

การประเมินผลของค่าการสูญเสียในการส่งผ่านสัญญาณวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งด้วย  
สภาวะแวดล้อมภายในอาคารไปถึงภายนอกอาคาร

EVALUATION OF UWB TRANSMISSION LOSS WITH INDOOR TO  
OUTDOOR ENVIRONMENTS

พยุ่งศักดิ์ ปันจุมหาพร  
PAYUNGSAK PANTHAP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-230-417

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประเมินผลของค่าการสูญเสียในการส่งผ่านสัญญาณวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งด้วย  
สถานะแวดล้อมภายในอาคารไปถึงภายนอกอาคาร

EVALUATION OF UWB TRANSMISSION LOSS WITH INDOOR TO  
OUTDOOR ENVIRONMENTS



พยุงศักดิ์ ปานเทพ

PAYUNGSAK PANTHAP

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 87059  
วัน,เดือน,ปี..... 30 ส.ค. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-230-417

**EVALUATION OF UWB TRANSMISSION LOSS WITH INDOOR TO  
OUTDOOR ENVIRONMENTS**

**PAYUNGSAK PANTHAP**

**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**

**2008**

**KMITL-2008-EN-M-230-417**

**COPYRIGHT 2008**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินผลของค่าการสูญเสียในการส่งผ่านสัญญาณวิทยุแบบ แถบกว้างยิ่งด้วยสภาวะแวดล้อมภายในอาคารถึงภายนอกอาคาร
นักศึกษา	นายพยุงศักดิ์ ปานเทพ
รหัสประจำตัว	49061011
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหลักการวิเคราะห์และการประเมินค่าการสูญเสียในการส่งผ่านของช่องสัญญาณวิทยุแบบแถบกว้างในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารถึงภายนอกอาคาร ในการศึกษาทดลองวิจัยได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์สำหรับการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนและบันทึกผล ส่วนสายอากาศทั้งด้านรับและด้านส่งใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ในการทดลองวิจัยวัดและทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สารสนเทศคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากนั้นได้กำหนดแบบจำลองเพื่อการทดลองวัดจริง โดยกำหนดการส่งสัญญาณจากภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร ผลที่ได้จากการวัดจริงจะนำมาประเมินค่าของขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ ค่าการสูญเสียเชิงวิถี ความล่าช้าของสัญญาณ รูปแบบสัญญาณที่รับได้ อัตราการผิดพลาดบิตและค่าการสูญเสียในการส่งผ่านเป็นต้น สำหรับขบวนการวิเคราะห์ได้พิจารณาใช้ทฤษฎีการส่งผ่านของฟรีส รูปแบบสัญญาณด้านส่งได้ใช้สัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมและสัญญาณเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด ส่วนทางด้านรับได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ โดยใช้สัญญาณแม่แบบ 2 สัญญาณ สัญญาณแรกจะใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ อีกสัญญาณจะใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ เพื่อที่จะหาสัญญาณที่ดีที่สุด จากแบบแผนของการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จะมีประโยชน์มากสำหรับการออกแบบระบบและวิเคราะห์ของวิทยุแบบแถบกว้างยิ่ง โดยเฉพาะประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลข่าวสารระยะสั้นจากภายในอาคารไปยังภายนอกอาคารหรือภายนอกไปยังภายในอาคาร

<b>Thesis Title</b>	Evaluation of UWB Transmission Loss with Indoor to Outdoor Environments
<b>Student</b>	Mr. Payungsak panthap
<b>Student ID.</b>	49061011
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Information Engineering
<b>Year</b>	2008
<b>Thesis Advisor</b>	Mr. Sathaporn Promwong

### **ABSTRACT**

This thesis introduces the method for analysis and evaluation of ultra wideband transmission loss with indoor to outdoor environment. The research uses Vector Network Analyzer (VNA) machine for measuring transfer function and recording results. About antenna, the biconical antenna is implemented in both transmitter and receiver. For measurement, it is operated at Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. After that the model for measurement is designed by sending the signal from indoor to outdoor environment. The result from measuring will be evaluated to find magnitude and phase of channel transfer function, path loss, power delay profile, received waveform, bit error rate and transmission loss. For process of analysis, the Friis' transmission is used and transmitted signals are the rectangular passband and the amplitude shift keying. The receiver side uses two types of filter that are transmitted signal template and received signal template to improve the performance system. From this method in the thesis, it will be very useful for designing and analyzing in ultra wideband system and especially, for find performance of data transmission for short range wireless from indoor to outdoor environment or outdoor to indoor environment.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงเป็นไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศเป็นที่สุด ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ เนื่องจากการอนุเคราะห์ อบรมสั่งสอน ดูแลลูกศิษย์เป็นอย่างดี ให้ความอนุเคราะห์ความรู้ต่างๆ คอยเสนอแนะการนำเสนองานวิจัยอย่างดีเยี่ยม ชี้แนะแนวทางเกี่ยวกับงานวิจัยทั้งหมด ตลอดจนความเป็นห่วงที่คอยสอบถามปัญหาของงานวิจัย ทำให้ข้าพเจ้ามีความรู้ และสามารถนำเสนองานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้เขียนมีความซาบซึ้งใจต่อความเป็นอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่ให้ชีวิตและคอยดูแลให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ๆ มาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี จนทำให้ผู้วิจัยมาถึงจุดนี้ได้

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือในการทดลองและให้คำแนะนำมาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณความดีและประโยชน์ที่พึงบังเกิดมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นผลมาจากความกรุณาของ บิดามารดา คณาจารย์ทุกท่านผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และผู้ที่ยสนับสนุน ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณความดีทั้งหลาย ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พยุงศักดิ์ ปานเทพ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 การเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	4
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง.....	7
2.1 กล่าวนำ.....	7
2.2 ประวัติและความเป็นมาของระบบแถบกว้างยิ่ง.....	8
2.3 ลักษณะโดยทั่วไปของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	9
2.4 จุดเด่นของระบบแถบกว้างยิ่ง.....	11
2.4.1 มีความจุช่องสัญญาณมาก.....	11
2.4.2 ไร้อำนาจในการส่งต่ำ.....	12
2.4.3 มีโอกาสที่จะถูกดักฟังหรือตรวจจับได้ยาก.....	12
2.4.4 มีความต้านทานจากการถูกรบกวนสัญญาณ.....	12
2.4.5 มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก.....	12
2.4.6 มีความต้านทานต่อช่องสัญญาณหลายวิถี.....	13

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	กฎข้อบังคับของระบบสื่อสารแถบกว้างยิ่ง	15
2.5.1	กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา	15
2.5.2	กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป	16
2.6	การนำไปใช้งานของระบบแถบกว้างยิ่ง	18
2.6.1	การติดต่อสื่อสารและเซนเซอร์	19
2.6.2	การหาตำแหน่งและระบุตำแหน่ง	20
2.6.3	เรดาร์	21
2.7	บทสรุป	22
บทที่ 3	ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์สัญญาณแถบกว้างยิ่ง	23
3.1	กล่าวนำ	23
3.2	ระบบการวัดช่องสัญญาณ	23
3.2.1	การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่	24
3.2.2	การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนเวลา	25
3.3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	25
3.3.1	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านช่องสัญญาณ	26
3.3.2	ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ	28
3.3.3	ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ	29
3.3.4	หลักการส่งผ่านของฟรีส	31
3.3.5	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	34
3.3.6	ค่าสูญเสียเชิงวิถี	34
3.3.7	ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน	35
3.3.8	ค่าการกระจายทางเวลา	36
3.3.9	เครื่องรับสัญญาณในระบบแบบแถบกว้างยิ่ง	37
3.3.10	สัญญาณแม่แบบในระบบแบบแถบกว้างยิ่ง	38
3.3.11	อัตราความผิดพลาดบิต	41
3.3.12	วิธีกำลังสองน้อยที่สุด	42
3.4	สรุป	43

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4	แบบจำลองและการวัดสัญญาณแถบกว้างยิ่ง	44
4.1	กล่าวนำ	44
4.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด	44
4.2.1	เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์	44
4.2.2	สายอากาศแบบกรวยคู่	45
4.3	แบบแผนการวัด	47
4.4	การทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณของแบบจำลอง	48
4.4.1	แบบจำลองการวัด	48
4.4.2	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด	49
4.4.3	รูปการวัดสัญญาณ	50
4.4.4	แบบจำลองของสัญญาณที่ใช้ส่ง	51
4.4.4.1	รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม	51
4.4.4.2	รูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด	53
4.5	สรุป	55
บทที่ 5	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง	56
5.1	กล่าวนำ	56
5.2	ผลการวิเคราะห์	56
5.2.1	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลอง	56
5.2.1.1	ฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง	57
5.2.1.2	ค่าสูญเสียเชิงวิถี	59
5.2.1.3	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	61
5.2.1.4	ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน	62
5.2.1.5	เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์	63
5.2.1.6	อัตราผิดพลาดบิด	66
5.2.1.7	การสูญเสียในการส่งผ่าน	69
5.3	บทสรุป	70

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	71
6.1 กล่าวนำ.....	71
6.2 การวิเคราะห์ช่องสัญญาณ.....	71
6.2.1 สรุปผลการวิเคราะห์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม เปรียบในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลต เชิงเลขทางแอมพลิจูด.....	71
5.2.1 สรุปผลการวิเคราะห์เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็น สัญญาณแม่แบบเปรียบเทียบกับเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้ สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ.....	72
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	89

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 จุดเด่นและประโยชน์ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง.....	15
2.2 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....	16
2.3 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานโดยสถาบันมาตรฐานโทรคมนาคมแห่งยุโรป สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....	17
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของแบบจำลอง.....	49
5.1 ระยะห่างจากสายอากาศส่งมายังตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลอง.....	57

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร.....	2
2.1 การเปรียบเทียบระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่งกักระบบอื่นๆ.....	10
2.2 พิจารณาการออกแบบสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....	11
2.3 โครงสร้างของระบบแถบกว้างยิ่งกักระบบแถบแคบ.....	13
2.4 ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง.....	14
2.5 ข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานในสเปกตรัมความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่าง คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาและสถาบันมาตรฐานโทรคมนาคมแห่ง ยุโรป ภายในอาคาร.....	17
2.6 ข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานในสเปกตรัมความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่าง คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาและสถาบันมาตรฐาน โทรคมนาคมแห่ง ยุโรป ภายนอกอาคาร.....	18
2.7 ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่สามารถประยุกต์ใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่ง.....	19
2.8 การนำไปใช้งานในลักษณะโครงข่ายภายในบ้าน.....	20
2.9 เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในงานค้นหาตำแหน่ง.....	21
3.1 ระบบการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์และ การแปลงสู่โดเมนเวลา โดยใช้ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว.....	25
3.2 ไดอะแกรมโครงข่ายแบบ 2 พอร์ต.....	26
3.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบ.....	29
3.4 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่.....	29
3.5 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนเวลา.....	30
3.6 ช่องสัญญาณการส่งผ่านแบบไร้สาย.....	31
3.7 การประยุกต์ใช้สมการของพริส.....	32
3.8 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน.....	36
3.9 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	38
3.10 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ.....	38
3.11 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในกรณีใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ.....	40
3.12 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด.....	42
4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์.....	45

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ขนาดและรูปทรงของสายอากาศแบบกรวยคู่.....	46
4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแบบกรวยคู่.....	46
4.4 ขนาดและเฟสของสายอากาศแบบกรวยคู่.....	47
4.5 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการวิเคราะห์.....	48
4.6 แบบจำลองที่ใช้ในการวัดและการจัดวางสายอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ.....	49
4.7 การจัดวางตำแหน่งของสายอากาศด้านส่งและด้านรับจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร.....	50
4.8 ตำแหน่งสายอากาศด้านรับที่อยู่ภายนอกอาคาร.....	50
4.9 รูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการส่งของแถบกว้างยิ่ง (แบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม).....	52
4.10 ความหนาแน่นแถบกำลังงานของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม.....	52
4.11 รูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการส่งของแถบกว้างยิ่ง (แบบเกาส์เซียน).....	53
4.12 ความหนาแน่นแถบกำลังงานของเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด.....	54
5.1 แบบจำลองและตำแหน่งที่นำเสนอผลการวิเคราะห์.....	57
5.2 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 2 เมตร.....	58
5.3 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 2 เมตร.....	58
5.4 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 8 เมตร.....	59
5.5 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 8 เมตร.....	59
5.6 ค่าสูญเสียเชิงวิถีในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม.....	60
5.7 ค่าสูญเสียเชิงวิถีในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด.....	60
5.8 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม.....	61
5.9 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด.....	61
5.10 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม.....	62
5.11 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด.....	63
5.12 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุทของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณส่ง.....	64

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุทของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดเป็นสัญญาณส่ง.....	64
5.14 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุทของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณส่ง.....	64
5.15 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุทของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดเป็นสัญญาณส่ง.....	64
5.16 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณส่ง.....	67
5.17 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดเป็นสัญญาณส่ง.....	67
5.18 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณส่ง.....	68
5.19 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดเป็นสัญญาณส่ง.....	68
5.20 การสูญเสียในการส่งผ่านเมื่อใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบเปรียบเทียบกับเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบและใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณส่ง.....	69
5.21 การสูญเสียในการส่งผ่านเมื่อใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบเปรียบเทียบกับเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบและใช้รูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดเป็นสัญญาณส่ง.....	70

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

ระบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wide Band)	UWB
สถาบันมาตรฐานโทรคมนาคมแห่งยุโรป (European Telecommunications Standards Institute)	ETSI
องค์การบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Aviation Administration)	FAA
คณะกรรมการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission)	FCC
ช่องทางเพื่อการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ทั่วไป (General Purpose Interface Bus)	GPIB
ระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global Positioning Systems)	GPS
สถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers)	IEEE
สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union)	ITU
ฟูรีเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform)	IFFT
ระดับแนวสายตา (Line of Sight)	LOS
นอกระดับแนวสายตา (Non-Line of Sight)	NLOS
คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)	PC
เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network)	WPAN
ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (Power Delay Profile)	PDP
อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio)	SNR
อัตราความผิดพลาดบิต (Bit error rat)	BER
ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (Power Spectral Density)	PSD
โดเมนความถี่ (Frequency Domain)	FD
โดเมนเวลา (Time Domain)	TD
เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer)	VNA
เครื่องรับ (Receiver)	Rx
เครื่องส่ง (Transmitter)	Tx
แอมแปร์ (Ampere)	A
เดซิเบล (Decibel)	dB
ฟารัด (Farad)	F
เมตร (meter)	m

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

เฮิรตซ์ (Hertz)	Hz
กิกะเฮิรตซ์ (Gigahertz)	GHz
เวลา (Time), $s$	$t$
วินาที (Second)	$s$
นาโนวินาที (Nanosecond)	ns
วัตต์ (Watt)	W
มิลลิวัตต์ (Milliwatt)	mW
สัดส่วนแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth)	$B_f$
ความเร็วแสง (Velocity of light), $c = f\lambda = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \approx 3 \times 10^8, m/s$	$c$
ความยาวคลื่น (Wavelength), $m$	$\lambda$
ระยะทาง (distance), $m$	$d$
ความถี่ (Frequency), Hz	$f$
ฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency transfer function)	$H(\omega)$
สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient)	$s_{21}$
จำนวนจุดความถี่ (Sampling number)	$N_{smp}$
ค่าความถี่สูงสุด	$f_{max}$
ค่าความถี่ต่ำสุด	$f_{min}$
แบนด์วิดท์ (Bandwidth)	$f_b$
ค่าความถี่กลาง	$f_o$
กำลังงานที่รับได้ (Receive power), $W$	$P_r$
กำลังงานที่ส่ง (Transmitt power), $W$	$P_t$
คอนโวลูชัน (Convolution)	$\otimes$
ความสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)	PL
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)	$C_c$
การประวิงเข้าถึงเฉลี่ย (Mean excess delay), $s$	$\bar{\tau}$
การแผ่กระวิง RMS (RMS delay spread), $s$	$\sigma_\tau$
ความน่าจะเป็นของความผิดพลาด (Probability of Error)	$\mathcal{Q}$
ค่าความผิดพลาด (Root mean square error)	$e$

# บทที่ 1

## บทนำ

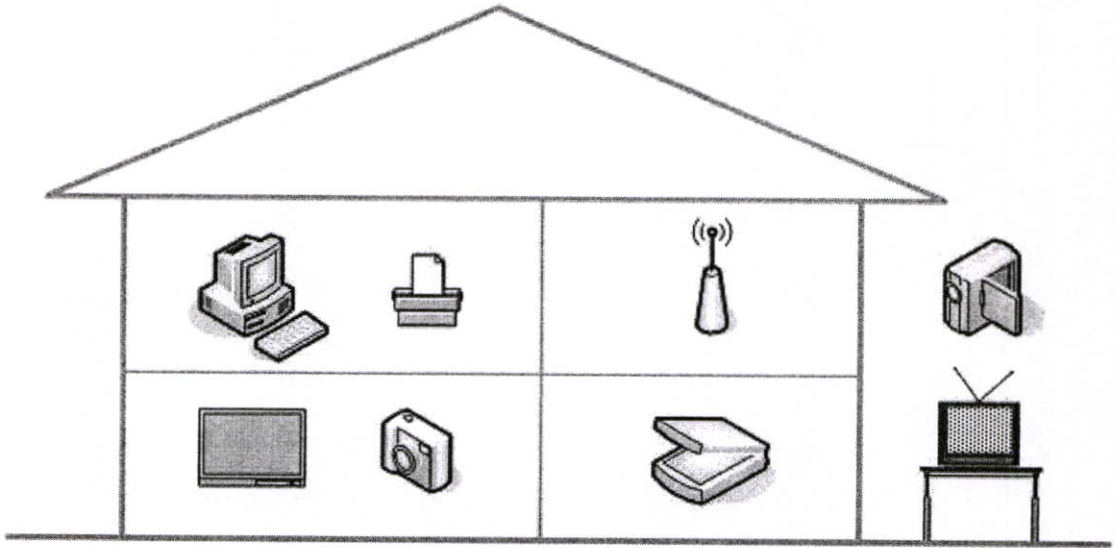
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวัน เพราะว่าเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายนี้ช่วยเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการติดต่อสื่อสารทั้งภายในอาคารสำนักงานและภายนอกสำนักงานหรือที่อยู่อาศัย และระหว่างภายในและภายนอกอาคาร เช่น การรับส่งข้อมูลมัลติมีเดียต่างๆ (ข้อมูลตัวอักษร ข้อมูลภาพ ข้อมูลเสียง หรือแม้กระทั่งข้อมูลในรูปแบบที่เป็นทั้งภาพและเสียง) โดยในการรับส่งข้อมูลที่เป็นมัลติมีเดีย นั้น มีความต้องการเทคโนโลยีที่รองรับการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูง มีแบนด์วิดท์ที่กว้าง รองรับผู้ใช้ได้จำนวนมาก มีสัญญาณรบกวนที่ต่ำและมีราคาถูกลง ซึ่งเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับความต้องการดังกล่าวและได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันก็คือเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่ง [1]-[3] หรืออัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-Wideband; UWB) ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งนี้ ตอบสนองความต้องการในการรับส่งข้อมูลที่เป็นมัลติมีเดียต่างๆดังนี้

- เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งนี้มีช่วงความถี่ระหว่าง 3.1 GHz – 10.6 GHz และมีแบนด์วิดท์มากที่สุดเท่ากับ 7.5 GHz
- ใช้กำลังในการส่งต่ำที่ -41.3 dBm/MHz จึงทำให้เกิดการรบกวนและถูกตรวจจับได้ยาก
- มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง คือ 110 Mbps ที่ระยะทาง 10 เมตร
- การส่งสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะส่งสัญญาณในลักษณะเป็นอิมพัลส์ โดยไม่มีการไม่มีการนำเอาสัญญาณข้อมูลไปมอดูเลตกับสัญญาณพาห้ จึงทำให้อุปกรณ์ในระบบแถบกว้างยิ่งมีราคาถูกลง
- มีสัดส่วนของแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth) ในการส่งมากกว่าหรือเท่ากับ 20% ของแถบความถี่กลาง หรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าระบบการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งจะนำไปใช้ภายในอาคารเป็นหลัก ซึ่งในการใช้งานจริงนั้น อาจมีการใช้งานในรูปแบบอื่นที่ไม่ใช่เพียงแคภายในอาคาร แต่เป็นการใช้งานในสภาวะภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร ดังรูปที่ 1.1 เช่นในกรณีเครื่องส่งอยู่ภายในอาคาร ส่วนเครื่องรับอยู่ภายนอกอาคาร ซึ่งในสภาวะภายในอาคารไปยัง

ภายนอกอาคาร นี้จะมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อการสื่อสารในสภาวะแวดล้อมนี้ เช่น ผนัง หน้าต่าง อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 สภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร

เมื่อนำเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งมาใช้ในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร จะทำให้เป็นระบบที่ไม่อยู่ในระยะที่สายตามองเห็น (None line of sight; NLOS) โดยจะทำให้สัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศแล้วผ่านวัสดุที่เป็นตัวกลาง (ในวิทยานิพนธ์นี้คือกระจกหน้าต่าง) ไปยังสายอากาศด้านรับ มีการลดทอนกำลังงานลง ส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่รับได้ อาจทำให้สัญญาณที่รับได้เกิดความผิดเพี้ยน หรืออาจจะรับสัญญาณไม่ได้เลย ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาวิจัยถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องด้วยเมื่อนำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งไปใช้งานจริง ในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร สัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศนั้นอาจจะถูกลดทอนกำลังงานลงโดยปัจจัยต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถูกลดทอนโดยผนัง กำแพงหรือหน้าต่างของอาคาร ซึ่งส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่รับได้ หรืออาจจะทำให้รับสัญญาณไม่ได้เลยก็เป็นได้ วิทยานิพนธ์นี้ต้องการที่จะศึกษาผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมภายในอาคารไปยังภายนอกอาคารที่มีผลต่อช่องสัญญาณของระบบการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่ง ซึ่งพิจารณาบนพื้นฐานของการวัดจริง ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารไป

ยังภายนอกอาคาร โดยนำผลที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector network analyzer; VNA) โดยใช้สัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม (Rectangular passband pulse) และสัญญาณเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด (Amplitude shift keying; ASK) มาทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่เกิดจากการส่งผ่านในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ไปยังภายนอกอาคาร เช่น ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ (Channel transfer function) ค่าสูญเสียเชิงวิถี (Path loss) ค่าความผิดเพี้ยนในรูปของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (Power delay profile; PDP) ทางด้านรับกำหนดให้มีเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ โดยใช้สัญญาณแม่แบบ 2 สัญญาณ สัญญาณแรกจะใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ (Transmitted signal template) อีกสัญญาณจะใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ (Received signal template) และได้นำสัญญาณที่ได้จากเครื่องรับทั้งสองแบบมาพิจารณาหาประสิทธิภาพอัตราผิดพลาดบิต (Bit error rate; BER) และการสูญเสียในการส่งผ่าน (Transmission loss) เมื่อทราบถึงประสิทธิภาพที่แตกต่างของระบบที่มีการพิจารณาถึงเครื่องรับและสัญญาณส่งที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถออกแบบระบบการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งที่มีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสมต่อการใช้งานได้เป็นอย่างดี

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ไปยังภายนอกอาคารที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งบนพื้นฐานของการวัด เป็นไปได้ว่าสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับจะถูกลดทอนกำลังงานลงหรือเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่นการส่งผ่านหรือสะท้อนวัสดุที่กั้นระหว่างสายอากาศทั้งสองเช่น กำแพง กระจก เป็นต้น จึงทำให้มีผลโดยตรงต่อสัญญาณที่รับได้ อาจทำให้สัญญาณที่รับได้มีกำลังงานที่ต่ำหรืออาจจะรับสัญญาณไม่ได้เลยก็เป็นได้ โดยในตำแหน่งต่างๆของการวัดน่าจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน จึงได้มีการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดสัญญาณของสายอากาศด้านรับเพื่อพิจารณาผลที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งคาดว่าจะส่งผลอย่างมากต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณเช่นกัน

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร (ทางเดินยาวในอาคาร) ไปยังภายนอกอาคาร (บริเวณที่จอดรถ) [4] ซึ่งสายอากาศด้านส่งและสายอากาศ

ด้านรับจะถูกกั้นด้วยกระจกหน้าต่างใน โดยสายอากาศด้านส่งจะอยู่ภายในอาคาร ส่วนสายอากาศด้านรับจะอยู่นอกอาคาร มีระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับจาก 2 เมตร ถึง 8 เมตร โดยจะทำการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศด้านส่งคงที่ และทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศด้านรับออกไปครั้งละ 0.6 เมตร ซึ่งแบบจำลองที่ได้กล่าวมามีผลต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่ง พิจารณานบนพื้นฐานของการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ความถี่ 3 GHz - 11 GHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งคือที่ 3.1 GHz - 10.6 GHz ซึ่งกำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal communication commission; FCC) [8] และใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ [9] ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายเป็นแบบรอบตัว (Omni directional) โดยกำหนดความสูงของสายอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับเป็น 2.65 เมตร ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงผลของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างระหว่างผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆระหว่างเครื่องรับและสัญญาณส่งที่แตกต่างกัน

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ไปยังภายนอกอาคารที่มีผลต่อการส่งผ่านช่องสัญญาณของระบบการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่ง โดยใช้สมการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission formula) ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการพิจารณา และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ไปยังภายนอกอาคาร ในการทำงานวิจัยนี้ได้กำหนดสัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมและสัญญาณเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ ประกอบด้วย ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ ค่าสูญเสียเชิงวิถี ค่าความผิดพลาดในรูปของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และภาพหน้าต่างข้างการประวิงกำลังงาน จากนั้นทางด้านรับกำหนดให้มีเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ โดยใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ จากนั้นได้นำสัญญาณที่ได้จากเครื่องรับทั้งสองแบบมาพิจารณาหาประสิทธิภาพอัตราผิดพลาดบิตและการสูญเสียในการส่งผ่าน เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพที่แตกต่างของระบบที่มีการพิจารณาถึงเครื่องรับและสัญญาณส่งที่แตกต่างกัน

## 1.6 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

เนื่องจากในงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง ได้มีการนำเสนอแบบจำลองของการแพร่กระจายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะแสดงให้เห็น

ถึงการแพร่กระจายภายในอาคาร หรืออาจจะมีการศึกษาผลการทดลองของการแพร่กระจายภายในอาคารและภายนอกอาคารของระบบวิทยุแบบแถบกว้างยังมีอยู่ก่อนหน้านี้แล้ว [5] ในจุดนั้นไม่ได้มีการพิจารณาเกี่ยวกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของการส่ง จากที่กล่าวมาจะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานในระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลหรือเครือข่ายภายในบ้าน

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาทดลองวัดแบบจำลองในสภาวะแวดล้อมภายในไปยังภายนอกอาคารโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ โดยใช้สัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมและสัญญาณเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด เพื่อศึกษาคุณลักษณะต่างๆของระบบแถบกว้างยิ่ง เช่น ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ ค่าสูญเสียเชิงวิถี ค่าความผิดเพี้ยนในรูปของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน จากนั้นทางด้านรับกำหนดให้มีเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ และได้นำสัญญาณที่ได้จากเครื่องรับทั้งสองแบบมาพิจารณาหาประสิทธิภาพอัตราผิดพลาดบิตและการสูญเสียในการส่งผ่าน เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพที่แตกต่างของระบบที่มีการพิจารณาถึงเครื่องรับและสัญญาณส่งที่แตกต่างกัน

## 1.7 ขั้นตอนการศึกษา

จากแนวคิดและหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการศึกษาสำหรับวิทยานิพนธ์ดังนี้ เริ่มจากศึกษาถึงขั้นตอนในการวัดเก็บค่าช่องสัญญาณ อุปกรณ์ที่จะนำมาใช้และรูปแบบวิธีการวัดโดยยึดหลักตามลักษณะการนำไปใช้งานจริง จากนั้นจึงทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่จะสามารถแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ อันประกอบไปด้วย ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ ค่าสูญเสียเชิงวิถี ค่าความผิดเพี้ยนในรูปของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ถือเป็นปัจจัยหลักในการวิเคราะห์ช่องสัญญาณ จากนั้นได้ศึกษาถึงการปรับปรุงสัญญาณที่รับได้ให้มีค่าดีขึ้น โดยได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบที่ภาครับเพื่อที่จะหาประสิทธิภาพของระบบที่ดีที่สุด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีโดยรวมของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง ซึ่งจะประกอบไปด้วยประวัติและความเป็นมา ลักษณะโดยทั่วไปของระบบแถบกว้างยิ่ง จุดเด่นของระบบแถบกว้างยิ่ง รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการส่ง

บทที่ 3 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ระบบการวัดช่องสัญญาณ พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน สมการการส่งผ่านของฟรีส สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ค่าสูญเสียเชิงวิถิ ภาพหน้าตัดข้างการประวิง กำลังงาน ค่ากระจายทางเวลา เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ อัตราผิดพลาดบิตและแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองและการวัดสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ประกอบด้วย อุปกรณ์และสายอากาศที่ใช้ในการวัด แบบแผนการวัด รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัด

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วย ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลอง โดยใช้สัญญาณส่งและเครื่องรับที่แตกต่างกัน

บทที่ 6 จะกล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# ระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

