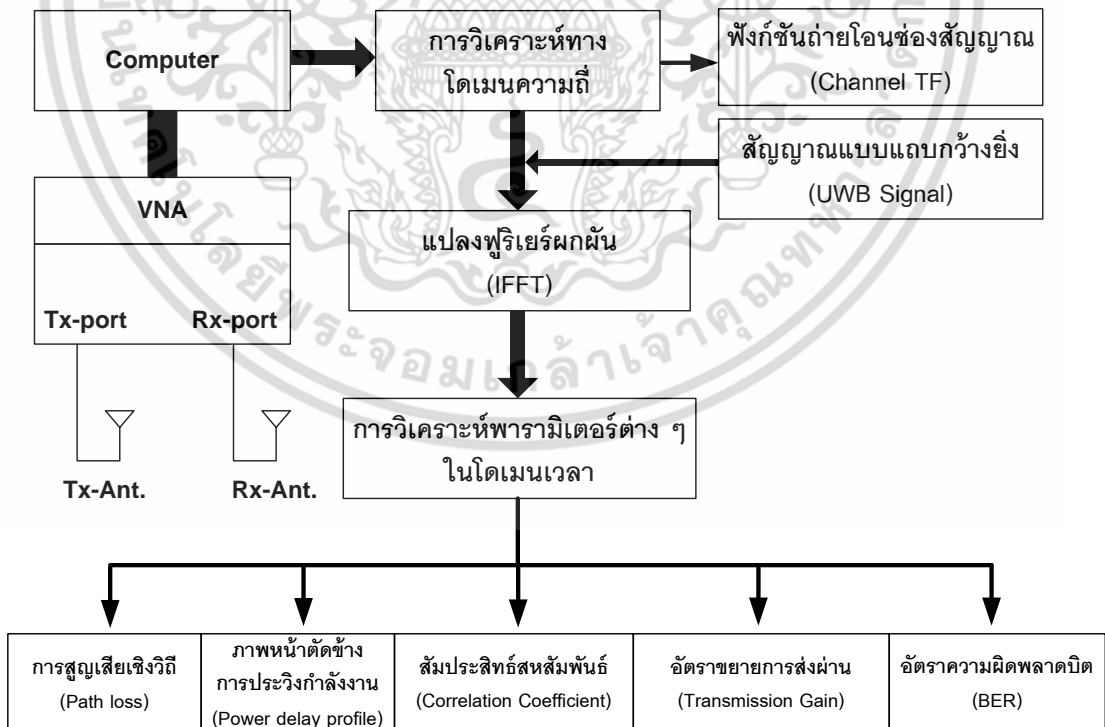
(ข) ตำแหน่งของสายอากาศส่ง

(ค) ลักษณะการวัดช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ลักษณะการวัดช่องสัญญาณแบบจำลองการวัดเชิงมุมต่าง ๆ



รูปที่ 5.11 บล็อกไดอะแกรมของแบบแผนการวิจัยสำหรับการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งบนร่างกายมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการวัดที่ได้กล่าวในข้างต้นเป็นการตรวจสอบถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณภายใต้สภาวะที่กำหนดขึ้น โดยในการทดลองนี้ต้องการที่จะตรวจสอบถึงผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งสิ่งที่ได้จากการทดลองนั้นคือฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่รวมผลของสายอากาศเข้าไปด้วย จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ทราบถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ซึ่งการจัดเก็บและประมวลผลการทดลองรวมทั้งพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลแสดงดังรูปที่ 5.11

## 5.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงแบบแผนการทดลองวิจัยในการวัดช่องสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งบนร่างกายมนุษย์โดยใช้สายอากาศที่ตอบสนองช่วงความถี่แถบกว้างประกอบกับการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัดบนโดเมนความถี่เพื่อตรวจสอบถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อช่องสัญญาณการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณมีด้วยกัน 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของร่างกายมนุษย์ และแบบจำลองการวัดที่มุมต่างๆ ของร่างกายมนุษย์ โดยข้อมูลการวัดที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์และแสดงผลด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในบทถัดไป

## บทที่ 6

# ผลการทดลองวิจัยและการอภิปราย

### 6.1 กล่าวนำ

บทนี้ได้กล่าวถึงผลที่ได้จากการทดลองวิจัยโดยใช้ข้อมูลจากการวัด และออกแบบจำลองช่องสัญญาณการส่งผ่านรูปคลื่นจากแบบจำลองการวิจัยทั้ง 2 แบบที่กล่าวถึงไว้ในบทที่ 5 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองวัดจะนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติลักษณะของช่องสัญญาณหรือผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อช่องสัญญาณจากการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งประกอบด้วย ขนาด เฟส และเวลาประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณ การสูญเสียเชิงวิถิ ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสหมัมพันธ์ สัมประสิทธิ์สหมัมพันธ์ อัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง และอัตราความผิดพลาดบิต ในแบบจำลองที่ 1 ได้ทำการเปรียบเทียบกันในแต่ละตำแหน่งบนร่างกาย สำหรับแบบจำลองที่ 2 จะเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีที่มีผลและไม่มีผลจากร่างกายมนุษย์

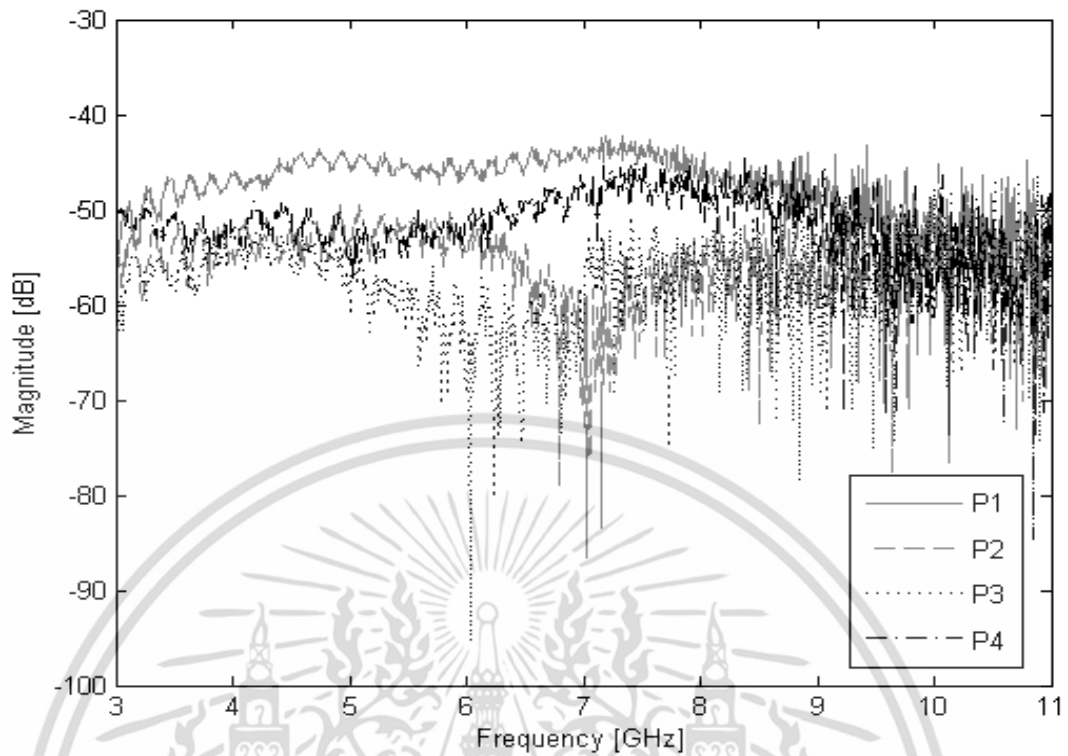
### 6.2 ผลการทดลองวิจัยของแบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ในการทดลองวัดแบบจำลองได้กำหนดให้สายอากาศทางด้านส่งยึดติดอยู่กับที่ในบริเวณหน้าอกของมนุษย์ ส่วนสายอากาศทางด้านรับเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่างๆ ของร่างกายตามแบบจำลอง รวมทั้งหมด 26 ตำแหน่ง ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และแสดงผลไว้ดังต่อไปนี้

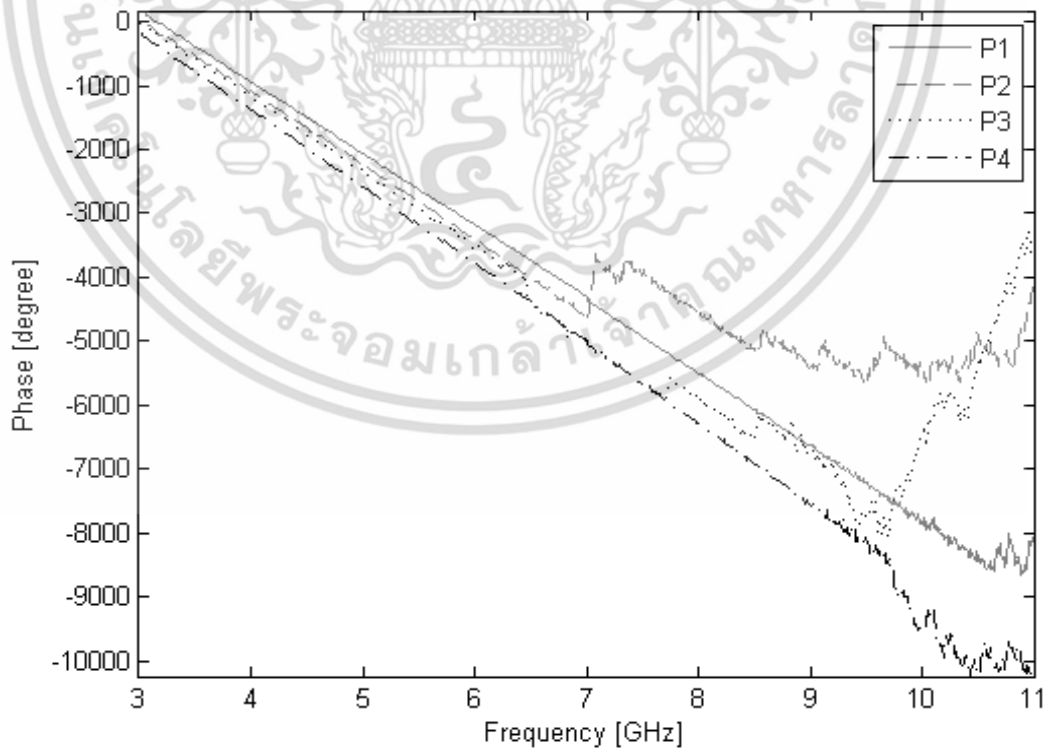
#### 6.2.1 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ

จากการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองที่ 1 ผลของขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณจะเปรียบเทียบกับตามระยะความสูงของตำแหน่งที่วัดในแนวเดียวกัน ทั้งหมด 5 แนวคือ แขนขวา ลำตัวและขาทางด้านขวาของร่างกาย ลำตัวส่วนกลางร่างกาย ลำตัวและขาทางด้านซ้ายของร่างกาย และแขนซ้าย แสดงดังรูปที่ 6.1 ถึงรูปที่ 6.10

เมื่อพิจารณาจากขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณตามแนวแขนขวาของร่างกายดังรูปที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าระดับสัญญาณส่วนใหญ่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ยกเว้นตำแหน่ง 4 ซึ่งเป็นตำแหน่งของข้อมื้อมีผลกระทบของช่องสัญญาณตามระยะทางน้อยหรือมีระดับของสัญญาณการถ่ายโอนที่สูง เช่นเดียวกับลักษณะของเฟส ดังรูปที่ 6.2 ซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นมากกว่าตำแหน่งอื่น จะเห็นว่าที่ช่วงความถี่ปลายขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนจะเกิดเฟดดิ้งมาก ไม่สามารถมองเห็นระดับในแต่ละกรณีได้ เนื่องจากเป็นคุณลักษณะทางความถี่ของสายอากาศ ฉะนั้นที่บริเวณต่อไปจะแสดงให้เห็นเฉพาะช่วงความถี่ 3-8 GHz เพื่อความชัดเจนในการมองเห็นของขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอน

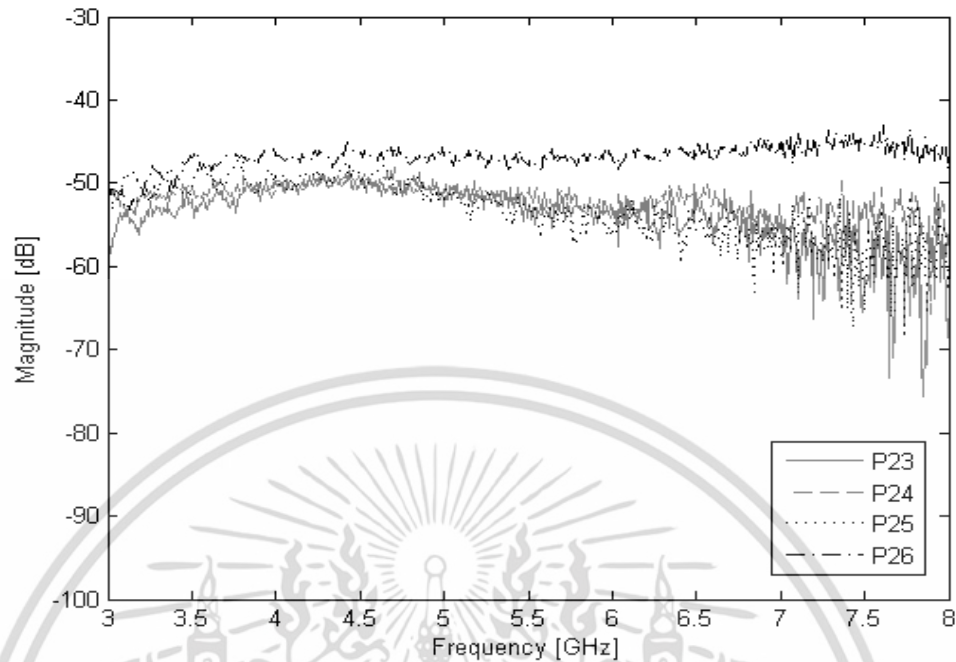


รูปที่ 6.1 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่แขนขวา

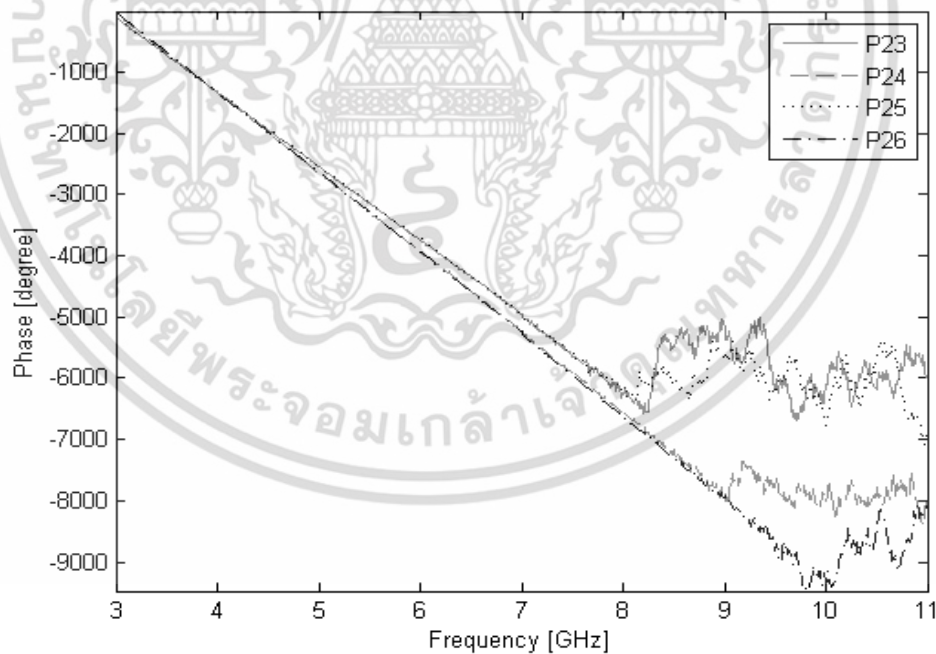


รูปที่ 6.2 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่แขนขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

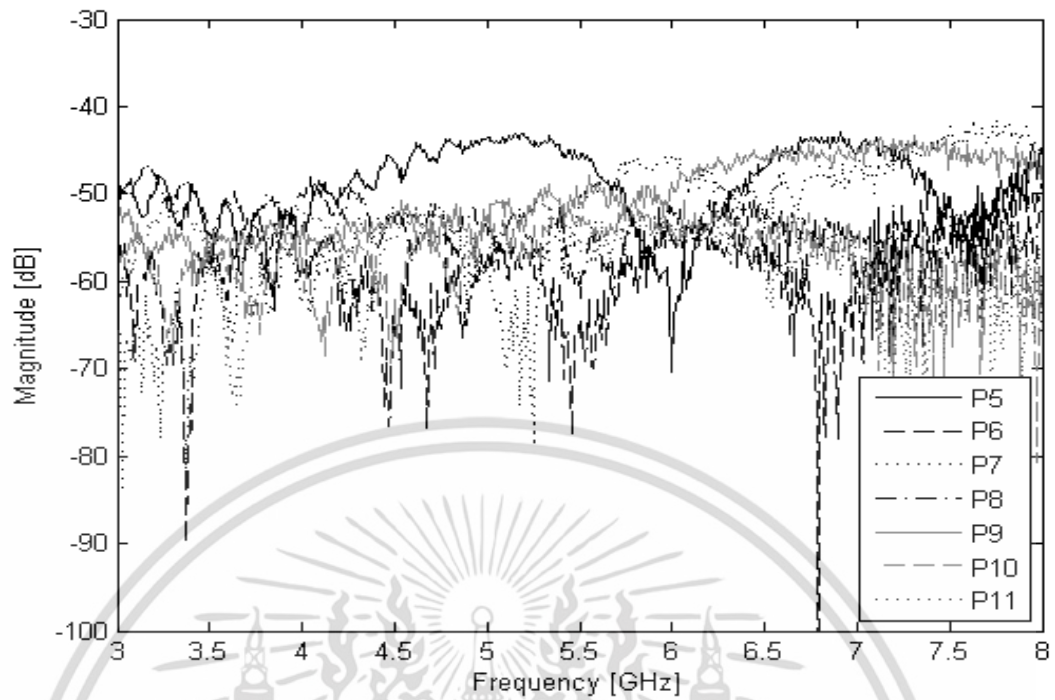


รูปที่ 6.3 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่แขนซ้าย

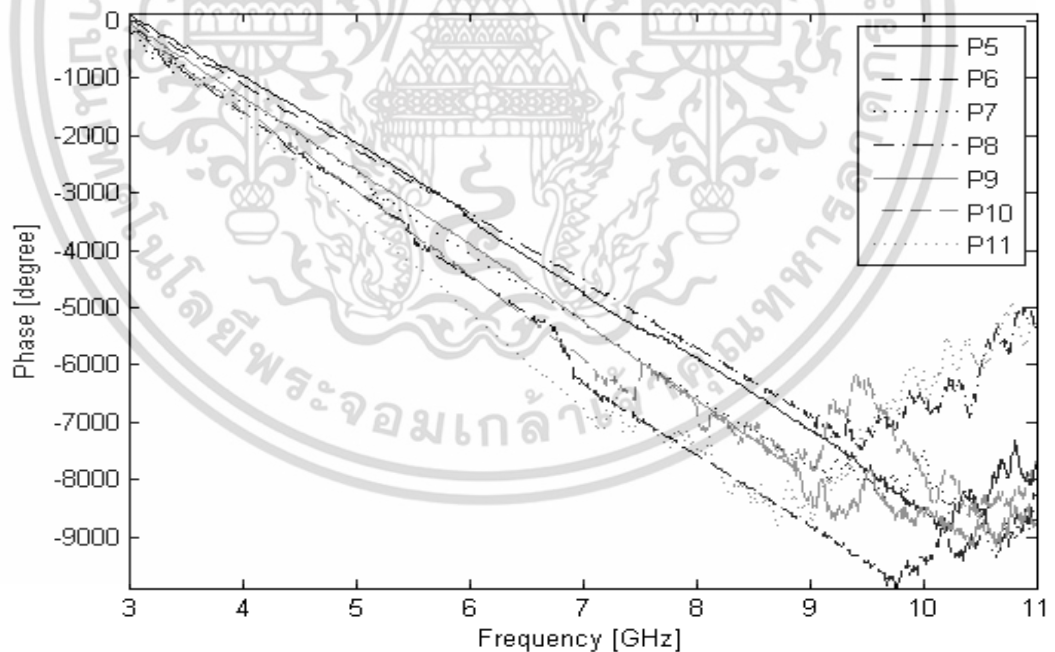


รูปที่ 6.4 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่แขนซ้าย

จากรูปที่ 6.3 และ 6.4 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ตำแหน่ง 26 หรือข้อมือมีระดับสัญญาณสูงที่สุด และมีเฟสเป็นเชิงเส้นมากที่สุด ส่วนที่ตำแหน่ง 23 หรือแขนด้านบนมีระดับสัญญาณน้อยที่สุด ส่วนเฟสจะมีความเป็นเชิงเส้นเกือบตลอดความถี่ที่ได้ทำการทดลอง ยกเว้นในช่วงความถี่สูงเท่านั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



