

การศึกษาของการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบความถี่กว้างยิ่ง  
ที่ประกอบไปด้วยหุ่นยนต์สำหรับระบบไร้สายระยะสั้น

A STUDY OF UWB PROPAGATION LOSS WITH ROBOTIC  
FOR SHORT-RANGE WIRELESS SYSTEMS

เสถียร บุญวิเศษ  
SATEAN BOONVISAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2638-5

การศึกษาของการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบความถี่กว้างยิ่ง  
ที่ประกอบด้วยหุ่นยนต์สำหรับระบบไร้สายระยะสั้น

A STUDY OF UWB PROPAGATION LOSS WITH ROBOTIC  
FOR SHORT-RANGE WIRELESS SYSTEMS

เสถียร บุญวิเศษ  
SATEAN BOONVISAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2638-5

**A STUDY OF UWB PROPAGATION LOSS WITH ROBOTIC  
FOR SHORT-RANGE WIRELESS SYSTEMS**

**SATEAN BOONVISAT**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2006**

**ISBN 974-15-2638-5**

**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาของการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบความถี่กว้างยิ่งที่ประกอบด้วยหุ่นยนต์สำหรับระบบไร้สายระยะสั้น
นักศึกษา	นายเสถียร บุญวิเศษ
รหัสประจำตัว	46064608
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ เราได้ศึกษาและวิเคราะห์การสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบกว้างยิ่งสำหรับระบบสื่อสารไร้สายระยะสั้น ซึ่งได้พิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากหุ่นยนต์และคุณสมบัติของสายอากาศที่มีผลต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งบนพื้นฐานของการวัดซึ่งได้ทำการวัดภายในอาคารตามรูปแบบการจำลองที่ได้กำหนดขึ้น ในการวัดแต่ละส่วนเรากำหนดลักษณะวิธีการวัดประกอบกับการใช้หุ่นยนต์จริง เพื่อทดสอบถึงผลที่เกิดขึ้นต่อช่องสัญญาณตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 กิกะเฮิร์ต ถึง 11 กิกะเฮิร์ต โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก และผลที่ได้จากการวัดจะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นที่จะแสดงให้เห็นถึงผลการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งอันเนื่องมาจากหุ่นยนต์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะนำมาทำการประเมินค่า ซึ่งสามารถนำรูปแบบการจำลองดังกล่าวไปพิจารณาในการที่จะออกแบบระบบเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงและทำให้มีผลกระทบกับระบบน้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์ในการนำระบบหุ่นยนต์มาใช้ร่วมกับช่องสัญญาณคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในอนาคต

<b>Thesis Title</b>	A Study of UWB Propagation Loss with Robotic for Short-Range Wireless Systems
<b>Student</b>	Mr. Satean Boonvisat
<b>Student ID.</b>	46064608
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Information Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Mr. Sathaporn Promwong

### **ABSTRACT**

In this thesis a study has been conducted to investigate UWB propagation loss with robotic for short-range wireless systems, and effects of robotic and antenna properties based on measurement. The measurements in an indoor environment were conducted. In respective parts of measuring, we stipulate the method of measurement incorporation with the use of a real robotic to investigate the effects occurring in the channel within the range of 3 to 11 GHz. In this research, a vector network analyzer is the main equipment for the measurement. The results are exploited to analyze the propagation loss showing the effect of UWB channel due to the robotic. The acquired analysis is subsequently evaluated. In the future, this research may be applied to design systems which can eliminate the adverse effects arising in collaborative uses of robotic and UWB radio channel, which would evidently bring in higher system performance.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา และคอยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย รวมทั้งตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จากท่านอาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ และหัวหน้ากลุ่มงานวิจัยที่ให้คำแนะนำ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคอยฝึกฝนอบรมสั่งสอนให้มีผู้วิจัยมีความสามารถในการทำวิจัยได้ดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชญ์ สุพรรณกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและแนะนำเกี่ยวกับการใช้งานด้านโปรแกรมต่างๆและที่คอยตรวจทานบทความงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เสมอมา

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำบทความตีพิมพ์และทุนสนับสนุนสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆเพื่อนๆที่แผนกวิศวกรรม บริษัท NHK SPRING (THAILAND) CO.,LTD. ทุกๆท่านที่คอยให้โอกาสช่วยเหลือและเป็นกำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ น้อง ๆ นักศึกษาห้องปฏิบัติการงานวิจัย UWB ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ทุกๆคนที่ช่วยเหลือในการทดลองและคำแนะนำต่างๆมาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณทุกๆท่านที่มีได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่คอยช่วยเหลือให้กำลังใจคอยดูแลห่วงใยเอาใจใส่ จนสามารถทำให้ผู้วิจัยต่อสู้กับอุปสรรคที่มากมายจนมาถึงวันนี้ได้

ขอขอบคุณสำหรับกำลังใจพิเศษ ที่ทำให้ผู้วิจัยต่อสู้กับอุปสรรคต่างๆจนมาถึงจุดนี้ได้ และได้รับมาเสมอจนถึงทุกวันนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ให้ชีวิตให้โอกาสและคอยดูแลให้กำลังใจให้คำปรึกษาอบรมสั่งสอนในทุกๆเรื่อง ในการดำเนินชีวิตมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยมาถึงวันนี้ได้ ถึงแม้วันนี้ บิดาท่านอาจจะไม่ได้ได้เห็นความสำเร็จที่ท่านรอคอยมาตลอดชีวิตแต่วันนี้ผู้วิจัยขอมอบความสำเร็จในครั้งให้กับท่านทั้งบิดาและมารดา ถ้าไม่มีท่านผู้วิจัยคงไม่มีวันนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เสถียร บุญวิเศษ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	6
2.1 กล่าวนำ.....	6
2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	9
2.2.1 ข้อดีของระบบแบบแถบกว้างยิ่ง.....	10
2.3 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	11
2.3.1 การใช้งานระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา.....	11
2.3.2 ข้อกำหนดของ FCC ที่มีต่อการแพร่กระจายกำลังงานของสเปกตรัม.....	13
2.4 รูปแบบของสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	14
2.4.1 คำจำกัดความของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	14
2.5 แบนด์วิดท์.....	14
2.6 การนำเทคโนโลยี UWB มาประยุกต์ใช้งาน.....	15

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1	โครงข่ายส่วนบุคคลไร้สายความเร็วสูง .....15
2.6.2	การเชื่อมโยงอินเทอร์เน็ตไร้สาย.....15
2.6.3	โครงข่ายไร้สายอัจฉริยะ .....16
2.6.4	โครงข่ายภายนอกแบบเพียร์ทูเพียร์.....16
2.7	สรุป.....16
บทที่ 3	ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ของระบบแถบกว้างยิ่ง.....17
3.1	กล่าวนำ.....17
3.2	ระบบการวัดช่องสัญญาณ.....17
3.2.1	การวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่.....18
3.2.2	การสัมประสิทธิ์การส่งผ่านช่องสัญญาณ.....19
3.2.3	ผลตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณ.....21
3.2.4	ผลตอบสนองอิมพัลส์ช่องสัญญาณ.....22
3.3	พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ช่องสัญญาณ.....23
3.3.1	การวิเคราะห์คุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยใช้หลักการของฟรีส.....23
3.3.2	แมตซ์ฟิวเตอร์ (Matched filter) .....25
3.3.3	การประวิงกำลังงานของช่องสัญญาณ (Power delay profile).....26
3.3.4	การเฉลี่ยของเวลาประวิง (Mean excess delay: $\tau_m$ ) และ การแผ่เวลาประวิง (RMS delay spread: $\tau_{rms}$ ) .....27
3.3.5	การสูญเสียกำลังงาน .....28
3.3.6	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....28
3.3.7	วิธีการประมาณค่าการถดถอยกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด หรือ Linear Least Square Regression .....29
3.4	สรุป.....32
บทที่ 4	การวัดและแบบจำลองการวัด.....33
4.1	กล่าวนำ.....33

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัด.....	33
4.2.1 เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์.....	33
4.2.2 สายอากาศแบบกรวยคู่.....	34
4.3 การทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณภายในอาคารรูปแบบที่ 1.....	37
4.3.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	37
4.3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	38
4.3.3 รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ส่ง.....	38
4.4 การทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 2 และ 3.....	42
4.4.1 ขั้นตอนการวัดในลักษณะอาคารแบบที่ 2.....	42
4.4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
4.4.3 รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ส่ง.....	43
4.4.4 ขั้นตอนการวัดในลักษณะอาคารแบบที่ 3.....	43
4.4.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	44
4.4.6 รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ส่ง.....	45
4.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธีการประเมินค่าของการสูญเสียในการแพร่ กระจายคลื่นย่านแถบความถี่กว้างยิ่งที่ประกอบด้วยหุ่นยนต์.....	45
4.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	45
4.5.2 การจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสอง แบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด.....	49
4.5.2.1 แบบจำลองของการถดถอยฟังก์ชัน โพลีโนเมียลกำลัง 2 (2-Degree polynomial regression model) .....	50
4.6 สรุป.....	51
บทที่ 5 ผลการทดลองวิจัย และการวิเคราะห์.....	52
5.1 กล่าวนำ.....	52
5.2 ผลการวิเคราะห์.....	52
5.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1.....	52

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.1.1	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1.....	53
5.2.1.2	การประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 .....	55
5.2.1.3	ความเพี้ยนของสัญญาณที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1.....	55
5.2.1.4	รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่ด้านรับที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 ...	56
5.2.1.5	การสูญเสียกำลังงานผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1.....	57
5.2.1.6	อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1...	58
5.2.2	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2.....	59
5.2.2.1	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 .....	60
5.2.2.2	การประวิงกำลังงานของสัญญาณผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 .....	63
5.2.2.3	ลักษณะการกระจายทางเวลาของสัญญาณผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 .....	64
5.2.2.4	อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 .....	66
5.2.3	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดภายในอาคารแบบที่ 3 .....	68
5.2.3.1	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 3 .....	69
5.2.3.2	อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 3 .....	72
5.3	ผลการประเมินค่าโดยใช้วิธีการปรับปรุงวิธีการวัด.....	73
5.3.1	ผลการประเมินค่าการการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบกว้างยิ่งที่ประกอบด้วยหุ่นยนต์โดยวิธีการปรับปรุงการวัดจากผลการวิเคราะห์ในอาคารแบบที่ 1.....	73
5.3.1.1	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด .....	73

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.1.2 การประวิงกำลังงานของสัญญาณผลการวัด ภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด.....	75
5.3.1.3 ความเพี้ยนของสัญญาณผลจากการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด.....	76
5.3.1.4 รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่ด้านรับผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด.....	77
5.3.1.5 การสูญเสียกำลังงานผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด.....	77
5.3.1.6 อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด.....	79
5.4 การประมาณค่าฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลโดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอย ของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด .....	80
5.4.1 ผลการประมาณฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลค่าอัตราการขยายจากผลการ วิเคราะห์ในอาคารแบบที่ 3 ในกรณี ที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์.....	81
5.4.2 ผลการประมาณฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลค่าอัตราการขยายจากผลการ วิเคราะห์ในอาคารแบบที่ 3 ในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ .....	82
5.5 สรุป.....	84
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะงานวิจัย.....	85
6.1 สรุปผลการวิเคราะห์ของสัญญาณกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์.....	85
6.2 ผลการจำลองชุดข้อมูลโดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอยกำลังสองแบบ เชิงเส้นที่น้อยที่สุดด้วยฟังก์ชัน โพลีโนเมียลจากการวัดภายในอาคารแบบที่ 3 .....	87
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก ก. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	96

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....	12
2.2 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....	12
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	38
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	44
5.1 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 .....	58
5.2 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 ในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างด้านส่งและด้านรับเท่ากับ 1 เมตร.....	66
5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 ในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างด้านส่งและด้านรับเท่ากับ 2 เมตร.....	67
5.4 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของสัญญาณระหว่างกรณีที่มีผลและไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ .....	72
5.5 ผลการประเมินค่าโดยใช้วิธีการปรับปรุงวิธีการวัดค่าการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1.....	79

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แบบแผนการศึกษาของงานวิจัย.....	4
2.1 Heinrich Rudoff Hertz ผู้ค้นพบระบบสื่อสารคลื่นวิทยุ.....	6
2.2 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์และการนำหุ่นยนต์มาใช้งานร่วมด้วย.....	8
2.3 ระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่ง.....	9
2.4 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของ ระบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคาร.....	13
2.5 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของ ระบบแถบกว้างยิ่งภายนอกอาคาร.....	13
3.1 ระบบการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่โดยเครื่อง VNA และการแปลงสู่โดเมนเวลาโดยใช้ IFFT.....	18
3.2 ไลอะแกรมโครงข่ายแบบ 2 พอร์ต.....	19
3.3 บล็อกไลอะแกรมของระบบ.....	22
3.4 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุต และเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่.....	22
3.5 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนเวลา.....	23
3.6 บล็อกไลอะแกรมของระบบการส่งสัญญาณที่ได้มีการเพิ่มเติม จากสมการการส่งผ่านของฟรีสและเพิ่มแมตซ์ฟิวเตอร์ทางด้านรับ เพื่อนำมาใช้ระบบเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....	24
4.1 เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ Vector Network Analyzer (VNA).....	34
4.2 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบกรวยคู่.....	35
4.3 ส่วนประกอบของสายอากาศแบบกรวยคู่.....	35
4.4 คุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่.....	36
4.5 ขนาดเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศแบบกรวยคู่.....	36
4.6 แบบจำลองของการทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1.....	37
4.7 การปรับการวัดของสายอากาศ.....	38
4.8 รูปแบบของสัญญาณพัลส์แถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ใช้ส่ง.....	39
4.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการวัดสัญญาณในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ ภายในอาคารแบบที่ 1.....	40

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 แผ่นป้องกันการสะท้อนที่ใช้ในการทดลองการวัดสัญญาณ	
ในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ภายในอาคารแบบที่ 1.....	40
4.11 การทดลองการวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ในมุม 90 องศา.....	41
4.12 การทดลองการวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ในมุม 100 องศา.....	41
4.13 แบบจำลองของการทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 2 .....	42
4.14 แบบจำลองของการทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 3 .....	44
4.15 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองภายในอาคารแบบที่ 1.....	45
4.16 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองภายในอาคารแบบที่ 2.....	46
4.17 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองภายในอาคารแบบที่ 3.....	46
4.18 การติดตั้งอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทดลองวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์	
ภายในอาคารแบบที่ 1 ในมุม 0 องศา.....	47
4.19 การติดตั้งอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทดลองวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์	
ภายในอาคารแบบที่ 1 ในมุม 5 องศา.....	47
4.20 การติดตั้งอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทดลองวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์	
ภายในอาคารแบบที่ 1 ในมุม 10 องศา.....	48
4.21 การติดตั้งอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทดลองวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์	
ภายในอาคารแบบที่ 1 ในมุม 90 องศา.....	48
4.22 การติดตั้งอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทดลองวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์	
ภายในอาคารแบบที่ 1 ในมุม 180 องศา.....	49
5.1 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศจากการวัดผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1...	53
5.2 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศจากการวัดผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 .....	54
5.3 การประวิงกำลังงานในแต่ละมุมจากการวัดภายในอาคารแบบที่ 1.....	54
5.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณในมุมต่างๆ เปรียบเทียบกัน	
จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1.....	55
5.5 รูปแบบสัญญาณด้านรับในมุมต่างๆ เปรียบเทียบกันจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1...	56
5.6 การสูญเสียกำลังงานของสัญญาณในมุมต่างๆจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 .....	57
5.7 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1.....	58
5.8 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 1 เมตร.....	60
5.9 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 1 เมตร.....	60
5.10 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 2 เมตร.....	61
5.11 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 2 เมตร.....	61
5.12 การประวิงกำลังงานในแต่ละมุมจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 1 เมตร.....	62
5.13 การประวิงกำลังงานในแต่ละมุมจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 2 เมตร.....	62
5.14 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเวลาประวิง และค่าการแผ่ประวิง ระหว่างระยะห่างด้านส่งกับด้านรับ 1 เมตร.....	63
5.15 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเวลาประวิง และค่าการแผ่ประวิง ระหว่างระยะห่างด้านส่งกับด้านรับ 2 เมตร.....	64
5.16 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผล การวัดภายในอาคารแบบที่ 2 ในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 1 เมตร .....	65
5.17 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผล การวัดภายในอาคารแบบที่ 2 ในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 2 เมตร .....	65
5.18 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัด ในกรณีที่ไม่แสดงผลกระทบจากหุ่นยนต์.....	68
5.19 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัด ในกรณีที่ไม่แสดงผลกระทบจากหุ่นยนต์.....	69
5.20 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัด ในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์.....	70
5.21 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัด	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์.....	70
5.22 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์.....	71
5.23 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์.....	71
5.24 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในอาคาร แบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด.....	74
5.25 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในอาคาร แบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด.....	74
5.26 การประวิงกำลังงานในแต่ละมุมจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด.....	75
5.27 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณในมุมต่างๆ เปรียบเทียบกันจากผลการวัด ภายในห้องแบบที่1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด .....	76
5.28 รูปแบบสัญญาณค้ำรับในมุมต่างๆ เปรียบเทียบกันจากผลการวัดภายในห้องแบบที่1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด .....	77
5.29 การสูญเสียกำลังงานของสัญญาณในมุมต่างๆผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด.....	78
5.30 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด.....	78
5.31 แบบจำลองเชิงเส้นของอัตราการขยายของสัญญาณที่ระยะทางต่าง ๆ กรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์.....	82
5.32 แบบจำลองเชิงเส้นของอัตราการขยายของสัญญาณที่ระยะทางต่าง ๆ กรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์.....	83

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

คณะกรรมการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission)	FCC
โดเมนความถี่ (Frequency Domain)	FD
ช่องทางเพื่อการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ทั่วไป (General Purpose Interface Bus)	GPIB
สถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers)	IEEE
ฟูรีเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform)	IFFT
สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union)	ITU
ระดับแนวสายตา (Line of Sight)	LOS
คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)	PC
ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (Power Delay Profile)	PDP
การมอดูเลตทางตำแหน่งของพัลส์ (Pulse Position Modulation)	PPM
โดเมนเวลา (Time Domain)	TD
ระบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wide Band)	UWB
เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย (Vector Network Analyzer)	VNA
แอมแปร์ (Ampere)	<i>A</i>
เดซิเบล (Decibel)	<i>dB</i>
เฮิรตซ์ (Hertz)	<i>Hz</i>
กิกะเฮิรตซ์ (Gigahertz)	<i>GHz</i>
เมตร (meter)	<i>m</i>
วินาที (Second)	<i>s</i>
นาโนวินาที (Nanosecond)	<i>ns</i>
วัตต์ (Watt)	<i>W</i>
มิลลิวัตต์ (Milliwatt)	<i>mW</i>
สัดส่วนแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth)	$B_f$
ความเร็วแสง (Velocity of light), $c = f\lambda = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \approx 3 \times 10^8, m/s$	<i>c</i>
ระยะทาง (Distance), <i>m</i>	<i>d</i>
ความถี่ (Frequency), <i>Hz</i>	<i>f</i>

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ค่าความถี่บนของระบบการสื่อสาร	$f_H$
ค่าความถี่ล่างของระบบการสื่อสาร	$f_L$
อัตราขยายของสายอากาศรับ (Receiver gain), $dB$	$G_R$
อัตราขยายของสายอากาศส่ง (transmitter gain), $dB$	$G_T$
ฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency transfer function)	$H(\omega)$
กำลังงานที่รับได้ (Receive power), $W$	$P_R$
กำลังงานที่ส่ง (Transmitt power), $W$	$P_T$
เครื่องรับ (Receiver)	Rx
สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient)	$s_{21}$
เวลา (Time), $s$	$t$
เครื่องส่ง (Transmitter)	Tx
ค่าคงที่การลดทอน (Attenuation constant), $Np \cdot m^{-1}$ หรือ $dB \cdot m^{-1}$	$\alpha$
ความยาวคลื่น (Wavelength), $m$	$\lambda$
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)	$\epsilon_r$
ความซึมซาบได้ (Permeability), $\mu = \mu_0 \mu_r, Hm^{-1}$	$\mu$
ความซึมซาบได้ของอวกาศว่าง (Permeability of free space), $\mu_0 \approx 400\pi \times 10^{-9}, Hm^{-1}$	$\mu_0$
ค่าเฉลี่ยเวลาประวิง (Mean excess delay), $s$	$\tau_m$
ค่าการแผ่ประวิง (RMS delay spread), $s$	$\tau_{rms}$
ฟังก์ชันสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)	$\rho(d)$

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอนาคตหุ่นยนต์จะสามารถนำมาใช้งานในการอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันของมนุษย์ได้มากขึ้น โดยในปัจจุบันนี้หุ่นยนต์ได้ถูกนำมาใช้ในงานที่เสี่ยงอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ งานบางอย่างที่มนุษย์ไม่สามารถทำได้ ซึ่งในงานบางอย่างนั้นจำเป็นต้องมีระบบการสื่อสารแบบไร้สายเข้ามาเกี่ยวข้องช่วยในการควบคุมหรือบังคับตัวหุ่นยนต์ รวมไปถึงส่งข้อมูลไปมาระหว่างส่วนที่ทำหน้าที่ในการควบคุมและตัวหุ่นยนต์ด้วย

ปัจจุบันเทคโนโลยีสื่อสารแบบไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในวงการสื่อสารมากขึ้น เพื่อเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างๆภายในอาคาร ภายในสำนักงาน หรือแม้กระทั่งภายในบ้าน ซึ่งเป็นระบบการสื่อสารไร้สายระยะสั้นที่มีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูงเพื่อรองรับระบบต่างๆ เช่น ระบบมัลติมีเดีย และรองรับการใช้งานในการที่จะใช้งานหลายๆ ผู้ใช้งานพร้อมๆ กัน โดยความต้องการเหล่านี้เทคโนโลยีที่สามารถรองรับความต้องการเหล่านี้และมีแนวโน้มว่าเทคโนโลยีไร้สายที่เรียกว่าแถบกว้างยิ่งหรืออูลตราไวด์แบนด์ (Ultra - wideband;UWB) จะถูกนำมาใช้งานในอนาคตอันใกล้ โดยการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั้นนับได้ว่าเป็นวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารไร้สาย โดยมีการใช้แถบความถี่ในการส่งที่กว้างมาก ประกอบกับใช้กำลังส่งที่น้อยจึงถือว่าเป็นข้อดีของระบบนี้ และในอนาคตอาจจะมีการนำระบบสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งมาใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีหุ่นยนต์ในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น ใช้ในการติดต่อสื่อสารในการควบคุมหุ่นยนต์ ใช้ในการส่งข้อมูลระหว่างหุ่นยนต์กับอุปกรณ์อื่นๆ เป็นต้น แต่ในการนำมาใช้งานจริงนั้นต้องคำนึงถึงผลกระทบของช่องสัญญาณที่จะเกิดขึ้นด้วยในการนำระบบสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งมาใช้งานในการควบคุมหรือส่งข้อมูลกับเทคโนโลยีหุ่นยนต์

จากปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จึงได้เสนอวิธีการที่จะมาช่วยในการวิเคราะห์ศึกษาหาค่าผลกระทบในกรณีที่เกิดการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบกว้างยิ่ง โดยได้นำหลักการคำนวณตามสมการของการส่งผ่านของฟรีส ( Friis' transmission formula ) [1] และรวมถึงได้มีการขยายสมการของฟรีส (Extension of Friis') [2] เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณด้วย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นในย่านแถบกว้างยิ่งในกรณีที่สายอากาศด้านรับติดตั้งกับหุ่นยนต์และผลกระทบที่เกิดจากตัวหุ่นยนต์ รวมไปถึงคุณสมบัติของสายอากาศที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งบนพื้นฐานของการวัดแล้วนำเอาผลที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบกว้างยิ่งที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์
2. เพื่อสามารถที่จะนำผลจากการวิจัย และผลจากการวิเคราะห์มาทำการประเมินค่าตามแบบจำลองในกรณีที่จะนำผลจากการวิเคราะห์มาทำการพิจารณาประยุกต์ใช้งาน
3. เพื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาออกแบบระบบหุ่นยนต์กับการสื่อสารไร้สายย่านแถบกว้างยิ่ง เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในการประยุกต์ใช้งานของระบบการควบคุมหุ่นยนต์ และการสื่อสารไร้สายสำหรับงานอุตสาหกรรมในอนาคตต่อไป

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่และส่งข้อมูลเป็นสัญญาณพัลส์ ซึ่งในการส่งสัญญาณนั้นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจะเป็นลักษณะของคลื่นความถี่ส่งออกจากสายอากาศด้านรับซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดการสูญเสีย เกิดการลดทอน เกิดการจางหาย เกิดการสะท้อนหรือการหักเหของสัญญาณได้ ซึ่งที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อระบบโดยตรงต่อคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปัญหาเหล่านี้คือ สภาพแวดล้อมที่อยู่รอบข้างในระบบการส่งสัญญาณ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาดังผลกระทบในการที่จะนำระบบการควบคุมหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันและลักษณะการใช้งานที่ต่างกันออกไป เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์ว่ามีผลกระทบเป็นอย่างไรต่อช่องสัญญาณแล้วจะเก็บผลจากการทดลองวิจัยเพื่อนำมาทำการปรับปรุงและหลีกเลี่ยงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นให้เหมาะสมกับการใช้งานและสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบกว้างยิ่งในกรณีที่สายอากาศด้านรับติดตั้งกับหุ่นยนต์ที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณและสัญญาณทางภาครับ ซึ่งจะพิจารณาบนพื้นฐานของการวัดสัญญาณจริง โดยการวัดนั้นได้ใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer) โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว (Omni-directional) ทำการวัดตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 – 11 GHz ครอบคลุมช่วงความถี่ที่กำหนดให้ใช้งานในการสื่อสาร คือตั้งแต่ 3.1 – 10.6 GHz ซึ่งถูกกำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communication Commission :

FCC) [3] ซึ่งในขั้นตอนของการวัดนั้นได้ทำการวัดสัญญาณภายในอาคารทั้งหมด โดยทำการกำหนดเงื่อนไขและพารามิเตอร์ต่างๆ ในการวัดนั้นได้ติดตั้งอุปกรณ์ให้ใกล้เคียงกับการนำมาใช้งานจริงมากที่สุดและนำมาวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีและหลักการของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณจากสมการการส่งผ่านของฟรีส รวมไปถึงวิธีการขยายเพิ่มเติมจากสมการการส่งผ่านของฟรีส เพื่อการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งของสัญญาณทางด้านรับว่ามีผลกระทบทำให้สัญญาณเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่อย่างไรแล้วทำการประเมินค่าจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

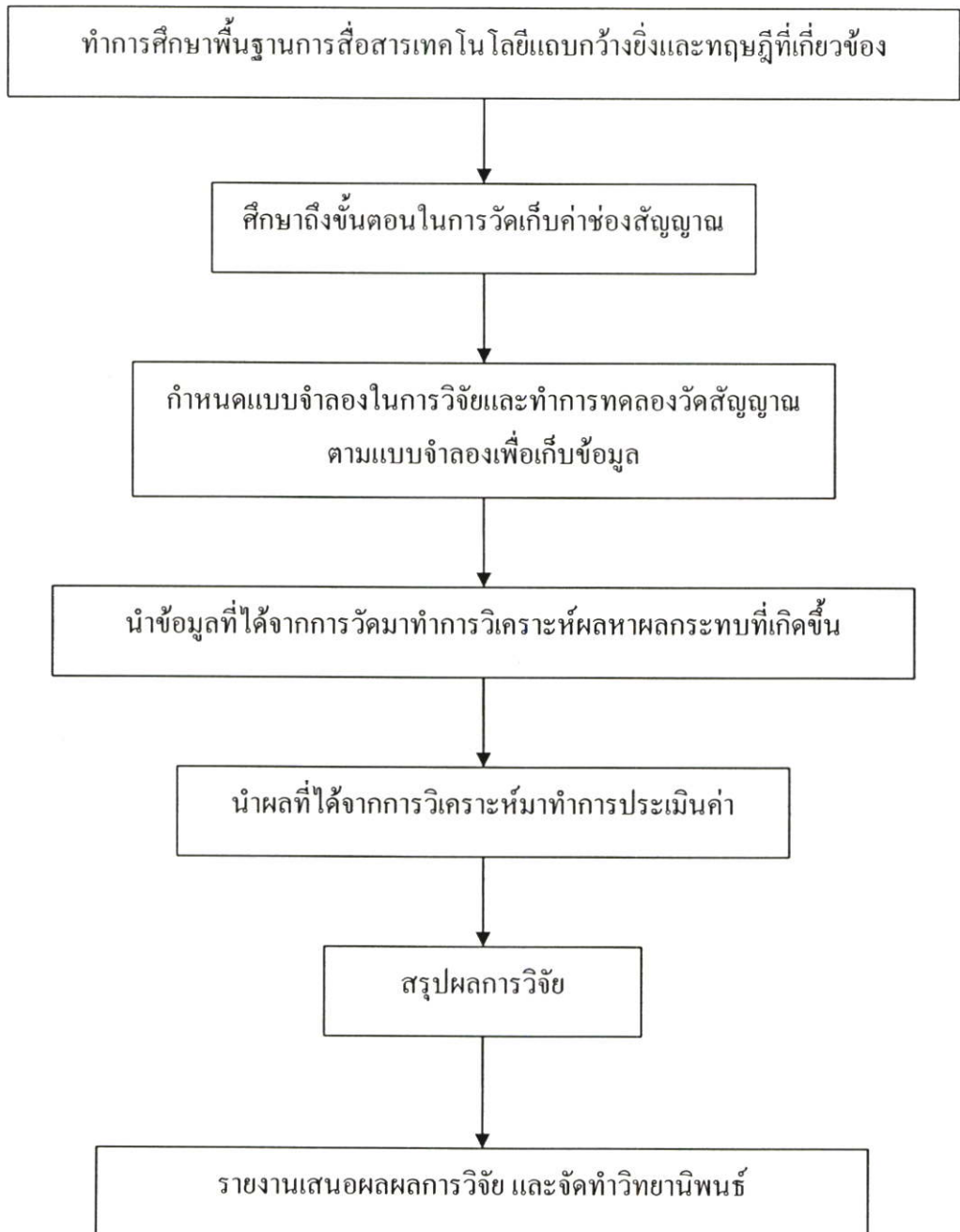
วิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของการที่จะนำหุ่นยนต์มาใช้ร่วมกับระบบสื่อสารแบบไร้สายที่มีผลต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง โดยในการวิเคราะห์ได้นำทฤษฎีและหลักการในการวิเคราะห์ช่องสัญญาณโดยสมการการส่งผ่านของฟรีส โดยวิเคราะห์จากผลการวัดภายในอาคาร ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวจะแสดงในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อค่าการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้างยิ่ง อันประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ค่าความสัมพันธ์ของอัตราขยาย ค่าการกระจายทางเวลา ค่าความผิดเพี้ยน และค่าการลดทอนของกำลังงานของสัญญาณ โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ในระยะต่างๆ และมุมต่างๆ ตามลักษณะแบบจำลองต่างๆ สุดท้ายจะนำผลที่เกิดขึ้นไปทำการประเมินค่าของการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นในย่านแถบความถี่กว้างยิ่งที่มีผลกระทบมาจากตัวหุ่นยนต์

### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

จากแนวคิดและหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นนั้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการศึกษาสำหรับวิทยานิพนธ์ดังนี้ เริ่มจากศึกษาถึงที่มาและข้อดีของระบบแถบกว้างยิ่ง แล้วศึกษาขั้นตอนในการวัดเก็บค่าช่องสัญญาณรวมถึงอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้และรูปแบบวิธีการวัดโดยยึดหลักตามลักษณะการนำไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมจริง จากนั้นจึงทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่จะสามารถแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณอันประกอบไปด้วย พารามิเตอร์ที่แสดงให้เห็นถึงค่าความสัมพันธ์ของอัตราขยาย ค่าการกระจายทางเวลาของสัญญาณ ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณและค่าการลดทอนของกำลังงานของสัญญาณที่ได้รับ ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ถือเป็นปัจจัยหลักในการวิเคราะห์ช่องสัญญาณ จากนั้นจะเป็นขั้นตอนในการศึกษาถึงวิธีการทดลองและวิเคราะห์ผล แล้วทำการปรับปรุงสภาพแวดล้อมในการวัดช่องสัญญาณอีกครั้ง เพื่อให้ค่าที่ได้จากผลการทดลองได้ค่าที่ดีที่สุด

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้วิธีการดังกล่าวนี้เพื่อประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากช่องสัญญาณ แล้วนำผลการทดลองวิจัยที่ได้มาสรุปผลวิจารณ์ผลการทดลองและเรียบเรียงเขียนเป็นวิทยานิพนธ์

โดยในการทำวิทยานิพนธ์มีแบบแผนงานและขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้



รูปที่ 1.1 แบบแผนการศึกษาของงานวิจัย

ในแต่ละส่วนของเนื้อหาวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็นบทต่างๆ ได้ดังนี้ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการทำวิจัยและแบบแผนในการศึกษาและดำเนินงานวิจัย โดยได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 1 ส่วนในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง โดยแบ่งออกเป็นความเป็นมาของระบบแถบกว้างยิ่ง ข้อกำหนดต่างๆ ของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง รวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง เพื่อที่จะใช้ประกอบในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนในบทที่ 3 จะได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยการวัดช่องสัญญาณของการสื่อสารย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง เช่น การวิเคราะห์คุณลักษณะของช่องสัญญาณโดยใช้หลักการของฟรีส อัตราการขยายของสัญญาณ ค่าการประวิงกำลังงาน เป็นต้น และบทที่ 4 จะได้กล่าวถึงการวัดช่องสัญญาณและการออกแบบการวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง โดยจะแบ่งได้คือ การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด สายอากาศที่ใช้ในการวัดและทดสอบ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดในการวัด และรูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์ สำหรับบทที่ 5 จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการวิจัย อีกทั้งได้ทำการวิเคราะห์สัญญาณและสรุปผลการวิจัยของการวัดคลื่นสัญญาณ สุดท้ายจะกล่าวถึงผลของการวิเคราะห์ และผลจากการประเมินค่าโดยวิธีการปรับปรุงการวัดและสภาพแวดล้อม ส่วนในบทสุดท้ายบทที่ 6 จะได้กล่าวสรุปผลจากการวิจัยและข้อเสนอแนะของการศึกษาวิจัยที่ได้ทำมานี้ โดยได้สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงกับช่องสัญญาณ ในการนำหุ่นยนต์มาใช้งานร่วมกับระบบเทคโนโลยีแถบความถี่กว้างยิ่งและประเมินผลของการทำวิจัยนี้ รวมไปถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการที่จะนำวิทยานิพนธ์นี้ไปพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

# ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

### 2.1 กล่าวนำ

คลื่นวิทยุ (Radio frequency, RF) ได้มีการค้นพบทางทฤษฎีโดย James Clerk Maxwell ใน ค.ศ. 1864 กล่าวไว้ว่า คลื่นวิทยุ คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง ต่อมาในปี ค.ศ. 1877 Heinrich Hertz ได้ทำการทดลองและพิสูจน์ให้เห็นว่าคลื่นวิทยุมีจริง หลังจากนั้นก็ได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับคลื่นวิทยุ และการกระจายคลื่นวิทยุให้ก้าวหน้าต่อไปในปัจจุบัน



รูปที่ 2.1 Heinrich Rudoff Hertz ผู้ค้นพบระบบสื่อสารคลื่นวิทยุ

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั้นได้เกิดขึ้นในปี 1901 โดยที่ มาร์คโอนิ (Marconi) ได้ทดลองสาธิตใช้เครื่องส่งสัญญาณวิทยุสปาร์กแก๊ป (Spark gap) ในการส่งสัญญาณวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติก และหลังจากนั้นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ก็ได้ถูกนำมาใช้สำหรับทางการทหารของกองทัพสหรัฐฯ ในปี 1960-1990 จากนั้นจึงได้พบว่าเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งนี้เหมาะที่จะนำมาใช้กับการสื่อสารของระบบเรดาร์และการติดต่อสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยสูง และในเดือนพฤษภาคมปี ค.ศ 2000 ทางคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้ออกหนังสือ Notice of Proposed Rule Making (NPRM) ซึ่งเป็น

