

การศึกษาค่าการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้างยิ่ง
ในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร

EXPERIMENTAL STUDY OF ULTRA WIDEBAND
PROPAGATION LOSS IN AN INDOOR ENVIRONMENT

เกียรติชัย ลิขัยกิจเจริญ

KEATICHAI LEECHAKITJAROEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2637-7

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาทดลองของการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้างยิ่ง
ในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร

EXPERIMENTAL STUDY OF ULTRA WIDEBAND
PROPAGATION LOSS IN AN INDOOR ENVIRONMENT

เกียรติชัย ลีชัยกิจเจริญ

KEATICHAI LEECHAIKITJAROEN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 63645
วัน,เดือน,ปี..... 30 ส.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2637-7

**EXPERIMENTAL STUDY OF ULTRA WIDEBAND
PROPAGATION IN AN INDOOR ENVIRONMENT**

KEATICHAI LEECHAIKITJAROEN

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

2006

ISBN 974-15-2637-7

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาทดลองของการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้าง ยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร
นักศึกษา	นายเกียรติชัย ลีชัยกิจเจริญ
รหัสประจำตัว	46064605
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร เพื่อการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการ รับ-ส่ง สัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งที่มีความเหมาะสม โดยแสดงถึงค่าการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่ง ช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 11 GHz โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ เป็นอุปกรณ์หลักในการวัดและบันทึกข้อมูล โดยผลที่ได้จากการวัดจะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สามารถทำให้เห็นถึงค่าการสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่ง ซึ่งผลที่นำมาประเมินค่าและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ได้แก่ ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (pdf) ค่าความหนาแน่นสะสม (cdf) และผลที่ได้จากการทดสอบในแต่ละแบบจำลองได้นำไปสร้างให้อยู่ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอย เพื่อสามารถแสดงให้เห็นถึงค่าการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งในแต่ละแบบจำลองภายใต้สภาวะแวดล้อมภายในอาคาร จากการศึกษาวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์และการพิจารณาการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณแถบกว้างยิ่งในอนาคต

Thesis Title	Experiment Study of Ultra Wideband Propagation Loss In An Indoor Environment
Student	Mr. Keatichai Leechaikitjaroen
Student ID.	46064605
Degree	Master of Engineering
Programme	Information Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Mr. Sathaporn Promwong

ABSTRACT

This thesis presents the experimentation of the ultra wideband propagation in the indoor environments. The purpose of this experimentation is to find out the appropriate positions for the receiver and transmitter which also show the parameters that effect to the ultra wideband propagation in the indoor environments, for example, the measurement of the path loss of the transmitted and received signal from 3 GHz to 11 GHz by using VNA and then analyze the results to find out any parameters that have been effected to the ultra wideband propagation in the indoor environments, then compare the parameters from the vary environment measurements, finally we can see the path loss, pdf, cdf, that it's very useful for the future work.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้ช่วยกรุณาให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาและคอยดูแลตลอดระยะเวลาที่ได้ทำการศึกษาวิจัย รวมทั้งตรวจทานวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชญ์ สุพรรณกุล ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

ขอขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่คอยดูแลให้กำลังใจ ในการทำงานมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยมาถึงอยู่ถึงจุดนี้ได้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือในการทดลองและให้คำแนะนำมา โดยตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เกียรติชัย ถีชัยกิจเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 เปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบเก่า.....	3
1.6 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.7 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย.....	4
บทที่ 2 เทคโนโลยีสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	6
2.1 กล่าวนำ.....	6
2.2 ลักษณะเฉพาะของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	8
2.2.1 จุดเด่นของระบบแบบแถบกว้างยิ่ง.....	9
2.3 กฎข้อบังคับของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	11
2.3.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา.....	11
2.3.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้างยิ่ง.....	14
3.1 การวิเคราะห์การสูญเสียของสัญญาณ	14
3.1.1 การสูญเสียกำลังงาน.....	14
3.1.2 การกระจายทางเวลา	15
3.1.3 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น.....	16
3.1.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นสะสม.....	16
3.2 ทฤษฎีการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่.....	17
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	23
บทที่ 4 รูปแบบและขั้นตอนการวิจัย.....	32
4.1 กล่าวนำ.....	32
4.2 การเตรียมการทดลองวัด	33
4.2.1 รูปแบบของการทดลองวัด.....	33
4.2.2 สายอากาศที่ใช้ในการทดลองวัด.....	33
4.3 การวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1.....	35
4.3.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	35
4.3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	37
4.3.3 แบบจำลองของสัญญาณที่ใช้ส่ง.....	38
4.4 การวัดช่องสัญญาณภายในอาคารรูปแบบที่ 2.....	39
4.4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	40
4.5 การวัดช่องสัญญาณภายในอาคารรูปแบบที่ 3	41
4.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
บทที่ 5 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล.....	50
5.1 กล่าวนำ.....	50
5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดภายในอาคารแบบที่ 1.....	50
5.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดภายในห้องแบบที่ 2.....	54
5.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดภายในห้องแบบที่ 3.....	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	65
เอกสารอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก ก บททความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบการใช้แบนด์วิธของเทคโนโลยีสื่อสารข้อมูลไร้สาย.....	6
2.2 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....	12
2.3 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....	13
3.1 ตัวอย่างชุดข้อมูลในการวิจัย.....	28
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดแบบที่ 1.....	37
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดรูปแบบที่ 2.....	40
4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดรูปแบบที่ 3.....	41
5.1 ค่าสูญเสียเชิงวิถีต่อระยะทางในการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1.....	51
5.2 ค่าสูญเสียเชิงวิถีต่อระยะทางในการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารบริเวณที่ 1.....	54
5.3 ค่าสูญเสียเชิงวิถีต่อระยะทางในการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารบริเวณที่ 2.....	55
5.4 ค่าสูญเสียเชิงวิถีต่อระยะทางในการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารบริเวณที่ 3.....	58
5.5 ชุดข้อมูลสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1.....	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความหนาแน่นสเปกตรัมของระบบ UWB เปรียบเทียบกับระบบ Wi-Fi	1
2.1 สเปกตรัมความถี่โดย FCC ของระบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคาร.....	7
2.2 มาตรฐานของ IEEE 802.15.....	8
3.1 ระบบการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ และการแปลงสู่โดเมนเวลา โดยใช้ IFFT.....	17
3.2 โครงข่ายแบบ 2 พอร์ค.....	19
3.3 บล็อกโคอะแกรมของระบบ.....	21
3.4 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่.....	22
3.5 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนเวลา.....	23
3.6 กระบวนการสร้างแบบจำลอง	23
3.7 เส้นที่ใช้แทนชุดข้อมูลที่มีสองจุดได้โดยให้เงื่อนไขในข้อหนึ่งมีค่าน้อยที่สุด.....	26
3.8 เส้นที่ใช้แทนชุดข้อมูลที่มีสี่จุดได้โดยเงื่อนไขในข้อสองมีค่าน้อยที่สุด.....	26
3.9 แบบจำลองเชิงเส้นของคัวอย่างชุดข้อมูล.....	30
4.1 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical).....	34
4.2 คุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่.....	34
4.3 ขนาด (Antenna gain) และเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศ.....	35
4.4 แบบจำลองลักษณะห้องและอุปกรณ์ที่ใช้วัดภายในอาคารแบบที่ 1.....	36
4.5 กำหนดจุดของตัวรับ-ส่งสัญญาณ.....	36
4.6 การติดตั้งอุปกรณ์วัดสัญญาณแถบกว้างยิ่งภายในอาคาร.....	37
4.7 รูปแบบสัญญาณส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง.....	38
4.8 แบบจำลองลักษณะห้องและอุปกรณ์ที่ใช้วัดภายในอาคารแบบที่ 2.....	39
4.9 แบบจำลองลักษณะห้องและอุปกรณ์ที่ใช้วัดภายในอาคารแบบที่ 3.....	41
4.10 ลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
5.1 ขนาดของฟังก์ชันการส่งผ่านตำแหน่งที่ 1, 4 และ 7 ในระยะห่าง 1 เมตร.....	50
5.2 เฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านตำแหน่งที่ 1, 4 และ 7.....	51
5.3 ระยะของจุดในการทดลองและค่าสูญเสียเชิงวิถี.....	53
5.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่บริเวณ 1.....	56
5.5 ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นสะสมที่บริเวณ 1	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่บริเวณ 2	57
5.7 ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นสะสมที่บริเวณ 2.....	57
5.8 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่บริเวณ 3.....	59
5.9 ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นสะสมที่บริเวณ 3	59
5.10 เปรียบเทียบความหนาแน่นความน่าจะเป็นในแต่ละบริเวณ.....	60
5.11 แบบจำลองเชิงเส้นของค่าการสูญเสียเชิงวิถิแบบที่1.....	61
5.12 แบบจำลองเชิงเส้นของค่าการสูญเสียเชิงวิถิแบบที่2 บริเวณที่ 1.....	62
5.13 แบบจำลองเชิงเส้นของค่าการสูญเสียเชิงวิถิแบบที่ 2 บริเวณที่ 2.....	63
5.14 แบบจำลองเชิงเส้นของค่าการสูญเสียเชิงวิถิแบบที่ 3.....	64

ความหมายของคำย่อ

การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด (Amplitude-Shift Keying)	ASK
หน่วยงานวิจัยขั้นสูงของสหรัฐ (Defense Advanced Research Projects Agency)	DARPA
ออสซิลโลสโคปสุ่มตัวอย่างแบบดิจิทัล (Digital Sampling Oscilloscope)	DSO
สถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standards Institute)	ETSI
องค์การบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Aviation Administration)	FAA
คณะกรรมการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission)	FCC
โดเมนความถี่ (Frequency Domain)	FD
ช่องทางเพื่อการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ทั่วไป (General Purpose Interface Bus)	GPIB
ระบบบอกพิกัด (Global Positioning Systems)	GPS
สถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers)	IEEE
ฟูรีเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform)	IFFT
สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union)	ITU
ระดับแนวสายตา (Line of Sight)	LOS
สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง (Meander Line Antenna)	MLA
การมอดูเลตทางขนาดของพัลส์ (Pulse Amplitude Modulation)	PAM
คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)	PC
ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (Power Delay Profile)	PDP
ความสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)	PL
การมอดูเลตทางตำแหน่งของพัลส์ (Pulse Position Modulation)	PPM
โดเมนเวลา (Time Domain)	TD
ระบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wide Band)	UWB
กลุ่มทำงานเกี่ยวกับระบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wide Band Working Group)	UWBWG
เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer)	VNA
เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network)	WPAN

ความหมายของคำย่อ (ต่อ)

แอมแปร์ (Ampere)	<i>A</i>
เดซิเบล (Decibel)	<i>dB</i>
ฟารัด (Farad)	<i>F</i>
เฮิรตซ์ (Hertz)	<i>Hz</i>
กิกะเฮิรตซ์ (Gigahertz)	<i>GHz</i>
เมตร (meter)	<i>m</i>
วินาที (Second)	<i>s</i>
นาโนวินาที (Nanosecond)	<i>ns</i>
วัตต์ (Watt)	<i>W</i>
มิลลิวัตต์ (Milliwatt)	<i>mW</i>
สัดส่วนแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth)	<i>B_f</i>
ความเร็วแสง (Velocity of light), $c = f\lambda = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \approx 3 \times 10^8, m/s$	<i>c</i>
ระยะทาง (distance), <i>m</i>	<i>d</i>
ความถี่ (Frequency), <i>Hz</i>	<i>f</i>
ค่าความถี่บนของระบบการสื่อสาร	<i>f_H</i>
ค่าความถี่ล่างของระบบการสื่อสาร	<i>f_L</i>
อัตราขยายของสายอากาศรับ (Receiver gain), <i>dB</i>	<i>G_R</i>
อัตราขยายของสายอากาศส่ง (transmitter gain), <i>dB</i>	<i>G_T</i>
ฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency transfer function)	<i>H(ω)</i>
จำนวนจุดความถี่ (Sampling number)	<i>N_{smp}</i>
กำลังงานที่รับได้ (Receive power), <i>W</i>	<i>P_R</i>
กำลังงานที่ส่ง (Transmitt power), <i>W</i>	<i>P_T</i>
เครื่องรับ (Receiver)	<i>Rx</i>
สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient)	<i>S₂₁</i>
เวลา (Time), <i>s</i>	<i>t</i>
เครื่องส่ง (Transmitter)	<i>Tx</i>
ค่าคงที่การลดทอน (Attenuation constant), $Np \cdot m^{-1}$ หรือ $dB \cdot m^{-1}$	<i>α</i>
ฟังก์ชัน อิมพัลส์	<i>δ(t)</i>

ความหมายของคำย่อ (ต่อ)

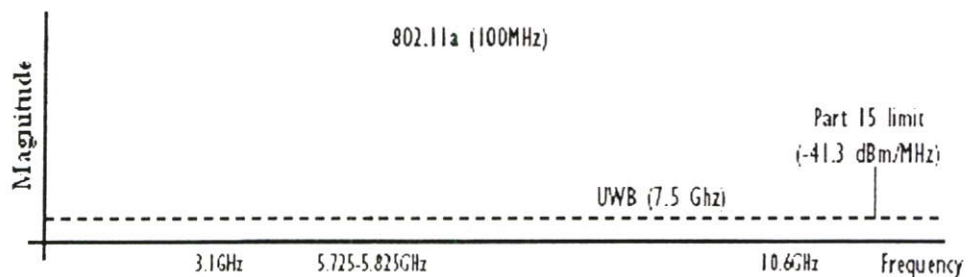
ความยาวคลื่น (Wavelength), m	λ
อิมพีแดนซ์อินทรินซิก (Intrinsic impedance), $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}, \Omega$	η
สภาพยอม (Permittivity), $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r, Fm^{-1}$	ϵ
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)	ϵ_r
สภาพยอมของอวกาศว่าง (Permittivity of free space), $\epsilon_0 \approx 1/36\pi \times 10^{-9}, Fm^{-1}$	ϵ_0
ความซึมซาบได้ (Permeability), $\mu = \mu_0 \mu_r, Hm^{-1}$	μ
ความซึมซาบได้ของอวกาศว่าง (Permeability of free space), $\mu_0 \approx 400\pi \times 10^{-9}, Hm^{-1}$	μ_0
ความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (Relative permeability)	μ_r
ค่าเฉลี่ยเวลาประวิง (Mean excess delay), s	$\bar{\tau}$
ค่าการแผ่ประวิง (RMS delay spread), s	σ_τ
ฟังก์ชันสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)	$\rho(d)$