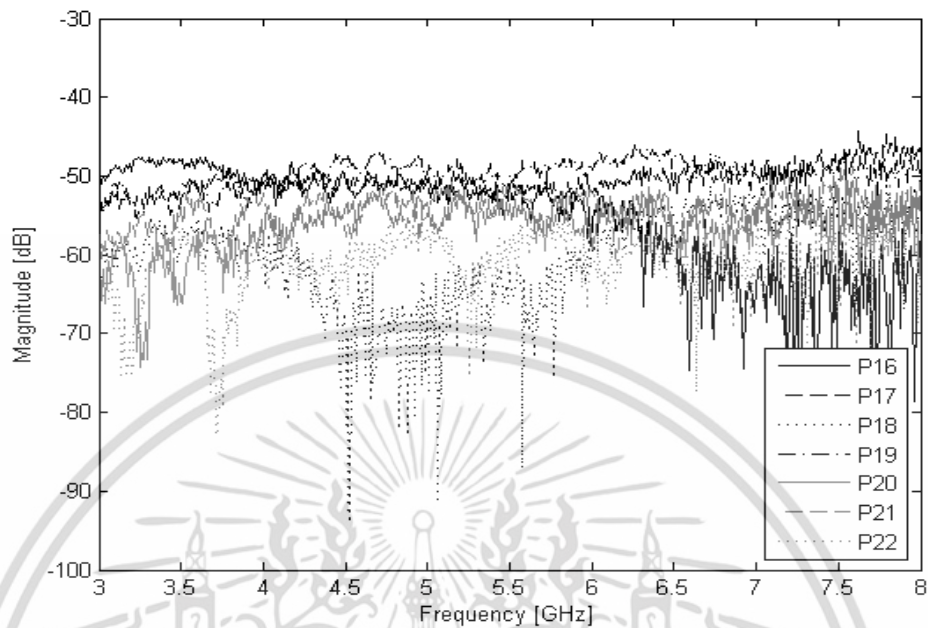
รูปที่ 6.5 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวและขาด้านขวา



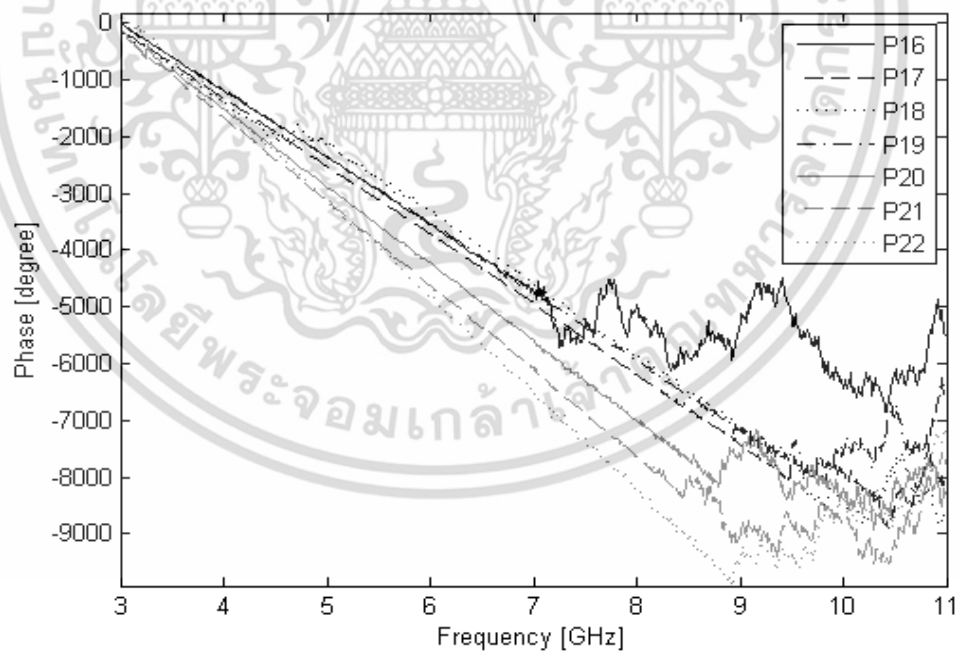
รูปที่ 6.6 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวและขาด้านขวา

จากรูปที่ 6.5 จะเห็นว่าส่วนใหญ่ระดับสัญญาณมีการแกว่งมากตามความถี่โดยเฉพาะในตำแหน่ง 7 ส่วนในบริเวณขาที่ตำแหน่ง 9-11 จะมีระดับสัญญาณต่ำกว่าบริเวณลำตัว เช่นเดียวกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟสในตำแหน่ง 6 และ 7 มีความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่าตำแหน่งอื่นๆ ตลอดช่วงความถี่ โดยที่ความถี่สูงของทุกตำแหน่งเกิดผลกระทบของช่องสัญญาณสูง



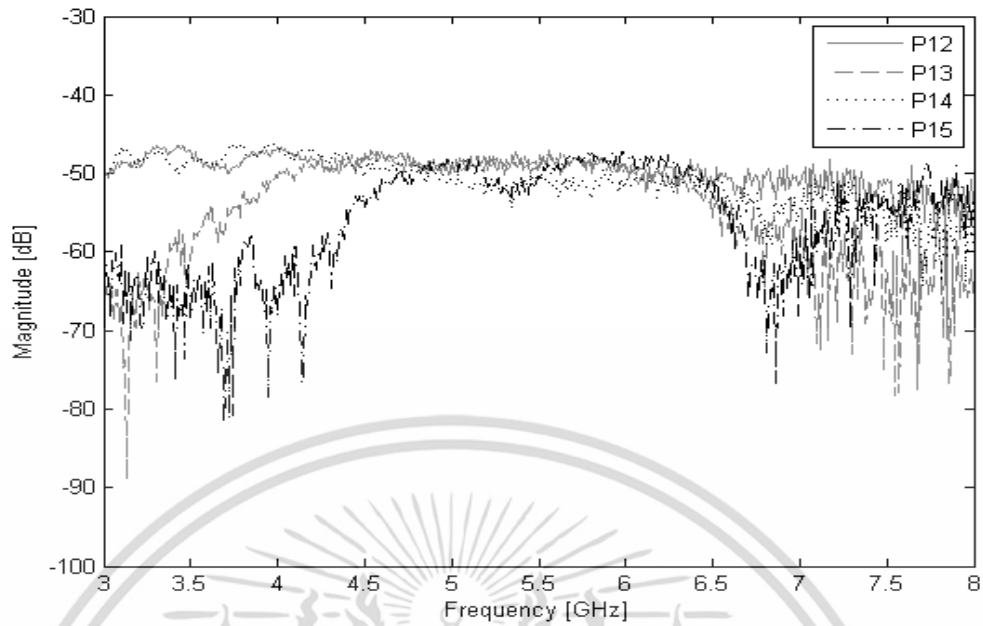
รูปที่ 6.7 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวและขาด้านซ้าย



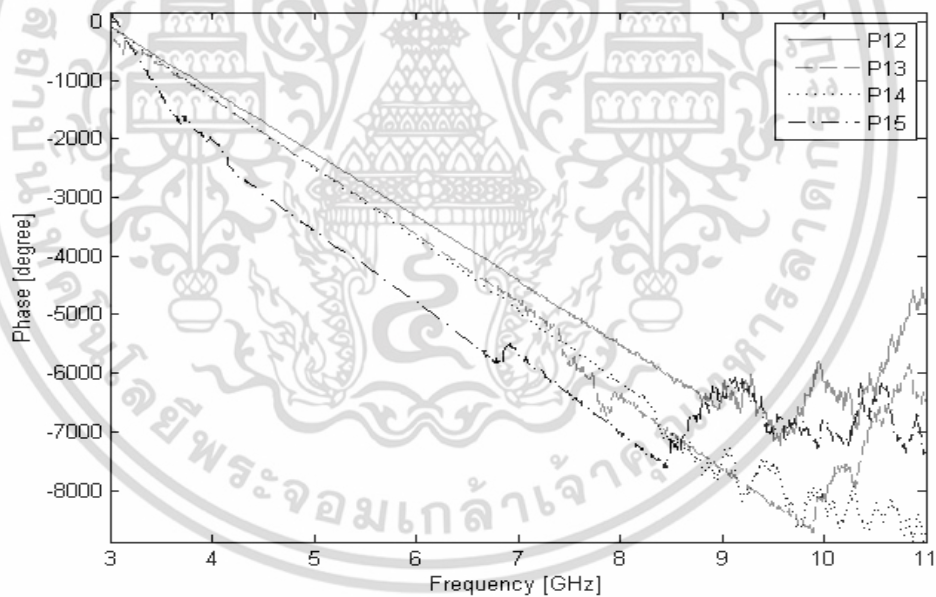
รูปที่ 6.8 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวและขาด้านซ้าย

จากรูปที่ 6.7 และ 6.8 สังเกตเห็นว่าตำแหน่ง 16 และ 18 มีระดับสัญญาณต่ำในช่วงความถี่ 6.5-8.5 GHz และ 4.5-5.5 GHz ตามลำดับ เช่นเดียวกับเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนที่เกิดผลกระทบในช่วงความถี่ดังกล่าว ทำให้เฟสไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความถี่นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวตรงกลาง

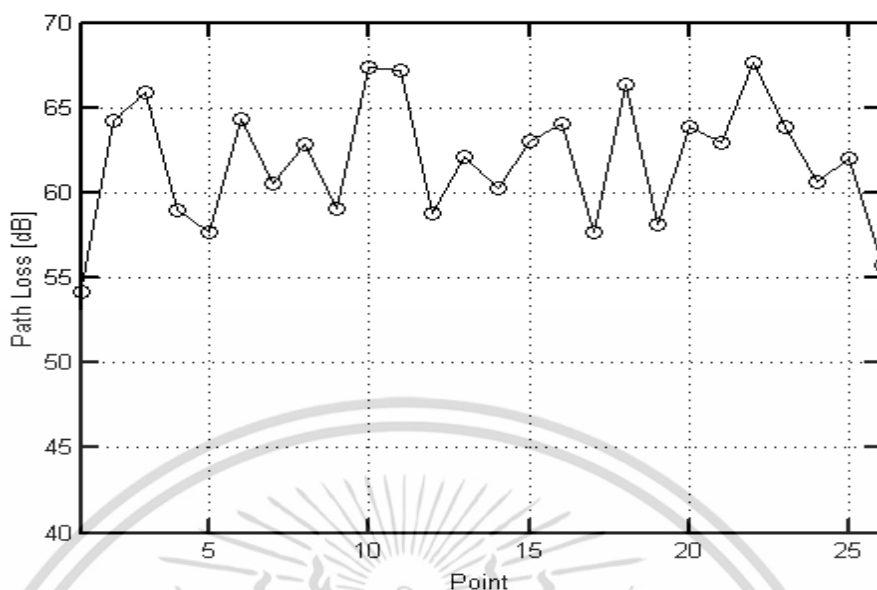


รูปที่ 6.10 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ลำตัวตรงกลาง

เมื่อพิจารณาขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง 12 หรือตรงกลางหน้าอกมีการแกว่งของระดับสัญญาณน้อยที่สุดและมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด ส่วนในตำแหน่งอื่นจะสังเกตเห็นว่าที่ตำแหน่ง 13 และ 15 มีระดับของสัญญาณที่ต่ำในช่วงความถี่ 3-4 GHz และมีระดับของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ 4.5-6 GHz และเมื่อพิจารณาเฟสจะเห็นได้ชัดเจนว่าในตำแหน่ง 15 มีผลกระทบต่อช่องสัญญาณมากในช่วงความถี่ดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2.2 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ



รูปที่ 6.11 การสูญเสียเชิงวิถีของแบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ

จากรูปที่ 6.11 แสดงการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ ของร่างกาย ซึ่งตำแหน่งที่มีการสูญเสียเชิงวิถีมากที่สุดจะอยู่ที่ข้อเท้าคือเท่ากับ 67.63 dB และน้อยที่สุดอยู่ที่ หัวไหล่ด้านขวา คือ 54.15 dB ดังตารางที่ 6.1 เมื่อเปรียบเทียบแต่ละส่วนของร่างกายจะพบว่าแนวโน้มของค่าการสูญเสียเชิงวิถีในบริเวณแขนจะมีค่าลดลงตามระยะทาง ส่วนบริเวณขาจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีเพิ่มขึ้นตามระยะทาง ส่วนในบริเวณลำตัวจะขึ้นอยู่กับลักษณะจำเพาะที่ตำแหน่งนั้นๆ

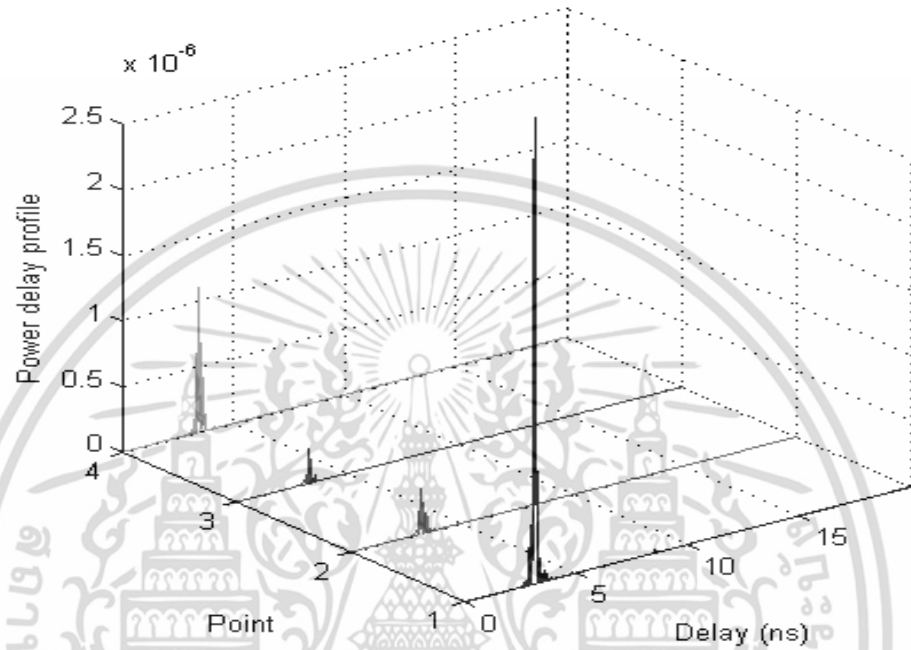
ตารางที่ 6.1 ค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ตำแหน่งต่างๆ บนร่างกาย

ตำแหน่ง	การสูญเสียเชิงวิถี (dB)	ตำแหน่ง	การสูญเสียเชิงวิถี (dB)
1	54.1464	14	60.3031
2	64.2648	15	63.0020
3	65.8851	16	64.0665
4	58.9318	17	57.7124
5	57.6386	18	66.3333
6	64.3548	19	58.1677
7	60.5746	20	63.8345
8	62.8201	21	62.9176
9	59.0327	22	67.6303
10	67.3450	23	63.8458
11	67.1878	24	60.6000
12	58.7595	25	61.9788
13	62.0989	26	55.7403

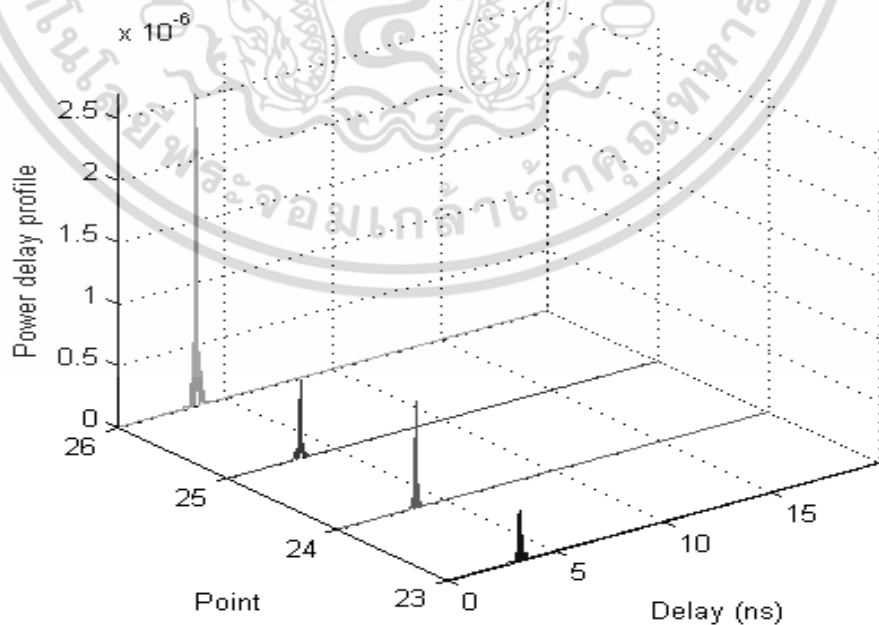
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

ในการแสดงผลภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟ 3 แกนคือ เวลาที่ใช้ในการเดินทาง ระยะห่างของสายอากาศรับส่ง และระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ โดยในที่นี้จะแสดงเปรียบเทียบกันที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวเดียวกัน ดังรูปที่ 6.12 ถึงรูปที่ 6.16 และแสดงค่าระดับกำลังงานและเวลาการประวิงดังตารางที่ 6.2



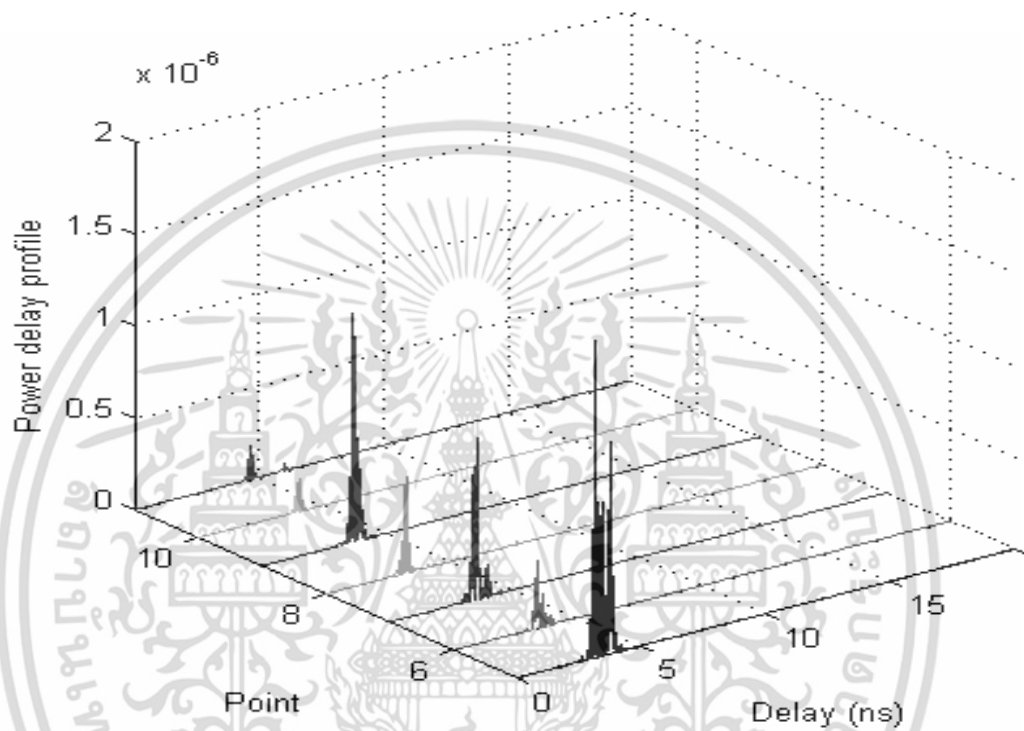
รูปที่ 6.12 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่แขนขวา



รูปที่ 6.13 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่แขนซ้าย

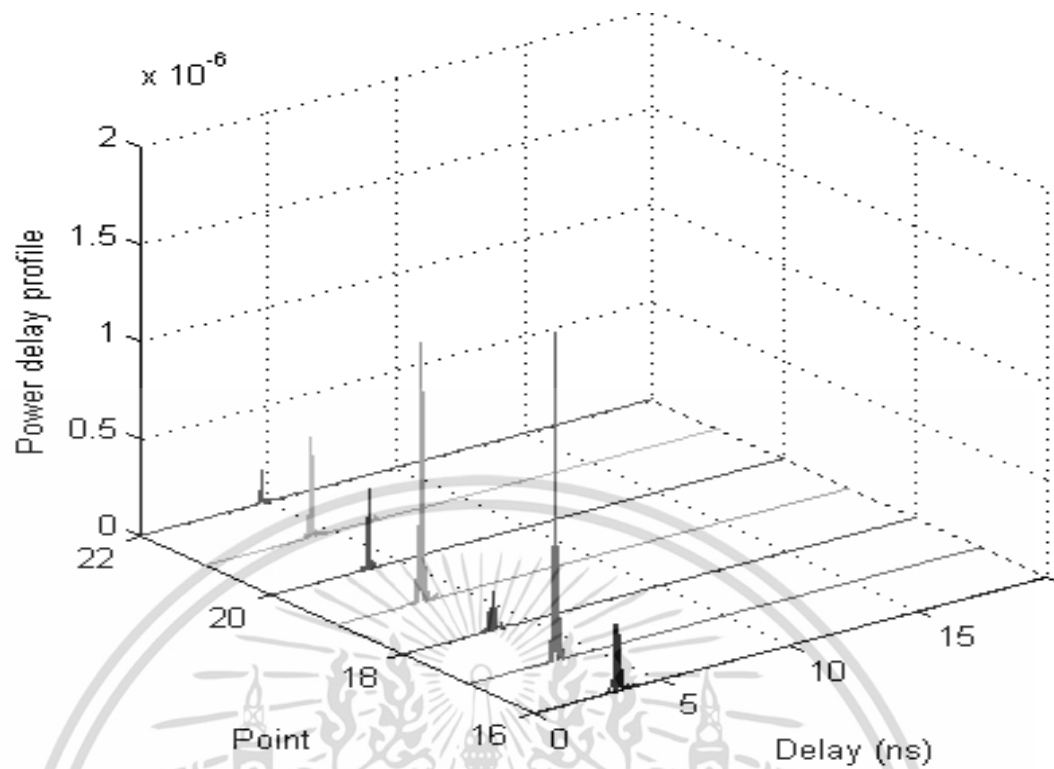
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.12 และ 6.13 ซึ่งเป็นภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่แขนขวาและแขนซ้าย ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่แขนขวาดำแหน่งหัวไหล่มีระดับกำลังงานสูงสุดอยู่ที่  $3.90 \mu\text{W}$  รองลงมาคือตำแหน่งข้อมือ และที่แขนซ้ายตำแหน่งข้อมือจะมีระดับกำลังงานที่รับได้สูงที่สุดอยู่ที่  $2.68 \mu\text{W}$  และต่ำสุดที่หัวไหล่อยู่ที่  $0.41 \mu\text{W}$  โดยมีช่วงการประวิงเวลาอยู่ที่ 3.15-3.67 ns