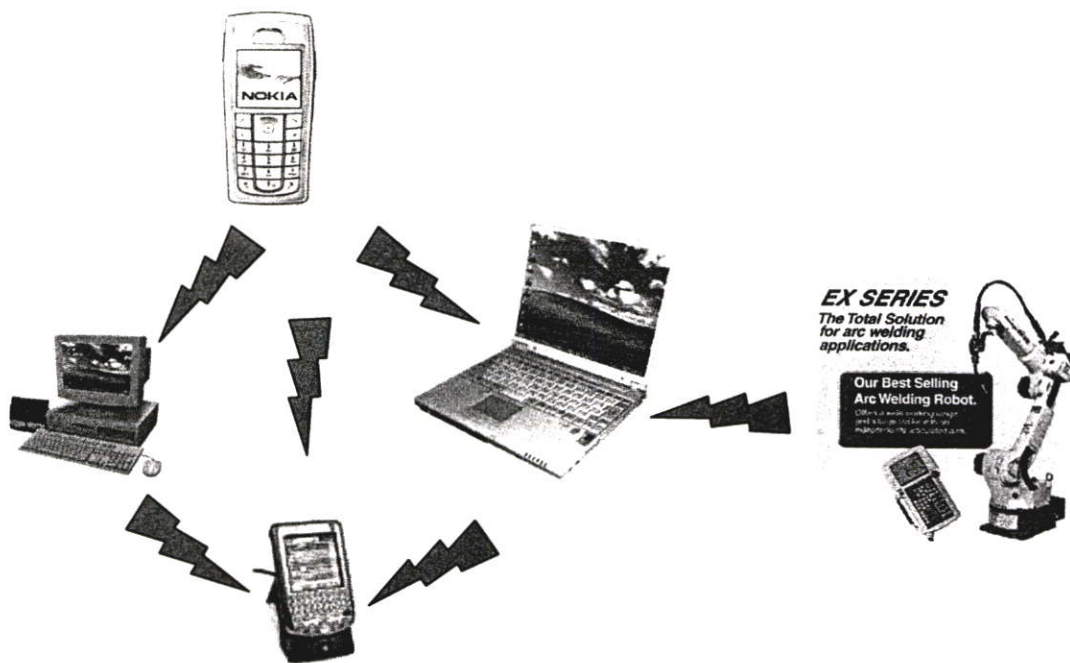
การเสนอให้หน่วยงานต่าง ๆ แสดงข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ปรับปรุงแก้ไขกฎข้อบังคับของ FCC เพื่อควบคุมดูแลระบบแถบกว้างยิ่งให้มีความชัดเจนและเป็นประโยชน์มากที่สุด โดยข้อบังคับนี้ได้ถูกนำออกมาใช้งานเมื่อเดือนปี ค.ศ 2002

ในยุคปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายนั้นได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น ซึ่งในอนาคตอันใกล้เพื่อเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภายในอาคาร ภายในสำนักงานหรือภายในบ้าน ซึ่งเป็นระบบการสื่อสารไร้สายระยะสั้นที่มีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูงเพื่อรองรับระบบมัลติมีเดียและด้านอื่นๆอีก และมีแนวโน้มว่าเทคโนโลยีไร้สายที่เรียกว่าแถบกว้างยิ่งหรือ UWB จะถูกนำเข้ามาใช้งานแทนเทคโนโลยีเดิมๆ โดยแนวโน้มที่ผลักดันให้มีการนำระบบสื่อสารไร้สายระยะสั้นแบบแถบกว้างยิ่งเข้ามาใช้งานอย่างกว้างขวาง ก็คือ การใช้งานสเปกตรัมความถี่ที่มีในปัจจุบันเกิดความคับคั่งมากไม่เพียงพอสำหรับใช้งาน เกิดมีความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับการสื่อสารข้อมูลไร้สายที่มีความต้องการแบนด์วิดท์ที่สูงขึ้น แต่มีราคาที่ถูกลง และมีการใช้กำลังงานที่ต่ำ มีอัตราการเจริญเติบโตและความต้องการใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงในหน่วยงานและองค์กรต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเกิดการใช้กำลังงานที่ลดลงของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจึงทำให้หลายหน่วยงานหันมาทำการศึกษาและวิจัยถึงผลกระทบต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นกันมากยิ่งขึ้น

ระบบแถบกว้างยิ่งมีข้อดีที่เหนือกว่าระบบสื่อสารไร้สายระยะสั้นแบบอื่น ๆ ตรงที่สามารถตอบสนองกับแนวโน้มที่เกิดในอนาคตได้ดีกว่า โดยการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั้นนับได้ว่าเป็นวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารไร้สาย โดยมีการใช้แถบความถี่ในการส่งที่กว้างมาก ประกอบกับใช้กำลังส่งที่น้อย สัญญาณของระบบแบบแถบกว้างยิ่งนั้นมีความแตกต่างกับระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน 2 ประการคือ การส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นจะทำการส่งสัญญาณในลักษณะที่เป็นอิมพัลส์ โดยไม่มีการนำเอาสัญญาณข้อมูลไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาห้ อีกประการหนึ่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจะใช้แบนด์วิดท์ในการส่งมากกว่า 25 % ของแถบความถี่กลาง ซึ่งจะพบว่ามีค่ามากกว่าแถบความถี่ของระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเอาเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งนี้มาใช้กับระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) โดยจะเป็นลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ อาทิเช่น กล้องถ่ายภาพดิจิทัล วีดีโอโปรเจคเตอร์ คอมพิวเตอร์ฯลฯ ซึ่งจะเป็นการเชื่อมต่อที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงประมาณ 110 Mb/s ในระยะทาง 10 เมตรและมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นในระยะทางที่สั้นลง

ในการใช้งานจริงของระบบแถบกว้างยิ่งนี้จะมีลักษณะการนำไปใช้ภายในอาคาร ซึ่งมักจะมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณในการสื่อสาร เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ในสำนักงาน ผนัง กำแพง ประตู เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอีกหลายๆ ปัจจัยซึ่งสามารถที่จะส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งได้เช่นกัน โดยมีหัวข้อที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งคือ เมื่อเรา

นำระบบสื่อสารไร้สายมาใช้งานกับอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ อาทิเช่น หุ่นยนต์เพราะมีความเป็นไปได้ที่ในอนาคตหุ่นยนต์จะสามารถนำมาใช้งานเพื่ออำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันของมนุษย์ และเมื่อนำมาใช้งานแล้วก็จะไปรบกวนหรือบดบังเส้นทางการเดินทางของคลื่น ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั้น ส่งผลอย่างไรต่อช่องสัญญาณในการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง



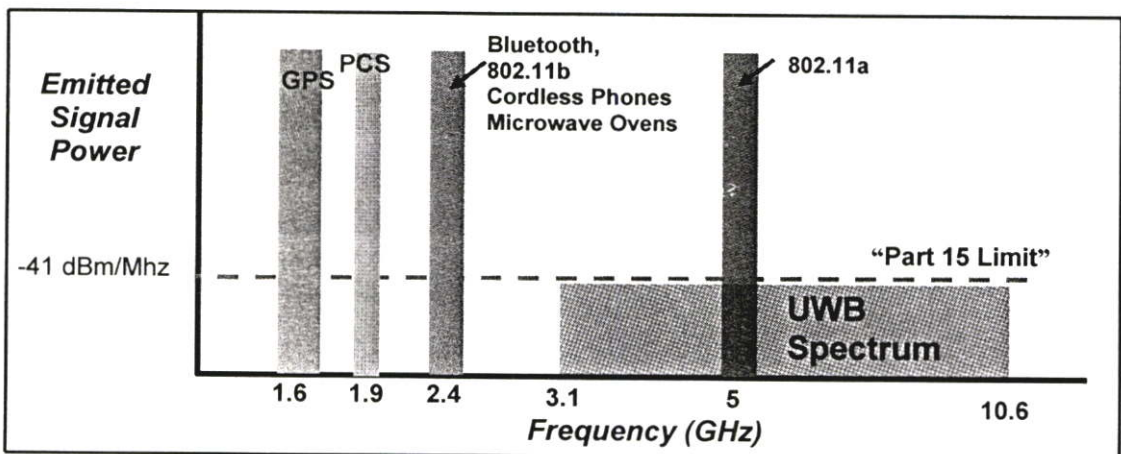
รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์และการนำหุ่นยนต์มาใช้งานร่วมด้วย

จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อแบบไร้สายของอุปกรณ์ต่างๆ และอนาคตจะมีการนำหุ่นยนต์มาใช้งานร่วมด้วยในการส่งข้อมูลต่างๆ เช่น ภาพและเสียง รวมไปถึงการส่งงาน หุ่นยนต์ เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งเป็นวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารไร้สายยุคใหม่ โดยมีการใช้แถบความถี่ในการส่งที่กว้างมากและใช้กำลังส่งที่ต่ำมากเพื่อรองรับการใช้งานด้านต่างๆ ในอนาคตโดยทาง FCC ได้กำหนดแถบความถี่ที่ใช้ในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งไว้ที่ 3.1 - 10.6 GHz ซึ่งมีแบนวิดท์ทั้งหมดเท่ากับ 7.5 GHz และเนื่องจากระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งใช้แถบความถี่ที่กว้างมาก โดยที่แถบความถี่ที่ใช้นั้นได้มีการทับซ้อนกับระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบที่มีอยู่ในปัจจุบันบางระบบ ทาง FCC จึงได้กำหนดระดับของความหนาแน่นของกำลังส่งต่อความถี่ในการส่งสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งไว้ในช่วง -41.3 dBm/MHz ทำให้ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งมีความหนาแน่นของกำลังงานของสัญญาณต่อความถี่ที่ต่ำ ส่งผลให้สัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจากระบบอื่น

มาก ด้วยสาเหตุนี้จึงได้มีการนำเสนอผลการวิจัยทางวิชาการต่างๆ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในการนำระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งมาใช้งานและเพื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดีขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากหุ่นยนต์ที่มีต่อช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะกล่าวถึงในบทต่อไป โดยที่ในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการพื้นฐานและข้อกำหนดต่างๆ ของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

## 2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ระบบแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ได้รับการกำหนดให้อยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.3a โดยมีย่านความถี่ที่ถูกกำหนดโดย Federal Communications Commission (FCC) อยู่ที่ 3.1 - 10.6 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่เดียวกันกับการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยจุดเด่นของระบบแบบแถบกว้างยิ่งก็คือ สัญญาณของระบบแบบกว้างยิ่งจะเป็นสัญญาณพัลส์ (Pulse) โดยจะเป็นพัลส์แคบๆ จึงทำให้มีความหนาแน่นแถบความถี่ที่กว้างมาก ดังนั้นจึงแผ่กระจายครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้างมากถึงระดับกิกะเฮิร์ต (GHz) เป็นระบบสื่อสารที่ไม่ต้องใช้คลื่นพาหะ และเนื่องด้วยระบบแถบกว้างยิ่งนี้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงทำให้สามารถที่จะรองรับอัตราการส่งข้อมูลได้สูงถึง 110 Mb/s ในระยะทางประมาณ 10 เมตร และ 480 Mb/s ที่ระยะทางประมาณ 2 เมตร ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าสัญญาณพัลส์ที่ใช้มีขนาดที่แคบมากจึงทำให้ช่วงใช้งานมีค่าต่ำจึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบนี้มีการใช้กำลังที่ต่ำลงไปด้วยในรูปแบบที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่งโดยเปรียบเทียบกับระบบอื่น ๆ เช่นระบบ GPS ที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.3 ระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่ง

จากรูปที่ 2.3 หากเปรียบเทียบระบบเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งกักระบบอื่นๆแล้วจะเห็นได้ว่าระบบแถบกว้างยิ่งนั้นจะมีการใช้กำลังงานที่ต่ำกว่าระบบอื่นๆ และยังสามารถเห็นได้ว่ามีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากๆ จึงทำให้ระบบแถบกว้างยิ่งนี้มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ ทั้งด้านมีแบนด์วิดท์ที่กว้าง มีการใช้พลังงานที่ต่ำกว่า รวมไปถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลทะลุทะลวงผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ โดยระบบแถบกว้างยิ่งจะมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงกว่าระบบอื่นๆดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

### 2.2.1 ข้อดีของระบบแบบแถบกว้างยิ่ง

ถ้าจะกล่าวถึงระบบแถบกว้างยิ่งเป็นระบบที่มีจุดเด่นที่น่าสนใจสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารอาทิเช่น

ระบบแถบกว้างยิ่งเป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อยจึงมีค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบที่ต่ำ ระบบแถบกว้างยิ่งมีการส่งสัญญาณซึ่งไม่เหมือนกับระบบการส่งสัญญาณวิทยุแบบอื่นๆ คือที่เครื่องส่งจะทำการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณที่แคบมากๆ ในโดเมนทางเวลาซึ่งสามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นออกไปโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยคลื่นพาหะจึงทำให้ลดความซับซ้อนของระบบและต้นทุนในการผลิตลงไปมาก

ระบบแถบกว้างยิ่งนั้นมีความหนาแน่นของพลังงานที่ต่ำและสัญญาณที่ใช้ส่งก็มีพลังงานที่ต่ำ จึงทำให้สัญญาณที่ใช้ส่งออกไปนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน ซึ่งทำให้การส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นไม่ก่อให้เกิดผลกระทบการแทรกสอดของสัญญาณต่อระบบคลื่นความถี่วิทยุอื่นๆ เนื่องจากสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งนั้นมีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับของสัญญาณรบกวน จึงทำให้ระบบอื่นๆ มองว่าสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนี้คือ สัญญาณรบกวน

ในระบบแถบกว้างยิ่งนั้นทำการมอดูเลตทางเวลา (Time modulation) ซึ่งจะสามารถทำการส่งข้อมูลด้วยความเร็วที่สูงได้ และจากการมอดูเลตทางเวลาทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่มีนั้นมีความต้านทานต่อการแพร่กระจายของคลื่นหลายวิธีที่สูง และต้านทานจากการรบกวนหรือแทรกสอดจากสัญญาณความถี่อื่นๆ ได้ดี

ด้วยพัลส์ที่มีลักษณะทางโดเมนเวลาที่แคบมากๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากๆ นั้นหมายถึง ระบบคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมจังหวะและค่านวนเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่าระบบดาวเทียมบอกพิกัดและระบบคลื่นวิทยุแบบอื่นๆ อีกทั้งด้วยคุณสมบัติในการทะลุผ่านวัสดุต่างๆ ได้ดีเนื่องจากมีย่านความถี่ที่สูง จึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่มีการมอดูเลตทางเวลาถูกนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ระยะสั้น เช่นในการช่วยชีวิตและปฏิบัติการป้องกันอาชญากรรม และในงานที่อำนวยความสะดวกในด้านอื่นๆ ได้

## 2.3 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ข้อกำหนดที่สำคัญที่ได้ถูกกำหนดขึ้นมาใช้ในการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งคือการจัดสรรความถี่ในการใช้งานเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันกับระบบเดิมที่มีใช้อยู่ ซึ่งในแต่ละประเทศได้มีการกำหนดกฎข้อบังคับในการใช้งานของระบบแถบกว้างยิ่งตามความเหมาะสมของกิจการโทรคมนาคมของประเทศนั้นๆ อาทิเช่น ประเทศสิงคโปร์ ประเทศญี่ปุ่นและอีกหลายๆประเทศที่กำลังพัฒนา ได้มีกลุ่มทำงานในสหรัฐอเมริกาได้พยายามทำการถอดถอนการจำกัดของข้อกำหนดในการใช้งานช่วงความถี่ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจากกฎข้อบังคับเดิมของคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา โดยกลุ่มคณะทำงานนี้ใช้ชื่อว่า Ultra-Wideband Working Group (UWBWG) เพื่อทำการเจรจาหาข้อตกลงร่วมกับ FCC ในส่วนของประเทศในแถบยุโรปก็ได้มีการหาข้อตกลงการจัดสรรคลื่นความถี่และการแทรกสอดของความถี่วิทยุโดยในปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดแถบความถี่ที่ชัดเจนสำหรับการใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่งในสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standards Institute : ETSI) หรือ สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union : ITU)

### 2.3.1 การใช้งานระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา

ในปี ค.ศ. 1998 ทาง FCC ได้ออกประกาศเกี่ยวกับการตรวจสอบหรือ Notice of Inquiry (NOI) โดยถึงแม้ว่าจะได้ดำเนินถึงผลกระทบในการใช้งานของระดับกำลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณให้มีระดับต่ำมาก ๆ แล้วก็ตาม ยังมีกลุ่มผู้ที่สนับสนุนหรือเสียผลประโยชน์จากการใช้งานในระบบเดิมได้ทำการต่อต้านการนำระบบแถบกว้างยิ่งมาใช้งานสำหรับการสื่อสารโดยทั่วไปซึ่งหัวข้อการเรียกร้องโดยมากจะเกี่ยวกับอนาคตของการนำมาใช้งานและการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดในแถบความถี่ที่มีอยู่ อาทิเช่น แถบความถี่ที่สำรองไว้ต่างๆ แถบความถี่ในการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ และระบบ GPS และ สำหรับลักษณะสัญญาณที่จะนำมาใช้ จึงได้มีหน่วยงานหนึ่งที่ชื่อว่า DARPA (Defense Advanced Research Project Agency) ทำการออกข้อกำหนดฉบับที่หนึ่งสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งอยู่บนพื้นฐานอัตราส่วนแบนด์วิดท์  $B_f$  ของสัญญาณโดยต้องมีค่ามากกว่า 0.25 โดยสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ 2.1 คือ

$$B_f = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (2.1)$$

โดยที่  $f_L$  คือ ความถี่ต่ำสุดและ  $f_H$  คือความถี่สูงสุดของแถบความถี่ระบบแถบกว้างยิ่ง

เมื่อเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้ถูกเสนอสำหรับการนำมาใช้ในกิจการการสื่อสารของพลเรือน ซึ่งยังไม่ได้มีการกำหนดใดๆ สำหรับลักษณะสัญญาณที่จะนำมาใช้ วันที่ 14 กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 FCC ได้มีกฎสำหรับระบบแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง และอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในทางการค้าได้ โดยได้ประกาศระเบียบการฉบับที่หนึ่งในวันที่ 22 เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2002 และได้มีการอนุญาตใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่งและการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายพลังงานสำหรับการใช้งานในประเภทต่าง ๆ และข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC ได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1 สำหรับใช้ในการสื่อสารข้อมูลของระบบแถบกว้างยิ่งทั้งภายในและภายนอกอาคาร

**ตารางที่ 2.1** ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร

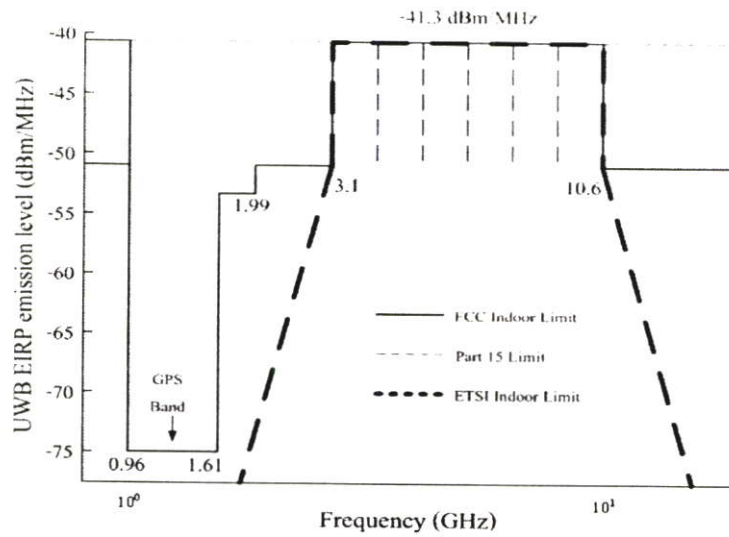
ความถี่ [MHz]	ภายในอาคาร	ภายนอกอาคาร
	EIRP in dBm	EIRP in dBm
960 – 1610	-75.3	-75.3
1610 – 1990	-53.3	-63.3
1990 - 3100	-51.3	-61.3
3100 - 10600	-41.3	-41.3
สูงกว่า 10600	-51.3	-61.3

### 2.3.2 ข้อกำหนดของ FCC ที่มีต่อการแพร่กระจายกำลังงานของสเปกตรัม

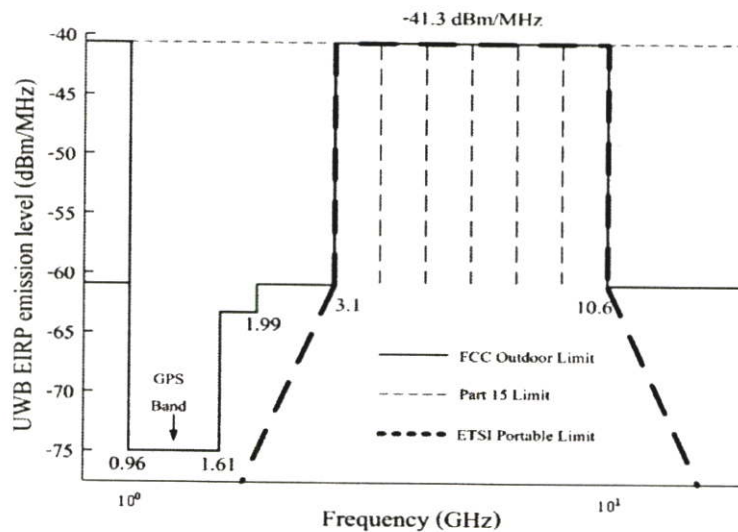
ข้อกำหนดระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรปนั้นยังไม่ชัดเจนแต่บางส่วนของข้อกำหนดจะค่อนข้างรัดกุมกว่าทางสหรัฐอเมริกา ซึ่งข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย ITU หรือ ETSI จะสามารถแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร

	ช่วงความถี่ [GHz]		
	$f < 3.1$	$3.1 < f < 10.6$	$f > 10.6$
ภายในอาคาร	$-51.3 + 87\log(f / 3.1)$	-41.3	$-51.3 + 87\log(10.6 / f)$
ภายนอกอาคาร	$-61.3 + 87\log(f / 3.1)$	-41.3	$-61.3 + 87\log(10.6 / f)$



รูปที่ 2.4 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของระบบแถบกว้าง  
ยั้งภายในอาคาร



รูปที่ 2.5 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของระบบแถบความ  
กว้างยั้งภายนอกอาคาร

รูปที่ 2.4 และ 2.5 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่  
ของระบบแถบกว้างยั้งระหว่าง FCC และ ETSI ภายในและภายนอกอาคารทั้ง 2 รูปมีข้อกำหนดที่  
เหมือนกันคือ ความถี่จะอยู่ระหว่าง 3.1 GHz – 10.6 GHz และสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยี  
UWB ตามมาตรฐานฉบับร่าง IEEE 802.15.3a สัญญาณที่ใช้ส่งจะต้องมีความหนาแน่นกำลังงานที่

ใช้ส่งได้ไม่เกิน  $-41.25$  dBm/MHz โดยข้อแตกต่างของระดับจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานของสเปกตรัมของทั้ง 2 รูปนี้ก็คือ ข้อกำหนดระดับการแพร่กระจายกำลังงานของสเปกตรัมที่ใช้ภายในอาคารนั้นสามารถอนุญาตให้ใช้กำลังได้สูงกว่าระดับจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานของสเปกตรัมที่ใช้ภายนอกอาคารในส่วนของบริเวณที่ใกล้เคียงย่านความถี่ UWB ซึ่งสาเหตุที่อนุญาตให้ระดับจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานของสเปกตรัมที่ใช้ภายในอาคารมีกำลังส่งสูงกว่าระดับจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานของสเปกตรัมที่ใช้ภายนอกอาคารในบริเวณที่ใกล้เคียงย่านความถี่ UWB เป็นเพราะว่า การสื่อสารของสัญญาณที่ใช้ภายในอาคารจะไปรบกวนระบบสื่อสารอื่นๆ นั้น ทำได้น้อยกว่าการสื่อสารของสัญญาณที่ใช้ภายนอกอาคารเนื่องจากภายในอาคารจะสามารถดูดกลืนสัญญาณคลื่นที่มีการแพร่กระจายไปในอากาศได้มากกว่า ส่วนภายนอกอาคารการดูดกลืนสัญญาณที่แพร่กระจายนั้นจะทำได้น้อยหรืออาจจะไม่มีเลย ซึ่งอาจจะไปรบกวนต่อระบบอื่นได้ เลยเป็นสาเหตุที่ทำให้ข้อกำหนดกำลังส่งของสัญญาณมีความแตกต่างกัน

## 2.4 รูปแบบของสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

### 2.4.1 นิยามของสัญญาณที่ใช้ส่งในระบบแถบกว้างยิ่ง

ลักษณะเฉพาะโดยทั่วไปของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง คือกำหนดให้อยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่  $3.1$  ถึง  $10.6$  GHz ตามมาตรฐาน โดยตัวแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งนั้นต้องทำการออกแบบและตรวจสอบเพื่อรับรองว่าการแพร่กระจายคลื่นในช่วงแบนด์วิดท์ตั้งแต่  $20$  dB ลงมาจากระดับสูงสุดของสเปกตรัมที่กำหนดไว้ต้องอยู่ภายในแถบความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่ง อีกทั้งช่วงแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดวัด ณ ตำแหน่งที่ต่ำกว่าระดับสูงสุดของการแพร่กระจายลงมาประมาณ  $10$  dB หรือเท่ากับ  $500$  MHz โดยระดับที่ยินยอมให้แพร่กระจายกำลังงานสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นได้ถูกกำหนดไว้ที่  $-41.25$  dBm/MHz ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานกำหนดใช้รูปแบบของสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งจึงมีหลายๆ สถาบันที่กำลังศึกษาวิจัยข้อมูลในเรื่องของสัญญาณที่จะใช้ส่งในระบบแถบกว้างยิ่งในอนาคต

## 2.5 แบนด์วิดท์

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ อัตราการขยาย ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้างมักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำ ยกตัวอย่างเช่น แบนด์วิดท์  $10:1$  แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานได้

ด้านสูง มีค่ามากกว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำอยู่ 10 เท่าสำหรับสายอากาศแบนด์วิดท์แคบๆ แบนด์วิดท์ที่จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น เช่น แบนด์วิดท์ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศ เป็น 5% ของความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

เนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งแต่เพียงอย่างเดียวได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่างไป ปกติแล้วคุณสมบัติของแพทเทิร์นกับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ มักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศนอกจากนี้แบนด์วิดท์ของอัตราขยายจะมีแบนด์วิดท์ค่าเดียวกับแพทเทิร์นแบนด์วิดท์ ในขณะที่แบนด์วิดท์ของอินพุทอิมพีแดนซ์ และประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นค่าเดียวกับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์

## 2.6 การนำเทคโนโลยี UWB มาประยุกต์ใช้งาน

เทคโนโลยี UWB คือเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระยะใกล้ที่ใช้แถบความถี่ในช่วงตั้งแต่ความถี่ 3.1-10.6 GHz และมีอัตราการส่งข้อมูลมากที่สุดเท่ากับ 110 Mb/s ภายในรัศมี 10 เมตร และ 200 Mb/s ภายในรัศมี 4 เมตร จะเห็นได้ว่า UWB สามารถให้อัตราการส่งข้อมูลสูงกว่าเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นอย่างมาก และในการใช้งานจริงเราสามารถนำ UWB มาประยุกต์ใช้งานได้ 2 โหมด เมื่อเราแบ่งตามอัตราการส่งข้อมูล คือ โหมดอัตราการส่งข้อมูลสูง หมายถึง มีอัตราการส่งข้อมูลเกินกว่า 100 Mb/s ในระยะใกล้ อีกโหมดคือ โหมดอัตราการส่งข้อมูลต่ำและค้นหาตำแหน่งหมายถึง มีอัตราการส่งข้อมูลลดลงเพื่อเพิ่มระยะการสื่อสารไร้สาย สามารถใช้บอกตำแหน่งของอุปกรณ์ได้อย่างแม่นยำเพื่อว่าในอนาคตเราสามารถนำเทคโนโลยี UWB มาประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้ ดังนั้นจึงแบ่งการใช้งานในอุตสาหกรรมและการบริการเป็นดังนี้

### 2.6.1 โครงข่ายส่วนบุคคลไร้สายความเร็วสูง

โครงข่ายส่วนบุคคลไร้สายความเร็วสูง คือโครงข่ายที่มีความหนาแน่นของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายปานกลางมีอัตราการส่งข้อมูลที่ความเร็ว 100-150 Mb/s ภายในระยะ 1 ถึง 10 เมตร สถาปัตยกรรมหลักที่ใช้ในการสื่อสารเป็นแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer-To-Peer) และใช้ รีเลย์/บริดจ์ (Relay/ Bridge) ในการเชื่อมโยงกับโครงข่ายภายนอก ซึ่งจะเป็นแบบไร้สาย หรือใช้สายเคเบิลก็ได้

### 2.6.2 การเชื่อมโยงอินเทอร์เน็ตไร้สาย

การเชื่อมโยงอินเทอร์เน็ตไร้สาย (WEIL) เป็นการขยายแนวคิดเพิ่มเติมจากการส่งสัญญาณที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง (HDR) ให้สูงยิ่งขึ้นไปอีก (1Gb/s, 2.5 Gb/s) ซึ่งการเชื่อมโยงไร้สายแบบนี้จะสามารถทำได้ภายในระยะสั้นมาก หรือภายในรัศมี 1-2 เมตร การเชื่อมโยงอินเทอร์เน็ตไร้สาย

เกิดขึ้นได้มาจากความต้องการของบริษัทผู้ผลิตเครื่องคอมพิวเตอร์ต้องการให้การเชื่อมโยงโครงข่ายอีเทอร์เน็ตที่ใช้สายเคเบิล เปลี่ยนไปใช้แบบไร้สายแทน และจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ต้องการให้การส่ง สัญญาณวิดีโอแบบไร้สายระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับฉาก LCD มีคุณภาพสูง

### 2.6.3 โครงข่ายไร้สายอัจฉริยะ

โครงข่ายไร้สายอัจฉริยะคือโครงข่ายที่มีความหนาแน่นของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายสูง ที่อยู่เป็นพื้นที่ภายในหรือพื้นที่สำนักงานทั่วไป ภายในระยะ 30 เมตร

### 2.6.4 โครงข่ายภายนอกแบบเพียร์ทูเพียร์

โครงข่ายภายนอกแบบเพียร์ทูเพียร์ เป็นโครงข่ายสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร UWB ที่อยู่บริเวณภายนอก เป็นไปตามความต้องการของตลาดการให้บริการที่จะเกิดขึ้นมาใหม่ สำหรับ เครื่อง PDA ที่จะส่งข้อมูลหรือแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันและอย่างร้านให้บริการข้อมูลดิจิทัลความเร็วสูง สำหรับดาวน์โหลดข้อความหนังสือพิมพ์ รูปภาพ การให้บริการเช่าม้วนเทป VDO, VCD, DVD เป็นต้น

## 2.7 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของของคลื่นวิทยุและเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งหรือ Ultra wideband ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันรวมถึงการกำหนดกฎเกณฑ์ในการใช้งาน ข้อบังคับต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นช่วงความถี่ที่ใช้งานซึ่งจะสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ของระบบ ระดับกำลังงานที่แพร่กระจายทั้งภายในอาคาร และภายนอกอาคารที่กำหนดโดยองค์กรที่มีหน้าที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา FCC Ultra-Wideband Working Group (UWBWG) และสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป ETSI หรือ สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ ITU เป็นต้น อีกทั้งกล่าวเกี่ยวกับแบนด์วิดท์และรวมไปถึงการที่จะนำระบบเทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างยิ่งไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและคุ้มค่ามากที่สุด ซึ่งในหลายๆ ประเทศได้เริ่มมีการทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยเพิ่มเติมในเรื่องของการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไปใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุด อย่างไรก็ตามในบทนี้ยังมีได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ของการวัดช่องสัญญาณในการสื่อสารย่านความถี่แถบกว้างยิ่งแต่อย่างใดซึ่งจะเริ่มกล่าวถึงตั้งแต่บทที่ 3 เป็นต้นไป

## บทที่ 3

# ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ของระบบแถบกว้างยิ่ง

### 3.1 กล่าวนำ

หลักการในการที่จะวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ชี้ให้เห็นว่าช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งนั้นมีผลกระทบเป็นอย่างไรในกรณีนำมาใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป และมีหลักเกณฑ์จำนวนมากที่ถูกนำมาพิจารณา ผลกระทบของช่องสัญญาณ โดยความแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบแถบกว้างยิ่งและเทคนิคการจำลองช่องสัญญาณด้วยสภาพความเป็นจริงในการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ การสะท้อน การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ อัตราการขยายของสัญญาณและผลกระทบอื่นๆ ควรที่จะนำมาพิจารณาตามความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป

สภาวะแวดล้อมในการแพร่กระจายคลื่นนั้นการส่งผ่านสัญญาณจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับจะเกี่ยวข้องไปถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยในทฤษฎีของการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์นั้น ได้มีทฤษฎีและเทคนิคในการวัดสำหรับการจำลองแบบการแพร่กระจายของสัญญาณไว้แล้ว โดยในการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งทั้งสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคารเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญด้วยผลกระทบที่เกี่ยวกับทิศทาง ขอบเขตของเส้นทางและปัจจัยอื่น ๆ ล้วนแล้วแต่เป็นการประเมินค่าความสำเร็จของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ถ้าช่องสัญญาณมีคุณลักษณะที่ดีแล้วผลของการรบกวนและการแทรกสอดของแหล่งกำเนิดสัญญาณอื่นๆ จะสามารถที่จะทำให้ลดลงได้โดยการออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับที่เหมาะสม โดยลักษณะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของการจำลองช่องสัญญาณวิทยุคือการตรวจสอบถึงฟังก์ชันการกระจายตัวของพารามิเตอร์ช่องสัญญาณ โดยทั่วไปการกระจายตัวเหล่านี้มักจะได้มาจากผลการวัดหรือผลการจำลองบนพื้นฐานของความถูกต้องหรือมีลักษณะตามสภาวะแวดล้อมที่ชัดเจน

### 3.2 ระบบการวัดช่องสัญญาณ

การวัดช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งนั้นมีเทคนิควิธีการวัดอยู่ 2 แบบด้วยกันคือการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่ (Frequency domain : FD) โดยใช้การกวาดความถี่ (Frequency sweeping) โดยวิธีการนี้ผลตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณนั้นจะถูกบันทึกโดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ และแบบที่สองนั้นช่องสัญญาณสามารถที่จะทำการวัดในโดเมนเวลา (Time domain : TD) โดยใช้เครื่องวัดช่องสัญญาณซึ่งอยู่บนพื้นฐานการส่งผ่านสัญญาณแบบอิมพัลส์หรือสัญญาณแบบ DSSS (Direct sequence spread spectrum) ด้วยวิธีการนี้พัลส์แคบจะถูกส่งออกไปยัง

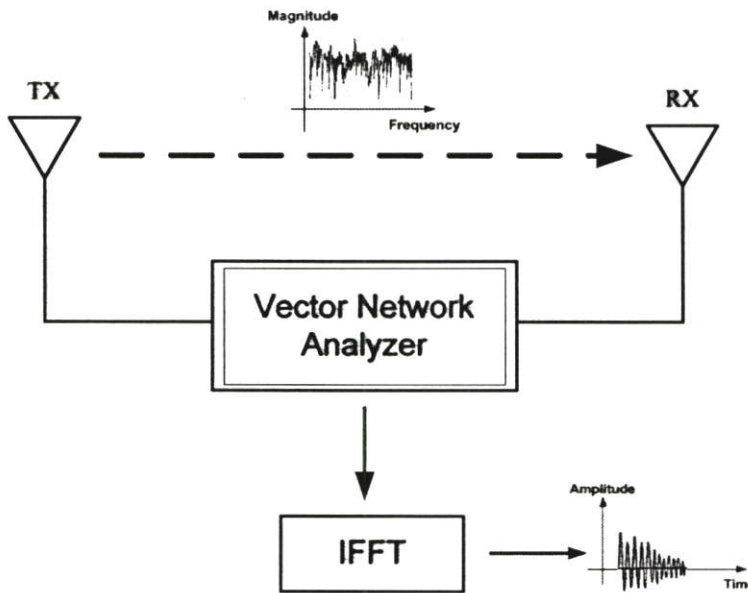
ช่องสัญญาณและผลตอบสนองอิมพัลส์ช่องสัญญาณจะถูกวัด โดยใช้เครื่อง DSO (Digital sampling oscilloscope) ส่วนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวัดช่องสัญญาณจากวิธีการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่โดยเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย