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารในประเทศไทย การใช้งานการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้จากในสำนักงานหรือ อาคารใหญ่ๆ จะมีเครื่องส่งสัญญาณคอยให้บริการ ทั้งในรูปแบบของการให้บริการเพื่อการศึกษา หรือ บริการแบบธุรกิจ ซึ่งตัวส่งสัญญาณที่ใช้งานในปัจจุบันยังเป็นระบบแถบความถี่แคบ หรือ IEEE 802.11 ซึ่งในอนาคตแน่นอนว่าความต้องการในการใช้ทรัพยากรช่องมียามากยิ่งขึ้นและจะมีการนำระบบของแถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra Wideband : UWB) มาใช้งานในลักษณะของการส่งสัญญาณแบบ โครงข่ายท้องถิ่นส่วนบุคคลแบบไร้สาย เนื่องจากคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการติดต่อสื่อสารภายในองค์กร หรือ โครงข่ายท้องถิ่นส่วนบุคคลแบบไร้สาย (Personal Area Network: PAN) ในระยะทางใกล้ๆ สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง มีความต้องการกำลังงานในการส่งต่ำ ซึ่งทำให้ไม่มีผลกระทบต่อระบบอื่นๆ ที่มีอยู่ เนื่องจากสัญญาณของ UWB ต่ำกว่าสัญญาณรบกวน โดยคาดว่าจะถูกนำมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ภายในอาคารเป็นหลัก ตัวอย่างเช่น คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายต่างๆ



รูปที่ 1.1 ความหนาแน่นสเปกตรัมของระบบ UWB เปรียบเทียบกับระบบ Wi-Fi

เทคโนโลยีการส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งคือ รูปแบบของการสื่อสารไร้สายที่แตกต่างจากการสื่อสารทางคลื่นความถี่วิทยุแบบอื่นๆ โดยจุดเด่นของระบบแบบแถบกว้างยิ่งคือเป็นระบบสื่อสารที่ปราศจากคลื่นพาห้ซึ่งไม่เหมือนกับระบบอื่น และสัญญาณในการส่งของระบบแบบแถบกว้างยิ่งจะเป็นสัญญาณพัลส์โดยจะเป็นพัลส์แคบๆ ขนาดประมาณ 0.2 นาโนวินาที จึงทำให้มีความหนาแน่นแถบความถี่ที่กว้างมาก ดังนั้นจึงแผ่กระจายครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้างในระดับกิกะเฮิร์ต (GHz) และเนื่องด้วยระบบนี้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงทำให้สามารถที่จะรองรับอัตรา

การส่งข้อมูลได้สูงถึง 110 Mbps ในระยะทางประมาณ 10 เมตร ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า สัญญาณพัลส์ที่ใช้มีขนาดที่แคบมากจึงทำให้ควิตีไซเคิล (Duty cycle) มีค่าต่ำ จึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบนี้มีการใช้กำลังที่ใช้งานต่ำไปด้วยในรูปที่ 1.1 ความหนาแน่นสเปกตรัมของระบบ UWB เปรียบเทียบกับระบบ Wi-Fi ในการใช้งานจริงของระบบนี้จะมีลักษณะการนำไปใช้ภายในอาคารซึ่งมักจะมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณและสัญญาณพัลส์ด้านรับในการสื่อสาร เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ ผนัง หน้าต่าง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งสามารถที่จะส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งได้เช่นกัน นั่นก็คือสภาวะแวดล้อมภายในอาคารนั่นเอง เพราะมีความเป็นไปได้ที่ลักษณะของตำแหน่งในการวางจอร์บ-ส่งของสัญญาณจะไปลดทอนหรือเกิดความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณด้านรับ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบว่าลักษณะสภาพแวดล้อมภายในอาคารส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่วัดได้และสัญญาณพัลส์ด้านรับในการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งอย่างไร

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้างยิ่งในแต่ละสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร เพื่อนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับวิจัยหรือปรับปรุงและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณให้ดีขึ้นในระบบแถบกว้างยิ่งต่อไปในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร โดยพิจารณาอยู่ 2 ส่วนคือการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งภายในอาคารและการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเก็บข้อมูลที่เกี่ยวกับการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 11 GHz และนำผลการวัดสัญญาณที่ได้ไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงให้เห็นถึงผลการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร โดยพิจารณาในแต่ละจุดของสัญญาณที่รับได้ที่มีระยะห่างต่างกันและตำแหน่งของมุมที่ต่างกันและการสูญเสียต่อระยะทาง (Path-loss) การลดทอนกำลังงานของสัญญาณที่รับได้และผลของการกระจายทางเวลาของช่องสัญญาณคือ ค่าเฉลี่ยเวลาประวิง (Mean excess delay) และค่าการแผ่ประวิง (RMS delay spread) ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะทางเวลาของสัญญาณที่เข้ามาถึงยังสายอากาศด้านรับ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบและตัดสินใจในการกำหนดตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งภายในอาคาร โดยคำนึงถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่ง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยังเป็นเทคโนโลยีที่ส่งข้อมูลเป็นสัญญาณพัลส์ ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศนั้นอาจจะถูกลดทอนกำลังงานอันเนื่องมาจากสถานะแวดล้อมรวมไปถึงระยะทางในการส่งสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่ง ซึ่งในการขั้นตอนของการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสถานะแวดล้อมรอบข้าง โดยจะพิจารณาถึงค่าการสูญเสียของสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งในแต่ละจุดที่รับสัญญาณได้ และระยะทางระหว่างสายอากาศด้านรับที่เปลี่ยนไปรวมถึงลักษณะสถานะแวดล้อมภายในอาคารด้วยว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะใดและส่งผลกระทบต่อผลการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งอย่างไร โดยในเบื้องต้นคาดว่าในแต่ละตำแหน่งของการกำหนดจุดรับสัญญาณถึงจะมีตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันแต่การสูญเสียของสัญญาณก็จะแตกต่างกันไปด้วย

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่ง ในสถานะแวดล้อมภายในอาคารซึ่งจะพิจารณาบนพื้นฐานของการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยในการวัดสัญญาณใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์โดยใช้สายอากาศชนิดกรวยคู่ และทำการวัดตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 11 GHz ครอบคลุมช่วงความถี่ที่กำหนดให้ใช้งานในการสื่อสาร ซึ่งถูกกำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communication Commission : FCC) [1] ในขั้นตอนของการวัดนั้นได้ทำการวัดสัญญาณภายในอาคารโดยการกำหนดแบบจำลองออกเป็น 3 รูปแบบ เพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงกับการนำไปใช้งานจริงภายในอาคาร โดยทำการกำหนดเงื่อนไขและพารามิเตอร์ต่างๆ และนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบถึงผลการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งในสถานะแวดล้อมภายในอาคารว่าทั้งสามรูปแบบมีการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นที่ต่างกันหรือไม่ อย่างไร เพื่อที่จะได้นำข้อมูลของการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งในสถานะแวดล้อมภายในอาคารมาเป็นแนวทางในการลดการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งเมื่อมีการนำมาใช้งานจริง

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบเก่า

เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งที่นำไปใช้เกี่ยวกับการสื่อสารนั้นยังอยู่ในขั้นตอนของการทำมาตรฐานและในส่วนของวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้าง

ยังมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียจากการส่งสัญญาณและการรับสัญญาณ [3] แต่ในการนำมาใช้งานจริงสิ่งที่ผลกระทบต่อ การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้างยิ่งอย่างมากคือ สภาวะแวดล้อม

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอหลักการวัดสัญญาณและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เพื่อให้เห็นถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร โดยมีการกำหนดแบบจำลองเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ในแต่ละจุดที่มีการส่งสัญญาณและการรับสัญญาณที่แตกต่างกันภายใต้สภาวะแวดล้อมภายในอาคารเรียนภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ เพื่อจะได้นำผลที่ได้จากการวิจัยการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นมาอ้างอิงเมื่อต้องการที่จะนำสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งเข้ามาใช้งานจริงในสภาวะแวดล้อมที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

1.6 ขอบเขตการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารบนพื้นฐานของการกำหนดแบบจำลองในการวัดสัญญาณแล้วนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยการหาค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้เห็นว่าในแต่ละแบบจำลองที่ได้กำหนดขึ้นทั้งสามแบบจำลองนั้นมีการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นอย่างไรจากนั้นทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอยแบบเชิงเส้น

1.7 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน โดยบทที่ 1 จะเป็นบทนำเพื่อกล่าวถึงวัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเปรียบเทียบกับ การวัดสัญญาณภายในอาคารในแต่ละสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันไป

บทที่ 2 เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งจะเป็นการกล่าวให้เห็นถึงความเป็นมาของระบบการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่งรวมถึงคุณสมบัติ จุดเด่นของสัญญาณ กฎและข้อบังคับของระบบการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่ง เทคนิคในการมอดูเลตในระบบการสื่อสาร

บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการแถบความถี่กว้างยิ่ง ในบทนี้จะได้นำกล่าวไปถึงการวัดช่องสัญญาณ และรูปแบบของการวัดในโดเมนความถี่ รวมถึงพารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์ในเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 4 ได้ทำการวิจัยโดยการวัดทดสอบสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่ง โดยใช้สายอากาศแบบกรวยคู่และการจัดรูปแบบของการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งภายในสภาวะแวดล้อมแบบภายในอาคาร

บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลในบทนี้จะได้กล่าวถึงผลการวัดที่ได้จากการจัดรูปแบบของสายอากาศในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณในแต่ละจุด

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในบทนี้จะสรุปผลของการทดลองวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งของสามรูปแบบจำลองการวัดที่ได้กำหนดขึ้นเพื่อให้เห็นถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารรวมทั้งได้นำเสนอแนะแนวทางในการนำไปศึกษาวิจัยต่อในการวิจัยการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่ง

บทที่ 2

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

2.1 กล่าวนำ

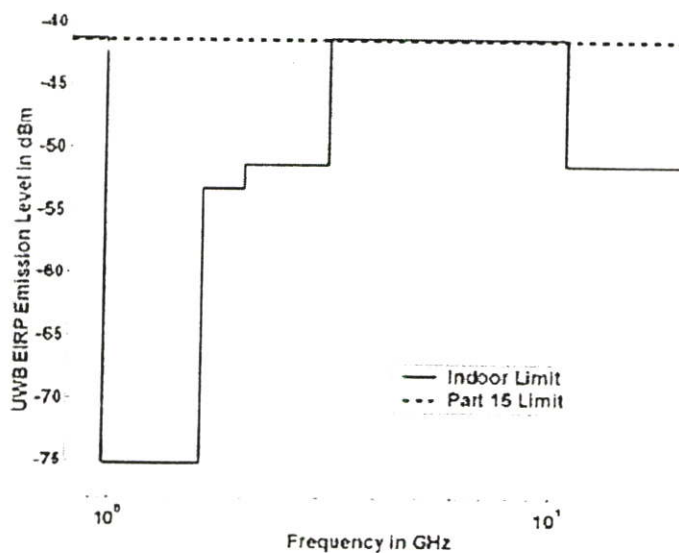
เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra – Wideband; UWB) มีประวัติย้อนหลังมายาวนานตั้งแต่สมัยที่ มาร์ค โคนี (Marconi) ได้ทดลองสาธิตเครื่องส่งสปาร์กแก๊ป (Spark gap) ในการส่งสัญญาณวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกในปี 1901 ซึ่งใน 20 ปีที่ผ่านมา ระบบแถบกว้างยิ่งถูกใช้สำหรับระบบเรดาร์ (Radar system) ระบบตรวจสอบ (Sensing) และระบบการสื่อสารของกองทัพ ต่อมาเมื่อเดือนพฤษภาคมปี ค.ศ. 2000 ทางคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission; FCC) [1] ได้ออกหนังสือ Notice of Proposed Rule Making (NPRM) ซึ่งเชิญชวนให้หน่วยงานต่าง ๆ นำเสนอข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่จะนำมาปรับปรุงแก้ไขกฎข้อบังคับของ FCC เพื่อควบคุมและจำกัดกำลังส่งสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งที่ใช้ในการส่งข้อมูลโดยข้อบังคับใหม่นี้ได้ถูกประกาศออกมาใช้งานเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ปี ค.ศ. 2002 ที่ผ่านมา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ FCC ออกมาชี้ขาดที่ระบบแถบกว้างยิ่งควรถูกใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารข้อมูลผ่านช่องการสื่อสารข้อมูลเช่นเดียวกับระบบเรดาร์และการใช้เพื่อความปลอดภัยและแถบความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งที่ได้รับการจัดสรรอยู่ที่ 7.5 GHz ซึ่งเป็นแบนด์วิดท์ที่ได้รับการจัดสรรที่กว้างที่สุดเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีแถบแคบดังตารางที่ 2.1 [2]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการใช้แบนด์วิดท์ของเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลไร้สาย