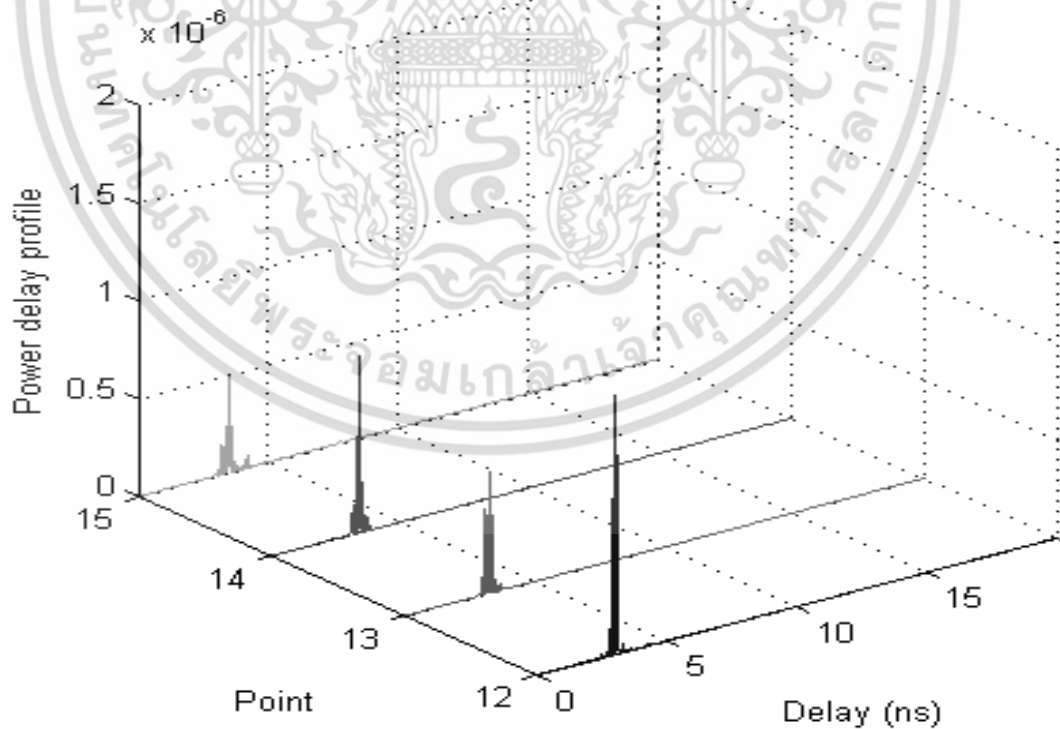


รูปที่ 6.14 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่ลำตัวและทางด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.15 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่ลำตัวและขาด้วนซ้าย



รูปที่ 6.16 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่ลำตัวตรงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

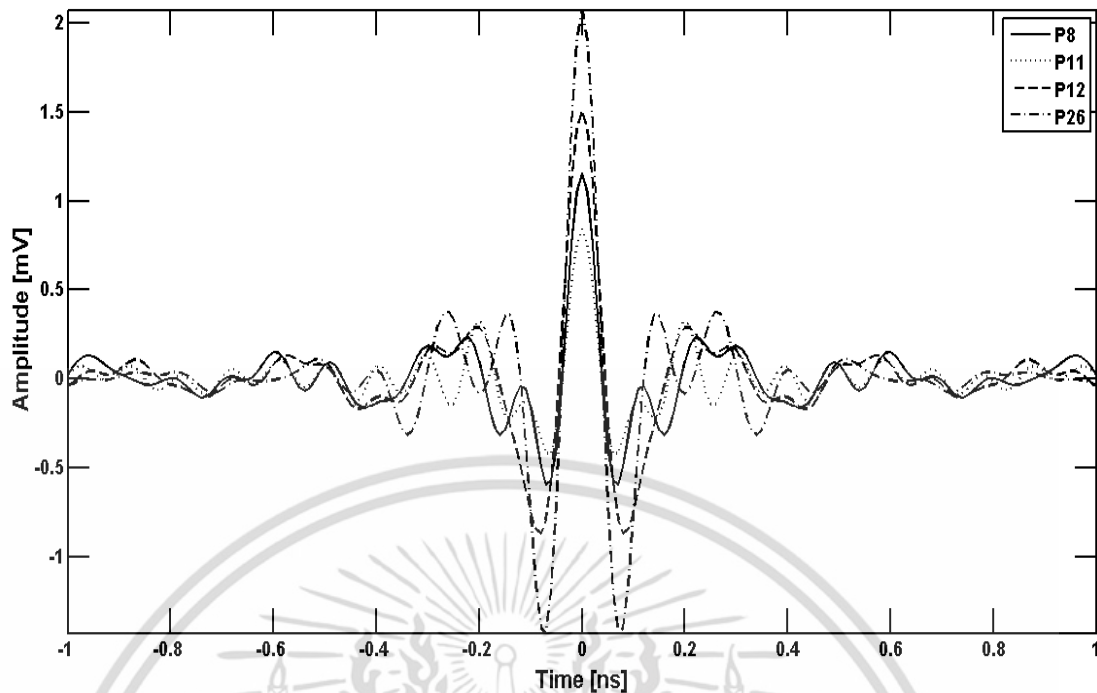
เมื่อพิจารณารูปที่ 6.14 6.15 และ 6.16 ซึ่งเป็นภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่ลำตัว และขาด้านขวา ลำตัวและขาด้านซ้าย และแนวกลางของลำตัว ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในบริเวณ ลำตัวมีระดับกำลังงานเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่างๆ โดยตำแหน่งที่มีระดับกำลังงานต่ำที่สุดคือ 5 อยู่ที่  $0.18 \mu\text{W}$  เวลาการประวิงอยู่ที่  $3.17 \text{ ns}$  ส่วนในบริเวณขาจะมีระดับกำลังงานที่รับได้ต่ำลงเมื่อ ระยะทางเพิ่มขึ้น โดยมีระดับกำลังต่ำสุดที่ข้อเท้าข้างซ้ายอยู่ที่  $0.17 \mu\text{W}$  และมีการประวิงเวลาใน ตำแหน่งดังกล่าวที่  $4.74 \text{ ns}$

ตารางที่ 6.2 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ

ตำแหน่ง	ระดับกำลังงาน ที่รับ ( $10^{-7} \text{ W}$ )	การประวิง เวลา (ns)	ตำแหน่ง	ระดับกำลังงาน ที่รับ ( $10^{-7} \text{ W}$ )	การประวิง เวลา (ns)
1	38.96	3.15	14	9.44	3.38
2	3.79	3.15	15	5.13	3.47
3	2.53	3.30	16	3.90	3.21
4	12.81	3.43	17	16.93	3.40
5	1.77	3.17	18	2.27	3.53
6	3.57	3.38	19	15.25	3.31
7	8.76	3.52	20	4.14	3.80
8	5.27	3.23	21	5.26	4.15
9	12.97	3.65	22	1.73	4.74
10	1.89	4.06	23	4.14	3.31
11	1.93	4.69	24	8.84	3.65
12	13.31	3.04	25	6.34	3.40
13	6.17	3.36	26	26.76	3.67

#### 6.2.4 รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสัมพันธ์

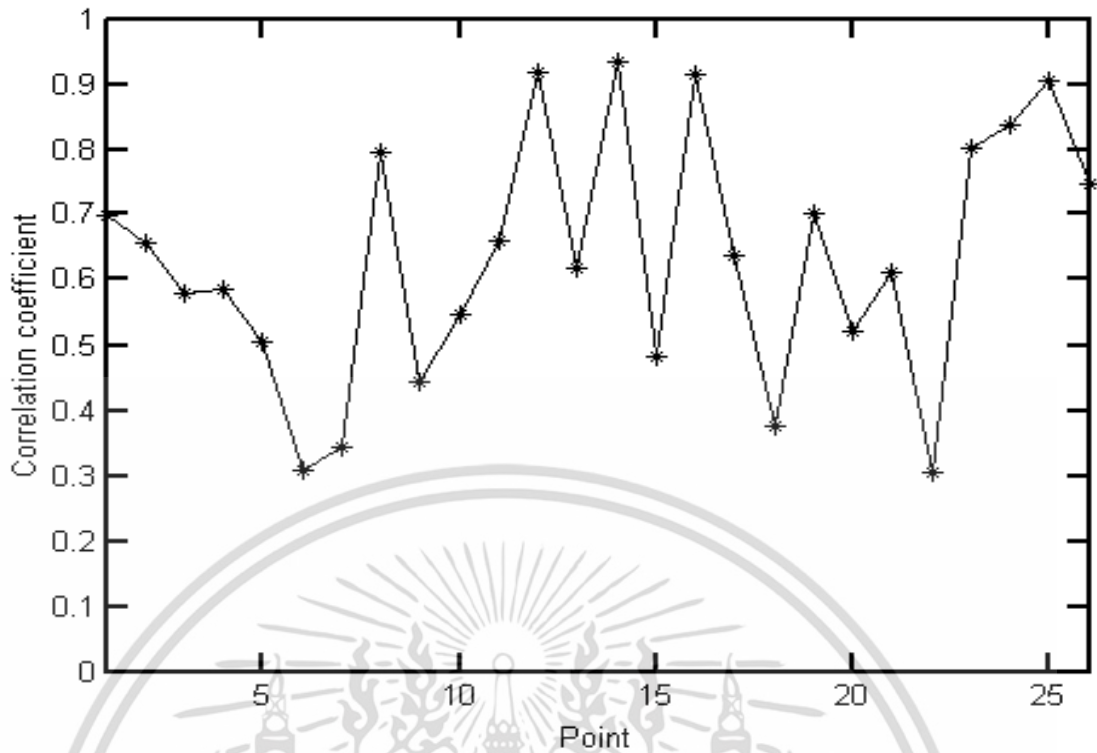
การเปรียบเทียบรูปคลื่นในที่นี้จะเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นที่ตำแหน่ง 4 ตำแหน่งคือ ตรงกลางหน้าอก เหวด้านขวา ข้อมือด้านซ้าย และข้อเท้า พบว่าระดับของสัญญาณที่รับได้ในตำแหน่ง ข้อมือ (P26) จะสูงที่สุด รองลงมาคือ หน้าอก (P12) เหว (P8) และ ข้อเท้า (P11) รวมทั้งเกิดความ ผิดเพี้ยนของรูปคลื่นที่แตกต่างกันไปในแต่ละตำแหน่ง ดังรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 สัญญาณรูปคลื่นที่รับโดยใช้เครื่องรับสหสัมพันธ์

#### 6.2.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระบบแถบกว้างยิ่ง

การเปรียบเทียบรูปคลื่นที่รับได้ในหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นว่ารูปคลื่นเกิดความผิดเพี้ยนแตกต่างกันทุกรูปคลื่น ซึ่งเกิดจากการส่งผ่านรูปคลื่นส่งไปในช่องสัญญาณที่ต่างกัน ทำให้รูปคลื่นที่รับได้นั้นผิดเพี้ยนไปจากเดิม ในหัวข้อนี้จะบอกถึงปริมาณความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นที่เกิดขึ้น สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากการวัดช่องสัญญาณสามารถบอกถึงความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นที่รับได้ ปริมาณความผิดเพี้ยนจะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 เมื่อมีค่าเป็น 1 นั้นหมายถึงรูปคลื่นที่รับได้ไม่ได้เกิดความผิดเพี้ยนขึ้นเลย ดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบกว้างยิ่ง

จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นั้นอยู่ในช่วง 0.31 ถึง 0.93 ซึ่งจะลดลงเมื่อเกิดการสูญเสียเชิงวิถีสูงขึ้น และสามารถแสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแถบกว้างยิ่ง

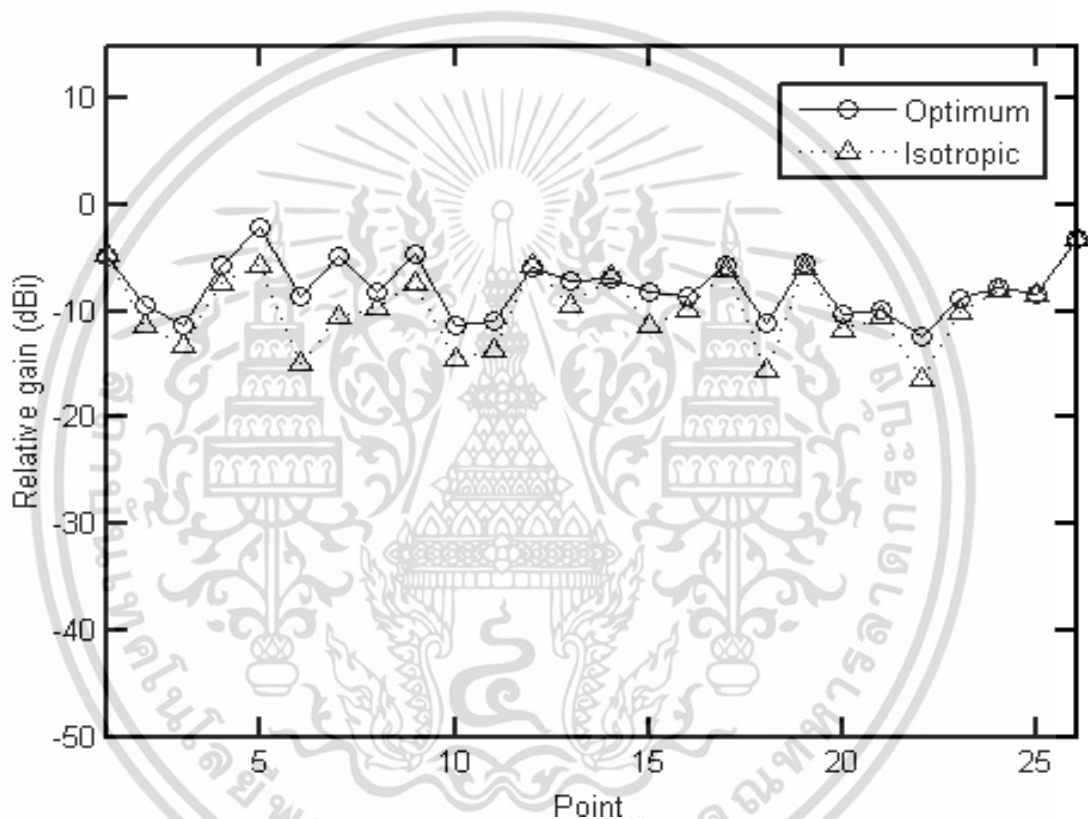
ตำแหน่ง	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (%)	ตำแหน่ง	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (%)
1	0.6992	30.08	14	0.9328	6.72
2	0.6558	34.42	15	0.4836	51.64
3	0.5776	42.24	16	0.9142	8.58
4	0.5846	41.54	17	0.6379	36.21
5	0.5036	49.64	18	0.3763	62.37
6	0.3085	69.15	19	0.7012	29.88
7	0.3435	65.65	20	0.5194	48.06
8	0.7943	20.57	21	0.6102	38.98
9	0.4441	55.59	22	0.3056	69.44
10	0.5467	45.33	23	0.8014	19.86
11	0.6590	34.10	24	0.8370	16.3
12	0.9186	8.14	25	0.9055	9.45
13	0.6163	38.37	26	0.7469	25.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.6 อัตราขยายของสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง

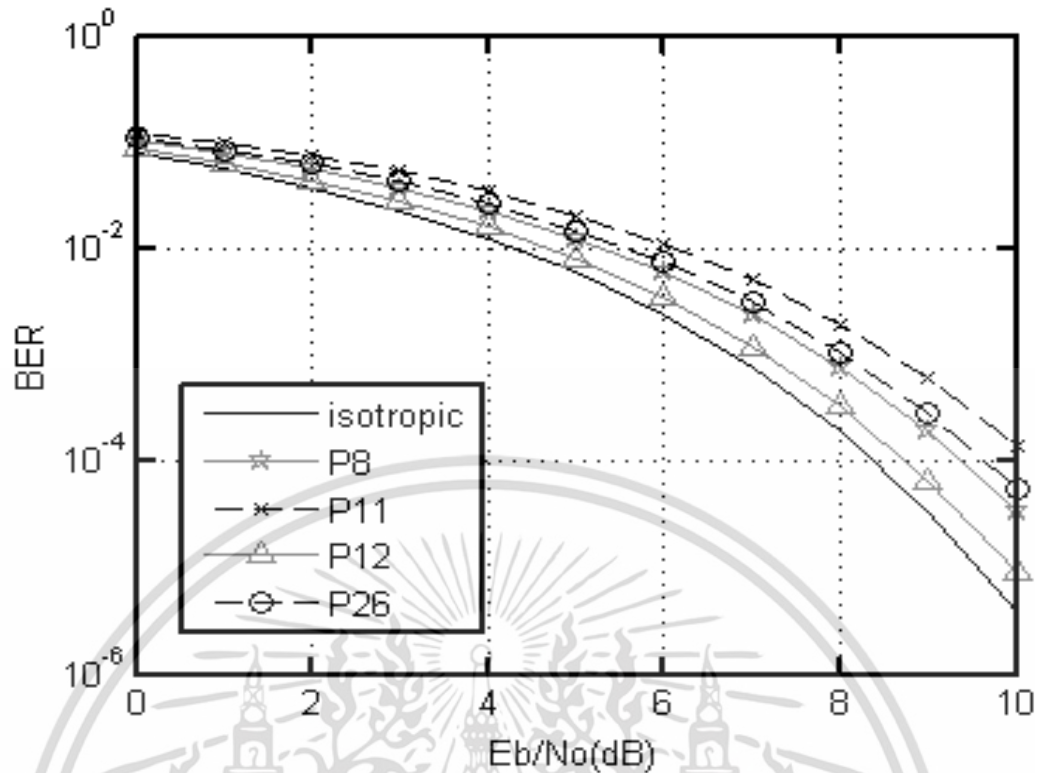
ความแตกต่างระหว่างอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ใช้การสหสัมพันธ์ด้วยสัญญาณที่รับได้แบบ Optimum และการสหสัมพันธ์สัญญาณไอโซทรอปิกจะเป็นการระบุปริมาณความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นอีกอย่างหนึ่ง จากรูปที่ 6.19 จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง 5 มีอัตราการขยายการส่งผ่านสูงที่สุดคือ -2.12 dBi และในตำแหน่ง 22 หรือข้อเท้าด้านซ้ายมีอัตราการขยายการส่งผ่านต่ำที่สุดคือ -12.39 dBi จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง 6 มีความแตกต่างของอัตราการขยายมากที่สุดคือ 6.54 dB ซึ่งหมายความว่าที่ตำแหน่งนี้เกิดความผิดเพี้ยนมากที่สุด ส่วนที่ตำแหน่ง 1 จะมีความแตกต่างของอัตราการขยายน้อยที่สุดคือ 0.021 dB หรือเกิดความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด ส่วนค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 1.92 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 2 dB แสดงให้เห็นว่าแบบแผนการประเมินผลนี้สามารถนำไปใช้ได้



รูปที่ 6.19 อัตราการขยายสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง

### 6.2.7 อัตราความผิดพลาดบิต

กราฟนี้จะแสดงให้เห็นถึงอัตราบิตผิดพลาดของสัญญาณ ซึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการส่งผ่านช่องสัญญาณ ในที่นี้ได้ยกตัวอย่าง ตำแหน่งบนร่างกาย 4 ตำแหน่งซึ่งประกอบไปด้วย หน้าอก (12) เอว (8) ข้อมือ (26) และข้อเท้า (11) โดยมีการเปรียบเทียบกับอัตราความผิดพลาดบิตกรณีส่งผ่านแบบไอโซทรอปิก ดังรูป 6.20



รูปที่ 6.20 อัตราความผิดพลาดบิตในการส่งผ่านช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

เมื่อพิจารณาอัตราบิตผิดพลาดทั้ง 4 ตำแหน่ง จะเห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพแตกต่างกันทุกตำแหน่ง โดยในตำแหน่ง 12 จะให้ค่าอัตราบิตผิดพลาดที่ดีกว่าตำแหน่งอื่นเมื่อเปรียบเทียบที่พลังงานต่อบิตต่อพลังงานสัญญาณรบกวนที่เท่ากัน เนื่องจากตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่สายอากาศตรงกัน รวมทั้งมีระยะทางที่ใกล้กว่าตำแหน่งอื่นๆ