### 3.2.1 การวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่

เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักที่จัดการเกี่ยวกับการวัดทั้งหมดที่ใช้ในการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่ซึ่งประสิทธิภาพของการวัดในโดเมนความถี่นั้นจะถูกกำหนดโดยค่าสูงสุดของเวลาประวิงของช่องสัญญาณซึ่งขอบเขตด้านบนของเวลาประวิงที่ตรวจพบ  $\tau_{\max}$  สามารถกำหนดโดยจำนวนจุดของความถี่ที่ใช้ในการกวาดแต่ละครั้งและแบนด์วิดท์  $B$  ซึ่งนิยามตามสมการที่ 3.1

$$\tau_{\max} = (N_{\text{smp}} - 1) / B \quad (3.1)$$

โดย  $N_{\text{smp}}$  คือ จำนวนจุดความถี่



รูปที่ 3.1 ระบบการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่โดยเครื่อง VNA และการแปลงสู่โดเมนเวลาโดยใช้ IFFT

หลักการในการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็วนี้ ในการที่จะทำการวัดสัญญาณโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์นั้นผลที่ได้จากการวัดก็คือ ผลตอบสนองทาง

ความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการวัดจากนั้นจะใช้ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform : IFFT) ในการแปลงข้อมูลการวัดในโดเมนความถี่ให้อยู่ในรูปแบบของโดเมนเวลา เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์อื่นๆต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.1

### 3.2.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านช่องสัญญาณ

ในการสื่อสารไร้สายนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณไม่ว่าจะเป็นระดับของกำลังงาน เวลาประวิงที่เกิดขึ้นหรือความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณที่ได้รับได้ เมื่อทำการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ โดยผลที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะต้องทำการตรวจสอบเบื้องต้นด้วยวิธีการวัดจากนั้นผลที่ได้จากการวัดหรือที่เรียกว่าข้อมูลดิบนั้นจำเป็นต้องนำมาวิเคราะห์ตามขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบหรือการเปลี่ยนแปลงดังที่ได้กล่าวไปแล้วโดยในขั้นตอนนี้มีความสำคัญมากเหมือนกับขั้นตอนการวัดซึ่งมีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและเชื่อถือได้โดยในหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ ดังนี้

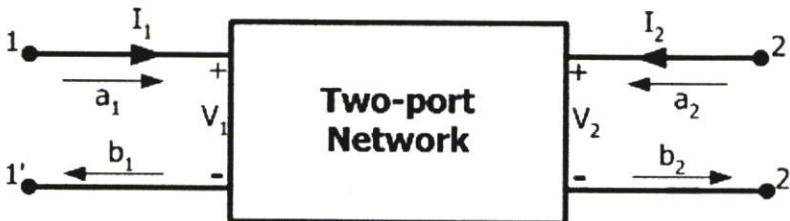
ขั้นตอนของการวัดนั้นจะเป็นลักษณะการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัญญาณ (transmission coefficient :  $S_{21}$ ) จากพอร์ตหนึ่งไปยังพอร์ตสองของเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากหลักการของ S-parameter หรือเรียกว่าพารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (Scattering parameter) ซึ่งมีนิยามตามเมตริกซ์การกระจัดกระจาย (Scattering matrix) ของโครงข่ายแบบ 2 พอร์ตดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมีสมการคือ

$$\bar{b} = \bar{S}a \quad (3.2)$$

โดยที่  $\bar{a}$  คือ เวกเตอร์ของการส่งผ่าน

$\bar{b}$  คือ เวกเตอร์ของการสะท้อน

$\bar{S}$  คือ เวกเตอร์ของการกระจาย



รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมโครงข่ายแบบ 2 พอร์ต

โดยสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\bar{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\bar{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

โดยที่

$a_1$  คือ คลื่นที่ส่งผ่านเข้าไปยังพอร์ตหนึ่ง

$b_1$  คือ คลื่นที่สะท้อนกลับมายังพอร์ตหนึ่ง

$a_2$  คือ คลื่นที่ส่งผ่านเข้าไปยังพอร์ตสอง

$b_2$  คือ คลื่นที่สะท้อนกลับมายังพอร์ตสอง

ซึ่งสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนี้สามารถหาได้จาก

$$a_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{V_1}{\sqrt{Z_0}} + \sqrt{Z_0} I_1 \right) \quad (3.5a)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{V_1}{\sqrt{Z_0}} - \sqrt{Z_0} I_1 \right) \quad (3.5b)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{V_2}{\sqrt{Z_0}} + \sqrt{Z_0} I_2 \right) \quad (3.5c)$$

$$b_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{V_2}{\sqrt{Z_0}} - \sqrt{Z_0} I_2 \right) \quad (3.5d)$$

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$b_1 = a_1 S_{11} + a_2 S_{12} \quad (3.7)$$

$$b_2 = a_1 S_{21} + a_2 S_{22} \quad (3.8)$$

โดยที่

$S_{11}$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนจากพอร์ตหนึ่ง

$S_{22}$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนจากพอร์ตสอง

$S_{21}$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (forward)

$S_{12}$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านผกผัน (reverse)

ค่าพารามิเตอร์ของการกระจายของโครงข่ายแบบสองพอร์ตนั้นกำหนดในรูปแบบของคลื่นการส่งผ่านและคลื่นสะท้อนได้ดังนี้

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (3.9a)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (3.9b)$$

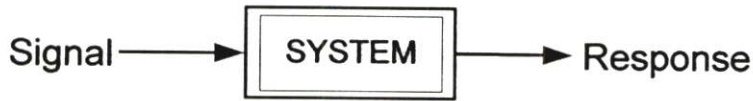
$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.9c)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.9d)$$

### 3.2.3 ผลตอบสนองความถี่ของสัญญาณ

การวัดช่องสัญญาณ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์นั้น สัญญาณคือปริมาณทางกายภาพที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบเรียกว่า สัญญาณขาเข้าหรือสัญญาณอินพุต (Input signal) และจะมีปริมาณทางกายภาพบางอย่างออกมาจากระบบซึ่งเรียกว่า สัญญาณขาออกหรือสัญญาณเอาต์พุต (Output signal) หรือผลตอบสนอง (Response) ของระบบ โดยเมื่อมีสัญญาณเข้าไปแล้วระบบจะต้องทำการประมวลผลหรือนำสัญญาณขาเข้ามาทำการผ่านวงจรหรืออุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบแล้วส่งออกมาเป็นสัญญาณขาออก โดยสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบดังรูปที่ 3.3 ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวนั้นจะเป็นสิ่งที่ใช้แสดงถึงคุณสมบัติของระบบและจากการวัดผลที่ได้ก็คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณซึ่งแปรผันตรงกับฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency transfer function :  $H(\omega)$ ) ของช่องสัญญาณโดยฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวนี้จะแสดง

ให้เห็นถึงผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการพิจารณาอยู่ ซึ่งประกอบด้วยระดับสัญญาณที่ส่งผ่าน (Magnitude) และผลตอบสนองทางเฟส (Phase) ของสัญญาณ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัญญาณกับฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณนั้นกำหนดตามสมการที่ 3.10 และแสดงดังรูปที่ 3.4



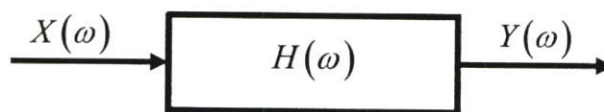
รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบ

$$S_{21}(\omega) \propto H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (3.10)$$

โดยที่กำหนดให้

$Y(\omega)$  คือ เอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่

$X(\omega)$  คือ อินพุตของระบบในโดเมนความถี่



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่

### 3.2.4 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ

การแสดงคุณสมบัติของช่องสัญญาณนั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ก็คือการแสดงด้วยค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse response) ของระบบโดยเริ่มต้นนั้นจะกล่าวถึงคำนิยามของฟังก์ชันอิมพัลส์ (Impulse function) ก่อนนั่นก็คือ

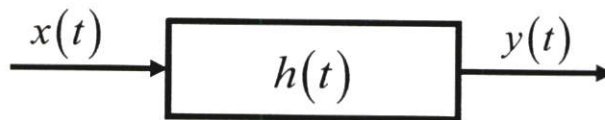
ฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่เหมือนกับฟังก์ชันทั่วไปโดยฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยมักนิยามแทนด้วยสัญลักษณ์  $\delta(t)$  และมีคุณสมบัติดังนี้คือ

$$\int_a^b f(t)\delta(t-t_0)dt = \begin{cases} f(t_0), & a < t_0 < b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.11)$$

โดย  $f(t)$  จะต้องเป็นฟังก์ชันที่มีค่าความต่อเนื่อง (Continuous) ที่ค่าเวลา  $t = t_0$  เมื่อกำหนดให้  $f(t) = 1$  จะได้

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0)dt = 1 \quad (3.12)$$

ถึงแม้ว่าฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่สามารถสร้างได้จริงในทางปฏิบัติแต่ในทางทฤษฎีจะมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการนำมาใช้ในการช่วยวิเคราะห์ระบบสัญญาณ โดยเฉพาะการบ่งบอกคุณสมบัติของระบบอีกทั้งสัญญาณอินพุตที่เป็นฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยนั้นยังถูกนิยามเรียกว่า ผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบใช้สัญลักษณ์  $h(t)$  แทนผลตอบสนองดังกล่าว ซึ่งผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบสามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบเพราะสามารถบอกคุณสมบัติของระบบนั้นได้ และโดยเฉพาะเมื่อระบบภายใต้การพิจารณาเป็นระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาค่าเอาต์พุต  $g(t)$  ของระบบที่เกิดจากสัญญาณอินพุต  $f(t)$  ใดๆ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้รูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนเวลา

### 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ช่องสัญญาณ

#### 3.3.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของช่องสัญญาณโดยใช้หลักการของฟรีส

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาถึงการแพร่กระจายของสัญญาณ ในระบบแถบกว้างยิ่งการวิเคราะห์ระบบการสื่อสารไร้สายโดยปรกตินั้นนิยมที่จะใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส ( Friis' transmission formula ) ในการวิเคราะห์แต่ว่าสมการนี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับการส่งสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่ง โดยในสมการนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของความถี่ แต่อย่างไรก็ตามรูปร่างของสัญญาณที่ส่งไปนั้น อาจจะผิดเพี้ยนไปเนื่องจาก คุณสมบัติในการตอบสนองความถี่ของสายอากาศจึงได้มีการขยายสมการของฟรีส (Extension of Friis') เพื่อวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณโดยสมการของฟรีส ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

$$G_{Friis}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} = G_f(f)G_r(f)G_i(f) \quad (3.13)$$

ซึ่งเมื่อ  $G_r$  และ  $G_i$  คือ อัตราการขยายสายอากาศด้านรับและสายอากาศด้านส่ง

$$G_f(f) = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.14)$$

ซึ่งเขียนในรูปแบบของฟังก์ชันการส่งผ่านสัญญาณคือ

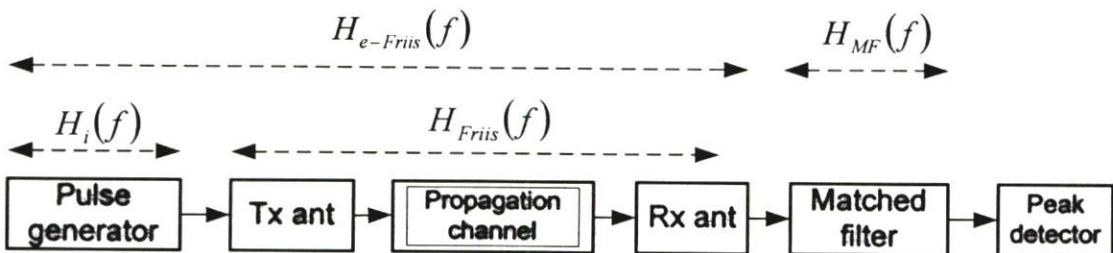
$$H_{Friis}(f) = H_f \mathbf{H}_r \cdot \mathbf{H}_t, \quad (3.15)$$

ในการปรับปรุงสมการการส่งผ่านของฟรีส ซึ่งเรียกว่าการขยายสมการของฟรีส ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่จะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการส่งผ่าน โดยการเพิ่มฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรกรองกำเนิดพัลส์ (Pulse generator filter,  $H_i$ ) เพื่อใช้ในการหาค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณจะได้ดังนี้

$$H_{e-Friis}(f) = H_f H_i \mathbf{H}_r \cdot \mathbf{H}_t \quad (3.16)$$

และสำหรับกรณี ไอโซโทรปิก (Isotropic)

$$H_{e-Friis,Iso}(f) = H_f H_i \quad (3.17)$$



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของระบบการส่งสัญญาณที่ได้มีการขยายจากสมการการส่งผ่านของฟรีส และเพิ่มเมตซ์ฟิวเตอร์ทางด้านรับเพื่อนำมาใช้กับระบบเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

### 3.3.2 แมตซ์ฟิลเตอร์ (Matched filter)

แมตซ์ฟิลเตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวที่ทำให้สัญญาณมีอัตราส่วนสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio: SNR) มากที่สุด โดยดูจากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าได้เพิ่มแมตซ์ฟิลเตอร์เข้ามาหลังจากสายอากาศด้านรับด้วย

โดย  $H_f$  นั้นเป็นฟังก์ชันการส่งผ่านสัญญาณในอวกาศ  $\mathbf{H}_r$  และ  $\mathbf{H}_t$  เป็นเป็นฟังก์ชันการส่งผ่านสัญญาณของสายอากาศด้านรับและด้านส่งตามลำดับ โดยที่สายอากาศด้านรับนั้นได้ใช้สมการแมตซ์ฟิลเตอร์ในการนำมาวิเคราะห์กับ  $H_{Friis}(f)$  เพื่อในการถูกนำมาหาค่าสูงสุดของสัญญาณเอาต์พุตทางด้านรับโดยสมการแมตซ์ฟิลเตอร์ในการกรองความถี่  $H_{Friis}(f)$  สามารถหาคำนวณได้สมการที่ 3.18

$$H_{MF}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} H_{e-Friis}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df}} \quad (3.18)$$

และสำหรับแมตซ์ฟิลเตอร์ในกรณีสมการไอโซโทรปิก(Isotropic)

$$H_{MF,Iso}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} H_{e-Friis,Iso}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis,Iso}(f)|^2 df}} \quad (3.19)$$

ซึ่งจากสมการที่ได้ค่ากำลังของสัญญาณรบกวนที่ได้จะมีค่าคงที่ดังสมการต่อไปนี้

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_{MF}(f)|^2 df = 2f_b \quad (3.20)$$

โดยในกรณีนี้รูปร่างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มาจากแมตซ์ฟิลเตอร์  $v_{MF}(t)$  จะเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} v_{MF}(t) &= h_{e-Friis}(t) \otimes h_{MF}(t) \\ &= \frac{\sqrt{2f_b} h_{e-Friis}(t) \otimes h_{e-Friis}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{e-Friis}^2(t) dt}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

และสำหรับในกรณี ไอโซโทรปิก(Isotropic)

$$v_{MF,Iso}(t) = h_{e-Friis}(t) \otimes h_{MF,Iso}(t)$$

$$= \frac{\sqrt{2f_b} h_{e-Friis, Iso}(t) \otimes h_{e-Friis, Iso}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{e-Friis, Iso}^2(t) dt}} \quad (3.22)$$

สำหรับสเปกตรัมของเอาท์พุทที่มาจากแมตซ์ฟิลเตอร์  $V_{MF}(f)$  คือ

$$\begin{aligned} V_{MF}(f) &= H_{e-Friis}(f) H_{MF}(f) \\ &= \frac{\sqrt{2f_b} H_{e-Friis}(f)^2}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df}} \end{aligned} \quad (3.23)$$

ค่าสูงสุดของสัญญาณจะได้เป็น

$$\begin{aligned} \max_t v_{MF}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} V_{MF}(f) df \\ &= \sqrt{2f_b} \int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df \end{aligned} \quad (3.24)$$

อัตราขยายรวมโดยผลที่ได้จะเป็นดังสมการที่ 3.25 สำหรับกรณีโดยทั่วไปที่มีการใช้สายอากาศแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) นั้น โดยที่กำหนดให้  $H_{Iso}(f) = 1$  ดังนั้นค่าความสัมพันธ์ของอัตราขยายในการส่งในย่านแถบความถี่กว้างยังสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$G_{UWB} = \frac{\max_t v_{MF}(t)}{\max_t v_{MF, Iso}(t)} \quad (3.25)$$

### 3.3.3 การประวิงกำลังงานของช่องสัญญาณ (Power delay profile)

ค่าพารามิเตอร์ที่เรียกว่าการประวิงกำลังงานของช่องสัญญาณ เป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่นิยมนำมาวิเคราะห์เพื่อแสดงให้เห็นถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับที่เวลาต่าง ๆ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสัญญาณที่มีการสะท้อนของสัญญาณในหลายทิศทางหรือที่เรียกว่าสัญญาณหลายวิถี โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อเวลาที่เข้ามาถึงและนอกจากนั้นยังสามารถนำไปพิจารณาถึงผลการกระจายทางเวลา (Time dispersion) อันประกอบไปด้วยค่าเฉลี่ยของเวลาประวิง (Mean excess delay) และค่าการแผ่ของเวลาประวิง (RMS delay spread) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เสนอส่วนขั้นตอนของการตรวจสอบผลกระทบจากหุ่นยนต์นั้น เราได้พิจารณาถึงเวลาที่ถูกลื่อนออกไปของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับ และกำลังงานที่ถูกลดทอนลง ซึ่งในส่วนของการประวิงกำลังงานของช่องสัญญาณซึ่งค่าพารามิเตอร์นี้จะเป็นส่วนหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงผลจากการหมุนสายอากาศและหุ่นยนต์โดยค่าการประวิงกำลังงานของช่องสัญญาณ ได้นิยามไว้ดังนี้

$$P_{(r)} = |h(t, \tau)|^2 \quad (3.26)$$

โดยที่  $h(t, \tau)$  คือ ผลตอบสนองสัญญาณอิมพัลส์ (Channel impulse response)

### 3.3.4 การเฉลี่ยของเวลาประวิง (Mean excess delay: $\tau_m$ ) และการแผ่เวลาประวิง (RMS delay spread: $\tau_{rms}$ )

ค่าเฉลี่ยของเวลาประวิงและค่าการแผ่เวลาประวิง เป็นตัวแปรในช่องสัญญาณแบบหลายวิถี ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก ค่าการประวิงกำลังงานของช่องสัญญาณโดยค่าเฉลี่ยของเวลาประวิง และค่าการแผ่เวลาประวิง เป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของช่องสัญญาณ โดยค่าเฉลี่ยของเวลาประวิงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.27

$$\tau_m = \frac{\int_0^\infty \tau \cdot |h(\tau)|^2 d\tau}{\int_0^\infty |h(\tau)|^2 d\tau} \quad (3.27)$$

โดยที่  $h(\tau)$  คือ ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ

$\tau$  คือ เวลาประวิงที่เกิดขึ้นของสัญญาณ

ค่าการแผ่เวลาประวิงนั้นหมายถึงค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานช่วงเวลาที่กำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นหรือสะท้อนจากสภาพแวดล้อมเป็นสัดส่วนกับพลังงานของสัญญาณที่เกิดสะท้อน ดังสมการที่ 3.28

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty (\tau - \tau_m)^2 \cdot |h(\tau)|^2 d\tau}{\int_0^\infty |h(\tau)|^2 d\tau}} \quad (3.28)$$

### 3.3.5 การสูญเสียกำลังงาน

การสูญเสียกำลังงานเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งที่จะแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สาย ค่าความสูญเสียกำลังงานของสัญญาณนั้นพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างระดับกำลังงานที่ส่งและระดับกำลังงานที่รับได้ซึ่งจะแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบล (Decibel) ดังแสดงในสมการที่ 3.29

$$L_{dB} = 20 \log \left( \frac{v_t(t)}{v_r(t)} \right) \quad (3.29)$$

โดยที่

$v_t$  คือ ระดับแรงดันที่ส่ง

$v_r$  คือ ระดับแรงดันที่รับได้

หลักการวิเคราะห์การสูญเสียกำลังงานในทุกระบบ โดยเฉพาะในระบบแถบกว้างยิ่ง  $PL_{UWB}$  นั้นจะพิจารณาที่กำลังงานสูงสุดของสัญญาณที่ส่งและกำลังงานสูงสุดของสัญญาณที่รับได้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทาง ( $d$ ) โดยมีนิยามเป็นไปตามสมการที่ 3.30 และ 3.31 ตามลำดับ

$$PL_{UWB}(d)[dB] = 20 \log \left[ \frac{\max |v_t(t)|}{\max |v_r(t,d)|} \right] \quad (3.30)$$

โดยในสมการที่ 3.30 กำหนดให้ขนาดของสัญญาณที่ส่งมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสามารถจัดสมการได้ใหม่คือ

$$PL_{UWB}(d)[dB] = -20 \log \left[ \max |v_r(t,d)| \right] \quad (3.31)$$

### 3.3.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ค่าความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณที่รับได้นั้นสามารถที่จะวิเคราะห์และแสดงให้เห็นโดยการพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ข้าม (Cross correlation) ที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้กับค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์รากที่สองของผลคูณระหว่าง ค่าอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation)

ของสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้โดยสมการที่นิยามถึงค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นตามสมการที่ 3.32 ถึงสมการที่ 3.35 ตามลำดับ

$$\rho(d) = \frac{\max |r_{ab}(\tau)|}{\max |\sqrt{r_a(\tau)r_b(\tau)}|} \quad (3.32)$$

โดยสมการที่นิยามค่าสหสัมพันธ์ข้ามคือ

$$r_{ab}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_i(\tau)v_r(t+\tau)dt \quad (3.33)$$

และสมการที่นิยามค่าอัตสหสัมพันธ์คือ

$$r_a(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_i(\tau)v_i(t+\tau)dt \quad (3.34)$$

$$r_b(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_r(\tau)v_r(t+\tau)dt \quad (3.35)$$

โดยที่

$v_i(t)$  คือ สัญญาณแรงดันส่ง

$v_r(t)$  คือ สัญญาณแรงดันที่รับได้

### 3.3.7 วิธีการประมาณค่าการถดถอยกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุดหรือ Linear

#### Least Square Regression

การประมาณค่าฟังก์ชันโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะได้ฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของข้อมูล เพราะได้จากการแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้เหลือน้อยที่สุด ดังนั้นเมื่อเขียนกราฟของฟังก์ชันเส้นกราฟจะผ่านไปบริเวณจุดต่างๆ ของข้อมูลโดยจะตัดผ่านจุดของข้อมูลบางจุด แนวคิดของวิธีการนี้คือ การลดค่าความแตกต่างระหว่างข้อมูลแต่ละจุดกับค่าฟังก์ชัน

วิธีการที่เรียกว่าค่าการถดถอยกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุดคือการแทนค่าชุดข้อมูล  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  ด้วยเส้นตรงที่เรียกว่า การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$y = a_0 + a_1x + e \quad (3.36)$$

โดย  $a_0$  และ  $a_1$  คือค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงจุดตัดแกนและค่าความชัน  
 $e$  คือค่าความผิดพลาด (root mean square error)

โดยเงื่อนไขของการหาฟังก์ชันที่ดีที่สุดคือ

$$1. \sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) \quad (3.37)$$

โดยกำหนดให้  $n$  แทนจำนวนข้อมูลทั้งหมด

เนื่องจากเงื่อนไขนั้นยังไม่เพียงพอสำหรับฟังก์ชันที่ใช้สำหรับการแทนชุดข้อมูลจำนวนสองจุด โดยเส้นใดๆ ที่ผ่านจุดกึ่งกลางระหว่างจุดสองจุดก็ทำให้ค่าต่ำสุดของเงื่อนไขในข้อที่หนึ่งเป็นศูนย์ได้เพราะว่าค่าผิดพลาดจะทำให้เกิดการหักล้างกันพอดี

$$2. \sum_{i=1}^n |e_i| = \sum_{i=1}^n |y_i - a_0 - a_1 x_i| \quad (3.38)$$

เงื่อนไขนี้ก็ยังไม่เพียงพอสำหรับฟังก์ชันที่ใช้แทนข้อมูลจำนวนจุดทั้งคู่จุด โดยเส้นตรงใดๆ ที่อยู่ระหว่างเส้นประสองเส้นนี้จะทำให้เงื่อนไขในข้อสองมีค่าต่ำที่สุด

$$3. S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i,measured} - y_{i,model})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \quad (3.39)$$

ข้อดีของการใช้เงื่อนไขในการหาฟังก์ชันเพื่อแทนชุดข้อมูลก็คือ จะได้ฟังก์ชันเดียวที่แน่นอนในการแทนชุดข้อมูลเงื่อนไขที่สามนำมาหาฟังก์ชันเส้นตรงที่ใช้แทนชุดข้อมูลได้โดยการนำมาหาค่าอนุพันธ์เทียบกับ  $a_0$  และ  $a_1$  ดังนี้

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad \text{และ} \quad a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (3.40)$$

เมื่อ  $\bar{x}$  และ  $\bar{y}$  คือค่าเฉลี่ยของ  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ

โดยที่ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าของฟังก์ชันและข้อมูลจริงนั้นสามารถหาได้จาก

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - b x_j)^2} \quad (3.41)$$

โดยข้อสมมติฐานข้อมูลทางสถิติสำหรับใช้กับวิธีการถดถอยแบบเชิงเส้นก็คือ

1. ตัวแปร  $x$  ต้องเป็นข้อมูลที่แน่นอน
2. ตัวแปร  $y$  ต้องเป็นค่าที่มีความแปรปรวนแน่นอน
3. ตัวแปร  $y$  ในแต่ละค่าของ  $x$  นั้นต้องมีการกระจายแบบปกติ

แต่ สำหรับชุดข้อมูลบางชุดที่ไม่เหมาะสมที่จะแทนด้วยเส้นตรงก็อาจเลือกแทนชุดข้อมูลนั้นด้วยสมการ โพลีโนเมียลแทนได้

โดยการแทนชุดข้อมูลด้วยสมการ โพลีโนเมียลกำลังสองคือ

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + e \quad (3.42)$$

ผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าฟังก์ชันกับค่าของข้อมูลจริงคือ

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i + a_2x_i^2)^2 \quad (3.43)$$

โดยสมการโพลีโนเมียลใช้หลักการเดียวกันกับการถดถอยแบบเชิงเส้น คือหาค่า  $a_0, a_1, a_2$  ที่ทำให้ค่า  $S_r$  มีค่าน้อยที่สุด โดยหาอนุพันธ์ของ  $S_r$  เทียบกับ  $a_0$  ได้คือ

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) \quad (3.44)$$

สามารถหาอนุพันธ์ของ  $S_r$  เทียบกับ  $a_1$  ได้คือ

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2 \sum x_i (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) \quad (3.45)$$

สามารถหาอนุพันธ์ของ  $S_r$  เทียบกับ  $a_2$  ได้คือ

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_2} = -2 \sum x_i^2 (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) \quad (3.46)$$

สุดท้ายสามารถจัดรูปซึ่งจะได้สมการก็คือ

$$\begin{aligned} (n)a_0 + (\sum x_i)a_1 + (\sum x_i^2)a_2 &= \sum y_i \\ (\sum x_i)a_0 + (\sum x_i^2)a_1 + (\sum x_i^3)a_2 &= \sum x_i y_i \\ (\sum x_i^2)a_0 + (\sum x_i^3)a_1 + (\sum x_i^4)a_2 &= \sum x_i^2 y_i \end{aligned} \quad (3.47)$$

ในส่วนของการหาค่า  $a_0, a_1, a_2$  นั้นโดยได้ทำตามวิธีการแก้ระบบสมการเชิงเส้นวิธีการหาสมการโพลิโนเมียลนี้สามารถใช้หาสมการโพลิโนเมียลกำลังใด ๆ ก็ได้เพื่อใช้แทนชุดข้อมูลนั้นๆ

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e \text{ เมื่อกำหนดให้ } m \text{ เป็นจำนวนเต็มใด ๆ}$$

### 3.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารซึ่งเป็นส่วนสำคัญในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดของคุณลักษณะของช่องสัญญาณปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อหรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณลักษณะของช่องสัญญาณรวมไปถึงระบบการวัดในโดเมนความถี่ ซึ่งระบบการวัดในโดเมนความถี่นั้นจะถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบถึงผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวถึงในบทต่อไป จากนั้นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ถึงผลที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นผลการลดทอนของกำลังงานการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ ผลการกระจายทางเวลา ผลของอัตราการขยาย ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ อันเนื่องด้วยผลกระทบจากปัจจัยดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น ท้ายสุดผลของอัตราการขยายที่เกิดขึ้นดังกล่าวนั้นจะถูกนำมาทำการประเมินค่าจากวิธีการประเมินค่าจากการปรับปรุงวิธีการวัดและสภาพแวดล้อมที่ทำการวัดและทำการประมาณค่าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า วิธีการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด ซึ่งจะแสดงขั้นตอนต่างๆ ในการจำลองผลนั้นจะนำเสนอในบทต่อไป

## บทที่ 4

# การวัดและแบบจำลองการวัด

### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนในการทดลองทั้งหมดซึ่งเป็นการตรวจสอบผลการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สาย โดยทั่วไปจะมีการพิจารณาอยู่ 2 วิธีด้วยกันคือ ตรวจสอบจากการใช้แบบจำลองช่องสัญญาณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และตรวจสอบจากการวัดโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย ซึ่งเป็นการตรวจสอบบนโดเมนความถี่ โดยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการตรวจสอบบนพื้นฐานของการวัดเป็นหลักสำหรับขั้นตอนในการวัดนั้นจำเป็นต้องมีการจัดเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยจะกล่าวถึงในข้อห้วต่อไปและสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกอย่างหนึ่งคือการกำหนดรูปแบบหรือลักษณะสภาพแวดล้อม ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดปัจจัยของการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบโดยในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ว่าด้วยการเกิดค่าการสูญเสียจากหุ่นยนต์ที่ส่งผลกระทบต่อระดับของสัญญาณบนช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร และแบบจำลองต่างๆ นั้นจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

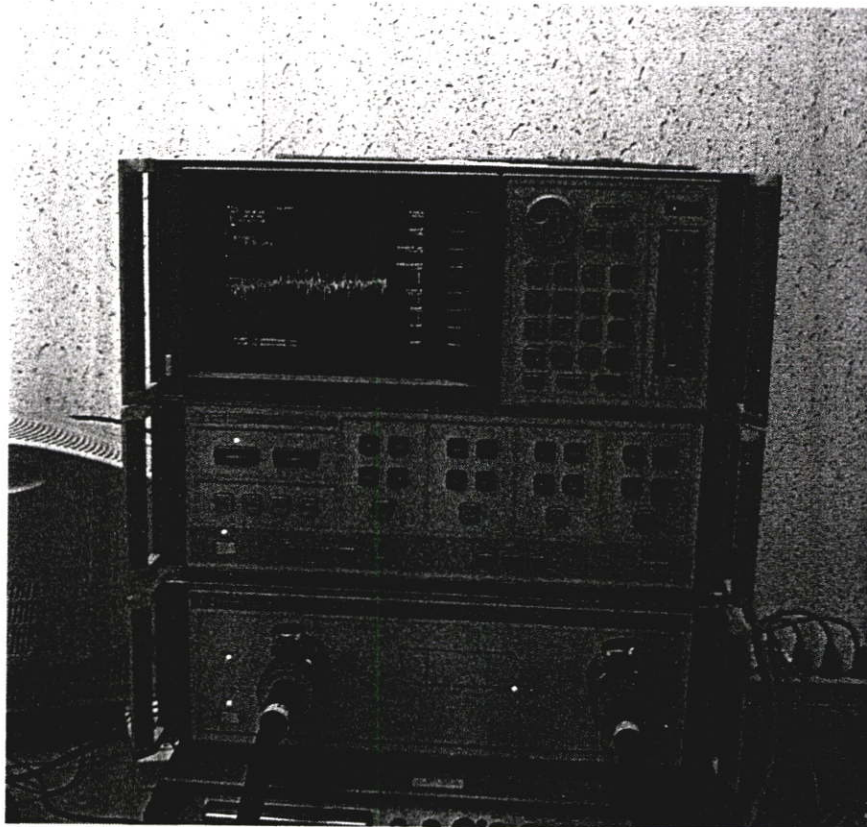
หลังจากขั้นตอนการวัดเสร็จสิ้นลงข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นซึ่งจะแสดงในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ อาทิเช่น ผลของระดับกำลังงานที่สูญเสีย ผลการกระจายทางเวลาอันประกอบไปด้วย ค่าเฉลี่ยเวลาประวิงและค่าการแผ่ประวิง อีกทั้งผลที่แสดงให้เห็นถึงความเพี้ยนของสัญญาณโดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นดังกล่าว ผลอัตราการขยาย จากนั้นจะนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปทำการประมาณค่าอัตราการขยายของการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบความถี่กว้างยิ่งที่ประกอบด้วยหุ่นยนต์สำหรับระบบไร้สายระยะสั้น

### 4.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัด

#### 4.2.1 เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์รุ่น HP-8510C ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-parameter test set) รุ่น HP-8514B และตัวสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesized sweeper) รุ่น HP-83620A เป็นอุปกรณ์หลักในการทดลองดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะถูควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ที่เชื่อมต่อผ่านช่องสื่อสารแบบ GPIB (General purpose interface bus) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่สามารถตรวจวัดสัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ต ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการตรวจวัดแบบสองพอร์ตโดยพอร์ต

ที่หนึ่งคือพอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ Tx ส่วนพอร์ตสองจะใช้ในการรับสัญญาณ Rx โดยที่ปลายของพอร์ตทั้งสองจะถูกต่อด้วยสายอากาศแบบกรวยคู่ และทำการวัดในโดเมนความถี่ก่อนที่จะถูกนำผลการวัดไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

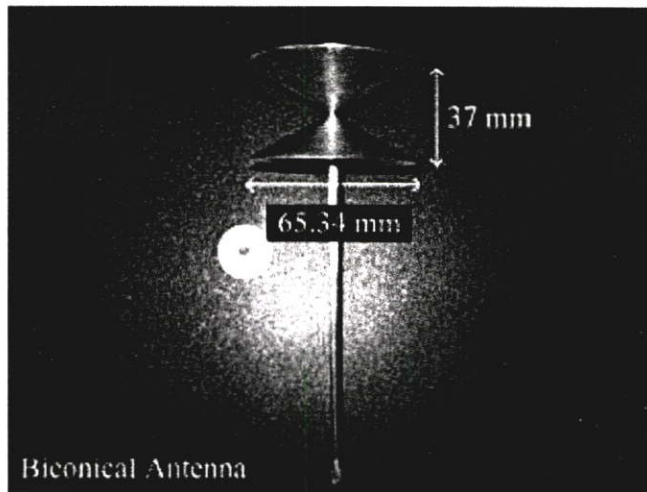


รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ Vector Network Analyzer (VNA)

#### 4.2.2 สายอากาศแบบกรวยคู่

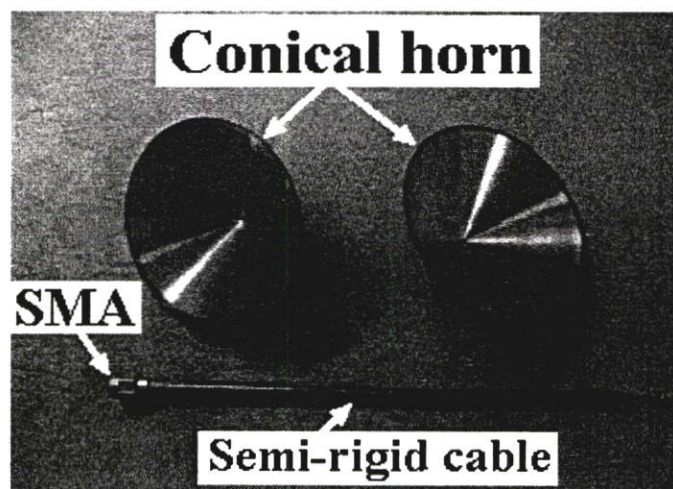
ถ้าจะกล่าวถึงอุปกรณ์หลักที่สำคัญในการตรวจวัดช่องสัญญาณในระบบการวัดสัญญาณแบบไร้สายนั้นส่วนที่มีความจำเป็นและสำคัญมากที่สุดอีกอย่างหนึ่งที่เรียกว่าสายอากาศ (Antenna) ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายผ่านอากาศไปยังสายอากาศทางด้านรับแล้วเปลี่ยนกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าตามเดิม โดยในการทดลองนี้ได้ใช้สายอากาศอยู่ทั้งหมดสองชุดคือ สายอากาศทางด้านส่ง (Tx) และสายอากาศทางด้านรับ (Rx) โดยสายอากาศที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองคือ สายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว (Omnidirectional) และเป็นสายอากาศที่ตอบสนองความถี่ได้กว้างซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในความถี่ย่านตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ตามข้อกำหนดย่านความถี่การใช้งานของระบบแถบกว้างยิ่งของ