### 2.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่ง เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารต่างๆ ซึ่งเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนี้เป็นเทคโนโลยีที่ถูกออกแบบมาให้มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูง ใช้ในระยะทางใกล้ๆ โดยที่ระยะทาง 10 เมตร จะมีความเร็ว 110 Mbps และมีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้นในระยะทางที่สั้นลง โดยที่ระยะทาง 2 เมตร จะมีความเร็วสูงถึง 480 Mbps มีช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้างคือช่วงความถี่ระหว่าง 3.1 GHz - 10.6 GHz และมีขนาดแบนด์วิดท์คือ 7.5 GHz [10] จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนี้มีการรับส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูงมาก และระยะทางไม่เกิน 10 เมตร การส่งสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งก็จะทำการส่งสัญญาณในลักษณะของพัลส์ที่ช่วงเวลาแคบมากๆ ซึ่งพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบๆ จะมีสเปกตรัมที่กว้าง ใช้กำลังงานต่ำ และสามารถแยกคลื่นหลายวิธีที่ไม่ต้องการออกไปได้ ส่วนสาเหตุที่ทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนี้มีราคาถูกเนื่องไม่ต้องการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลที่จะส่งเข้ากับสัญญาณพาห้ (Carrier less) ทำให้ที่ภาครับและภาคส่งของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้น ไม่ต้องการอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง เช่นตัวมอดูเลต ดิมอดูเลต และมิกเซอร์ เป็นต้น ที่กล่าวมานี้จึงทำให้อุปกรณ์ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีราคาถูก ขนาดเล็ก และใช้กำลังงานต่ำ เมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารแบบแคบที่ใช้กันอยู่ อีกประการหนึ่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจะมีสัดส่วนของแบนด์วิดท์ในการส่งมากกว่าหรือเท่ากับ 20 % ของแถบความถี่กลางหรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz [10] ซึ่งจะพบว่ามีความถี่มากกว่าแถบความถี่ของระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาก

จากคุณสมบัติต่างๆ ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ได้กล่าว จะเห็นได้ว่าเหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะของโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless personal area network; WPANs) การติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ในการรับส่งข้อมูลที่เป็นมัลติมีเดีย (ข้อมูลภาพ เสียง วิดีโอ ฯลฯ) ที่มีขนาดของข้อมูลที่ใหญ่ ต้องการความเร็วและความถูกต้องในการรับส่ง เช่น การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ กล้องวิดีโอ กล้องถ่ายรูป เครื่องสแกนเนอร์ เป็นต้น เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งก็สามารถรองรับความต้องการดังกล่าวได้เช่นกัน

เมื่อถึงเวลาที่นำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไปใช้งานจริง การใช้งานจะไม่จำกัดอยู่แค่ในสถานะแวดล้อมภายในอาคาร แต่จะมีการใช้งานที่อยู่ในสถานะแวดล้อมระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่รับได้ วิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการวิเคราะห์ถึง

ผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมดังกล่าว ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะกล่าวถึงในบทต่อไป โดยที่ในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติและความเป็นมา หลักการพื้นฐานและข้อกำหนดต่างๆ ของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

## 2.2 ประวัติและความเป็นมาของระบบแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งโดยพื้นฐานแล้วแตกต่างจากระบบการสื่อสารอื่นๆ เนื่องจากเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้นใช้พัลส์ที่แคบมากในการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ จากพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากนี้เองทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ๆ ครอบคลุมได้ยาก มีความเร็วสูงและสามารถใช้งานกับระบบเดิมที่มีอยู่แล้วได้

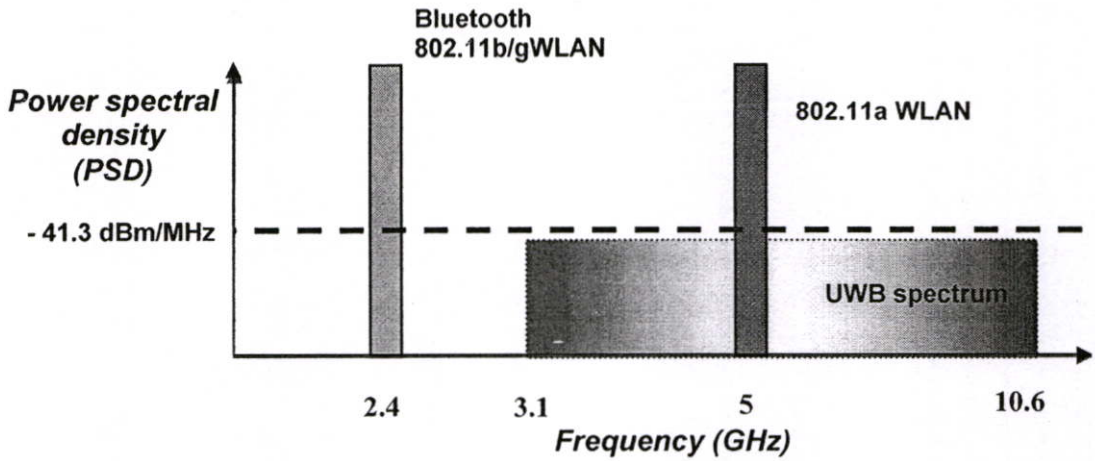
เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งไม่ใช่เป็นเทคโนโลยีที่คิดค้นเทคนิคในการสื่อสารขึ้นมาใหม่ เพียงแต่ใช้หลักการพื้นฐานเดิมของการสื่อสารที่ถูกค้นพบครั้งแรกโดยนายมาร์โคนี (Guglielmo marconi) ในปี ค.ศ.1901 นั่นคือรหัสมอส (Morse code) โดยได้ทำการทดลองส่งสัญญาณต่อเนื่องข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกโดยใช้เครื่องส่งสปาร์กแก๊ป (Spark gap) ซึ่งในการทดลองสื่อสารครั้งนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการใช้ประโยชน์ของการสื่อสารที่มีแบนด์วิดท์กว้างแต่ความสามารถในการใช้งานสื่อสารแบบที่หลายผู้ใช้ยังไม่เกิดขึ้น ต่อมาอีกประมาณ 15 ปี การสื่อสารโดยการใช้พัลส์ในการส่งสัญญาณได้ถูกผลักดันให้ทดสอบใช้ในทางการสื่อสารทางด้านต่างๆ ของทหารในรูปแบบของอิมพัลส์เรดาร์ (Impulse radar) ต่อมาได้มีการพัฒนาการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในปี ค.ศ. 1962 โดยใช้หลักการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนทางเวลา และต่อมาได้ถูกพัฒนานำไปใช้ในการส่งสัญญาณการสื่อสารในเครือข่ายไมโครเวฟ ในปี ค.ศ. 1963-1966 ซึ่งยึดหลักการในการพัฒนาการสื่อสารว่าต้องมีรูปแบบที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยใช้คุณลักษณะของการตอบสนองความถี่ เช่น ขนาดของสัญญาณ และเฟส ซึ่งในการวิเคราะห์สัญญาณนั้นได้ใช้เครื่อง ออสซิลอสโคปในการสุ่มค่าของสัญญาณ และได้ทำการวิเคราะห์เพื่อพัฒนาระบบการสื่อสารให้เป็นแบบเครือข่ายในระบบไมโครเวฟ ในปี ค.ศ. 1968 มีการพัฒนารูปแบบของสัญญาณให้รูปแบบของสัญญาณมีขนาดแคบลงได้อย่างรวดเร็ว และได้นำไปใช้ในการส่งสัญญาณติดต่อกับระบบเรดาร์ได้ ในปี ค.ศ. 1972 และในปี ค.ศ. 1973 เครื่องออสซิลอสโคปที่ใช้การวิเคราะห์ความถี่ที่ความถี่สูงมากๆ ก็ได้ถูกสร้างขึ้น จึงทำให้ต้องมีการกำหนดช่วงของแถบความถี่กว้างยิ่งขึ้น ต่อมาในปี ค.ศ.1980 นั้นได้มีการกำหนดให้เทคโนโลยี แถบกว้างยิ่งนี้ไม่จำเป็นต้องใช้คลื่นพาหะในการสื่อสาร โดยส่วนใหญ่แล้วการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งจะนำไปประยุกต์ใช้งานด้านระบบเรดาร์ อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของสัญญาณที่มีช่วงความถี่ที่กว้างมากทำให้ทราบข้อมูลในด้านการระบุตำแหน่งที่มีความถูกต้องสูง และเทคโนโลยีนี้ได้ถูกจำกัดการใช้งานในกองทัพทหารและแผนการปกครองที่เป็นความลับทางราชการ เช่นการสื่อสารที่ต้องการความ

ปลอดภัยที่สูง อย่างไรก็ตามในตอนนี้อาจความก้าวหน้าของไมโคร โปเซสเซอร์และสวิตช์ตัดต่อความเร็วสูงในเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ได้ทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งพร้อมสำหรับการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์

จากที่เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้รับความสนใจในด้านการพาณิชย์ผ่านมาเป็นเวลาหลายปี ผู้พัฒนาระบบแถบกว้างยิ่งต่างพากันกดดันให้ทางคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาอนุมัติให้ใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในเชิงพาณิชย์ จากนั้นในปี 2002 คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา ได้อนุมัติรายงานและข้อบังคับฉบับที่หนึ่ง (First report and order; R&O) สำหรับการใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในเชิงพาณิชย์ภายใต้การจำกัดกำลังงานที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่นสำหรับอุปกรณ์ต่างๆอย่างเคร่งครัด

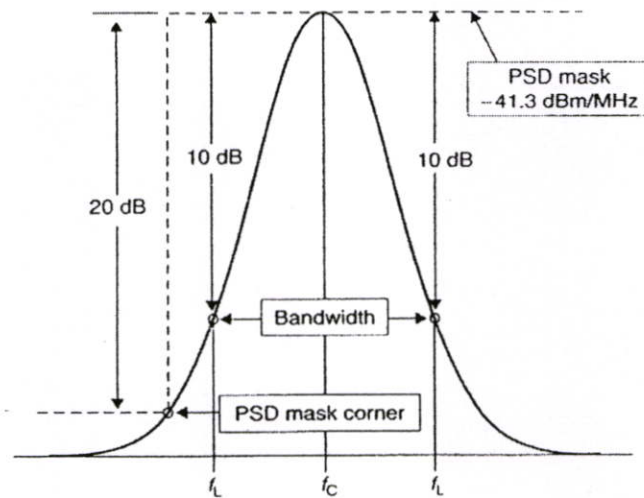
### 2.3 ลักษณะโดยทั่วไปของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั้นถูกนำมาใช้ในระบบการสื่อสารแบบไร้สายโดยมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงมากและยังมีข้อแตกต่างจากระบบการสื่อสารทางคลื่นความถี่วิทยุแบบอื่นๆ คือ เป็นระบบที่ไม่ต้องใช้คลื่นพาห์ โดยจะทำการส่งสัญญาณที่มีลักษณะเป็นพัลส์ ซึ่งจะเป็นพัลส์ที่มีความกว้างในระดับนาโนวินาที (Nano second; ns) เมื่อพิจารณาในโดเมนเวลา ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระบบมีความหนาแน่นของแถบกำลังงาน (Power spectral density; PSD) ครอบคลุมในช่วงความถี่ที่กว้างมากอยู่ในระดับกิกะเฮิรตซ์ (GHz) ในโดเมนความถี่ และเนื่องด้วยระบบนี้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงทำให้สามารถที่จะรองรับอัตราการส่งข้อมูลได้สูงแต่ด้วยข้อจำกัดในระดับของกำลังงานที่ใช้ส่งจึงทำให้ระยะทางในการให้บริการถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 10 เมตร ซึ่งเป็นข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE802.15.3a หรือโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล โดยในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงระดับความหนาแน่นของแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่ง โดยเปรียบเทียบกับระบบอื่นๆ



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่งกักระบบอื่นๆ

ลักษณะเฉพาะโดยทั่วไปของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง เช่น การสื่อสารความเร็วสูงภายในบ้าน หรือแม้กระทั่งอุปกรณ์เครือข่ายทางธุรกิจ โดยอุปกรณ์นั้นต้องสามารถทำงานอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz - 10.6 GHz ซึ่งจะถูกรอกแบบเพื่อให้สามารถที่จะทำงานได้ภายในอาคารเท่านั้น หรือต้องเข้ากันได้กับอุปกรณ์ขนาดมือถือ ซึ่งอาจจะถูกนำมาใช้ในลักษณะการสื่อสารแบบจุดต่อจุด โดยตัวแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งนั้นต้องทำการออกแบบเพื่อรับรองว่าการแพร่กระจายคลื่นในช่วงแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 20 dB ต้องอยู่ภายในแถบความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่ง และค่าแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดโดยวัดที่ระดับต่ำลงมา 10 dB จากระดับสูงสุดของการแพร่กระจายเท่ากับ 500 MHz โดยระดับสูงสุดที่อนุญาตให้การแพร่กระจายกำลังงานสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นถูกกำหนดไว้ที่  $-41.3$  dBm/MHz เพราะฉะนั้นในการออกแบบสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้นมีความต้องการแบนด์วิดท์ต่ำสุดที่ระดับ 10 dB ลงมาจากระดับสูงสุดของการแพร่กระจายคลื่น โดยรูปที่ 2.2 จะแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดดังกล่าว



รูปที่ 2.2 พิจารณาการออกแบบสัญญาณแถบกว้างยิ่ง [10]

## 2.4 จุดเด่นของระบบแถบกว้างยิ่ง

ลักษณะของพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบที่ใช้ในเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะมีข้อดีหลายประการ เมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารแถบแคบ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงประโยชน์ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่จะนำมาใช้ในการสื่อสารไร้สาย [11]

### 2.4.1 มีความจุของช่องสัญญาณมาก

จุดเด่นที่สำคัญของการมีแบนด์วิดท์ที่กว้างสำหรับพัลส์แถบกว้างยิ่งคือการทำให้ความจุของช่องสัญญาณมากขึ้น โดยความจุของช่องสัญญาณหรืออัตราการส่งข้อมูลจะบอกถึงขนาดของข้อมูลทั้งหมดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณการสื่อสารต่อหนึ่งวินาที ซึ่งขนาดความจุที่มากของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งสามารถพิจารณาได้จากสูตรของแฮนนอน (Hartley-Shannon) ดังสมการที่ 2.1

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $C$  คือค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุด

$B$  คือแบนด์วิดท์

$SNR$  คืออัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

จากสมการจะเห็นว่าค่าความจุของช่องสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแบนด์วิดท์มีมากขึ้น เพราะฉะนั้นสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มีแบนด์วิดท์มากถึง 7.5 GHz จึงทำให้มีอัตราการส่งข้อมูลใน

ระดับหลายร้อยเมกะบิตต่อวินาที (Mbps) แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา ได้จำกัดกำลังส่งของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไว้ จึงทำให้สามารถที่จะส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงในระยะสั้นๆ เท่านั้น ทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นตัวเลือกที่น่าจับตามองสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายระยะสั้นที่มีความเร็วสูง เช่น โครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล

#### 2.4.2 ใช้กำลังในการส่งต่ำ

จากข้อกำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดให้กำลังงานในการส่งสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้นมีค่าสูงสุดไม่เกิน -41.3 dBm/MHz ทำให้สัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้นมีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับต่ำโดยอยู่ในระดับของสัญญาณระบบกวน (Noise floor) จึงทำให้ระบบอื่นมองว่าสัญญาณของแถบกว้างยิ่งนี้เป็นสัญญาณรบกวนเลยถูกกำจัดออกไป ทำให้สัญญาณของแถบกว้างยิ่งไม่มีผลกระทบกับระบบอื่นๆ

#### 2.4.3 มีโอกาสที่จะถูกดักฟังหรือตรวจจับได้ยาก

เนื่องจากมีกำลังเฉลี่ยในการส่งที่ต่ำ ทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างยิ่งมีความสามารถในการถูกดักฟังและตรวจจับได้ยาก การส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งที่ต่ำทำให้ผู้ดักฟังจะต้องอยู่ใกล้กับตัวส่งสัญญาณมาก (ประมาณ 1 เมตร) เพื่อที่จะสามารถตรวจจับข่าวสารที่ส่งได้นอกจากนั้นพัลส์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งเป็นการมอดูเลตทางเวลา (Time modulation) ด้วยรหัสเฉพาะสำหรับภาคส่งและภาครับนั้นๆ การมอดูเลตทางเวลาของแถบกว้างยิ่งที่มีพัลส์ที่แคบมากๆ จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการส่งสัญญาณ เนื่องจากการที่จะตรวจจับพัลส์ในระดับพิโกวินาที (Pico second; ps) โดยที่ไม่รู้ว่าจะมาถึงเมื่อไหร่ นั้นเป็นสิ่งที่แทบจะเป็นไปไม่ได้เลย ฉะนั้นเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจึงเป็นเทคโนโลยีที่มีความปลอดภัยมาก ยกต่อการดักฟังและตรวจจับ การสื่อสารที่ต้องการจุดเด่นในข้อนี้คือการสื่อสารของกองทัพและแผนการปกครอง

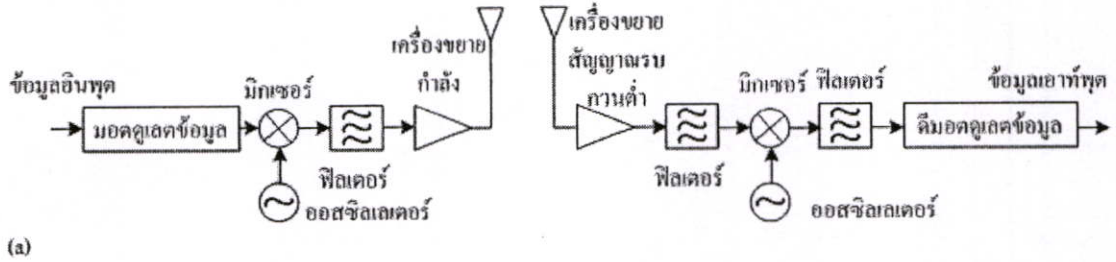
#### 2.4.4 มีความต้านทานจากการถูกรบกวนสัญญาณ (Jamming)

หากเปรียบเทียบกับแถบความถี่ของการสื่อสารแถบแคบแล้ว แถบความถี่ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่งนั้นครอบคลุมช่วงของความถี่ที่มากกว่าในระดับหลายกิกะเฮิรตซ์ การมีความถี่ที่หลากหลายของสัญญาณแถบกว้างยิ่งทำให้มีความต้านทานต่อการถูกรบกวนสัญญาณไม่ว่าจะเป็นการรบกวนโดยตั้งใจหรือไม่ได้ตั้งใจ เพราะที่ไม่มีผู้ที่ทำการรบกวนสัญญาณคนไหนที่สามารถรบกวนสัญญาณในทุกความถี่ของแถบความถี่กว้างยิ่งได้ในครั้งเดียว ฉะนั้นถ้าความถี่บางความถี่ถูกรบกวน แถบกว้างยิ่งก็ยังมีเหลือช่วงความถี่อีกมากมายที่ยังไม่ถูกใช้

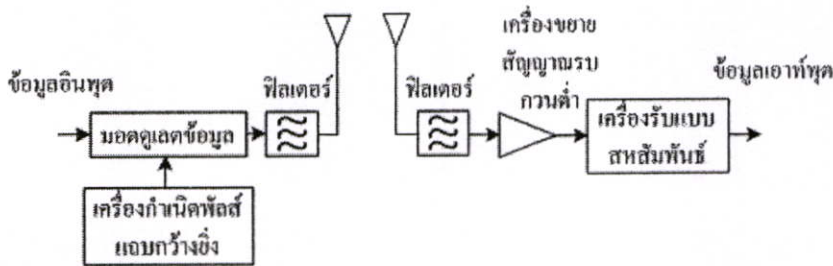
#### 2.4.5 มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ต้องการคิโนพาร์ นั้นหมายความว่าไม่ต้องมีการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเหมือนกับในเทคโนโลยีแถบแคบและเทคโนโลยีแถบกว้าง การสื่อสารที่

ปราศจากคลื่นพายุที่มีความต้องการส่วนประกอบต่างๆ น้อยกว่าการสื่อสารที่มีการมอดูเลตเข้ากับสัญญาณพาห์ ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้โครงสร้างของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าและมีราคาในการสร้างถูกกว่าเทคโนโลยีแถบแคบ รูปที่ 2.3 เป็นการเปรียบเทียบบล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบแคบ กับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง



(a)



(b)

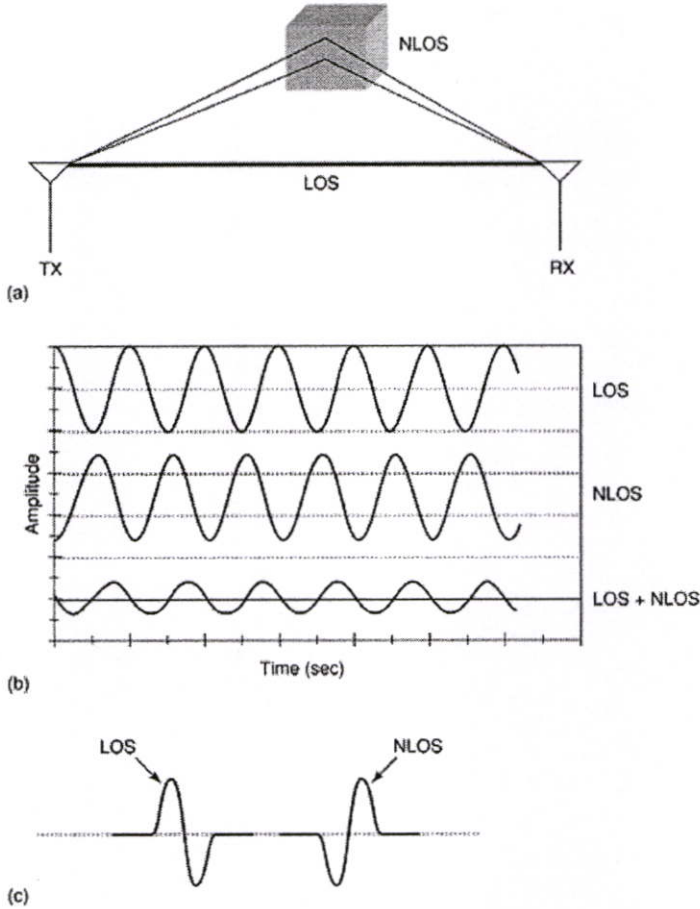
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของระบบแถบกว้างยิ่งกับระบบแถบแคบ

a) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบแคบ

b) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

#### 2.4.6 มีความต้านทานต่อช่องสัญญาณหลายวิถี

เป็นที่รู้กันว่าการเกิดช่องสัญญาณหลายวิถีเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการสื่อสารไร้สาย ซึ่งเป็นผลมาจากการสะท้อนของสัญญาณการสื่อสารจากหลายๆ ทิศทางที่วัสดุต่างๆ เช่น อาคาร ใต้สะพาน หรืออุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น เส้นทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับโดยตรงเรียกว่า เส้นระดับสายตา (Line of sight; LOS) ส่วนสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนจากพื้นผิววัสดุต่างๆ จะไม่เป็นเส้นระดับสายตา (Non line of sight; NLOS) โดยรูปที่ 2.4 แสดงช่องการเกิดคลื่นหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง



**รูปที่ 2.4** ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง

- (a) การเกิดช่องสัญญาณหลายวิถีในการสื่อสารไร้สาย
- (b) ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบ
- (c) ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบกว้างยิ่ง

จากรูปที่ 2.4 ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีสำหรับสัญญาณแถบแคบจะเกิดขึ้นค่อนข้างมากกว่าสัญญาณแถบกว้างยิ่ง เนื่องจากการรวมกันแบบต่างเฟส (Out of phase) ของสัญญาณที่มาจกในระดับสายตาและไม่ใช่ในระดับสายตา ทำให้ระดับของแอมพลิจูดลดลงมาก แต่ในเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งการส่งพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากๆ ทำให้เทคโนโลยีนี้ได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณหลายวิถีน้อยกว่า เนื่องจากช่วงเวลาการส่งผ่านของพัลส์ของแถบกว้างยิ่งช่วงเวลาสั้นกว่านาโนวินาที ทำให้พัลส์ที่เกิดจากการสะท้อนมีโอกาสน้อยมากที่จะไปถึงพร้อมกับพัลส์ที่มากจากระดับสายตา

ตารางที่ 2.1 จุดเด่นและประโยชน์ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง [11]

จุดเด่น	ประโยชน์
ช่องสัญญาณมีความจุมาก	ช่องสัญญาณที่มีความจุมากสามารถรองรับการ แสดงไฟล์วิดีโอที่มีความละเอียดสูง
ใช้กำลังส่งต่ำ	ไม่ไปรบกวนกับระบบอื่นๆ
มีโอกาที่จะถูกดักฟังหรือตรวจจับได้ยาก	เพิ่มความปลอดภัย เหมาะกับการใช้ในกองทัพ และงานด้านความมั่นคง
มีความต้านทานจากการถูกรบกวนสัญญาณ	มีความน่าเชื่อถือได้เมื่อนำไปใช้ในสภาวะ แวดล้อมที่มีกลุ่มที่ไม่หวังดี
มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน	ทำให้มีขนาดเล็ก สร้างได้ง่าย และมีราคาถูก
มีความต้านทานต่อช่องสัญญาณหลายวิธี	ให้สัญญาณที่มีกำลังสูงกว่า ในสภาวะแวดล้อมที่มี ผลการสะท้อนมาก

## 2.5 กฎข้อบังคับของระบบสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

### 2.5.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา

ในวันที่ 14 กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 [12] คณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา ได้ออกกฎสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงาน ฉบับที่หนึ่งสำหรับระบบแถบกว้างยิ่งและยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้า อีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของคำประกาศและระเบียบการฉบับที่หนึ่งได้เผยแพร่ต่อสาธารณชนในวันที่ 22 เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งในเอกสารได้กล่าวถึงการอนุญาตใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่งทั้ง 3 ประเภทคือ ระบบตรวจจับภาพ ระบบเรดาร์ในยานพาหนะ ระบบการวัดและการสื่อสาร โดยการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายพลังงานสำหรับการใช้งานในประเภทระบบการสื่อสาร นั้นจะถูกกำหนดค่าสัดส่วนของแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth) ไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 0.2 หรือแบนด์วิดท์รวมทั้งหมด ต้องไม่ต่ำกว่า 500 MHz ดังนิยามตามสมการที่ 2.2 [13] และ 2.3 และกำหนดช่วงความถี่ใช้งานไว้ที่ 3.1 GHz - 10.6 GHz โดยข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานของระบบแถบกว้างยิ่งที่กำหนดโดยคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1 สำหรับใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร

$$\text{Fractional bandwidth} \geq 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L}, \text{ or} \quad (2.2)$$

$$\text{UWB bandwidth} \geq f_H - f_L \quad (2.3)$$

โดยที่  $f_L$  คือ ความถี่ต่ำสุด  
 $f_H$  คือ ความถี่สูงสุด

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร [10]

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

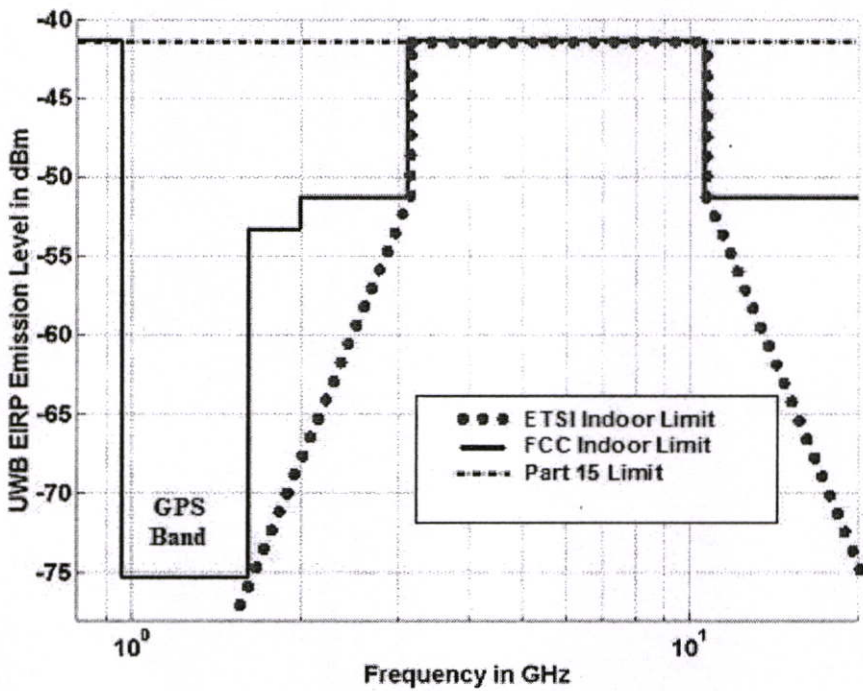
### 2.5.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป

ปัจจุบันโครงสร้างของข้อกำหนดระบบแถบกว้างยิ่งในทวีปยุโรปอยู่ในช่วงรอข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวกับผลกระทบของระบบแถบกว้างยิ่งบนระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่โดยทางยุโรปนั้น บางส่วนของข้อกำหนดจะรัดกุมกว่าของทางสหรัฐอเมริกา เพราะทางด้านยุโรปนั้นในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ต้องแสดงให้เห็นว่าส่งผลกระทบน้อยหรือไม่ส่งผลเสียหายต่อระบบเดิมที่มีอยู่โดยข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดยสหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International telecommunication union; ITU) หรือ สถาบันมาตรฐานโทรคมนาคมแห่งยุโรป (European Telecommunications Standards Institute; ETSI) แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2

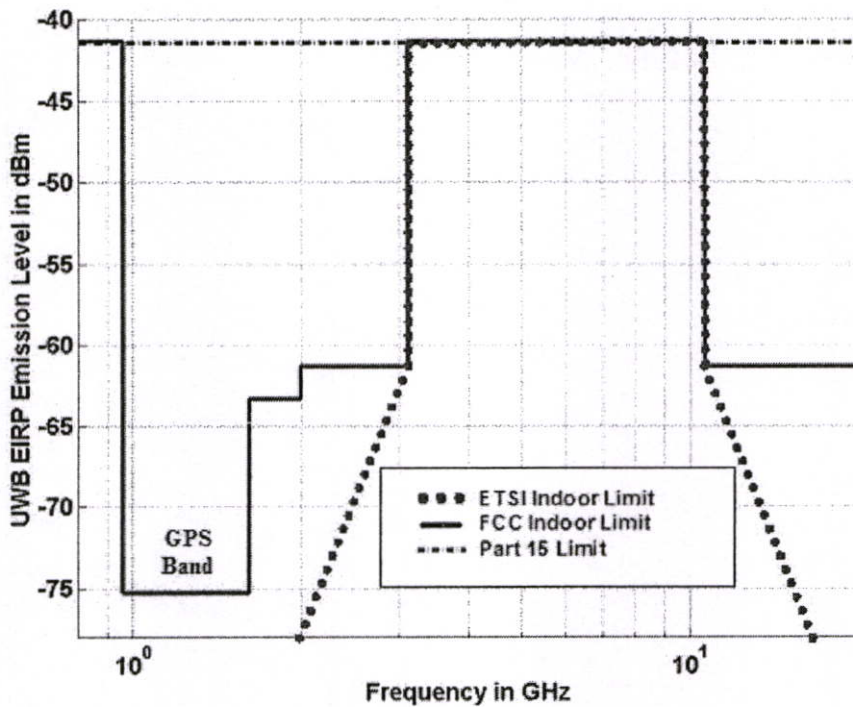
โดยในรูปที่ 2.5 และ 2.6 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานในสเปกตรัมความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่างคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาและสถาบันมาตรฐานโทรคมนาคมแห่งยุโรป ภายในและภายนอกอาคารตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานโดยสถาบันมาตรฐานโทรคมนาคมแห่งยุโรป  
สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร [10]