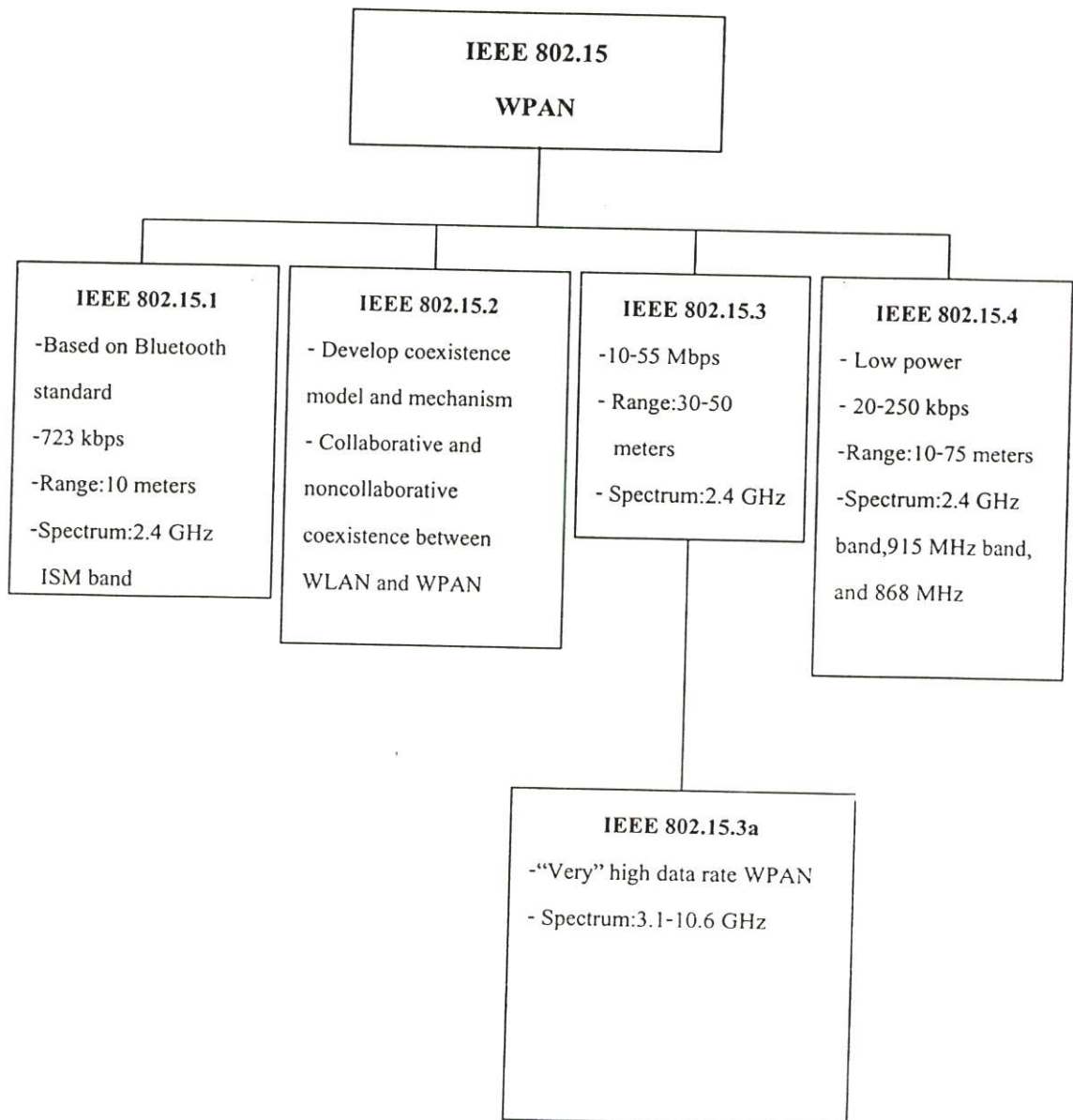
ระบบ	แบนด์วิดท์	การควบคุมในสหรัฐอเมริกา
AMPS or D-AMPS (1G or 2G cellular)	0.03 MHz	แถบความถี่ที่ต้องขออนุญาตใช้
GSM (2G cellular)	0.2 MHz	แถบความถี่ที่ต้องขออนุญาตใช้
IS-54 CDMA (2G or 3G cellular)	125 MHz	แถบความถี่ที่ต้องขออนุญาตใช้
Wideband CDMA (3G cellular)	5 MHz	แถบความถี่ที่ต้องขออนุญาตใช้
IEEE 802.11a or 802.11b (Wireless LAN)	25 MHz	อยู่ในแถบความถี่ของ ISM หรือ U-NII
UWB (communications type)	7,000 MHz	จำกัดพลังงานโดยข้อกำหนดส่วนที่ 15

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีของสวิตช์ตัดต่อความเร็วสูงทำให้ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งได้รับความสนใจสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารประเภทต่างๆ มากขึ้น โดยการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั้นนับได้ว่าเป็นวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารไร้สายโดยมีการใช้แถบความถี่ในการส่งที่กว้างมากประกอบกับใช้กำลังส่งที่น้อย ซึ่งสัญญาณของระบบ

แถบกว้างขั้่งนั้นมีความแตกต่างกับระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน 2 ประการคือ การส่งสัญญาณแบบแถบกว้างขั้่งนั้นจะทำการส่งสัญญาณในลักษณะที่เป็นอิมพัลส์ โดยไม่มีการนำเอาสัญญาณข้อมูลไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาห้ อีกประการหนึ่งสัญญาณแบบแถบกว้างขั้่งจะมีสัดส่วนของแบนวิดท์ในการส่งมากกว่าหรือเท่ากับ 20 % ของแถบความถี่กลาง หรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz ซึ่งจะพบว่ามีความมากกว่าแถบความถี่ของระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาก โดยที่ทาง FCC ได้กำหนดแถบความถี่ที่ใช้ในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างขั้่งไว้ที่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งมีแบนวิดท์เท่ากับ 7.5 GHz จากการที่ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างขั้่งใช้แถบความถี่ที่กว้างมากโดยที่แถบความถี่ที่ใช้นั้นได้มีการทับซ้อนกับระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งทาง FCC กำหนดระดับของความหนาแน่นของกำลังส่งต่อความถี่ในการส่งสัญญาณในระบบแถบกว้างขั้่งไว้ไม่เกิน -41.3 dBm/MHz ซึ่งจากการที่ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างขั้่งมีความหนาแน่นของกำลังงานของสัญญาณต่อความถี่ที่ต่ำ จึงทำให้สัญญาณที่ใช้ส่งในระบบการสื่อสารแบบ แถบกว้างขั้่งได้รับผลกระทบของสัญญาณรบกวนมาก ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอผลการวิจัยต่างๆ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงผลดังกล่าวในการสื่อสารแบบแถบกว้างขั้่งเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดีขึ้น โดยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของสภาพแวดล้อมที่มีต่อช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างขั้่ง ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะกล่าวถึงในบทต่อไป โดยที่ในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการพื้นฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ ของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างขั้่ง โดยที่รูปที่ 2.1 แสดงสเปกตรัมความถี่โดย FCC ของระบบแถบกว้างขั้่งภายในอาคารและในรูปที่ 2.2 จะแสดงให้เห็นถึงมาตรฐานของ IEEE 802.15 รวมไปถึงกลุ่มย่อยซึ่งเป็นมาตรฐานของในแต่ละกลุ่ม [3]



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมความถี่โดย FCC ของระบบแถบกว้างขั้่งภายในอาคาร

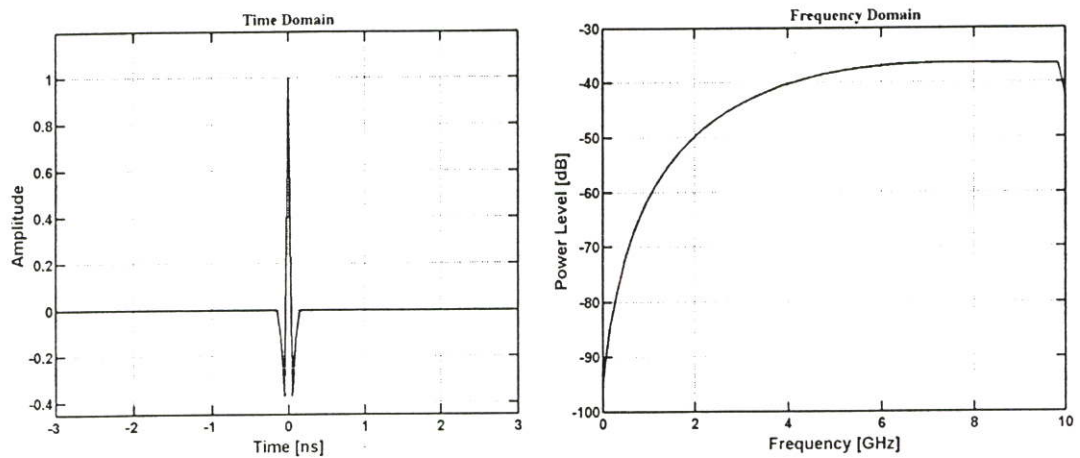


รูปที่ 2.2 มาตรฐานของ IEEE 802.15

2.2 ลักษณะเฉพาะการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ระบบแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่แตกต่างจากการสื่อสารทางคลื่นความถี่วิทยุแบบอื่น โดยจุดเด่นของระบบแบบแถบกว้างยิ่งก็คือเป็นระบบสื่อสารที่ไม่ต้องใช้คลื่นพาห์เหมือนในระบบอื่น สัญญาณของระบบแบบกว้างยิ่งจะเป็นสัญญาณพัลส์โดยจะเป็นพัลส์แคบๆ ขนาดประมาณ 0.2 นาโนวินาที จึงทำให้มีความหนาแน่นแถบความถี่ที่กว้างมาก ซึ่งโดยจะแผ่กระจายครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้างในระดับกิกะเฮิรต์ และเนื่องด้วยระบบนี้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงทำให้สามารถที่จะรองรับอัตราการส่งข้อมูลได้สูงถึง 110 Mbps ในระยะประมาณ

10 เมตร ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าสัญญาณพัลส์ที่ใช้มีขนาดที่แคบมากจึงทำให้ควิตไซเคิลมีค่าต่ำจึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบนี้มีการใช้กำลังงานที่ต่ำลงไปด้วยรูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของสัญญาณพัลส์ในโดเมนเวลาและแถบกำลังงานของสัญญาณในโดเมนความถี่ [4]



รูปที่ 2.3 ลักษณะของสัญญาณพัลส์ใน โดเมนเวลาและแถบกำลังงานของสัญญาณใน โดเมนความถี่

2.2.1 จุดเด่นของระบบแบบแถบกว้างยิ่ง

ซึ่งเป็นระบบที่มีจุดเด่นที่น่าสนใจดังต่อไปนี้

เป็นระบบที่มีความซับซ้อนและต้นทุนต่ำ

ความซับซ้อนและต้นทุนที่ต่ำของระบบแบบแถบกว้างยิ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยทางลักษณะเบสแบนด์ (Base band) ของการส่งสัญญาณซึ่งไม่เหมือนกับระบบการส่งสัญญาณวิทยุแบบอื่น ๆ โดยที่เครื่องส่งจะทำการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมาก ๆ ในโดเมนทางเวลา ซึ่งสามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นออกไปโดยปราศจากการเพิ่มความถี่วิทยุหรือคลื่นพาห์รวมเข้าไป และในส่วนของารรวมสัญญาณวิทยุนั้นจะเป็นการนำเอาสัญญาณเบสแบนด์รวมเข้าไปกับคลื่นพาห์ เพื่อย้ายสัญญาณไปยังแถบความถี่ที่มีคุณลักษณะในการแพร่กระจายคลื่นตามต้องการ ซึ่งสัญญาณจะถูกแพร่กระจายได้ดีโดยปราศจากความถี่ในการเพิ่มการแปลงความถี่ให้สูงขึ้น (Up – conversion) และการเพิ่มกำลังให้สูงขึ้น (Amplification) โดยในกระบวนการกลับกันการแปลงความถี่ลง (Down – conversion) และตัวผลิตความถี่ (Local oscillator) จึงไม่จำเป็นในเครื่องรับแบบแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกันทำให้ลดความซับซ้อนของระบบและต้นทุนในการผลิตลงไปมาก

มีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน (Noise)

เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานต่ำและลักษณะเฉพาะในการสุ่มเทียม (Pseudo-random) ของสัญญาณส่งจึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนี้มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณรบกวนซึ่งทำให้การตรวจหาสัญญาณทำได้ยากและยังปรากฏในเอกสารทางการวิจัยว่าการส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นไม่ก่อให้เกิดผลการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบคลื่นความถี่วิทยุอื่น ๆ เนื่องจากสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งนั้นมีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับต่ำ โดยอยู่ในระดับของสัญญาณรบกวน (Noise floor) จึงทำให้ระบบอื่นมองว่าสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนี้คือสัญญาณรบกวนเลขถูกกำจัด

มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลาสำหรับการกำหนดตำแหน่งและการประยุกต์ใช้ในระบบติดตาม (Tracking)

มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลาสำหรับการกำหนดตำแหน่งและการประยุกต์ใช้ในระบบติดตามด้วยพัลส์ที่มีลักษณะทางโดเมนเวลาที่แคบมาก ๆ หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมาก ๆ นั้นหมายถึง ระบบคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมจังหวะและกำหนดเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่าระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global positioning system; GPS) และระบบคลื่นวิทยุแบบอื่น ๆ อีกทั้งด้วยคุณสมบัติในการทะลุผ่านวัสดุได้ดีจึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่มีการมอดูเลตทางเวลาถูกนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ระยะสั้น เช่นในการช่วยชีวิตและปฏิบัติการป้องกันอาชญากรรม เช่นเดียวกับการใช้งานสำรวจและในอุตสาหกรรมการทำเหมืองเป็นต้น

ทั้งนี้หากเปรียบเทียบระบบนี้กับเทคโนโลยีอย่าง Wi-Fi หรือ Bluetooth แล้วก็จะพบว่าระบบแถบกว้างยิ่งจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีดังกล่าวทั้งด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูล การใช้พลังงานที่ต่ำรวมถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลทะลุทะลวงผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ โดยระบบแถบกว้างยิ่งจะมีความเร็วในการส่งรับข้อมูลสูงถึง 480 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 2 เมตรและความเร็ว 110 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 10 เมตร ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในขณะที่ Wi-Fi สามารถรับส่งข้อมูลสูงสุด 54 Mbps และหากเปรียบเทียบกับ Bluetooth ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมสำหรับเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลในปัจจุบัน ระบบแถบกว้างยิ่งมีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงกว่า Bluetooth ถึง 100 เท่า ซึ่งด้วยความเร็วในระดับดังกล่าวระบบแถบกว้างยิ่งจึงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ประเภทให้ความบันเทิงภายในบ้าน (Home entertainment)

2.3 กฎข้อบังคับของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ได้ถูกกำหนดขึ้นในการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั่นคือ การจัดสรรความถี่ในการใช้งานซึ่งได้มีกลุ่มทำงานในสหรัฐอเมริกาได้พยายามลดข้อกำหนดในการใช้งานช่วงความถี่ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจากกฎข้อบังคับเดิมของคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา โดยกลุ่มงานนี้ก่อตั้งขึ้นอย่างเป็นทางการโดยใช้ชื่อว่า Ultra - Wideband Working Group (UWBWG) เพื่อทำการเจรจาข้อตกลงร่วมกับ FCC เช่นเดียวกับในยุโรปก็ได้มีการหาข้อตกลงการจัดสรรคลื่นความถี่และการแทรกสอดของคลื่นวิทยุ ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดแถบความถี่สำหรับการใช้งานในระบบแถบกว้างในสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standards Institute; ETSI) หรือสหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union; ITU)

2.3.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา

ในปี ค.ศ. 1998 FCC ได้ออกประกาศเกี่ยวกับการตรวจสอบหรือ Notice of Inquiry (NOI) โดยถึงแม้ว่าจะได้คาดการณ์ถึงระดับกำลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณที่มีระดับต่ำมากๆ แล้วก็ตาม ยังมีกลุ่มผู้ที่สนับสนุนในระบบเดิมที่มีใช้งานกันอยู่ได้ทำการต่อต้านการนำระบบแถบกว้างยิ่งมาใช้งานสำหรับการสื่อสารของพลเรือน ซึ่งเรียกรวมโดยมากจะเกี่ยวข้องกับภาคการคลังถึงการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดในแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด อาทิเช่น แถบความถี่ในการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ แถบความถี่ที่สำรองไว้สำหรับคลื่นวิทยุทางดาราศาสตร์และระบบ GPS โดยที่องค์กรบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Aviation Administration; FAA) ได้แสดงความเป็นห่วงต่อการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบความปลอดภัยในกิจการการบินและทิศทางในการค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องส่งในระบบแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกัน

เมื่อเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้ถูกนำเสนอสำหรับการนำมาใช้ในกิจการการสื่อสารของพลเรือน ซึ่งยังไม่ได้มีการกำหนดใด ๆ สำหรับลักษณะสัญญาณที่จะนำมาใช้ จึงได้มีหน่วยงานหนึ่งที่ชื่อว่า DARPA (Defense Advanced Research Project Agency) ให้ทำการออกข้อกำหนดฉบับที่หนึ่งสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งอยู่บนพื้นฐานอัตราส่วนแบนด์วิดท์ (B_f) ของสัญญาณโดยต้องมีค่ามากกว่า 0.25 โดยสามารถกำหนดได้ตามสมการที่ 2.1

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

โดยที่ f_L คือความถี่ต่ำสุดและ f_H คือความถี่สูงสุดของแถบความถี่ที่ใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่ง และ f_C คือความถี่กลาง

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร [5]

ความถี่ (เมกกะเฮิรต์)	ภายใน	ภายนอก
	EIRP in dBm	EIRP in dBm
960 – 1,610	-75.3	-75.3
1,610 – 1,990	-53.3	-63.3
1,990 – 3,100	-51.3	-61.3
3,100 – 10,600	-41.3	-41.3
สูงกว่า 10,600	-51.3	-61.3

ในวันที่ 14 กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 ทาง FCC ได้ออกกฎสำหรับระบบแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับระบบแถบกว้างยิ่งและยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของคำประกาศและระเบียบการฉบับที่หนึ่งได้เผยแพร่ต่อสาธารณชนในวันที่ 22 เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งในเอกสารได้กล่าวถึงการอนุญาตใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่งทั้ง 4 ประเภทและการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้ในประเภทต่าง ๆ โดยจากนิยามข้างต้นได้ทำการลดค่าการจำกัด B_f ไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 0.2 ตามสมการที่ 2.1 และข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC ได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2 สำหรับใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร

2.3.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป

ปัจจุบัน โครงร่างของข้อกำหนดระบบแถบกว้างยิ่งในทวีปยุโรปอยู่ในช่วงรอข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวกับผลกระทบของระบบแถบกว้างยิ่งบนระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่โดยทางยุโรปนั้น บางส่วนของข้อกำหนดจะรอบคอบกว่าของทางสหรัฐอเมริกา เพราะทางด้านยุโรปนั้นในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ต้องแสดงให้เห็นว่าส่งผลกระทบน้อยหรือไม่ส่งผลกระทบเสียหายต่อระบบเดิมที่มีอยู่โดยข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย ITU หรือ ETSI แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสาร ทั้งภายในและภายนอกอาคาร [5]

	Frequency range [GHz]		
	$f < 3.1$	$3.1 < f < 10.6$	$f > 10.6$
Indoor mask	$-51.3 + 87 \log(f / 3.1)$	-41.3	$-51.3 + 87 \log(f / 10.6)$
Outdoor mask	$-61.3 + 87 \log(f / 3.1)$	-41.3	$-61.3 + 87 \log(f / 10.6)$

โดยในตารางที่ 2.2 และ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัม ความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่าง FCC และ ETSI ภายในและภายนอกอาคารตามลำดับ

บทที่ 3

การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่ง

3.1 การวิเคราะห์การสูญเสียของสัญญาณ

ในการสื่อสารไร้สายนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณไม่ว่าจะเป็นระดับของกำลังงาน เวลาประวิงที่เกิดขึ้นหรือความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณที่รับได้ เมื่อทำการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ โดยผลที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะต้องทำการตรวจสอบเบื้องต้นด้วยวิธีการวัด จากนั้นผลที่ได้จากการวัดหรือที่เรียกว่าข้อมูลดิบ (Raw data) นั้นจำเป็นต้องนำมาวิเคราะห์ตามขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบหรือการเปลี่ยนแปลงดังที่ได้กล่าวไปแล้วโดยในขั้นตอนนี้มีความสำคัญพอ ๆ กับขั้นตอนการวัดซึ่งมีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและเชื่อถือได้โดยในหัวข้อนี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ ดังนี้

3.1.1 การสูญเสียกำลังงาน

ในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นเป้าหมายหลักของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นคือ การคาดการณ์ถึงค่าความสูญเสียกำลังงานของสัญญาณ PL เนื่องจากการแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณ โดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างระดับกำลังงานที่ใช้ส่งและระดับกำลังงานที่รับได้ ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบล (Decibel) ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$L_{dB} = 20 \log \left(\frac{v_t(t)}{v_r(t)} \right) \quad (3.1)$$

โดยที่	L_{dB}	คือ การสูญเสียกำลังงาน
	v_t	คือ ระดับกำลังงานที่ใช้ส่ง
	v_r	คือ ระดับกำลังงานที่รับได้

โดยในการวิเคราะห์การสูญเสียของกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่ง PL_{unwb} นั้นจะพิจารณาที่กำลังงานสูงสุดของสัญญาณที่ใช้ส่งและกำลังสูงสุดของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทาง (d) โดยมีนิยามเป็นไปตามสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

$$PL_{UWB}(d)[dB] = 20 \log \left[\frac{\max |v_r(t)|}{\max |v_r(t,d)|} \right] \quad (3.2)$$

โดยในสมการที่ 3.3 ได้กำหนดให้ขนาดของสัญญาณที่ใช้ส่งมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$PL_{UWB}(d)[dB] = -20 \log [\max |v_r(t,d)|] \quad (3.3)$$

3.1.2 การกระจายทางเวลา

เส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับมีได้หลายทิศทาง และสัญญาณแต่ละส่วนมักจะส่งผ่านในเส้นทางที่มีระยะทางไม่เท่ากัน สัญญาณบางส่วนอาจจะเดินทางเป็นเส้นตรงระหว่างภาคส่งและภาครับ สัญญาณส่วนนี้มักจะเดินทางถึงภาครับได้เร็ว ในขณะที่สัญญาณส่วนอื่นที่มีการสูญเสียอันเนื่องมาจากเกิดการสะท้อนหลายครั้งกว่าจะเดินทางถึงภาครับ สัญญาณมักจะใช้เวลาการแพร่กระจายที่ยาวนานกว่า ความล่าช้าในการเดินทางของสัญญาณแต่ละส่วนก่อให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า การแผ่ประวิง (Delay spread) ขึ้นนั่นคือสัญญาณแต่ละส่วนใช้เวลาเดินทางถึงจุดหมายไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงเวลาที่ถูกเลื่อนออกไปของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับ ซึ่งในส่วนของกระจายทางเวลา (Time dispersion) นั้นสามารถที่จะวิเคราะห์โดยใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า ค่าเฉลี่ยของเวลาที่เลื่อนเกินออกไปจากค่าเวลาเดิมหรือค่าเฉลี่ยเวลาประวิง (Mean excess delay: $\bar{\tau}$) และค่าการแผ่ประวิง (RMS delay spread: σ_τ) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้ถูกนิยามไว้ดังสมการที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2 \tau_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n P(\tau_i) \tau_i}{\sum_{i=1}^n P(\tau_i)} \quad (3.4)$$

โดยที่

- a_i คือ ขนาดของสัญญาณเส้นทางที่ i
- τ_i คือ เวลาประวิงที่เกิดขึ้นของสัญญาณเส้นทางที่ i
- $P(\tau_i)$ คือ กำลังงานของสัญญาณเส้นทางที่ i

สำหรับค่าการแผ่ของเวลาประวิงนั้นจะมีนิยามคือ

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \quad (3.5)$$

ซึ่งจะได้เป็น

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2 \tau_i^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n P(\tau_i) \tau_i^2}{\sum_{i=1}^n P(\tau_i)} \quad (3.6)$$

3.1.3 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function:PDF)

เป็นการพิจารณาที่ระบุถึงความเป็นไปได้ของการเกิดการสูญเสียของสัญญาตามแถบความถี่กว้างยิ่งในรูปแบบของความน่าจะเป็นในบริเวณแบบจำลองที่ได้กำหนดเอาไว้กับแต่ละตำแหน่งการสูญเสียเชิงวิถิ โดยแสดงได้จากสมการที่ 3.7

$$f_x(x) = \frac{d}{dx} P\{X \leq x\} \quad (3.7)$$

$$f_x(x) = P\{X \leq x\} \quad (3.8)$$

เมื่อ p = ความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้น

X = ตำแหน่งที่มีการสูญเสียเชิงวิถิ

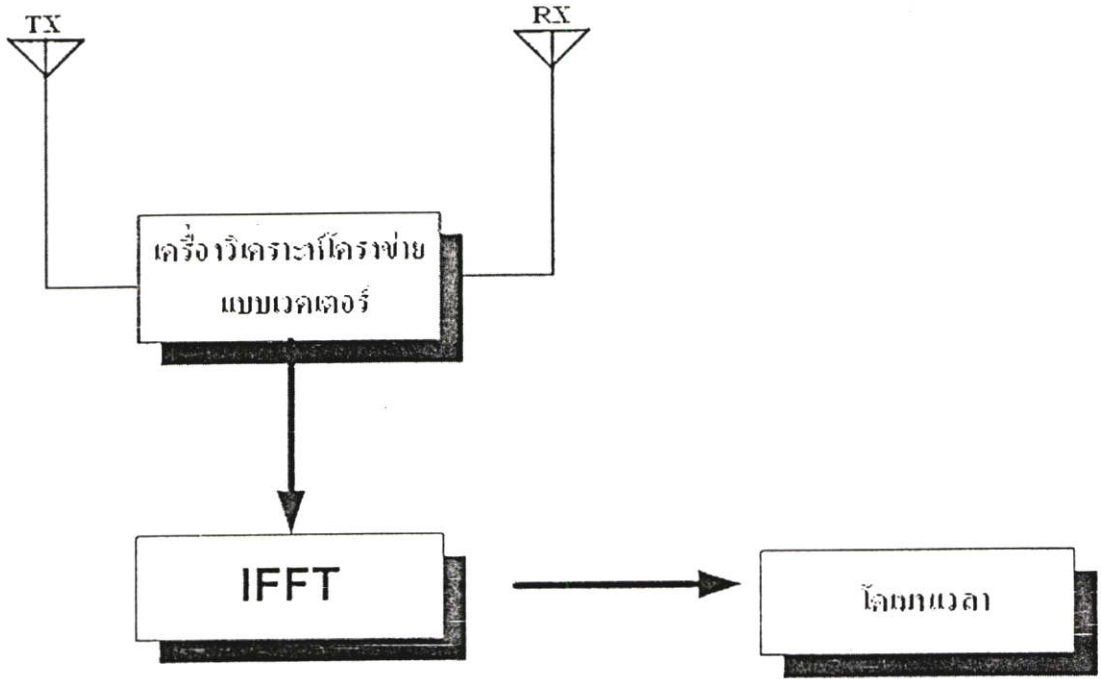
x = ค่าของการสูญเสียเชิงวิถิ

3.1.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative Density Function:CDF)

เป็นค่าที่แสดงควบคู่กับฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น โดยจะเป็นส่วนกลับกันเพื่อให้เห็นถึงค่าความน่าจะเป็นสะสม ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.8

3.2 ทฤษฎีการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่

การวัดช่องสัญญาณใน โดเมนความถี่นั้นสัญญาณวิทยุจะถูกสร้างขึ้นและรับ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ช่วงจรรยาแบบเวกเตอร์ที่เป็นอุปกรณ์หลักที่จัดการเกี่ยวกับการวัดทั้งหมด โดยสัญญาณที่ใช้ตรวจสอบนั้นจะเป็นกลุ่มของสัญญาณแถบแคบรูปคลื่น ไซน์ซุซอยด์ (Sinusoid) ซึ่งทำการกวาดตลอดแถบความถี่ที่ต้องการพิจารณาประกอบกับการใช้สายอากาศแถบกว้าง



รูปที่ 3.1 ระบบการวัดช่องสัญญาณใน โดเมนความถี่ โดยเครื่องวิเคราะห์จรรยาแบบเวกเตอร์และการแปลงสู่โดเมนเวลา โดยใช้ IFFT

การวัดสัญญาณ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์จรรยาแบบเวกเตอร์นั้นผลที่ได้คือผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ จากนั้นจะใช้การแปลงฟูริเยร์ผกผัน (Inverse Fast Fourier Transform: IFFT) ในการแปลงข้อมูลการวัดในโดเมนความถี่ให้อยู่ในรูปแบบของโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.1

โดยในการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณแบบแถบกว้างยังทั้งสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคารเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญด้วย ผลกระทบที่เกี่ยวกับทิศทาง ขอบเขตของเส้นทาง และปัจจัยอื่น ๆ ล้วนแล้วแต่เป็นการประเมินค่าความสำเร็จของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งถ้าช่องสัญญาณมีคุณลักษณะที่ดีแล้ว ผลของการรบกวนและการแทรกสอดของแหล่งกำเนิดสัญญาณ

อื่นๆ จะสามารถที่จะทำให้ลดลงได้โดยการออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับที่เหมาะสม โดยลักษณะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของการจำลองช่องสัญญาณวิทยุคือการตรวจสอบถึงฟังก์ชันการกระจายตัวของพารามิเตอร์ช่องสัญญาณ โดยทั่วไปการกระจายตัวเหล่านี้มักจะได้มาจากผลการวัดหรือผลการจำลองบนพื้นฐานของความถูกต้องหรือมีลักษณะตามสภาวะแวดล้อมที่ชัดเจน

ในการวัดช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งยั้งนั้นมีหลักเกณฑ์จำนวนมากที่ถูกนำมาพิจารณาเพื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนของลักษณะการเกิดของช่องสัญญาณ โดยความแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบแถบกว้างยิ่งยั้งและเทคนิคการวัดช่องสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งยั้งเนื่องด้วยสภาพความเป็นจริงในการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งยั้งหรือผลที่ขึ้นอยู่กับความถี่ที่เปลี่ยนไปนั้นไม่สามารถที่จะละเลยได้ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ การทะลุผ่าน การสะท้อน การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณและผลอื่นๆ ควรที่จะนำมาพิจารณาตามความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป

o สัมประสิทธิ์การส่งผ่านช่องสัญญาณ

ในขั้นตอนของการวัดนั้นจะเป็นลักษณะการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัญญาณ (transmission coefficient : S_{21}) จากพอร์ตหนึ่งไปยังพอร์ตสองของเครื่อง VNA โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากหลักการของ S-parameter หรือเรียกว่าพารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (scattering parameter) ซึ่งมีนิยามตามเมตริกซ์การกระจัดกระจาย (scattering matrix) ของโครงข่ายแบบ 2 พอร์ตดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมีสมการดังนี้ [6]