FCC โดยรูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างและขนาดของสายอากาศและรูปที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของสายอากาศชนิดนี้

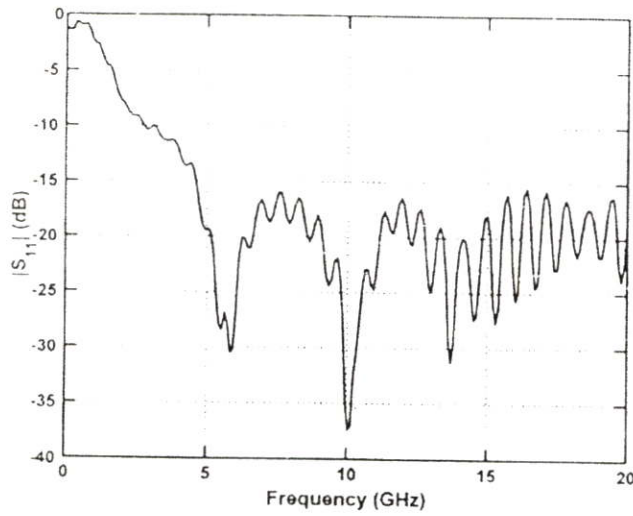


รูปที่ 4.2 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบกรวยคู่

การทดลองวิจัยนี้ได้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่มาใช้ในการทดลองวิจัยในครั้งนี้ทั้งหมดแต่ในการติดตั้งจะแตกต่างกันออกไปตามรูปแบบที่จะทำการทดสอบ ซึ่งได้แสดงรูปแบบและขนาดได้ในรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเป็นสายอากาศที่นำมาใช้จริงในการทดลองทั้งด้านรับและส่งสัญญาณ

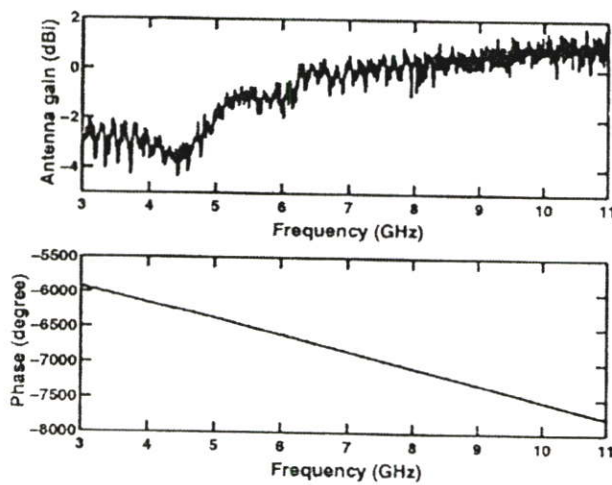


รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบของสายอากาศแบบกรวยคู่



รูปที่ 4.4 คุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่

เหตุผลของการเลือกใช้สายอากาศแบบกรวยคู่คือสายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีความเหมาะสมสำหรับการพิจารณาที่ความถี่ช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งเป็นข้อกำหนดของเทคโนโลยีระบบแถบกว้างยิ่ง โดยมีลักษณะในการติดตั้งคือ กรวยด้านบนของสายอากาศใช้ติดต่อกับสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุขณะที่กรวยด้านล่างใช้ต่อกับกราวด์ ส่วนในรูปที่ 4.4 แสดงถึงค่าประสิทธิภาพการสะท้อนกลับ (Reflection coefficient)  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแบบกรวยคู่จะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพการสะท้อนกลับนั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ระหว่าง 3.1 GHz จนถึงความถี่ 10.6 GHz



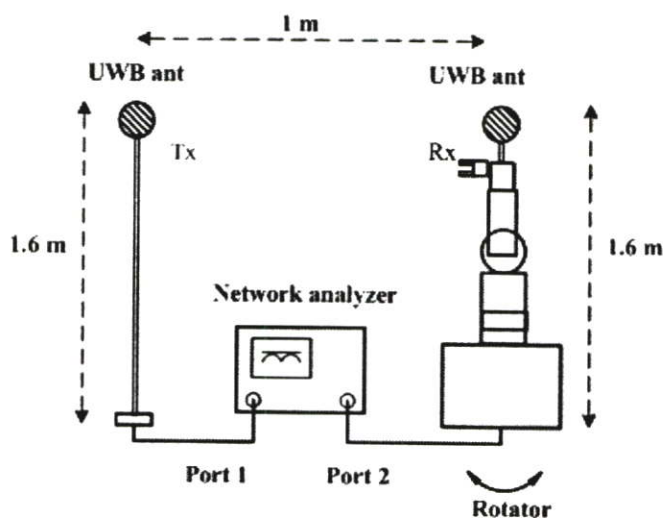
รูปที่ 4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศแบบกรวยคู่

ในส่วนของการแสดงถึงขนาดของฟังก์ชันการส่งผ่านและเฟสที่ใช้ในการส่งผ่านของสายอากาศซึ่งเป็นคุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้โดยแสดงไว้ในรูปที่ 4.5

### 4.3 การทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณภายในอาคารรูปแบบที่ 1

#### 4.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

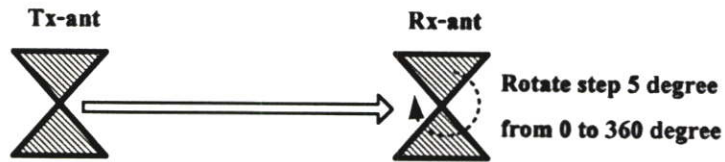
ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งถูกวัดในโดเมนของความถี่ โดยใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่าเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการวัดและบันทึกผลที่ได้จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งได้ทำการวัดในห้องประชุมภาควิศวกรรมสารสนเทศชั้น 12 ของอาคารวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 4.6 แบบจำลองของการทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1

โดยสายอากาศที่ใช้นั้นมีอยู่ 2 ชุดคือ สายอากาศทางด้านส่งและสายอากาศทางด้านรับ ซึ่งเป็นสายอากาศแบบกรวยคู่ โดยสายอากาศทางด้านรับจะติดกับหุ่นยนต์ สายอากาศทั้งคู่อยู่สูงจากพื้น 1.6 เมตรและวางห่างกัน 1 เมตร ในส่วนของสายอากาศโดยคุณสมบัติจะเป็นสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางเมื่อทำการติดตั้งเป็นแบบแนวตั้ง แต่ในการทดลองในครั้งนี้ต้องการที่จะทดสอบให้เห็นว่าการหมุนหุ่นยนต์นั้นมีผลเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไรบ้าง จึงทำการติดตั้งในแนวอนดั่งรูปที่ 4.7 โดยทำการติดตั้งให้เป็นแบบสายอากาศให้มีการแพร่กระจายคลื่น

แบบมีทิศทาง (Directional antenna ) ระหว่างด้านส่งและด้านรับแล้วทำการหมุน ทีละ 5 องศาต่อการวัด 1 ครั้ง โดยจะทำการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา ในรูปที่ 4.7 แสดงภาพการปรับการวัดของสายอากาศ



รูปที่ 4.7 การปรับการวัดของสายอากาศ

#### 4.3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการทดลองได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 4.1

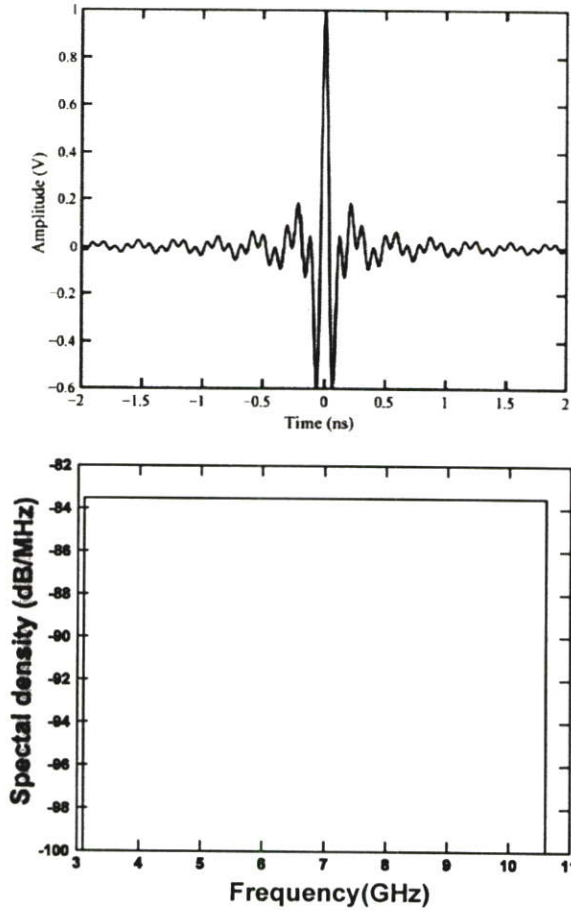
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ช่วงความถี่ที่ทำการทดลอง	3.0 GHz ถึง 11.0 GHz
จำนวนของตำแหน่งความถี่	801
ความสูงของสายอากาศด้านส่ง	1.60 เมตร
ความสูงของสายอากาศด้านรับ	1.60 เมตร
ระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ	1.0 เมตร
มุมที่ทำการวัด	0-360 องศา
การหมุน	5 องศา / ครั้ง

#### 4.3.3 รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ส่ง

รูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการส่งในย่านความถี่แบบแถบกว้างยิ่งนั้นมีหลายลักษณะหลายรูปแบบและยังไม่มีข้อกำหนดที่ชัดเจน ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้สัญญาณแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม

(Rectangular passband pulse) ในการวิเคราะห์ซึ่งมีข้อดีคืออยู่ภายใต้ข้อกำหนดของ FCC มีความถี่ครอบคลุมตลอดทั้งช่วง คือตั้งแต่ 3.1 GHz จนถึง 10.6 GHz โดยมีความถี่ศูนย์กลางและแบนด์วิดท์รวม เท่ากับ 7.5 GHz โดยกำหนดความถี่ต่ำสุด ( $f_{\min}$ ) เท่ากับ 3.1 GHz ความถี่สูงสุด ( $f_{\max}$ ) เท่ากับ 10.6 GHz และสเปกตรัมแบนด์วิดท์ ( $f_b$ ) เท่ากับ 7.5 GHz ซึ่งในรูปที่ 4.8 แสดงรูปแบบของสัญญาณพัลส์ที่ใช้วิเคราะห์และมีนิยามดังสมการที่ 4.1



รูปที่ 4.8 รูปแบบของสัญญาณพัลส์แถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ใช้ส่ง

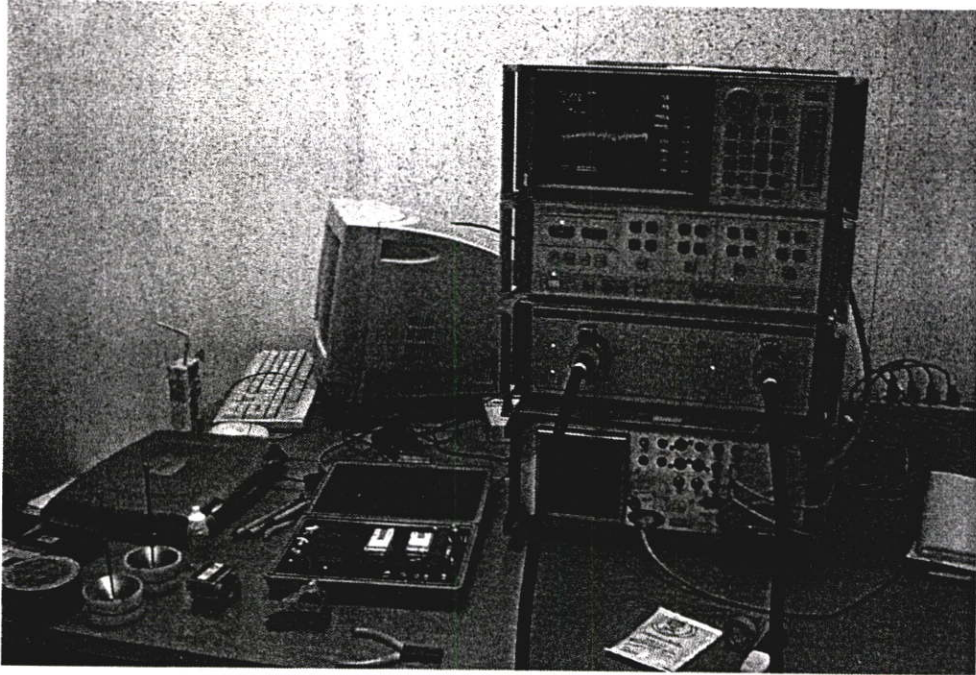
$$v_r(t) = \frac{1}{f_b} [f_{\max} \text{sinc}(2f_{\max}t) - f_{\min} \text{sinc}(2f_{\min}t)] \quad (4.1)$$

โดยที่  $f_{\max}$  คือ ความถี่สูงสุดเท่ากับ 10.6 GHz

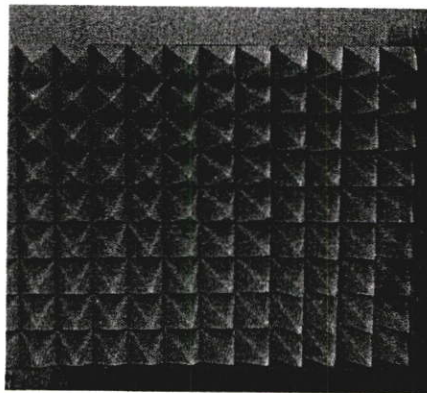
$f_{\min}$  คือ ความถี่ต่ำสุดเท่ากับ 3.1 GHz

$f_b$  คือ แบนด์วิดท์

และ  $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$



รูปที่ 4.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการวัดสัญญาณในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ภายในอาคารแบบที่ 1



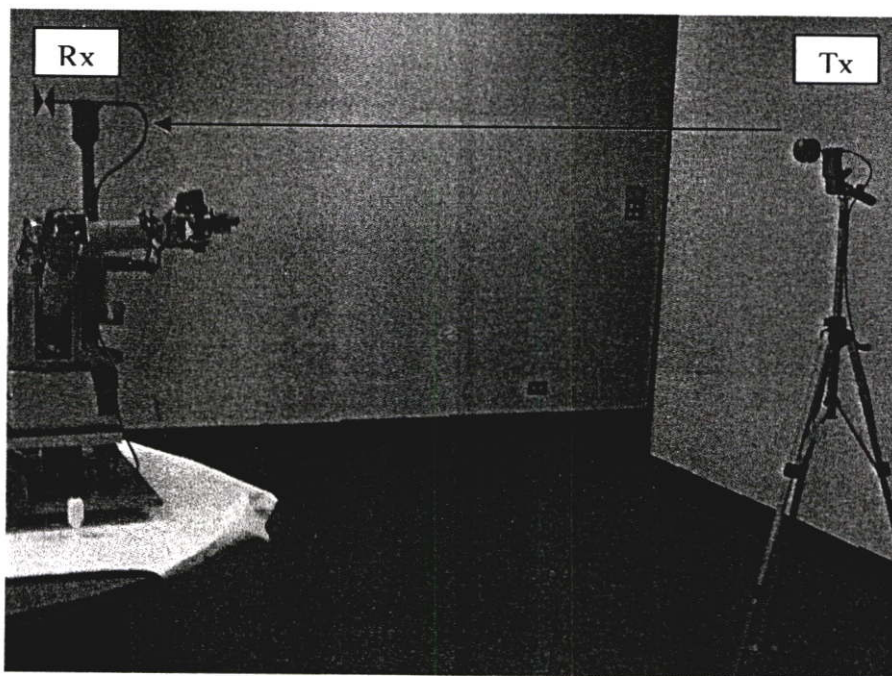
รูปที่ 4.10 แผ่นป้องกันการสะท้อนที่ใช้ในการทดลองการวัดสัญญาณในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ภายในอาคารแบบที่ 1

รูปที่ 4.9 จะแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการวัดสัญญาณคือสายอากาศที่จะนำมาใช้ในการทดลองรวมไปถึงเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายก่อนที่จะทำการติดตั้งและทดลอง ส่วนในรูปที่ 4.10 นั้นแสดงให้เห็นถึงแผ่นป้องกันการสะท้อนที่ใช้ในการทดลอง ส่วนการจัดวางและติดตั้งสายอากาศให้เป็นแบบแนวนอน ซึ่งความสูงของสายอากาศด้านส่งและรับกำหนดให้มีความสูงคือ 1.6 เมตร โดยมีระยะห่างของสายอากาศคือ 1 เมตรและทำการหมุนที่ละ 5 องศาเท่าๆกันเริ่มตั้งแต่ 0 องศา จน

ครบ 360 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงให้เห็นตัวอย่างการทดลองการหมุน  
ในมุม 90 องศาและมุม 100 องศา



รูปที่ 4.11 การทดลองการวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ในมุม 90 องศา

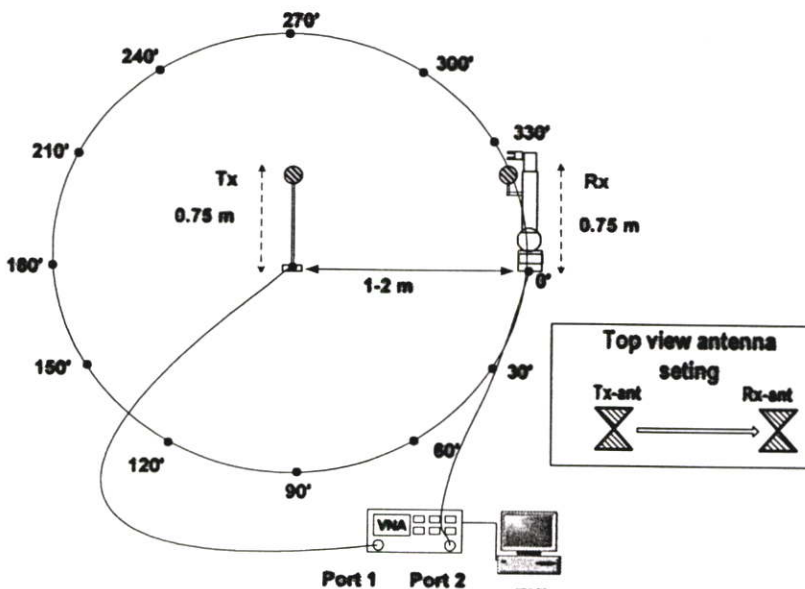


รูปที่ 4.12 การทดลองการวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ในมุม 100 องศา

## 4.4 การทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 2 และ 3

### 4.4.1 ขั้นตอนการวัดในลักษณะอาคารแบบที่ 2

ในลักษณะอาคารแบบที่ 2 นี้ยังคงใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการวัดในการทดลองนี้โดยใช้ที่ความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz และทำการวัดในโดเมนความถี่ โดยการทดลองนี้จะทำงานโดยใช้พอร์ตที่ 1 เป็นตัวส่งสัญญาณ และใช้พอร์ตที่ 2 เป็นตัวรับสัญญาณ ซึ่งสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศแบบกรวยคู่ ทั้งด้านส่งและทางด้านรับ โดยทำการติดตั้งสายอากาศให้เป็นแนวอนทั้งด้านส่งและรับ คือการติดตั้งให้การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบมีทิศทางเช่นเดียวกันกับการวัดในแบบจำลองที่ 1 ส่วนการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณแถบกว้างยั้งนั้นได้ทำการวัดสัญญาณบนชั้น 9 ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ อาคาร 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสายอากาศทางด้านรับและส่งมีความสูงของสายอากาศที่ 0.75 เมตรเท่ากันในกรณีนี้หุ่นยนต์มีความสูงที่ค่อนข้างต่ำและให้สายอากาศทางด้านส่งอยู่กับที่ ส่วนสายอากาศทางด้านรับซึ่งติดตั้งไว้กับตัวหุ่นยนต์หมุนรอบสายอากาศด้านส่งเป็นมุมตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศาจะทำการหมุนครั้งละ 30 องศาต่อการวัด 1 ครั้ง เริ่มวัดจากระยะทาง 1 เมตร แล้วทำการวัดที่ระยะ 2 เมตรเพื่อทำการเปรียบเทียบกัน แล้วทำการบันทึกค่าผลการตอบสนองความถี่แต่ละครั้งด้วยเครื่อง VNA ซึ่งควบคุมโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แบบจำลองของการทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 2

#### 4.4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการทดลองได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ช่วงความถี่ที่ทำการทดลอง	3.0 GHz ถึง 11.0 GHz
จำนวนของตำแหน่งความถี่	801
ความสูงของสายอากาศด้านส่ง	0.75 เมตร
ความสูงของสายอากาศด้านรับ	0.75 เมตร
ระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ	1 เมตร ถึง 2 เมตร
มุมที่ทำการวัด	0-360 องศา
การหมุน	30 องศา / ครั้ง
ชนิดของสายอากาศ	กรวยคู่

#### 4.4.3 รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ส่ง

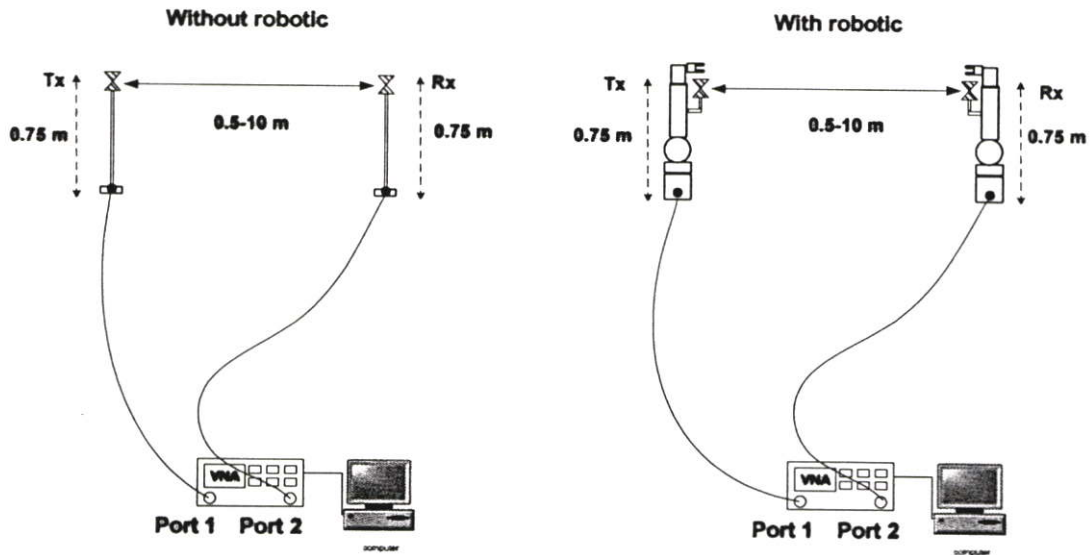
ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นรูปแบบสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่ใช้ในการส่งจะเป็นสัญญาณแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมเหมือนกันกับหัวข้อที่ผ่านมาดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งมีนิยามดังสมการที่ 4.1

#### 4.4.4 ขั้นตอนการวัดในลักษณะอาคารแบบที่ 3

ในการวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคารแบบที่ 3 นี้ยังคงใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งในการวัดนั้นได้ทำการทดลองวัดในบริเวณชั้น 9 ของอาคาร 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง โดยจะทำการวัดแบ่งออกเป็น 2 แบบเพื่อนำผลการวัดมาเปรียบเทียบกันว่าเกิดผลอย่างไร ซึ่งการทดลองแบบแรกนั้นจะทำการวัดในกรณีที่ไม่มีการรบกวนจากหุ่นยนต์ ส่วนแบบที่สองจะทำการวัดกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ โดยสายอากาศทางด้านส่งและด้านรับจะติดตั้งติดกับตัวหุ่นยนต์ โดยทั้งสองกรณีสายอากาศทั้งคู่อยู่สูงจากพื้นดิน 0.75 เมตรและวางห่างกันเริ่มตั้งแต่ 0.5 เมตรและขยับทางด้านรับออกไปครั้งละ 0.5 เมตรไปจนถึง 10 เมตร

ส่วนสายอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้คือ สายอากาศแบบกรวยคู่ ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นรอบตัว และทำการติดตั้งในลักษณะแนวตั้งคือให้มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบ

ทิศทางโดยจะใช้เป็นสายอากาศทางด้านภาคส่งและภาครับ ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการทดลอง 2 แบบ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบว่าจะมีผลกระทบแตกต่างกันอย่างไร โดยในการทดลองในแบบจำลองที่ 3 นี้จะนำผลที่ได้มาทำการประมาณค่าฟังก์ชัน โดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุดด้วย ในรูปที่ 4.14 แสดงภาพของอุปกรณ์ในการทดลองและ



แบบจำลอง

รูปที่ 4.14 แบบจำลองของการทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 3

#### 4.4.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการทดลองได้แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ช่วงความถี่ที่ทำการทดลอง	3.0 GHz ถึง 11.0 GHz
จำนวนของตำแหน่งความถี่	801
ความสูงของสายอากาศด้านส่ง	0.75 เมตร
ความสูงของสายอากาศด้านรับ	0.75 เมตร
ระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ	0.5 เมตร ถึง 10 เมตร
การปรับระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ	0.5 เมตร / ครั้ง
ชนิดของสายอากาศ	กรวยคู่

#### 4.4.6 รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ส่ง

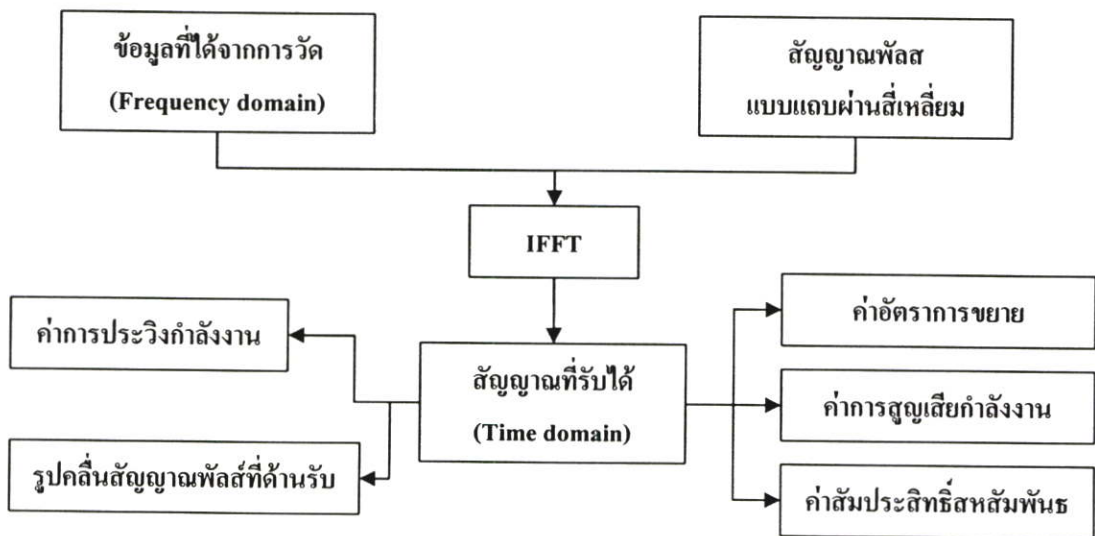
ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นรูปแบบสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่ใช้ในการส่งจะเป็นสัญญาณเดียวกันกับหัวข้อที่ผ่านมาดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งมีนิยามดังสมการที่ 4.1

### 4.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธีการประเมินค่าของการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบความถี่กว้างยิ่งที่ประกอบด้วยหุ่นยนต์

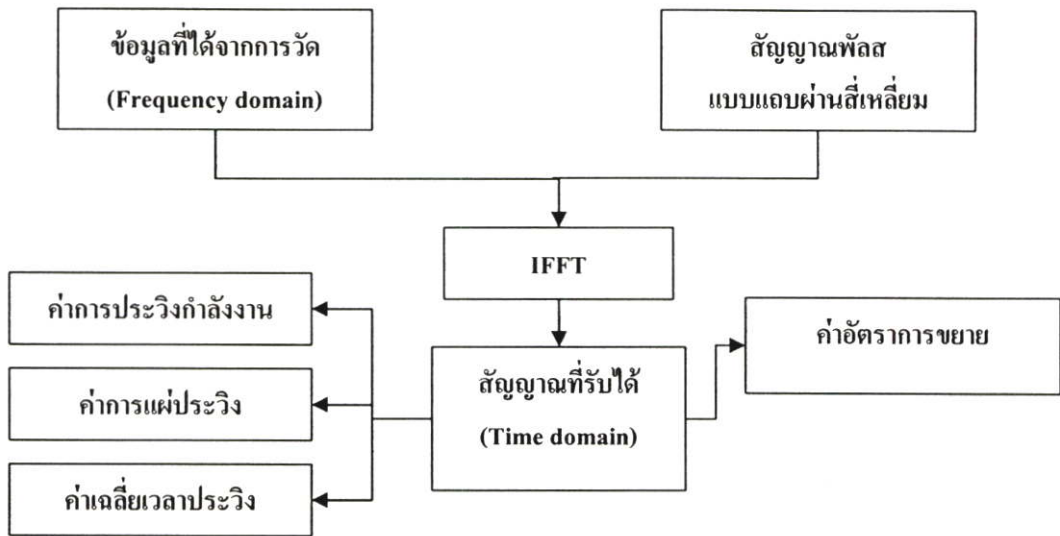
#### 4.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูล

ขั้นตอนการวัดในแต่ละแบบที่ได้กล่าวในข้างต้นเป็นการตรวจสอบถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณภายใต้สภาวะที่กำหนดขึ้น โดยในการทดลองนี้ต้องการที่จะตรวจสอบถึงผลกระทบจากการนำหุ่นยนต์มาใช้งานที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งสิ่งที่ได้จากการทดลองนั้นคือฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่รวมผลของสายอากาศเข้าไปด้วย จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ทราบถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

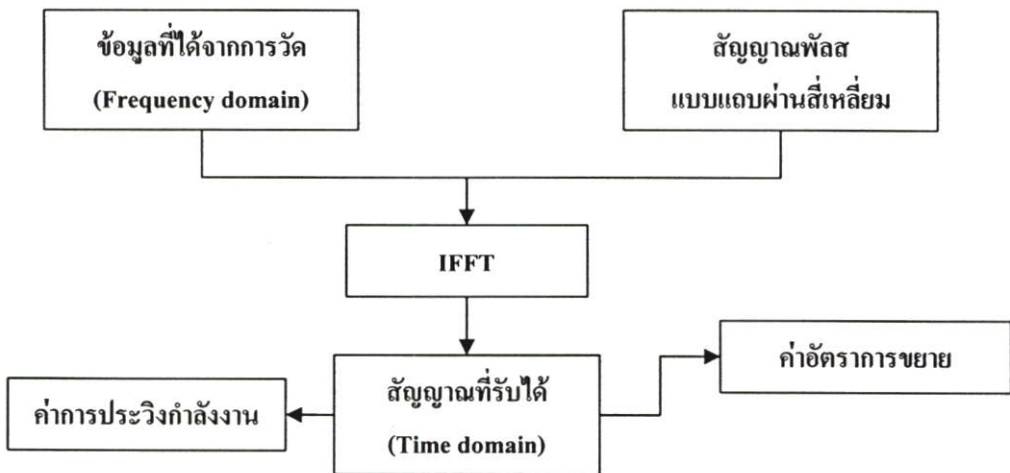
ในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธีการประมาณค่านั้นได้ทำการวิเคราะห์จากการทดลองปรับปรุงการวัดในแบบจำลองการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยนำผลที่ได้จากการปรับปรุงการวัดและสภาพแวดล้อมภายในห้องให้มีการสะท้อนของสัญญาณให้น้อยที่สุดเพื่อที่จะปรับปรุงค่าอัตราการขยายให้มีค่าที่สูงที่สุด



รูปที่ 4.15 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองภายในอาคารแบบที่ 1

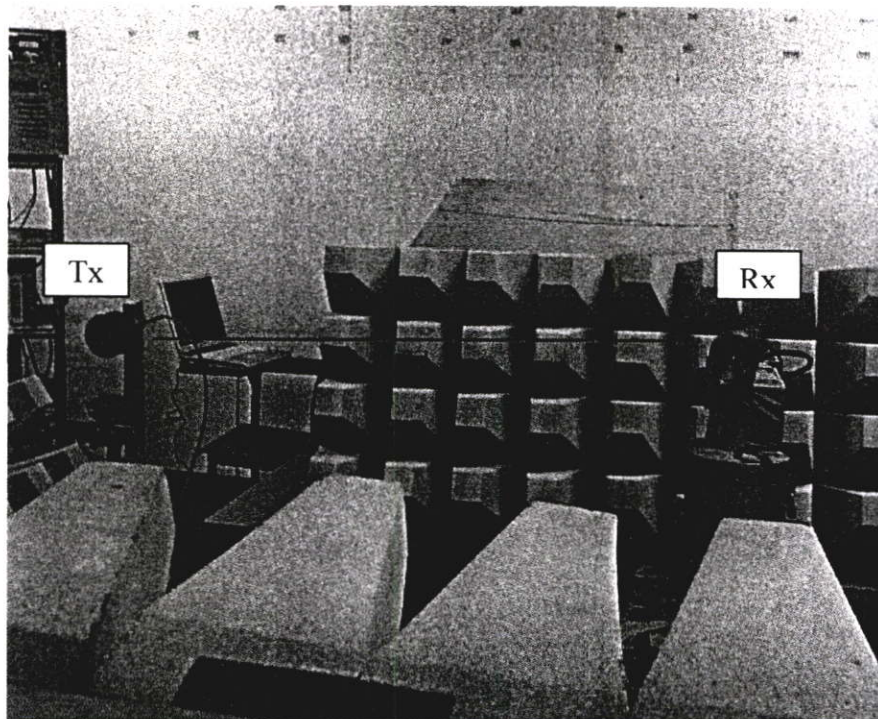


รูปที่ 4.16 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองภายในอาคารแบบที่ 2

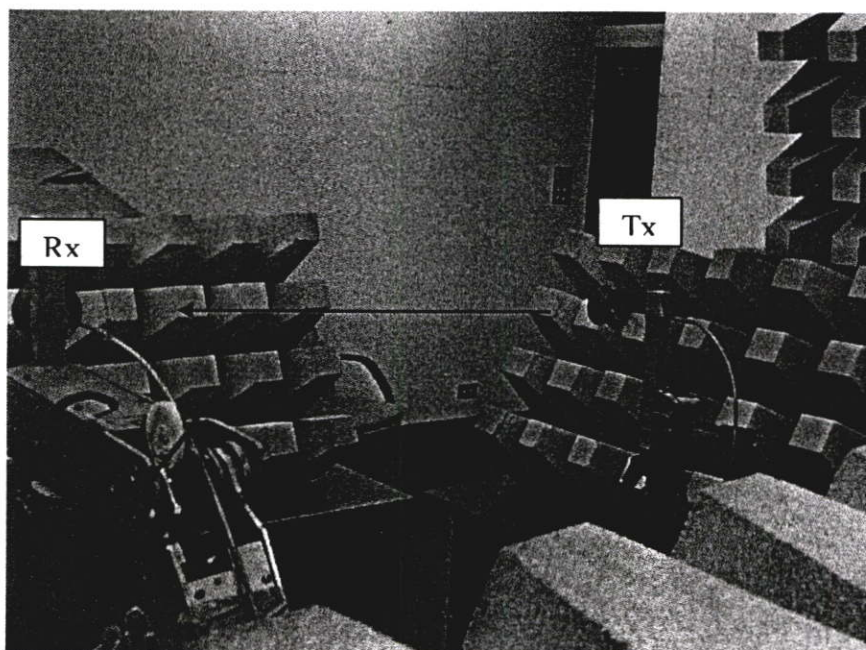


รูปที่ 4.17 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองภายในอาคารแบบที่ 3