	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 2.5 ข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานในสเปกตรัมความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่าง  
คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาและสถาบันมาตรฐานโทรคมนาคมแห่ง  
ยุโรป ภายในอาคาร [10]



รูปที่ 2.6 ข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานในสเปกตรัมความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่างคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาและสถาบันมาตรฐานโทรคมนาคมแห่งยุโรป ภายนอกอาคาร [10]

## 2.6 การนำไปใช้งานของระบบแถบกว้างยิ่ง

จากข้อดีของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ทำให้เทคโนโลยีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย โดยจะแบ่งประเภทการใช้งานเป็น 3 ประเภท คือ

1. การติดต่อสื่อสารและเซนเซอร์
2. การหาตำแหน่งและการติดตาม
3. เรดาร์

ในตอนแรกนั้นกลุ่มที่นำระบบแถบกว้างยิ่งไปใช้งานจะเป็นกลุ่มทางการทหารและแผนการรักษาความปลอดภัย แต่ต่อมาได้ระบบแถบกว้างยิ่งได้รับความสนใจมากขึ้น จึงทำให้มีแนวโน้มที่จะนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ด้วย

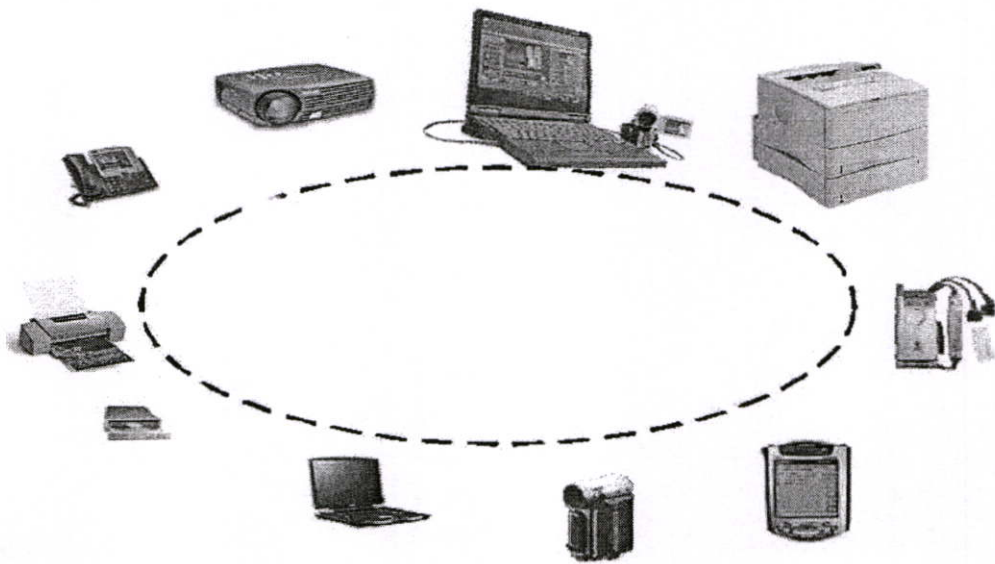
### 2.6.1 การติดต่อสื่อสารและเซนเซอร์ [10]

ในอนาคตนั้นมีความโน้มแน่ว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เครื่องใช้ภายในบ้านชนิดต่างๆ นั้น ต้องการติดต่อสื่อสารข้อมูลกันระหว่างตัวอุปกรณ์มากขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานภายในบ้านที่ต้องการการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันเพื่อใช้งานกันแบบโครงข่ายแล้ว สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ไป เช่น โทรทัศน์ วิทยุ วีดีโอเกมส์ กล้องดิจิตอล เครื่องขยายเสียง ลำโพง และเครื่องเล่นดีวีดี

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดพกพา เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ พีดีเอ และเครื่องเล่นเอ็มพีสาม

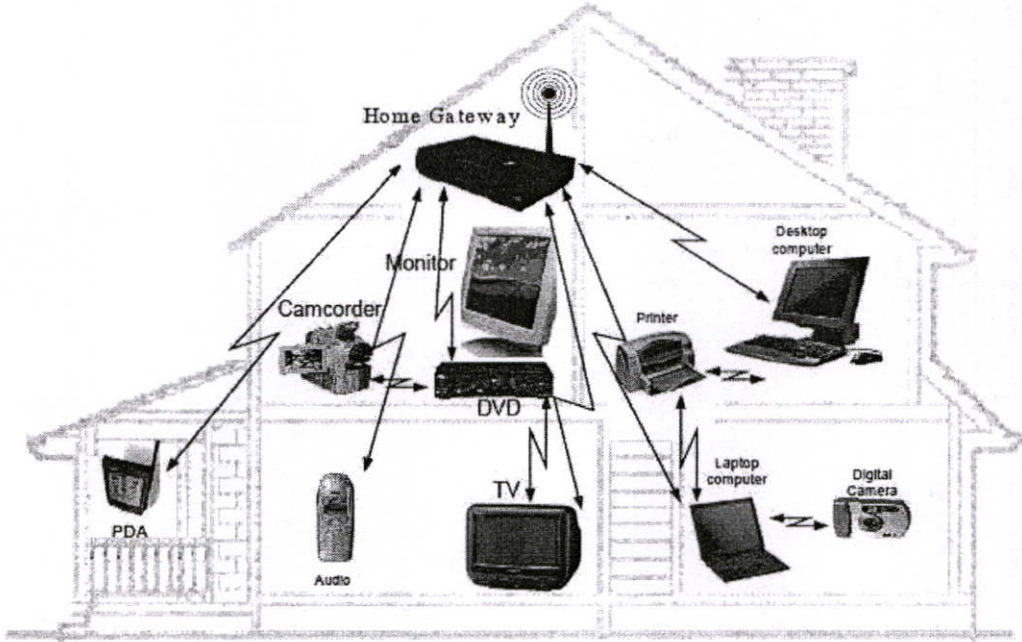
อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เช่น เครื่องพิมพ์ เครื่องฉายภาพ อุปกรณ์เก็บข้อมูล คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ และคอมพิวเตอร์แบบพกพา



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่สามารถประยุกต์ใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่ง

ด้วยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีแบนด์วิดท์ที่กว้าง จึงทำให้มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงในระดับหลายร้อยเมกะบิตต่อวินาที ซึ่งทำให้องค์กรกับระบบมัลติมีเดียที่ต้องการความเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงอยู่แล้ว ซึ่งแนวคิดในการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไปใช้ในด้าน การติดต่อสื่อสารหรือการรับส่งข้อมูลก็คือระบบโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล โดยจะเป็นการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ภายในบ้าน หรืออาคารสำนักงาน ซึ่งต่อไปในอนาคตเราสามารถดูภาพวีดีโอที่อัปเดตจากกล้องวีดีโอพกพาผ่านทางหน้าจอโทรศัพท์มือถือทันทีโดยไม่ต้องทำการต่อสายสัญญาณให้

ยุ่งยาก หรือสามารถส่งพิมพ์ภาพจากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่คนละห้องกันกับเครื่องพิมพ์ได้โดยไม่ต้องเดินสายเป็นต้น ซึ่งรูปที่ 2.8 แสดงการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไปใช้งานในลักษณะโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล



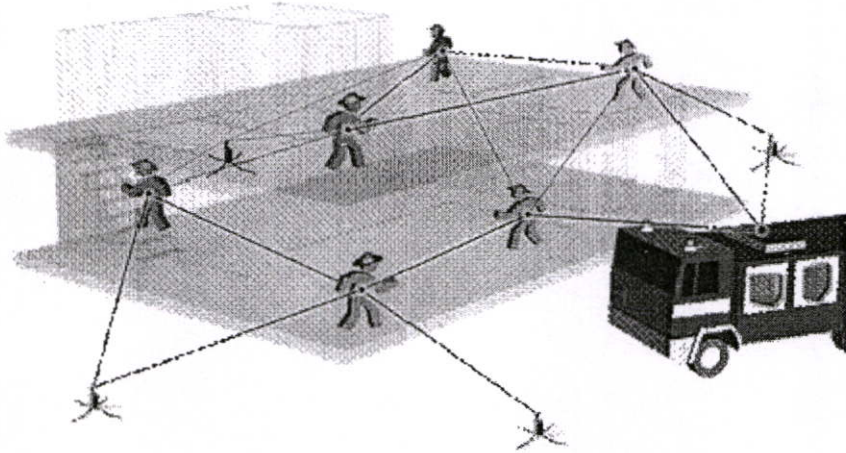
รูปที่ 2.8 การนำไปใช้งานในลักษณะโครงข่ายภายในบ้าน

นอกจากจะนำระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ภายในบ้านแล้วนั้นยังสามารถนำไปประยุกต์กับระบบเซนเซอร์ต่างๆ ที่เห็นกันทั่วไปก็จะเป็นการใช้งานในระบบรักษาความปลอดภัยตามสถานที่ต่างๆ หรือเป็นการตรวจจับสิ่งผิดปกติต่างๆ ในที่นี้จะยกตัวอย่างการใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่นำไปใช้งานในทางการแพทย์ โดยเช่นการตรวจวัดอุณหภูมิ การวัดอัตราการเต้นของหัวใจ หรืออื่นๆ ที่เป็นสัญญาณอันตรายต่อผู้ป่วย ซึ่งก่อนหน้านี้การตรวจวัดค่าต่างๆ ตัวเซ็นเซอร์นั้นจะมีสายไฟหรือสายเคเบิลไปติดที่ตัวผู้ป่วยทำให้ไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายหรือการตรวจของแพทย์และเนื่องจากข้อดีของแถบกว้างยิ่งที่ใช้กำลังส่งที่ต่ำจึงทำให้ไม่ไปรบกวนอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ

### 2.6.2 การหาตำแหน่งและระบุตำแหน่ง

ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่เราสามารถใช้ค้นหาตำแหน่งหรือพิกัดต่างๆ บนโลกได้ โดยใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global positioning system; GPS) แต่ในการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมาใช้งาน ซึ่งใช้ภายในอาคารเป็นหลักมีความเหมาะสมมากสำหรับปัญหาในระบบระยะสั้น ซึ่งมันสามารถที่จะระบุตำแหน่งได้แม่นยำในระดับเซนติเมตร อาจนำไปใช้ค้นหาคน หรือ

สิ่งของต่างๆ ได้ เช่น การหาลูกกัญญาแฉดยชนด้ที่กายอยู่ในห้องหรือในบ้าน การตรวจสอบสินค้ำในคลังสินค้ำ หรือการระบุตำแหน่งของนักผจญเพลิงที่เข้าไปค้นหาผู้ประสบภณัภัยที่ติดอยู่ในอาคารที่ถูคไฟไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในงานค้นหาตำแหน่ง

### 2.6.3 เรดาร์

ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั้นเป็นเทคโนโลยีที่มีราคาต้นทุนต่ำซึ่งเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้กับเรดาร์ ซึ่งอุปกรณ์เรดาร์ในอนาคตนั้นยังมีแนวโน้มที่จะเจริญเติบโตทางด้านยอดขายอีกมาก อุปกรณ์เรดาร์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัตถุ ตรวจสอบสภาพการณ์ข้างหน้าเพื่อหลีกเลี่ยงการชน การตรวจวัดความเร็วของรถยนต์บนท้องถนน ใช้เป็นระบบเตือนภัยเพื่อรักษาความปลอดภัยภายในสถานที่ส่วนบุคคลเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนไหวของวัตถุในพื้นที่ที่เราต้องการความปลอดภัยสูง พื้นที่ที่มีทรัพย์สินที่มีมูลค่าสูงหรือพื้นที่ที่ต้องการความเข้มงวดในการตรวจสอบสูง และอาจนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบเพื่อหาวัตถุต้องสงสัยได้เนื่องจากสัญญาณทะลุผ่านวัสดุที่ใช้ทำสิ่งปลูกสร้างต่างๆ เช่น ไม้ อิฐ อิฐบล็อก ไฟเบอร์ คอนกรีต เป็นต้น ดังนั้นเรดาร์จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นและใช้เพื่อกิจการทางทหารแต่ในอนาคตอันใกล้นี้ก็ได้นำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ และการช่วยชีวิตเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

## 2.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันรวมถึงข้อกำหนดต่างๆของเทคโนโลยีนี้ซึ่งออกโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา ซึ่งว่าด้วยเรื่องของช่วงความถี่ที่ใช้ กำลังงานในการส่งทั้งในสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคาร นอกจากนั้นยังได้กล่าวถึงจุดเด่นและประโยชน์ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจากการที่เทคโนโลยีนี้มีจุดเด่นในเรื่องความเร็วในการส่งที่สูง แบนด์วิดท์กว้าง ใช้กำลังงานในการส่งที่ต่ำทำให้มีการใช้งานได้หลากหลายโดยไม่ไปรบกวนหรือถูกรบกวนจากระบบอื่นๆ ซึ่งการนำไปใช้งานหลักๆ จะแบ่งเป็น 3 ประเภทการใช้งานคือ การติดต่อสื่อสารและเซนเซอร์ การหาตำแหน่งและการติดตาม และสุดท้ายคือระบบเรดาร์

## บทที่ 3

# ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์สัญญาณแถบกว้างยิ่ง

### 3.1 กล่าวนำ

สภาวะแวดล้อมในการแพร่กระจายคลื่นนั้นการส่งผ่านสัญญาณจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับจะเกี่ยวข้องไปถึงลักษณะของช่องสัญญาณ โดยในการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งสภาวะแวดล้อมภายในอาคารไปยังภายนอกอาคารเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญ ถ้าช่องสัญญาณมีคุณลักษณะที่ดีแล้วผลของการรบกวนและการแทรกสอดของแหล่งกำเนิดสัญญาณอื่นๆ จะสามารถที่จะทำให้ลดลงได้โดยการออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับที่เหมาะสม โดยลักษณะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของการจำลองช่องสัญญาณวิทยุคือการตรวจสอบถึงฟังก์ชันการกระจายตัวของพารามิเตอร์ช่องสัญญาณ โดยทั่วไปการกระจายตัวเหล่านี้มักจะได้มาจากผลการวัดหรือผลการจำลองบนพื้นฐานของความถูกต้องหรือมีลักษณะตามสภาวะแวดล้อมที่ชัดเจน

ในการจำลองช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งนั้นมีหลักเกณฑ์จำนวนมากที่ถูกนำมาพิจารณาเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะของช่องสัญญาณ ซึ่งในบทนี้ได้อธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการจำลองช่องสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งและค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งอีกด้วย

### 3.2 ระบบการวัดช่องสัญญาณ

การทดสอบช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งนั้นเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบนั้นสามารถทำการทดสอบได้ 2 โดเมน คือ แบบแรกใช้เทคนิคการกวาดด้านความถี่ (Frequency sweeping technique) ซึ่งสามารถทำการทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่ (Frequency domain; FD) ซึ่งการใช้วิธีนี้ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณนั้นสามารถทดสอบได้จากการทดสอบพารามิเตอร์  $S_{21}$  หรือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) ซึ่งจะใช้เครื่องวิเคราะห์วังจรข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการกวาดความถี่และในแบบที่สองเป็นการทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนเวลา (Time domain; TD) โดยใช้เครื่องทดสอบช่องสัญญาณซึ่งอยู่บนพื้นฐานในการส่งสัญญาณแบบอิมพัลส์หรือสัญญาณแบบ (Direct sequence spread spectrum; DSSS) ซึ่งประสิทธิภาพของสัญญาณแบบ DSSS ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันสหสัมพันธ์ตัวเอง (Auto-correlation function; ACF) ด้วยวิธีการนี้พัลส์แคบๆ จะถูกส่งออกไปยังช่องสัญญาณและผลตอบสนองอิมพัลส์ช่องสัญญาณจะถูกทดสอบโดยใช้เครื่อง (Digital sampling oscilloscope; DSO) [6] ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้อุปกรณ์ทาง

อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถผลิตสัญญาณพัลส์ที่มีขนาดแคบมากๆ ที่ช่วงเวลาของพัลส์เป็นนาโนวินาที จึงเป็นไปได้ยากที่จะสามารถทดสอบช่องสัญญาณด้วยวิธีนี้

### 3.2.1 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่

อุปกรณ์หลักในการสร้างและรับสัญญาณเพื่อทำการทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่ นั้นคือเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จัดการเกี่ยวกับการทดสอบทั้งหมด โดยสัญญาณที่ใช้ตรวจสอบนั้นจะเป็นกลุ่มของสัญญาณแถบแคบรูปคลื่นไซน์ (Sinusoid) ซึ่งทำการกวาดตลอดแถบความถี่ที่ต้องการพิจารณาประกอบกับการใช้สายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้าง โดยในการจำลองช่องสัญญาณแถบกว้างขีงนั้นสามารถที่จะทำได้ในส่วนของ การประมวลผลข้อมูลและเมื่อใช้วิธีการทดสอบสัญญาณในโดเมนความถี่ช่วงเวลาของช่องสัญญาณ ที่ทำการทดสอบต้องถูกกำหนดให้คงที่เพื่อรักษาเงื่อนไขของช่องสัญญาณในช่วงการกวาดความถี่ โดยที่ค่าสูงสุดของเวลาการกวาดความถี่ถูกจำกัดโดยเวลาร่วมนัย (Coherence time) ของช่องสัญญาณ ถ้าเวลาการกวาดนานกว่าเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณแล้วช่องสัญญาณอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาในการกวาดความถี่สำหรับการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนั้นจำเป็นต้องใช้เทคนิควิธีการอื่นเข้ามาทำการตรวจสอบแทน ซึ่งประสิทธิภาพของการทดสอบในโดเมนความถี่นั้นจะถูกกำหนดโดยค่าสูงสุดของเวลาประวิงของช่องสัญญาณ ซึ่งขอบเขตด้านบนของเวลาประวิงที่ตรวจพบ  $\tau_{\max}$  สามารถกำหนดโดยจำนวนจุดของความถี่ที่ใช้ในการกวาดแต่ละครั้งและแบนด์วิดท์  $B$  ซึ่งนิยามตามสมการที่ 3.1 [6]

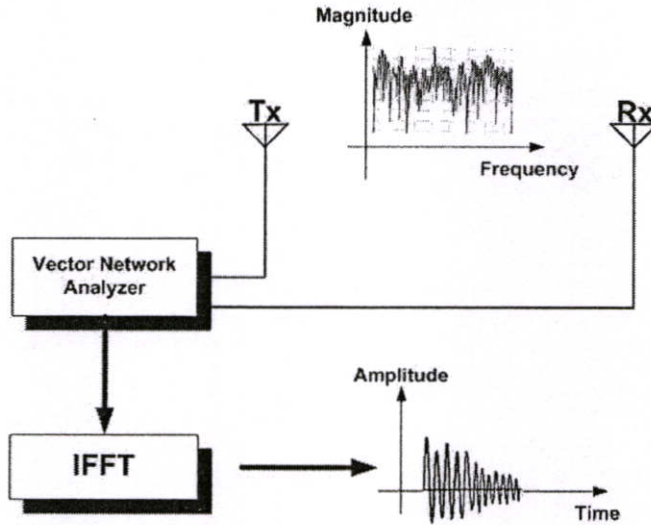
$$\tau_{\max} = (N_{\text{smp}} - 1) / B \quad (3.1)$$

โดยที่

$N_{\text{smp}}$  คือ จำนวนจุดความถี่

$B$  คือ แบนด์วิดท์

ในการที่จะทำการทดสอบสัญญาณ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์นั้นผลที่ได้จากการทดสอบคือ ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการทดสอบจากนั้นจะใช้ฟูรีเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse fast Fourier transform; IFFT) การแปลงข้อมูลจากการทดสอบในโดเมนความถี่ให้อยู่ในรูปแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ของโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบการวัดช่องสัญญาณใน โดเมนความถี่โดยเครื่องวิเคราะห์ที่รองรับแบบเวกเตอร์และการแปลงสู่โดเมนเวลา โดยใช้ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว [18]

### 3.2.2 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนเวลา

ข้อเสียของการทดสอบช่องสัญญาณใน โดเมนความถี่นั้นคือไม่สามารถที่จะทำการทดสอบช่องสัญญาณในลักษณะที่ไม่คงที่ได้ (Non-stationary) จึงมีอีกวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เรียกว่าการทดสอบในโดเมนเวลาที่สามารถใช้ประโยชน์สำหรับระบบแถบกว้างยิ่งได้ การทดสอบช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลานั้นจะเป็นลักษณะการส่งสัญญาณในทิศทางเดียวโดยใช้พัลส์ที่มีขนาดแคบมากๆ ซึ่งเครื่องรับนั้นจะใช้ออสซิลโลสโคปที่มีการสุ่มแบบดิจิทัล (DSO) โดยแบนด์วิดท์ของการทดสอบนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและความกว้างของพัลส์ที่ใช้ ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์นี้ยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมด้วย อย่างไรก็ตามการที่จะทราบถึงผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณนั้นจำเป็นต้องทำการแยกรูปสัญญาณพัลส์ที่ใช้ส่งออกจากผลการทดสอบโดยผลการจำลองช่องสัญญาณที่ถูกต้องนั้นสามารถทำได้ถ้ารูปสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการตรวจสอบมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปสัญญาณที่ถูกนำมาใช้งานจริง

### 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการสื่อสารไร้สายนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณไม่ว่าจะเป็นระดับของกำลังงาน เวลาประวิงที่เกิดขึ้นหรือความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณที่รับได้เมื่อทำการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ โดยผลที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะต้องทำการตรวจสอบเบื้องต้นด้วยวิธีการวัดจากนั้นผลที่ได้จากการวัดหรือที่เรียกว่าข้อมูลดิบ นั้นจำเป็นต้องนำมาวิเคราะห์ตามขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบหรือการเปลี่ยนแปลงดังที่ได้กล่าวไป

แล้วโดยในขั้นตอนนี้มีความสำคัญพอ ๆ กับขั้นตอนการวัดซึ่งมีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยในหัวข้อนี้ขอก้าวถึงเฉพาะพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ ดังนี้

### 3.3.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านช่องสัญญาณ

ในขั้นตอนของการทดสอบนั้นจะเป็นลักษณะการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient;  $S_{21}$ ) สัญญาณจากพอร์ตที่หนึ่งไปยังพอร์ตที่สองของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากหลักการของพารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (Scattering parameter) หรือเรียกว่า S-parameter ซึ่งมีนิยามตามเมตริกซ์การกระจัดกระจาย (Scattering matrix) ของโครงข่ายแบบ 2 พอร์ตดังสมการที่ 3.2 และแสดงในรูปที่ 3.2 [7]

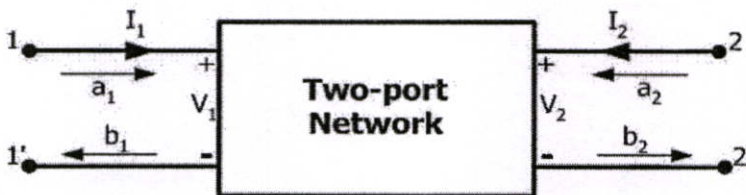
$$\bar{b} = \bar{S}\bar{a} \quad (3.2)$$

โดยที่

$\bar{a}$  คือ เวกเตอร์การส่งผ่าน

$\bar{b}$  คือ เวกเตอร์การสะท้อน

$\bar{S}$  คือ เวกเตอร์การกระจาย



รูปที่ 3.2 ไคอะแกรมโครงข่ายแบบ 2 พอร์ต [7]

ซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ดังสมการที่ 3.3 และสมการที่ 3.4

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

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

โดยที่

- $a_1$  คือ สัญญาณที่ส่งผ่านเข้าไปยังพอร์ตหนึ่ง  
 $b_1$  คือ สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังพอร์ตหนึ่ง  
 $a_2$  คือ สัญญาณที่ส่งผ่านเข้าไปยังพอร์ตสอง  
 $b_2$  คือ สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังพอร์ตสอง

ซึ่งสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนี้สามารถหาได้จาก

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

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

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

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

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

จากสมการที่ 3.2, 3.3, 3.4 และ 3.6 สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปสมการกระจัดกระจาย ดังสมการที่ 3.7 และ 3.8

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

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

โดยที่

$S_{11}$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตหนึ่ง

$S_{22}$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตสอง

$S_{21}$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Forward)

$S_{12}$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านผกผัน (Reverse)

พารามิเตอร์ของการกระจายของโครงข่ายแบบสองพอร์ตนั้นยังสามารถที่จะกำหนดในเทอมของคลื่นส่งผ่านและคลื่นสะท้อนได้ดังนี้

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

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

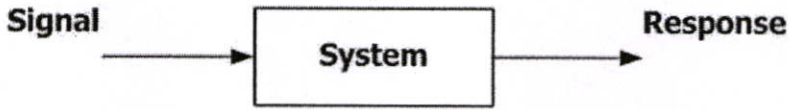
$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.9c)$$

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

### 3.3.2 ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ

เมื่อพิจารณาการวัดช่องสัญญาณ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ นั้นสิ่งที่จะต้องทำความเข้าใจเป็นอันดับแรกคือ ระบบและสัญญาณ โดยระบบคือกลุ่มของวัตถุที่รวมกัน ซึ่งสามารถทำงานร่วมกันเพื่อให้สำเร็จตามจุดมุ่งหมายที่ต้องการและสัญญาณคือปริมาณทางกายภาพบางอย่างที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบเรียกว่า สัญญาณเข้าหรือสัญญาณอินพุต (Input signal) ของระบบ และจะมีปริมาณทางกายภาพบางอย่างออกมาจากระบบซึ่งเรียกว่า สัญญาณออกหรือสัญญาณเอาต์พุต (Output signal) หรือผลตอบสนอง (Response) ของระบบ โดยสามารถแสดงบล็อกละเอียดของระบบดังรูปที่ 3.3 ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวนั้นจะเป็นสิ่งที่ใช้แสดงถึงคุณสมบัติของระบบ และจากการวัดผลที่ได้ก็คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณซึ่งแปรผันตรงกับฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency transfer function;  $H(\omega)$ ) ของช่องสัญญาณโดยฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวนี้จะแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการพิจารณาอยู่ ซึ่งประกอบด้วยขนาดสัญญาณที่ส่งผ่าน (Magnitude) และผลตอบสนองทางเฟส (Phase response)

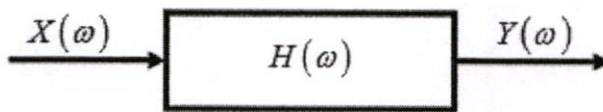
ของสัญญาณ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัญญาณกับฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณนั้นกำหนดตามสมการที่ 3.10 [10] และแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบ [16]

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

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



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่ [16]

### 3.3.3 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ

การแสดงความสัมพันธ์ของช่องสัญญาณนั้นสามารถทำได้หลายวิธีโดยหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ก็คือ การแสดงด้วยค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse response) ของระบบโดยเริ่มต้นนั้นจะขอกล่าวถึงคำนิยามของฟังก์ชันอิมพัลส์ (Impulse function) ก่อนดังนี้

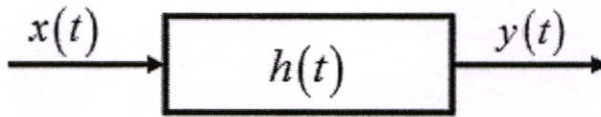
ฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่เหมือนกับฟังก์ชันทั่วไปโดยฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยมักนิยามแทนด้วยสัญลักษณ์  $\delta(t)$  และมีคุณสมบัติดังนี้คือ

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

โดยในที่นี้  $f(t)$  จะต้องเป็นฟังก์ชันที่มีค่าต่อเนื่อง (Continuous) ที่ค่าเวลา  $t = t_0$  จากสมการ 3.11 เมื่อกำหนดให้  $f(t) = 1$  จะได้

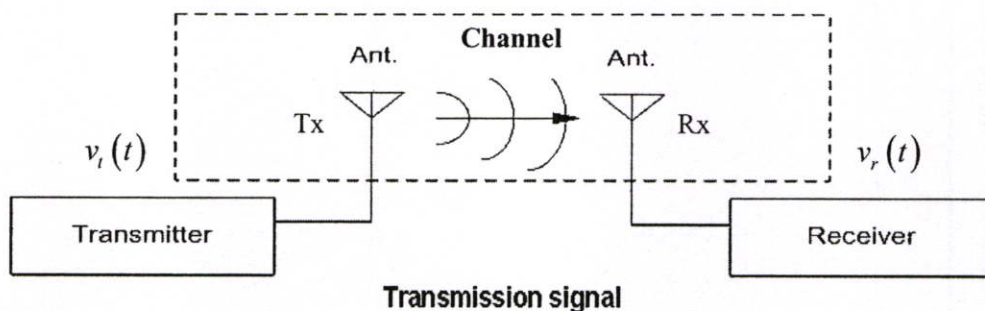
$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0) dt = 1 \quad (3.12)$$