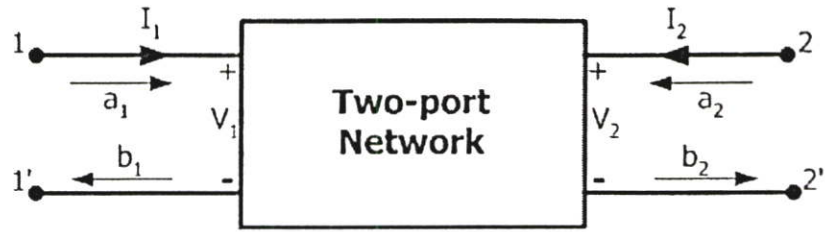
$$\bar{b} = \bar{S}a \quad (3.9)$$

โดยที่

\bar{a} คือ เวกเตอร์การส่งผ่าน

\bar{b} คือ เวกเตอร์การสะท้อน

\bar{S} คือ เวกเตอร์การกระจาย



รูปที่ 3.2 โครงข่ายแบบ 2 พอร์ต

ซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\bar{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\bar{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

โดยที่

- a_1 คือ คลื่นที่ส่งผ่านเข้าไปยังพอร์ตหนึ่ง
- b_1 คือ คลื่นที่สะท้อนกลับมายังพอร์ตหนึ่ง
- a_2 คือ คลื่นที่ส่งผ่านเข้าไปยังพอร์ตสอง
- b_2 คือ คลื่นที่สะท้อนกลับมายังพอร์ตสอง

ซึ่งสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนี้สามารถหาได้จาก

$$a_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_1}{\sqrt{Z_0}} + \sqrt{Z_0} I_1 \right) \quad (3.12a)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_1}{\sqrt{Z_0}} - \sqrt{Z_0} I_1 \right) \quad (3.12b)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_2}{\sqrt{Z_0}} + \sqrt{Z_0} I_2 \right) \quad (3.12c)$$

$$b_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_2}{\sqrt{Z_0}} - \sqrt{Z_0} I_2 \right) \quad (3.12d)$$

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$b_1 = a_1 S_{11} + a_2 S_{12} \quad (3.14)$$

$$b_2 = a_1 S_{21} + a_2 S_{22} \quad (3.15)$$

โดยที่

S_{11} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตหนึ่ง

S_{22} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตสอง

S_{21} คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (forward)

S_{12} คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านผกผัน (reverse)

พารามิเตอร์ของการกระจัดกระจายของโครงข่ายแบบสองพอร์ตนั้นยังสามารถที่จะกำหนดในเทอมของคลื่นส่งผ่านและคลื่นสะท้อนได้ดังนี้

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (3.16a)$$

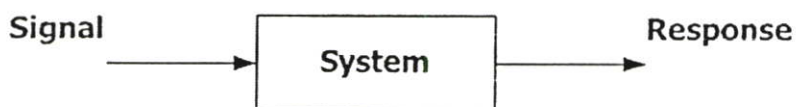
$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (3.16b)$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.16c)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.16d)$$

o ผลตอบสนองความถี่ของสัญญาณ

เมื่อพิจารณาการวัดของสัญญาณโดยใช้เครื่อง VNA นั้นสิ่งที่จะต้องทำความเข้าใจเป็นอันดับแรกคือ ระบบและสัญญาณ โดยระบบคือ กลุ่มของวัตถุที่รวมกันซึ่งสามารถทำงานร่วมกันเพื่อให้สำเร็จตามจุดมุ่งหมายที่ต้องการและสัญญาณคือปริมาณทางกายภาพบางอย่างที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ เรียกว่า สัญญาณเข้าหรือสัญญาณอินพุต (input signal) ของระบบและจะมีปริมาณทางกายภาพบางอย่างออกจากระบบซึ่งเรียกว่า สัญญาณออกหรือสัญญาณเอาต์พุต (output signal) หรือผลตอบสนอง (response) ของระบบ โดยสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบดังรูปที่ 3.3 ที่ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวนั้นจะเป็นสิ่งที่ใช้แสดงถึงคุณสมบัติของระบบและจากการวัดผลที่ได้ก็คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณซึ่งแปรผันตรงกับฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (frequency transfer function : $H(\omega)$) ของช่องสัญญาณโดยฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวนี้จะแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการพิจารณาอยู่ซึ่งประกอบด้วยระดับสัญญาณที่ส่งผ่าน (magnitude) และผลตอบสนองทางเฟส (phase) ของสัญญาณโดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัญญาณกับฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณนั้นกำหนดตามสมการที่ 3.17 และแสดงดังรูปที่ 3.4



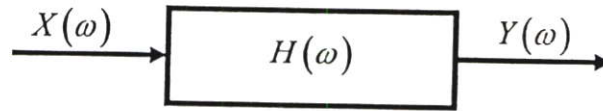
รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบ

$$S_{21}(\omega) \propto H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (3.17)$$

โดยที่

$Y(\omega)$ คือ เอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่

$X(\omega)$ คือ อินพุตของระบบในโดเมนความถี่



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบใน โดเมนความถี่

o ผลตอบสนองอิมพัลส์ของสัญญาณ

การแสดงความสัมพันธ์ของช่องสัญญาณนั้นสามารถทำได้หลายวิธีโดยหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ก็คือ การแสดงด้วยค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response) ของระบบ โดยเริ่มต้นนั้นจะขอกกล่าวถึง คำนิยามของฟังก์ชันอิมพัลส์ (impulse function) ก่อนดังนี้

ฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่เหมือนกับฟังก์ชันทั่วไปโดยฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยมักนิยามแทนด้วย สัญลักษณ์ $\delta(t)$ และมีคุณสมบัติดังนี้คือ

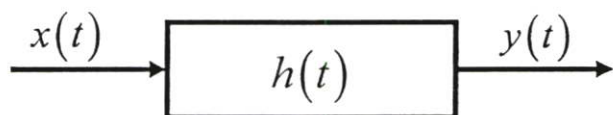
$$\int_a^b f(t) \delta(t - t_0) dt = \begin{cases} f(t_0), & a < t_0 < b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.18)$$

โดยในที่นี้ $f(t)$ จะต้องเป็นฟังก์ชันที่มีค่าต่อเนื่อง (continuous) ที่ค่าเวลา $t = t_0$ จาก (3.18) เมื่อกำหนดให้ $f(t) = 1$ จะได้

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1 \quad (3.19)$$

จะกล่าวได้ว่าพื้นที่ใต้เส้นโค้งของ $\delta(t - t_0)$ มีค่า 1 หน่วย โดยค่าที่ได้จากการทำปริพันธ์ นี้ นิยมเรียกว่า น้ำหนัก (weight) ของฟังก์ชันอิมพัลส์นั้นดังนั้นจะพบว่าน้ำหนักของฟังก์ชัน $A\delta(t)$ มีค่าเท่ากับ A หน่วย ฟังก์ชันอิมพัลส์ที่มีน้ำหนัก 1 หน่วยนั้นเรียกว่า ฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วย (unit impulse function) แม้ว่าฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่สามารถสร้างได้จริงในทางปฏิบัติแต่ในทาง ทฤษฎีจะมีบทบาทในการวิเคราะห์สัญญาณและระบบ โดยเฉพาะการบอกคุณสมบัติของระบบอีก ทั้งสัญญาณอินพุตที่เป็นฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยนั้นยังถูกนิยามเรียกว่า ผลตอบสนองอิมพัลส์ ของระบบใช้สัญลักษณ์ $h(t)$ แทนผลตอบสนองดังกล่าวซึ่งผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ สามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบเพราะสามารถบอกคุณสมบัติของระบบนั้นได้และโดยเฉพาะเมื่อ

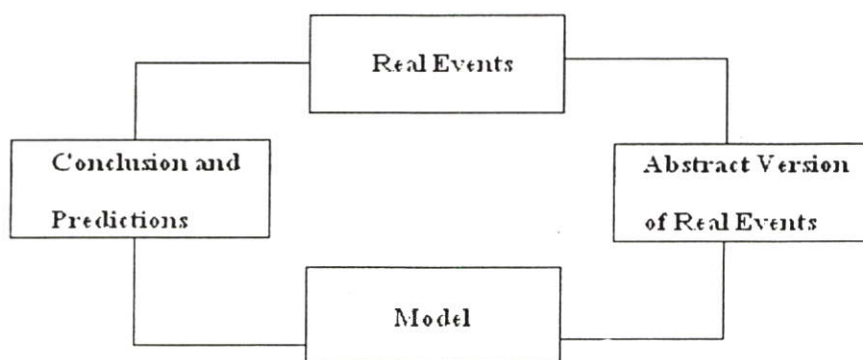
ระบบภายใต้การพิจารณาเป็นระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ค่าเอาต์พุต $g(t)$ ของระบบที่เกิดจากสัญญาณอินพุต $f(t)$ ใดๆ นั้นจะสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้รูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนเวลา

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Models)

การสร้างแบบจำลองเป็นหัวใจของการทำความเข้าใจปรากฏการณ์ของโลกแห่งความเป็นจริง โดยการสร้างแบบจำลองสามารถจัดแบ่งการสังเกต (Observations) ออกเป็นสาเหตุและผลลัพธ์ (cause and effect) แบบจำลองทำให้เราสามารถประสบความสำเร็จในการกระทำสิ่งต่างๆ เช่น การข้ามถนนที่มีการจราจรคับคั่ง วิศวกร นักชีววิทยาจำลองการสังเกตโดยใช้รูปแบบที่แน่นอน เป็นต้น



รูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างแบบจำลอง (model construction process)

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในโลกนี้มักจะมีหลายรูปแบบ (Multifaceted) เชื่อมโยงกัน (interrelated) และยากแก่การเข้าใจ ในการชั่งแวงะกับปรากฏการณ์เหล่านี้ จากรูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างแบบจำลอง พยายามสรุปกฎเกณฑ์ (abstract) และพยายามมุ่งไปยังขอบเขตที่กว้างขึ้น เป็นชุดของลักษณะประกอบกันเป็นโลกในความเป็นจริง หรือโครงสร้างที่วางอยู่ภายใต้กระบวนการซึ่งนำไปสู่ผลที่สังเกตได้ แบบจำลองก็คือการสรุปกฎเกณฑ์ (abstractions) ของความเป็นจริง (reality)

แบบจำลองมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งานจำแนกประเภท ได้ดังนี้

o Deterministic models เป็นแบบจำลองที่ตัววัด (parameters) ต่างๆ เช่น อัตราการเติบโต มีค่าแน่นอน (deterministic) เนื่องจากไม่คำนึงถึงการสั่นไหวแบบไร้ทิศทาง (random fluctuations) ของสภาพแวดล้อม

o Stochastic models เป็นแบบจำลองที่รวมเอาการสั่นไหวแบบไร้ทิศทางของสภาพแวดล้อมเข้ามาด้วยทำให้ตัววัดต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณฝน อัตราการไหลของน้ำทิ้ง มีค่าไม่คงที่ซึ่งจะใช้ค่าเฉลี่ย (mean) เป็นตัวแทน และยังมีค่าเปลี่ยนไปตามเวลาอีกด้วย นอกจากนี้ตัววัดบางตัวก็มีค่าที่กระจายเป็นช่วง เช่น ขนาดของอนุภาคดิน ขนาดของฟองอากาศจากเครื่องเติมอากาศ ดังนั้นจึงต้องใช้ค่าการกระจายทางสถิติ (statistical distributions) เช่น Gaussian, Poisson, binomial เป็นต้น มาอธิบายค่าตัววัดเหล่านี้ การจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองนี้ ทำโดยการเลือกค่าตัววัดแบบสุ่ม (random) มาใช้หลายๆ ค่า

o Dynamic models เป็นแบบจำลองที่คำนึงถึงผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระบบ มักจะซับซ้อน เนื่องจากประกอบด้วยทั้งสมการพีชคณิตและสมการอนุพันธ์ (differential equations) การแก้สมการจะยุ่งยากซับซ้อนหากไม่ใช้เทคนิคการอินทิเกรตแบบใช้ตัวเลข (numerical integration techniques) ด้วยคอมพิวเตอร์

โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีของ การถดถอยเชิงเส้น (linear regression) การประมาณค่าฟังก์ชันโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะได้ฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของข้อมูล

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเป็นการหาความสัมพันธ์ทางสถิติของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ในรูปของฟังก์ชันเชิงเส้น เช่น

$$Y = a + bX$$

$$Y = a + bX^2$$

$$Y = a + b / X$$

$$Y = a + bX^{0.5}$$

$$Y = aX^b$$

$$Y = a e^{bx}$$

$$Y = a + b \log X$$

$$Y = a + b e^{-x}$$

o Linear regression เขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y = a_0 + a_1x + e \quad (3.20)$$

เมื่อ a_0 และ a_1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงจุดตัดแกนและความชัน
 e เป็นค่าความผิดพลาดหรือเศษเหลือระหว่างค่าฟังก์ชันและข้อมูลจริง

โดยเงื่อนไขของการหาฟังก์ชันที่ดีที่สุดคือ

$$1. \sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i) \quad (3.21)$$

เมื่อ n แทนจำนวนข้อมูลทั้งหมด

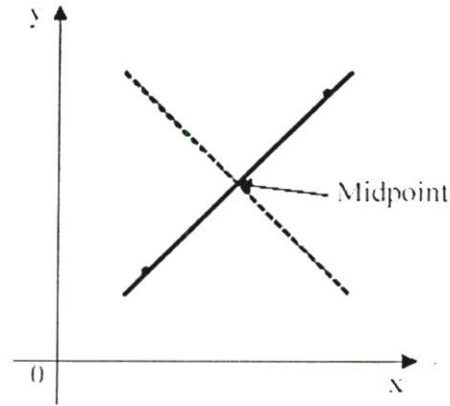
เงื่อนไขนี้ยังไม่เพียงพอสำหรับฟังก์ชันที่ใช้แทนข้อมูลจำนวนสองจุด ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยเส้นใดๆ ที่ผ่านจุดกึ่งกลางระหว่างจุดสองจุดก็ทำให้ค่าต่ำสุดของเงื่อนไขข้อที่หนึ่งเป็นศูนย์ เพราะว่าค่าผิดพลาดหักล้างกันพอดี

$$2. \sum_{i=1}^n |e_i| = \sum_{i=1}^n |y_i - a_0 - a_1x_i| \quad (3.22)$$

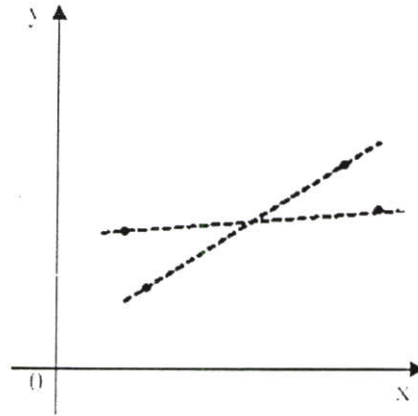
เงื่อนไขนี้ก็ยังไม่เพียงพอสำหรับฟังก์ชันที่ใช้แทนข้อมูลจำนวนสี่จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยเส้นตรงใดๆ ที่อยู่ระหว่างเส้นประสองเส้นนี้จะทำให้เงื่อนไขข้อสองมีค่าต่ำสุด

$$3. S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i,measured} - y_{i,model})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i)^2 \quad (3.23)$$