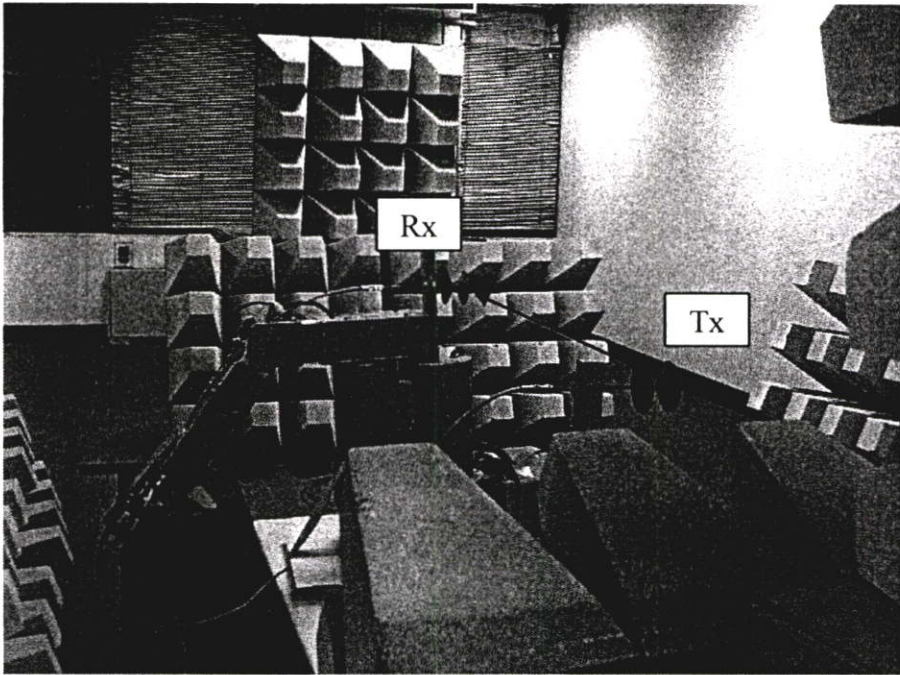
โดยในรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17 แสดงบล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดโดยนำข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์วงจรเข้ามาวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์แล้วจะได้เป็นฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ (Channel transfer function) และมารวมกับสัญญาณที่ใช้ส่งคือสัญญาณแถบผ่านสี่เหลี่ยมแล้วมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆของแต่ละการทดลองซึ่งจะแตกต่างกันออกไปเนื่องจากต้องการนำเสนอผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันในแต่ละแบบจำลองโดยจะอธิบายถึงผลที่เกิดขึ้นในบทต่อไป



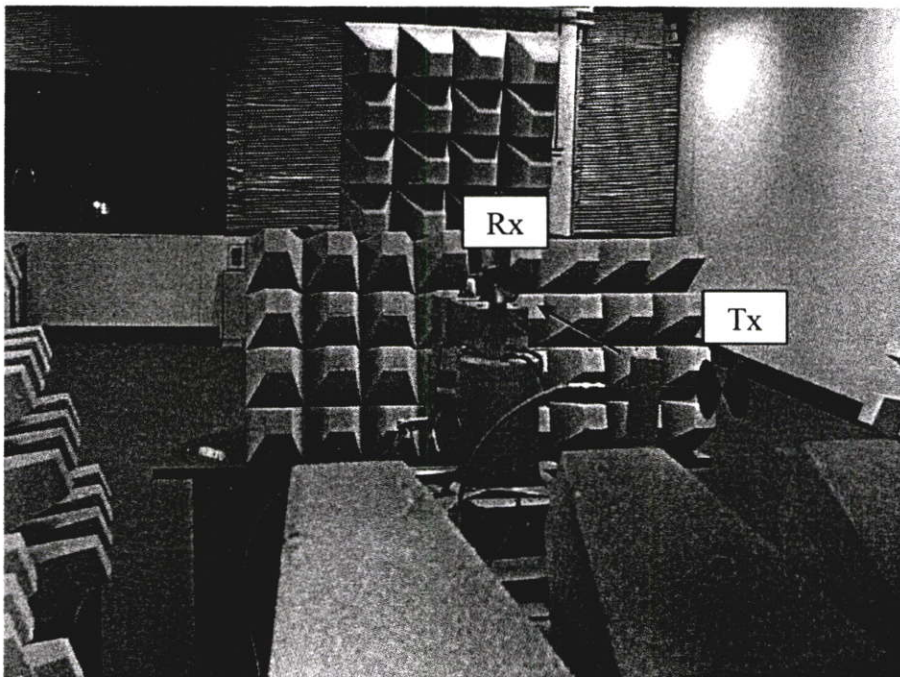
รูปที่ 4.18 การติดตั้งอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทดลองวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ ภายในอาคารแบบที่ 1 ในมุม 0 องศา



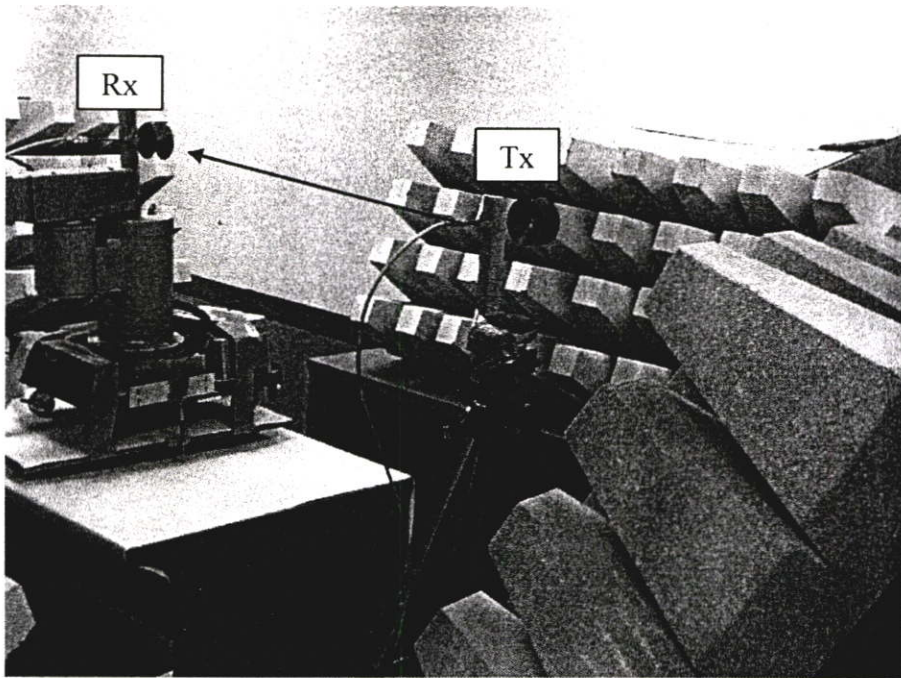
รูปที่ 4.19 การติดตั้งอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทดลองวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ ภายในอาคารแบบที่ 1 ในมุม 5 องศา



รูปที่ 4.20 การติดตั้งอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทดลองวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์  
ภายในอาคารแบบที่ 1 ในมุม 10 องศา



รูปที่ 4.21 การติดตั้งอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทดลองวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์  
ภายในอาคารแบบที่ 1 ในมุม 90 องศา



รูปที่ 4.22 การติดตั้งอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทดลองวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ภายในอาคารแบบที่ 1 ในมุม 180 องศา

รูปที่ 4.18 จนถึงรูปที่ 4.22 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายในการวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ภายในอาคารแบบที่ 1 ในครั้งที่ 2 คือเป็นการปรับปรุงการทดลองการวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ภายในอาคารแบบที่ 1 โดยจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าในมุมต่างๆจะสังเกตเห็นได้ว่าจะมีแผ่นป้องกันการสะท้อนวางไว้ทุกๆ มุมที่อาจจะเกิดการสะท้อน เพื่อเป็นการป้องกันการสะท้อนที่จะเกิดขึ้นทำให้ผลของการวัดสัญญาณนั้นได้ข้อมูลที่ผิดเพี้ยนมากเกินไป ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้ทำการปรับปรุงทั้งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ รวมไปถึงสภาพสภาวะแวดล้อมภายในห้องที่ทำการวัดสัญญาณ เพื่อที่จะได้ผลของการวัดสัญญาณที่จะนำมาวิเคราะห์และประเมินค่าเปรียบเทียบกับจากการทดลองวัดทั้งสองครั้งของการวิเคราะห์ข้อมูลในแบบจำลองที่ 1 เพื่อที่จะสามารถนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาทำการสรุปเปรียบเทียบว่าจากการปรับปรุงแล้วนั้น ผลจากการวิเคราะห์จะเป็นอย่างไร ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 5 ต่อไป

#### 4.5.2 การจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด

เนื่องจากการที่จะสามารถทราบถึงแนวโน้มของค่าอัตราการขยายผลจากการวิเคราะห์นั้นว่าไปทิศทางใดแล้วซึ่งสามารถนำชุดข้อมูลที่มีแนวโน้มทิศทางและการเปลี่ยนแปลงที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นมาทำการประมาณค่าฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลของอัตราการขยาย โดยใช้วิธีการ

ประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุดนี้ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ฟังก์ชัน โพลีโนเมียลกำลัง 2 แทนชุดข้อมูลเพราะให้ค่าผิดพลาดน้อยที่สุดเพราะฉะนั้นในหัวข้อนี้จะแสดง เฉพาะขั้นตอนวิธีการประมาณค่าฟังก์ชัน โพลีโนเมียลกำลัง 2 ดังนี้

#### 4.5.2.1 แบบจำลองของการถดถอยฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลัง 2

##### (2-Degree polynomial regression model)

แบบจำลองของการถดถอยฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลัง 2 นั้นสามารถเขียนสมการ โพลีโนเมียลกำลัง 2 โดยมีนิยามดังสมการที่ 4.2 คือ

$$y = a + bx + cx^2 \pm e \quad (4.2)$$

โดยกำหนดให้

$a, b, c$  คือ ค่าคงที่ที่ต้องการหา

$e$  คือ ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าฟังก์ชันและข้อมูล

แล้วหลังจากนั้นก็ทำการกำหนดจุดหรือชุดข้อมูลที่ต้องการพิจารณา คือ

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$$

โดยมีค่าผิดพลาดรวมทั้งหมด (Total square error) เท่ากับ

$$q = \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2 \quad (4.3)$$

หลังจากนั้นทำการหาอนุพันธ์ย่อย (Partial derivative) เพื่อทำการเทียบกับตัวแปร  $a, b, c$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ทำให้ค่าผิดพลาดรวมให้มีค่าน้อยที่สุด

$$\frac{\partial q}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2 = -2 \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2) = 0 \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial b} = \frac{\partial}{\partial b} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2 = -2 \sum_{j=1}^n x_j (y_j - a - bx_j - cx_j^2) = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial q}{\partial c} = \frac{\partial}{\partial c} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2 = -2 \sum_{j=1}^n x_j^2 (y_j - a - bx_j - cx_j^2) = 0 \quad (4.6)$$

โดยนำ -2 มาหารตลอดทั้งสมการที่ 4.4 สมการที่ 4.5 และ สมการที่ 4.6 จะได้สมการใหม่คือ

$$an + b \sum_{j=1}^n x_j + c \sum_{j=1}^n x_j^2 = \sum_{j=1}^n y_j \quad (4.7)$$

$$a \sum_{j=1}^n x_j + b \sum_{j=1}^n x_j^2 + c \sum_{j=1}^n x_j^3 = \sum_{j=1}^n x_j y_j \quad (4.8)$$

$$a \sum_{j=1}^n x_j^2 + b \sum_{j=1}^n x_j^3 + c \sum_{j=1}^n x_j^4 = \sum_{j=1}^n x_j^2 y_j \quad (4.9)$$

สามารถหาค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root mean square error) ได้คือ

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2} \quad (4.10)$$

ขั้นตอนทั้งหมดนี้คือวิธีการหาฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลที่กำหนดให้โดยมีค่าความผิดพลาด ( $e$ ) น้อยที่สุดและจะทำการแทนชุดข้อมูลลงในสมการข้างต้นเพื่อหาสมการที่ใช้แทนชุดของข้อมูลซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป

#### 4.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนในการทดลองวัดช่องสัญญาณ ในระบบแถบกว้างยิ่งภายในห้องที่มีลักษณะต่างกัน 3 แบบแล้วนำแบบการวัดภายในอาคารในแบบที่ 1 มาทำการปรับปรุงวิธีการวัดเพื่อนำผลที่ได้จากการวัดครั้งที่ 1 กับผลที่ได้จากการปรับปรุงการวัดในครั้งที่ 2 มาทำการเปรียบเทียบแล้วทำการประมาณค่าที่ได้จากการวัดเพื่อสรุปผลที่เกิดขึ้น และจะทำการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุดของผลอัตราการขยายในแบบจำลองการวัดภายในอาคารในแบบที่ 3 เนื่องจากอัตราการขยายมีการลดลงตามระยะทางซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นโดยการทดลองนี้ได้กล่าวถึงการใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ที่ตอบสนองช่วงความถี่ได้กว้าง ประกอบกับการใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัดบนโดเมนความถี่ เพื่อการตรวจสอบถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง และได้นำเสนอคุณลักษณะการสูญเสียในการแพร่คลื่นย่านแถบความถี่กว้างยิ่ง ที่ได้ส่งผ่านสายอากาศโดยได้นำสายอากาศติดกับหุ่นยนต์แตกต่างกันในแต่ละแบบจำลอง เพื่อที่จะนำผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะมาทำการประเมินค่าของการสูญเสีย โดยข้อมูลที่ได้จากการวัดทั้งหมดจะนำไปวิเคราะห์และแสดงผลในพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังจะแสดงในบทที่ 5

## บทที่ 5

# ผลการทดลองวิจัย และการวิเคราะห์

### 5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ข้อมูลของช่องสัญญาณที่ได้จากการวัดในอาคารทั้ง 3 แบบ โดยแสดงในพารามิเตอร์หลักคือ ภาพผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณ ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ ขนาดของฟังก์ชันการส่งผ่านสายอากาศ และเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านสายอากาศ ลักษณะการกระจายทางเวลาของสัญญาณในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งเป็นประเด็นหลักของการพิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้ โดยแบ่งตามลักษณะห้องภายในอาคารในแบบต่าง ๆ

โดยในบทนี้จะได้นำเสนอผลจากการวิเคราะห์ของการประมาณค่าของการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ในแต่ละแบบจำลอง และจะทำการประเมินค่าของการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ ในแบบจำลองการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงวิธีการวัดและสภาพแวดล้อมภายในห้องที่ทำการวัดสัญญาณ และจะทำการประมาณค่าของอัตราการขยายโดยวิธีการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุดในแบบจำลองการวัดภายในอาคารแบบที่ 3 ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อสุดท้าย

### 5.2 ผลการวิเคราะห์

#### 5.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

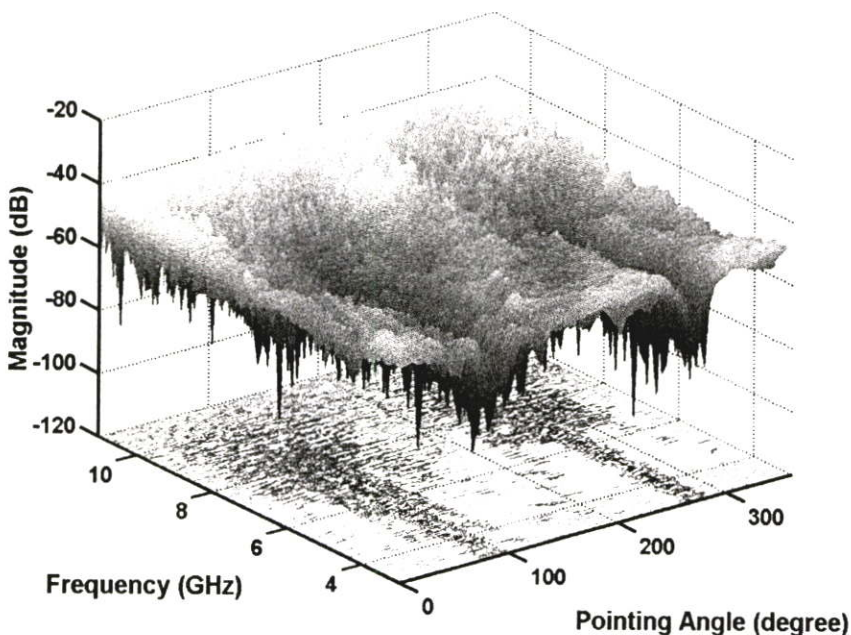
ลักษณะการวัดในแบบจำลองที่ 1 [4] ได้ทำการวัดสัญญาณภายในห้องประชุมภาควิศวกรรมสารสนเทศ ชั้น 12 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งในบริเวณแต่ละด้านของห้องจะใช้แผ่นป้องกันการสะท้อนวางอยู่ตามบริเวณรอบๆ ห้อง โดยกำหนดให้สายอากาศทางด้านรับและสายอากาศทางด้านส่งเป็นแบบกรวยคู่ ซึ่งมีลักษณะและขั้นตอนการวัดดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ในมุมต่างๆ ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศาและโดยมีระยะห่างคือ 1 เมตร ซึ่งเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะสามารถแสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ ดังต่อไปนี้

สิ่งที่ได้จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง คือผลตอบสนองอิมพัลส์ ซึ่งได้จากการแปลงฟูรีเยร์ผกผันของผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ได้จากการวัด ซึ่งเราได้นำผลนี้ไปทำการวิเคราะห์โดยประยุกต์ร่วมกับรูปสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งคังรูปที่ 4.8 โดยแสดงผลจากการจำลองให้เห็นในรูปแบบของฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัด ค่าการประวิงกำลังงานของ

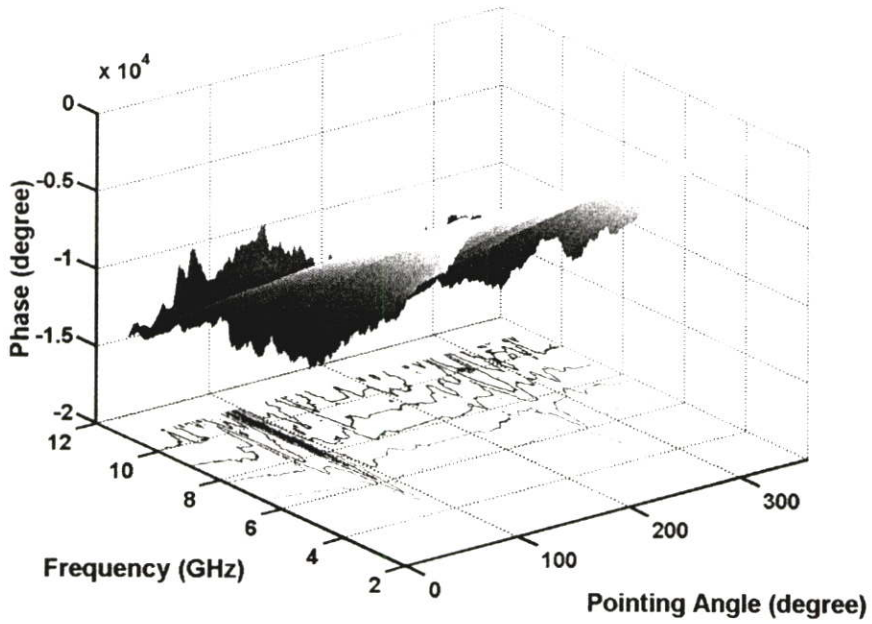
ช่องสัญญาณ ค่าความถี่ของสัญญาณ เพื่อหาค่าการสูญเสียกำลังงาน และอัตราการขยายของสัญญาณเมื่อใช้สมการแมตซ์ฟิลเตอร์ และค่าอัตราการขยายของสัญญาณเมื่อผ่านเป็นสายอากาศแบบไอโซโทรปิกในเชิงมุมที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของหุ่นยนต์และสายอากาศที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในมุมต่างๆ ผลจากการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.6 ตามลำดับ

### 5.2.1.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

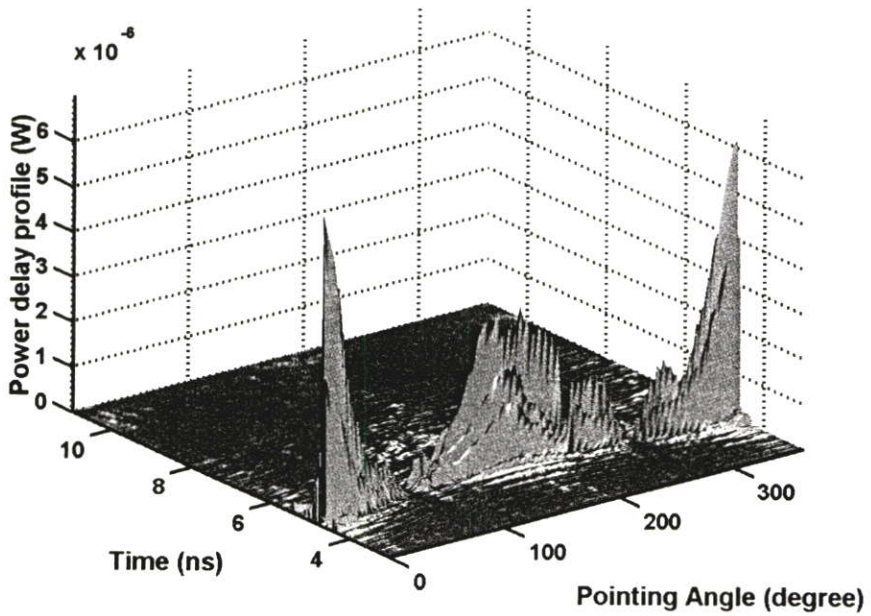
ผลที่ได้จากทดลอง คือแสดงผลจากการจำลองให้เห็นในรูปภาพขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 โดยผลจากการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.1 แสดงขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการผลการวัดภายในห้องแบบที่ 1 ซึ่งจะสามารถเห็นได้ว่าจะมีระดับของสัญญาณลดลงในช่วงมุม 90 องศา 270 องศา ซึ่งในสองมุมนี้ทิศทางในการรับสัญญาณของสายอากาศจะไม่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรง จึงทำให้มีระดับของสัญญาณมีระดับที่ต่ำกว่าในช่วงมุมอื่นๆ และในรูปที่ 5.2 แสดงเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในห้องแบบที่ 1 ซึ่งจะได้เห็นเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดในช่วงความถี่ต่างๆ และแสดงให้เห็นช่วงที่ระดับของสัญญาณลดระดับลงเช่นเดียวกันกับขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัด คือในช่วงมุม 90 องศา 270 องศา



รูปที่ 5.1 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศจากการวัดผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1



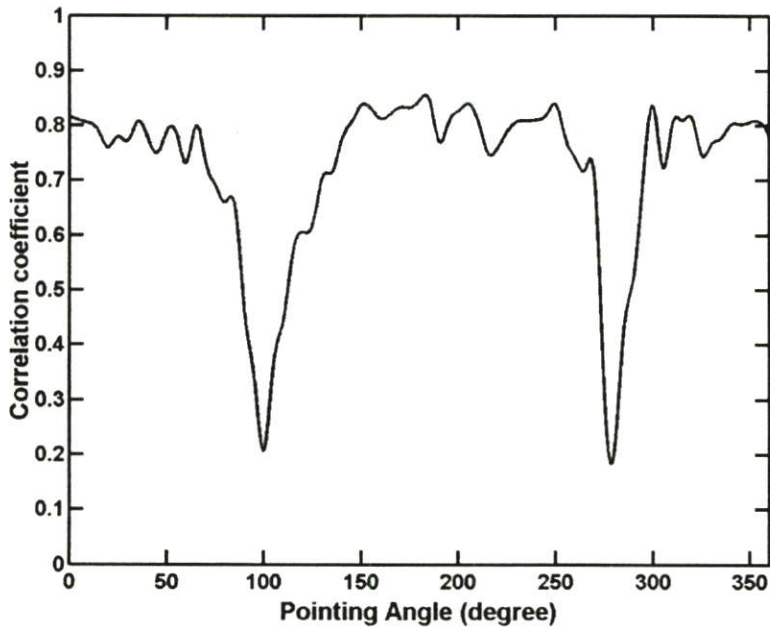
รูปที่ 5.2 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศจากการวัดผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1



รูปที่ 5.3 การประวิงกำลังงานในแต่ละมุมจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

### 5.2.1.2 การประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

จากรูปที่ 5.3 แสดงผลของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟ 3 แกนคือ เวลาที่ใช้ในการเดินทาง ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้และมุมที่ทำการวัดโดยพิจารณา จากรูปจะเห็นได้ว่าในกรณีที่มีการหมุนของหุ่นยนต์ในมุมต่างๆนั้น สัญญาณเดินทางมาถึงด้านรับใช้เวลาเท่ากันคือประมาณ 5 นาโนวินาที โดยมีระดับของสัญญาณที่ต่างกันตามมุมที่ทำการหมุนสายอากาศด้านรับซึ่งที่มุม 90 และ 270 องศาจะมีระดับของสัญญาณต่ำกว่ามุมอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างของสายอากาศและในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์นั้นจะเห็นได้ว่าระดับของสัญญาณในแต่ละมุนั้นลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 90 และ 270 องศา ระดับของสัญญาณจะต่ำที่สุดเนื่องจากเกิดสายอากาศทางด้านรับหมุนไปในทิศทางที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรง



รูปที่ 5.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณในมุมต่างๆ เปรียบเทียบกับกันจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

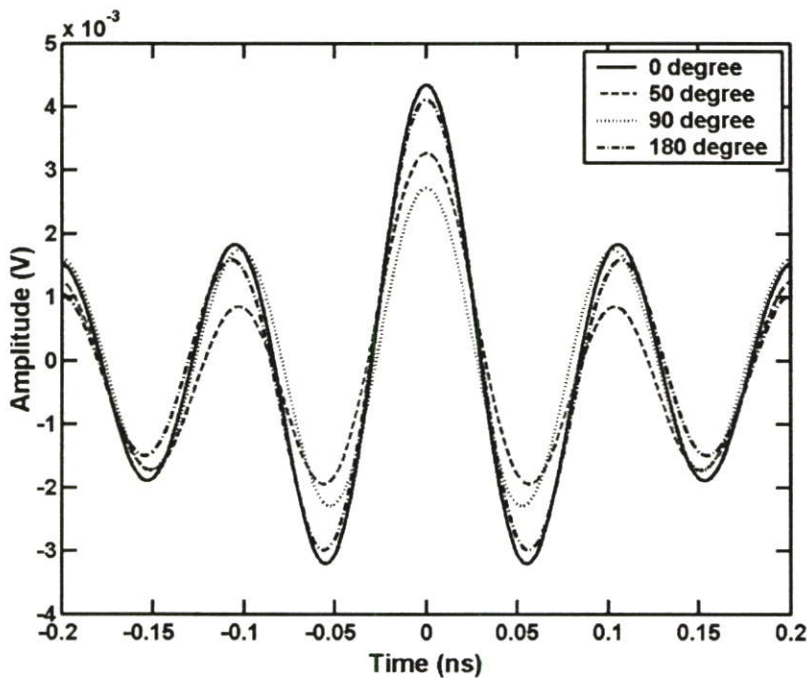
### 5.2.1.3 ความเพี้ยนของสัญญาณที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

ในการวิเคราะห์ถึงความเพี้ยนของสัญญาณจากข้อมูลการวัดภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงนั้นยังคงพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.4 จากรูปจะเห็นว่าได้แสดงในลักษณะของกราฟ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นผลความแตกต่างของค่าความเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้

ระหว่างมุมต่างๆที่ทำการวัดได้อย่างชัดเจน โดยกรณีที่มีผลกระทบจากการหมุนของหุ่นยนต์ นั้นค่าความเพี้ยนของสัญญาณจะเพิ่มมากขึ้นในมุมที่สายอากาศไม่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรง เมื่อเปรียบเทียบกับมุมที่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรงค่าจะมีความแตกต่างกันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 90 องศา และมุม 270 องศา โดยค่า ความเพี้ยนจะมีค่าคือ 0.207 และ 0.203 ตามลำดับซึ่งจะเกิดความเพี้ยนของสัญญาณมากที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนของหุ่นยนต์และทำให้สายอากาศที่ติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์หมุนไปในทิศทางที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรง

#### 5.2.1.4 รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่ด้านรับที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

จากรูปที่ 5.5 แสดงถึงคลื่นสัญญาณด้านรับจากช่องสัญญาณของสายอากาศด้านรับและส่งที่มีความสูงเท่ากับ 1.6 เมตร และแสดงมุมต่างๆ นำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะพบว่าที่มุม 0 องศาจะมีลักษณะรูปคลื่นที่มีระดับของสัญญาณที่สูงที่สุด เพราะเป็นมุมที่สายอากาศที่ติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์สามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด และในมุมอื่นๆ ที่ทำการหมุนของหุ่นยนต์ทำให้สายอากาศทางด้านรับนั้นได้เปลี่ยนทิศทางไป จึงทำให้ขนาดของยอดคลื่นและระดับของสัญญาณจะลดลงตามมุมในการรับสัญญาณของสายอากาศ โดยมองเห็นความแตกต่างกันได้อย่างชัดเจนของทั้ง 4 มุม (0 องศา 50 องศา 90 องศาและ 180 องศา)



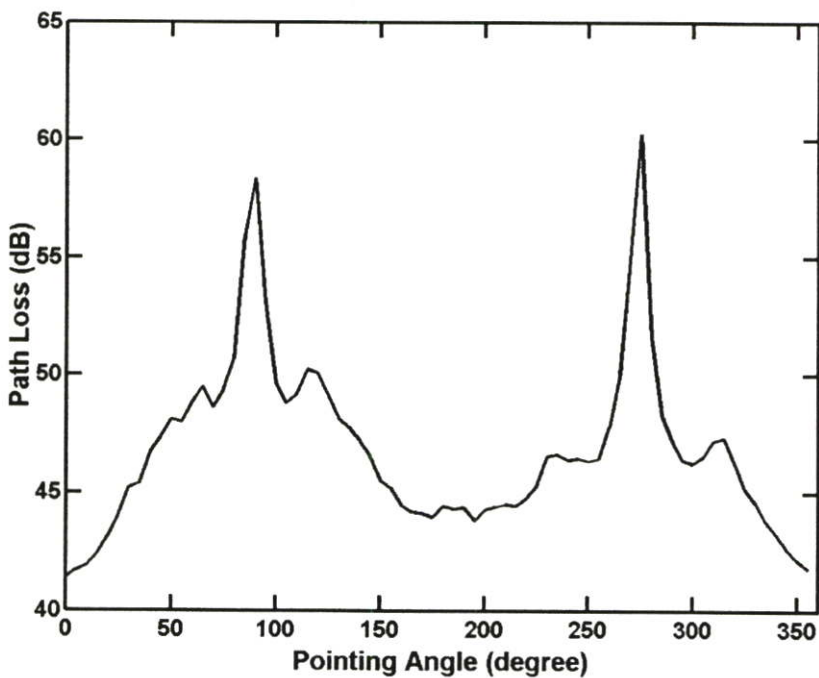
รูปที่ 5.5 รูปแบบสัญญาณด้านรับในมุมต่างๆ เปรียบเทียบกันจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

สรุปได้ว่าในกรณีที่นำสายอากาศมาติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์ แล้วทำการหมุนหุ่นยนต์เป็นวงกลมตั้งแต่มุม 0 องศาจนถึง 360 องศา ขนาดของยอดคลื่นและระดับของสัญญาณจะลดลงตามมุม

และทิศทางในการรับคลื่น โดยมุมที่ทำให้ระดับของยอดคลื่นลดลงมากที่สุดคือที่มุม 90 องศา ซึ่งเป็นมุมที่สายอากาศทางด้านรับหันไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับสายอากาศทางด้านส่ง จึงทำให้ระดับกำลังของสัญญาณนั้นมีกำลังงานที่ต่ำมาก

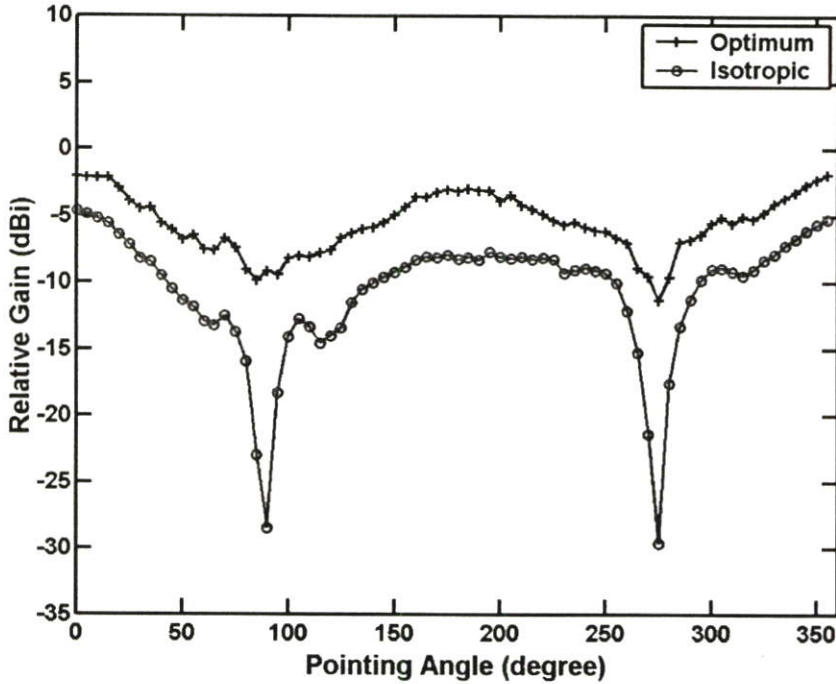
#### 5.2.1.5 การสูญเสียกำลังงานผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

ผลจากการวัดและสภาพแวดล้อมของการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 ทำให้ได้ค่าการสูญเสียกำลังงานที่สูงมากในช่วงมุม 90 องศา และในมุม 270 องศาและช่วงที่สูญเสียกำลังงานน้อยที่สุดก็คือช่วงที่หุ่นยนต์หันหน้าไปด้านที่สายอากาศด้านรับสามารถรับสัญญาณได้โดยตรงคือในช่วงมุม 0 องศา และ 360 องศาและจะลดลงเพิ่มขึ้นตามมุมที่หมุน ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 การสูญเสียกำลังงานของสัญญาณในมุมต่างๆจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

จากรูปที่ 5.6 ผลจากการวัดและสภาพแวดล้อมของการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 ทำให้ทราบว่าในระยะที่ความสูงของสายอากาศที่เท่ากัน แต่เมื่อมีการหมุนของตัวหุ่นยนต์ที่มีสายอากาศติดตั้งอยู่ ทำให้ได้ทราบค่าการสูญเสียกำลังงานว่าในช่วงที่เกิดการสูญเสียที่สูงมากที่สุดได้แก่คือมุม 90 องศา และมุม 270 องศาซึ่งจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นมากคืออยู่ในช่วง 58 dB และ 60 dB ตามลำดับ



รูปที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

#### 5.2.1.6 อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

ผลจากการวัดและสภาพแวดล้อมของการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 ทำให้ได้ค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านเป็นดังนี้ โดยมุมที่มีค่าอัตราการขยายที่สูงก็คือ มุม 0 องศา มุม 180 องศาและมุม 360 องศา ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถดูได้จากตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

ตำแหน่ง	ค่าอัตราการขยาย (Optimum)	ค่าอัตราการขยาย (Isotropic)
จุด1 ที่ 0 องศา	-2.0384 dBi	-4.6163 dBi
จุด2 ที่ 30 องศา	-4.4702 dBi	-8.1791 dBi
จุด3 ที่ 60 องศา	-7.5493 dBi	-12.9077 dBi
จุด4 ที่ 90 องศา	-9.1624 dBi	-28.4956 dBi

**ตารางที่ 5.1** ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 (ต่อ)

ตำแหน่ง	ค่าอัตราการขยาย (Optimum)	ค่าอัตราการขยาย (Isotropic)
จุด 5 ที่ 120 องศา	-7.5899 dBi	-14.0324 dBi
จุด 6 ที่ 150 องศา	-4.9738 dBi	-9.2359 dBi
จุด 7 ที่ 180 องศา	-3.1658 dBi	-8.2946 dBi
จุด 8 ที่ 210 องศา	-4.2060 dBi	-8.1034 dBi
จุด 9 ที่ 240 องศา	-5.8853 dBi	-8.9158 dBi
จุด 10 ที่ 270 องศา	-8.9240 dBi	-15.2932 dBi
จุด 11 ที่ 300 องศา	-6.3922 dBi	-9.8076 dBi
จุด 12 ที่ 330 องศา	-4.7345 dBi	-8.3011 dBi
จุด 13 ที่ 360 องศา	-1.8984 dBi	-5.2674 dBi

โดยผลจากการวิเคราะห์หานั้นจะนำเสนอในสองกรณีคือ กรณีแบบไอโซโทรปิกและในกรณีค่าออปติมัล ซึ่งกรณีแบบไอโซโทรปิกนั้นแสดงถึงกรณีคิดค่าอัตราการขยายของสายอากาศให้มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนในกรณีค่าออปติมัลนั้นรวมเอาผลอัตราการขยายที่ได้จากการวัดทั้งหมดมาคิดรวม โดยผลที่ได้นั้นอาจจะเกิดการสะท้อนของคลื่นจากส่วนต่างๆ ที่สายอากาศสามารถรับได้จึงมีอัตราการขยายที่สูงกว่า เนื่องจากการทดลองวัดสัญญาณนั้นได้ทำการวัดภายในอาคารที่สามารถเกิดการสะท้อนจากวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องได้และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.25 โดยค่าเฉลี่ยในกรณีไอโซโทรปิก คือ -10.6462 dBi และค่าเฉลี่ยในกรณีค่าออปติมัลนั้นคือ -5.5393 dBi ซึ่งทั้งสองกรณีมีค่าเฉลี่ยต่างกันเท่ากับ -5.1069 dBi