จะกล่าวได้ว่าพื้นที่ใต้เส้นโค้งของ  $\delta(t-t_0)$  มีค่า 1 หน่วย โดยค่าที่ได้จากการทำปริพันธ์นี้ นิยมเรียกว่า น้ำหนัก (Weight) ของฟังก์ชันอิมพัลส์นั้น ดังนั้นจะพบว่า น้ำหนักของฟังก์ชัน  $A\delta(t)$  มีค่าเท่ากับ  $A$  หน่วย ฟังก์ชันอิมพัลส์ที่มีน้ำหนัก 1 หน่วยนั้นเรียกว่า ฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วย (unit impulse function) แม้ว่าฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่สามารถสร้างได้จริงในทางปฏิบัติ แต่ในทางทฤษฎีจะมีบทบาทในการวิเคราะห์สัญญาณและระบบ โดยเฉพาะการบอกคุณสมบัติของระบบ อีกทั้งสัญญาณอินพุตที่เป็นฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยนั้นยังถูกนิยามเรียกว่า ผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบใช้สัญลักษณ์  $h(t)$  แทนผลตอบสนองดังกล่าวซึ่งผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบสามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบเพราะสามารถบอกคุณสมบัติของระบบนั้นได้และโดยเฉพาะเมื่อระบบภายใต้การพิจารณาเป็นระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Linear time invariance system) ค่าเอาต์พุต  $y(t)$  ของระบบที่เกิดจากสัญญาณอินพุต  $x(t)$  ใดๆ นั้นจะสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้รูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนเวลา

### 3.3.4 หลักการส่งผ่านของฟรีส



รูปที่ 3.6 ช่องสัญญาณการส่งผ่านแบบไร้สาย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาถึงการแพร่กระจายของสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งโดยในระบบแถบแคบโดยปกตินั้นจะถูกกำหนดโดยใช้หลักการส่งผ่านของฟรีส แต่ที่ไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับการส่งสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่ง โดยในสูตรนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของความถี่ แต่อย่างไรก็ตามรูปร่างของสัญญาณอาจผิดเพี้ยนไปเนื่องจากคุณสมบัติในการตอบสนองความถี่ของสายอากาศจึงได้มีการปรับปรุงสมการของฟรีส เพื่อวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณโดยสมการของฟรีสสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

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

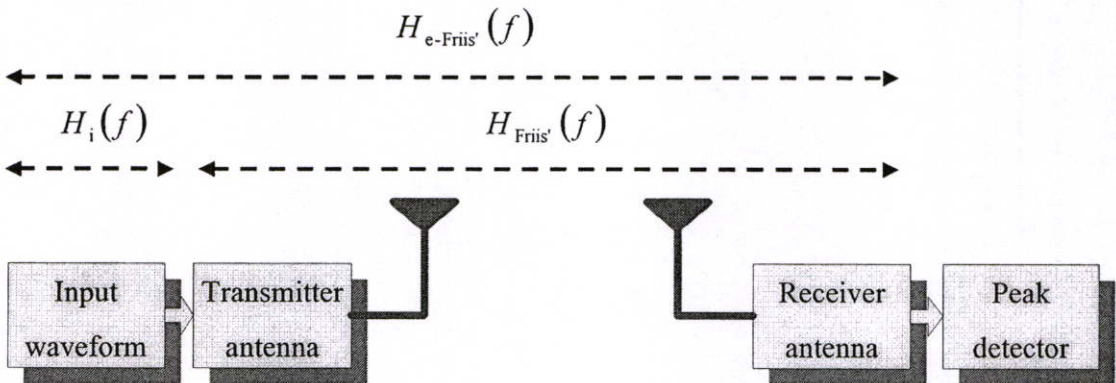
โดยที่

$G_{\text{Friis}}(f)$	คือ อัตราการขยายของฟรีส
$P_r(f)$	คือ กำลังของสัญญาณด้านรับ
$P_t(f)$	คือ กำลังของสัญญาณด้านส่ง
$G_f(f)$	คือ อัตราการขยายของช่องสัญญาณในอวกาศว่าง
$G_r(f)$	คือ อัตราการขยายของด้านรับ
$G_t(f)$	คือ อัตราการขยายของด้านส่ง

และสามารถคำนวณหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของอวกาศว่างได้จากสมการที่ 3.14

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

โดยที่  $G_f(f)$  คือ อัตราขยายของช่องสัญญาณในอวกาศว่าง (Free Space) หรือเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันการถ่ายโอนดังสมการ 3.15



รูปที่ 3.7 การประยุกต์ใช้สมการของฟรีส

$$H_{\text{Friis}}(f, d) = \frac{V_r(f)}{V_t(f, d)} = H_f(f, d) H_r(f) H_t(f) \quad (3.15)$$

โดยที่

- $H_f$  คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านความถี่ในอวกาศว่าง
- $H_r$  คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศทางด้านรับ
- $H_t$  คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศทางด้านส่ง
- $V_r$  คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณทางด้านรับ
- $V_t$  คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณทางด้านส่ง
- $f$  คือ ความถี่
- $d$  คือ ระยะห่างระหว่างด้านส่งและด้านรับ

สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนในอวกาศว่าง สามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_f(f, d) = \frac{c}{4\pi df} e^{-j2\pi df/c} \quad (3.16)$$

แต่สูตรการส่งผ่านของฟรีสดังสมการที่ 3.15 เมื่อนำมาใช้ร่วมกับระบบสื่อสารที่เป็นแบบแถบกว้าง เช่น ระบบแบบแถบกว้างยิ่ง สมการของฟรีสไม่สามารถใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างด้านส่งกับด้านรับได้ทำให้ไม่สามารถพิจารณาการผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ เพราะว่าจากสมการที่ 3.15 นั้น ไม่มีสัญญาณด้านอินพุตมาเกี่ยวข้องจึงต้องมีการปรับแต่งประยุกต์ให้เหมาะสมกับความต้องการเสียใหม่ โดยสมการที่ปรับแต่งแล้วมีรูปแบบเป็นตามสมการที่ 3.17 [13] ซึ่งเรียกว่า การขยายตัวของหลักการการส่งผ่านของฟรีส (Extension Friis' transmission formula) ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการถ่ายโอน

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

รูปแบบสัญญาณทางด้านรับ  $v_r(t, d)$  หาได้จากสมการ

$$v_r(t, d) = v_t(t) \otimes h_{Friis}(t, d) \quad (3.18)$$

โดยที่

$v_t(t)$  คือ รูปแบบสัญญาณทางด้านส่ง

$\otimes$  คือ คอนโวลูชัน

$h_{Friis}(t, d)$  คือ ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของการขยายตัวของหลักการของฟรีส  
หาได้จาก

และผลตอบสนองทางอิมพัลส์ของอวกาศว่างสามารถคำนวณได้จากการแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform; IFFT) ดังสมการที่ 3.19

$$h_{Friis}(t, d) = F^{-1}\{H_{Friis}(f, d)\} \quad (3.19)$$

### 3.3.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ในการตรวจสอบหาความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณที่รับได้นั้นสามารถวิเคราะห์และแสดงให้เห็นโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ดังแสดงนิยามตามสมการที่ 3.20 ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ข้าม (Cross correlation) ที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้กับค่าสูงสุดของค่าสัมบูรณ์รากที่สองของผลคูณระหว่างค่าอัตสหสัมพันธ์ (Auto correlation) ของสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้โดยสมการที่นิยามถึงค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นตามสมการที่ 3.21 ถึงสมการที่ 3.23 ตามลำดับ

$$C = \frac{\max |r_{ab}(\tau)|}{\sqrt{\max |r_a(\tau)| \cdot \max |r_b(\tau)|}} \quad (3.20)$$

โดยสมการที่นิยามค่าสหสัมพันธ์ข้าม คือ

$$r_{ab}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_t(\tau)v_r(t+\tau)dt \quad (3.21)$$

และสมการที่นิยามค่าอัตสหสัมพันธ์ คือ

$$r_a(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_t(\tau)v_t(t+\tau)dt \quad (3.22)$$

$$r_b(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_r(\tau)v_r(t+\tau)dt \quad (3.23)$$

โดยที่

$v_t(t)$  คือ สัญญาณส่ง

$v_r(t)$  คือ สัญญาณที่รับได้

### 3.3.6 ค่าสูญเสียเชิงวิถี

ในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นเป้าหมายหลักของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นคือ การคาดการณ์ถึงค่าสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ  $PL$  เนื่องจากการแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณโดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างระดับกำลังงานที่ใช้ส่งและระดับกำลังงานที่รับได้ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบล (Decibel) ดังแสดงในสมการที่ 3.24

$$PL_{dB} = 20 \log \left( \frac{v_t(t)}{v_r(t)} \right) \quad (3.24)$$

โดยที่

$v_t$  คือ ระดับสัญญาณที่ใช้ส่ง

$v_r$  คือ ระดับสัญญาณที่รับได้

โดยในการวิเคราะห์ค่าสูญเสียเชิงวิถีในระบบแถบกว้างยิ่ง  $PL_{UWB}$  นั้นจะพิจารณาที่กำลังงานสูงสุดของสัญญาณที่ใช้ส่งและกำลังสูงสุดของสัญญาณที่รับได้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทาง ( $d$ ) โดยมีนิยามเป็นไปตามสมการที่ 3.25 และ 3.26 ตามลำดับ

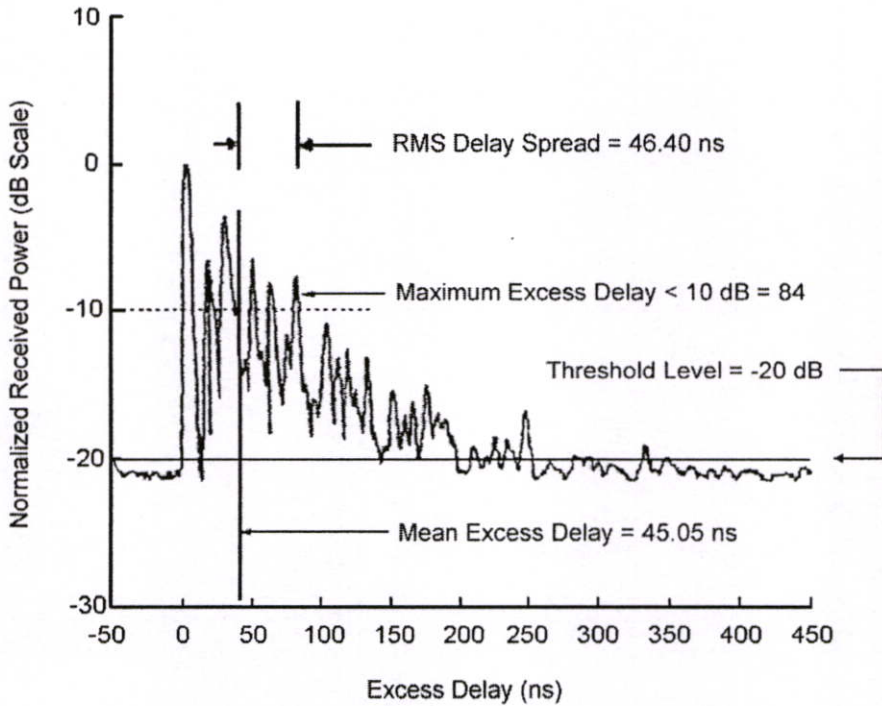
$$PL[dB] = 20 \log \left[ \frac{\max |v_t(t)|}{\max |v_r(t, d)|} \right] \quad (3.25)$$

โดยในสมการที่ 3.25 ได้กำหนดให้ขนาดของสัญญาณที่ใช้ส่งมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$PL_{UWB}(d)[dB] = -20 \log[\max |v_r(t, d)|] \quad (3.26)$$

### 3.3.7 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน

พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่นิยมนำมาวิเคราะห์เพื่อแสดงให้เห็นถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับที่เวลาต่าง ๆ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสัญญาณที่มีการสะท้อนในหลายทิศทางหรือที่เรียกว่าสัญญาณหลายวิถีโดยจะเรียกว่า ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน ซึ่งตัวอย่างได้แสดงดังรูปที่ 3.8 [18] โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อเวลาที่เข้ามาถึงและนอกจากนั้นยังสามารถนำไปพิจารณาถึงผลการกระจายทางเวลา (Time dispersion) อันประกอบไปด้วย การประวิงเข้าถึงเฉลี่ย (Mean excess delay) และค่าการแผ่ประวิง RMS (RMS delay spread) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.8 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน [17]

### 3.3.8 ค่าการกระจายทางเวลา

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับมิได้หลายทิศทาง และสัญญาณแต่ละส่วนมักจะส่งผ่านในเส้นทางที่มีระยะทางไม่เท่ากัน สัญญาณบางส่วนอาจจะเดินทางในระดับเส้นสายตาระหว่างภาคส่งและภาครับ สัญญาณส่วนนี้มักจะเดินทางถึงภาครับได้เร็ว ในขณะที่สัญญาณส่วนอื่นที่มีการตกกระทบพื้นผิวของวัตถุและเกิดการสะท้อนหลายครั้งกว่าจะเดินทางถึงภาครับ สัญญาณมักจะใช้เวลาการแพร่กระจายที่ยาวนานกว่า ความล่าช้าในการเดินทางของสัญญาณแต่ละส่วนก่อให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า การแผ่ประวิง (Delay spread) ขึ้น นั่นคือสัญญาณแต่ละส่วนใช้เวลาเดินทางถึงจุดหมายไม่เท่ากัน ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาถึงเวลาที่ถูกระเบิดออกไปของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับ ซึ่งในส่วนของกระจายทางเวลา (Time dispersion) นั้นสามารถที่จะวิเคราะห์โดยใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ประวิงเกินออกไปจากค่าเวลาเดิมหรือการประวิงเข้าถึงเฉลี่ย (Mean excess delay;  $\bar{\tau}$ ) และค่าการแผ่ประวิง RMS (RMS delay spread;  $\sigma_{\tau}$ ) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้ถูกนิยามไว้ดังสมการที่ 3.27 และสมการที่ 3.28 ตามลำดับ [17]

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2 \tau_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n P(\tau_i) \tau_i}{\sum_{i=1}^n P(\tau_i)} \quad (3.27)$$

โดยที่

- $\bar{\tau}$  คือ การประวิงเข้าถึงเฉลี่ย
- $a_i$  คือ ระดับของสัญญาณเส้นทางที่  $i$
- $\tau_i$  คือ เวลาประวิงที่เกิดขึ้นของสัญญาณเส้นทางที่  $i$
- $P(\tau_i)$  คือ ระดับกำลังงานของสัญญาณเส้นทางที่  $i$

สำหรับค่าการแผ่ประวิง RMS นั้นจะมีนิยามคือ

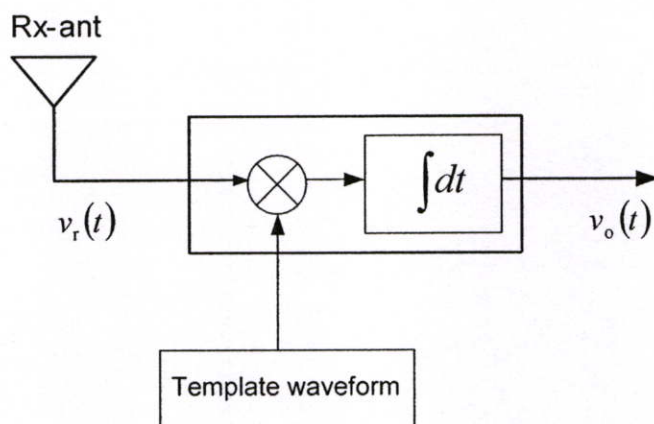
$$\sigma_\tau = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (3.28)$$

โดยที่

$$\tau^2 = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2 \tau_i^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n P(\tau_i) \tau_i^2}{\sum_{i=1}^n P(\tau_i)} \quad (3.29)$$

### 3.3.9 เครื่องรับสัญญาณในระบบแบบแถบกว้างยิ่ง

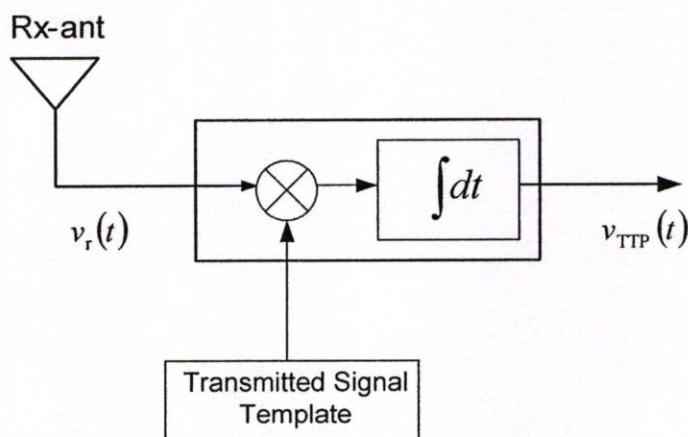
เครื่องรับสัญญาณในระบบแบบแถบกว้างยิ่งนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ ซึ่งหลักการของเครื่องรับประเภทนี้จะทำการนำเอาสัญญาณแม่แบบ (Template waveform) ในลักษณะต่าง ๆ โดยกำหนดให้ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนระหว่างอินพุตและเอาต์พุตคงที่ โดยที่บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง จะแสดงในรูป 3.9



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

### 3.3.10 สัญญาณแม่แบบในระบบแบบแถบกว้างยิ่ง

สำหรับสัญญาณแม่แบบที่นำมาใช้พิจารณานั้นมี 2 สัญญาณ โดยสัญญาณแรกจะใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ (Transmitted signal template) อีกสัญญาณจะใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ (Received signal template)



รูปที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในกรณีสัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ

ความหนาแน่นของสเปกตรัมของสัญญาณแม่แบบเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนของ  $V_i$  โดยมีอัตราขยายเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนคงที่ ดังนั้น ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ  $H_{TTP}(f)$  สามารถเขียนได้เป็น

$$H_{TTP}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} V_i^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_i(f)|^2 df}} \quad (3.30)$$

โดย  $V_i(f)$  คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง

ผลตอบสนองอิมพัลส์หรือสัญญาณแม่แบบของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ  $h_{TTP}$  สามารถหาได้จากการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

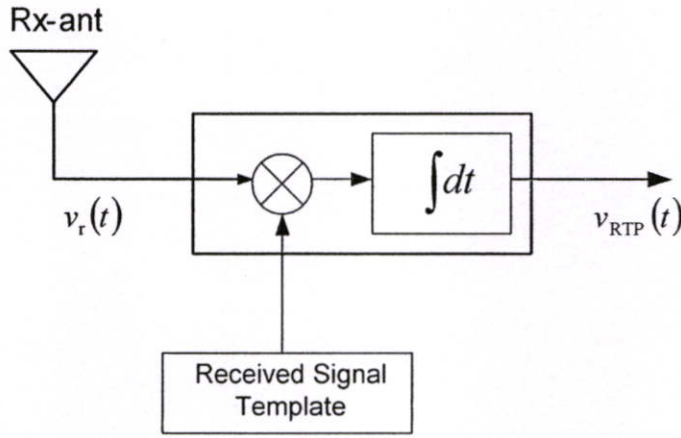
$$h_{TTP}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_{TTP}(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.31)$$

ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาต์พุตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ  $V_{TTP}(f)$  สามารถคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบคูณกับฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณรับ  $V_r(f)$  ดังสมการ

$$V_{TTP}(f) = V_r(f) \cdot H_{TTP}(f) \quad (3.32)$$

หลังจากที่ได้ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาต์พุตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบแล้ว เราสามารถหาค่ารูปคลื่นสัญญาณรับของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ  $v_{TTP}(t)$  โดยการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับ ดังสมการ

$$v_{TTP}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{TTP}(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.33)$$



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในกรณีสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณแม่แบบเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนของ  $V_r$  โดยมีอัตราขยายเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนคงที่ ดังนั้น ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ  $H_{RTP}(f)$  สามารถเขียนได้เป็น

$$H_{RTP}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} V_r^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_r(f)|^2 df}} \quad (3.34)$$

โดย  $V_r(f)$  คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้

ผลตอบสนองอิมพัลส์หรือสัญญาณแม่แบบของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ  $h_{RTP}$  สามารถหาได้จากการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$h_{RTP}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_{RTP}(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.35)$$

ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาที่พุดของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ  $V_{RTP}(f)$  สามารถคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน

ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบคูณกับฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณรับ  $V_r(f)$  ดังสมการ

$$V_{RTP}(f) = V_r(f) \cdot H_{RTP}(f) \quad (3.36)$$

หลังจากที่ได้ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาที่พุดของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบแล้ว เราสามารถหาค่ารูปคลื่นสัญญาณรับของแมตซ์ฟิลเตอร์  $v_{RTP}(t)$  โดยการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับ ดังสมการ

$$v_{RTP}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{RTP}(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.37)$$

### 3.3.11 อัตราความผิดพลาดบิต

ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างขั้วนั้น จะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลที่ได้รับที่ภาครับซึ่งจะสัมพันธ์กับสัญญาณรบกวน ซึ่งในระบบจะแสดงความผิดพลาดของข้อมูลในรูปของอัตราความผิดพลาดของบิต ซึ่งเป็นค่าทางสถิติที่นิยามมาจากค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้รับ ตัวอย่างเช่น ในการส่งข้อมูล 1000 บิต ปรากฏว่าข้อมูลที่ได้รับมีข้อมูลที่ผิด 1 บิต ดังนั้นค่าอัตราความผิดพลาดของบิตจะมีค่าเท่ากับ  $1/1000$  หรือ  $10^{-3}$  เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio: SNR) และอัตราความผิดพลาดของบิต สามารถหาได้จากสมการที่ 3.38

$$BER = Q \left[ \sqrt{\frac{(E_b/N_0) f_b C_c}{b_r}} \right] \quad (3.38)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (3.39)$$

โดยที่

$Q$  คือ ความน่าจะเป็นของความผิดพลาด

$C_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$b_r$  คือ อัตราการส่งข้อมูล

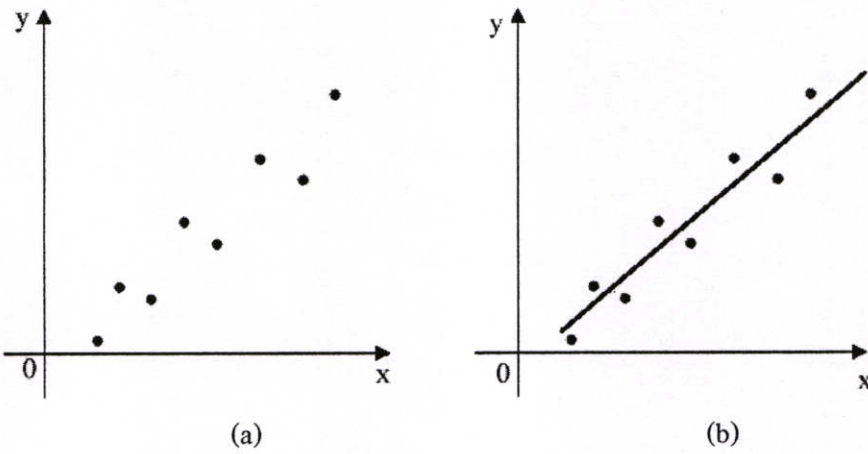
$f_b$  คือ แบนด์วิดท์

$E_b$  คือ พลังงานเฉลี่ยต่อบิต

$N_0$  คือ ความหนาแน่นกำลังของสัญญาณรบกวน

### 3.3.12 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares)

ในกรณีที่มีความผิดพลาดในชุดข้อมูลที่ได้ เทคนิคในการประมาณค่าฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลนั้นจะให้การแทนค่าแนวโน้มกว้าง ๆ ของข้อมูล โดยฟังก์ชันที่ใช้ประมาณนั้นไม่จำเป็นต้องทับกับข้อมูลทุกจุดดังในรูปที่ 3.7 โดยการได้มาซึ่งฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลนั้นอาจทำได้โดยการวาดเส้นที่คิดว่าดีที่สุดในการใช้แทนจุดข้อมูลนั้น แต่วิธีการนี้ไม่มีข้อพิสูจน์ว่าเส้นที่วาดขึ้นมานั้นเป็นฟังก์ชันที่ดีที่สุดสำหรับแทนชุดข้อมูลนั้นด้วยเหตุนี้จึงมีอีกวิธีหนึ่งซึ่งเรียกว่า Least-squares regression โดยแนวคิดของวิธีนี้คือ การลดค่าความแตกต่างระหว่างข้อมูลแต่ละจุดกับค่าฟังก์ชัน ถ้าข้อมูลจำนวน  $n$  ชุดมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตรง สมการเส้นตรงที่หาได้จากวิธีนี้เรียกว่า การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression) โดยมีสมการดังสมการที่ 3.40 [18]



รูปที่ 3.12 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

a) ชุดข้อมูล b) ฟังก์ชันที่ใช้แทนค่าชุดข้อมูลโดยคำนึงถึงแนวโน้มรวม

$$y = a + bx \pm e \quad (3.40)$$

เมื่อ  $a$  และ  $b$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงจุดตัดแกนและความชัน  
 $e$  เป็นค่าความผิดพลาด (Root mean square error)

โดยที่  $a$  และ  $b$  สามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} an + b \sum_{j=1}^n x_j &= \sum_{j=1}^n y_j \\ a \sum_{j=1}^n x_j + b \sum_{j=1}^n x_j^2 &= \sum_{j=1}^n x_j y_j \end{aligned} \quad (3.41)$$

และ  $e$  หาได้จากสมการ

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j)^2} \quad (3.42)$$

### 3.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณในการสื่อสารซึ่งเป็นส่วนสำคัญในวิทยานิพนธ์นี้อันประกอบด้วยรายละเอียดของคุณลักษณะของช่องสัญญาณ ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อหรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณลักษณะของช่องสัญญาณรวมไปถึงระบบการวัดช่องสัญญาณซึ่งทำการวัดในโดเมนความถี่ จากนั้นจะนำผลการวัดมาใช้ในการตรวจสอบถึงผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวในบทต่อไป ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ถึงผลที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็น ผลการลดทอนของกำลังงาน การผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ อันเนื่องมาจากผลกระทบจากปัจจัยดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น

## บทที่ 4

# แบบจำลองและการวัดสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

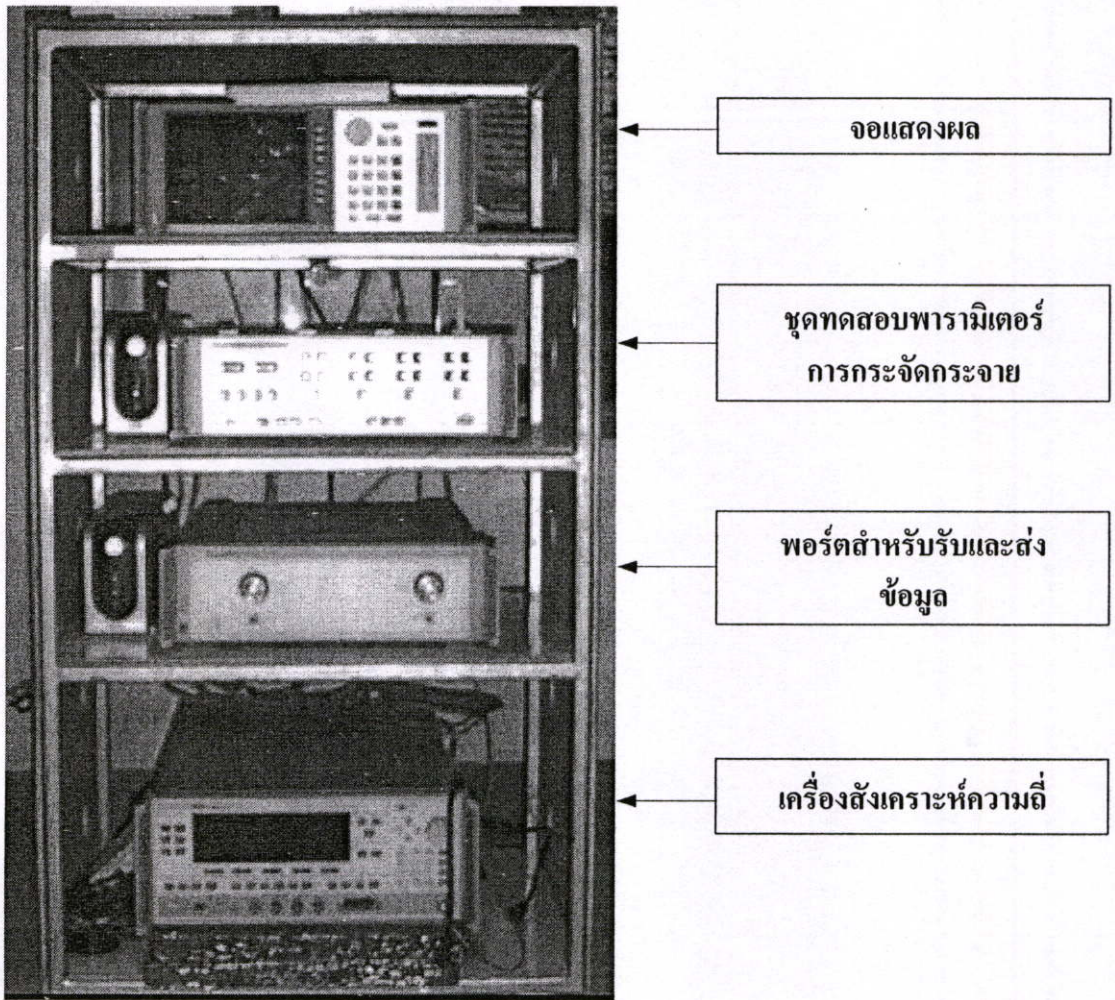
### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนและแบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นการตรวจสอบผลการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สาย โดยทั่วไปจะมีการพิจารณาอยู่ 2 วิธีด้วยกันคือ ตรวจสอบจากการใช้แบบจำลองช่องสัญญาณ (Channel model) บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์และตรวจสอบจากการวัด (Measurement) โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย ซึ่งเป็นการตรวจสอบบนโดเมนความถี่ โดยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการตรวจสอบบนพื้นฐานของการวัดเป็นหลัก สำหรับขั้นตอนในการวัดนั้นจำเป็นต้องมีการจัดเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และสิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการกำหนดรูปแบบหรือลักษณะสภาวะแวดล้อมที่ทำการวัด (Measurement model) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดปัจจัยของการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบ โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิเคราะห์ในสภาวะแวดล้อมจากภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร ซึ่งกำหนดให้สายอากาศส่งอยู่ภายในอาคารและสายอากาศรับอยู่ภายนอกอาคาร ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด แบบจำลอง รวมถึงแบบแผนในการวัด จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