### 6.3 ผลการทดลองของแบบจำลองการวัดที่มุมต่างๆ

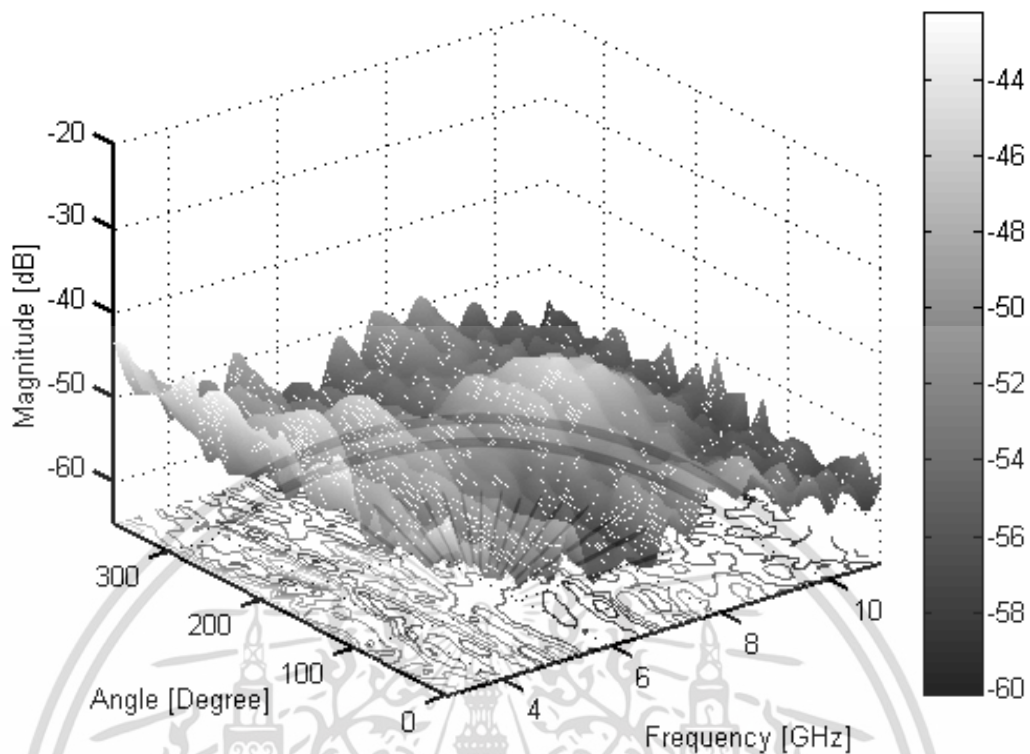
การทดลองวัดโมเดลนี้ได้ติดตั้งสายอากาศทั้งด้านส่งและรับอยู่ในตำแหน่งหน้าอกของร่างกายมนุษย์ทั้งสอง โดยทำการหมุนทางด้านภาครับครั้งละ 10 องศาจากมุม 0 องศาถึง 360 องศา เพื่อต้องการดูการถ่ายโอนของสัญญาณในลักษณะรอบทิศทางจากร่างกายคนหนึ่งไปยังอีกคนหนึ่ง ค่าที่ได้จากการทดลองเป็นฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ผลตามพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

#### 6.3.1 ขนาด เฟส และการประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณ

ขนาด เฟส และเวลาประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณจะแสดงถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยขนาดจะบอกถึงระดับสัญญาณในการถ่ายโอนที่ความถี่ที่เราพิจารณา เฟสจะบอกถึงคุณภาพของช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณที่ดีเฟสจะมีความเป็นเชิงเส้น ส่วนการประวิงกลุ่มจะขึ้นอยู่กับเฟส หากเฟสไม่มีความเป็นเชิงเส้นจะเกิดการประวิงกลุ่มมาก ซึ่งฟังก์ชันการถ่ายโอนทั้ง 3 แบบนี้จะแสดงในรูปแบบของกราฟสามมิติ คือ แกนของความถี่ มุมที่ทำการหมุนทางด้านภาครับ

และฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ต้องการแสดง ดังรูป 6.21-6.26

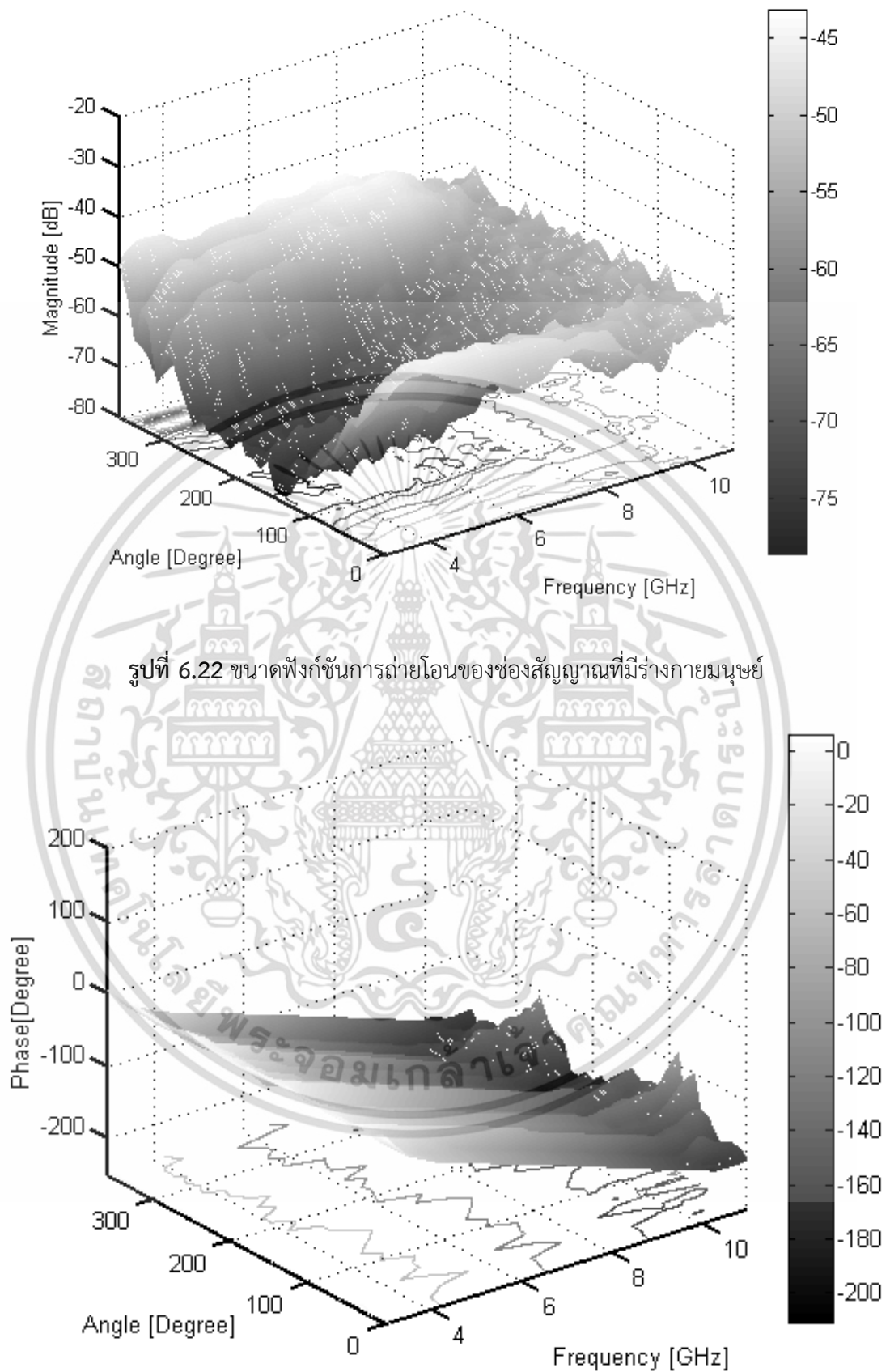
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.21 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ไม่มีร่างกายมนุษย์

เมื่อพิจารณาขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ จะเห็นได้ว่ามีขนาดของสัญญาณที่ใกล้เคียงกันทุกมุมยกเว้นช่วงมุม 180 องศาจะมีขนาดของสัญญาณสูงกว่ามุมอื่นเล็กน้อย เนื่องจากเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ส่วนรูปที่ 6.22 แสดงขนาดฟังก์ชันการส่งผ่านของช่องสัญญาณกรณีมีร่างกายมนุษย์ จะเห็นว่าขนาดของสัญญาณต่ำในช่วงมุม 90 องศา ถึง 270 องศา เนื่องจากเกิดการบดบังของร่างกายมนุษย์ โดยมีขนาดสัญญาณต่ำในช่วงความถี่ 3-6 GHz ที่ประมาณ -70 dB

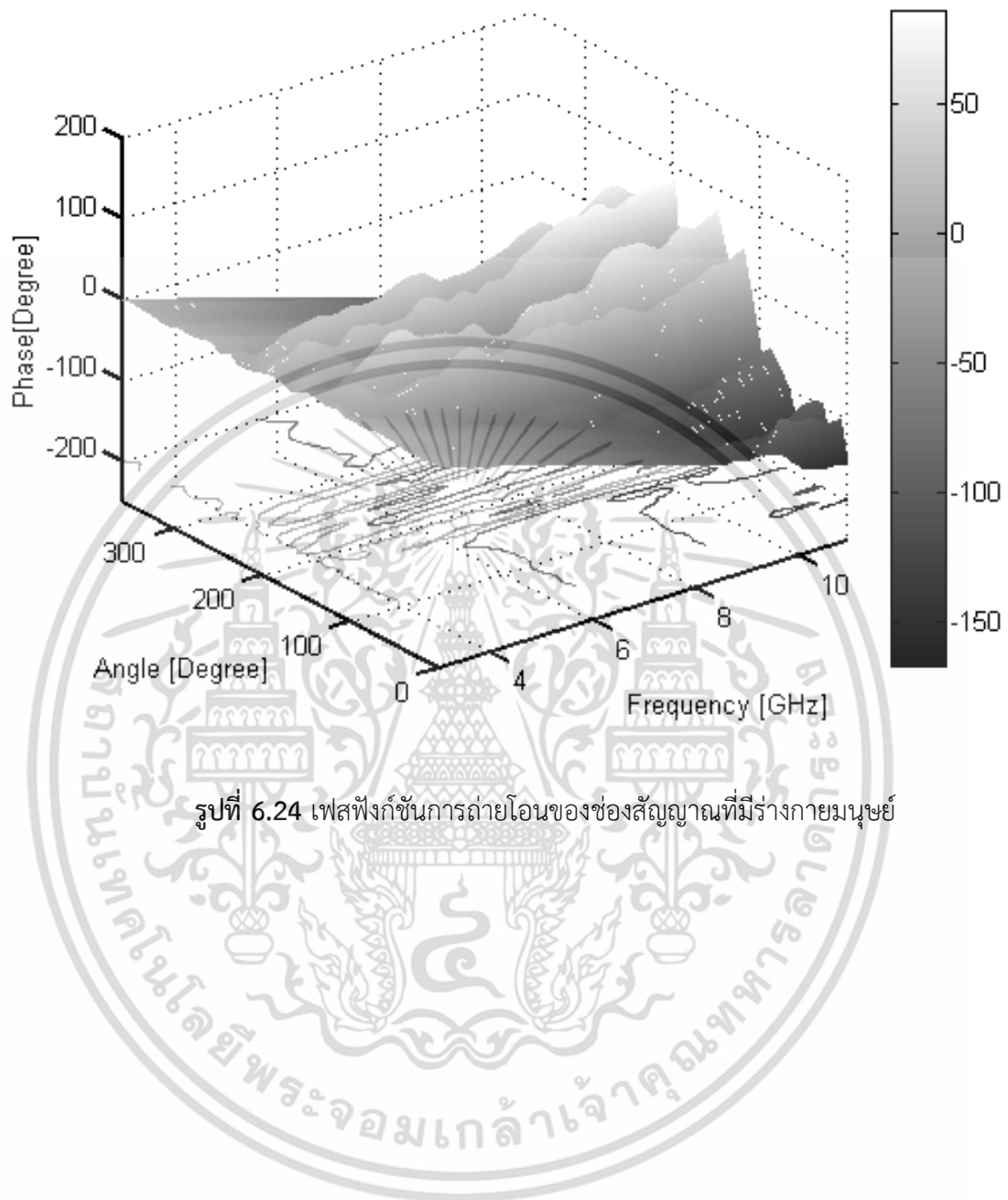
เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ดังรูปที่ 6.23 จะเห็นได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้นเกือบตลอดช่วงความถี่ที่พิจารณาและทุกมุมที่ทำกรการหมุน ซึ่งส่งผลให้ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณในกรณีเดียวกันดังรูปที่ 6.21 มีการแกว่งของสัญญาณค่อนข้างน้อย แต่จะเห็นว่าตั้งแต่ความถี่ 9 GHz ขึ้นไปความเป็นเชิงเส้นเริ่มน้อยลง เนื่องจากโครงสร้างการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ส่วนในรูปที่ 6.24 จะเห็นว่าเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณมีความเป็น Linear ยกเว้นช่วงมุม 90 องศา ถึงมุม 270 องศา จะไม่ Linear เนื่องจากการบดบังของร่างกายมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 180 องศา จะเกิดการบดบังอย่างสมบูรณ์



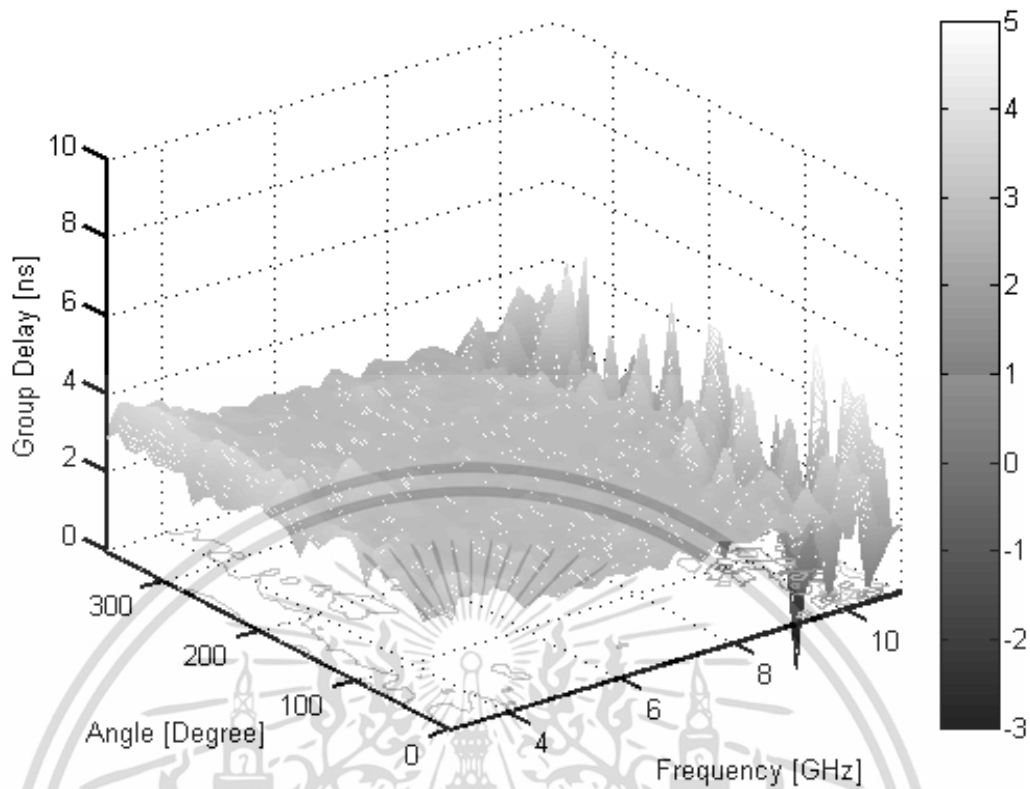
รูปที่ 6.22 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่มีร่างกายมนุษย์

รูปที่ 6.23 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ไม่มีร่างกายมนุษย์

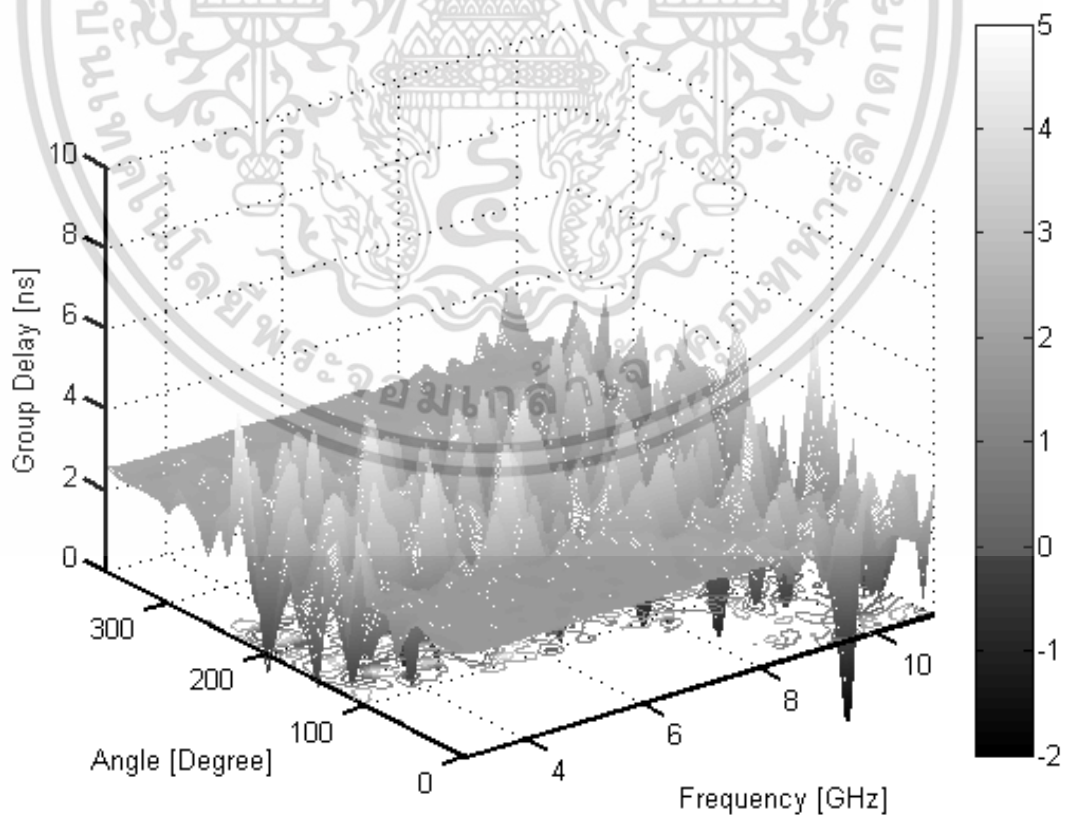
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.25 การประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ไม่มีร่างกายมนุษย์



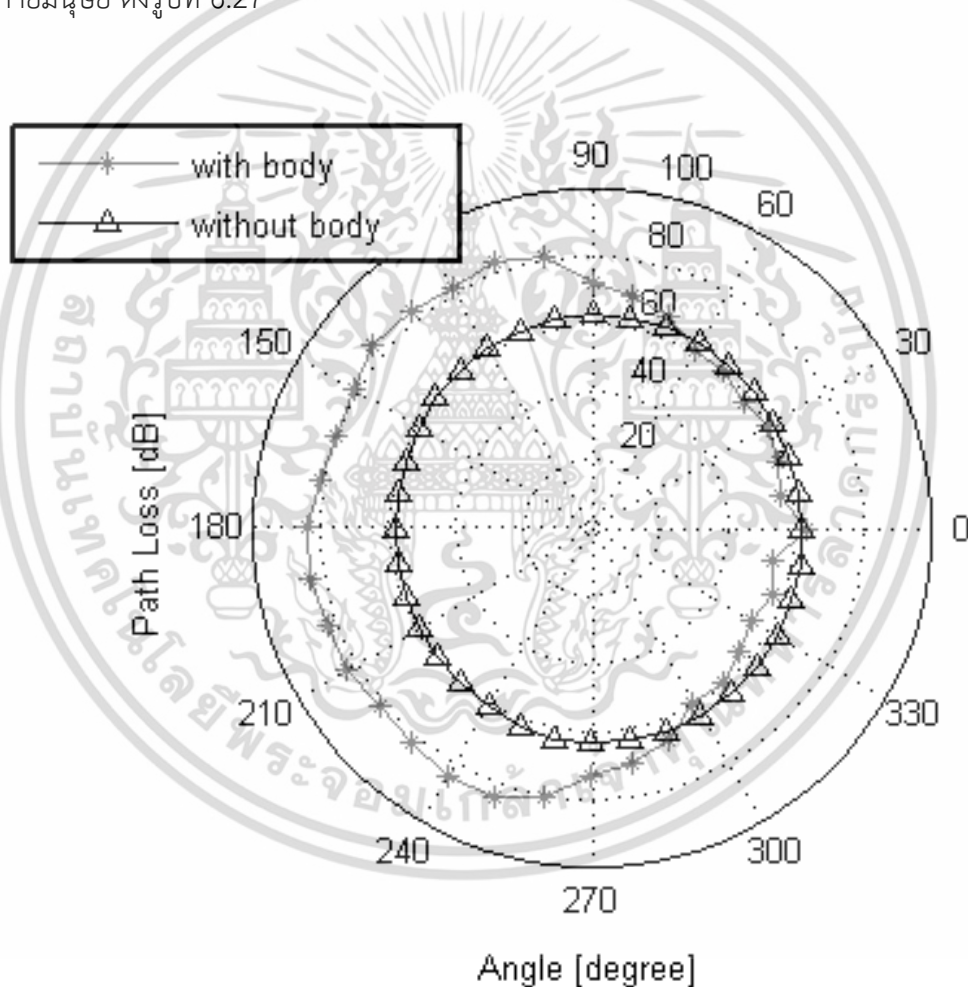
รูปที่ 6.26 การประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่มีร่างกายมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ในพื้นที่นี้โปรดระวังการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาการประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์จะสังเกตเห็นได้ว่าการประวิงกลุ่มในช่วงความถี่สูง ทั้งนี้เกิดจากความผิดเพี้ยนของสัญญาณในช่วงความถี่สูงทำให้เฟสไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ พบว่าในช่วงมุม 90 องศา ถึง 270 องศา มีการประวิงกลุ่มตลอดช่วงความถี่อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการบดบังของร่างกายมนุษย์นั้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากทั้งขนาด เฟส และการประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอน ซึ่งอาจจะทำให้สัญญาณที่รับได้นั้นเกิดการลดทอนและผิดเพี้ยนมากตามไปด้วย ดังจะแสดงในพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ถัดไป