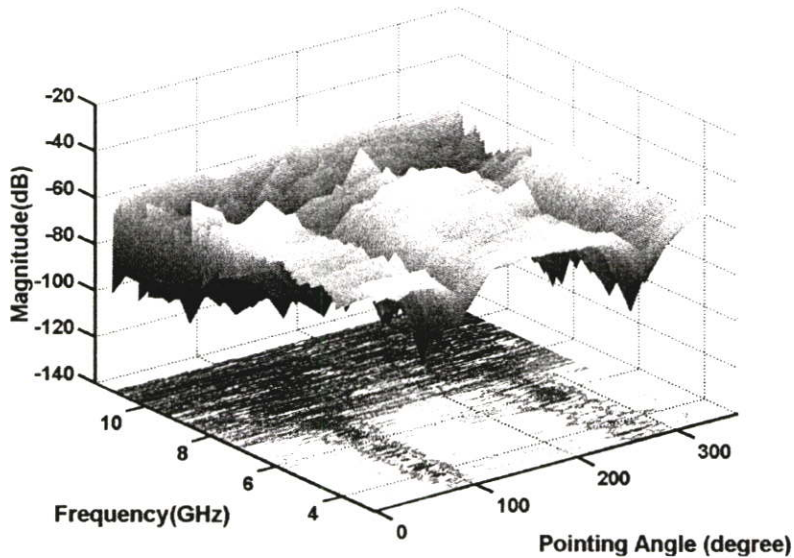
### 5.2.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2

การวัดภายในห้องแบบที่ 2 ลักษณะชั้นตอนจะต่างจากการวัดในห้องแบบที่ 1 โดยจะกำหนดให้สายอากาศด้านรับซึ่งติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์ ห่างจากสายอากาศด้านส่งเป็นระยะทางเท่ากับ 1 เมตรและ 2 เมตร ซึ่งทำการวัดด้วย สายอากาศแบบกรวยคู่และทำการติดตั้งสายอากาศในแนวนอน

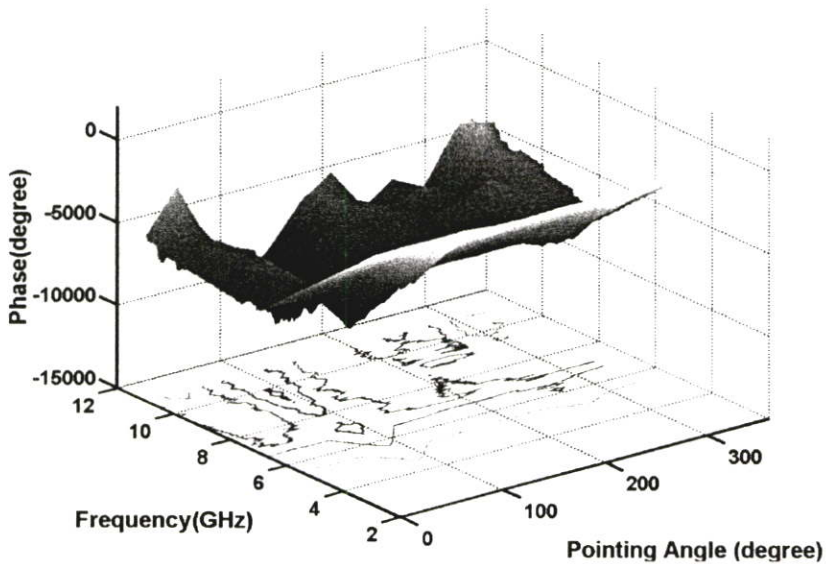
โดยจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในมุมต่างๆ ตั้งแต่ 0 องศาถึง 360 องศา ช่วงละ 30 องศา และเปรียบเทียบกัน 2 ระยะ ดังจะแสดงให้เห็นในรูปของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

### 5.2.2.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดภายในอาคารแบบที่ 2

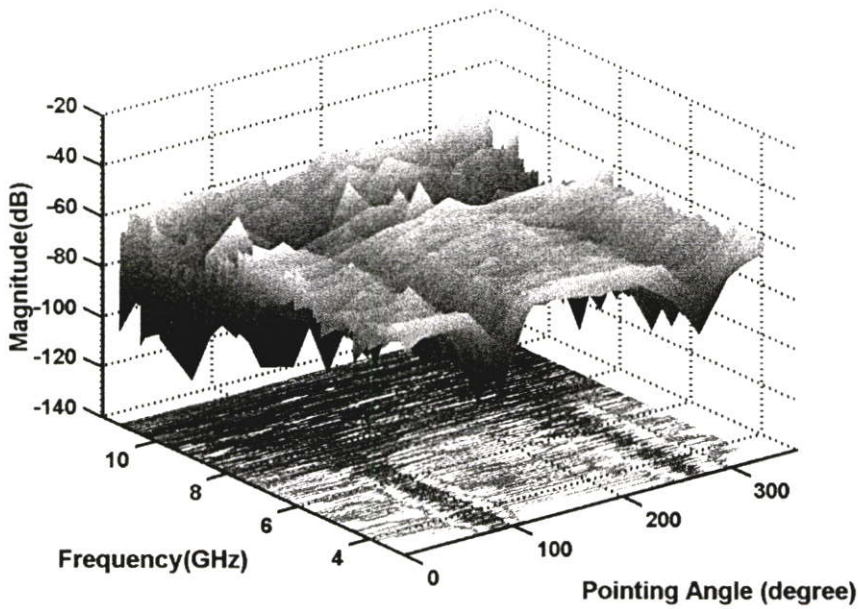
ในส่วนของการวิเคราะห์ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ นั้นผลจากการวิเคราะห์มาแสดงในรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.11 ตามลำดับ



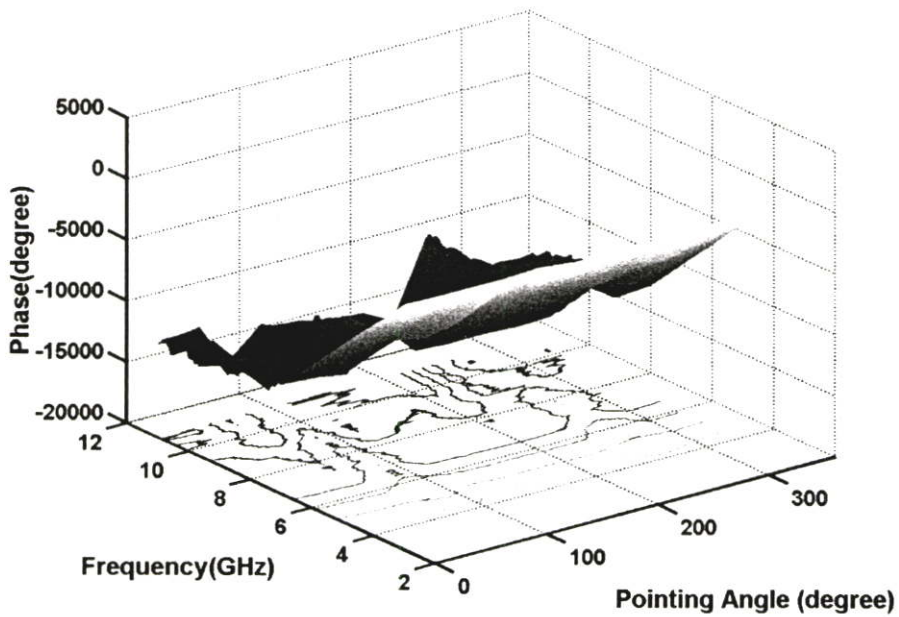
รูปที่ 5.8 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 1 เมตร



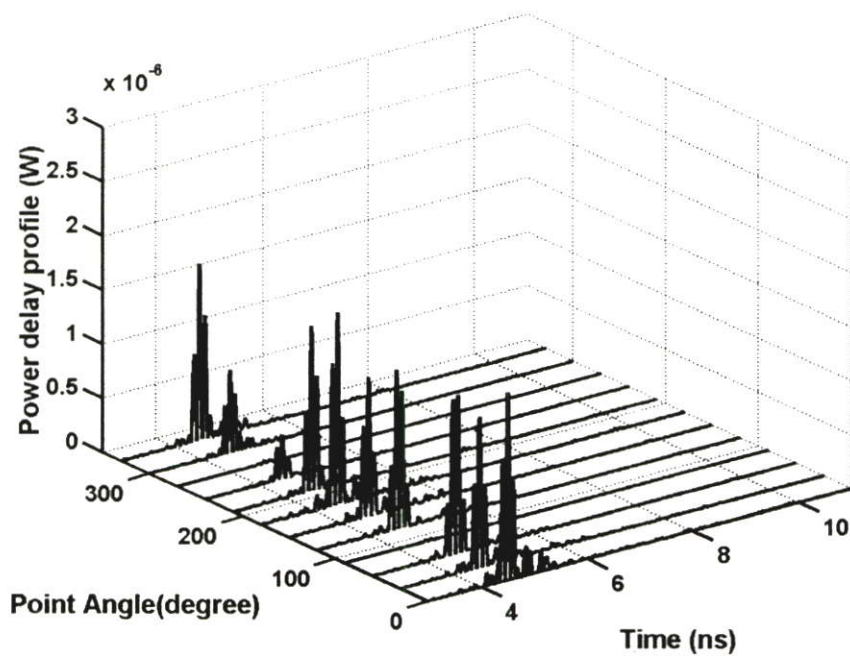
รูปที่ 5.9 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 1 เมตร



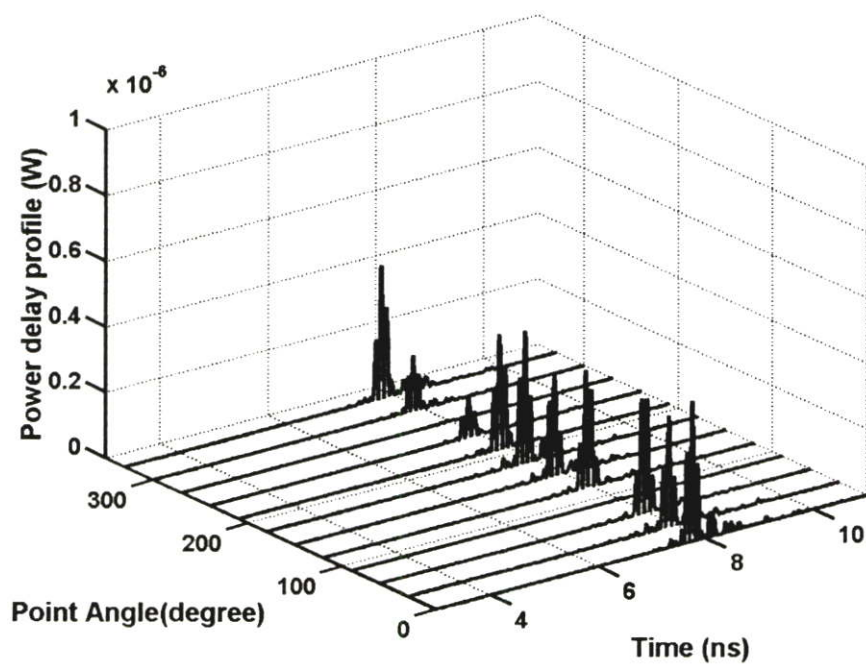
รูปที่ 5.10 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 2 เมตร



รูปที่ 5.11 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 2 เมตร



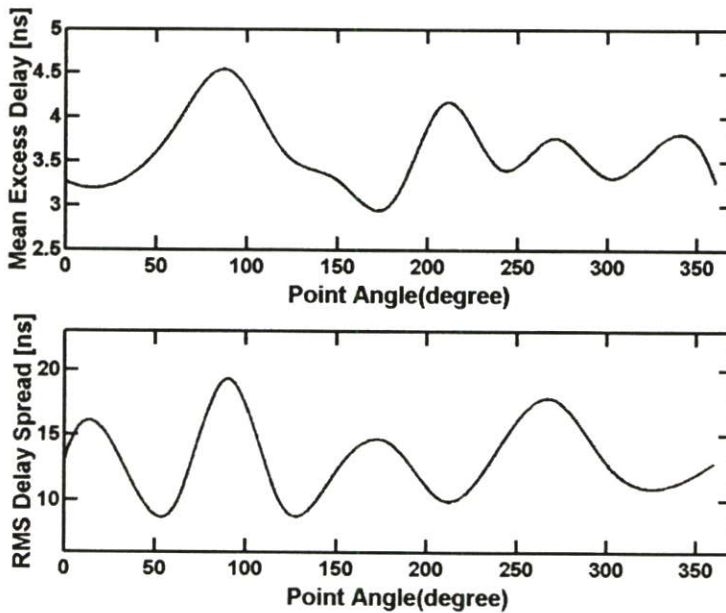
รูปที่ 5.12 การประวิงกำลังงานในแต่ละมุมจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 1 เมตร



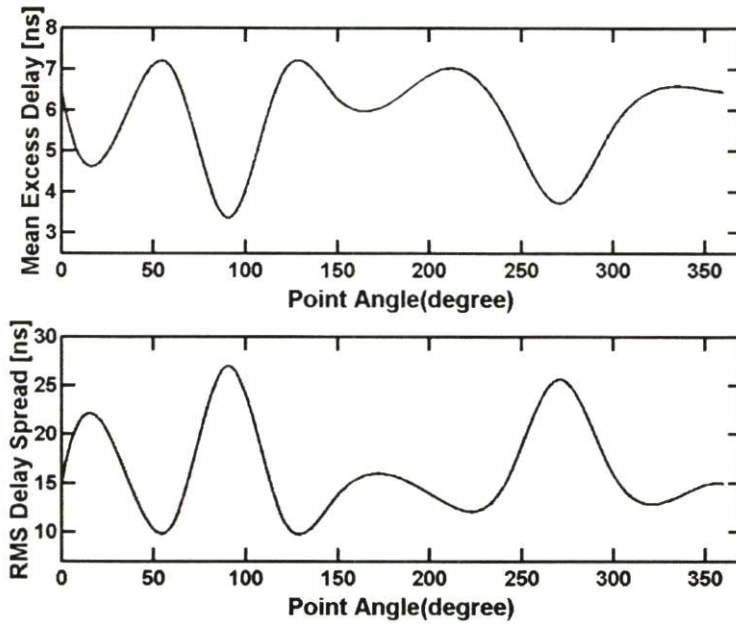
รูปที่ 5.13 การประวิงกำลังงานในแต่ละมุมจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 2 เมตร

### 5.2.2.2 การประวิงกำลังงานของสัญญาณผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2

จากรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ในการแสดงผลของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟ 3 แกนคือ เวลาที่ใช้ในการเดินทาง ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้และมุมที่ทำการวัดโดยพิจารณา จากรูปจะเห็นได้ว่าในกรณีที่มีการหมุนของหุ่นยนต์ในมุมต่างๆ นั้นสัญญาณเดินทางมาถึงด้านรับใช้เวลาเท่ากันคือประมาณ 5 นาโนวินาทีในระยะ 1 เมตรและ ประมาณ 8 นาโนวินาทีในระยะห่างระหว่างด้านรับและด้านส่งมีขนาด 2 เมตร โดยมีระดับของสัญญาณที่ต่างกันตามมุมที่ทำการหมุนสายอากาศด้านรับซึ่งที่มุม 90 และ 270 องศา นั้นจะมีระดับของสัญญาณต่ำกว่ามุมอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างของสายอากาศและผลกระทบจากหุ่นยนต์นั้นจะเห็นได้ว่าระดับของสัญญาณในแต่ละมุมนั้นลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 90 และ 270 องศา ระดับของสัญญาณจะต่ำที่สุดเนื่องจากเกิดสายอากาศทางด้านรับหมุนไปในทิศทางที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้และจะสังเกตได้ว่าเมื่อมีระยะที่ห่างกันออกไปจะทำให้ระดับของสัญญาณนั้นถูกลดทอนลงไปด้วยตามระยะห่างของสายอากาศโดยสามารถสังเกตได้จากรูปทั้งสองรูปเปรียบเทียบกันแสดงให้เห็นว่าระยะทางและมุมที่ทำการหมุนหรือมีการเปลี่ยนแปลงไปย่อมมีผลกระทบต่อระดับของสัญญาณและรวมไปถึงค่าเวลาในการเดินทางมาถึงของสัญญาณด้วยเช่นกัน



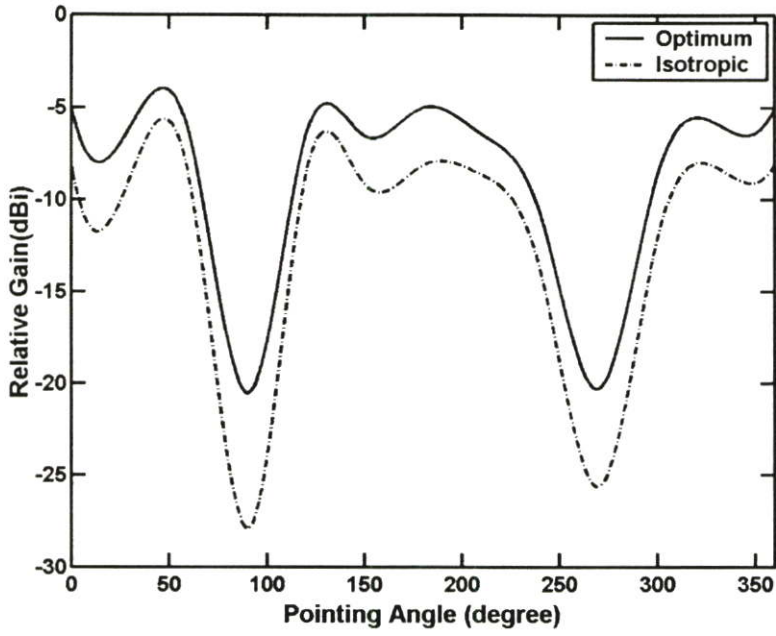
รูปที่ 5.14 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเวลาประวิง และค่าการแผ่ประวิงระหว่างระยะห่างด้านส่งกับด้านรับ 1 เมตร



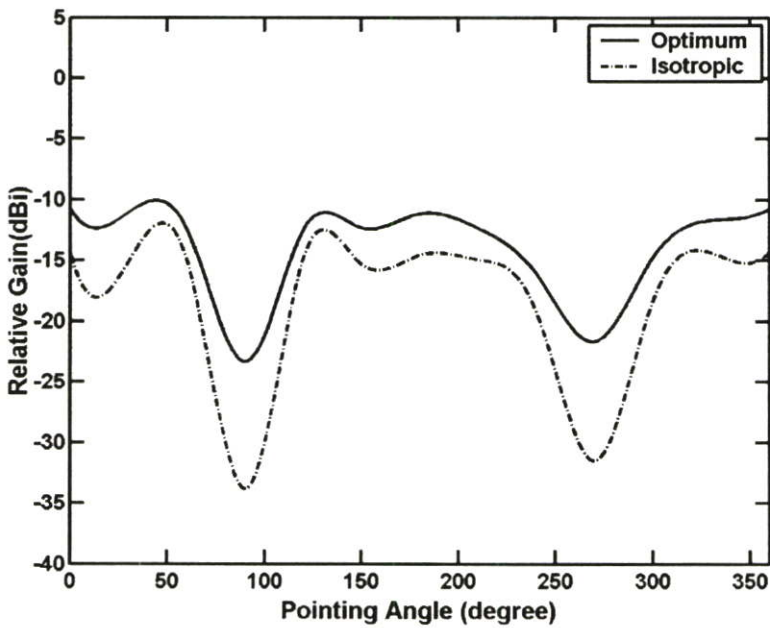
รูปที่ 5.15 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเวลาประวิง และค่าการแผ่ประวิงระหว่างระยะห่าง ด้านส่งกับด้านรับ 2 เมตร

### 5.2.2.3 ลักษณะการกระจายทางเวลาของสัญญาณผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2

การวิเคราะห์เพื่อหาผลของการกระจายทางเวลา ของสัญญาณนั้นจะพิจารณาใน 2 ส่วนหลักๆ คือ ค่าเฉลี่ยเวลาประวิงและค่าการแผ่ประวิง โดยจะแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของเวลาที่เข้ามาถึงของสัญญาณและเวลาของสัญญาณที่กระจายออกไปจากค่าเฉลี่ย ซึ่งจะเป็นตัวบอกถึงการเกิดสัญญาณที่มาจากหลายทิศทางตามลำดับ แต่เนื่องจากการวัดได้ทำภายในห้องที่ไม่มี การดูดซับการสะท้อนของคลื่น จึงทำให้ค่าเฉลี่ยเวลาประวิงสามารถประมาณได้จากภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังของสัญญาณได้ในทั้ง 2 กรณี ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงขอแสดงเฉพาะค่าการแผ่ประวิงในมุมต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.14 และ 5.15 จากรูปจะเห็นได้ว่าผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเวลาประวิง และค่าการแผ่ประวิงระหว่างในแต่ละมุมเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 90 องศา และในมุม 270 องศา ค่าเพิ่มขึ้นซึ่งมากกว่ามุมอื่นๆ ทั้งนี้ก็เนื่องจากเกิดผลกระทบของการติดตั้งสายอากาศบนตัวหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่ และจากรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 แสดงให้เห็นถึงผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเวลาประวิง และค่าการแผ่ประวิงระหว่างระยะห่างด้านส่งกับด้านรับ 1 เมตรและ 2 เมตร ซึ่งเกิดการกระจายทางเวลาของช่องสัญญาณมากน้อยต่างกันออกไปตามมุมในการหมุน ซึ่งนั่นก็หมายความว่าสัญญาณที่เข้ามายังสายอากาศด้านรับนั้นเข้ามาในเวลาที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งอันเนื่องมาจากการหมุนรวมไปถึงสะท้อนของหุ่นยนต์และสภาพแวดล้อมภายในห้องนั่นเอง



รูปที่ 5.16 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 ในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 1 เมตร



รูปที่ 5.17 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 ในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ 2 เมตร

### 5.2.2.4 อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งผลการวัดภายในอาคาร แบบที่ 2

จากการวิเคราะห์ผลการวัดช่องสัญญาณ ในรูปที่ 5.16 และ รูปที่ 5.17 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง แสดงให้เห็นถึงค่าอัตราการขยายในแต่ละมุมที่ทำการวัด และเปรียบเทียบกันระหว่างระยะห่างสายอากาศทางด้านรับและสายอากาศด้านส่ง ที่ระยะ 1 เมตรและ 2 เมตร โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถดูได้จากตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3

**ตารางที่ 5.2** ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้าง ยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 ในกรณีที่มิมีระยะห่างเท่ากับ 1 เมตร

ตำแหน่ง	ค่าอัตราการขยาย (Optimum)	ค่าอัตราการขยาย (Isotropic)
จุด1 ที่ 0 องศา	-5.0624 dBi	-8.1145 dBi
จุด2 ที่ 30 องศา	-6.0905 dBi	-8.8101 dBi
จุด3 ที่ 60 องศา	-6.3754 dBi	-8.7696 dBi
จุด4 ที่ 90 องศา	-20.4959 dBi	-27.8915 dBi
จุด5 ที่ 120 องศา	-6.5348 dBi	-8.6574 dBi
จุด6 ที่ 150 องศา	-6.5387 dBi	-9.1511 dBi
จุด7 ที่ 180 องศา	-5.0038 dBi	-8.1322 dBi
จุด8 ที่ 210 องศา	-6.4531 dBi	-8.6428 dBi
จุด9 ที่ 240 องศา	-10.7995 dBi	-13.8601 dBi
จุด10 ที่ 270 องศา	-20.2520 dBi	-25.6134 dBi
จุด11 ที่ 300 องศา	-8.7138 dBi	-12.1590 dBi
จุด12 ที่ 330 องศา	-5.8622 dBi	-8.2147 dBi
จุด13 ที่ 360 องศา	-5.0624 dBi	-8.1145 dBi

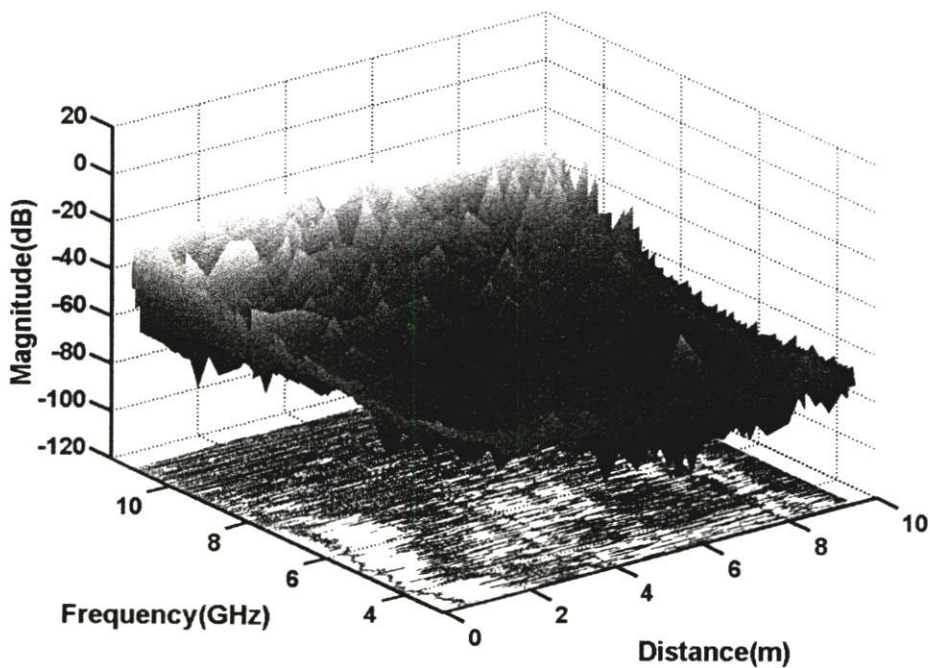
ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 ในกรณีที่มีระยะห่างเท่ากับ 2 เมตร

ตำแหน่ง	ค่าอัตราการขยาย (Optimum)	ค่าอัตราการขยาย (Isotropic)
จุด1 ที่ 0 องศา	-10.7137 dBi	-14.2947 dBi
จุด2 ที่ 30 องศา	-11.0741 dBi	-15.1587 dBi
จุด3 ที่ 60 องศา	-12.3902 dBi	-14.9669 dBi
จุด4 ที่ 90 องศา	-23.3247 dBi	-33.8222 dBi
จุด5 ที่ 120 องศา	-12.4629 dBi	-14.8116 dBi
จุด6 ที่ 150 องศา	-12.3053 dBi	-15.3085 dBi
จุด7 ที่ 180 องศา	-11.1458 dBi	-14.5500 dBi
จุด8 ที่ 210 องศา	-12.3305 dBi	-14.9009 dBi
จุด9 ที่ 240 องศา	-16.1095 dBi	-19.2635 dBi
จุด10 ที่ 270 องศา	-21.6531 dBi	-31.5067 dBi
จุด11 ที่ 300 องศา	-14.7471 dBi	-18.3575 dBi
จุด12 ที่ 330 องศา	-11.6702 dBi	-14.3440 dBi
จุด13 ที่ 360 องศา	-10.7137 dBi	-14.2947 dBi

โดยผลจากการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ว่า ในกรณีมีการหมุนหุ่นยนต์จะทำให้การเปลี่ยนแปลงมุมของการรับสัญญาณของสายอากาศ อันเป็นผลเนื่องมาจากเกิดผลการสะท้อนของตัวหุ่นยนต์และสภาพแวดล้อมภายในอาคารรวมไปถึงระยะทางระหว่างสายอากาศทางด้านรับ และสายอากาศทางด้านส่ง ซึ่งผลกระทบดังกล่าวนี้ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของสัญญาณในภาครับโดยตรง เพราะฉะนั้นจุดนี้จึงเป็นประเด็นที่ควรจะนำมาพิจารณา ในการที่จะนำไปประกอบการพิจารณาออกแบบระบบเพื่อวิเคราะห์หาวิธีการในการแก้ปัญหา หรือหลีกเลี่ยงผลกระทบดังกล่าวนี้ต่อไปในอนาคต

### 5.2.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดภายในอาคารแบบที่ 3

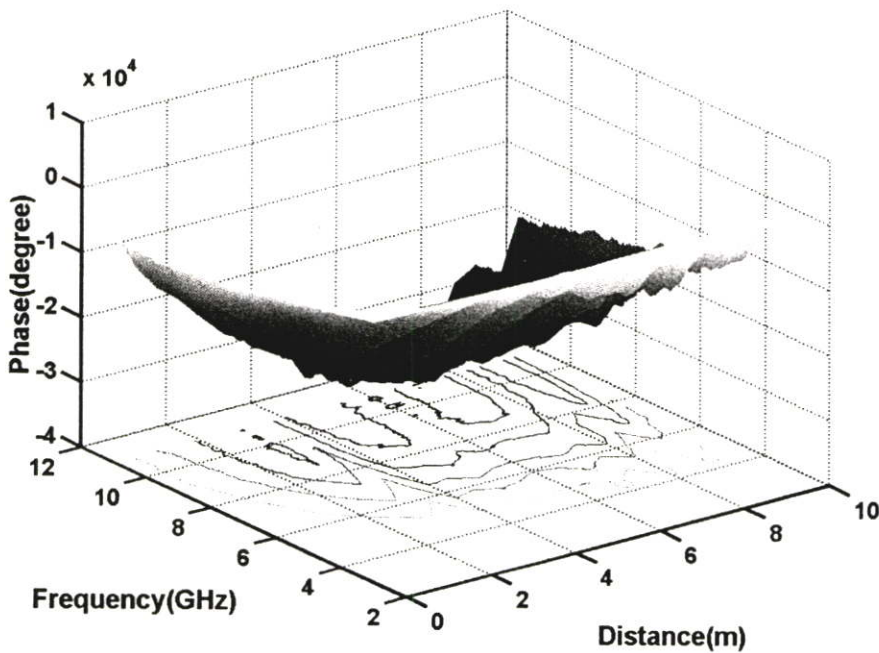
ในการทดลองแบบที่ 3 นี้ได้ทำการวัดภายในห้องซึ่งมีลักษณะดังรูปที่แสดงไว้ในบทที่ผ่านมาซึ่งทำการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรรายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก โดยใช้สายอากาศทั้งทางด้านรับและส่งเป็นสายอากาศแบบกรวยคู่ ซึ่งมีลักษณะการติดตั้งสายอากาศเป็นแบบแนวตั้งแล้วทำการเพิ่มระยะห่างของสายอากาศด้านส่งและด้านรับออกไปครั้งละ 0.5 เมตร ไปจนถึงระยะที่ 10 เมตร ส่วนขั้นตอนในการวัดดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเพื่อที่จะตรวจสอบถึงผลการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณภายในสภาวะแวดล้อมจริงที่มีผนังกำแพงว่ามีผลอย่างไรกับช่องสัญญาณ โดยผลที่ได้จากการวัดจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์และในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ในระยะทางต่างๆ ซึ่งจะมีระยะที่ห่างกันออกไปว่าจะเกิดผลอย่างไรซึ่งเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์บน โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะสามารถแสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดขึ้นกับช่องสัญญาณในลักษณะต่างๆ ดังนี้



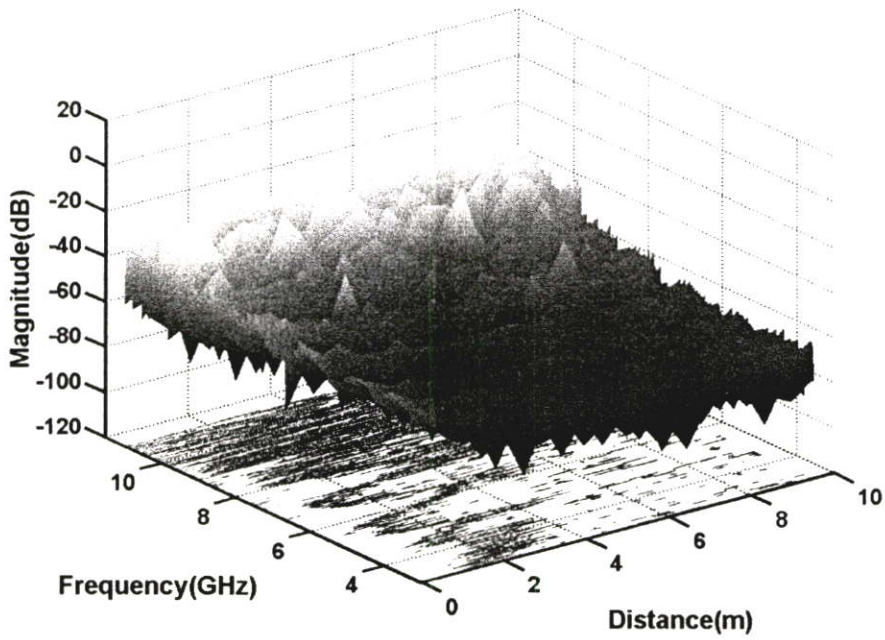
รูปที่ 5.18 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์

### 5.2.3.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 3

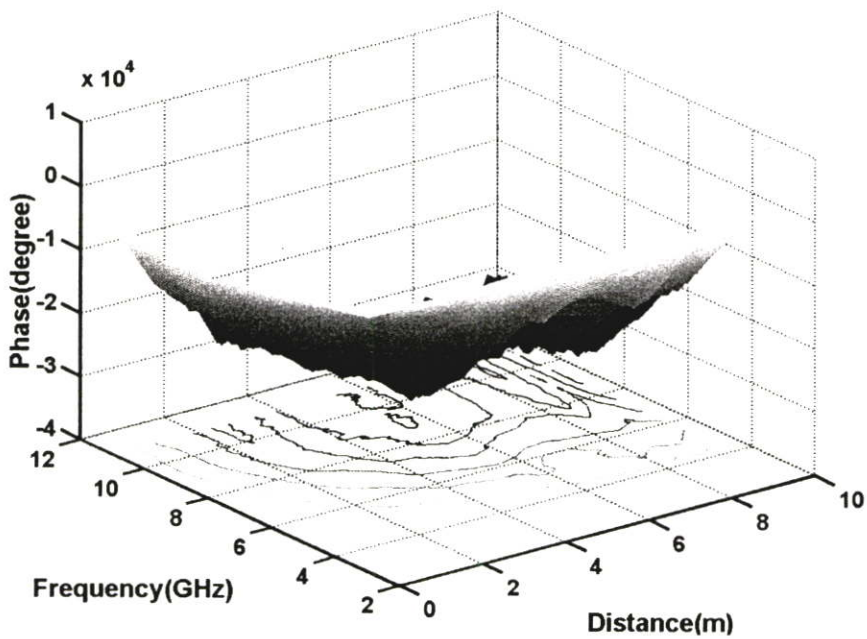
ผลที่ได้จากทดลองก็คือ ผลตอบสนองอิมพัลส์ ซึ่งได้จากการแปลงฟูริเยร์ผกผันของผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ได้จากการวัด ซึ่งเราได้นำผลนี้ไปทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงผลจากการจำลองให้เห็นในรูปภาพขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์และที่ไม่ได้ทำการติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์ซึ่งจะแสดงให้เห็น ตั้งแต่ระยะ 0.5 เมตร ไปจนถึงระยะ 10 เมตร โดยในส่วนของขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในทั้งสองกรณีจะเห็นได้ว่าการแกว่งขนาดของสัญญาณมากอันเนื่องมาจากได้ทำการวัดสัญญาณในสภาพแวดล้อมที่มีการสะท้อนจากวัสดุและพื้นผิวภายในอาคาร ในส่วนของเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศนั้นจะเห็นได้ว่าในสภาพแวดล้อมที่ทำการวัดนั้นทำให้มุมของเฟสเปลี่ยนไปโดยผลจากการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.18 ถึงรูปที่ 5.21 ตามลำดับ