### 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

#### 4.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

ในระบบการวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นจะใช้เครื่องวัดเฉพาะทางอันประกอบไปด้วย เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์รุ่น HP-8510C ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-parameter test set) รุ่น HP-8514B และตัวสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesized sweeper) รุ่น HP-83620A เป็นอุปกรณ์หลักในการทดลองดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer; PC) ที่เชื่อมต่อผ่านช่องสื่อสารแบบ (General purpose interface bus; GPIB) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่สามารถตรวจวัดสัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ต ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการตรวจวัดแบบสองพอร์ตโดยพอร์ตที่หนึ่งคือพอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ส่วนพอร์ตสองจะใช้ในการรับสัญญาณ โดยที่ปลายของพอร์ตทั้งสองจะถูกต่อด้วยสายอากาศ และทำการวัดในโดเมนความถี่ก่อนที่จะถูกนำผลการวัดไปวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

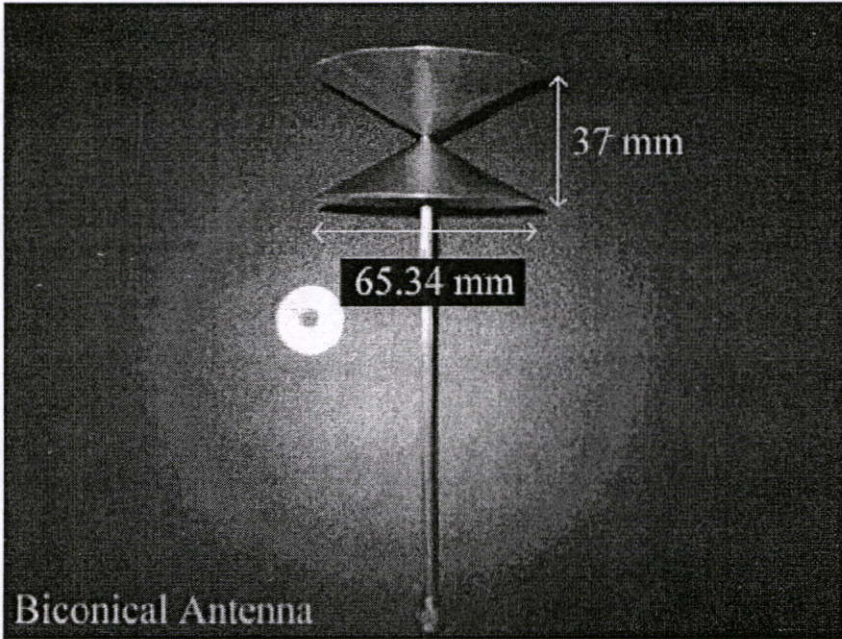


รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

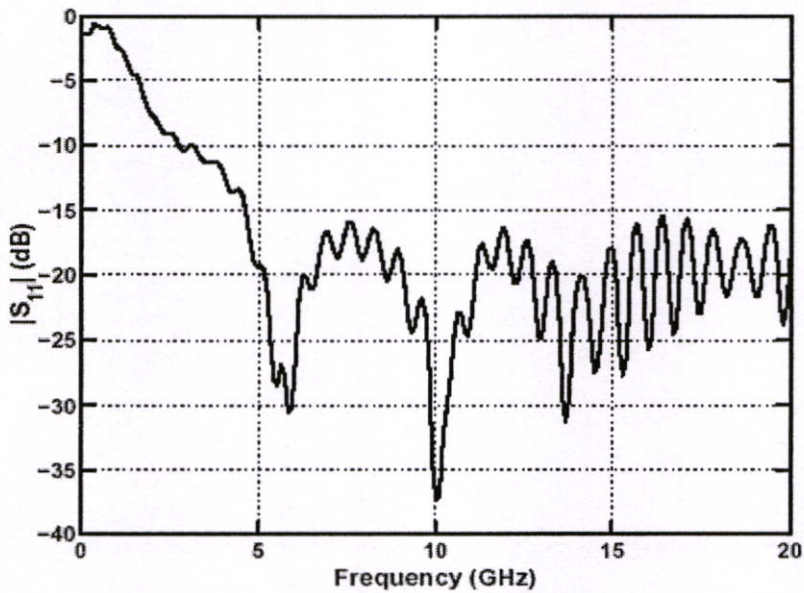
#### 4.2.2 สายอากาศแบบกรวยคู่

ในการตรวจวัดช่องสัญญาณแบบไร้สายนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ สายอากาศ (Antennas) ซึ่งช่วยในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แพร่กระจายผ่านอากาศทางด้านส่งไปยังสายอากาศทางด้านรับจากนั้นสายอากาศทางด้านรับก็จะเปลี่ยนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าตามเดิม โดยในการทดลองนี้ได้ใช้ สายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical antenna) [9] ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) แบบรอบทิศทาง (Omni-directional) และเป็นสายอากาศที่ตอบสนองความถี่ ได้สูง ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในช่วง 3.1 GHz - 10.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของแถบกว้าง ยิ่ง ตามข้อกำหนดย่านความถี่การใช้งานระบบแถบกว้างยิ่งของคณะกรรมการการสื่อสารแห่ง สหรัฐอเมริกา โดยสายอากาศแบบกรวยคู่นี้มีความสูงของตัวสายอากาศ 37 มิลลิเมตร และยาว 65.34 มิลลิเมตร เช่นดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงรูปทรงและขนาดของสายอากาศแบบกรวยคู่, รูปที่ 4.3 แสดง

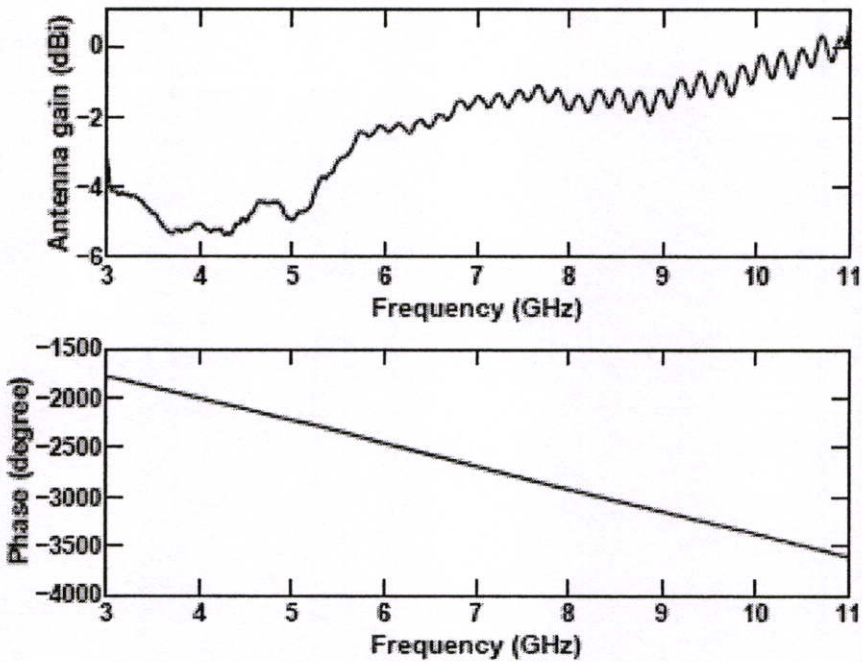
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแบบกรวยคู่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมีค่าต่ำกว่า  $-10$  dB ในช่วง  $3.1$  GHz -  $10.6$  GHz ในย่านของแถบกว้างยิ่ง และรูปที่ 4.4 แสดงขนาดและเฟสของสายอากาศแบบกรวยคู่



รูปที่ 4.2 ขนาดและรูปทรงของสายอากาศแบบกรวยคู่ [9]



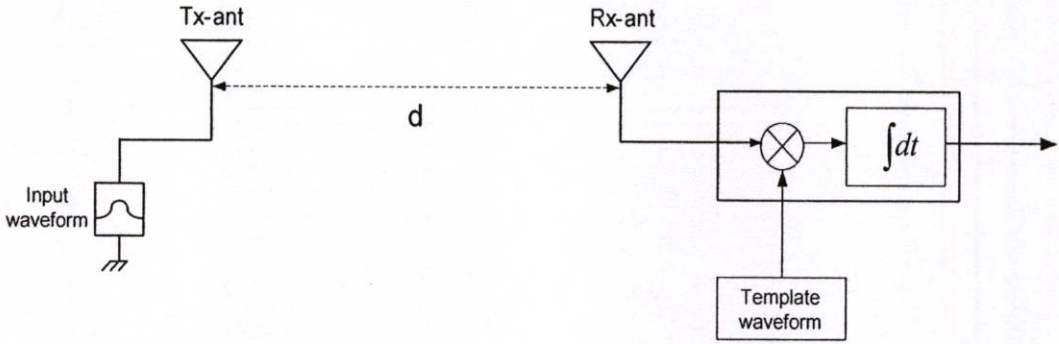
รูปที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแบบกรวยคู่ [9]



รูปที่ 4.4 ขนาดและเฟสของสายอากาศแบบกรวยคู่ [9]

### 4.3 แบบแผนการวัด

รูปแบบการจำลองการวัดที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นการตรวจสอบถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดขึ้น โดยในการทดลองนี้ต้องการที่จะตรวจสอบถึงผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมภายในอาคารไปยังสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคาร โดยมีกระจกหน้าต่างเป็นตัวกลาง ซึ่งสิ่งที่ได้จากการทดลองนั้นคือฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่รวมผลของสายอากาศเข้าไปด้วย จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ทราบถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยแสดงในพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณ อัตราขยายการสูญเสียเชิงวิถี ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อัตราผิดพลาดบิต และจากนั้นใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ที่ภาครับ โดยใช้สัญญาณแม่แบบ 2 สัญญาณ สัญญาณแรกจะใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ อีกสัญญาณจะใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ แล้วนำผลที่ได้จากเครื่องรับทั้งสองแบบมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงที่สุด

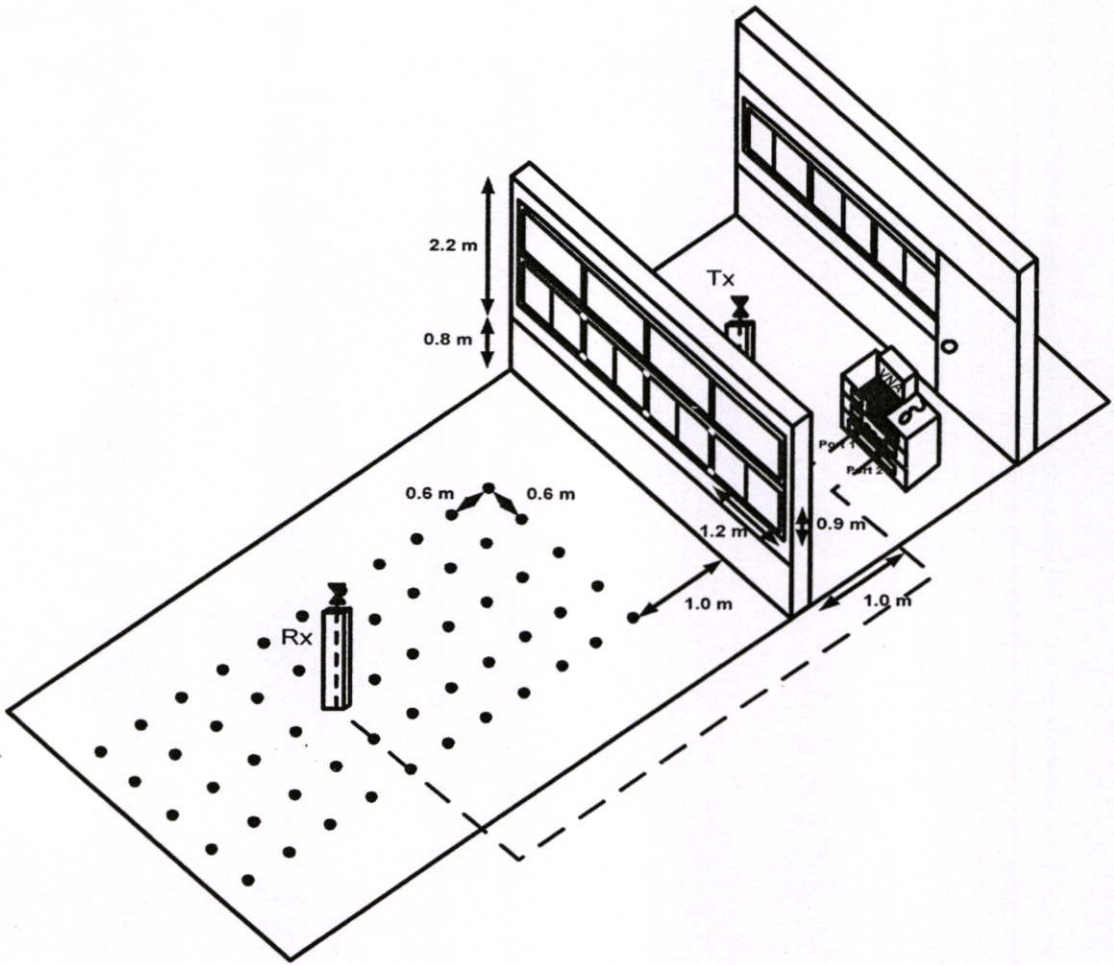


รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการวิเคราะห์

#### 4.4 การทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณของแบบจำลอง

##### 4.4.1 แบบจำลองการวัด

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ แบบแถบกว้างยิ่งถูกวัดในลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน  $S_{21}$  ในโดเมนของความถี่โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการวัดและบันทึกผลที่ได้ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป โดยสภาวะแวดล้อมที่ทำการวัดคือสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งในแบบจำลองจะเป็นแบบจำลองที่มีการวางสายอากาศด้านส่งอยู่ภายในอาคารและสายอากาศด้านรับอยู่ภายนอกอาคาร ในระยะห่าง 2 เมตร และสายอากาศทั้งสองมีความสูง 2.65 เมตร และส่งสัญญาณผ่านตัวกลางที่เป็นกระจกหน้าต่าง ในการวัดนั้นจะทำการวัดโดยการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศด้านรับไปตำแหน่งละ 0.6 เมตร เพื่อต้องการเก็บข้อมูลการวัดในตำแหน่งต่างๆ เพื่อดูความแตกต่างของช่องสัญญาณที่ระยะทางต่างๆ ซึ่งแบบจำลองนี้แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แบบจำลองที่ใช้ในการวัดและการจัดวางสายอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ

#### 4.4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด

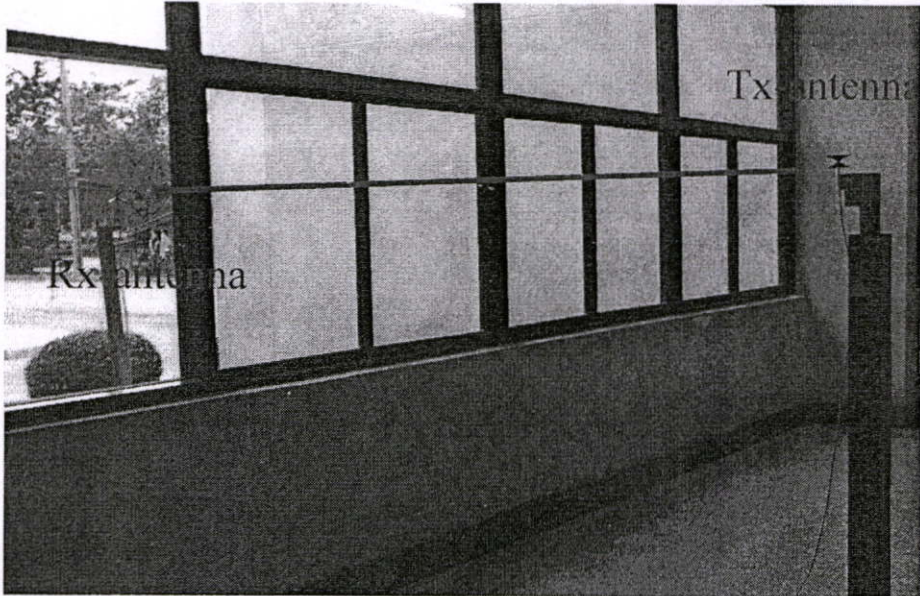
พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการวัด [4] แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของแบบจำลอง

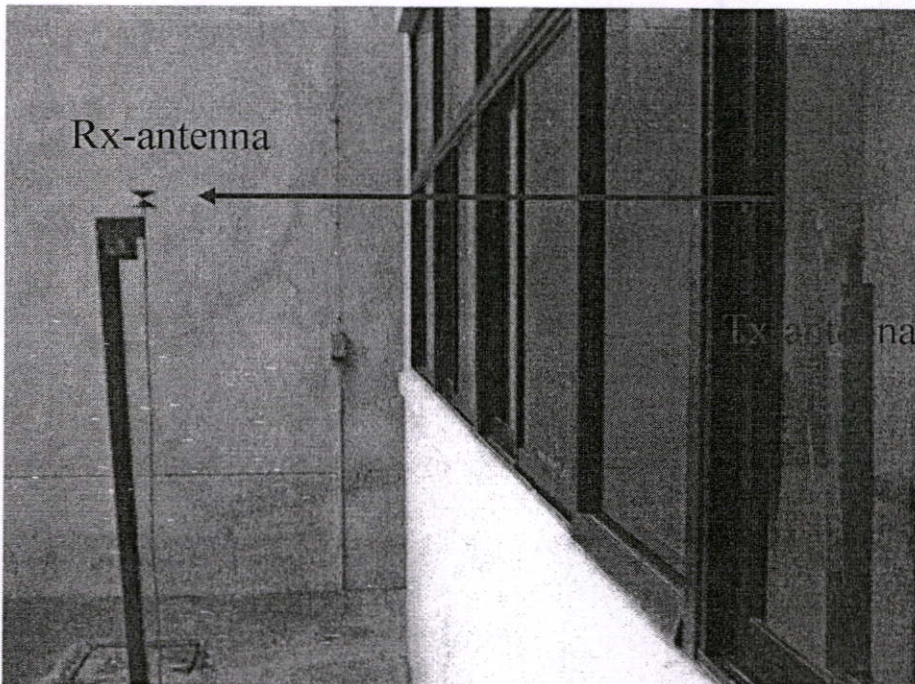
พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	3 GHz - 11 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
ความสูงสายอากาศด้านส่ง	2.65 เมตร
ความสูงสายอากาศด้านรับ	2.65 เมตร
ระยะห่างของสายอากาศด้านส่งและรับ	2 ~ 8 เมตร
ระยะห่างแต่ละจุดของสายอากาศด้านรับ	0.6 เมตร
การวางตัวของสายอากาศ	แนวตั้ง

#### 4.4.3 รูปการวัดสัญญาณ

หัวข้อนี้แสดงภาพการทำกรวัดสัญญาณจริง โดยที่สายอากาศด้านส่งอยู่ภายในอาคาร (ทางเดินยาวในอาคาร) และสายอากาศด้านรับอยู่ภายนอกอาคาร (บริเวณที่จอดรถ) [4] ที่อาคารของ ด็ก 12 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 4.7 การจัดวางตำแหน่งของสายอากาศด้านส่งและด้านรับจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งสายอากาศด้านรับที่อยู่ภายนอกอาคาร

#### 4.4.4 แบบจำลองของสัญญาณที่ใช้ส่ง

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นรูปแบบสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่ใช้ในการส่งได้ ถูกกำหนดไว้คือเราจะพิจารณาในส่วนของสัญญาณอิมพัลส์ซึ่งมีความถี่ครอบคลุมตลอดทั้งช่วงที่ คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกากำหนด คือตั้งแต่ 3.1 GHz - 10.6 GHz ใน วิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาสัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมและสัญญาณเกาส์เซียนที่ ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด

##### 4.4.4.1 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

โดยกำหนดความถี่ต่ำสุด ( $f_{\min}$ ) เท่ากับ 3.1 GHz ความถี่สูงสุด ( $f_{\max}$ ) เท่ากับ 10.6 GHz และสเปกตรัมแบนด์วิดท์ ( $f_b$ ) เท่ากับ 7.5 GHz โดยสมการของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมแสดงดัง สมการที่ 4.1 และ 4.2 รูปคลื่นสัญญาณในโดเมนเวลาและขนาดของฟังก์ชันความหนาแน่น สเปกตรัมแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

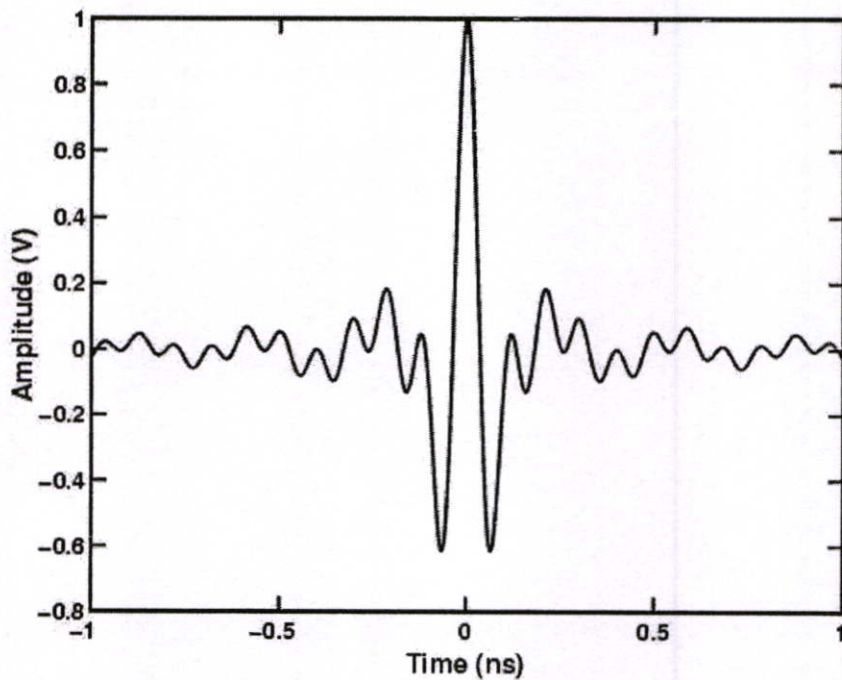
$$v_i(t) = \frac{1}{f_b} [f_{\max} \text{sinc}(2f_{\max}t) - f_{\min} \text{sinc}(2f_{\min}t)] \quad (4.1)$$

โดยที่  $f_{\min} = 3.1$  GHz คือความถี่ต่ำสุด

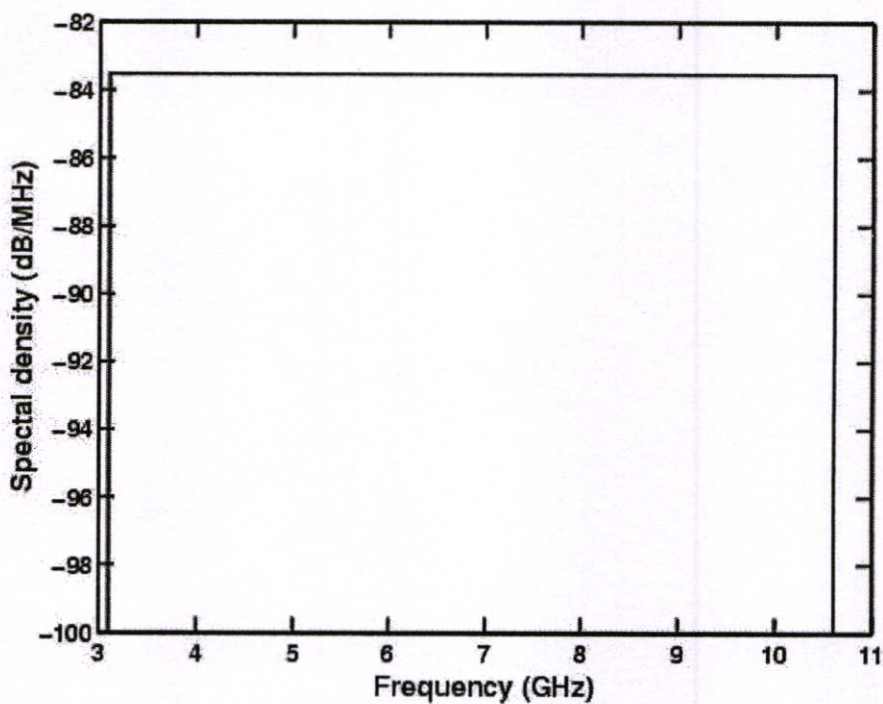
$f_{\max} = 10.6$  GHz คือความถี่สูงสุด

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

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



รูปที่ 4.9 รูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการส่งของแถบกว้างยิ่ง (แบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม)

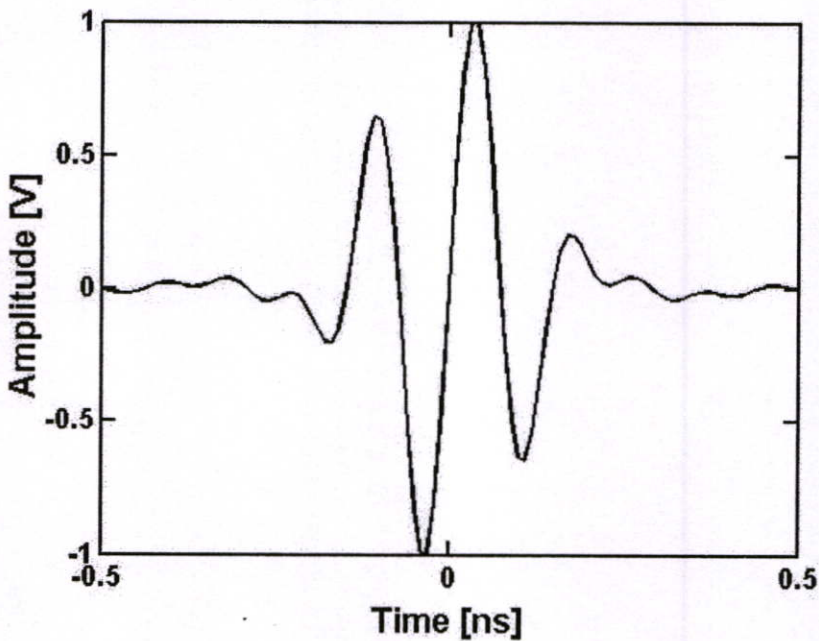


รูปที่ 4.10 ความหนาแน่นแถบกำลังงานของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

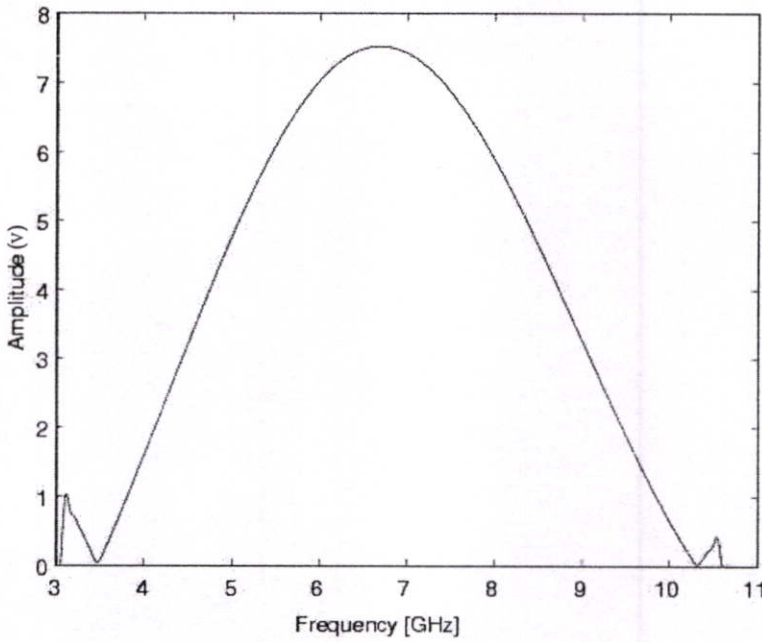
#### 4.4.4.2 รูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด

โดยกำหนดความถี่ต่ำสุด ( $f_{\min}$ ) เท่ากับ 3.1 GHz ความถี่สูงสุด ( $f_{\max}$ ) เท่ากับ 10.6 GHz ความถี่กลาง ( $f_0$ ) เท่ากับ 6.85 GHz และสเปกตรัมแบนด์วิดท์ ( $f_b$ ) เท่ากับ 7.5 GHz ความถี่พาห้และความยาวของสัญญาณพัลส์ไม่เกิน  $2/f_b$  และสัญญาณนี้จะใช้ Nyquist roll-off filter โดยมีแถบผ่าน(pass band)  $\left(f_0 - \frac{f_b}{2}, f_0 + \frac{f_b}{2}\right)$  โดยสมการของรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดแสดงดังสมการที่ 4.3 และรูปคลื่นสัญญาณในโดเมนเวลาและขนาดของฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

$$v_t = \sin(2\pi f_0 t) \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.11 รูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการส่งของแถบกว้างยิ่ง (แบบเกาส์เซียน)



รูปที่ 4.12 ความหนาแน่นแถบกำลังงานของเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด

เราสามารถหาฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งโดยใช้ผลการแปลงฟูริเยร์

$$V_t(f) = \int_{-\infty}^{\infty} v_t(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.4)$$

ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรับหาได้โดยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งผ่านช่องสัญญาณที่วัดได้ตามสมการดังนี้

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H_c(f) \quad (4.5)$$

รูปคลื่นที่รับได้สามารถคำนวณได้โดยการใช้การแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับดังนี้

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} df \quad (4.6)$$

#### 4.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนในการทดลองวัดช่องสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งภายในสถานะแวดล้อมจากภายในอาคารไปยังภายนอกอาคารของแบบจำลอง โดยในแบบจำลองมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการวัดของสายอากาศด้านรับเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากตำแหน่งต่างๆ ในการวางสายอากาศด้านรับด้วย ในการวัดนั้นใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการวัดในโดเมนความถี่เพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบต่างๆที่เกิดจากสถานะแวดล้อมดังกล่าว โดยใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ที่สามารถตอบสนองที่ความถี่ในช่วง 3.1 GHz - 10.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของแถบกว้างยิ่ง เป็นทั้งสายอากาศด้านส่งและด้านรับ และใช้แบบจำลองสัญญาณที่ใช้ส่งเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมและรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดเพื่อวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณ โดยข้อมูลการวัดที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์และแสดงผลในพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังจะแสดงในบทต่อไป