เงื่อนไขที่ 3 นี้เรียกว่า Minimax criterion ซึ่งเหมาะสมสำหรับใช้กับฟังก์ชันง่ายๆ โดยข้อดีของการใช้เงื่อนไขในการหาฟังก์ชันเพื่อแทนชุดข้อมูลก็คือ จะได้ฟังก์ชันเดียวแน่นอนในการแทนชุดข้อมูล



รูปที่ 3.7 เส้นที่ใช้แทนชุดข้อมูลที่มีสองจุดได้โดยให้เงื่อนไขในข้อหนึ่งมีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 3.8 เส้นที่ใช้แทนชุดข้อมูลที่มีสี่จุดได้โดยเงื่อนไขในข้อสองมีค่าน้อยที่สุด

เงื่อนไขที่สามนำมาหาฟังก์ชันเส้นตรงที่ใช้แทนชุดข้อมูลได้โดยการนำมาหาค่าอนุพันธ์เทียบกับ a_0 และ a_1 ดังนี้

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad \text{และ} \quad a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (3.24)$$

เมื่อ \bar{x} และ \bar{y} คือค่าเฉลี่ยของ x และ y ตามลำดับโดยที่ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าของฟังก์ชันและข้อมูลจริงนั้นสามารถหาได้จาก

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j)^2} \quad (3.25)$$

สมมติฐานทางสถิติสำหรับข้อมูลที่ใช้กับวิธี Linear regression คือ

1. ค่า x เป็นข้อมูลที่แน่นอนไม่ใช่ค่าที่สุ่มมาและไม่ผิดพลาด
2. ค่า y เป็นค่าที่มีความแปรปรวนแน่นอนและไม่ขึ้นอยู่กับค่าอื่น
3. ค่า y สำหรับแต่ละค่าของ x มีการกระจายแบบปกติ

o สมการ โพลีโนเมียล โดยใช้วิธี Polynomial regression

ตัวอย่างเช่นการแทนชุดข้อมูลด้วยสมการ โพลีโนเมียลกำลังสอง

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + e \quad (3.26)$$

มีผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าฟังก์ชันกับข้อมูลจริงเป็น

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i + a_2x_i^2)^2 \quad (3.27)$$

ใช้หลักการเดียวกันกับ Linear regression คือหาค่า a_0, a_1, a_2 ที่ทำให้ S_r มีค่าน้อยที่สุด
หาอนุพันธ์ของ S_r เทียบกับ a_0 ได้

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

หาอนุพันธ์ของ S_r เทียบกับ a_1 ได้

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

หาอนุพันธ์ของ S_r เทียบกับ a_2 ได้

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

จัดให้เท่ากับศูนย์และจัดรูปซึ่งจะได้ระบบสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} (n)a_0 + (\sum x_i)a_1 + (\sum x_i^2)a_2 &= \sum y_i \\ (\sum x_i)a_0 + (\sum x_i^2)a_1 + (\sum x_i^3)a_2 &= \sum x_i y_i \\ (\sum x_i^2)a_0 + (\sum x_i^3)a_1 + (\sum x_i^4)a_2 &= \sum x_i^2 y_i \end{aligned} \quad (3.28)$$

การแก้สมการหาค่า a_0, a_1, a_2 ทำตามวิธีการแก้ระบบสมการเชิงเส้นโดยวิธีการหาสมการ โพลีโนเมียลข้างต้นนี้สามารถใช้หาสมการ โพลีโนเมียลกำลังใด ๆ ก็ได้เพื่อแทนชุดข้อมูล

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

สามารถยกตัวอย่างของ การทำ Linear regression เพื่อแก้สมการหาค่า a_0, a_1, a_2 ได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างชุดข้อมูลในการวิจัย

Data 1	Data 2
20.8637	0.025
21.1985	0.075
22.5807	0.125
23.3788	0.175
25.4838	0.225
26.4578	0.275
27.0140	0.325
28.0551	0.375
28.4799	0.425
29.1035	0.475
29.9393	0.525
30.1359	0.575
30.4688	0.625
30.8056	0.675
32.6877	0.725
33.2455	0.775
37.5846	0.825
38.1115	0.875
38.5100	0.925
40.8389	0.975

แทนผลที่ได้จากตัวอย่างชุดข้อมูลในการวิจัยลงในฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลัง 2

จากนั้นทำการหาอนุพันธ์ย่อย (Partial derivative) เทียบกับตัวแปร a, b, c ตามลำดับซึ่ง
เป็นเงื่อนไขที่ทำให้ค่าผิดพลาดรวมน้อยที่สุด

$$\frac{\partial q}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2 = -2 \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2) = 0 \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial q}{\partial b} = \frac{\partial}{\partial b} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2 = -2 \sum_{j=1}^n x_j (y_j - a - bx_j - cx_j^2) = 0 \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial q}{\partial c} = \frac{\partial}{\partial c} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2 = -2 \sum_{j=1}^n x_j^2 (y_j - a - bx_j - cx_j^2) = 0 \quad (3.31)$$

นำ -2 หารดลออกทั้ง (3.29) (3.30) และ (3.31) จะได้สมการทั่วไปคือ

$$an + b \sum_{j=1}^n x_j + c \sum_{j=1}^n x_j^2 = \sum_{j=1}^n y_j \quad (3.32)$$

$$a \sum_{j=1}^n x_j + b \sum_{j=1}^n x_j^2 + c \sum_{j=1}^n x_j^3 = \sum_{j=1}^n x_j y_j \quad (3.33)$$

$$a \sum_{j=1}^n x_j^2 + b \sum_{j=1}^n x_j^3 + c \sum_{j=1}^n x_j^4 = \sum_{j=1}^n x_j^2 y_j \quad (3.34)$$

จะเห็นได้ว่าค่า $n = 20$ เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าลงใน (3.32) (3.33) และ (3.34) จะได้

$$\sum_{j=1}^{20} x_j = 10, \quad \sum_{j=1}^{20} x_j^2 = 6.6625, \quad \sum_{j=1}^{20} x_j^3 = 4.9938, \quad \sum_{j=1}^{20} x_j^4 = 3.9917$$

$$\sum_{j=1}^{20} y_j = 594.94, \quad \sum_{j=1}^{20} x_j y_j = 329.4, \quad \sum_{j=1}^{20} x_j^2 y_j = 230.84$$

สมการทั่วไปคือ

$$20a + 10b + 6.6625c = 594.94$$

$$10a + 6.6625b + 4.9938c = 329.4$$

$$6.6625a + 4.9938b + 3.9917c = 230.84$$

โดยผลเฉลี่ยของสมการทั่วไปคือ

$$a = 21.228, b = 12.707, c = 6.5011$$

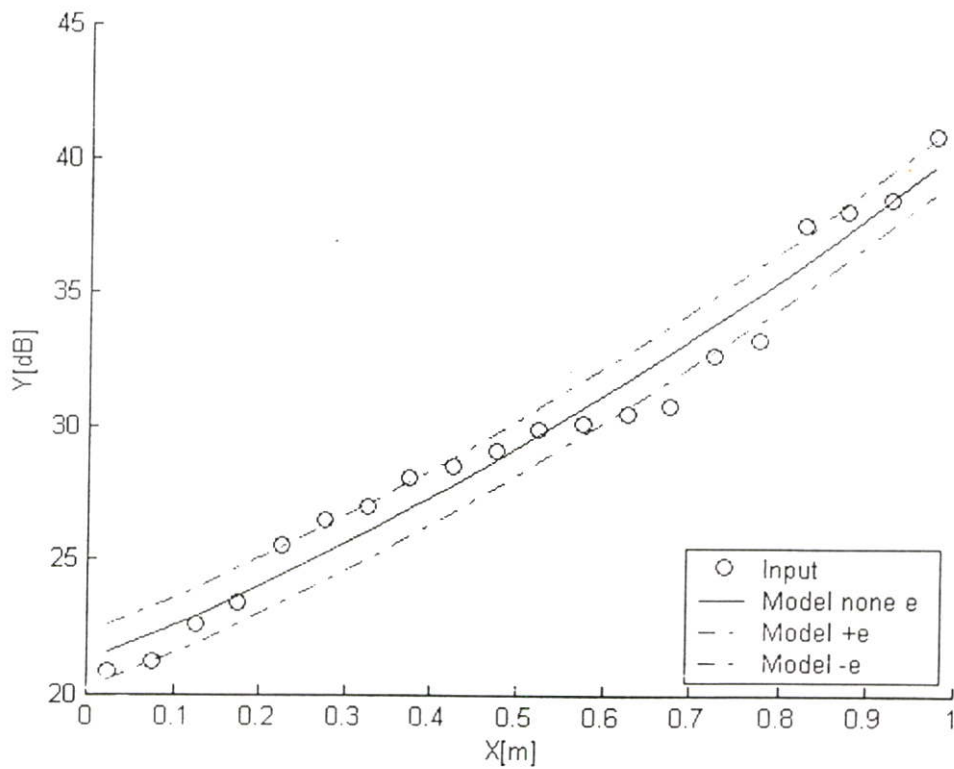
ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองคือ

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2} = 1.0289$$

ได้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นคือ

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e$$

$$y = 68.546 - 2.7831x + 0.97525x^2 \pm 0.90724$$



รูปที่ 3.9 แบบจำลองเชิงเส้นของตัวอย่างชุดข้อมูล

สรุปในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เป็นส่วนสำคัญในวิทยานิพนธ์นี้อันประกอบด้วย รายละเอียดของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ถึงผลที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็น ผลการลดทอนของกำลังงาน ผลการกระจายทางเวลา รวมไปถึงทฤษฎี และหลักการของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำผลที่ได้จากการวิจัยมาแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งในสถานะแวดล้อมภายในอาคาร

บทที่ 4

รูปแบบและขั้นตอนการวิจัย

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบแผนในการทดลองวัดสัญญาณความถี่กว้างยิ่งและขั้นตอนในการทดลองซึ่งเป็นการตรวจสอบผลการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สาย โดยสามารถกำหนดได้ดังนี้

- กำหนดแบบแผนการวัดในห้องประชุมชั้น 12 ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศโดยในการเลือกสถานที่วัดสัญญาณเราจะต้องคำนึงถึงผลกระทบของสัญญาณที่จะสามารถแสดงได้ในการนำไปใช้งานจริง ซึ่งห้องประชุมเป็นห้องที่เหมาะสม
- กำหนดตำแหน่งสำหรับการวัดสัญญาณที่เหมาะสมภายในห้องประชุมโดยคำนึงถึงการแพร่กระจายของสัญญาณในตำแหน่งและมุมของสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันเพื่อนำผลที่ได้จากการวัดสัญญาณมาวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง
- กำหนดแบบแผนในการวัดภายในห้องวิจัยชั้น 9 ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศเพื่อวางแผนในอนาคต สำหรับการนำสัญญาณแถบกว้างยิ่งมาใช้งาน โดยที่ในการวัดสัญญาณจะมีการเปรียบเทียบในแต่ละห้องในแต่ละตำแหน่งเพื่อให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน โดยในการวิจัยวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นจะมีการแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียของสัญญาณในแต่ละตำแหน่งเพื่อนำมาเปรียบเทียบให้เห็นถึงความเหมาะสมในการกำหนดจุดรับสัญญาณ และจุดส่งสัญญาณ

โดยทั่วไปจะมีการพิจารณา 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกได้ทำการวัดภายในห้องซึ่งมีลักษณะเป็นห้องทำงานหรือสำนักงาน และส่วนที่สองได้ทำการวัดภายในอาคาร โดยในการวัดแต่ละส่วนได้ออกแบบ และกำหนดลักษณะ วิธีการวัดในรูปแบบของแบบจำลองลักษณะที่จะแสดงให้เห็นถึงการกระจายของสัญญาณได้ชัดเจนที่สุด นอกจากนั้นยังได้ทำการตรวจสอบถึงผลของการกระจายทางเวลาของช่องสัญญาณคือ ค่าเฉลี่ยประวิงเวลา และค่าการแผ่ประวิง ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะทางเวลาของสัญญาณที่เข้ามาถึงยังสายอากาศด้านรับและแสดงค่าของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นและความหนาแน่นสะสม เมื่อเปรียบเทียบกับการสูญเสียของสัญญาณ เพื่อนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาประกอบกับการตัดสินใจในการออกแบบการสื่อสารภายในอาคารหรือแบบจำลองที่มีลักษณะคล้ายกันต่อไป

หลังจากขั้นตอนการวัดเสร็จสิ้นลงข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ซึ่งจะแสดงในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ อาทิเช่น ผลของระดับกำลังงานที่สูญเสีย เป็นต้น

4.2 การเตรียมการทดลองวัด

4.2.1 รูปแบบของการทดลองวัด

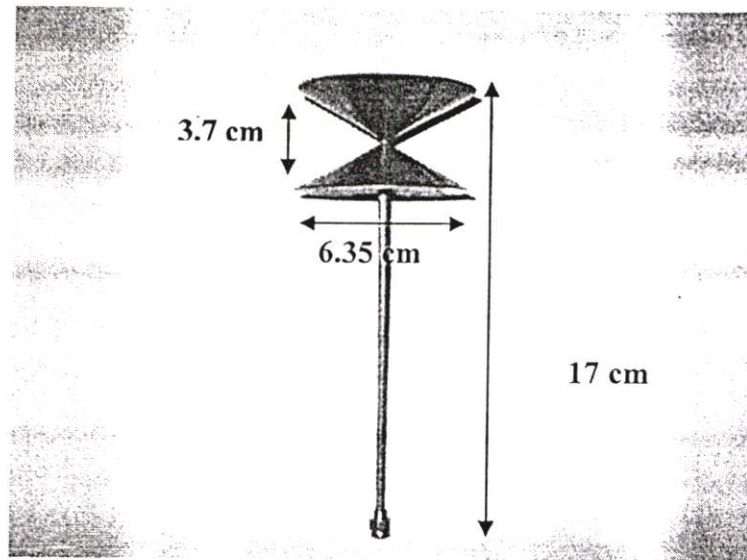
ในระบบการวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นจะใช้เครื่องวัดเฉพาะทางอันประกอบไปด้วย เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์รุ่น HP-8510C ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-parameter test set) รุ่น HP-8514B และตัวสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesized sweeper) รุ่น HP-83620A เป็นอุปกรณ์หลักในการทดลอง ซึ่งจะถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ที่เชื่อมต่อผ่านช่องสื่อสารแบบ GPIB (General purpose interface bus) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่สามารถตรวจวัดสัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ต ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการตรวจวัดแบบสองพอร์ตโดยพอร์ตที่หนึ่งคือพอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (Tx) ส่วนพอร์ตสองจะใช้ในการรับสัญญาณ (Rx) โดยที่ปลายของพอร์ตทั้งสองจะถูกต่อด้วยสายอากาศและทำการวัดในโดเมนความถี่ก่อนที่จะถูกนำผลการวัดไปวิเคราะห์ต่อไป