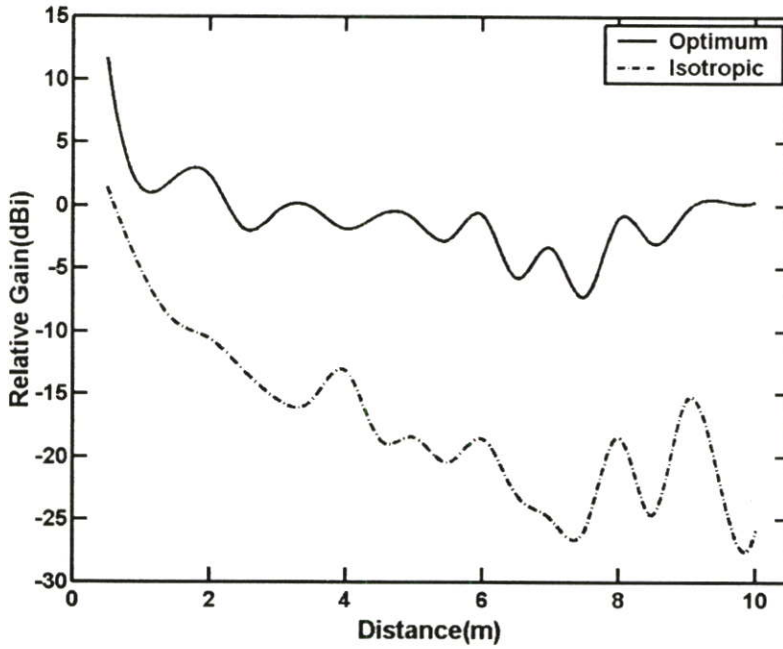
รูปที่ 5.19 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์



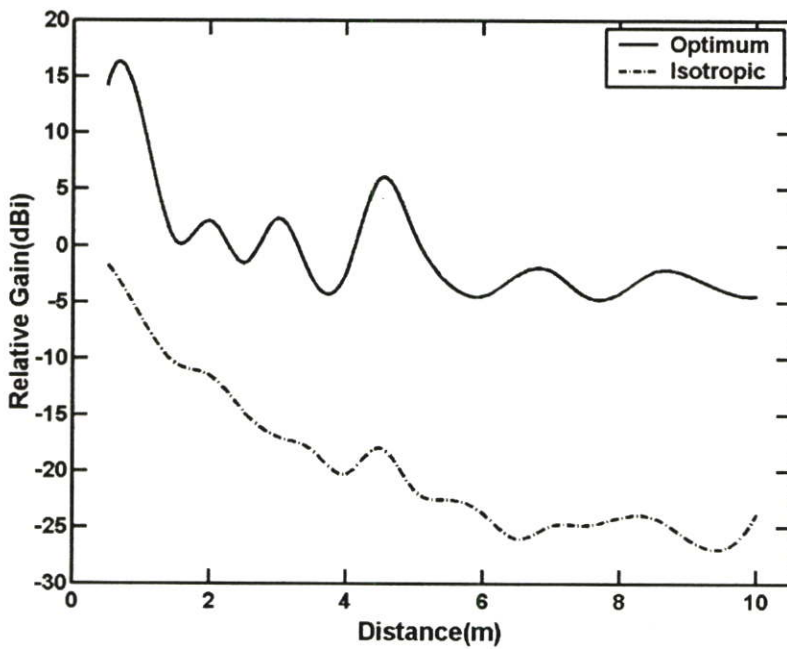
รูปที่ 5.20 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์



รูปที่ 5.21 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์



รูปที่ 5.22 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในกรณีที่ไม่มีการกระทบจากหุ่นยนต์



รูปที่ 5.23 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในกรณีที่มีการกระทบจากหุ่นยนต์

### 5.2.3.2 อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งผลการวัดภายในอาคาร แบบที่ 3

จากการวิเคราะห์ผลการวัดช่องสัญญาณทั้งที่มีและไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์รวมอยู่ ดัง  
ในรูปที่ 5.18 ไปจนถึงรูปที่ 5.21 แสดงถึงภาพขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้  
จากการวัดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัด โดยจะสังเกตเห็นว่าที่  
ความถี่สูงๆ จะเกิดการแกว่งของขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศทั้งสองกรณี ซึ่ง  
เป็นผลมาจากการวัดสภาพแวดล้อมภายในอาคารที่อาจเกิดการสะท้อนได้จากหลายๆ อย่าง อาทิ  
เช่น พื้น กำแพง ประตู เพดาน เป็นต้น

ตารางที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของสัญญาณระหว่างกรณีที่มีผลและไม่มี  
ผลกระทบจากหุ่นยนต์

ระยะทาง (เมตร)	กรณีมีผลกระทบจากหุ่นยนต์ Isotropic (dBi)	กรณีไม่มีผลกระทบจาก หุ่นยนต์ Isotropic (dBi)
1	-6.3711	-5.1978
2	-11.5085	-10.5756
3	-16.9958	-15.4669
4	-20.2630	-13.1391
5	-21.6988	-18.4408
6	-23.7663	-18.5716
7	-24.8529	-24.9208
8	-24.1386	-18.4408
9	-25.9994	-15.4669
10	-23.7663	-25.8261

รูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.23 แสดงอัตราการขยายของสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งที่ได้จาก  
การวิเคราะห์ผลการวัดช่องสัญญาณ จากการปรับเพิ่มระยะทางจาก 0.5 เมตร และขยับตำแหน่งการ  
ติดตั้งของสายอากาศทางด้านรับออกไปครั้งละ 0.5 เมตร ไปจนถึง 10 เมตร และได้ทำการ  
เปรียบเทียบค่าออปติคัลกับค่าอัตราการขยายของสายอากาศแบบไอโซโทรปิก จากรูปโดยจะเห็นได้  
ว่าค่าออปติคัลนั้น มีอัตราการขยายที่สูงกว่าค่าของไอโซโทรปิกซึ่งเป็นผลมาจากการวัด  
สภาพแวดล้อมภายในอาคารที่อาจเกิดการสะท้อนได้จากหลายๆ อย่างเช่น พื้น กำแพงและโดย  
เฉพาะตัวหุ่นยนต์เอง โดยจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบค่าในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ และ

ในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์นั้น ค่าอุปคัมภ์ในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์จะมีอัตราการขยายที่สูงกว่าในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ เนื่องมาจากการที่เกิดการสะท้อนจากตัวหุ่นยนต์ด้วย รวมไปถึงสภาพแวดล้อมอันประกอบไปด้วย พื้น ผนัง และ อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ที่อยู่บริเวณรอบๆ สภาพแวดล้อมที่ทำการวัดสัญญาณที่เอื้อต่อการสะท้อนของสัญญาณ

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้น อัตราการขยายในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์และในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ ที่ได้นั้นจะเห็นว่าค่าอัตราการขยายจะลดลงเมื่อมีระยะเพิ่มมากขึ้นและรวมไปถึงผลกระทบจากหุ่นยนต์ด้วย โดยมีอัตราการขยายในกรณีไอโซโทรอปิกที่ลดลงไปตามระยะทางที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นจึงได้นำเอาผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ไปทำการจำลองชุดข้อมูลแบบการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุดซึ่งจะกล่าวถึงในช่วงท้ายของบทนี้

### 5.3 ผลการประเมินค่าโดยใช้วิธีการปรับปรุงวิธีการวัด

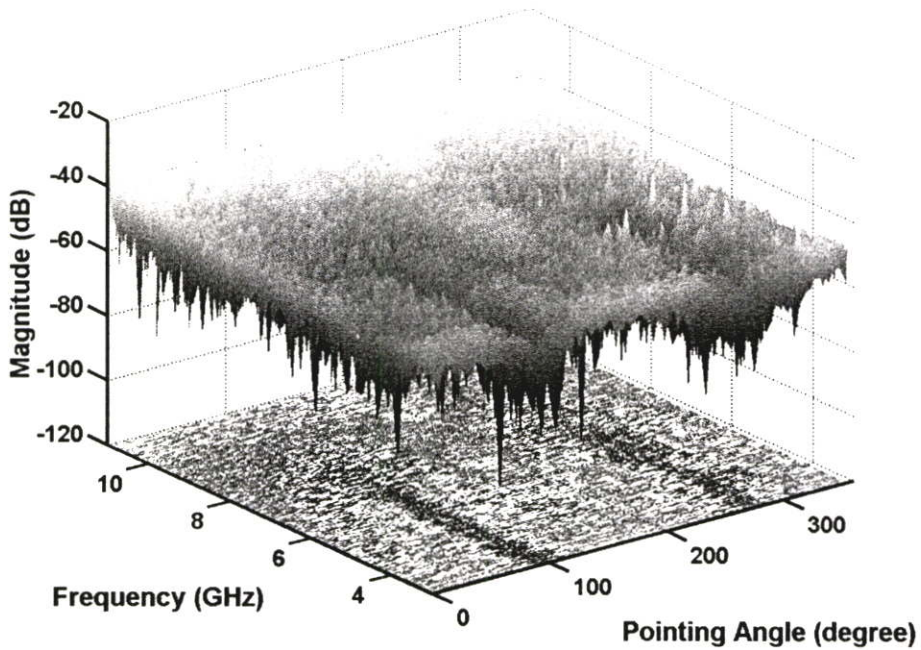
#### 5.3.1 ผลการประเมินค่าการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบกว้างยิ่งที่ประกอบด้วยหุ่นยนต์โดยวิธีการปรับปรุงการวัดจากผลการวิเคราะห์ในอาคารแบบที่ 1

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึง การประเมินค่าของการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ โดยวิธีการปรับปรุงวิธีการวัดผลการจำลอง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ซึ่งในการปรับปรุงนั้นได้เลือกเอาชุดข้อมูลจากการวัดในห้องแบบที่ 1 มาทำการเปรียบเทียบและนำมาทำการปรับปรุงการวัดใหม่อีกครั้ง โดยนำลักษณะการจำลองการวัดให้เหมือนกับการวัดครั้งที่ 1 แต่ในการปรับปรุงวิธีการวัดในครั้งนี้ได้ทำการปรับปรุงสภาพบริเวณโดยรอบเพื่อให้มีการสะท้อนน้อยที่สุดโดยใช้แผ่นป้องกันการสะท้อนมาปิดกั้นบริเวณที่ทำการวัด และทำการวัดเก็บค่าชุดข้อมูลทั้งหมด 3 ครั้งต่อการหมุนของหุ่นยนต์ 1 ครั้ง เพื่อที่จะนำค่าของชุดข้อมูลมาทำการหาค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์เพื่อทำการประมาณค่าที่ดีที่สุด และสามารถที่จะพยากรณ์ได้จากผลการวิเคราะห์ว่าในช่วงมุมไหนจะมีอัตราการขยายสูงที่สุด และในช่วงมุมไหนที่มีอัตราการขยายต่ำที่สุด โดยสายอากาศที่ใช้ในการทดลองคือสายอากาศแบบกรวยคู่เหมือนกันการวัดในครั้งแรก

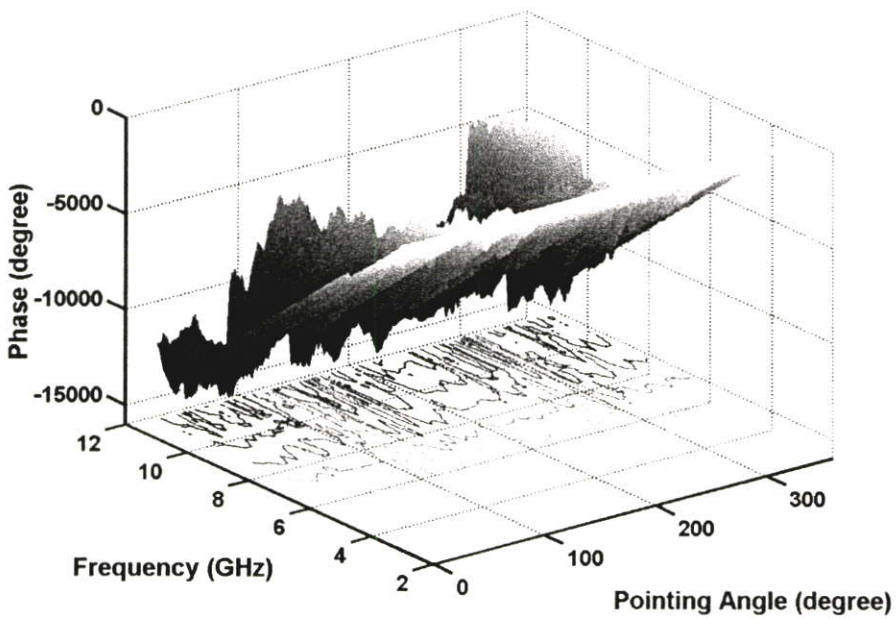
##### 5.3.1.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด

ผลที่ได้จากการทดลอง คือแสดงผลจากการจำลองให้เห็นในรูปภาพขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัด โดยผลจากการวิเคราะห์ได้แสดงในรูปที่ 5.24 และรูปที่ 5.25 โดยแสดงขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในห้องแบบที่ 1 ซึ่งเป็นผลหลังจากปรับปรุงการวัดจะสามารถเห็นได้ว่าจะมีระดับของสัญญาณลดลงในช่วงมุม 90 องศา 270 องศา เช่นกันกับการวัดในครั้งแรก ส่วนเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของ

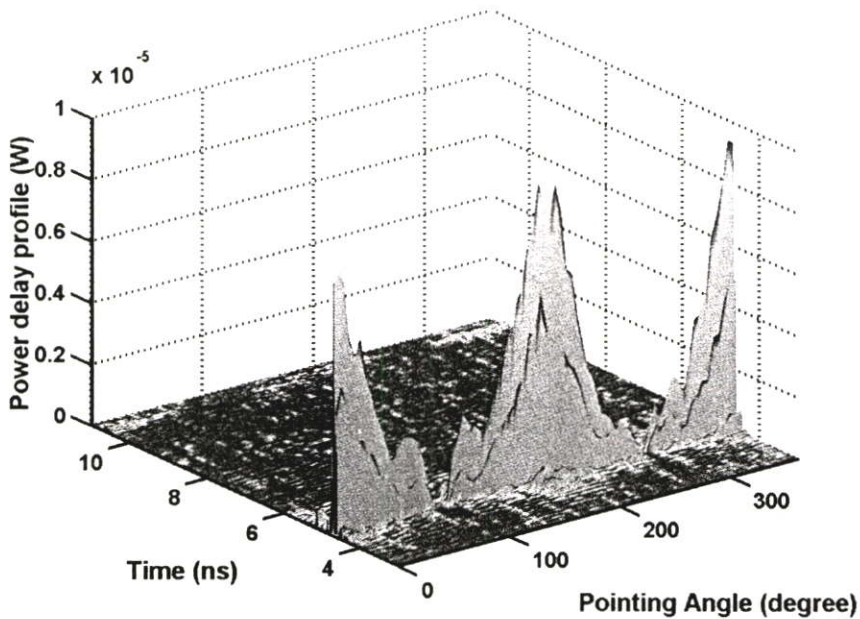
สายอากาศนั้นจะแสดงให้เห็นช่วงที่ระดับของสัญญาณลดระดับลงเช่นเดียวกันกับขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ ก็คือในช่วงมุม 90 องศา 270 องศาเช่นกัน



รูปที่ 5.24 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด



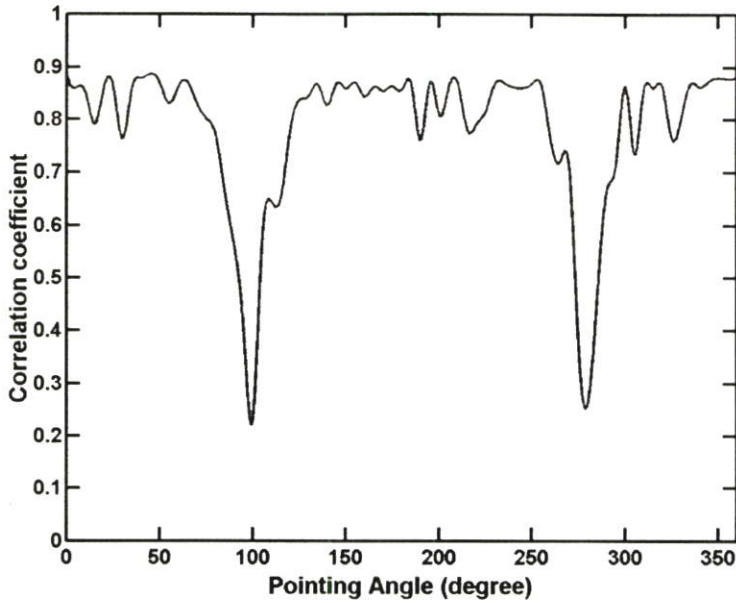
รูปที่ 5.25 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากการวัดจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด



รูปที่ 5.26 การประวิงกำลังงานในแต่ละมุมจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด

### 5.3.1.2 การประวิงกำลังงานของสัญญาณผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด

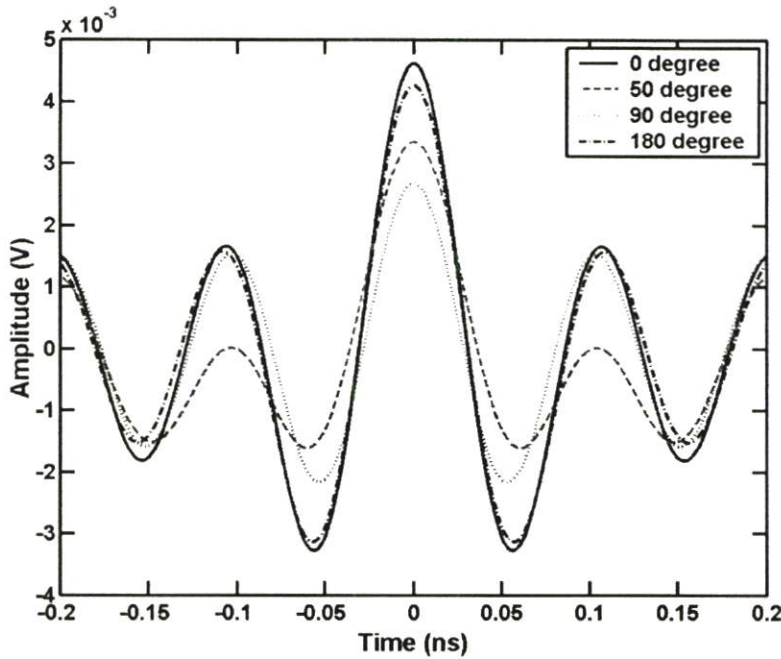
ในการแสดงผลของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟ 3 แกนคือ เวลาที่ใช้ในการเดินทาง ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้และมุมที่ทำการวัดโดยพิจารณา จากรูปจะเห็นได้ว่าในกรณีที่มีการหมุนของหุ่นยนต์ในมุมต่างๆนั้นสัญญาณเดินทางมาถึงด้านรับใช้เวลาเท่ากันคือประมาณ 5 นาโนวินาที โดยมีระดับของสัญญาณที่ต่างกันตามมุมที่ทำการหมุนสายอากาศด้านรับซึ่งที่มุม 90 และ 270 องศาจะมีระดับของสัญญาณต่ำกว่ามุมอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างของสายอากาศและในกรณีที่มิผลกระทบต่อจากหุ่นยนต์นั้นจะเห็นได้ว่าระดับของสัญญาณในแต่ละมุมนั้นลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 90 และ 270 องศา ระดับของสัญญาณจะต่ำที่สุดเนื่องจากเกิดสายอากาศทางด้านรับหมุนไปในทิศทางที่รับสัญญาณได้ส่วนในมุมที่ระดับของสัญญาณสูงคือมุม 0 องศา 90 องศาและ 360 องศา เนื่องจากสายอากาศทางด้านรับนั้นสามารถรับสัญญาณได้โดยตรง



รูปที่ 5.27 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณในมุมต่างๆ เปรียบเทียบกันจากผลการวัดภายในห้องแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด

### 5.3.1.3 ความเพี้ยนของสัญญาณผลจากการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด

ในการวิเคราะห์ถึงความเพี้ยนของสัญญาณจากข้อมูลการวัดภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงจากผลการวัดภายในห้องแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด นั้นยังคงพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.27 จากรูปจะเห็นว่าได้แสดงในลักษณะของกราฟ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นผลความแตกต่างของค่าความเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้ระหว่างมุมต่างๆ ที่ทำการวัดได้อย่างชัดเจน โดยกรณีที่มีผลกระทบจากการหมุนของหุ่นยนต์ นั้นค่าความเพี้ยนของสัญญาณจะเพิ่มมากขึ้นในมุมที่สายอากาศไม่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรง เมื่อเปรียบเทียบกับมุมที่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรงค่าจะมีความแตกต่างกันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 90 องศา และมุม 270 องศา โดยค่าความเพี้ยนจะมีค่าคือ 0.2270 และ 0.263 ตามลำดับซึ่งจะเกิดความเพี้ยนของสัญญาณมากที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนของหุ่นยนต์และทำให้สายอากาศที่ติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์หมุนไปในทิศทางที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรง โดยผลจากการปรับปรุงการวัดครั้งนี้จากรูปที่ 5.27 จะวิเคราะห์เปรียบเทียบได้ว่าค่าความผิดเพี้ยนของการวัดในครั้งนี้จะมีค่าความผิดเพี้ยนน้อยกว่าการวัดในครั้งแรก โดยการเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.4 ในการวัดครั้งแรก



รูปที่ 5.28 รูปแบบสัญญาณด้านรับในมุมต่างๆ เปรียบเทียบกันจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด

#### 5.3.1.4 รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่ด้านรับผลจากการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด

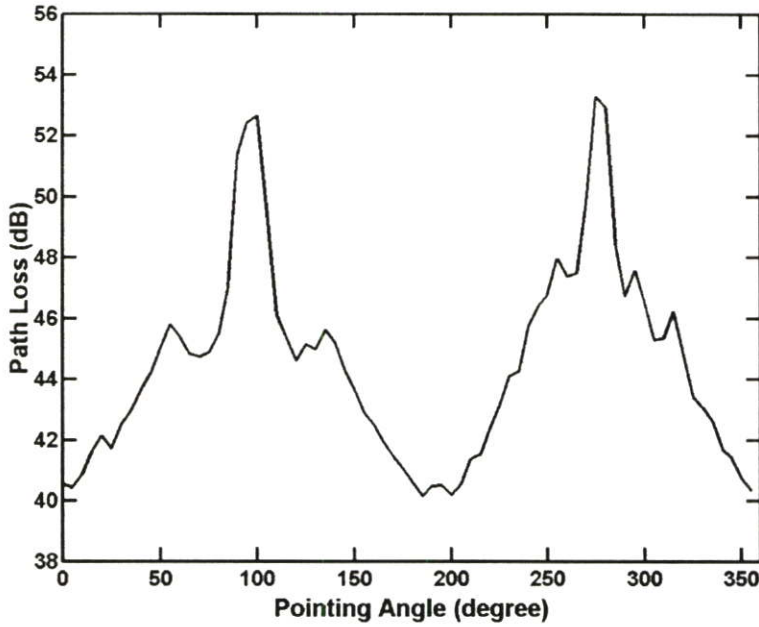
จากรูปที่ 5.28 แสดงถึงคลื่นสัญญาณด้านรับจากช่องสัญญาณ และแสดงมุมต่างๆ นำมาเปรียบเทียบกับกัน ซึ่งจะพบว่าที่มุม 0 องศาจะมีลักษณะรูปคลื่นที่มีระดับของสัญญาณที่สูงที่สุด เหมือนกับการวัดในครั้งแรกแต่ระดับของสัญญาณจะสูงกว่า เพราะเป็นมุมที่สายอากาศที่ติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์สามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด และสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้อต่อการสะท้อน จึงทำให้ขนาดของยอดคลื่นและระดับของสัญญาณดีกว่าผลจากการวัดในครั้งแรก

สรุปได้ว่าในกรณีที่นำสายอากาศมาติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์ ภายในสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้อต่อการเกิดการสะท้อน แล้วทำการหมุนหุ่นยนต์เป็นวงกลมตั้งแต่มุม 0 องศาจนถึง 360 องศา ขนาดของยอดคลื่นและระดับของสัญญาณจะสูงกว่าในสถานะที่เอื้อต่อการเกิดการสะท้อน แต่ระดับของสัญญาณจะลดลงตามมุมและทิศทางในการรับคลื่นเช่นเดียวกัน กับสถานะแวดล้อมที่เอื้อต่อการเกิดสะท้อน

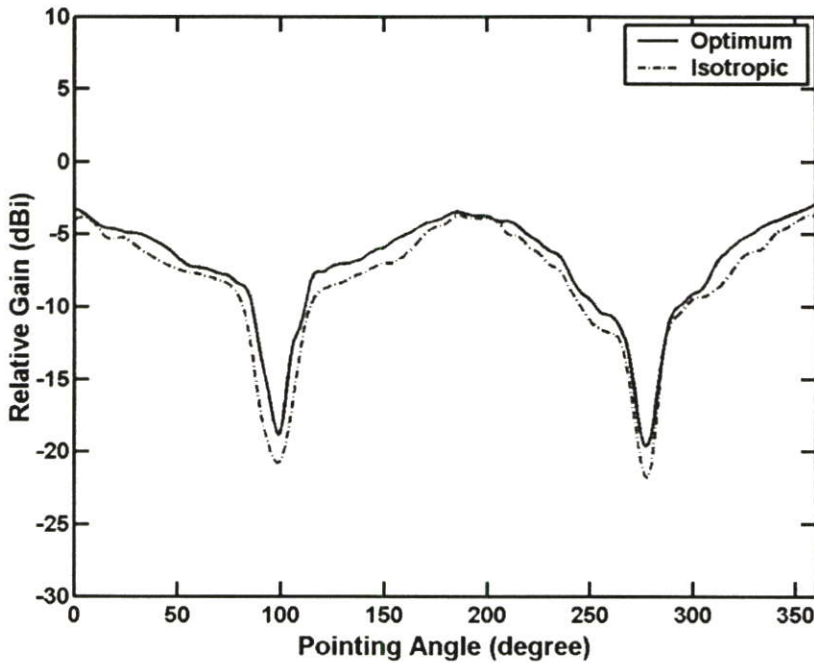
#### 5.3.1.5 การสูญเสียกำลังงานผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด

ผลจากการปรับปรุงวิธีการวัดและสภาพแวดล้อมของการวัดภายในห้องแบบที่ 1 ซึ่งในมุมที่มีการสูญเสียกำลังงานมากที่สุดก็คือมุมที่ 90 องศาและที่มุม 270 องศาเหมือนกับการวัดในครั้ง

แรกแต่ค่าการสูญเสียกำลังงานจะมีค่าการสูญเสียที่น้อยกว่าการวัดในครั้งแรก ซึ่งสามารถดูค่าจากการวิเคราะห์หุ้มต่างได้จากรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 การสูญเสียกำลังงานของสัญญาณในมุมต่างๆผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด



รูปที่ 5.30 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยวิธีการปรับปรุงการวัด

### 5.3.1.6 อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดย วิธีการปรับปรุงการวัด

ผลจากการปรับปรุงวิธีการวัดและสภาพแวดล้อมของการวัดภายในห้องแบบที่ 1 ทำให้ได้ค่าอัตราการขยายที่สูงขึ้นมากกว่าการวัดในครั้งแรก ซึ่งเกิดจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้อต่อการสะท้อนของสัญญาณ เนื่องจากในการทดลองวิจัยได้นำแผ่นป้องกันการสะท้อนมาใช้ในการดูดซับการสะท้อนเป็นผลทำให้มีค่าอัตราการขยายที่สูงขึ้นเนื่องมาจากไม่มีการสะท้อนจากผนังกำแพงของห้อง ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถดูได้จากตารางที่ 5.5

**ตารางที่ 5.5** ผลการประเมินค่าโดยใช้วิธีการปรับปรุงวิธีการวัดค่าการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1

ตำแหน่ง	ค่าอัตราการขยาย (Optimum)	ค่าอัตราการขยาย (Isotropic)
จุด 1 ที่ 0 องศา	-3.2718 dBi	-4.0039 dBi
จุด 2 ที่ 30 องศา	-4.9105 dBi	-5.8142 dBi
จุด 3 ที่ 60 องศา	-7.2733 dBi	-7.7412 dBi
จุด 4 ที่ 90 องศา	-13.0722 dBi	-17.0722 dBi
จุด 5 ที่ 120 องศา	-7.9864 dBi	-8.8308 dBi
จุด 6 ที่ 150 องศา	-5.8785 dBi	-7.0208 dBi
จุด 7 ที่ 180 องศา	-3.7513 dBi	-4.2966 dBi
จุด 8 ที่ 210 องศา	-4.4028 dBi	-4.9965 dBi
จุด 9 ที่ 240 องศา	-7.6821 dBi	-8.6821 dBi
จุด 10 ที่ 270 องศา	-11.5439 dBi	-12.5439 dBi
จุด 11 ที่ 300 องศา	-10.1917 dBi	-10.5917 dBi
จุด 12 ที่ 330 องศา	-5.2275 dBi	-6.1849 dBi
จุด 13 ที่ 360 องศา	-3.2428 dBi	-3.7794 dBi

จากผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยในกรณีไอโซโทรปิก คือ  $-8.3821$  dBi และค่าเฉลี่ยในกรณีออปติมัล คือ  $-7.3424$  dBi ทั้งสองกรณีนี้มีระยะห่างกันค่าเฉลี่ยต่างกันเท่ากับ  $-1.0397$  dBi

สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลโดยวิธีการปรับปรุงผลของการวัดนี้ สามารถนำมาทำการประมาณค่าได้ ในกรณีที่มีการนำหุ่นยนต์มาใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งนี้สามารถที่จะทำนายได้ว่า ในกรณีที่มีการหมุนของหุ่นยนต์แล้วทำให้สายอากาศไม่สามารถที่จะรับสัญญาณได้โดยตรงนั้นจะเกิดอัตราการขยายที่ต่ำคือ ในช่วงมุมที่  $85-110$  องศาโดยสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 5.30 ในขณะที่หุ่นยนต์ทำการหมุนไปในทิศทางที่สายอากาศสามารถรับสัญญาณได้แบบโดยตรงนั้นจะทำให้เกิดอัตราการขยายที่สูงกว่ามุมอื่นๆคือที่  $0$  องศา  $180$  องศาและ  $360$  องศา ซึ่งสามารถทราบค่าได้จากตารางและในส่วนที่มีความสำคัญต่ออัตราการขยายคือ การเคลื่อนที่หรือการหมุนของหุ่นยนต์นั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางของสายอากาศนั้นสามารถทำให้เกิดผลกระทบโดยตรงกับระบบคลื่นแบบแถบกว้างยิ่ง

ในส่วนของตัวหุ่นยนต์นั้นก็จะมีผลกระทบด้วยเช่นกัน เนื่องจากหุ่นยนต์โครงสร้างทำด้วยโลหะที่สามารถเกิดการสะท้อนของสัญญาณจากตัวหุ่นยนต์ได้ เพราะหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลองทำมาจากเหล็ก ซึ่งสามารถทำให้สัญญาณเกิดการสะท้อนได้จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการวัดสัญญาณในสภาพแวดล้อมภายในอาคารนั้น จะมีสัญญาณรบกวนสูงจากการสะท้อนของอุปกรณ์ต่างๆ รวมไปถึงผนังและกำแพง และยังเมื่อมีผลกระทบจากหุ่นยนต์ด้วยแล้วจะทำให้เกิดผลกระทบกับระบบช่องสัญญาณมากยิ่งขึ้น และระยะห่างของสายอากาศด้านส่งและด้านรับก็ส่งผลกระทบโดยตรงด้วย สุดท้ายจากผลการวิเคราะห์และการประเมินค่านี้สามารถนำมาพิจารณาได้ว่ามุมไหนบ้างที่จะทำให้เกิดผลกระทบต่อสัญญาณมากที่สุด และมุมไหนบ้างที่สัญญาณรับได้น้อยที่สุดหรือไม่สามารถรับสัญญาณได้เลย จึงสามารถที่จะพยากรณ์ได้ว่าช่วงไหนมุมใดที่จะเกิดผลกระทบกับอัตราการขยายของสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งได้บ้าง

#### 5.4 การประมาณค่าฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลโดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด

หัวข้อนี้จะแสดงถึงผลการจำลองค่าการอัตราการขยายด้วยวิธีการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด ซึ่งในการจำลองนั้นได้เลือกเอาชุดข้อมูลค่าอัตราการขยายในกรณีไอโซโทรปิกจากการวัดในอาคารแบบที่ 3 ที่นำเสนอผลจากการวัดภายในอาคารแบบที่ 3 เนื่องจากชุดข้อมูลนี้ทำการวัดเปรียบเทียบกัน 2 กรณีคือกรณีที่มีผลกระทบและไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ที่มีระยะห่างตั้งแต่ระยะ  $1$  เมตรจนไปถึง  $10$  เมตรและมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเป็นเชิงเส้น ซึ่งจะสามารถแสดงให้เห็นแนวโน้มการลดลงของอัตราการขยายได้ชัดเจนตามระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 5.31 และ 5.32 ตามลำดับ

### 5.4.1 ผลการประมาณฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลค่าอัตราการขายจากผลการวิเคราะห์ ในอาคารแบบที่ 3 ในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์

แบบจำลองเชิงเส้นของอัตราการขายของสัญญาณวัดภายในอาคารแบบที่ 3 โดยจะทำการแทนชุดข้อมูลด้วยชุดข้อมูลแรกนั้นก็คือค่าอัตราการขายในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากตัวหุ่นยนต์ในระยะต่าง ๆ ตั้งแต่ 1 ถึง 10 เมตร คือ

$$(1, -5.1978), (2, -10.5756), (3, -15.4669), (4, -18.5716), (5, -20.4240)$$

$$(6, -23.0008), (7, -24.9208), (8, -24.6154), (9, -22.5132), (10, -25.8261)$$

จากชุดข้อมูลจะเห็นได้ว่า ค่า  $n = 10$  เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.7 สมการที่ 4.8 และสมการที่ 4.9 จะได้ค่าคือ

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{10} x_j &= 55, & \sum_{j=1}^{10} x_j^2 &= 385, & \sum_{j=1}^{10} x_j^3 &= 3025, & \sum_{j=1}^{10} x_j^4 &= 25333 \\ \sum_{j=1}^{10} y_j &= -191.11, & \sum_{j=1}^{10} x_j y_j &= -1219.4, & \sum_{j=1}^{10} x_j^2 y_j &= -9025.2 \end{aligned}$$

และสมการทั่วไปก็คือ

$$10a + 55b + 385c = -191.11$$

$$55a + 385b + 3025c = -1219.4$$

$$385a + 3025b + 25333c = -9025.2$$

โดยผลของการแก้ของสมการทั่วไปคือ

$$a = -0.23025$$

$$b = -5.8706$$

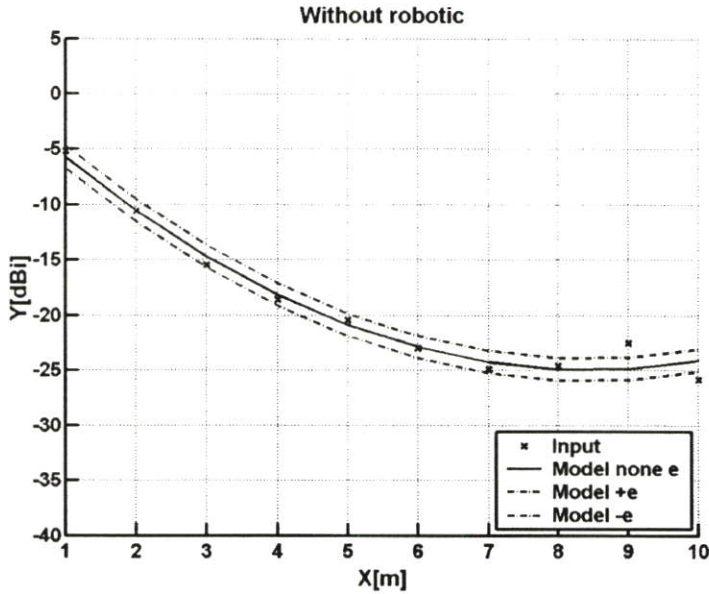
$$c = 0.34825$$

จากสมการที่ 4.10 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองคือ

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2} = 1.0119$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.2 จะได้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์คือ

$$y = -0.23025 - 5.8706x + 0.34825x^2 \pm 1.0119$$



รูปที่ 5.31 แบบจำลองเชิงเส้นของอัตราการขยายของสัญญาณที่ระยะทางต่าง ๆ กรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์

#### 5.4.2 ผลการประมาณฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลค่าอัตราการขยายจากผลการวิเคราะห์ในอาคารแบบที่ 3 ในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์

แบบจำลองเชิงเส้นของอัตราการขยายของสัญญาณวัดภายในอาคารแบบที่ 3 โดยจะทำการแทนชุดข้อมูลชุดที่ 2 ซึ่งก็คือค่าอัตราการขยายในกรณีมีผลกระทบจากตัวหุ่นยนต์ในระยะต่างๆ ตั้งแต่ 1 ถึง 10 เมตร คือ

(1, -6.3711), (2, -11.5085), (3, -16.9958), (4, -20.2630), (5, -21.6988)