## บทที่ 5

# ผลการวิจัยและการวิเคราะห์สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง

### 5.1 กล่าวนำ

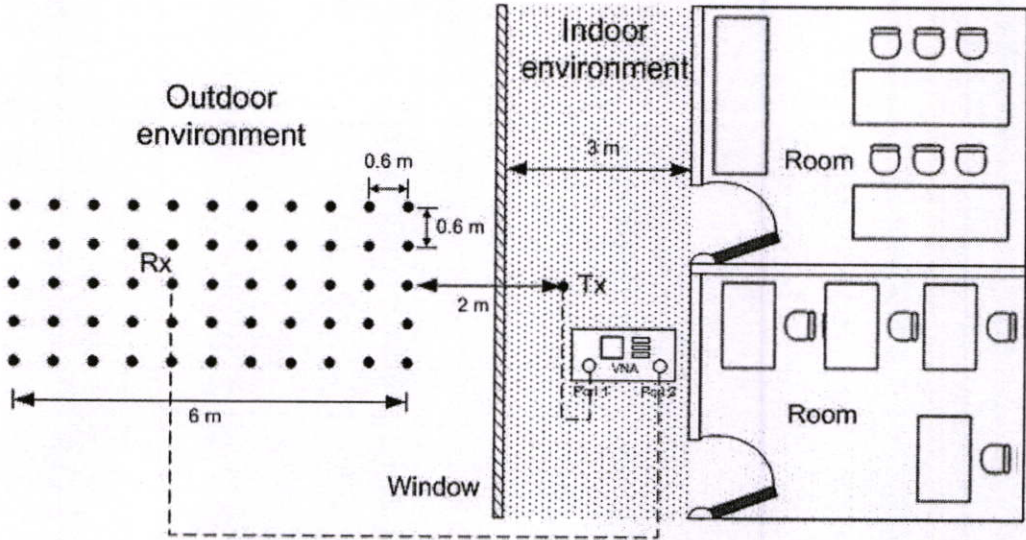
ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวัดช่องสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจากภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร ซึ่งแบบจำลองต่าง ๆ ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 จากนั้นนำผลที่ได้จากการวัดทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากสัญญาณส่งรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมและสัญญาณเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด เช่น ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ ค่าสูญเสียเชิงวิถี ค่าความผิดเพี้ยนในรูปของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน จากนั้นทางด้านรับกำหนดให้มีเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ โดยใช้สัญญาณแม่แบบ 2 สัญญาณ สัญญาณแรกจะใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ อีกสัญญาณจะใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ และได้นำสัญญาณที่ได้จากเครื่องรับทั้งสองแบบมาพิจารณาหาประสิทธิภาพ อัตราผิดพลาดบิตและการสูญเสียในการส่งผ่าน ซึ่งรายละเอียดของผลการวิเคราะห์จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

### 5.2 ผลการวิเคราะห์

#### 5.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลอง

ในแบบจำลองนี้ได้ทำการวัดในสภาวะแวดล้อมจากภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร โดยทำการวางตำแหน่งของสายอากาศจะกำหนดให้สายอากาศส่งอยู่ภายในอาคารและสายอากาศรับอยู่ภายนอกอาคาร และจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดของสายอากาศด้านรับไปตำแหน่งละ 0.6 เมตร โดยระหว่างสายอากาศส่งและรับจะมีกระจกหน้าต่างกันไว้ สายอากาศด้านรับและด้านส่งสูง 2.65 เมตร และสายอากาศทั้งสองเป็นสายอากาศแบบกรวยคู่

โดยค่าพารามิเตอร์บางค่าจะนำเสนอผลการวิเคราะห์ในรูปของกราฟในบางจุดการวัดเท่านั้นและจะแสดงเป็นตารางในทุกๆจุดการวัด เนื่องจากถ้านำมาแสดงเป็นกราฟทุกจุดการวัด จะทำให้ยากต่อการพิจารณา เพราะว่าเป็นแบบจำลองนี้ได้ทำการวัดทั้งหมด 55 จุดการวัด [4] โดยที่รูปที่ 5.1 จะแสดงตำแหน่งจุดการวัดที่จะใช้ในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะใช้ในการอ้างอิงตัวเลขตำแหน่งของผลการวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 5.1 แบบจำลองการวัดและการจัดตำแหน่ง

ระยะห่างแต่ละตำแหน่งจากสายอากาศทางด้านส่งมายังสายอากาศทางด้านรับ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ จะแสดงในตารางที่ 5.1

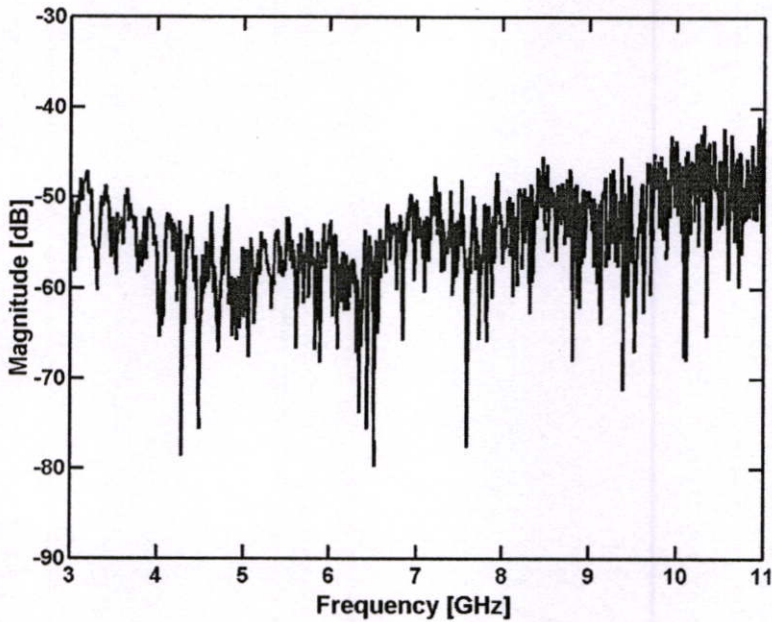
ตารางที่ 5.1 ระยะห่างจากสายอากาศทางด้านส่งมายังสายอากาศทางด้านรับ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลอง

ตำแหน่งที่	ระยะทาง (เมตร)
a	2.00
b	2.86
c	3.20
d	3.99
e	5.00
f	8.00

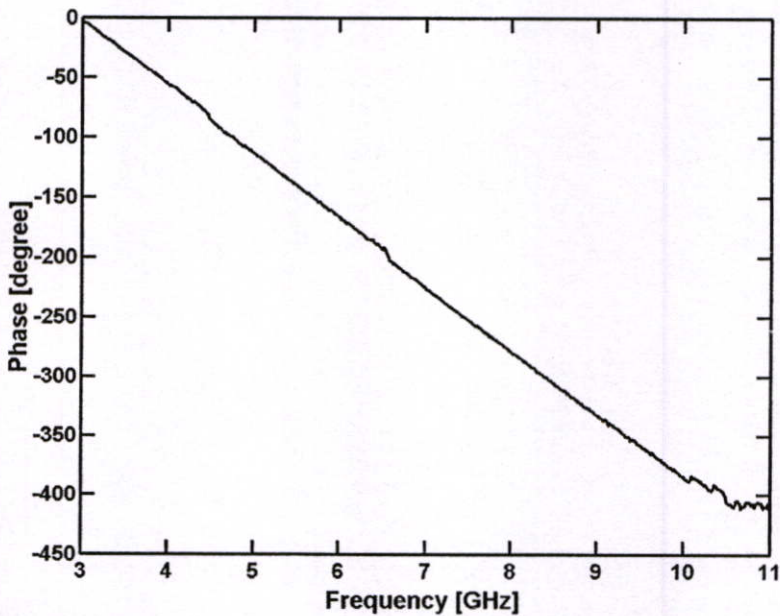
### 5.2.1.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองนี้ได้แสดงผลของตำแหน่งที่ a และ f ซึ่งอ้างอิงจากรูปที่ 5.1 คือที่ระยะทาง 2 และ 8 เมตร โดยในรูปที่ 5.2 แสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ระยะทาง 2 เมตร ซึ่งมีค่าขนาดเฉลี่ยเท่ากับ -51.59 dB ส่วนรูปที่ 5.3 แสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ระยะทาง 8 เมตร ซึ่งมีค่าขนาดเฉลี่ยเท่ากับ -56.32 dB รูปที่ 5.4 แสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 2 เมตร และจะสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะของ

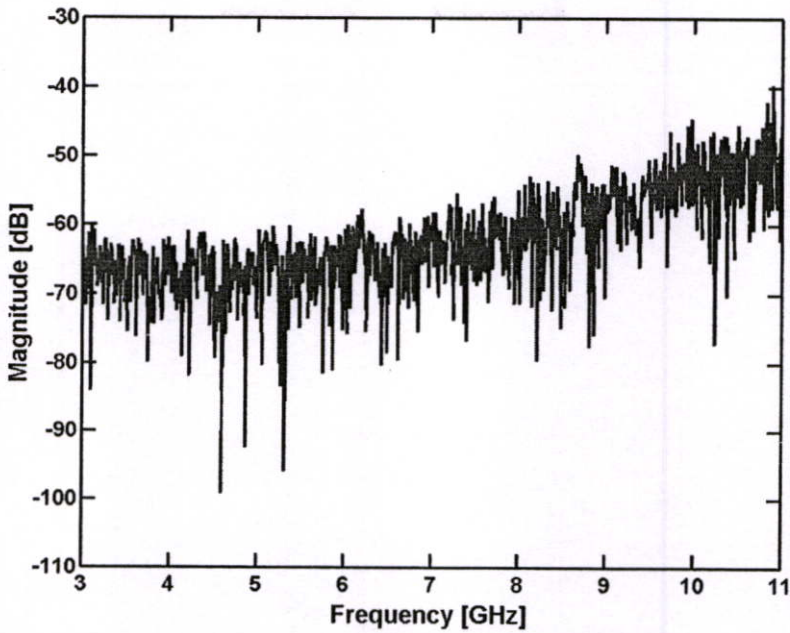
เฟสจะเรียบและจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 GHz อาจเกิดจากสายนำสัญญาณไม่รองรับในช่วงความถี่ที่สูงมากๆ และรูปที่ 5.5 แสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 8 เมตร ลักษณะของเฟสในจุดนี้จะค่อนข้างเรียบ และตั้งแต่ช่วงความถี่ 7 GHz เป็นต้นไปเฟสจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น จะสังเกตได้ว่าลักษณะของเฟสในระยะทาง 2 เมตรจะเป็นเชิงเส้นมากกว่าเฟสในระยะทาง 8 เมตร



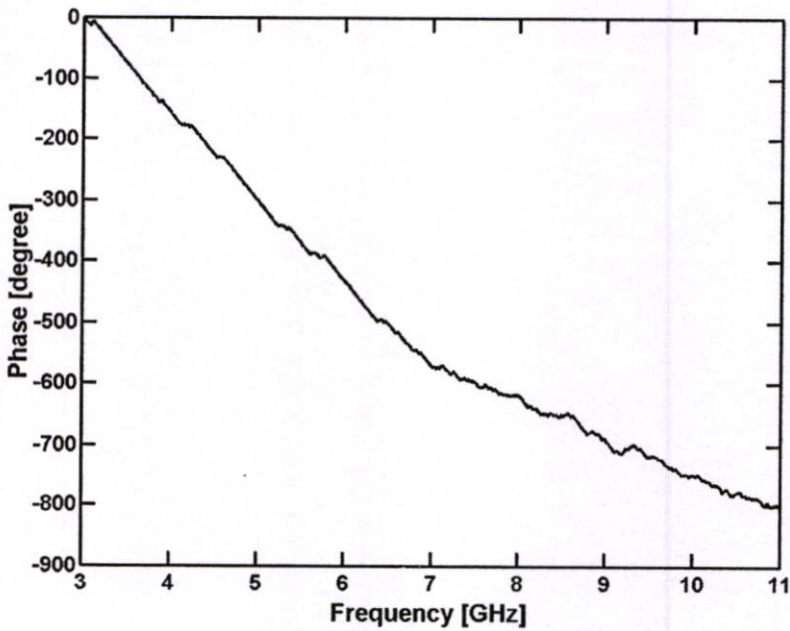
รูปที่ 5.2 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 2 เมตร



รูปที่ 5.3 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 2 เมตร



รูปที่ 5.4 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 8 เมตร

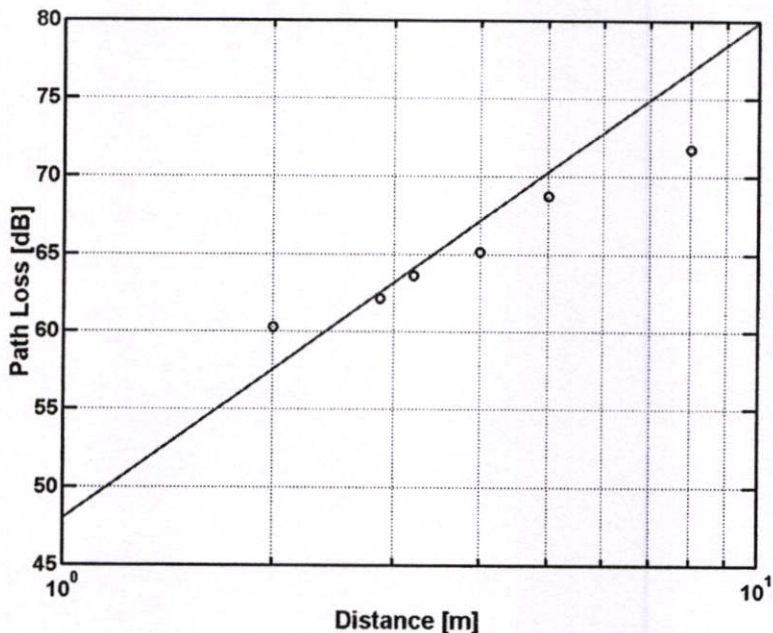


รูปที่ 5.5 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 8 เมตร

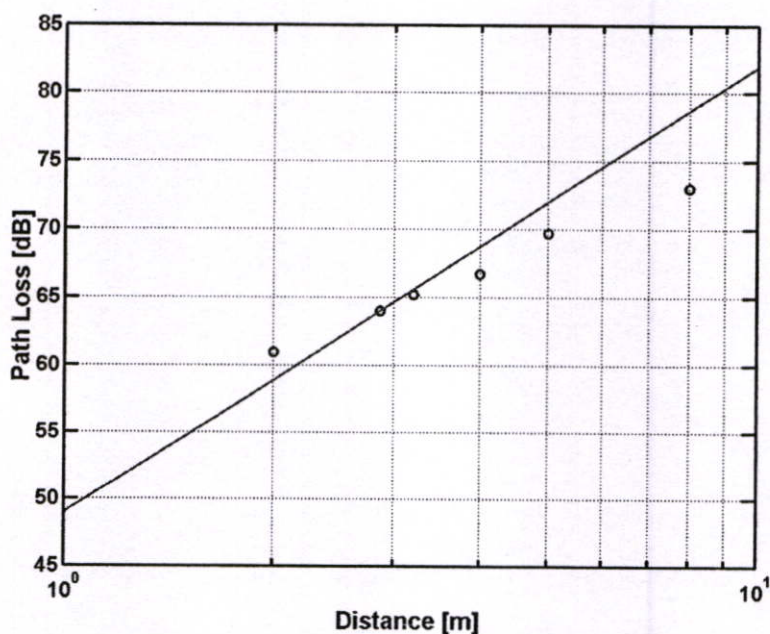
#### 5.2.1.2 ค่าสูญเสียเชิงวิถี

อัตราการสูญเสียเชิงวิถีสำหรับการแพร่กระจายภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร จากรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะทางไกลขึ้นค่าอัตราการสูญเสียเชิงวิถีก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จาก

ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจุดที่มีอัตราสูญเสียเชิงวิถีน้อยที่สุดจะอยู่ที่จุด a จะมีค่าอัตราสูญเสียเชิงวิถีในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ 60.297 dB และจะมีค่าอัตราสูญเสียเชิงวิถีในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดที่ 60.966 dB เพราะว่าเป็นจุดที่อยู่ใกล้มากที่สุด



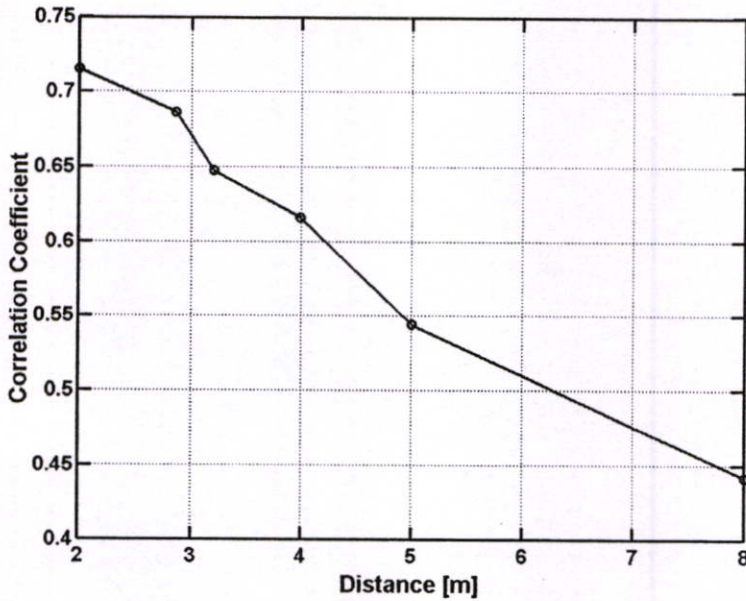
รูปที่ 5.6 ค่าสูญเสียเชิงวิถีในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม



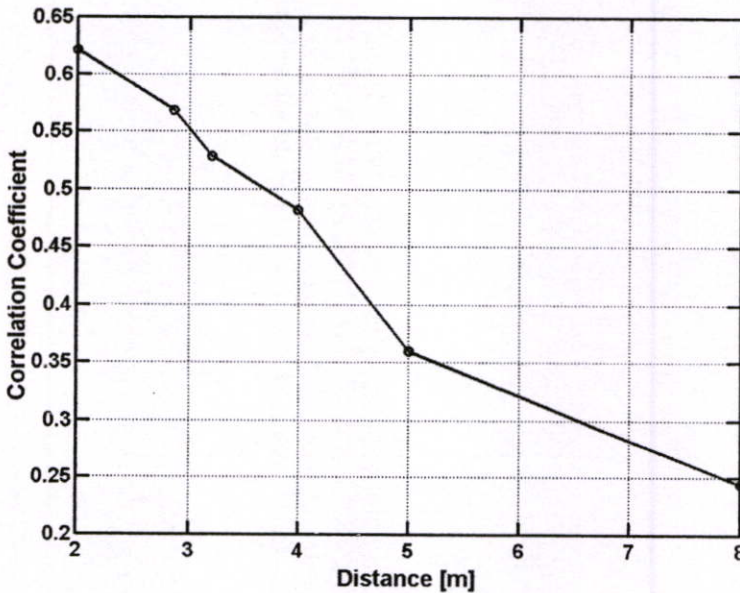
รูปที่ 5.7 ค่าสูญเสียเชิงวิถีในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด

### 5.2.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแถบกว้างยิ่ง จะพิจารณาโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณส่งทั้งสองแบบ จากรูปจะเห็นว่าที่ระยะ 2 เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม อยู่ที่ 0.715 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดอยู่ที่ 0.622 และจะมีค่าลดลงไปตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น



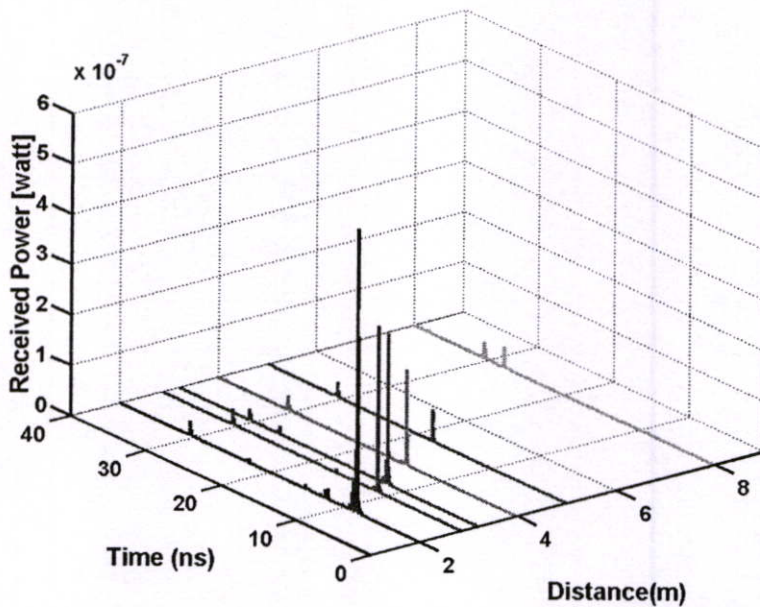
รูปที่ 5.8 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม



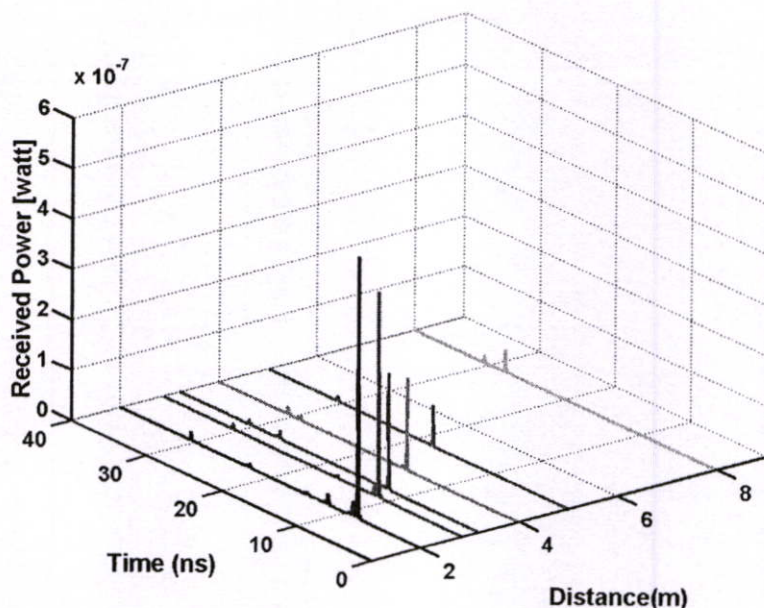
รูปที่ 5.9 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด

#### 5.2.1.4 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับที่เวลาต่าง ๆ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสัญญาณที่มีการสะท้อนในหลายทิศทางหรือที่เรียกว่าสัญญาณหลายวิถี โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อเวลาที่เข้ามาถึง จะสังเกตได้ว่าระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะทาง 2 เมตร จะมีระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าสูงที่สุดและใช้เวลาน้อยที่สุด เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้จะน้อยลงและจะต้องใช้เวลาในการรับสัญญาณที่มาจากพัลส์ในทางตรงมากขึ้น จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11



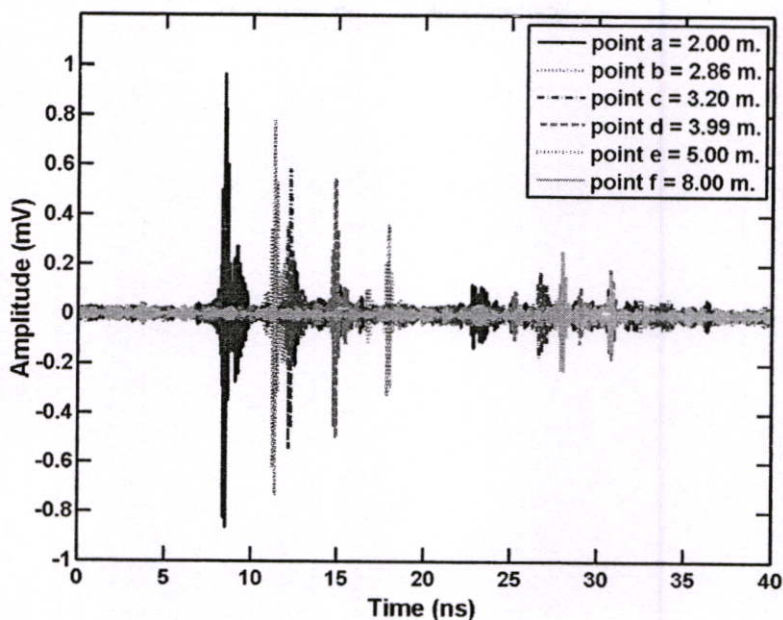
รูปที่ 5.10 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม



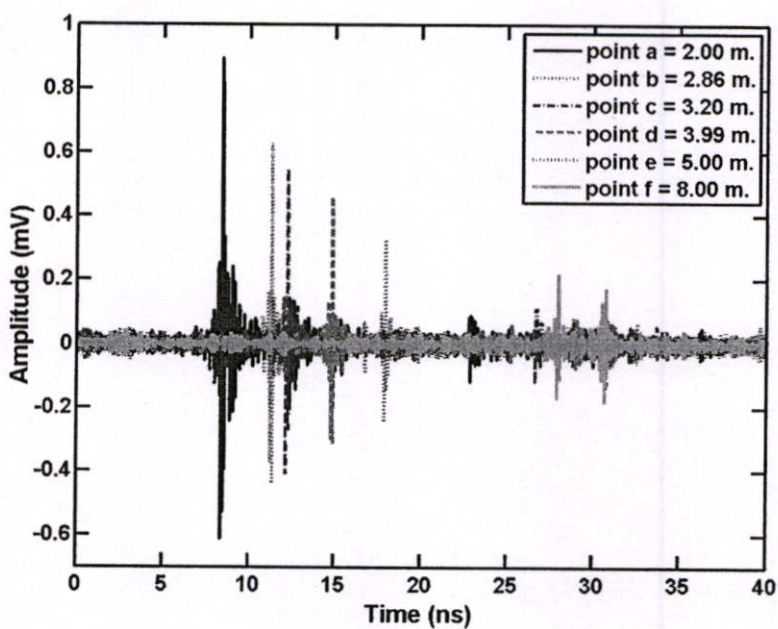
รูปที่ 5.11 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียน ที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด

#### 5.2.1.5 เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์

จากผลของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าน้อยมากที่ระยะทางมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงค่าความผิดพลาดของสัญญาณที่มากขึ้น จึงได้มีการทำการปรับปรุงสัญญาณด้านรับให้ดีขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้สัญญาณแม่แบบ 2 สัญญาณ สัญญาณแรกจะใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ อีกสัญญาณจะใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ เพื่อที่จะหาสัญญาณที่รับได้มีค่าดีที่สุด โดยรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 แสดงผลของแอมพลิจูดของสัญญาณเมื่อผ่านเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ ในตำแหน่งการวัดตำแหน่งที่ a, b, c, d, e และ f โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง a ระยะทาง 2 เมตร มีค่าแอมพลิจูดในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเท่ากับ 0.966 mV ส่วนค่าแอมพลิจูดในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดเท่ากับ 0.894 mV และมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามระยะทาง

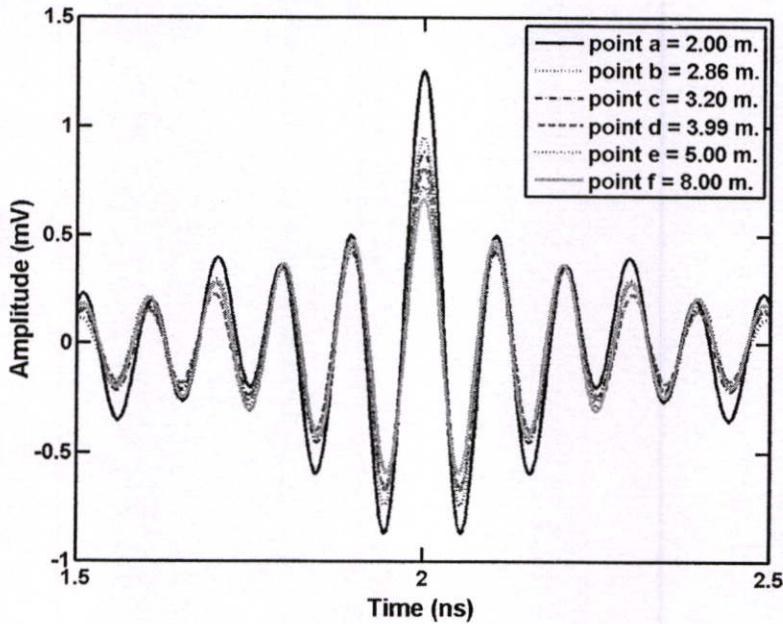


รูปที่ 5.12 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุทของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณส่ง

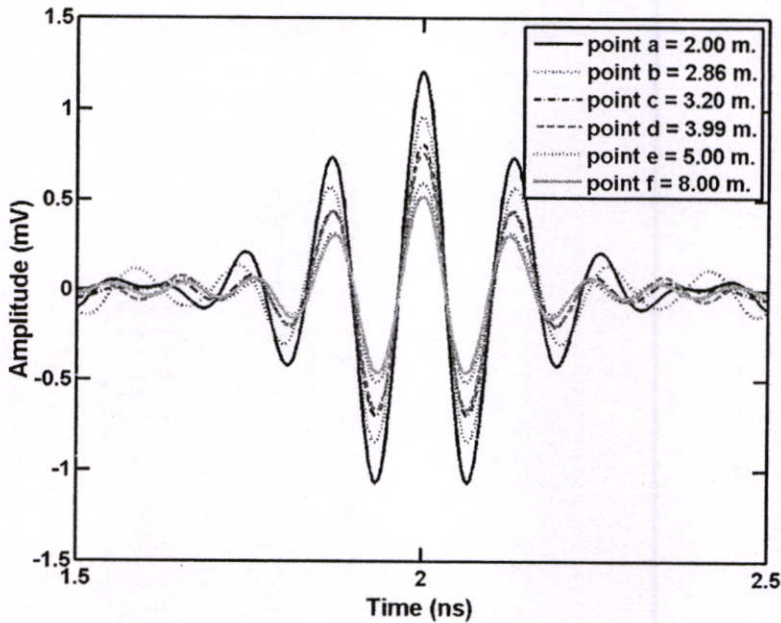


รูปที่ 5.13 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุทของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดเป็นสัญญาณส่ง