4.2.2 สายอากาศที่ใช้ในการทดลองวัด

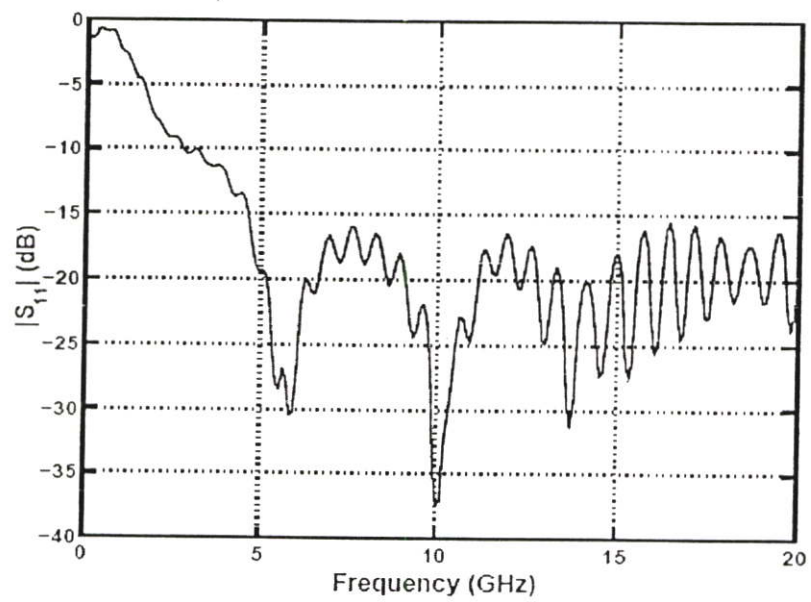
ในการตรวจวัดช่องสัญญาณแบบไร้สายนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่เรียกว่าสายอากาศ ซึ่งช่วยในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายผ่านอากาศไปยังสายอากาศทางด้านรับแล้วเปลี่ยนกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าตามเดิม โดยในการทดลองนี้ได้ใช้สายอากาศอยู่ 2 ชุดคือ สายอากาศทางด้านส่ง (Tx) และสายอากาศทางด้านรับ (Rx) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) แบบรอบตัว (Omni-directional) และเป็นสายอากาศที่ตอบสนองความถี่ได้กว้าง (wideband) ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ~ 10.6 GHz ตามข้อกำหนดย่านความถี่การใช้งานของระบบแถบกว้างยิ่งของ FCC

o สายอากาศแบบกรวยคู่

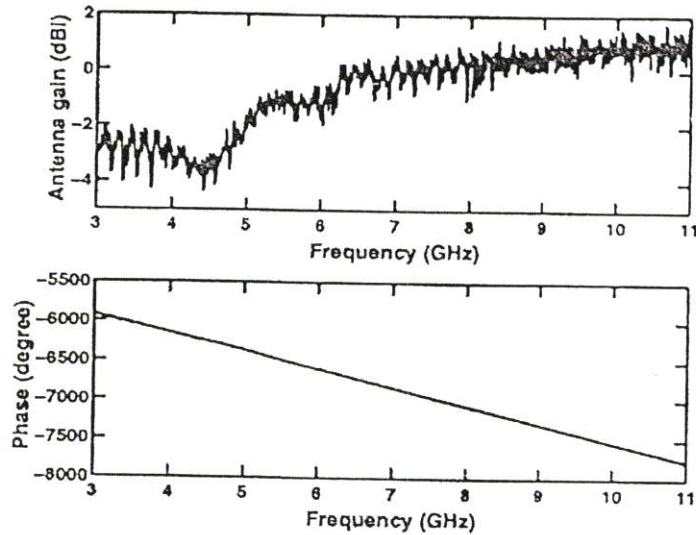
สายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical antenna) เป็นหนึ่งในสายอากาศที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองโดยมีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวในมุมกวาด (Azimuth) มีอัตราขยาย (Gain) อยู่ในช่วง 1.5 ถึง 15.0 dBi รูปที่ 4.1 และ 4.2 จะแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของสายอากาศชนิดนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical)



รูปที่ 4.2 คุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่



รูปที่ 4.3 ขนาด (Antenna gain) และเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศ

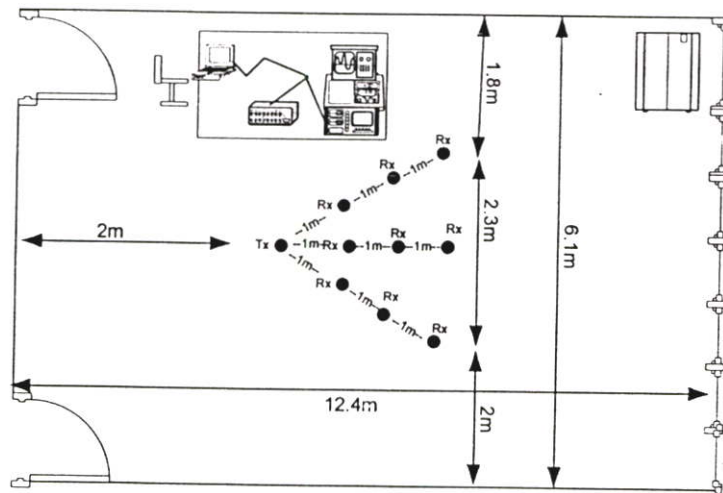
สายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศที่มีลักษณะการแพร่กระจาย (Broadband) คลื่นแบบรอบตัว การพิจารณาสายอากาศ กรวยคู่ นี้ ได้พิจารณาจากการกระจายของสายอากาศซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับกับรูปคลื่นสัญญาณแบบพัลส์ [7], [8] โดยกรวยด้านบนของสายอากาศใช้ติดต่อกับสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุขณะที่กรวยด้านล่าง ใช้ติดต่อกับกราวด์รูปที่ 4.1 แสดงถึงค่าประสิทธิภาพการสะท้อนกลับ (reflection coefficient) $|S_{11}|$ ของสายอากาศกรวยคู่ ให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพการสะท้อนกลับนั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ระหว่าง 3.1 GHz และ 10.6 GHz

4.3 การวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1

4.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

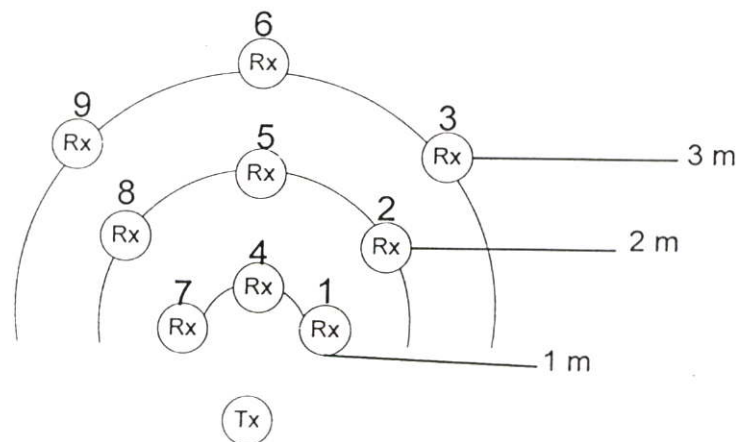
โดยการทดลองนี้จะทำงานโดยใช้พอร์ตที่ 1 ต่อกับสายอากาศทางด้านส่งและใช้พอร์ตที่ 2 ต่อกับสายอากาศทางด้านรับ ซึ่งมีความถี่ครอบคลุมตลอดทั้งช่วงที่ FCC กำหนด คือตั้งแต่ 3.1 ~ 10.6 GHz โดยมีความถี่ศูนย์กลางและแบนด์วิดท์รวม เท่ากับ 6.85 GHz และ 7.5 GHz ตามลำดับ ในส่วนของการวิเคราะห์แบบจำลองนั้น เราได้ใช้สัญญาณพัลส์ที่มอดูเลตแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม (Rectangular passband pulse) ในการวิเคราะห์ ซึ่งในรูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองลักษณะห้องและอุปกรณ์ที่ใช้วัดภายในอาคารแบบที่ 1 โดยลักษณะภายในห้องจะมีลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าความยาวและขนาดของห้องได้เขียนอธิบายเอาไว้ดังรูป โดยเครื่อง VNA จะวางไว้ในตำแหน่งมุมห้องทางซ้ายและ เมื่อมีการวัดสัญญาณสายอากาศทางด้านส่งจะอยู่ที่จุด Tx ส่วนสายอากาศทางด้านรับ

จะมีการปรับไปตามตำแหน่งที่ได้กำหนดเอาไว้ ซึ่งสามารถอธิบายให้ละเอียดในแต่ละตำแหน่งได้จากรูปที่ 4.5 แสดงการกำหนดตำแหน่งในการส่งสัญญาณและ การรับสัญญาณในระยะต่างกัน



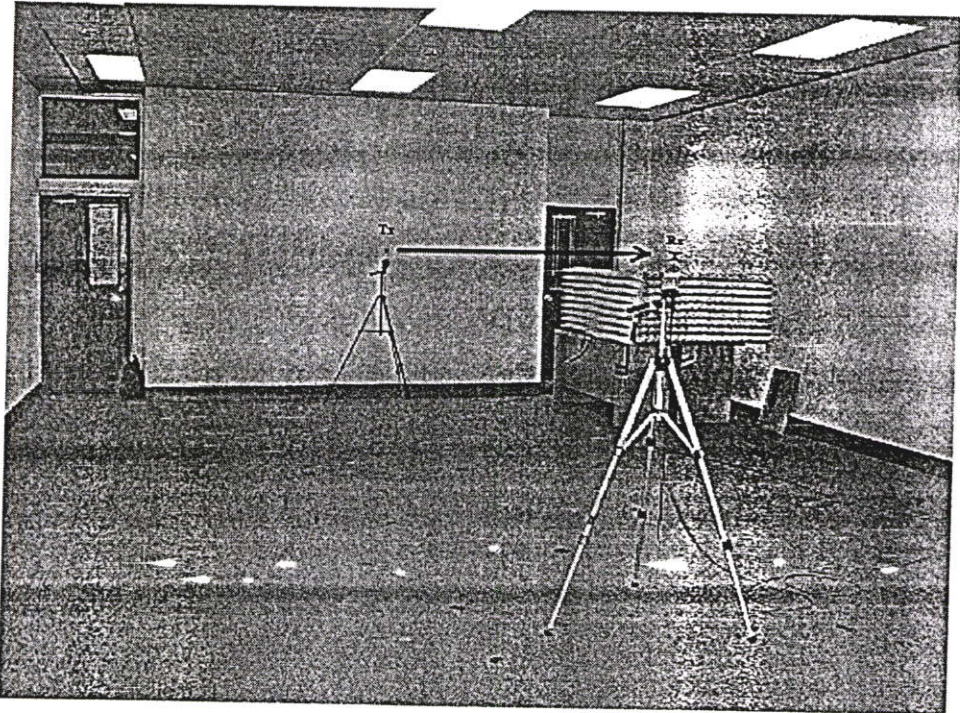
รูปที่ 4.4 แบบจำลองลักษณะห้องและอุปกรณ์ที่ใช้วัดภายในอาคารแบบที่ 1

ห้องที่ใช้สำหรับการเตรียมการในการวัดสัญญาณ โดยรูปแบบของการทดลองสายอากาศที่ใช้ในการส่งสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่ง อยู่ตรงตำแหน่ง Tx และสายอากาศที่ใช้ในการรับสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งอยู่ตรงตำแหน่ง Rx ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดสัญญาณแถบกว้างยิ่งภายในอาคาร



รูปที่ 4.5 กำหนดตำแหน่งของตัวรับ ~ ส่งสัญญาณ

เพื่อสามารถที่จะอธิบายการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับและ สายอากาศทางด้านส่ง ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้กำหนดให้แต่ละตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับเพิ่มระยะทางขึ้นครั้งละ 1 เมตร 2 เมตร และ 3 เมตร ตามลำดับ โดยในการเริ่มตำแหน่งใหม่จะมีการทำมุมกัน 45 องศา



รูปที่ 4.6 การติดตั้งอุปกรณ์วัดสัญญาณแถบกว้างยิ่งภายในอาคาร

4.3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

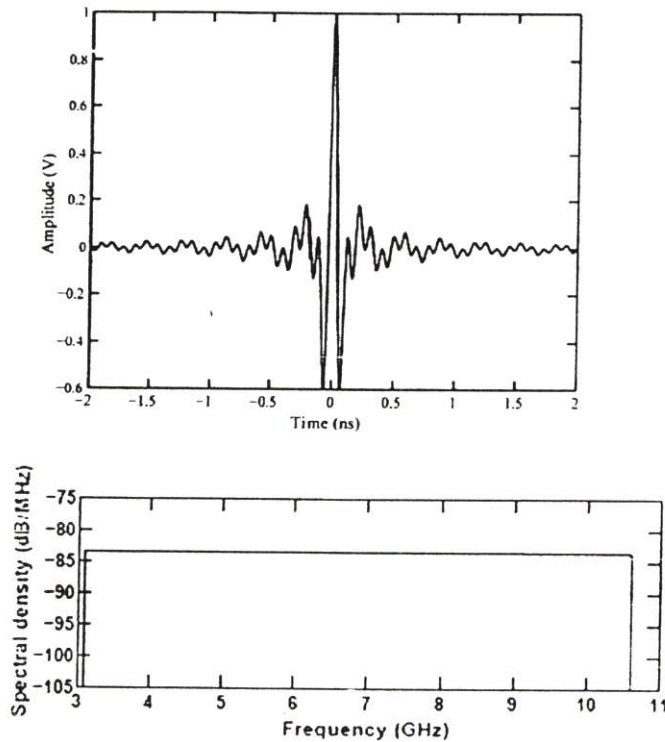
พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการทดลองได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดแบบที่ 1

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ช่วงความถี่ที่ทำการทดลอง	3 GHz ~ 11GHz
จำนวนของตำแหน่งความถี่	801
ความสูงของสายอากาศด้านส่ง	1.5 m
ความสูงของสายอากาศด้านรับ	1.5 m
ระยะห่างระหว่างจุดที่ 1 จุดที่ 2 จุดที่ 3	1, 2, 3 m
ชนิดของสายอากาศ	สายอากาศแบบกรวยคู่