(6, -23.7663), (7, -24.8529), (8, -24.1386), (9, -25.9994), (10, -23.7663)

จากชุดข้อมูล ค่า  $n = 10$  เหมือนกับข้อมูลชุดแรกเพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.7 สมการที่ 4.8 และสมการที่ 4.9 จะได้อีกก็คือ

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{10} x_j &= 55, & \sum_{j=1}^{10} x_j^2 &= 385, & \sum_{j=1}^{10} x_j^3 &= 3025, & \sum_{j=1}^{10} x_j^4 &= 25333 \\ \sum_{j=1}^{10} y_j &= -199.36, & \sum_{j=1}^{10} x_j y_j &= -1251.3, & \sum_{j=1}^{10} x_j^2 y_j &= -9172.9 \end{aligned}$$

และสมการทั่วไปจะได้

$$10a + 55b + 385c = -199.36$$

$$55a + 385b + 3025c = -1251.3$$

$$385a + 3025b + 25333c = -9172.9$$

โดยผลของการแก้ของสมการทั่วไปคือ

$$a = -1.0761$$

$$b = -6.147$$

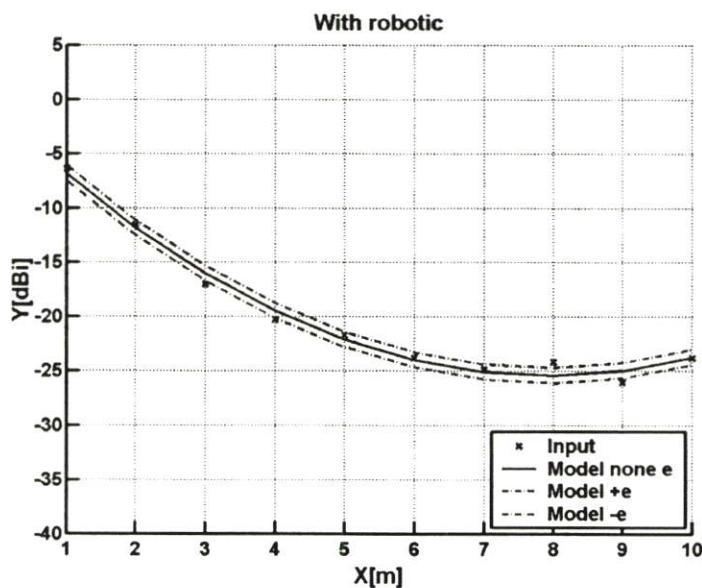
$$c = 0.38827$$

จากสมการที่ 4.10 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองคือ

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2} = 0.6986$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.2 จะได้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์คือ

$$y = -1.0761 - 6.147x + 0.38827x^2 \pm 0.6986$$



รูปที่ 5.32 แบบจำลองเชิงเส้นของอัตราการขยายของสัญญาณที่ระยะทางต่าง ๆ กรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์

แบบจำลองอัตราการขยายในกรณีที่มีและไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ โดยการประมาณจากฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลัง 2 เพราะจากการวิเคราะห์ฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลัง 2 มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดจึงเหมาะสมที่สุดในการนำมาพิจารณา จากรูปที่ 5.31 และรูปที่ 5.32 จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันที่นำมาประมาณนั้นครอบคลุมชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดโดยการแทนด้วยจุด โดยมีค่าผิดพลาดทั้งด้านบวกและด้านลบแทนด้วยเส้นประ ส่วนเส้นสีทึบคือเส้นที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด โดยจะเห็นได้ว่าจากผลการวิเคราะห์อัตราการขยายของทั้งสองกรณีจะลดลงไปตามระยะทางที่เพิ่มมากขึ้นเป็นเชิงเส้น

จากการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่าค่าการลดลงของอัตราการขยายที่รับได้ในระยะต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นจึงสามารถที่จะแทนชุดข้อมูลนั้นด้วยการประมาณค่าฟังก์ชัน ซึ่งสะดวกแก่การนำไปพิจารณาต่อในภายหลัง เหตุผลที่เลือกชุดข้อมูลอัตราการขยายนั้นก็เพราะว่าอัตราการขยายที่แพร่กระจายไปยังภาครับนั้นเป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาเพื่อกำหนดประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบไร้สาย โดยในหัวข้อนี้จึงนำผลของอัตราการขยายในกรณีไอโซโทรปิกของแบบจำลองที่ 3 มาทำการประมาณค่าชุดข้อมูลเพราะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามระยะทางมีความเป็นเชิงเส้น

## 5.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอถึงผลจากการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการจำลองโดยการนำเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบการควบคุมหุ่นยนต์ และนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในแบบจำลองที่ 3 มาทำการประมาณค่าฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลอัตราการขยายโดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด ผลจากการศึกษาแล้วทำให้ทราบว่ามีส่วนที่มีผลกระทบกับระบบการแพร่กระจายคลื่น ตัวอย่างเช่นมุมในการรับส่งสัญญาณ ลักษณะการติดตั้งสายอากาศ ระยะทางในการรับส่งสัญญาณ โครงสร้างของหุ่นยนต์ การหมุนหรือการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และสภาพแวดล้อมที่ทำการรับส่งสัญญาณเป็นต้น ดังนั้นจึงควรที่จะนำผลการทดลองนี้มาพิจารณาในการออกแบบระบบเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นของระบบการเชื่อมต่อแบบไร้สายในย่านแถบความถี่กว้างยิ่ง จากผลการวิเคราะห์นี้ได้ศึกษาหาผลกระทบการสูญเสียของระบบการส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่นำมาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์หรือสื่อสารร่วมกับหุ่นยนต์นี้ ซึ่งมีข้อดีในการนำมาใช้งานร่วมกันคือ เพื่อนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของเทคโนโลยีหุ่นยนต์ในอนาคตให้มีขีดความสามารถที่สูงขึ้นสามารถทำงานในระบบไร้สายได้รวมไปถึงสามารถรับส่งข้อมูลในระบบสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งได้

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาวิจัยถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งร่วมกับผลกระทบจากการนำหุ่นยนต์มาใช้งานในสภาวะสภาพแวดล้อมภายในอาคาร โดยอาศัยการตรวจสอบบนพื้นฐานของการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งได้จำลองการวัดในสภาพแวดล้อมคือ ภายในห้องประชุมและภายในอาคาร โดยใช้สายอากาศในการทดสอบคือสายอากาศแบบกรวยคู่ซึ่งเป็นสายอากาศที่ตอบสนองแถบความถี่สูง โดยทำการวิเคราะห์ผลการวัดด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้คือ ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ ค่าเฉลี่ยเวลาประวิงของสัญญาณ ค่าการแผ่ประวิงของสัญญาณ ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ค่าการสูญเสียของกำลังงาน และ ค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณ โดยแสดงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในเชิงมุมคือตั้งแต่ 0 องศาถึง 360 องศาและในเชิงระยะทางตั้งแต่ 0.5 เมตรถึง 10 เมตร อีกทั้งทำการสรุปผลของค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณในแบบจำลองการวัดของห้องแบบที่ 1 โดยใช้วิธีการปรับปรุงรูปแบบของการวัดแล้วทำการประเมินค่า ซึ่งขั้นตอนการวัดในห้องแบบที่ 1 ได้ทำภายในห้องที่มีการสะท้อนของคลื่นเต็มรูปแบบ และได้ทำการปรับปรุงสภาพแวดล้อมภายในห้องที่มีการสะท้อนให้มีการสะท้อนน้อยที่สุดโดยใช้แผ่นป้องกันการสะท้อนมากขึ้นในบริเวณเหนือต่อการสะท้อนของสัญญาณ และปรับปรุงสภาพแวดล้อมต่างๆ ส่วนภายในห้องที่มีผลกับการสะท้อนเพื่อให้เหนือต่อการสะท้อนน้อยที่สุด เพื่อให้ผลที่ออกมาจากการทดลองเมื่อนำมาวิเคราะห์แล้วทำให้มีอัตราการขยายที่สูงกว่าการทดลองวัดในครั้งแรก และมีผลกระทบกับสัญญาณน้อยที่สุด ส่วนการวัดในอาคารแบบที่ 2 และภายในอาคารแบบที่ 3 รวมทั้งการวิเคราะห์ได้ทำการทดลองภายในอาคารและภายในห้องประชุมภายในอาคารภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทั้งหมด

#### 6.1 สรุปผลการวิเคราะห์ช่องสัญญาณกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์

ในการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในแบบจำลองการวัดภายในห้องทั้ง 3 แบบ ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดในส่วนต่างๆ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อแสดงถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ รวมไปถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสายอากาศ มุมในการรับสัญญาณของสายอากาศและสภาพแวดล้อมภายในห้องที่ทำการวัด

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดในลักษณะของห้องทั้ง 3 แบบสามารถสรุปได้ว่า ค่าเวลาประวิง ค่าการแผ่ประวิงของสัญญาณ และค่าเฉลี่ยเวลาประวิงของสัญญาณ จะแปรไปตาม

ระยะห่างของสายอากาศ คือระยะทางระหว่างสายอากาศด้านส่งและรับเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าเวลาประวิงของสัญญาณเพิ่มขึ้นตามด้วย อีกทั้งลักษณะของสภาพแวดล้อมภายในอาคารก็ส่งผลด้วยนั้นคือถ้าภายในห้องมีพื้นที่มากและเอื้อให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณก็จะทำให้เกิดสัญญาณที่มาจากหลายทิศทางส่งผลให้ค่าการแผ่ประวิงเพิ่มขึ้นไปด้วย ค่าความเพี้ยนของสัญญาณจากการทดลองสรุปได้ว่าค่าความเพี้ยนจะสูงขึ้นในกรณีที่มีมุมของสายอากาศที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์หมุนไปในทิศทางที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรง ค่าการสูญเสียกำลังงานนั้นจะมีการสูญเสียที่สูงในช่วงมุมที่สายอากาศทางด้านรับไม่สามารถรับสัญญาณได้และค่าการสูญเสียกำลังงานจะมีการสูญเสียเพิ่มมากขึ้นตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณจากผลของการทดลองนี้ จะเป็นไประยะทางและมุมที่สามารถรับสัญญาณได้ของสายอากาศ คือเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณ ก็จะลดลงตามนั่นเอง และมุมของสายอากาศในการรับสัญญาณก็มีผลในการหาค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณ สรุปโดยรวมแล้วผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้ จะเกิดจากหลายๆ ส่วนประกอบกันซึ่งได้แก่ คุณสมบัติของสายอากาศและลักษณะในการติดตั้งสายอากาศที่อยู่บนตัวหุ่นยนต์ด้วย มุมในการรับสัญญาณ ระยะทางระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ตัวโครงสร้างของหุ่นยนต์ และลักษณะสภาพแวดล้อมภายในอาคารที่ทำการทดลองวัดช่องสัญญาณ ที่กล่าวมานี้เป็นส่วนสำคัญที่มีผลทำให้เกิดผลกระทบต่อช่องสัญญาณในย่านแถบกว้างยิ่ง

จากผลการทดลองวิจัยนี้ ได้นำเสนอคุณลักษณะการสูญเสียในการแพร่คลื่นย่านแถบความถี่กว้างยิ่งที่ได้ส่งผ่านสายอากาศโดยได้นำสายอากาศติดกับหุ่นยนต์ โดยในการทดลองนี้ได้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ทั้งหมดในการทดลองวิจัยโดยจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการวัดสัญญาณในสภาพแวดล้อมภายในอาคารนั้นจะมีสัญญาณรบกวนสูง และยังเมื่อมีผลกระทบจากหุ่นยนต์ด้วยแล้ว จะทำให้เกิดผลกระทบกับระบบช่องสัญญาณมากยิ่งขึ้น ซึ่งจากการศึกษาแล้วทำให้ทราบว่า มีหลายๆ ส่วนที่มีผลกระทบกับระบบโดยตรงได้แก่ ระยะความห่างของสายอากาศ ความสูงของสายอากาศ ลักษณะการติดตั้งของสายอากาศ มุมในการรับสัญญาณของสายอากาศ สภาพแวดล้อม รวมไปถึงผลกระทบจากตัวหุ่นยนต์ด้วย ซึ่งจะมีผลกระทบในรูปแบบต่างๆ ตามแบบจำลอง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสัญญาณในภาครับ ดังนั้นจึงควรที่จะนำผลการทดลองวิจัยนี้มาประกอบในการพิจารณาเพื่อที่จะออกแบบระบบการควบคุมหุ่นยนต์ ที่มีการนำระบบการเชื่อมต่อแบบไร้สายในย่านแถบความถี่กว้างยิ่งมาใช้งานร่วมกันในระบบด้วย เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่างๆ ที่จะส่งผลต่อสัญญาณในภาครับด้วย

## 6.2 สรุปผลการจำลองชุดข้อมูลโดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอยกำลังสองแบบ เชิงเส้นที่น้อยที่สุดด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียลจากการวัดภายในอาคารแบบที่ 3

ชุดข้อมูลค่าอัตราการขยายของสัญญาณจากผลการวัดภายในอาคารแบบที่ 3 โดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอยกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุดด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียล เพื่อสร้างสมการที่ใช้แทนชุดข้อมูล โดยให้เกิดมีค่าผิดพลาดระหว่างข้อมูลจริงกับค่าจากการประมาณให้น้อยที่สุดจากการวิเคราะห์แล้วพบว่าในทั้งสองกรณีคือ กรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ และในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์นั้น ค่าอัตราการขยายที่แปรผันตามระยะทางนั้นสามารถแทนชุดข้อมูลด้วยสมการของฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลัง 2 ซึ่งจะเกิดค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

โดยในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์นั้นมีรูปสมการดังนี้

$$y = -0.23025 - 5.8706x + 0.34825x^2 \pm 1.0119$$

โดยที่

$y$  คือ ค่าอัตราการขยายของสัญญาณ [dBi]

$x$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและส่ง [เมตร]

โดยในกรณีนี้เกิดค่าความผิดพลาดระหว่างข้อมูลจริงกับค่าการประมาณคือ  $\pm 1.0119$

ส่วนอัตราการขยายในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์นั้นได้ใช้สมการโพลีโนเมียลกำลัง 2 แทนชุดข้อมูลเช่นเดียวกัน โดยมีรูปสมการดังนี้คือ

$$y = -1.0761 - 6.147x + 0.38827x^2 \pm 0.6986$$

โดยที่

$y$  คือ ค่าอัตราการขยายของสัญญาณ [dBi]

$x$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและส่ง [เมตร]

โดยในกรณีนี้เกิดค่าความผิดพลาดระหว่างข้อมูลจริงกับค่าการประมาณคือ  $\pm 0.6986$  ที่ในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า ในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ก็เพราะว่าค่าของชุดข้อมูลนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากกว่าในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ จึงทำให้เกิดค่าความผิดพลาดที่ต่ำกว่า

### 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากแนวคิดที่ได้ทำการตรวจสอบถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งทั้ง 3 แบบจำลองในกรณีที่มีผลกระทบจากหุ่นยนต์ที่ได้แสดงไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จากการวิเคราะห์พบว่าผลของช่องสัญญาณที่ได้จากการวัดนั้นถูกรวมเข้ากับผลของคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งเมื่อทำการเปลี่ยนสายอากาศเป็นชนิดอื่นๆ ค่าของช่องสัญญาณก็จะเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติของสายอากาศนั้นๆ ด้วย ซึ่งสายอากาศที่ใช้ในการวัดนั้นมีผลเป็นอย่างมากในการที่จะเกิดผลกระทบกับช่องสัญญาณ ซึ่งในการนำไปใช้งานจริงนั้นจึงจำเป็นต้องนำมาพิจารณาถึงความเหมาะสมในการที่จะเลือกใช้งานสายอากาศตามลักษณะงานและการติดตั้งที่เหมาะสม เพื่อที่จะสามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุดผู้จัดทำวิทยานิพนธ์นี้เห็นว่าควรจะทำการศึกษาทดลองโดยหาสายอากาศหลายๆ ชนิดมาทำการทดลองวิเคราะห์เพิ่มเติมในส่วนนี้เพื่อที่จะหาสายอากาศที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด และเหมาะสมในการนำมาใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีระบบหุ่นยนต์ และจากการวิเคราะห์ในครั้งนี้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์เห็นควรว่าในงานวิจัยครั้งต่อไปควรจะทำการศึกษาทดลองวัดช่องสัญญาณในช่วงความถี่ต่างๆ แบ่งย่อยออกไป ภายใต้ข้อกำหนดของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งเพื่อวิเคราะห์หาช่วงความถี่ที่เหมาะสมที่สุดในการนำระบบเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมาใช้งานร่วมกันกับเทคโนโลยีหุ่นยนต์ที่จะมีการนำมาใช้เพื่ออำนวยความสะดวกแก่นutzerในอนาคตต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H.T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," Proc. IRE, vol. 34, no. 5, pp.254-256, May 1946.
- [2] 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.
- [3] Federal Communication Commission, "Revision of part 15 of the commission 's rules regarding ultra-wideband transmission system", First Report and Order, ET Docket 98-153, FCC 02-48, April 2002. On line available at [<http://www.fcc.gov>].
- [4] Satean Boonvisat, S. Promwong, P. Supanakoon, S. Kaewmechai , and P. Sityopasakul, "Indoor Propagation Channel Measurement of Ultra Wideband Antenna with Robotic", International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT) 2005, vol. 2/2. pp. 1087-1090, Oct. 2005.
- [5] M. Sanchez, L. de Haro, A. Pino, and M. Calvo, "Human Operator Effect on Wide-band Radio Channel Characteristics ", IEEE Trans. Antennas and Propag., vol. 45 no.8, pp. 1318-1320, Aug.1997.
- [6] K. Siwiak, "Ultra-wide Radio: The Emergence of an Important RF Technology", Proc.2001 Spring IEEE Veh. Tech. VTC, vol. 2, pp. 1169-1172, May 2001.
- [7] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, and P. Tangtisanon, "Path Loss and Matched Filter Gain for UWB System ", Proc. ISAP'04, Sendai, Japan, pp. 97-100, Aug. 2004.
- [8] M. Sanchez, L. de Haro, A. Pino, and M. Calvo, "Human Operator Effect on Wide-band Radio Channel Characteristics", IEEE Trans. Antennas and Propag., vol. 45 no. 8, pp. 1318-1320, Aug.1997.
- [9] Apichit Pradabphon, Noppon Kaewboonruen, Monchai Chamchoy, Pichaya Supanakoon and Sathaporn Promwong. " Characteristics of UWB Pulse Distortion and Propagation Loss Due to Human Body Shadowing " Electrical Engineering Conference. 28th, Oct. 2005. pp. 669-672.
- [10] James D. Tayloy, "Introduction to ultra-wideband radar systems" , CRC Press ,1995.

## ภาคผนวก ก

## บทความวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

- [1] **Satean Boonvisat**, S. Promwong, P. Supanakoon, S. Kaewmechai , and P. Sityopasakul, “Indoor Propagation Channel Measurement of Ultra Wideband Antenna with Robotic”, International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT) 2005, vol. 2/2. pp. 1087-1090, Oct. 2005.

# ISCIT 2005

## PROCEEDINGS

International Symposium on Communications  
and Information Technologies

October 17-19, 2005

Fragrant Hill Hotel, Beijing, China

Sponsored by:

The National Natural Science Foundation of China

K.C. Wong Education Foundation, Hong Kong

IEEE Circuits and Systems Society

IEEE Communication Society Beijing Chapter

Beijing Association for Science and Technology

Beijing University of Posts and Telecommunications

Technical Co-Sponsored by

IEICE Japan

ECTI Thailand

Official Web site: <http://iscit05.bupt.edu.cn>



PUBLISHING HOUSE, BUPT  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

# Indoor Propagation Channel Measurement of Ultra Wideband Antenna with Robotic

Satean Boonvisat, Sathaporn Promwong, Pichaya Supanakoon,  
Sompoph Kaewmechai, and Pisan Sityopasakul<sup>†</sup>  
Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
E-mail: s6064608@kmitl.ac.th

**Abstract**— In this paper, the characterization of ultra wideband (UWB) antenna with robotic is evaluated. The measurement system consists of transmitter (Tx) and receiver (Rx) biconical antennas measured by using a vector network analyzer (VNA). To obtaining the data, measurements were performed at 3 GHz to 11 GHz covered by a VNA, which provided information on the amplitude and phase of the transmission coefficient. Friis' transmission formula is not directly applicable and the waveform distortion may degrade the transmission performance as well. The matched filter is considered at the receiver side to maximize the SNR for evaluation. The power delay profile and the UWB transmission gain, based on the extension of Friis' transmission formula take into account the transmitted waveform and the matched filter into the system for the free space of UWB. The experimental examples using the biconical antenna as the receiver install with robotic are presented in this paper.

**Keywords**—Ultra wideband (UWB), Friis' transmission formula, Ultra Wideband Antenna with Robotic

## I. INTRODUCTION

The mobile robotics research has yielded significant improvements in sensing and control algorithms, enabling high levels and robustness never before realized. These advances were driven in part by the maturation of the underlying technologies, improvements in sensor and actuator technology, and wireless network communication.

In ultra wideband (UWB) technology, a revolutionary approach to radio communications, allows systems to operate across a range of frequency bands 3.1 to 10.6 GHz defined by Federal Communications Commission (FCC) with negligible interference to existing systems in that band. Ultra wideband technology is an ideal candidate for wireless networks that can be utilized for short-range, high-speed, low power, and low cost indoor applications.

This paper, we investigated the effects of the robotic on UWB antenna propagation in an indoor environment. This technique based on the Friis' transmission formula, adapted for UWB, in the sense that we would like to derive the equivalent antenna gain for UWB systems. The

transmission waveform and the matched filter reception are keys for the extension of the Friis' transmission formula to UWB signal. To know the antenna transfer function by measurement, an the experiments are carried out by using the biconical antennas at both the transmitter (Tx) and the receiver (Rx) for UWB operation in the indoor environment.

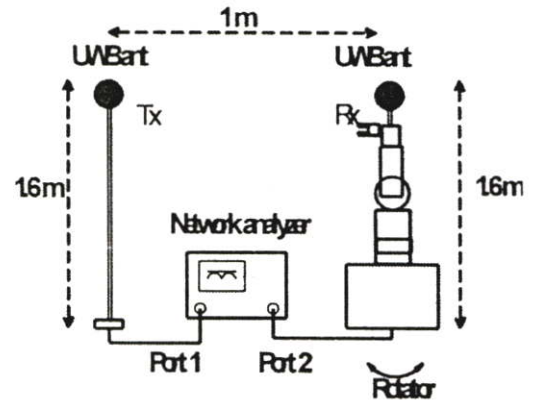


Fig. 1 The instrument setup.



Fig. 2 Top view antenna setting.

## II. PREPARATION FOR THE EXPERIMENTS

In this section, some issues of the preparation for the experiments are discussed.

### A. Measurement Setup

The UWB radio channel transfer function was measured by using the vector network analyzer (VNA) model HP- 8510C which operated in the response measurement mode, where Port-1 was the Tx port and

Port-2 was the Rx port, respectively. Biconical antennas with the maximum diameter of 65.34 mm and the length of 37 mm are used as both the Tx and Rx antennas.

The antennas have typically an omni directional pattern, with a linearly phase response. Both Tx and Rx antennas were fixed at the height of 1.6 m and separated at a distance of 1 m. The instrument setup is sketched in Fig.1.

Figure 2 shows the orientations of the  $S_{21}$ , which is the transfer function measurement for Tx and Rx antennas. The Tx antenna is fixed at  $0^\circ$  pointing angle and the Rx antenna is rotated from  $0^\circ$  to  $360^\circ$  pointing angle with each step at  $5^\circ$ .

TABLE I  
PARAMETERS OF EXPERIMENT

Parameter	Value
Frequency range	3 GHz to 11 GHz
Number of frequency points	801
Tx antenna height	1.6 m
Rx antenna height	1.6 m
Distance between Tx and Rx	1 m
Rx rotate range	$0^\circ$ to $360^\circ$
Rx rotate step	$5^\circ$
Antenna type	Biconical

### B. Parameters of Experiment and Calibration Techniques

The important parameters for the experiments are listed in Table I.

It is noted that the calibration 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.

### C. UWB waveform Transmission

The effect of the waveform distortion is more obvious when the bandwidth is wider. We considered the impulse radio signal that fully covers the FCC band [2], i.e., 3.1 to 10.6 GHz. The transmitted waveform assumed in the simulation was a pass band rectangular pulse with the minimum frequency is  $f_{min} = 3.1$  GHz to the maximum frequency is  $f_{max} = 10.6$  GHz, respectively. Then, the spectral bandwidth is  $f_b = 7.5$  GHz. This UWB transmitted waveform is shown in Fig. 3 and its equation is

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

where  $f_{min}$  and  $f_{max}$  is the minimum and maximum frequencies, respectively,  $f_b = (f_{max} - f_{min})$  is the spectral bandwidth,  $f_c = (f_{max} + f_{min})/2$  is the center frequency and  $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$ . The transmission process of the pulse waveform is simulated based on the measured transfer function of the antenna.

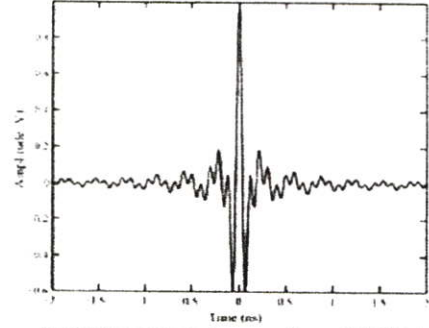


Fig.3 The transmission waveform of UWB signal.

## III. UWB SIGNAL PROCESSING

In this study, we focus on the characteristics of UWB antenna with robotic in free space. In narrowband systems, the link budget of the free space propagation loss is usually estimated by using Friis' transmission formula [3]. However, it is not directly applicable to the UWB transmission system, as the formula is expressed as a function of the frequency. Moreover, the waveform may be distorted due to the frequency characteristics of the antenna treats the special cases of the constant gain and the constant aperture [4], but it is not general discussion had been made although it suggested the use of the time-domain antenna effective length.

The Friis' transmission formula has been widely used, and can be applied to the calculate of these LOS channels. The Friis' transmission formula can be written as

$$G_{Friis}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} = G_f(f)G_r(f)G_t(f), \quad (2)$$

where  $G_r$  and  $G_t$  are Rx and Tx antenna gain,

$$G_f(f) = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (3)$$

is the free space propagation gain (less than unity in practice),  $\lambda = c/f$  is the wavelength,  $c$  is the velocity of the light,  $f$  is the operating frequency and  $d$  is the separation between Tx and Rx antennas. It is noted, however, that Eq. (2) is satisfied only at some certain frequency, and is not directly applicable to UWB systems. The Friis' transmission formula shall be extended to take into account the transmission signal waveform and its distortion as well [5], [6].

Transfer functions of Friis' transmission formula are

$$H_{Friis}(f) = H_f \mathbf{H}_r \cdot \mathbf{H}_t, \quad (4)$$

Extension of Friis' transmission formula for UWB systems are

$$H_{e-Friis}(f) = H_f H_t \mathbf{H}_r \cdot \mathbf{H}_t, \quad (5)$$

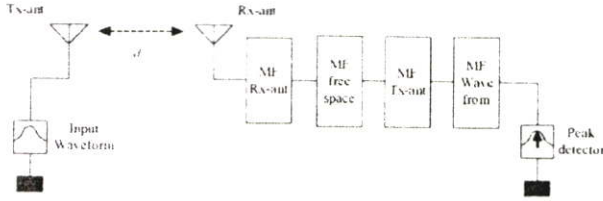


Fig.4 Block diagram of transmission system for the extension of Friis' transmission formula to treat UWB signal

At the receiver, the matched filter  $H_{MF}(f)$  is introduced to maximize the signal-to-noise ratio (SNR) of the receiver output, as shown in Fig. 4.

$$H_{MF}(f) = \frac{\sqrt{2fb} H_{e-Friis}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}^*(f)|^2 df}}, \quad (6)$$

which satisfies the following constant noise output power condition

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_{MF}(f)|^2 df = 2fb, \quad (7)$$

The receiver waveform, and the spectrum of received waveform are  $h_{e-Friis}(t)$  and  $H_{e-Friis}(f)$ , respectively. The waveform at the output of the optimum matched filter  $v_{MF}(t)$  is

$$\begin{aligned} v_{MF}(t) &= h_{e-Friis}(t) * h_{MF}(t) \\ &= \frac{\sqrt{2fb} h_{e-Friis}(t) * h_{e-Friis}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{e-Friis}^2(t) dt}}, \end{aligned} \quad (8)$$

The spectrum at the output of the matched filter  $V_{MF}(f)$  is

$$\begin{aligned} V_{MF}(f) &= H_{e-Friis}(f) H_{MF}(f) \\ &= \frac{\sqrt{2fb} H_{e-Friis}(f)^2}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df}}, \end{aligned} \quad (9)$$

taking its maximum as

$$\begin{aligned} \max_t v_{MF}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} V_{MF}(f) df \\ &= \sqrt{2fb} \int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df, \end{aligned} \quad (10)$$

Equation (10) is the UWB extension of Friis' transmission formula. It includes three elements, namely the frequency characteristics of the antennas, the frequency characteristics of free space propagation and the spectrum of the transmitted signal. It is clear from Eq. (10) that the transmission gain of the UWB signal can not be defined as the product of gains of antennas and a free space channel as Friis' transmission formula. Instead the total

transmission gain including the effect of the waveform can be obtained as Eq. (10). For the normalization, the reference isotropic antenna with  $H_{Iso}(f) = 1$  is considered.

The UWB transmission gain can be defined as

$$G_{UWB} = \frac{\max_t v_{MF}(t)}{\max_t v_{MF,Iso}(t)}, \quad (11)$$

where  $v_{MF}(t)$  is the optimum matched filter and  $v_{MF,Iso}(t)$  is the output matched filter for an isotropic antenna.

#### A. Power Delay Profile

The mean relative power of the taps are specified by the power delay profile (PDP) of the channel, defined as the variation of mean power in the channel with delay, thus

$$P_{(\tau)} = \frac{E|h(\tau)|^2}{2}, \quad (12)$$

where  $E$  is expectation and  $h(\tau)$  is the channel impulse response.

## IV. RESULTS

The UWB signal shown in Fig.3 is used as the transmission waveform. The received waveforms at the output of the matched filter are evaluated.

The relative gain is defined as Eq.(11). In practice, it is quite complicated and is not feasible to implement the adaptive matched filter to adjust for the antennas. Therefore, the matched filter designed for an isotropic antenna is also considered and compared with the ideal matched filter.

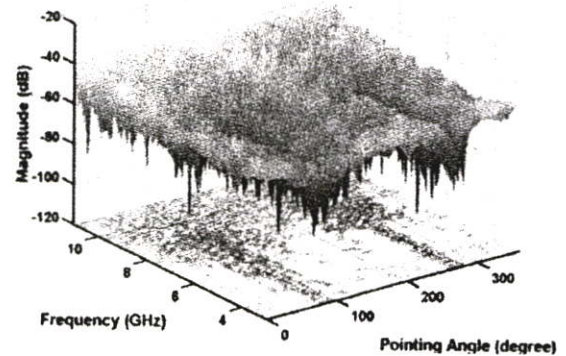


Fig.5 Antenna transfer function: magnitude.

Figure 5 shows the magnitude of the measured antenna transfer function and its phase is also shown in Fig. 6. We can particularly see the frequency characteristic of the antenna transfer function at each pointing angle. As the

antenna under test (AUT) is the broadband biconical antenna, the ideal linear phase is almost realized, except

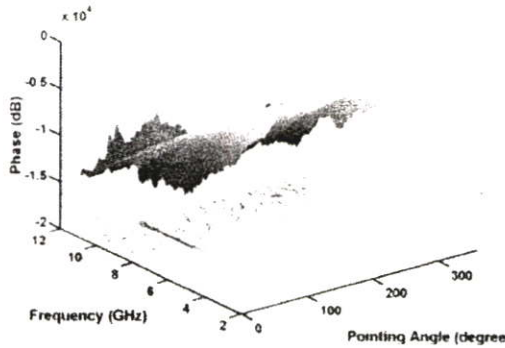


Fig.6 Antenna transfer function: phase.

for the null directions which change by the frequency.

Figure 7 shows the UWB transmission gain versus antenna pointing angle that uses the optimum matched filter compared with the matched filter for an isotropic antenna. The peaks are found at 0°, 180° and 360° pointing angles which correspond to the broadside of the antenna. The nulls are observed at 90° and 270° pointing angles.

Figure 8 shows the UWB power delay profile (PDP) of

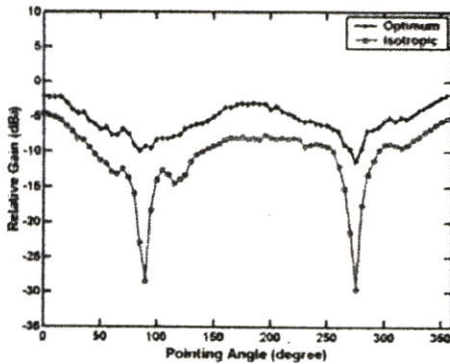


Fig.7 Antenna transfer function: magnitude.

the antenna with robotic effect at the arbitrary angle 0° to 360°. We can see that the received signal is attenuated by pointing angle an antenna and body robotic in 90° and 270°. The UWB power delay profile high power and low power dependently pointing angle an antenna with robotic.

## V. CONCLUSIONS

The paper present the characterization of UWB antenna with robotic is evaluated. The power delay profile and the UWB transmission gain, based on the extension of Friis' transmission formula take into account the transmitted waveform and the matched filter into the system for the free space of UWB. The experimental examples using the

biconical antenna as the receiver install with robotic are presented. This approach is more useful to design and evaluate the UWB wireless system with the mobile robotics.

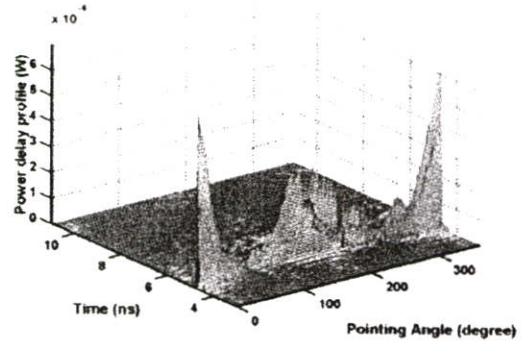


Fig.8 The power delay profile.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Mr. Apichit Pradabphon from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, for their help in the experiments and review of this paper.

## REFERENCES

- [1] J. Derenick, C. Thorne and J. Spletzer, "Hybrid Free-Space. Optics/Radio Frequency (FSO/RF) Networks for Mobile Robot Teams," accepted to The Third International Multi-Robot Systems Workshop, Washington, DC, March 2005
- [2] 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.
- [3] H.T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," Proc. IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] A. H. Mohammadian, A. Rajkotia, and S.S. Soliman, "Characterization of UWB Transmit-Receive Antenna System," Proc. IEEE Conf. Ultra Wideband Syst. Tech. (UWBST) 2003, Nov. 2003.
- [7] 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.
- [8] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, and P. Tangtisanon "Part Loss and Matched Filter Gain for UWB System," Proc. The 2004 international symposium on antennas and propagation (ISAP'04), pp.97-100, Aug.2004.
- [9] J. Foerster, "Channel Modeling Sub-Committee Report Final," IEEE P802.15-02/368r5-SG3a, Nov. 2002.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเสถียร บุญวิเศษ
วัน เดือน ปีเกิด	21 ตุลาคม 2522 ที่จังหวัดอุดรธานี
ที่อยู่	284 หมู่ที่ 1 ถ.มิตรภาพ บ้านโนนสะอาด อ.โนนสะอาด จังหวัดอุดรธานี 412140 โทร.0-4239-2390 มือถือ 0-1556-5851
ประวัติการศึกษา	2545 สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคม (เกียรตินิยมอันดับ2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2542 สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี 2540 สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ 2.) การออกแบบวงจรPLC 3.) ระบบการควบคุมหุ่นยนต์

### ผลงานวิจัย

- [1] **Satean Boonvisat**, S. Promwong, P. Supanakoon, S. Kaewmechai , and P. Sityopasakul, "Indoor Propagation Channel Measurement of Ultra Wideband Antenna with Robotic", International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT) 2005, vol. 2/2. pp. 1087-1090, Oct. 2005.

### รางวัลเกียรติคุณ

พ.ศ.2542 ได้รับใบประกาศเกียรติคุณรางวัลชมเชยในการประกวดสิ่งประดิษฐ์ดีเด่น จากกรมอาชีวศึกษา

### ตำแหน่งหน้าที่การทำงานในปัจจุบัน

พ.ศ.2545 เข้าทำงานในตำแหน่ง วิศวกรไฟฟ้า ที่บริษัท NHK Spring (Thailand) Co., Ltd.