ส่วนสัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบแสดงดังรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 โดยในรูปนี้ได้แสดงผลของแอมพลิจูดของสัญญาณในตำแหน่งการวัดตำแหน่งที่ a, b, c, d, e และ f โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง a ระยะทาง 2 เมตร มีค่าแอมพลิจูดในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเท่ากับ 1.255 mV ส่วนค่าแอมพลิจูดในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดเท่ากับ 1.207 mV จะสังเกตได้ว่าในกรณีใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ จะได้สัญญาณรับที่มีค่าแอมพลิจูดสูงกว่าในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ



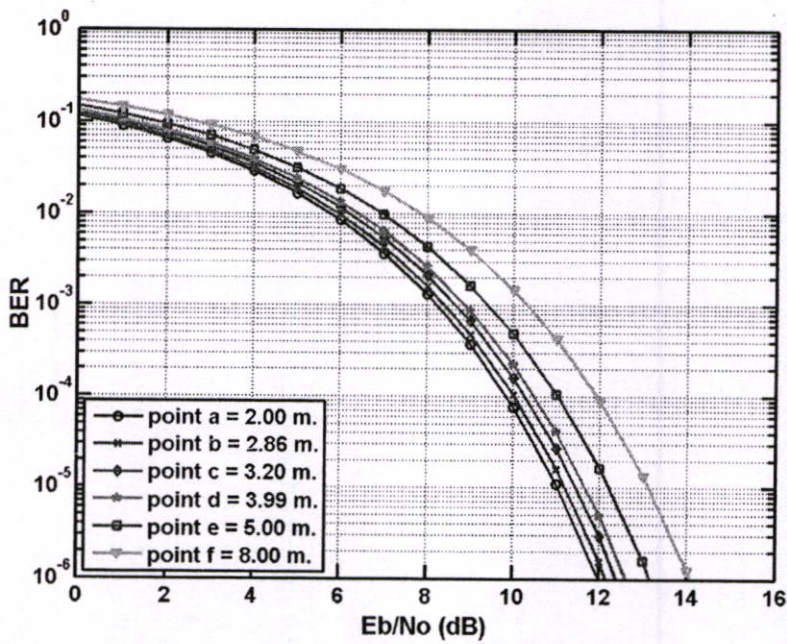
รูปที่ 5.14 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุทของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณส่ง



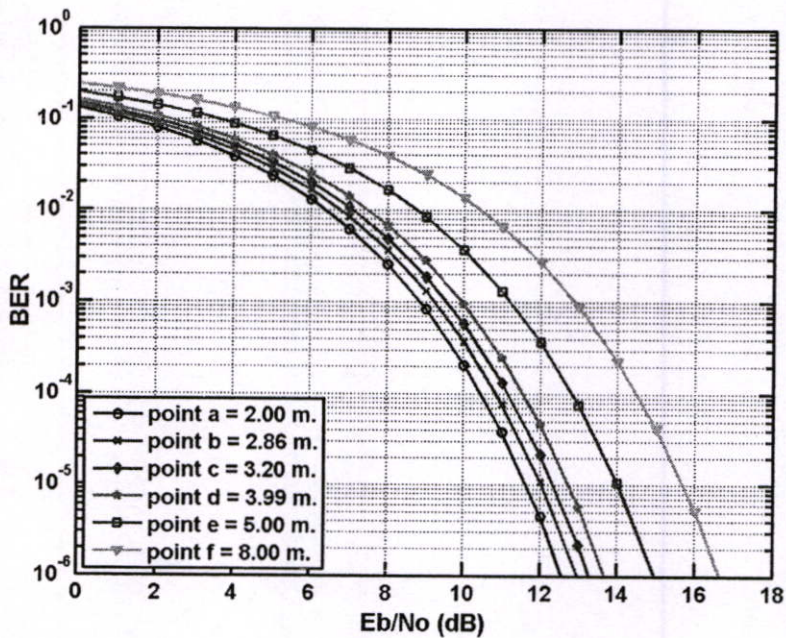
รูปที่ 5.15 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุทของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดเป็นสัญญาณส่ง

#### 5.2.1.6 อัตราผิดพลาดบิต

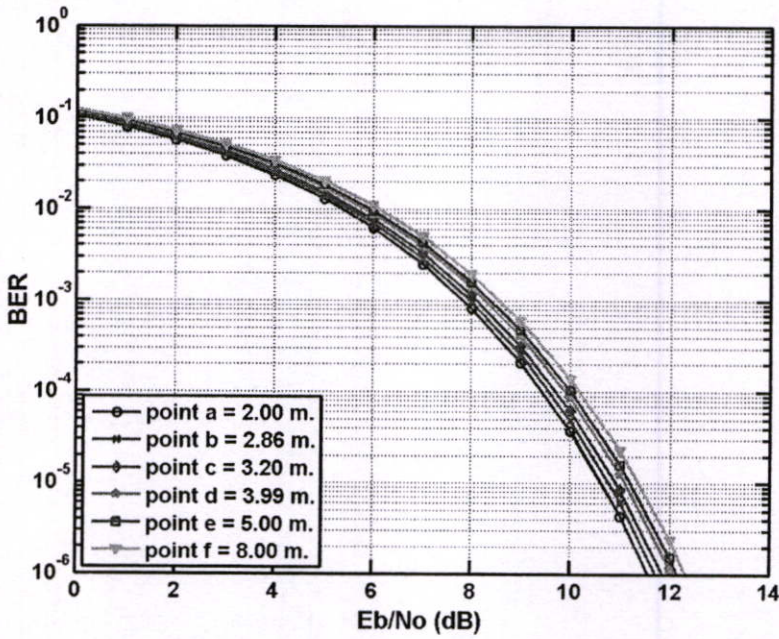
ในการวิเคราะห์หาผลของอัตราผิดพลาดบิตในแบบจำลองนี้เพื่อที่จะดูประสิทธิภาพของระบบระหว่างเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบกับในกรณีใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบ โดยในแบบจำลองนี้จะแสดงผลของตำแหน่งที่ a, b, c, d, e และ f โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1 โดยผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบแสดงดังรูปที่ 5.16 และรูปที่ 5.17 ส่วนผลของอัตราผิดพลาดเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบแสดงดังรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 จะสังเกตเห็นได้ว่าผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบจะมีอัตราผิดพลาดบิตต่ำกว่าผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ และจะเห็นได้ว่าผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับทั้งสองสัญญาณแม่แบบ ในระยะทางที่ใกล้จะมีอัตราผิดพลาดบิตที่ต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น



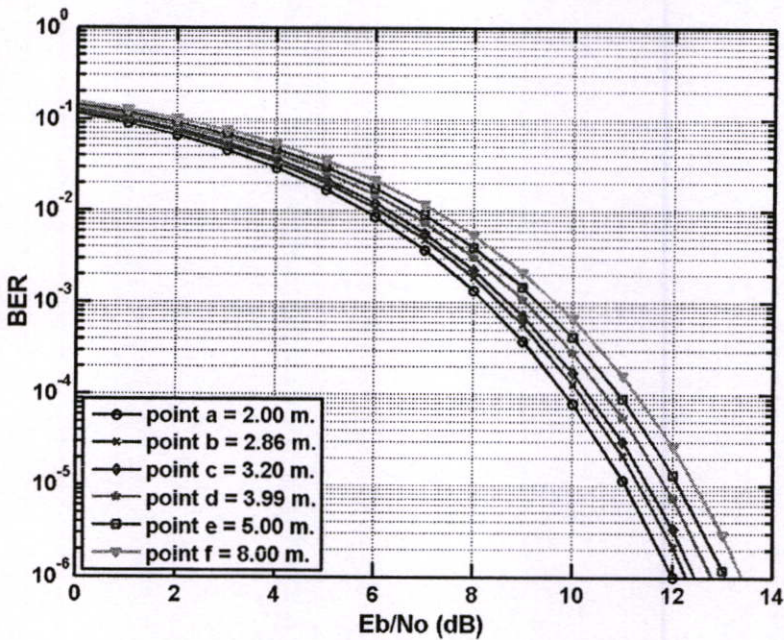
รูปที่ 5.16 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณส่ง



รูปที่ 5.17 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด



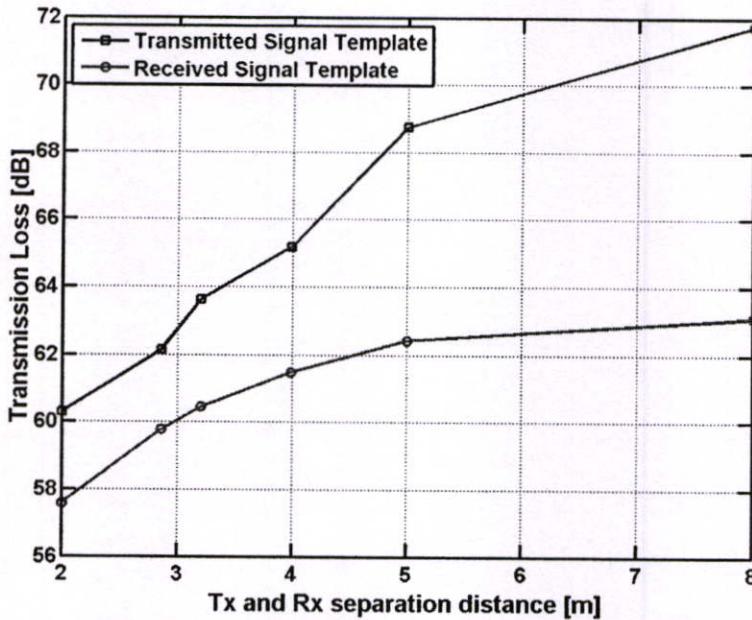
รูปที่ 5.18 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณส่ง



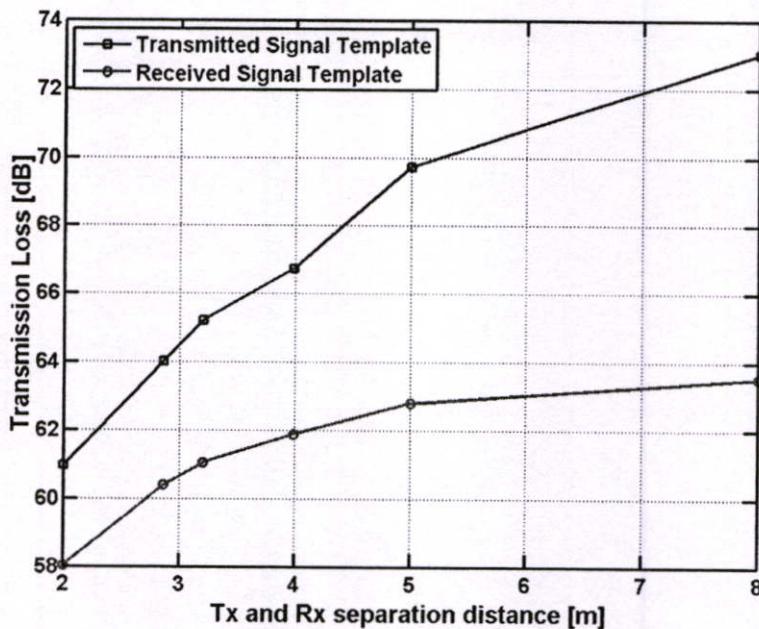
รูปที่ 5.19 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบและใช้แบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด

### 5.2.1.7 การสูญเสียในการส่งผ่าน

รูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียในการส่งผ่านหลังจากผ่านเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ กับการสูญเสียในการส่งผ่านหลังจากผ่านเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบ จะเห็นได้ว่าการสูญเสียในการส่งผ่านของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบ จะมีค่าการสูญเสียในการส่งผ่านน้อยกว่าเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ



รูปที่ 5.20 การสูญเสียในการส่งผ่านเมื่อใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบเปรียบเทียบกับเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณส่ง



รูปที่ 5.21 การสูญเสียในการส่งผ่านเมื่อใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบเปรียบเทียบกับเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้รูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูดเป็นสัญญาณส่ง

### 5.3 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลองในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารไปยังภายนอกอาคารของแบบจำลอง โดยได้แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากสัญญาณส่งรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมและสัญญาณเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด เช่น ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ ค่าสูญเสียเชิงวิถี ค่าความผิดเพี้ยนในรูปของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน จากนั้นทางด้านรับกำหนดให้มีเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบและเครื่องแบบสหสัมพันธ์โดยใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบ และได้นำสัญญาณที่ได้จากเครื่องรับทั้งสองสัญญาณแม่แบบมาพิจารณาหาประสิทธิภาพอัตราผิดพลาดบิตและการสูญเสียในการส่งผ่าน เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพที่แตกต่างของระบบที่มีการพิจารณาถึงเครื่องรับและสัญญาณส่งที่แตกต่างกัน ซึ่งบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงในบทต่อไป

## บทที่ 6

# บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 6.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งที่เกิดจากผลของสภาวะแวดล้อม โดยอาศัยการตรวจสอบบนพื้นฐานของการวัดจริง ในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร โดยทำการวัดที่ตึก 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยที่สภาวะแวดล้อมภายนอกอาคารจะเป็นบริเวณลานจอดรถที่ชั้นหนึ่งของตึก 12 ชั้น และภายในอาคารจะเป็นระเบียงทางเดินยาวภายในตึก ซึ่งได้วางสายอากาศด้านส่งอยู่ภายในอาคารและสายอากาศด้านรับอยู่นอกอาคาร ซึ่งแบบจำลองได้แสดงให้เห็นในบทที่ 4 ส่วนผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในบทที่ผ่านมา และในบทนี้จะทำการสรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสัญญาณและเครื่องรับที่แตกต่างกัน

### 6.2 การวิเคราะห์ช่องสัญญาณ

ผลการวิเคราะห์ที่ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองมีค่าขนาดเฉลี่ยเท่ากับ  $-51.59$  dB ที่ระยะ 2 เมตร ส่วนที่ระยะทาง 8 เมตรจะมีค่าขนาดเฉลี่ยของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองเท่ากับ  $-56.32$  dB จะเห็นได้ว่าที่ระยะทาง 8 เมตรจะมีการจางหาย ของสัญญาณมากกว่าที่ระยะ 2 เมตร นั้นหมายถึงเมื่อมีระยะทางเพิ่มขึ้นก็จะมีกรจางหายของสัญญาณเพิ่มมากขึ้นด้วย

#### 6.2.1 สรุปผลการวิเคราะห์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเปรียบใน

กรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด

ค่าสูญเสียเชิงวิถีและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของทั้งสองแบบรูปคลื่นสัญญาณส่ง ทั้งในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมและในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด จะมีค่าสูญเสียเชิงวิถีเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างระหว่างสายอากาศ โดยจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าสูญเสียเชิงวิถีและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมจะมีค่าที่ดีกว่าในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด ซึ่งค่าสูญเสียเชิงวิถีในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ระยะทาง 2 เมตร จะมีค่าเท่ากับ  $60.388$  dB และในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลข

ทางแอมพลิจูด จะมีค่าเท่ากับ 60.966 dB ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ระยะทาง 2 เมตร จะมีค่าเท่ากับ 0.754 และในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด จะมีค่าเท่ากับ 0.712

ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของทั้งสองแบบรูปคลื่นสัญญาณส่ง ทั้งในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมและในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด จะมีค่าเวลาของสัญญาณที่มาถึงใกล้เคียงกันทุกจุด อันเนื่องมาจากใช้แบบจำลองในการวัดที่เหมือนกัน แต่จะมีระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่างกัน ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม จะมีระดับกำลังงานที่รับได้สูงกว่าในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด ในทุกๆ ตำแหน่ง และจะมีระดับกำลังงานที่รับได้ลดลงไปตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น

### 6.2.2 สรุปผลการวิเคราะห์เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบเปรียบเทียบกับเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบ

สัญญาณที่รับได้ของทั้งสองแบบรูปคลื่นสัญญาณส่ง ทั้งในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมและในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด เมื่อผ่านเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบจะได้ค่าแอมพลิจูดที่สูงกว่าเมื่อผ่านเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ โดยที่ระยะ 2 เมตรจะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงที่สุด และจะมีค่าแอมพลิจูดลดลงไปตามระยะห่างของสายอากาศที่เพิ่มมากขึ้น จะสังเกตได้ว่าสัญญาณที่รับได้ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม จะมีค่าแอมพลิจูดสูงกว่าในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด ในทุกๆ ตำแหน่ง

ค่าอัตราผิดพลาดบิตของทั้งสองแบบรูปคลื่นสัญญาณส่ง ทั้งในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมและในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่ามากขึ้น กล่าวคือเมื่อระยะทางมากขึ้นทำให้เกิดบิตข้อมูลผิดพลาดมากขึ้น จะเห็นได้ว่าผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบจะมีอัตราผิดพลาดบิตต่ำกว่าผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบในกรณีทั้งสองแบบรูปคลื่นสัญญาณส่ง และอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบและใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมจะเกิดบิตข้อมูลที่ผิดพลาดน้อยที่สุด

การสูญเสียในการส่งผ่านของทั้งสองแบบรูปคลื่นสัญญาณส่ง ทั้งในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมและในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด หลังจากผ่านเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบกับการสูญเสียในการส่งผ่านหลังจากผ่านเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบ จะเห็นได้ว่าการสูญเสียในการส่งผ่านของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณรับเป็นสัญญาณแม่แบบ จะมีค่าการสูญเสียในการส่งผ่านน้อยกว่าเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบ โดยจะเห็นว่าในกรณีที่ใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมจะมีการสูญเสียในการส่งผ่านผ่านน้อยกว่าที่สุด

จากผลการศึกษาวิจัยในการวัดการแพร่กระจายของสัญญาณแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารไปยังภายนอกอาคารนี้ ทำให้เราได้ทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบและหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งต่อไปในอนาคต

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

จากแนวคิดที่ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ไปยังภายนอกอาคารนั้น พบว่าสภาพของห้องที่อยู่ภายในอาคารและวัสดุที่เป็นตัวกลางระหว่างสายอากาศทั้งสองซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เป็นกระจกหน้าต่างซึ่งมีขอบเป็นเหล็ก มีผลต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณจึงเห็นว่าควรจะมีการนำค่าวัสดุตัวกลางไม่ว่าจะเป็นค่าวัสดุตัวกลางของกระจกหรือขอบเหล็กมาพิจารณาด้วย และลองทำการวัดในแบบจำลองที่มีสภาวะแวดล้อมภายในอาคารเป็นห้องที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และเปลี่ยนวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างและผลที่เกิดขึ้น ส่วนช่องสัญญาณที่ได้จากการวัดนั้นถูกรวมเข้ากับผลของคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งเมื่อทำการเปลี่ยนสายอากาศเป็นชนิดอื่นๆ ค่าของช่องสัญญาณก็จะเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติของสายอากาศนั้นๆ ผู้เขียนเห็นว่าควรจะมีการแยกผลของคุณสมบัติของสายอากาศออกจากผลของช่องสัญญาณด้วยเทคนิควิธีการใดวิธีการหนึ่ง ซึ่งจะทำให้สามารถนำผลของช่องสัญญาณนั้นไปใช้ในการวิเคราะห์หาผลในกรณีอื่นๆ ได้อีกในโอกาสต่อไป

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าข้อมูล กระบวนการและเทคนิคที่ได้นำเสนอไปในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ในการศึกษาค้นคว้า เพื่อพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งต่อไปในอนาคตข้างหน้าได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Siwiak, **“Ultra-Wide Radio : Introducing a New Technology,”** 2001 Spring IEEE Veh. Tech.Conf. (VTC), Plenary session, pp. 1088-1093, May 2001.
- [2] K. Siwiak, **“Ultra-Wide Radio : The emergence of an Important RF Technology,”** 2001 Spring IEEE Veh. Tech.Conf. (VTC), pp. 1169-1172, May 2001.
- [3] K. Siwiak, **“Impact of Ultra Wide Band Transmission on A Generic Receiver,”** 2001 Spring IEEE Veh. Tech.Conf. (VTC), pp. 1181-1183, May 2001.
- [4] P. Panthap and S. Promwong. **“Performance Analysis of UWB Propagation Channel with Indoor to Outdoor Channel Model,”** The 1<sup>st</sup> Joint International Conference on Information Communication Technology (JICT2007), vol. 1, pp. 238-241, Dec. 2007.
- [5] S. Promwong and P. Panthap, **“Experimental Evaluation of Complex Form Friis’ Transmission Formula with Indoor/Outdoor for Ultra Wideband Impulse Radio,”** International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCC-2008), Vol. 2, pp. 1037-1041, 13-15 May 2008.
- [6] Ian O., Matti H. and Jari I, **“UWB Theory and Applications,”** England : John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [7] Theodore S. Rappaport, **“Wireless Communications Principles And Practice,”** United States of America : Prentice-Hall PTR, inc. 2002.
- [8] FCC, **“Revision of Part 15 of the Commission’s Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems,”** FCC 02-48, Apr. 2002.
- [9] S. Promwong and W. Hachitani, and J. Takada, **“Free Space Link Budget Evaluation of UWBIR Systems,”** 2004 International Workshop on Ultra Wideband Systems Joint with Conference on Ultra Wideband Systems and Technology (UWBST&IWUWBS), pp. 312-316, May 2004.
- [10] Kazimierz S, and Debra M, **“Ultra-Wideband Radio Technology,”** England: John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [11] Faranak Nekoogar, **“Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications,”** United States of America: Prentice-Hall PTR, Aug. 2005
- [12] James D. Taylor, **“Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems,”** USA: CRC Press. 1995.

- [13] M.Ghavami, L.B.Michael and R.Kohn, "**Ultra wideband signals and systems in communication engineering,**" England: John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [14] Ian O., Matti H. and Jari I, "**UWB Theory and Applications,**" England : John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [15] Ralph S. Carson, "**High-Frequency Amplifiers Second edition,**" New york : John Wiley & Sons Ltd. 1982.
- [16] Theodore S. Rappaport, "**Wireless Communications Principles And Practice,**" United States of America : Prentice-Hall PTR, inc. 2002.
- [17] Apichit Pradabphon, Monchai Chamchoy, Pichaya Supanakoon, Sathaporn Promwong and Jun-ichi Takada. "**The Impacts of Body Shadowing on UWB Propagation in an Indoor Environment,**" Electrical Engineering Conference. 27<sup>th</sup>, vol.2, Sep. 2004. pp. 461-464.
- [18] T. Rappaport, "**Wireless Communications,**" Upper saddle River: Prentice- Hall, second ed, 2002.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

#### งานประชุมในระดับนานาชาติ

1. P. Panthap and S. Promwong. "Performance Analysis of UWB Propagation Channel with Indoor to Outdoor Channel Model," The 1<sup>st</sup> Joint International Conference on Information Communication Technology (JICT2007), vol. 1, pp. 238-241, Dec. 2007.

#### งานประชุมในระดับนานาชาติ

2. S. Promwong and P. Panthap, "Experimental Evaluation of Complex Form Friis' Transmission Formula with Indoor/Outdoor for Ultra Wideband Inpulse Radio," International Conference on Computer and Communication Engineering(ICCCE-2008), Vol. 2, pp. 1037-1041, May 2008.

JICT  
2007

# Proceedings

Joint International Conference  
on Information Communication Technology



JICA



TOKAI  
UNIVERSITY



MEIJI  
UNIVERSITY

ECTI  
Association

日本シミュレーション学会  
JSST  
Japan Society for Simulation Technology

19-22 December 2007  
Donchan Palace Hotel, Vientiane, Lao PDR



JICT  
2007

JICT  
2007

JICT  
2007

JICT  
2007

JICT  
2007

JICT  
2007

JICT  
2007

# PERFORMANCE ANALYSIS OF UWB PROPAGATION LOSS WITH INDOOR TO OUTDOOR CHANNEL MODEL

Paungsak Panthap and Sathaporn Promwong

Department of Information Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.  
E-mail: {s9061011,kpsathap}@kmitl.ac.th

## ABSTRACT

The radio propagation channel between indoor and outdoor is very complicated and difficult to predict. In this paper we discuss the experiment of the ultra wideband propagation loss based on Friis' transmission formula. This formula is not directly applicable and the waveform distortion may degrade the transmission performance as well. The transmission waveform and the matched filter reception are proposed in the extension of the Friis' transmission formula to ultra wideband system. We carry out an experiment between indoor to outdoor in King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. The experiments are operated in the frequency band from 3 GHz to 11 GHz and direct link is covered by a vector network analyzer. Some experimental examples are shown.

## 1. INTRODUCTION

Ultra wideband (UWB) technology have attracted a great deal of attention because UWB systems are wide bandwidth, low cost, high data rates, precise positioning capability, extremely low interference and low power consumption potentials [1]-[5]. The UWB systems transmit pulses with power spectral density (PSD) in the range of the ultra wide frequency. The UWB have been allowed to operate across a range 3.1 GHz to 10.6 GHz of frequency bands defined by Federal Communications Commission (FCC) [6] with negligible interference to existing systems in that band.

The measurements of indoor to outdoor propagation channel is very important. Their datas are useful to predict the maximum allowable data rates because of the intersymbol interference and used to improve the propagation performance. Although, the experimental study of indoor to outdoor propagations for UWB systems are already reported [7], there is no consideration about the improvement of transmission performance.

In this paper, the free space transfer function of UWB system with indoor to outdoor are evaluated and we improve by using the extended Friis' transmission formula. The measurement is performed between the corridor (indoor) and parking area (outdoor) environments. The matched filter is used to maximize the SNR. The optimum matched filter and the transmitted signal template are considered. The transmission gain is obtained from the optimum matched filter. The results and conclusion are discussed in this paper.

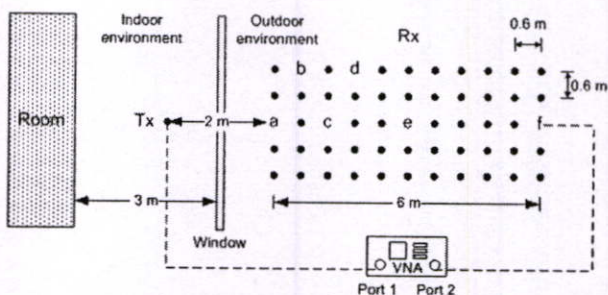


Figure 1. The measurement system model.

Table 1. The parameters of experiment

Parameter	Value
Center frequency	6.85 GHz
Spectral bandwidth	7.50 GHz
Frequency range	3 GHz ~ 11 GHz
Number of frequency point	801
Tx antenna height	2.65 m
Rx antenna height	2.65 m
Tx and Rx separate	2-8 m
Grid dimension	0.6 m × 0.6 m
Antenna type	Biconical

## 2. MEASUREMENT SYSTEM

### 2.1. Measurement scheme

The complex transfer functions can be measured by using the vector network analyzer (VNA). However, this transfer function is a product of transfer functions between transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas that is the free space channel.

### 2.2. Measurement setup

The VNA was operated in the response measurement mode from 3 GHz to 11 GHz, where port-1 was used as the Tx port and port-2 was used as the Rx port, respectively. Both Tx and Rx antennas were fixed at the height of 2.65 m. We choose the biconical antenna for Tx and Rx antennas.

In this experiment, the transfer function of indoor to outdoor environments is measured. For the Tx antenna is in an indoor environment, while the Rx antenna is in the outdoor environment and it is varied its positions as shown in Fig. 1.

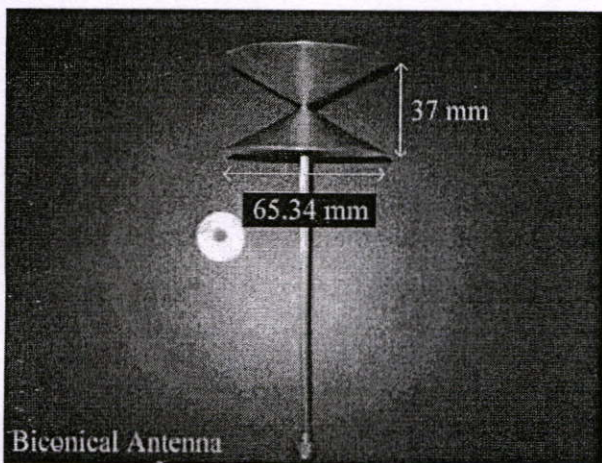


Figure 2. Geometric and dimension of biconical antenna.

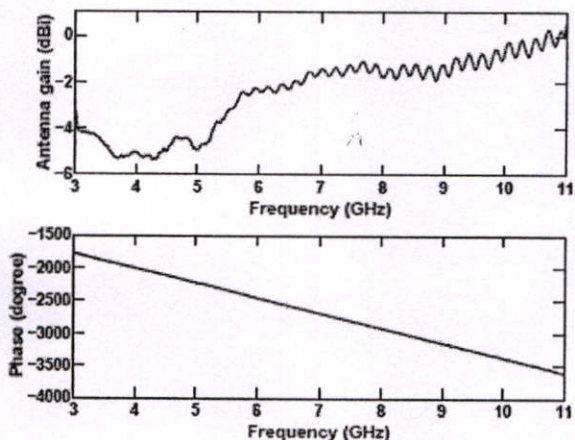


Figure 3. Magnitude and phase of antenna transfer function.

2.3. Antenna under test

The geometric and dimension of biconical antenna are shown in Fig. 2 and the magnitude and phase of the transfer function of each antenna are shown in Fig. 3.

2.4. Parameters of experiments

The important parameters for the experiments are listed in table 1. It is noted that calibration is done at the connectors of the cables to connect to the antennas.