### 6.3.2 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ

การสูญเสียเชิงวิถีนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียในหน่วยเดซิเบลและมุมที่ทำการทดลอง ซึ่งจะแสดงผลเปรียบเทียบในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์และมีร่างกายมนุษย์ ดังรูปที่ 6.27



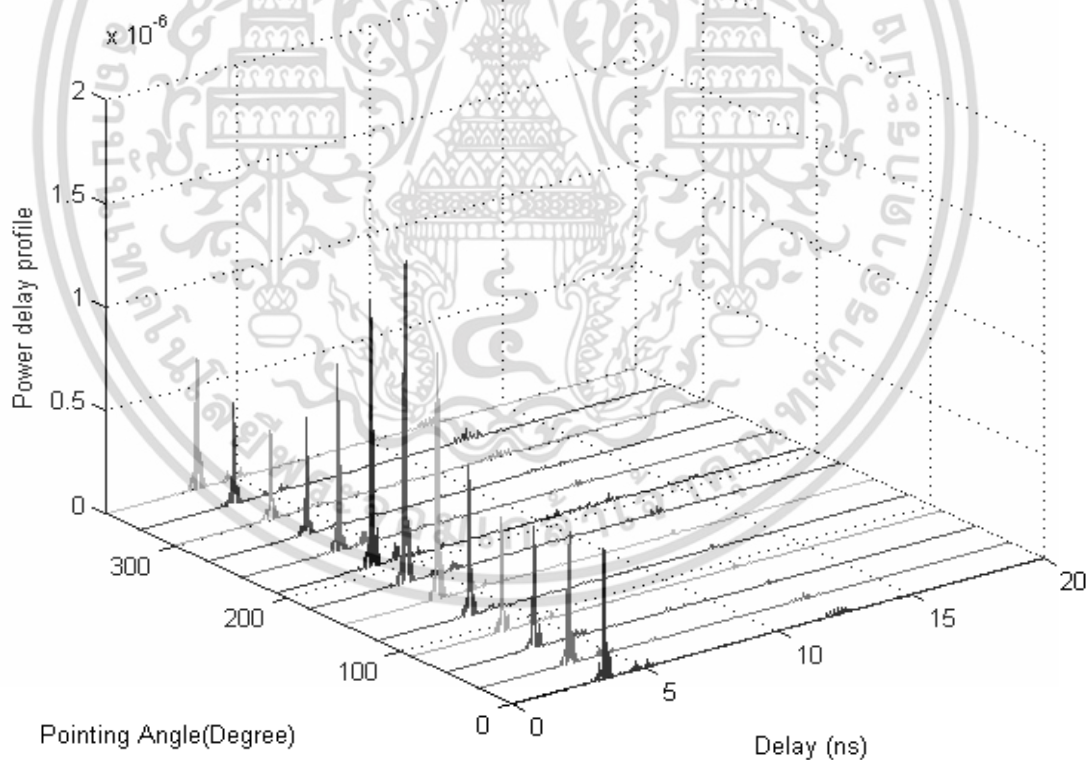
รูปที่ 6.27 เปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีกรณีมีและไม่มีร่างกายมนุษย์

ในการวิเคราะห์ถึงผลการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียเชิงวิถีที่ทำการทดลองทั้ง 2 กรณี จะเห็นว่ากรณีที่ไม่มีผลจากร่างกายมนุษย์นั้น ค่าการสูญเสียเชิงวิถีอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ มุมโดยมีค่าประมาณ 60 dB ส่วนในกรณีที่มีผลจากร่างกายมนุษย์ค่าการสูญเสียเชิงวิถีจะแตกต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปตามมุมที่หมุน โดยในช่วงมุม 90-270 องศา เกิดการสูญเสียมากโดยประมาณ 80 dB เนื่องจากเกิดการบดบังจากร่างกายมนุษย์ แต่ที่น่าสังเกตคือในช่วงมุม 0-60 องศา และ 300-360 องศา การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีมีร่างกายมนุษย์นั้นมีความน้อยกว่ากรณีไม่มีร่างกายมนุษย์เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการสะท้อนของสัญญาณระหว่างคนสองคนที่ยืนหันหน้าเข้าหากัน

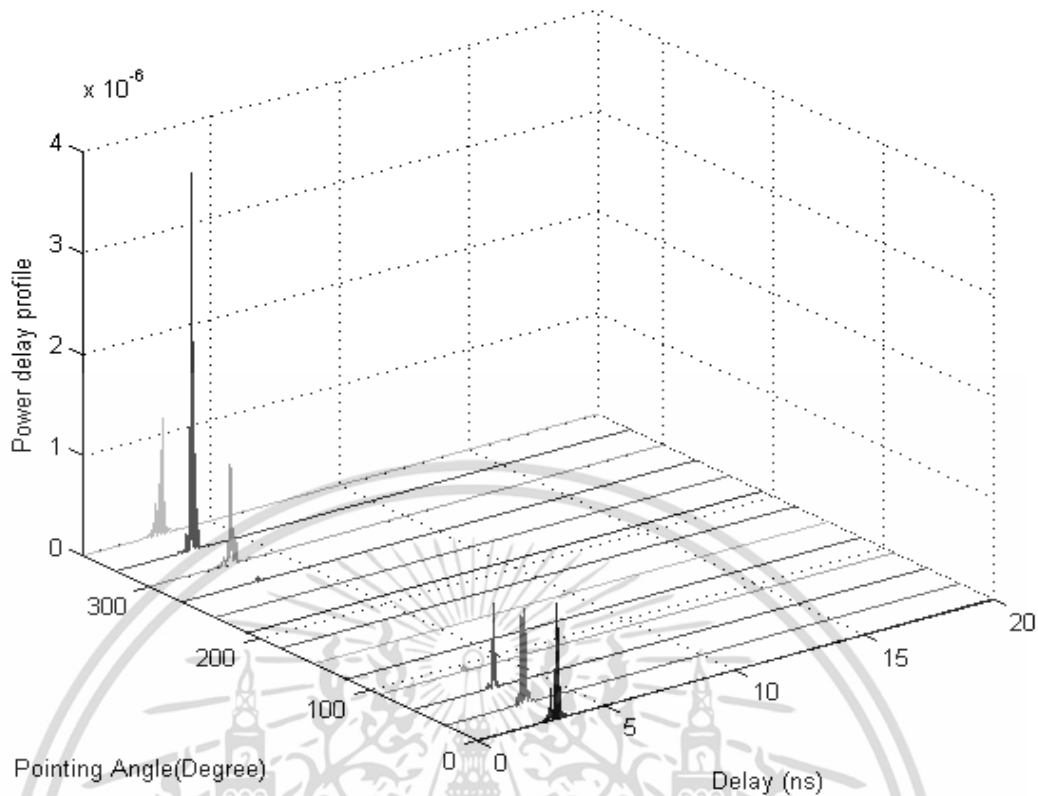
### 6.3.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ

ในการแสดงผลของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟ 3 แกนคือ เวลาที่ใช้ในการเดินทาง ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้และมุมที่ทำกรวัด โดยพิจารณาในสองกรณีคือ กรณีที่ไม่มีผลและมีผลจากร่างกายมนุษย์ ดังแสดงในรูปที่ 6.28 และ 6.29 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่า ในกรณีที่ไม่มีผลจากร่างกายมนุษย์นั้นสัญญาณเดินทางมาถึงด้านรับใช้เวลาใกล้เคียงกันประมาณ 3.5 นาโนวินาทีโดยมีระดับของสัญญาณที่ต่างกันตามมุมที่ทำให้การหมุนสายอากาศด้านรับซึ่งในช่วงมุม 180 องศา นั้นจะมีระดับของสัญญาณสูงกว่ามุมอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างของสายอากาศ ส่วนในกรณีที่มีผลจากร่างกายมนุษย์นั้นจะเห็นได้ว่าระดับของสัญญาณในแต่ละมุมนั้นลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ช่วงมุม 90-270 องศา ระดับของสัญญาณจะต่ำมากเนื่องจากเกิดการบดบังจากร่างกายมนุษย์



รูปที่ 6.28 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่ไม่มีร่างกายมนุษย์

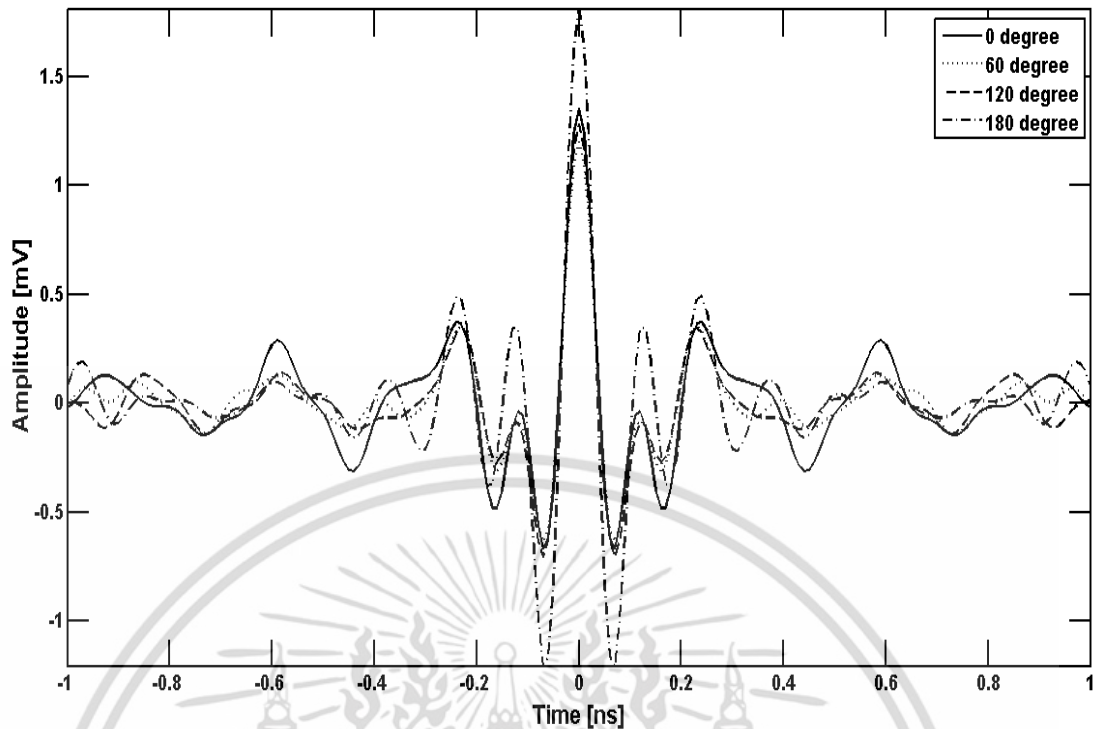
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



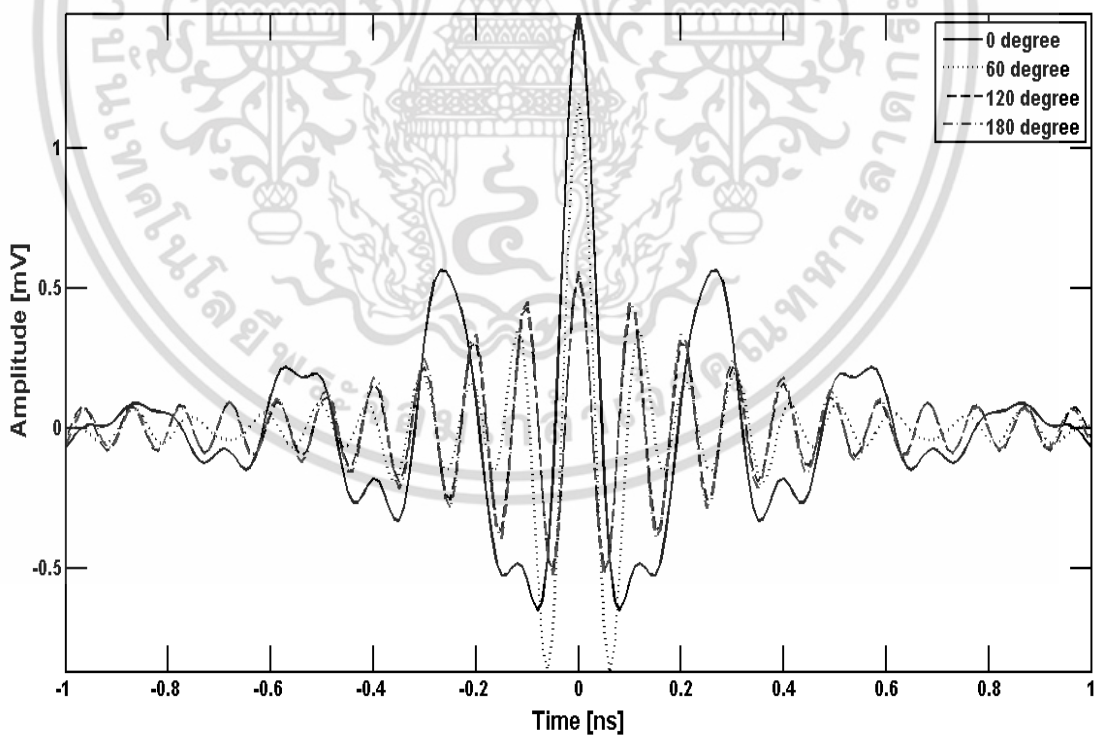
รูปที่ 6.29 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่มีร่างกายมนุษย์

#### 6.3.4 รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสหสัมพันธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ที่มีความเหมาะสมที่สุด รูปคลื่นที่รับได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีไม่มีและมีย่างกายมนุษย์ แสดงดังรูปที่ 6.30 และ 6.31 ตามลำดับ โดยพิจารณาเปรียบเทียบที่มุม 0 60 120 และ 180 องศา ในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์จะสังเกตเห็นได้ว่า รูปคลื่นมีระดับสัญญาณที่ใกล้เคียงกันเกือบทุกมุม ส่วนในกรณีที่ไม่มีร่างกายมนุษย์จะมีระดับสัญญาณสูงสุดเป็น 1.478 1.161 0.5505 และ 0.5579 mV ตามลำดับมุมที่แสดง ซึ่งจะเห็นว่าที่มุม 0 และ 60 องศาจะมีระดับสัญญาณใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี ส่วนที่มุม 120 และ 180 องศาผลกระทบจากร่างกายมนุษย์จะทำให้มีระดับสัญญาณลดต่ำลง 2-3 เท่า นอกจากระดับสัญญาณที่แตกต่างกันแล้วยังมีในเรื่องของความถี่ของสัญญาณที่เกิดขึ้นอีกด้วย ในรูปที่ 6.32 แสดงการเปรียบเทียบรูปคลื่นที่มุม 0 องศาทั้งสองกรณีกับรูปคลื่นแบบไอโซทรอปิก จะเห็นว่ามีระดับของสัญญาณที่ต่างกันอย่างชัดเจน ในกรณีมีย่างกายมนุษย์จะเกิดความผิดเพี้ยนมากกว่าในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ ส่วนปริมาณความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นสามารถดูได้จากหัวข้อถัดไป

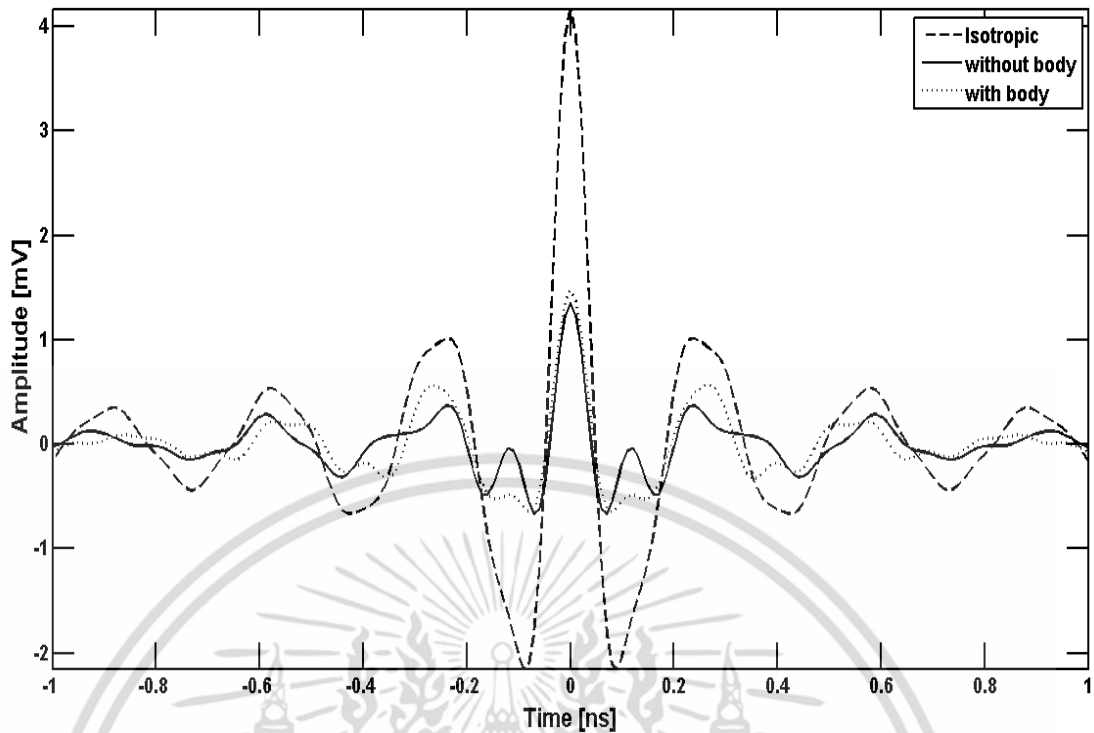


รูปที่ 6.30 รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้กรณีไม่มีร่างกายมนุษย์



รูปที่ 6.31 รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้กรณีมีร่างกายมนุษย์

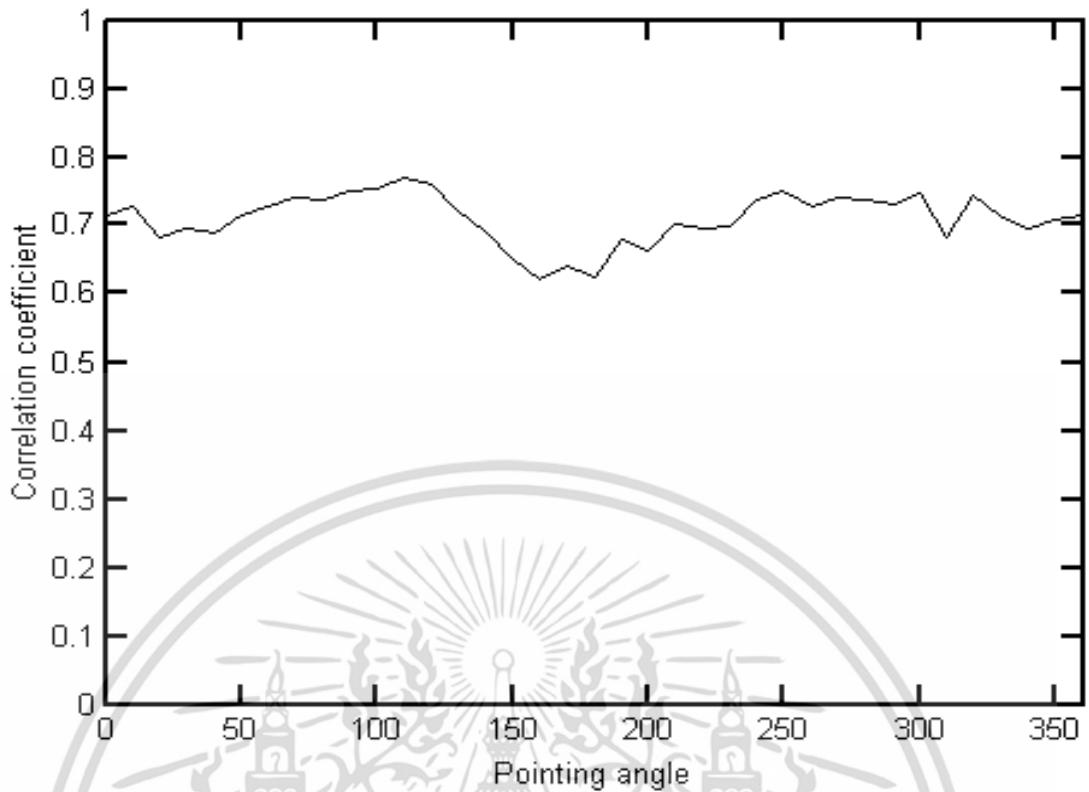
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



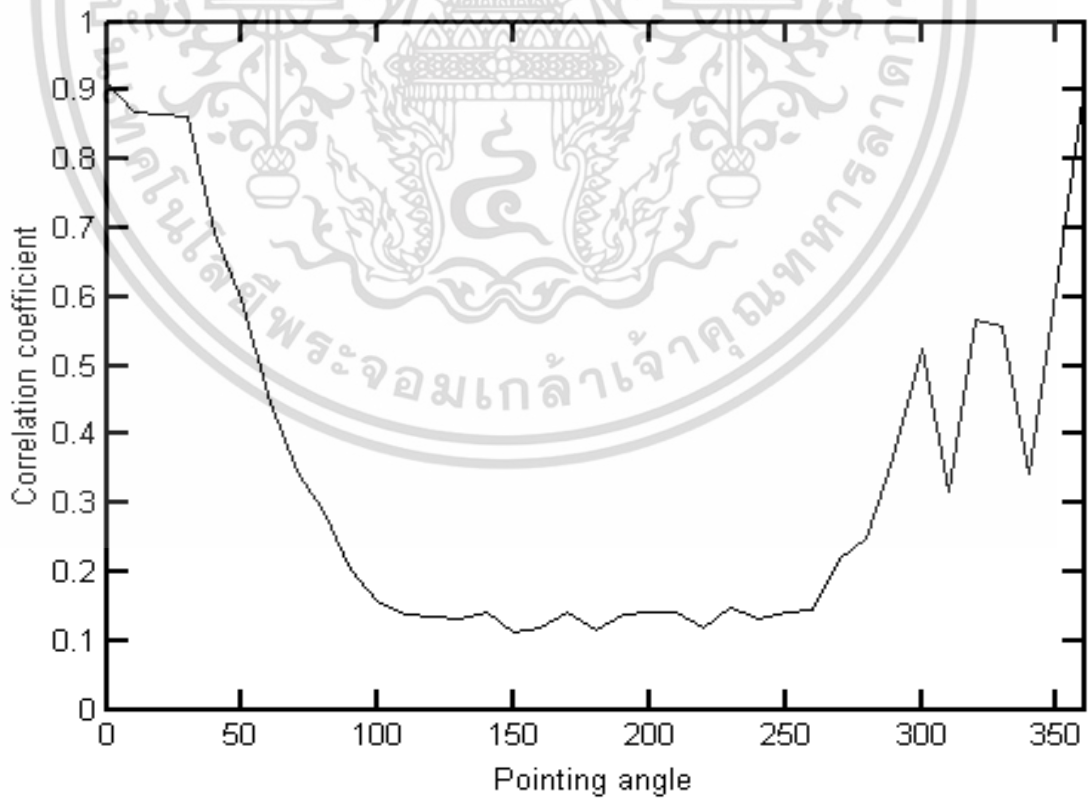
รูปที่ 6.32 ตัวอย่างสัญญาณที่รับได้กรณีมีและไม่มีร่างกายมนุษย์ที่มุม 0 องศา

### 6.3.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง

การสื่อสารระบบแถบกว้างยิ่งนั้นรูปร่างของสัญญาณมีความสำคัญ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการวิเคราะห์ถึงค่าความเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะอยู่ในช่วง 0- 1 กล่าวคือถ้าค่าสัมประสิทธิ์มีค่าเท่ากับ 1 นั้นหมายความว่าสัญญาณที่รับได้เหมือนกับสัญญาณแบบไอโซทรอปิกทุกประการคือไม่เกิดความเพี้ยนนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 6.33 จากรูปจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ไม่มีผลจากร่างกายมนุษย์นั้นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉลี่ยทุกมุมแล้วจะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.71 ส่วนในกรณีที่มึร่างกายจะเกิดความผิดเพี้ยนอย่างมากในช่วงมุม 90-270 องศา เนื่องจากเกิดการบดบังของร่างกาย ส่วนในมุมอื่นจะเห็นได้ว่าเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยมากอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 6.33 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีไม่มีร่างกายมนุษย์



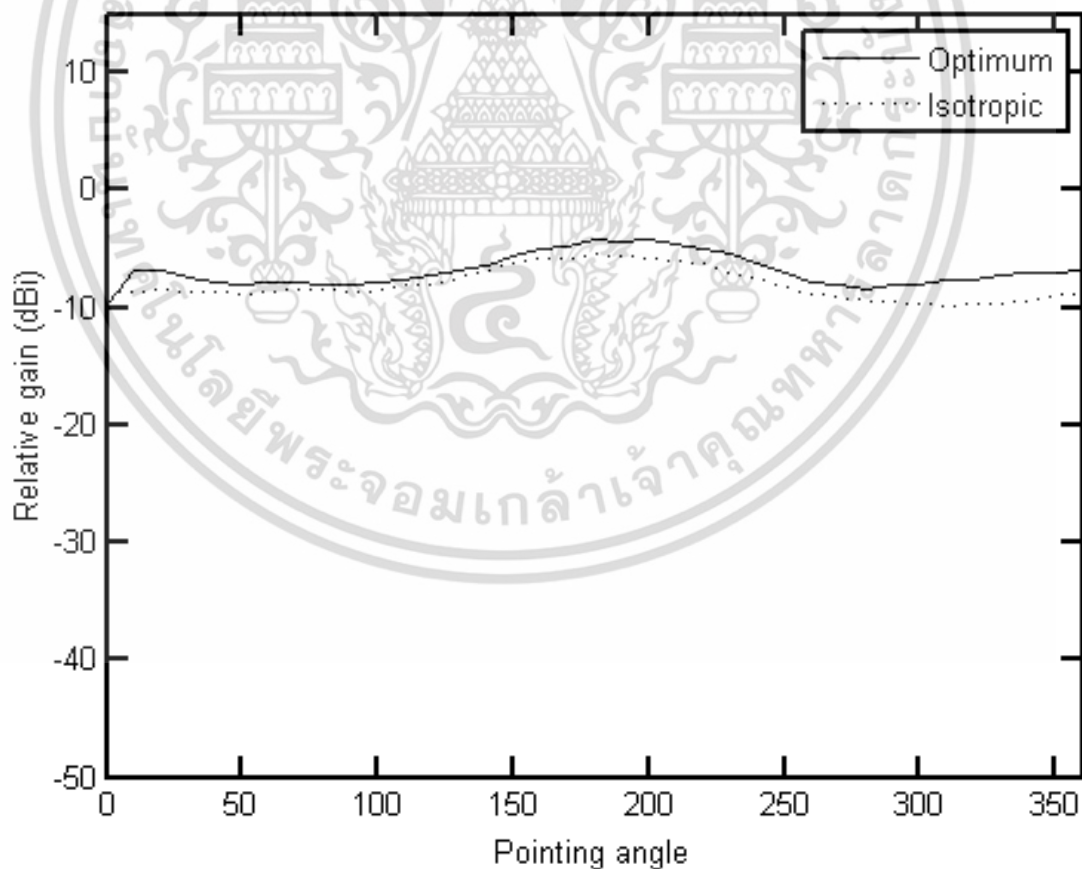
รูปที่ 6.34 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กรณีมีร่างกายมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.6 อัตราการขยายการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งสำหรับโครงข่ายรับร่างกายมนุษย์

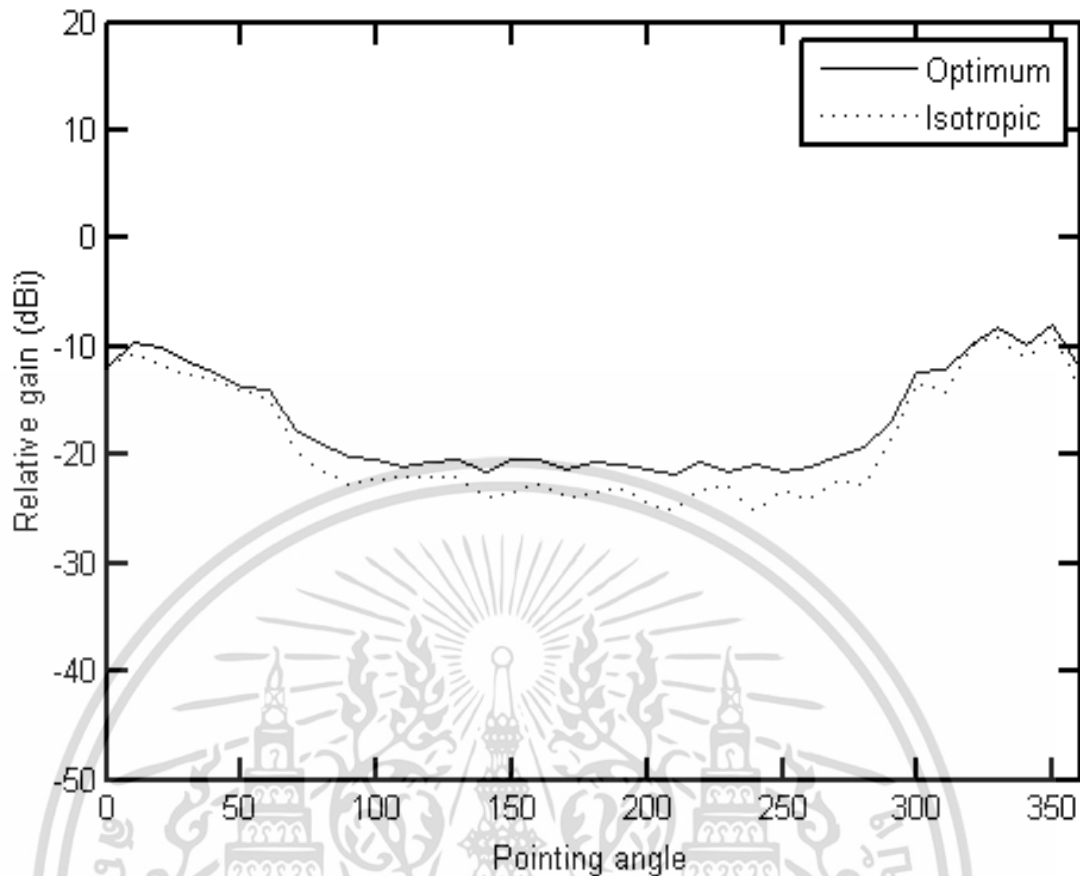
อัตราการขยายการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ในแต่ละมุมของสายอากาศที่ทำการวัดโดยเปรียบเทียบกับค่าอัตราการขยายของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก ในกรณีที่ไม่มีผลต่อร่างกายมนุษย์ และที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์ ดังแสดงในรูปที่ 6.35 และ 6.36 ตามลำดับ จะเห็นว่าอัตราการขยายในการส่งผ่านที่ดีที่สุดหรือที่เรียก Optimum ในกรณีที่ไม่มีผลต่อร่างกายมนุษย์ จะมีค่าสูงสุดที่มุม 180 องศา มีค่าเท่ากับ -4.25 dBi และมีค่าต่ำสุดที่มุม 0 องศา มีค่าเท่ากับ -9.75 dBi ซึ่งเป็นผลจากลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ส่วนกรณีที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์ ค่าสูงสุดอยู่ที่มุม 350 องศา มีค่า -1.78 dBi และต่ำสุดที่มุม 210 องศา มีค่า -15.6 dBi

ความแตกต่างระหว่างอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ใช้การสหสัมพันธ์ด้วยสัญญาณที่รับได้แบบ Optimum และการสหสัมพันธ์สัญญาณไอโซทรอปิกจะเป็นการระบุปริมาณความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น จากรูปที่ 6.35 ในกรณีที่ไม่มีร่างกายมนุษย์จะเห็นว่ามุม 340 องศา จะมีการผิดเพี้ยนของคลื่นสูงสุด คือมีความแตกต่างระหว่างอัตราขยายทั้งสองแบบเท่ากับ 2.47 dB โดยมีค่าเฉลี่ยความผิดเพี้ยนอยู่ที่ 1.18 dB และในรูปที่ 6.36 เป็นกรณีที่มีร่างกายมนุษย์ จะเห็นว่าในช่วงมุม 90-270 องศา เกิดการผิดเพี้ยนสูง โดยที่มุม 240 ผิดเพี้ยนสูงสุดเท่ากับ 4.39 dB และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.85 dB ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้เนื่องจากมีค่าต่ำกว่า 2 dB



รูปที่ 6.35 อัตราการขยายสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



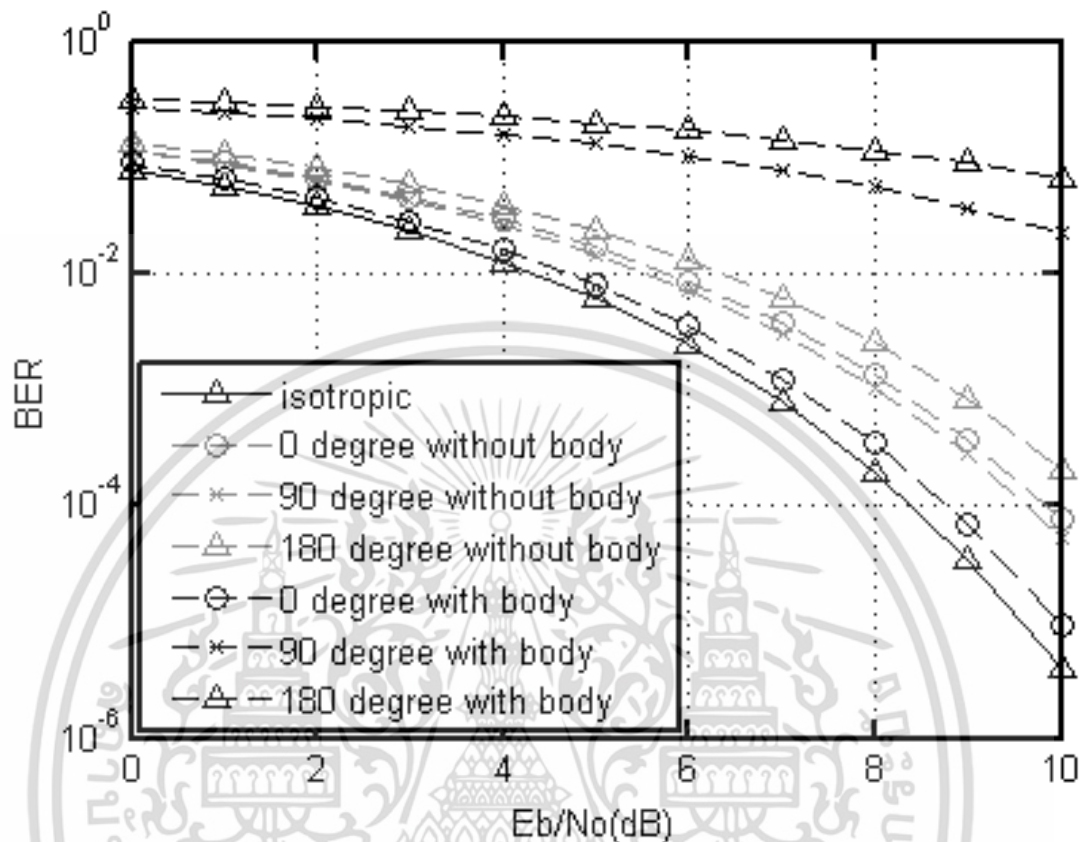
รูปที่ 6.36 อัตราการขยายสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งกรณีมีร่างกายมนุษย์

### 6.3.7 อัตราความผิดพลาดบิต

รูปที่ 6.37 แสดงอัตราความผิดพลาดบิตจากการส่งรูปคลื่นแถบกว้างยิ่งผ่านช่องสัญญาณแบบไม่มีและมียร่างกายมนุษย์ โดยจะแสดงค่าที่มุม 0 90 และ 180 องศาเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมีความสมมาตรกันของมุมที่รับสัญญาณ ในการศึกษาประสิทธิภาพ BER นี้ จะใช้ระดับที่  $10^{-6}$  เป็นระดับอ้างอิงเพื่อใช้เปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี ซึ่งในกรณีช่องสัญญาณที่ไม่มีร่างกายจะมีค่าพลังงานต่อบิตต่อพลังงานสัญญาณรบกวนเป็น 11.98 11.77 และ 12.58 dB ที่มุม 0 90 และ 180 องศา ตามลำดับ ส่วนในกรณีช่องสัญญาณที่มีร่างกายมนุษย์จะมีค่าพลังงานต่อบิตต่อพลังงานสัญญาณรบกวนที่เป็น 10.92 17.48 และ 19.95 dB จากผลทั้งสองกรณีจะพบว่าที่มุม 0 องศา มีค่าพลังงานต่อบิตต่อพลังงานสัญญาณรบกวนในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์มากกว่ากรณีมีร่างกายมนุษย์ 1.06 dB ส่วนที่มุม 90 และ 180 องศา กรณีช่องสัญญาณที่มีร่างกายจะมีค่าพลังงานต่อบิตต่อพลังงานสัญญาณรบกวนมากกว่ากรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ 5.71 dB และ 7.37 dB ตามลำดับ หากพิจารณาที่พลังงานต่อบิตต่อพลังงานสัญญาณรบกวนที่เท่ากันแล้ว จะพบว่าอัตราความผิดพลาดบิตของทั้งสองกรณีแตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่ที่มุม 0 องศาของกรณีมีร่างกายมนุษย์จะมีอัตราความผิดพลาดน้อยกว่ากรณีไม่มีร่างกายมนุษย์เล็กน้อย ดังนั้นกล่าวได้ว่าเมื่อเกิดการบดบังของร่างกายขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณต่ำลง หรือเกิดอัตราความผิดพลาดสูงขึ้น ส่วนในช่วงมุมที่สายอากาศรับบนตัวมนุษย์อยู่ในลักษณะที่มองเห็นกันกับสายอากาศส่ง จะมีผลต่อการส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเล็กน้อย คือมีประสิทธิภาพการส่งผ่านหรือเกิดอัตราความผิดพลาดที่ใกล้เคียงกับกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์



รูปที่ 6.37 การเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตในกรณีมีและไม่มีร่างกายมนุษย์

#### 6.4 สรุป

ผลการทดลองวิจัยที่ได้แสดงไว้ในบทนี้ และการวิเคราะห์ผลของสัญญาณโดยการวัดสัญญาณนั้นได้ทำการทดลองในสภาพการใช้งานจริง ซึ่งได้ใช้แบบจำลองในการวัด 2 แบบตามที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 5 นำผลที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส และทางด้านรับได้ใช้เครื่องรับสหสัมพันธ์สองแบบมาเปรียบเทียบกันระหว่างเครื่องรับแบบสัญญาณที่รับได้กับเครื่องรับแบบไอโซทรอปิก เพื่อประเมินผลความผิดพลาดที่เกิดขึ้น พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล ได้แก่การสูญเสียเชิงวิถี ภาพหน้าตัดข้างการประวิงเวลากำลังงาน รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับสหสัมพันธ์ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อัตราการขยายสัญญาณ และอัตราความผิดพลาดบิต จากผลการทดลองวิจัยทราบว่าร่างกายมนุษย์มีผลต่อการส่งผ่านของรูปคลื่นแบบแถบกว้างยิ่ง เป็นผลให้เกิดความผิดพลาดของรูปคลื่น และส่งผลต่อประสิทธิภาพการส่งผ่าน การบดบังจากร่างกายจะเกิดความผิดพลาดของรูปคลื่นอย่างมาก รวมทั้งตำแหน่งที่ต่างกันของร่างกายมนุษย์จะมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน และทำให้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านสัญญาณแถบกว้างในแต่ละตำแหน่งมีแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

# สรุปการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 7.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบแผนการประเมินผลของช่องสัญญาณการส่งผ่านแบบแถบกว้าง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์สัญญาณการส่งผ่านด้วยการประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านของฟรีส และทางด้านเครื่องรับได้นำเสนอเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความเหมาะสมที่สุด สำหรับการทดลองวิจัยได้อาศัยการตรวจสอบบนพื้นฐานของการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครมข่าย แบบเวกเตอร์ ซึ่งได้จำลองการวัดที่มีลักษณะแตกต่างกัน 2 แบบคือ แบบจำลองการวัดในตำแหน่งต่างๆ บนร่างกายมนุษย์ และแบบจำลองการวัดที่มุมต่างๆ รอบร่างกาย โดยการวัดผลการทดลองจะใช้สายอากาศแบบเส้นคดเคี้ยวเป็นสายอากาศทั้งด้านส่งและรับ ซึ่งเป็นสายอากาศที่ตอบสนองแถบความถี่กว้างและมีขนาดเล็ก โดยทำการวิเคราะห์ผลการวัดด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ การสูญเสียเชิงวิถี ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน รูปคลื่นสัญญาณที่ได้รับได้จากเครื่องรับสหสัมพันธ์ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อัตราขยายของสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง และอัตราความผิดพลาดบิต ด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะบอกถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้น รวมถึงประสิทธิภาพการส่งผ่านของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งมีประโยชน์ต่อการนำไปประเมินผลผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มีผลต่อช่องสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง

### 7.2 สรุปผลการทดลองวิจัย

#### 7.2.1 การวิเคราะห์ผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่ตำแหน่งต่างๆ ของร่างกาย

การวิเคราะห์ผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ของแบบจำลองการวัดที่ตำแหน่งต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณการส่งผ่านจากคนหนึ่งไปยังอีกคนหนึ่งในตำแหน่งที่ต่างกัน โดยกำหนดให้สายอากาศด้านส่งติดตั้งอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางหน้าอกเพียงตำแหน่งเดียวของคนแรก ส่วนสายอากาศด้านรับติดตั้งในตำแหน่งต่างๆ ที่กำหนดไว้รวม 26 จุดของคนที่สองตามแบบจำลองการวัด จากผลการทดสอบพบว่า ในบริเวณลำตัวจะมีการแกว่งของสัญญาณมาก ทำให้เฟรมมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยเฉพาะในตำแหน่งด้านข้างของลำตัวช่วงกลาง ส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากในบริเวณดังกล่าวด้วย โดยมีความผิดเพี้ยนมากถึง 69.15 เปอร์เซ็นต์ และถ้าหาปริมาณความผิดเพี้ยนจากความแตกต่างของอัตราขยายสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งจะมีค่าอยู่ที่ 11.04 dB ส่วนบริเวณที่เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุดคือ บริเวณแขนและที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าอกซึ่งตรงกันกับสายอากาศทางด้านส่ง โดยมีค่าความผิดเพี้ยนน้อยสุด 6.72 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณความผิดเพี้ยนจากความแตกต่างของอัตราขยายสัญญาณที่น้อยที่สุดเป็น 1.92 dB ส่วนในเรื่องของกำลังงาน เวลาการประวิงและการสูญเสียพบว่า ส่วนใหญ่มีผลมาจากระยะทาง โดยระยะทางมากทำให้เกิดการสูญเสียมาก การประวิงเวลาก็มาก และมีระดับกำลังงานที่รับได้น้อย โดยตำแหน่งที่มีผลกระทบในเรื่องของกำลังงานการสูญเสียและการประวิงเวลามากที่สุดก็คือขาหรือที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งใกล้ข้อเท้า ซึ่งมีระยะทางที่ไกลที่สุด และมีผลกระทบน้อยสุดก็คือแขนรองลงมาก็คือบริเวณช่วงอก เนื่องจากแขนเป็นบริเวณที่มีขนาดเล็ก รวมถึงความซับซ้อนทางกายภาพน้อยกว่าจึงเกิดการสูญเสียในบริเวณนี้น้อย

### 7.2.2 การวิเคราะห์ผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มุมต่างๆ ของร่างกาย

การวิเคราะห์ผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ของแบบจำลองการวัดที่มุมต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณการส่งผ่านจากคนหนึ่งไปยังอีกคนหนึ่งที่มีมุมต่างกันทั้งในกรณีไม่มีร่างกายมนุษย์และกรณีมีร่างกายมนุษย์ โดยกำหนดให้สายอากาศด้านส่งและรับติดตั้งในตำแหน่งเดียวกันที่กึ่งกลางหน้าอกของทั้งสองคน จากผลการทดสอบพบว่า

ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อช่องสัญญาณในกรณีที่ไม่มีร่างกายมนุษย์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ จะมีลักษณะใกล้เคียงกันทุกมุม โดยมีค่าเฉลี่ยการสูญเสียเชิงวิถีเป็น 60 dB และมีระดับกำลังงานที่สูงที่สุดที่มุม 180 องศา น้อยสุดที่มุม 330 องศา อันเนื่องมาจากโครงสร้างของสายอากาศ และเมื่อพิจารณาฟังก์ชันการถ่ายโอนจะพบว่าในช่วงความถี่สูงจะเกิดการแกว่งของสัญญาณสูง ทำให้เฟสไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความถี่สูง อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของสายอากาศ อย่างไรก็ตามที่ความถี่สูงจะมีความไม่เป็นเชิงเส้นของเฟสเกิดขึ้นด้วย และในส่วนของความผิดเพี้ยนของสัญญาณจะมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น 0.71 หรือเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณประมาณ 29 เปอร์เซ็นต์ และถ้าหาปริมาณความผิดเพี้ยนจากความแตกต่างของอัตราขยายสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่งจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.68 dB ซึ่งความเพี้ยนของรูปสัญญาณนั้นจะเห็นได้ว่าในกรณีนี้ความเพี้ยนของสัญญาณจะเกิดจากคุณสมบัติของสายอากาศช่องสัญญาณ และสภาวะแวดล้อม โดยส่วนใหญ่ ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลกระทบจากร่างกายนั้นจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศที่ใช้งานด้วย จึงจะสามารถประเมินผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งได้อย่างถูกต้อง

เมื่อพิจารณาผลการบดบังจากร่างกายมนุษย์ในมุมต่างๆ พบว่าร่างกายมนุษย์ก็เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดการบดบังจากร่างกายมนุษย์ในช่วงมุม 90-270 องศา จะเกิดผลการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงต่อช่องสัญญาณ ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าการสูญเสียเชิงวิถี ระดับกำลังงานที่รับได้ ความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ และอัตราความผิดพลาดบิต โดยสิ่งที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณที่รับได้ลดลงอีกทั้งยังทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงด้วยเช่นกัน แต่ที่น่าสังเกตคือในช่วงมุม 0-60 องศา และ 300-360 องศา มีค่าสูญเสียเชิงวิถีน้อยกว่ากรณีไม่มีร่างกายมนุษย์ประมาณ 2 dB กำลังงานที่รับได้สูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการสะท้อนและการกระจายของสัญญาณกับร่างกายมนุษย์และสายอากาศในช่วงมุมดังกล่าว ทำให้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณในช่วงมุมดังกล่าวลดลง และมีประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณดีขึ้น

### 7.2.3 สรุปผลการวิจัย

ปัจจัยทางกายภาพของร่างกายมนุษย์เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการวิเคราะห์ผลการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งในการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์การสื่อสารไร้สายที่ประกอบกับร่างกายมนุษย์ จากผลการทดลองวิจัยทราบว่าร่างกายมนุษย์มีผลต่อการส่งผ่านของรูปคลื่นแบบแถบกว้างยิ่ง เป็นผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น และส่งผลต่อประสิทธิภาพการส่งผ่าน การบดบังจากร่างกายจะเกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นอย่างมาก รวมทั้งตำแหน่งที่ต่างกันของร่างกายมนุษย์จะมีลักษณะเฉพาะที่

แตกต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณที่แต่ละตำแหน่งแตกต่างกันด้วย ซึ่งแบบแผนที่ได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการใช้ในเชิงพาณิชย์เท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ผ่านการพิจารณาจากผู้เกี่ยวข้อง ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้

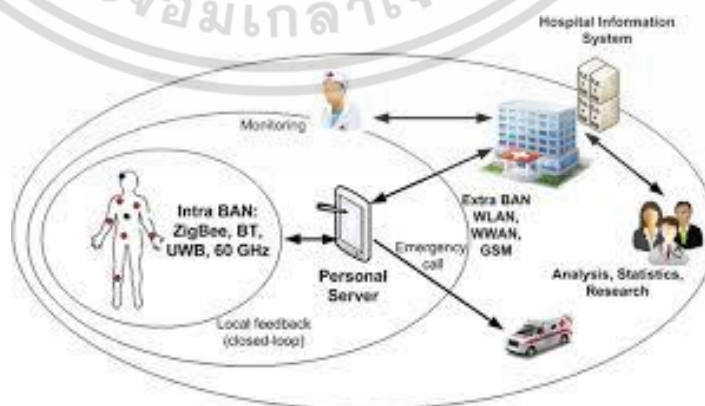
นำเสนอแนะสามารถนำไปใช้ในการประเมินผลดังกล่าวข้างต้นได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราการขยายการส่งผ่าน

ค่าความผิดพลาดและการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากร่างกายมนุษย์นี้อาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น อวัยวะและองค์ประกอบต่างๆ ภายในร่างกาย ประกอบไปด้วย กระดูก เนื้อเยื่อ เลือด น้ำ เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ อาจทำให้เกิดการรบกวนการส่งผ่านของสัญญาณได้ เช่น การเลี้ยวเบน การสะท้อน การดูดกลืน การจางหาย เป็นต้น จึงส่งผลให้สัญญาณเกิดการสูญเสียและเกิดความผิดพลาดของสัญญาณขึ้น นอกจากนี้แล้วปัจจัยภายนอกก็ยังส่งผลให้เกิดการสูญเสียและความผิดพลาดของสัญญาณได้อีกไม่น้อย เช่น ผนังห้อง พื้น ฝ้า กระจก โตะ ฯลฯ

### 7.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยในอนาคต

จากการศึกษาถึงผลกระทบจากร่างกายมนุษย์นั้นมีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะการใช้งานของตัวอุปกรณ์สื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งจะทำให้เราสามารถออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพระบบสื่อสารให้มีความเหมาะสมและปลอดภัยในการใช้งานได้ ในการติดตั้งอุปกรณ์การสื่อสารที่ใช้คลื่นวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้งานระหว่างคนสองคน ควรจะติดตั้งที่ตำแหน่งร่างกายที่มีผลกระทบต่อการบินของคลื่นน้อยที่สุด เช่น แขนและข้อมือ ซึ่งสามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด และมีการสูญเสียที่น้อย รวมทั้งเกิดความผิดพลาดของสัญญาณที่น้อยเช่นกัน รองลงมาคือบริเวณกึ่งกลางหน้าอกช่วงบน ตำแหน่งที่แย่ที่สุดคือ ด้านข้างของท้อง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดการผิดพลาดของข้อมูลสูงที่สุด แต่ทั้งนี้การที่ตัวคนบดบังที่มุมต่างๆ นั้นส่งผลต่อการรับสัญญาณอย่างมากเพราะฉะนั้นแล้วควรหลีกเลี่ยงการใช้คลื่นวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งในสถานที่ที่มีคนเยอะ

การทดลองวิจัยในอนาคตจะได้ประยุกต์เอางานวิจัยไปพัฒนาในแนวทางอื่นๆ เช่น ระบบแถบกว้างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ไร้สาย โดยระบบแถบกว้างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์นั้น สิ่งที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมคือการวิเคราะห์ถึงเวลาที่มาถึงยังภาครับแต่ละเส้นทางด้วยวิธี Time of Arrival (TOA) และการพิจารณาถึงทิศทางของสัญญาณที่มาถึงด้วยวิธี Angle of Arrival (AOA) ซึ่งวิธีเหล่านี้จำเป็นมากสำหรับการพิจารณาภายในอาคารตัวอย่างแสดงดังรูป 7.1



รูปที่ 7.1 การประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ไร้สาย [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H.T. Friis, "A Note on A Simple Transmission Formula," Proceedings of IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May. 1946.
- [2] A. W. ASTRIN, H.-B. LI, and R. KOHNO, "standardization for body area networks," IEICE Transactions on Communications, vol. E92.B, no. 2, pp. 366-372, Feb. 2009.
- [3] R. C. Qiu, "Propagation effects," in UWB Communications Systems: A Comprehensive Overview, M. G. Di Benedetto, Ed. Lausanne, Switzerland: EURASIP, 2005.
- [4] N. Kumar and R. M. Buehrer, "Application of layered space-time processing to ultra-wideband communication," in Proceedings of 45th Midwest Symposium on Circuits and Systems, pp. 597-600, Aug. 2002.
- [5] M. Ghavami, L. B. Michael and R. Kohno, Ultra wideband signals and systems in communication engineering, John Wiley & Sons, 2004.
- [6] F. Ramirez-Mireles and R. A. Scholtz. "Wireless multiple-access using SS timehopping and block waveform pulse position modulation, part 2: Multiple-access performance," in Proceedings ISITA Symposium, 1998.
- [7] D. G. Leeper. "Wireless data blaster". Scientific American, pp. 1-3, May. 2002.
- [8] H. Kikuchi. "UWB arrives in Japan," Nikkei Electronics, pages 95-122, Feb. 2003.
- [9] Z.N. Chen, X.H. Wu, N. Yang and M.Y.W. Chia, "Consideration for source pulse and antennas in UWB radio systems," IEEE Trans. Antennas Propagation., 52(7), pp. 1739-1748, 2004.
- [10] R.Q. Lee and R.N. Simons, Tapered slot antennas, Chapter 9 of Advances in Microstrip and printed Antennas, Edited by K.F. Lee and W. Chen, New York., 1997.
- [11] F. Nekoogar, "Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications," United States of America: Prentice-Hall PTR, Aug. 2005.
- [12] R. Kohno, M. McLaughlin and M. Wellborn, "DS-UWB Physical Layer Submission to 802.15 Task Group 3a," IEEE Document number 802.15-04-0137r4.
- [13] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems," First Report and Order, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [14] S. Kazimierz, and M. Debra, "Ultra-Wideband Radio Technology," England: John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [15] M. Di Benedetto and G. Giancola, "Understanding Ultra Wideband Radio Fundamentals," New Jersey: Prentice Hall, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] Z. Sahinoglu, S. Gezici and I. Guvenc, "Ultra-wideband Positioning Systems," New York : Cambridge University, Inc. 2008.
- [17] H. Nekoogar and R. Prasad, "Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications," Springer Science, 2009.
- [18] J. Farserotu, A. Hutter, F. Platbrood, J. Gerrits and A. Pollini, "UWB Transmission and MIMO Antenna Systems for Nomadic User and Mobile PAN," Wireless Personal Communications, no. 22, pp. 197-317, 2002.
- [19] L. D. Nardis and M. D. Benedetto, "Overview of the IEEE 802.15.4/4a standards for low data rate wireless personal data networks," 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC), pp. 285-289, 2007.
- [20] K. S. Kwak, S. Ullah and N. Ullah, "An overview of IEEE 802.15.6 standard," 2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), pp. 1-6, 2010.
- [21] K. Hur, W. S. Sohn, J. K. Kim and Y. Lee, "A Power-Efficient Mechanism of IEEE 802.15.6 WBAN for Wireless USB Support," International Journal of Software Engineering and Its Applications Vol. 7, No. 3, May. 2013.
- [22] A. Mehaoua, "Wireless Body Area Networks for HealthCare," SIEPCPC 2013 Workshop on Pervasive HealthCare, Apr. 27, 2013.
- [23] E. Schylander, "15WNG Guidelines for New Work Items," IEEE 802.15-06-0002-01, Jan. 2006.
- [24] Project Authorization Request (PAR) for P802.15.6, 15-07-0575-09-0ban-ban-draft-par-doc.rtf.
- [25] H.-B. Li, J. Schwoerer, Y.-M. Yoon, J. Farserotu, W.-B. Yang, K. Sayrafian, D. Miniutti, D. Lewis, and A. Gowans, "IEEE 802.15.6 regulation subcommittee report," 15-08-0034-08-0006-ieee-802-15-6-regulation-subcommittee-report.doc
- [26] ERC Recommendation 70-03 relating to the use of Short Range Device (SRD), European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, CEPT/ERC 70-03, Tromsø, Norway, 1997.
- [27] B. Zhen, H. B. Li, and R. Kohno, "IEEE body area networks and medical implant communications," Proceedings of the ICST 3rd International Conference on Body Area Networks, Tempe, Arizona, 2008.
- [28] B. Zhen, M. Patel, S.-H. Lee, and E.-T. Won, "Body area network (BAN) technical requirements," 15-08-0037-03-0006-ieee-802-15-6-technical-requirements document-v-5-0.doc
- [29] A. W. ASTRIN, H.-B. LI, and R. KOHNO, "standardization for body area networks," IEICE Transactions on Communications, vol. E92.B, no. 2, pp. 366-372, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์เท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเอกสารฉบับนี้ได้รับการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] “Federal communications commission (FCC), code of federal regulations (CFR), title 47 part 95, MICS band plan,” [Online]. Available: [www.fcc.gov](http://www.fcc.gov), Mar 03, 2013.
- [31] “International telecommunications union-radio communications (ITU-R), radio regulations, section 5.138 and 5.150,” [Online]. Available: [www.itu.int/home](http://www.itu.int/home). 2013.
- [32] “Federal communications commission (FCC), code of federal regulations (CFR), title 47 part 95, WMTS band plan,” [Online]. Available: [www.fcc.gov](http://www.fcc.gov), Jan. 2013.
- [33] Y. Kama Yazdandoost et al, “Channel Characterization for BAN Communications,” IEEE802.15-07-0641-00-0ban.
- [34] Yazdandoost and Sayrafian, “Channel Model for Body Area Network (BAN),” IEEE P802.15-08-0780-09-0006, Apr. 2009.
- [35] S. Ullah et al, “A Review of Wireless Body Area Networks for Medical Applications,” International J. of Communications Network and System Sciences (IJCNS), vol. 2, no. 8: 797-803. July 27, 2009.
- [36] S. Promwong, "Optimum template receiver of ultra wideband transmission network for short-range wireless communication systems," International Conference on Information Networking (ICOIN), pp. 1-5, Jan. 2009.
- [37] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, “Extension of Friis’ Transmission Formula for UWB Systems,” Technical Report of IEICE, WBS2003-8/MW2003-20, May. 2003.
- [38] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, “Experimental Evaluation Scheme of UWB Antenna Performance,” Technical Meeting on Instrument and Measurement, IEE Japan, IM-03-35, June. 2003.
- [39] S. Promwong, W. Hachitani, J. Takada, P. Supanakoon and P.Tangtisanon, “Experimental Study of Ultra-Wideband Transmission Based on Friis’ Transmission Formula,” The Third International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT) 2003, vol. 1, pp. 467-470, Sept. 2003.
- [40] S. Promwong, and J. Takada, “Evaluation of Distortion Due to the Antennas in Ultra-Wideband Impulse Radio,” Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp.1209-1212, Vol. III, Dec. 2007.
- [41] S. Keolounxay, S. Promwong, W. Boosing, N. Sukutamanti, and Jun-ichi Takada, “SNR Gain Analysis of Ultra Wideband Template Receiver for Wireless Personal Area Network,” The 14th Asia-Pacific Conference on Communication (APCC), pp.15-PM2-E, Oct. 14-18, 2008.
- [42] T. Rappaport, “Wireless Communications: Principles and Practice,” 2nd Edition: Prentice Hall, 2001.

- [43] G. Quintero, J.-F. Zurcher and A.K. Skrivervik, "System Fidelity Factor: A New Method for Comparing UWB Antenna," IEEE Transactions on Antenna and Propagation, vol. 59, no. 7, pp. 2502-2512, Jul 2011.
- [44] S. Promwong, P. Supanakoon, J. Takada, "Waveform Distortion and Transmission Gain Due to Antennas on Ultra Wideband Impulse Radio," IEICE Transactions on Communications 2010, vol.E93-B, no.10, pp.2644-2650.
- [45] S. Duangsuwan, S. Promwong, N. Sukutamatanti, "Measurement and Evaluation of FFID Propagation Channel with in an Indoor Environment," ICACTE, pp. 393-395, Dec. 2008.
- [46] K. Teplee, P. Supanakoon, S. Promwong and J. Takada, "A BER Performance of UWB Communication with Matched Filter and Correlation Receivers," the 2007 ECTI International Conference, pp. 872-875, 2007.
- [47] Skycross Company. "3.1-10 GHz Ultra-Wideband Antenna for Commercial UWB Applications." [Online]. Available: <http://www.skycross.com/>. 2003.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการนานาชาติ

- [1] S. Chaiyapong, A. Jala, S. Promwong, “Ultra Wideband Transmission Model in Common Frequency Band for Wireless Body Area Network,” 2012 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2012), pp. 424-429, Nov. 2012.



# Ultra Wideband Transmission Model in Common Frequency Band for Wireless Body Area Network

Somsak Chaiyapong<sup>1,2</sup>, Akkarawut Jala<sup>1</sup>, and Sathaporn Promwong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

<sup>2</sup>MCOT Publi Compana Limited, 63/1 Rama IX Road, Huaykwang, Bangkok 10310, Thailand.

E-mail: kpsathap@kmitl.ac.th

**Abstract**—Ultra wideband impulse radio (UWB-IR) signals must be able to accommodate its common frequency band at 7.25 GHz to 8.5 GHz. Moreover, the signals should not be distorted too much when they pass through the antennas. Therefore, the transfer function of antennas should be known for the performance evaluation. In free space transmission loss is usually evaluated by using the Friis' transmission formula. However, it is not directly applicable to ultra wideband impulse radio (UWB-IR) transmission systems. This paper presentation, the characterization of UWB transmission in common frequency band that takes into account the transmission signal waveform, its distortion due to the antennas, and the receiver. Since the antennas are significant pulse-shaping filters in UWB, various kinds of antennas are experimentally examined, especially focusing on the effect of template waveform receiver.

**Index Terms**—ultra wideband (UWB), impulse radio (IR), Friis' transmission formula, common frequency band, WBAN.

## I. INTRODUCTION

Recently, the ultra wideband (UWB) radio draws much attention due to its potential low cost and low power consumption properties.

The Federal Communications Commission (FCC) is currently working on setting emission limits that would allow UWB communication systems to be deployed on an unlicensed band following the Part 15 rules for radiated emissions of intentional radiators [1]. The UWB radio channel bandwidth for handheld wireless communications is from 3.1 GHz to 10.6 GHz and commonband from 7.25 GHz to 8.5 GHz. The UWB transmitter sends a pulse with a channel bandwidth of this wide and the receiver collects the power of the received signal for rebuilding the pulse. Since the power spectrum density level of UWB signal may be below the noise level of the receivers for other systems, UWB technology can exist with other RF technology without interference.

In UWB communication systems, any frequency selectivity causes distortion of the transmitting pulse shape. Therefore, antennas usually act as significant pulse-shaping filters [2], [3]. Consequently this will increase the complexity of the detection mechanism at the receiver. Moreover, low cost, geometrically small and still efficient structures are required for typical wireless applications. Therefore the antenna design for UWB signal radiation is one of the main challenges.

For narrowband wireless communication systems, Friis' transmission formula is used for the line-of-sight (LOS) link

budget evaluation [4]. However, it is not directly applicable to the UWB impulse radio (IR) system as the bandwidth of the pulse is extremely wide. Moreover, the effect of waveform distortion shall be quantitatively considered in the link budget evaluation.

Ref. [5] treats the special cases of constant gain and constant aperture antennas, but no general discussion had been made. McLean et.al. [6] considered the antenna and the receiver template waveform to evaluate the free space transmission property, but they only considered the relative performance.

In this paper, we discuss the UWB transmission evaluation scheme with measurement data for wireless body area network (WBAN). This scheme is based on the Friis' transmission formula, adapted to UWB, in the sense that we derive the equivalent transmission gain of UWB radio systems. The transmission and the receiver template waveforms are the keys for the extension of the Friis' formula to UWB radio. Experimental investigations are done for different types of wideband antennas.