3. UWB SIGNAL PROCESSING

The rectangular density spectral waveform covering the FCC band, that is 3.1 GHz to 10.6 GHz is used to test the distortion of the received UWB waveform. This waveform and its spectral density are expressed by

$$v_t(t) = \frac{1}{f_b} \begin{bmatrix} f_{\max} \text{sinc}(2f_{\max}t) \\ -f_{\min} \text{sinc}(2f_{\min}t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

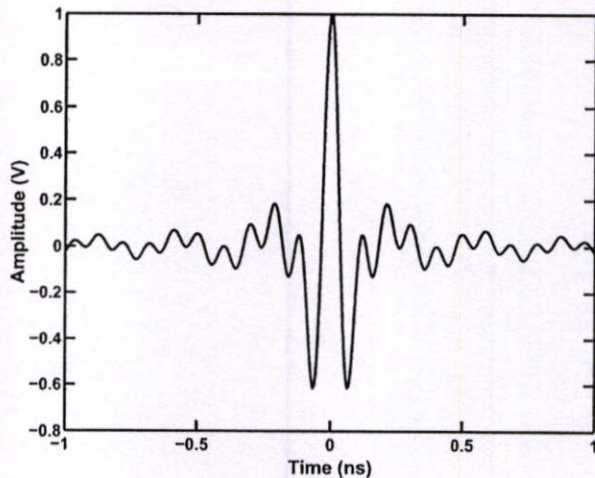


Figure 4. The transmitted signal waveform of UWB.

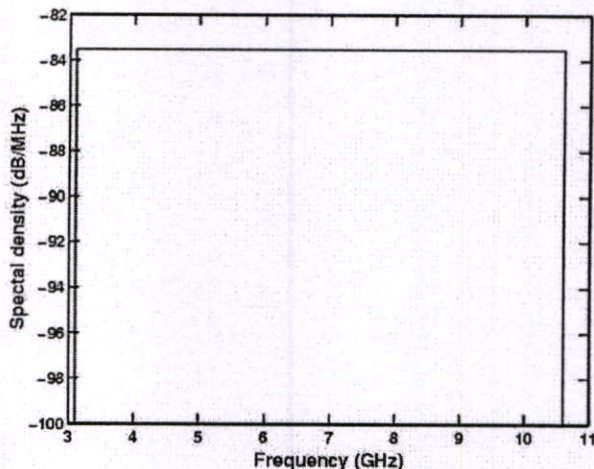


Figure 5. The transmitted spectral density of UWB.

$$V_t(f) = \begin{cases} \frac{1}{2f_b} & ||f| - f_c| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & ||f| - f_c| > \frac{f_b}{2} \end{cases}, \quad (2)$$

where  $f_{\min} = 3.1$  GHz is the minimum frequency and  $f_{\max} = 10.6$  GHz is the maximum frequency. The  $f_b$  is spectral bandwidth and we use  $f_c$  is the center frequency where  $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$ . This signal waveform in time domain and magnitude of its spectral density function are shown in Fig. 4 and Fig. 5 respectively.

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. 6.

The spectral density of the received waveform  $V_r(f)$  is the multiplication between the spectral density of the transmitted waveform and the channel frequency transfer function  $H_c(f)$  [7], which is obtained from the measurement. Therefore, the spectral density of the received waveform can be written as

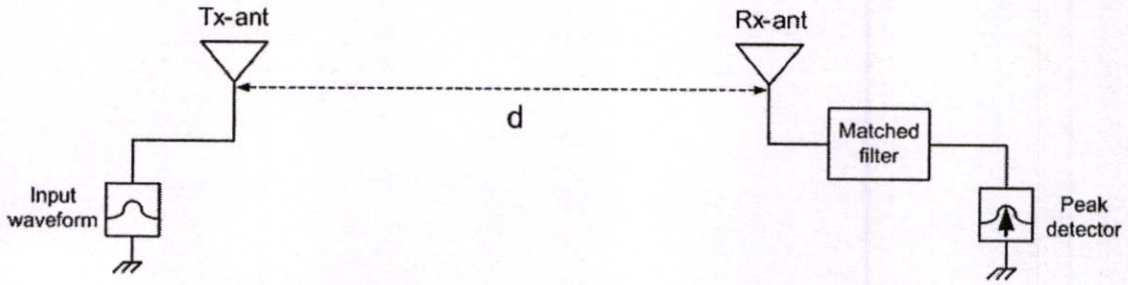


Figure 6. Block diagram of UWB transmission waveform.

$$V_r(f) = H_c(f) \cdot V_t(f). \quad (3)$$

The received waveform  $v_r(t)$  is calculated by using the inverse Fourier transform, which is

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} df. \quad (4)$$

At the receiver side, we use the matched filter to maximize the SNR of the receiver output. The matched filter  $H_{MF}(f)$  is defined as

$$H_{MF}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} V_r^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_r(f)|^2 df}}, \quad (5)$$

where  $V_r(f)$  is the spectral density of received signal.

The spectral density of the signal waveform at the output of the matched filter  $V_{MF}(f)$  can be calculated by using the transfer function of the matched filter  $H_{MF}(f)$  multiply by the spectral density function of the received waveform  $V_r(f)$  as

$$V_{MF}(f) = V_r(f) \cdot H_{MF}(f). \quad (6)$$

After we obtain the spectral density function at the output of the matched filter, we can obtain the matched filter receiver waveform  $v_{MF}(t)$  by using inverse Fourier transform, which is

$$v_{MF}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{MF}(f) e^{j2\pi ft} df. \quad (7)$$

After we obtain transmitted and received waveforms, the propagation loss can be calculated. It is defined as the ratio between the maximum absolute amplitude of the transmitted and the received waveforms and it can be written as

$$PL(d)[dB] = -20 \log \left[ \frac{\max|v_t(t)|}{\max|v_r(t, d)|} \right]. \quad (8)$$

Bit error rate (BER) can also be defined in terms of the probability of error

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt, \quad (9)$$

$E_b$  is the energy in one bit and  $N_o$  is the noise power spectral density, so  $\frac{E_b}{N_o}$  is a form of signal to noise ratio.  $b_r$  is rate of transfer (bps) and  $C_c$  is correlation coefficient

$$BER = Q \left[ \sqrt{\frac{(E_b/N_o) f_b C_c}{b_r}} \right]. \quad (10)$$

#### 4. RESULTS

From the result of the improvement by using optimum matched filter and transmitted signal waveform.

Fig. 7, shows the amplitudes of the received signal waveforms at the output of the matched filter using optimum matched filter. The amplitudes of the signal waveforms at the output of the matched filter when they are compared with the transmitted signal waveform. The peak amplitudes of optimum matched filter are higher than that of the transmitted signal waveform. Especially, in the position a defined at 2 meter, it has the amplitude at 1.26 mV, which it is the best peak than any points. In addition, at other points, their amplitude will be deplete depended on the distance rising.

In Fig.8, it depicts the path loss of indoor to outdoor propagation. From the result shows that when we send the signal along the distance, the path loss value has increased as the signal goes. Moreover, from the result, the most minimum path loss is the position(a) having the path loss value about 60.966 dB because it is the point arranged in the nearest position.

For Fig.9. shows BER performance of UWB transmission with indoor to outdoor. From analytical result, the BER value has decreased when SNR has risen in every points of observation. For corresponding result, the point a set at 2 meter is the one having the minimum BER because this point is very close to the transmitter according to the theory.

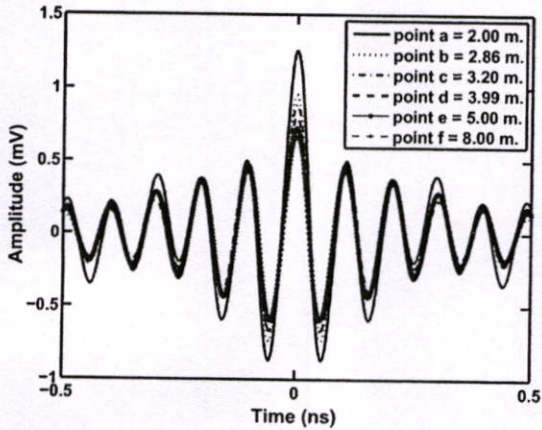


Figure 7. The received signal waveform at output matched filter.

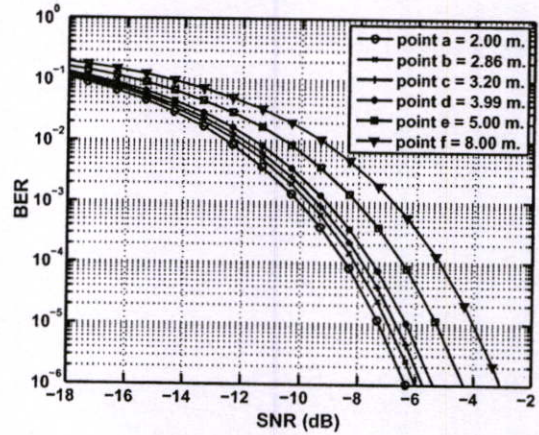


Figure 9. BER performance of UWB with propagations channel indoor to outdoor .

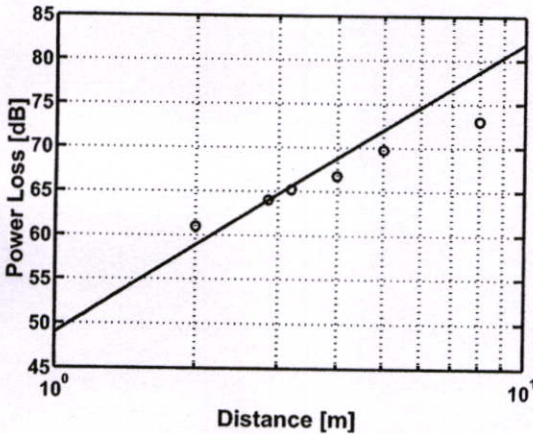


Figure 8. Path loss of UWB with propagations channel indoor to outdoor .

## 5. CONCLUSION

In this paper, we report the characteristics of indoor to outdoor propagations channel for UWB systems. The transmission gain can be improvement by using the optimum matched filter at the receiver side. Path loss and BER performance of UWB with indoor to outdoor propagations channel are proposed. Moreover, we consider the received waveform passed matched filter. Matched filter help us observe the received waveform more clearly to find the distortion occurring. This approach is more useful to design and evaluate the UWB wireless systems.

## 6. REFERENCES

- [1] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New Technology," 2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 2, pp. 1088- 1093, May 2001.
- [2] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: The emergence of an Importance RF Technology," 2001 Spring IEEE

Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 2, pp. 1169-1172, May 2001.

- [3] K. Siwiak, "Impact of ultra wide band transmissions on a generic receiver," 2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 2, pp. 1181-1183, May 2001.
- [4] J.D. Taylor, "Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems," CRC press, London, UK, pp. 670, 1994.
- [5] OSD/DARAPA, "Ultra-Wideband Radar Review Panel," Assessment of Ultra-Wideband (UWB) Technology. Arlington, VA.: DARPA, 1990.
- [6] Federal Communication Commissio, "Revision of part 15 of the commissions rules regrading UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr.2002
- [7] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, and P. Tangtisanon "Path Loss and Matched Filter Gain for UWB System," Proc. The 2004 international symposium on antennas and propagation (ISAP04), pp. 97-100, Aug. 2004.

**PROCEEDINGS OF THE  
INTERNATIONAL CONFERENCE ON  
COMPUTER AND COMMUNICATION ENGINEERING  
ICCCE'08**



**Global Links for Human Development**

ORGANISED BY:



Faculty of Engineering  
International Islamic University Malaysia

Istana Hotel  
Kuala Lumpur, MALAYSIA  
13 - 15 May 2008

CO-TECHNICAL SPONSORED BY:



**Volume I**

## Experimental Evaluation of Complex Form Friis' Transmission Formula with Indoor/Outdoor for Ultra Wideband Impulse Radio

Sathaporn Promwong, Payungsak Panthap  
 Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
 Email: {kpsathap,s9061011}@kmitl.ac.th

### Abstract

*In free space propagation loss we have studied to use the Friis' transmission formula in complex form to treat the UWB signals to take into account the waveform distortion due to the frequency characteristics of the antennas [1]. It is noted that Friis' transmission formula is applicable only in the far field region. In wireless personal area networks (WPANs) environments, however, the distance may not satisfy the far field condition. In this paper, we report the experimental results of the transmission signal waveform in a Fresnel regions for indoor and outdoor environments.*

### I. INTRODUCTION

The ultra wideband impulse radio (UWB-IR) transmission systems have attracted a great deal of attention because of its potentiality for application to short-range, high-speed mobile communications, low-power transmission, and so on. In order to minimize the interference with existent systems, the UWB is expected to be used mainly in wireless personal area networks (WPANs) for office and home networks. In the future, we should consider between indoor and outdoor environments for UWB communications.

Even if the channel is in line of sight (LOS), Friis' transmission formula cannot be directly applied to the UWB radio as the bandwidth of the pulse is extremely wide. Furthermore, simple comparison between waveforms of the transmitter and the receiver is not significant because of the distortion of the waveform caused by the frequency response of the antenna.

In this paper, we report the experimental results of the UWB transmission properties in a Fresnel regions for indoor and outdoor environments.

### II. FRIIS' TRANSMISSION FORMULA FOR UWB SYSTEM

The Friis' transmission formula is first expressed in terms of power [2]. Then it is extended in terms of the transmission signal waveform to consider the transfer function  $H_{Friis}$  [1]. Defining the transmitted and received voltage signals as  $V_r$  and  $V_t$ , respectively, and assuming the polarization of transmitter and receiver antennas match perfectly. We obtain

$$H_{Friis}(f, d) = \frac{V_r(f)}{V_t(f, d)} = H_f(f, d)H_r(f)H_t(f), \quad (1)$$

where  $H_f$  is the transfer function of free space,  $H_r$  and  $H_t$  are the transfer functions of the transmitting (Tx) and the receiving (Rx) antennas, which are implicit functions of directions, and  $d$  is the transmitter-receiver (TR) separation distance.

The transfer function of free space can be written as

$$H_f = \frac{\lambda}{4\pi d} \exp(-jkd), \quad (2)$$

is the free space transfer function where

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

is the propagation constant. The received waveform  $v_r(t, d)$  can be found by using

$$v_r(t, d) = v_t(t) \otimes h_{Friis}(t, d), \quad (4)$$

where  $v_i(t)$  is the transmitted signal waveform,  $\otimes$  is the convolution operator,  $h_{Friis}(t, d)$  is the impulse response of the extension of Friis' formula defined as:

$$h_{Friis}(t, d) = F^{-1}\{H_{Friis}(f, d)\} \quad (5)$$

where  $F^{-1}\{\cdot\}$  is the inverse Fourier transform.

### III. UWB TRANSFER FUNCTION MEASUREMENT

#### A. Measurement Scheme

By using the vector network analyzer (VNA), complex transfer functions can be measured. However, this transfer function is a product of transfer functions of Tx and Rx antennas as well as the free space channel. The transfer function of the Tx antenna, which is usually a standard antenna, shall be known in advance as the calibration data. The overall measurement scheme is summarized as follows:

Step 1) Calibration of the standard antenna. The standard antenna is calibrated by using the three-antenna method. In this method, three linearly-polarized antennas are required, but they do not have to be identical to one another. Three sets of measurements are performed using all combinations of the three antennas pointing toward the same directions as shown in Fig. 1. The result is a set of three simultaneous equations of the form

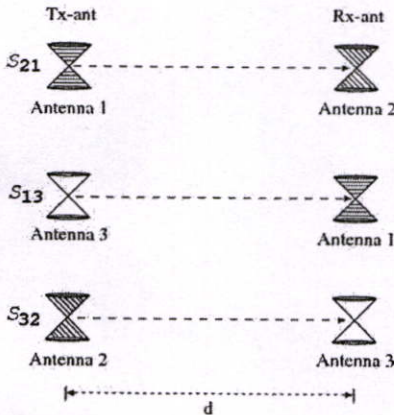


Figure 1. Three antenna model.

$$S_{21}(f) = H_1(f)H_f(f, d)H_2(f), \quad (6)$$

$$S_{13}(f) = H_3(f)H_f(f, d)H_1(f), \quad (7)$$

$$S_{32}(f) = H_2(f)H_f(f, d)H_3(f), \quad (8)$$

where  $H_i(f)$  is the complex frequency transfer function of antenna  $i$ ,  $S_{ji}$  is the measurement result by using Tx antenna  $i$  and Rx antenna  $j$ ,  $d$  is the distance between antennas, and  $H_f(f, d)$  is the complex transfer function of free space. Then, we can estimate the complex frequency transfer function of the antennas by using these equations

$$H_1(f) = \sqrt{\frac{S_{21}(f)S_{32}(f)}{S_{13}(f)H_f(f, d)}}, \quad (9)$$

$$H_2(f) = \sqrt{\frac{S_{21}(f)S_{13}(f)}{S_{32}(f)H_f(f, d)}}, \quad (10)$$

$$H_3(f) = \sqrt{\frac{S_{32}(f)S_{13}(f)}{S_{21}(f)H_f(f, d)}}, \quad (11)$$

Step 2) The transfer function of the antenna under test (AUT) is measured. By using the standard antenna and the AUT as Tx and Rx antennas respectively, the transfer function between Tx and Rx antenna ports is expressed as

$$S_{21}(f) = H_{AUT}(\theta, \varphi, f)H_f(f, d)H_{Std}(f), \quad (12)$$

and the transfer function of AUT is obtained by

$$H_{AUT}(\theta, \varphi, f) = \frac{S_{21}(f)}{H_f(f, d)H_{Std}(f)}, \quad (13)$$

#### B. Measurement Setup

The VNA was operated in the response measurement mode, where Port-1 was the transmitter port (Tx) and Port-2 was the receiver port (Rx), respectively. Biconical antennas with the maximum diameter of 65.3 mm and the length of 37 mm are used both as the standard antennas and as AUT. The measurement was done in the anechoic chamber. Both Tx and Rx antennas were fixed at the height of 1.80 m

and separated at a maximum distance of 4 m shown in Fig. 2.

C. UWB Antennas

The geometry and dimensions of the antenna and its characteristics are shown in Fig. 3 and 3. From Fig. 3 the largest dimension of each Tx and Rx antennas are the inclined height  $D_t = D_r = 75$  mm. The largest dimension of the antenna considering the field regions are  $D = D_t + D_r = 150$  mm. For the whole UWB frequency spectrum, the inner boundary distance of the

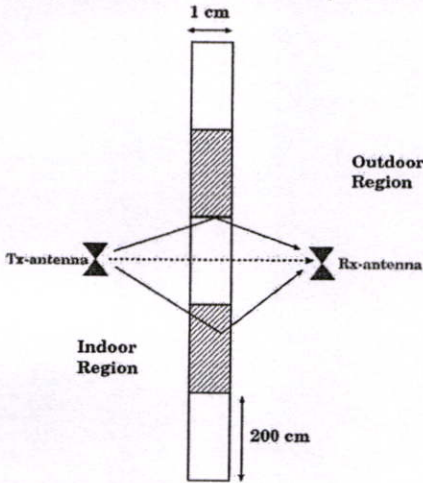


Figure 2. Measurement setup.

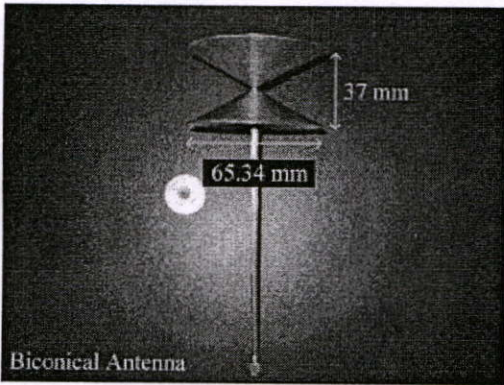


Figure 3. Geometry and dimensions of the biconical antenna.

Fresnel region is 0.21 m while the outer boundary distance is 0.47 m. The inner boundary distance of the far field region for the whole UWB frequency spectrum is 1.59 m. Then, 0.4 m TR separation distances are chosen for the Fresnel region, while 2.0 m TR separation distances are chosen for the far field

region. The practical maximum measured distance, 4 m, is chosen as reference distance to estimate the accuracy of the antenna transfer function. The Tx and Rx antennas are assumed to be identical.

D. UWB Transmitted Signal Waveform

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 [3], i.e., 3.1 ~ 10.6 GHz is used to test the distortion of the received UWB waveform. This waveform is expressed by

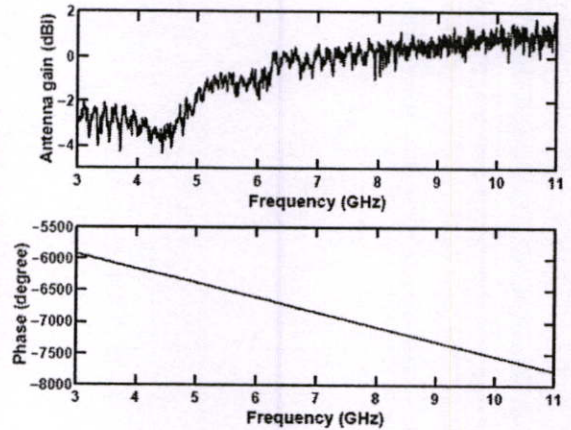


Figure 4. The antenna transfer function.

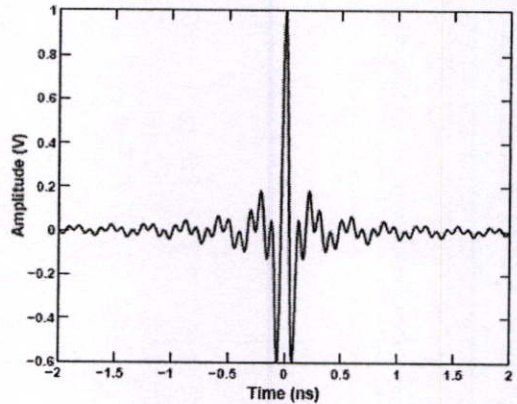


Figure 5. The UWB transmitted signal waveform.

$$v_i(t) = \frac{1}{f_b} [f_{\max} \sin c(2f_{\max}t) - f_{\min} \sin c(2f_{\min}t)] \quad (14)$$

where  $f_{min} = 3.1$  GHz is the minimum frequency,  $f_{max} = 10.6$  GHz is the maximum frequency,  $b = f_{max} - f_{min}$  and  $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ . This signal waveform in time domain shown in Fig. 5.

IV. EXPERIMENT RESULTS

The transfer function of Tx and Rx antennas are estimated by using the channel transfer function at 4 m, assuming that these antennas are with identical transfer function. The magnitude and phase of the antenna transfer function are shown in Fig. 4.

Figures 6 and 7 show the magnitude and Figs. 8 and 9 shows the phase of the transfer functions measured at 0.4 and 2.0 m distances. The measured values are compared with the predicted values using the antenna transfer function (Fig. 4) and complex form Friis' transmission formula.

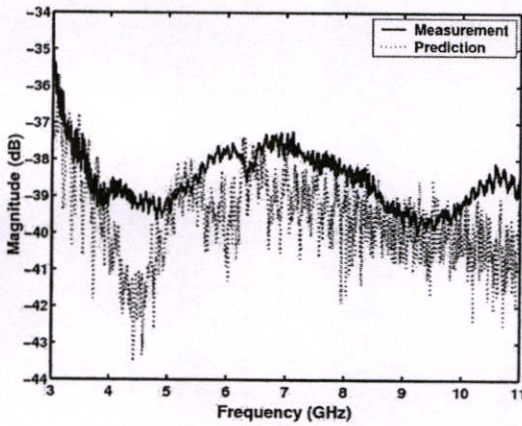


Figure 6. The antenna transfer function at a distance 0.4 m : magnitude.

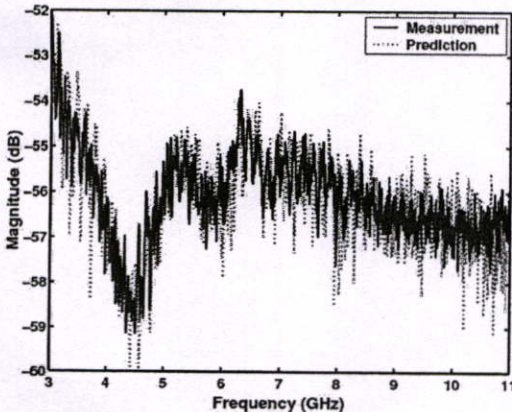


Figure 7. The antenna transfer function at a distance 2 m : magnitude.

Both results are almost identical in the far field region, but the differences of magnitude are observed in the Fresnel region. We can clearly see that in the Fresnel region, the measured magnitude results are greater than the predicted magnitude results. This is due to the radial field in the Fresnel region. In the far field region, the radial field can be negligible.

Figure 10 and 11 compares the transmission of the received UWB waveform presented in Fig. 5, by using the measured transfer functions and those predicted by using the complex form Friis' transmission formula and the antenna transfer function. We can see a little difference between the measured and the predicted waveforms in the Fresnel region. In the far field region on the other hand, the received waveforms are almost the same.

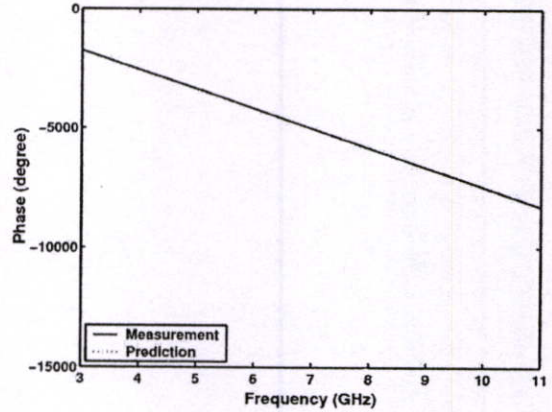


Figure 8. The antenna transfer function at a distance 0.4 m : phase.

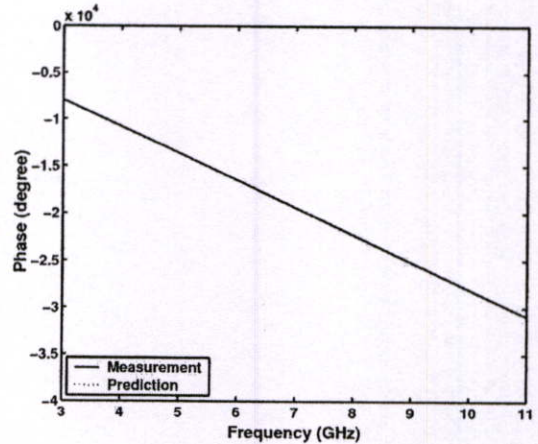


Figure 9. The antenna transfer function at a distance 2 m : phase.

Table 1 summarizes the results of Figs. 10 and 11 with respect to the path loss. As expected from Figs. 10 and 11, the difference of the path gain is more obvious in the Fresnel region. Table 2 shows the correlation between two waveforms corresponding to the measured and the predicted transfer functions. It has higher distortion in the Fresnel region. While in the far field region, the distortion is very small.

V. CONCLUSION

In this paper we presented the complex form Friis' transmission formula in the Fresnel region has been experimentally studied to consider the UWB free space channel model. The error of the path loss is observed in the Fresnel region with indoor to outdoor environments caused by the multipath. More comprehensive studies are necessary to consider the type of antennas and to find in multipath how to compensate the error.

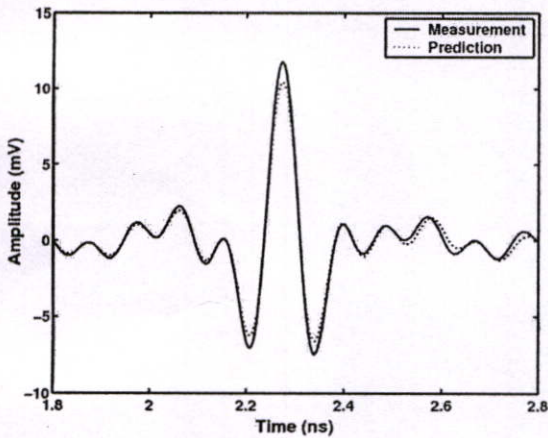


Figure 10. The received signal waveform at a distance 0.4 m.

TABLE 1. PATH LOSS OF THE RECEIVED UWB WAVEFORM.

	Path loss	
	0.4 m (dB)	2.0 m (dB)
Measured	38.65	56.10
Prediction	39.60	53.20

TABLE 2. THE PERCENT OF THE CORRELATION COEFFICIENT OF THE RECEIVED UWB WAVEFORM.

	Correlation coefficient	
	0.4 m (dB)	2.0 m (dB)
	(%)	(%)
Prediction	99.50	99.90

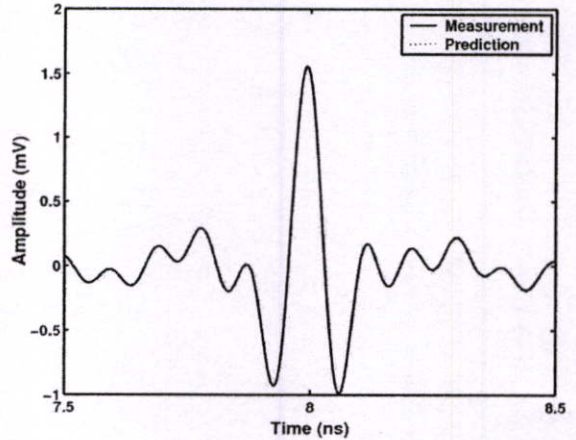


Figure 11. The received signal waveform at a distance 2.0 m.

REFERENCES

- [1] S. Promwong and W. Hachitani, and J. Takada, "Free Space Link Budget Evaluation of UWB-IR Systems," 2004 International Workshop on Ultra Wideband Systems Joint with Conference on Ultra Wideband Systems and Technology, to be presented, May 2004.
- [2] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," Proc. IRE, Vol 34, no 5, pp. 254-256, May 1946.
- [3] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commissions Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems," First Report and Order, FCC 0248, Apr. 2002.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายพยุหศักดิ์ ปานเทพ  
 วัน เดือน ปีเกิด 3 กรกฎาคม 2523  
 ที่อยู่ 25/4 หมู่ 1 ต.ตลิ่งชัน อ.ท่าศาลา  
 จ.นครศรีธรรมราช 80160  
 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
 สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ จากภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2547

## ผลงานวิจัย

- พ.ศ.2550 P. Panthap and S. Promwong. Performance Analysis of UWB Propagation Channel with Indoor to Outdoor Channel Model. The 1<sup>st</sup> Joint International Conference on Information Communication Technology (JICT2007), vol. 1, pp. 238-241, Dec. 2007.
- พ.ศ.2551 S. Promwong and P. Panthap, "Experimental Evaluation of Complex Form Friis' Transmission Formula with Indoor/Outdoor for Ultra Wideband Impulse Radio" International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE-2008), Vol. 2, pp. 1037-1041, 13-15 May 2008.