## II. THEORY OF UWB TRANSMISSION MODEL

### A. UWB Impulse Radio Transmission

The Friis' transmission formula [4] has been widely used to evaluate the link budget for the narrowband LOS channels.

$$G_{\text{Friis}}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} = G_t(f)G_r(f)G_l(f), \quad (1)$$

where  $P_t(f)$  and  $P_r(f)$  are the transmitter and receiver powers respectively,  $G_t(f)$  and  $G_r(f)$  are gain of transmitter and receiver antennas respectively,

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

is the free space propagation gain,  $\lambda = \frac{c}{f}$  is the wavelength,  $c$  is the velocity of light,  $f$  is the operating frequency, and  $d$  is the separation between transmitter and receiver antennas.

The formula extended to take into account the transmission signal waveform, its distortion due to the channel, and the receiver [7], [8].

Free space channel response including antennas is obtained by using Friis' formula as

$$H_c(f, d) = H_f(f, d)\mathbf{H}_r(f, \Omega_r) \cdot \mathbf{H}_t(f, \Omega_t), \quad (3)$$

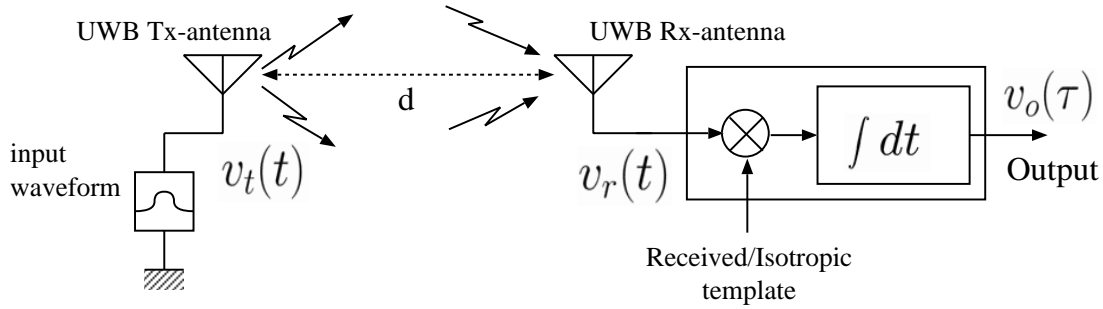


Fig. 1. Block diagram of UWB-IR transmission model for WBAN.

where  $\mathbf{H}_a$  ( $a = r$  or  $t$ ) is a complex transfer function vector of the antenna relative to the isotropic antenna towards the  $\Omega_a = (\theta_a, \varphi_a)$  direction, i.e.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_a(f, \Omega_a) &= \mathbf{H}_a(f, \theta_a, \varphi_a) \\ &= \hat{\theta}_a H_{a\theta}(f, \theta_a, \varphi_a) + \hat{\varphi}_a H_{a\varphi}(f, \theta_a, \varphi_a), \end{aligned} \quad (4)$$

where  $a = r$  or  $t$ ,

$$H_f(f, d) = \frac{\lambda}{4\pi d} \exp(-jkd) \quad (5)$$

is the free space transfer function where

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (6)$$

is the propagation constant. Unit vectors  $\hat{\theta}_a, \hat{\varphi}_a$  express the polarization and are defined with respect to the local polar coordinates of the antennas. The following relations can be easily derived.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_r &= \hat{\theta}_t, \\ \hat{\varphi}_r &= -\hat{\varphi}_t. \end{aligned} \quad (7) \quad (8)$$

The spectrum of the receiver input  $V_r(f)$  is given as

$$V_r(f) = H_c(f, d)V_t(f), \quad (9)$$

where  $V_t(f)$  is the spectrum of the transmit waveform.

### B. Correlation Receiver

Let us consider a correlation receiver shown in Fig. 1. The output SNR is dependent on the choice of the template waveform. The correlator output  $v_o(\tau)$  is therefore expressed as

$$v_o(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_r(t)h_w(t - \tau)dt, \quad (10)$$

where  $v_r(t)$  is the receiver input waveform which is the inverse Fourier transform of Eq. (9), and  $h_w(t)$  is the template waveform.  $\tau$  corresponds to the timing of the template waveform, and the optimum timing  $\tau_o$  is chosen as

$$\tau_o = \arg \max_{\tau} v_o(\tau). \quad (11)$$

Hereafter  $h_w(t)$  is normalized as

$$\int_{-\infty}^{\infty} |h_w(t)|^2 dt = 2B, \quad (12)$$

where  $B$  is the signal bandwidth, so that the output noise power is a constant as  $N_0B$ , where  $\frac{N_0}{2}$  is the power spectral density of AWGN.

Under the constraint of Eq. (12),  $h_{wm}(t)$  maximizes  $v_o(\tau_o)$  when  $h_{wm}(t)$  is a time-reversed and scaled version of  $v_r(t)$ , i.e.

$$h_{wm}(t) = \frac{\sqrt{2B}v_r(\tau_o - t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |v_r(t)|^2 dt}}, \quad (13)$$

where  $\tau_o$  is usually chosen so that  $h_{wm}(t) = 0$  for  $t < 0$  to satisfy the causality.  $h_{wm}(t)$  is called the optimum template waveform hereafter. It is noted that the link budget evaluation is identical to that in Ref. [8] when  $h_{wm}(t)$  is used as the receiver template.

### C. Feasibility of the Optimum Correlation Receiver

It is obvious from Eq. (13) that the optimum template waveform is not the simple time-reversed version of the transmitter waveform, but the channel characteristics including the antennas and the free space propagation. Therefore, it is not always feasible to adapt the template waveform to the angular-dependent antenna characteristics, since the waveform shall be generated at the clock rate of tens of gigahertz. Therefore, we consider a canonical template waveform  $h_{wc}(t)$ . In this paper we have chosen  $h_{wc}(t)$  that is optimum for the isotropic and the constant gain antennas, i.e.

$$h_{wc}(t) = \frac{\sqrt{2B}v_{r-iso}(\tau_o - t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |v_{r-iso}(t)|^2 dt}}, \quad (14)$$

where

$$v_{r-iso}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_r(f)V_t(f) \exp(j2\pi ft)df \quad (15)$$

is the receiver input voltage for the case of isotropic antennas used in both sides. The difference between the optimum and the isotropic templates indicates quantitatively the distortion of the waveform.

### III. EXPERIMENTAL EVALUATION OF UWB-IR TRANSMISSION WITH VARIOUS WIDEBAND ANTENNAS

#### A. The Transmitted Waveforms of UWB-IR System

The effect of the waveform distortion is more obvious when the bandwidth is wider. We considered the transmitted waveforms that fully cover the Federal Communications Commission (FCC) frequency band, i.e., 3.1 – 10.6 GHz [10] and common frequency band available between the FCC of USA, European Conference of Postal and Telecommunications Administrations/Electronic Communications Committee (CEPT/ECC) of Europe and Ministry of Internal Affairs and Communications (MIC) of Japan, i.e., 7.25 – 8.5 GHz [11]. In this paper, the rectangular passband and root raised cosine passband waveforms are used as the transmitted waveforms.

1) *Rectangular Passband Waveform*: The rectangular passband waveform is the waveform with rectangular spectrum and its spectral density is defined as

$$V_{t, \text{re}}(f) = \begin{cases} 1 & ||f| - f_c| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (16)$$

where  $f_c$  is the center frequency and  $f_b$  is the spectral bandwidth. For satisfying the FCC spectral masks for indoor and outdoor limits,  $f_c$  and  $f_b$  are set to 6.85 and 7.50 GHz, respectively. For satisfying the common frequency band spectral mask,  $f_c$  and  $f_b$  are set to 7.875 and 1.250 GHz, respectively.

2) *Root Raised Cosine Passband Waveform*: The root raised cosine passband waveform is the waveform with root raised cosine spectrum and its spectral density is defined as

$$V_{t, \text{ro}}(f) = \begin{cases} 1 & ||f| - f_c| \leq \frac{(1-\beta)}{2T} \\ A \frac{(1-\beta)}{2T} & \frac{(1-\beta)}{2T} < ||f| - f_c| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (17)$$

where

$$A = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi T}{\beta} \left[ ||f| - f_c| - \frac{1-\beta}{2T} \right] \right) \right]},$$

$T = 1/f_b$  is the reciprocal of the symbol-rate and  $\beta = 0.3$  is the roll-off factor. For satisfying the FCC spectral masks,  $f_c$  is set to 6.85 GHz. The spectral bandwidth  $f_b$  is set to 6.37 and 5.94 GHz for satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits, respectively. For satisfying the common frequency band spectral mask,  $f_c$  and  $f_b$  is set to 7.877 and 0.975 GHz, respectively. In this research we consider at common frequency band in UWB band.

The normalized spectral densities of these waveforms compared with common frequency band spectral mask are shown in Fig. 2.

#### B. Experimental Description

An UWB radio channel transfer function was measured as  $S_{21}$  in frequency domain by using a vector network analyzer (VNA) in an anechoic chamber. The VNA was operated in the response measurement mode, where Port-1 was the transmitter (Tx) port and Port-2 was the receiver (Rx) port, respectively.

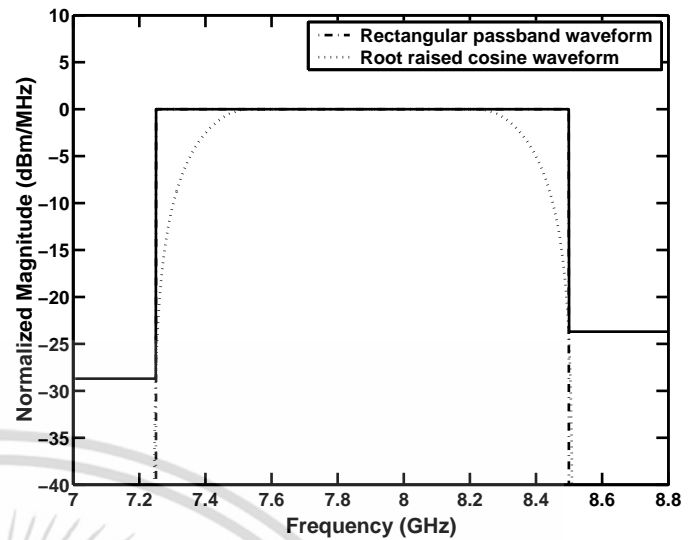


Fig. 2. Normalized spectral densities compared with common frequency band spectral mask

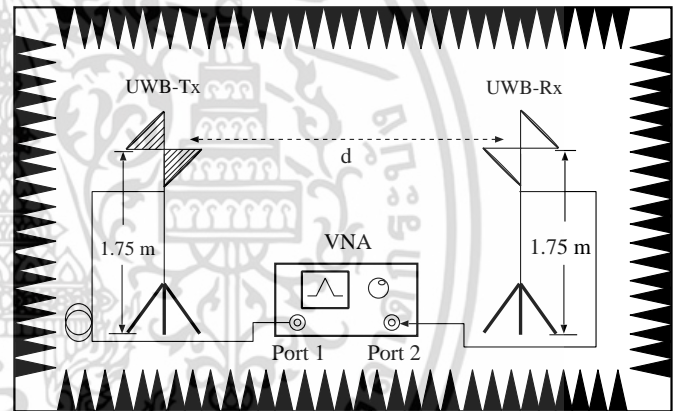


Fig. 3. The instrument setup.

Both Tx and Rx antennas were fixed at the height of 1.75 m and separated by 5 m. The setup is sketched in Fig. 3.

We used a biconical antenna as the Tx antenna. We have chosen this antenna for ease of fabrication, as well as its low distortion property. The geometry of the antenna is shown in Fig. 4. The upper cone is connected to the center conductor of a coaxial line while the lower cone is connected to the shield conductor. The maximum diameter is 65.3 mm and length is 37 mm. We changed only the Rx antennas to compare the transmission properties.

The experimental parameters are listed in Table I. It is noted that the calibration of VNA is done at the connectors of the cables to be connected to the antennas. Therefore, all the impairments of the antenna characteristics are included in the measured results.

TABLE I  
 EXPERIMENTAL SETUP PARAMETERS.

Parameter	Value
Frequency range	7 GHz to 9 GHz
Number of frequency points	1601
Dynamic range	80 dB
Tx antenna height	1.75 m
Rx antenna height	1.75 m
Distance between Tx and Rx	5 m
Rx rotation range	0° to 360°
Rx rotation step	5°
Rx rotation cut	E- or H-plane

#### IV. RESULTS

##### A. Data Processing

The template waveforms, we considered the optimum template waveform  $h_{wm}(t)$  which was optimized for each transmission channel setup, i.e. antennas and their pointing directions, as well as the canonical isotropic template waveform  $h_{wc}(t)$  designed for the isotropic antennas.

Although the absolute path gain can be derived by using the proposed approach, the UWB transmission gain presented in the next section was normalized by the path gain for isotropic antennas at both Tx and Rx sides.

and a double-ridged guide horn for the frequency ranges of 30 – 200 MHz,

##### B. Biconical Antenna

First, the same biconical antennas were used both at Tx and Rx sides. Figure 5 shows the normalized UWB transmission gain as a function of antenna pointing angle in the E-plane. Well-known 8-shaped patterns were obtained. Two template waveforms were used for comparison, and the difference was rather small. The phase center of the biconical antenna is the feed point and it has theoretically the frequency independent gain at broadside direction, and that is why the waveform distortion effect is small compared with the isotropic template.

##### C. Log-Periodic Dipole Antenna

A log-periodic dipole antenna (LPDA) is also used at broadband. It also has a frequency-independent gain. Different from biconical antennas, however, the dispersion characteristic of LPDA is rather big, since the phase center changes with frequency due to the resonance of the dipole elements [12].

We used a commercial LPDA, Watkins-Johnson's AR7-15A, shown in Fig. 6. The antenna has been designed to operate in the range of 1 to 12.4 GHz. Figure 7 shows the normalized UWB transmission gain pattern for biconical-LPDA link in E-plane. As is known, an LPDA is uni-directional and its gain is higher than that of a biconical antenna. The degradation of the transmission gain is observed when the canonical isotropic template is used, since the waveform dispersion is obvious [12].

The UWB antennas performance with transmission gain, using both the received signal template and isotropic template waveforms, gives us quantitative measure of the link budget. Since we have chosen broadband antennas, the trend of the

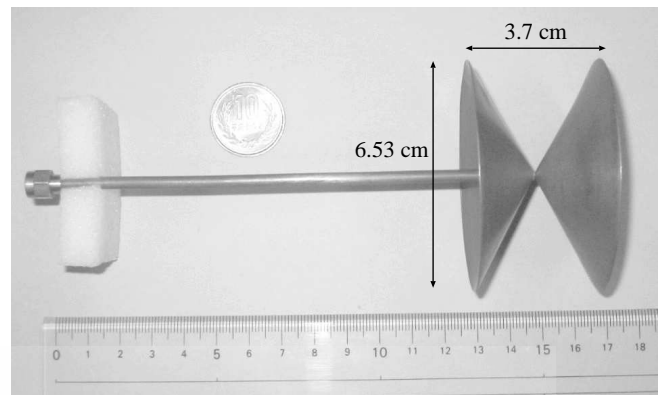


Fig. 4. Biconical antenna structure.

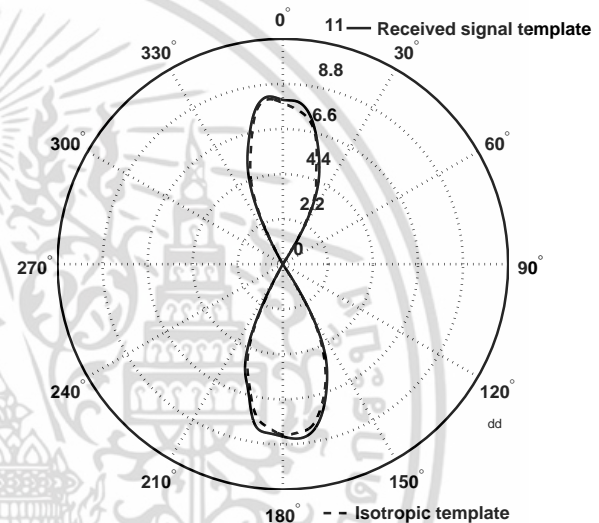


Fig. 5. Transmission gain of common frequency band spectral mask for biconical-biconical link.

narrowband gain is reflected in the UWB transmission gain. Another issue is the distortion of the waveform. The difference between the optimum and the isotropic templates is a measure of the waveform distortion its is similar.

#### V. CONCLUSION

This paper we presented how to evaluate the UWB-IR transmission in common frequency band, which includes the transmit waveform, antennas, free space transmission, and correlator receiver. By using the definition, we have evaluated three types of broadband antennas. The formulation presented in the preceding paper [8] is a special case for the optimum template waveform in this paper. Therefore, as is also presented in [8], IEEE 802.15.3a path loss model [9] is also a special case of the formulation presented in this paper, by considering the single ASK pulse, the frequency independent isotropic antenna, and the optimum receiver.

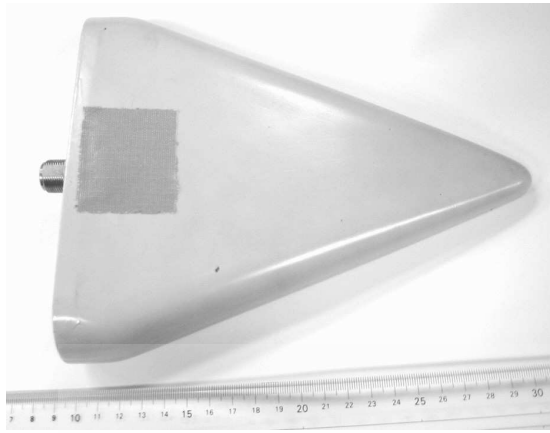


Fig. 6. Log-periodic dipole antenna (Watkins-Johnson AR7-15A).

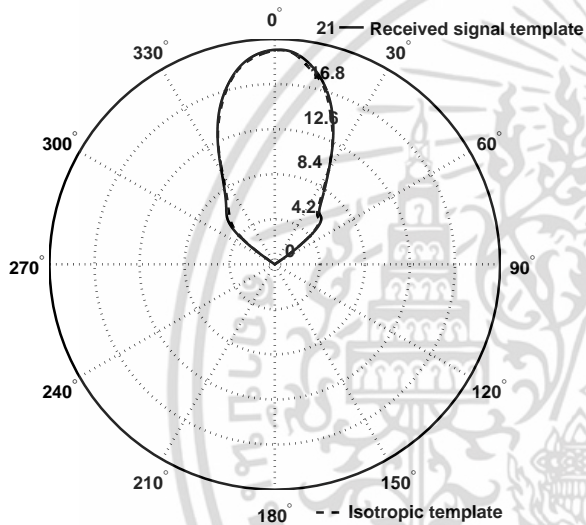


Fig. 7. Transmission gain of common frequency band spectral mask for LPDA-LPDA link.

#### ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank TAKADA Lab members from Tokyo Institute of Technology for help in the experiments, and Prof. Koichi Ito and Dr. Kazuyuki Saito of Chiba University to let us use their LPDA.

#### REFERENCES

- [1] "Radio Frequency Devices," Part 15, Federal Communications Commission Rules, Dec. 2003.
- [2] J. McLean, H. Foltz, and R. Sutton, "The Quantitative Assessment of Log-periodic Dipole Antennas with Fixed Equalization," 2004 International Workshop Ultra Wideband Systems Joint with Conference on Ultra Wideband Systems Technologies (Joint UWBST & IWUWBS 2004), May 2004.
- [3] H.F. Harmuth and S. Ding-Rong, "Antennas for Nonsinusoidal Wave — Part I: Radiators," IEEE Trans. Elec. Mag. Compat., vol. EMC-25, no. 1, pp. 13–24, Feb. 1983.
- [4] H.T. Friis, "A note on a simple Proc. IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, May 1946.
- [5] United States of America, "Path loss calculations for ultra-wideband signals in indoor environments," ITU-R Document 3K/30-E, pp. 1–14, Nov. 2003.
- [6] J. McLean, H. Foltz, and R. Sutton, "The quantitative assessment of the effects of dissipative loading on the ti

- [7] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' transmission formula for ultra-wideband systems," IEICE Tech. Rep., WBS2003-8/MW2003-20, May 2003.
- [8] S. Promwong, and J. Takada, "Free space link budget estimation scheme for ultra wideband impulse radio with imperfect antennas," IEICE Electronics Express, vol. 1, no. 7, pp. 188–192, July 2004.
- [9] J. Foerster, "Channel modeling sub-committee report final," IEEE P802.15-02/368r5-SG3a, Nov. 2002.
- [10] "Radio Frequency Devices," Part 15, Federal Communications Commission Rules, Dec. 2003.
- [11] W. Hirt and M. Weisenhorn, "Overview and implications of the emerging global UWB radio regulatory framework," in Proc. The 2006 IEEE Int. Conf. on Ultra-Wideband, pp. 581–586, Sept. 2006.
- [12] H.G. Schantz, "Dispersion and UWB antennas," Proc. 2004 Int. Workshop Ultra Wideband Syst. / Conf. Ultra Wideband Syst. Tech. (Joint UWBST & IWUWBS 2004), Kyoto, Japan, May 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสมศักดิ์ ชัยพงษ์
วัน เดือน ปีเกิด	12 สิงหาคม 2519
ที่อยู่	30/71 ซอย งามวงศ์วาน 54 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ประวัติการศึกษา	2544 วิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ประวัติการทำงาน	2547 Engineering บริษัทเนชั่นบรอดแคสติ้งคอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) 2558 Technical Manager บริษัทสปริงนิวส์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้