4.3.3 แบบจำลองของสัญญาณที่ใช้ส่ง

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นรูปแบบสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่ใช้ในการส่งได้ถูกกำหนดไว้คือเราจะพิจารณาในส่วนของสัญญาณอิมพัลส์ซึ่งมีความถี่ครอบคลุมตลอดทั้งช่วงที่ FCC กำหนด คือตั้งแต่ 3.1 GHz ~ 10.6 GHz โดยมีความถี่ศูนย์กลางและแบนด์วิดท์รวม เท่ากับ 6.85 GHz และ 7.5 GHz ตามลำดับ ในส่วนของการวิเคราะห์แบบจำลองนั้นได้ใช้สัญญาณพัลส์ที่เรียกว่า แถบผ่านสี่เหลี่ยม ในการวิเคราะห์โดยกำหนดความถี่ต่ำสุด (f_{\min}) เท่ากับ 3.1 GHz ความถี่สูงสุด (f_{\max}) เท่ากับ 10.6 GHz และสเปกตรัมแบนด์วิดท์ (f_b) เท่ากับ 7.5 GHz ซึ่งในรูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบของสัญญาณพัลส์ที่ใช้วิเคราะห์และมีนิยามดังสมการที่ 4.1



รูปที่ 4.7 รูปแบบสัญญาณส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง

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

โดยที่

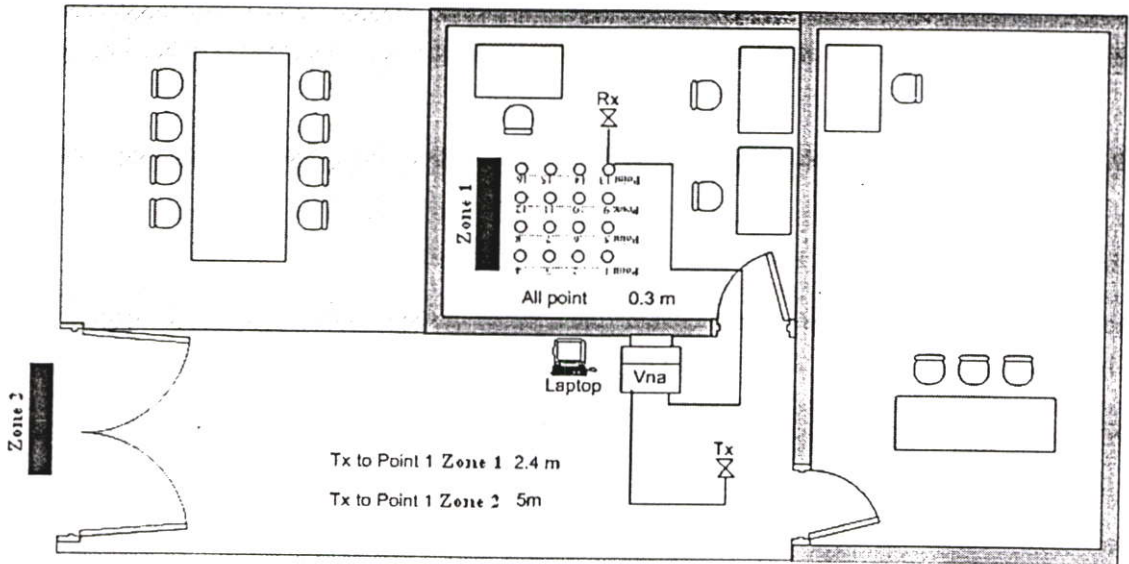
f_{\max} คือความถี่สูงสุดเท่ากับ 10.6 GHz

f_{\min} คือความถี่ต่ำสุดเท่ากับ 3.1 GHz

f_b คือแบนด์วิดท์

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

4.4 การวัดช่องสัญญาณภายในอาคารรูปแบบที่ 2



รูปที่ 4.8 แบบจำลองลักษณะห้องและอุปกรณ์ที่ใช้วัดภายในอาคารแบบที่ 2

ในการวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ในการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่ง โดยการวัดสัญญาณในรูปแบบที่ 2 นี้จะเป็นการวัดเพื่อนำผลที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์ถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้างยิ่งซึ่งในรูปแบบที่ 2 นี้ได้กำหนดแบบจำลองในการวัดสัญญาณออกเป็น 2 บริเวณคือบริเวณที่ 1 จะเป็นลักษณะภายในห้องโดยมีการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณแบ่งออกเป็น 16 ตำแหน่งและในแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.3 เมตร ส่วนสายอากาศทางด้านส่งสัญญาณห่างจากตำแหน่งที่ 1 ของบริเวณที่ 1 เป็นระยะทาง 2.4 เมตร ส่วนบริเวณที่ 2 มีการกำหนดรูปแบบของแบบจำลองในการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งในลักษณะที่เหมือนกันกับบริเวณที่ 1 นั่นคือกำหนดตำแหน่งในการรับสัญญาณเป็น 16 ตำแหน่งโดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.3 เมตรและระยะห่างระหว่างตำแหน่งสายอากาศทางด้านส่งสัญญาณห่างจากตำแหน่งที่ 1 ของบริเวณที่ 2 เป็นระยะทาง 5 เมตรโดยส่วนที่แตกต่างกันของบริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 คือสภาพแวดล้อมในการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่ง โดยที่ในบริเวณที่ 2 จะเป็นบริเวณภายนอกห้องวิจัยทำการวัดเพื่อศึกษาว่าตรงตำแหน่งนั้นมีการสูญเสียของสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งมากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับสัญญาณที่วัดได้ภายในบริเวณที่ 1

4.4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

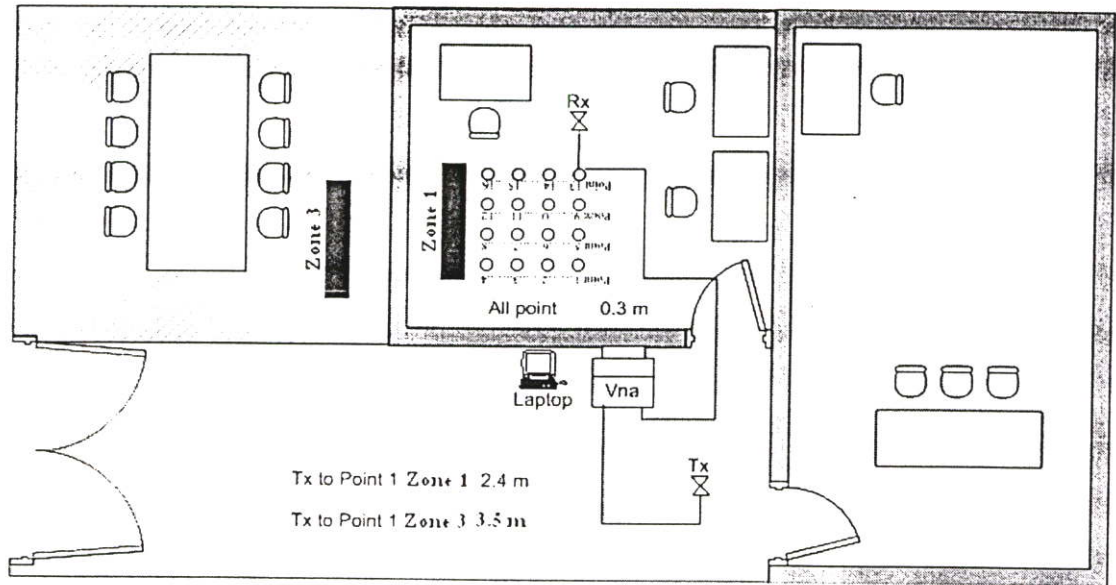
พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการทดลองได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดรูปแบบที่ 2

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ช่วงความถี่ที่ทำการทดลอง	3.0 ~ 11.0 GHz
จำนวนของตำแหน่งความถี่	801
พิสัยพลวัตของกำลังงาน	80 dB
ความสูงของเสาอากาศด้านส่ง	1.50 เมตร
ความสูงของเสาอากาศด้านรับ	1.50 เมตร
ระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ บริเวณ 1	2.4 เมตร
ระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ บริเวณ 2	5 เมตร
ระยะห่างของจุดแต่ละจุดที่วัด	0.3 เมตร
เสาอากาศที่ใช้	เสาอากาศแบบกรวยคู่

จากรูปที่ 4.8 แบบจำลองลักษณะห้องและอุปกรณ์ที่ใช้วัดภายในอาคารแบบที่ 2 จุด Rx ที่แบบจำลองทั้งในบริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 จะเลื่อนไปตามตำแหน่งโดยเริ่มจากตำแหน่งที่ 1 ไปตำแหน่งที่ 2 ในแต่ละตำแหน่งจะทำการวัดเก็บข้อมูล 1 ครั้งแล้วทำการเลื่อน Rx ไปทุกๆ ตำแหน่งตามลำดับเพื่อให้ได้ข้อมูลของการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งในการนำมาวิเคราะห์โดยการพิจารณาเพื่อต้องการทราบค่าการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารและระยะทางที่ต่างกันของบริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 [9]

4.5 การวัดช่องสัญญาณภายในอาคารรูปแบบที่ 3



รูปที่ 4.9 แบบจำลองลักษณะห้องและอุปกรณ์ที่ใช้วัดภายในอาคารแบบที่ 3

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดรูปแบบที่ 3

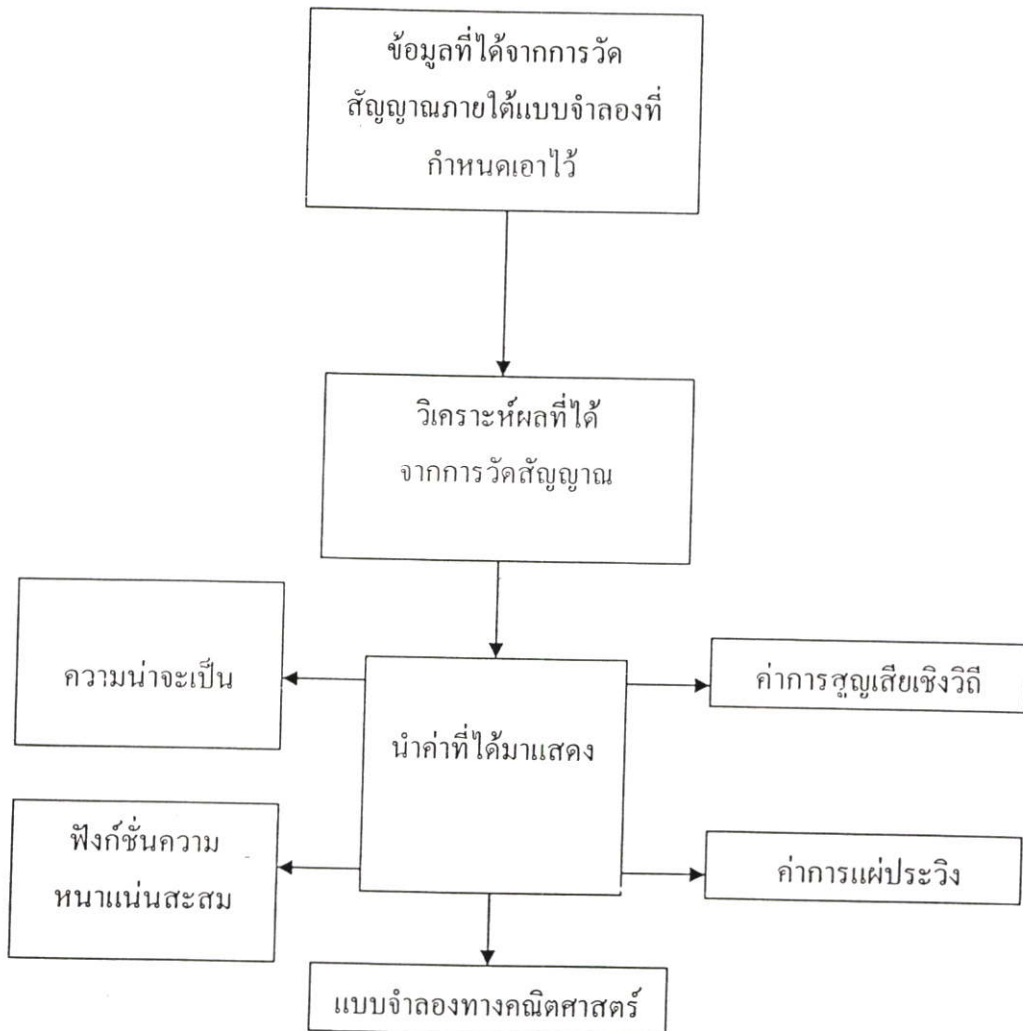
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ช่วงความถี่ที่ทำการทดลอง	3.0 ~ 11.0 GHz
จำนวนของตำแหน่งความถี่	801
พิสัยพลวัตของกำลังงาน	80 dB
ความสูงของสายอากาศด้านส่ง	1.50 เมตร
ความสูงของสายอากาศด้านรับ	1.50 เมตร
ระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ บริเวณ 1	2.4 เมตร
ระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ บริเวณ 3	3.5 เมตร
ระยะห่างของจุดแต่ละจุดที่วัด	0.3 เมตร
สายอากาศที่ใช้	สายอากาศแบบกรวยคู่

ในการวัดสัญญาณแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นจะอยู่ในรูปแบบของการส่งสัญญาณในลักษณะแบบพัลส์ที่ทำการมอดูเลตแบบ แถบผ่านสี่เหลี่ยม โดยที่สัญญาณนี้จะมีย่านความถี่ในช่วง

3 GHz ~ 11 GHz โดยที่ค่า f_c จะมีค่าเท่ากับ 7.5 GHz ในการสร้างแบบจำลองสัญญาณแถบความถี่ กว้างยิ่งนั้นสามารถสร้างได้หลายวิธี โดยทั่วไปคุณลักษณะของการส่งผ่านของสัญญาณและการประยุกต์ใช้งานจะขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างสัญญาณแถบความถี่ กว้างยิ่ง การรับสัญญาณของภาครับมีความแตกต่างกันไปตามจุดต่าง ๆ ที่ถูก กำหนดโดยอ้างอิงจากแบบจำลอง อันอาจเป็นผลเนื่องมาจากการการกระทบของคลื่นเมื่อเกิดการบังจากสภาพแวดล้อมภายในห้องและยังส่งผลให้เกิดการกระจายทางเวลาของสัญญาณ

ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของสัญญาณที่เข้ามาถึงยังภาครับที่บริเวณที่ 3 เพราะบริเวณที่ 1 มีระยะที่ใกล้กว่าทำให้รับสัญญาณได้ชัดเจนกว่าแต่ก็มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายใน จุดที่กำหนด 16 จุด [10]

4.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 4.10 ลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อได้ผลการจากการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งในแต่ละแบบจำลองซึ่งได้กล่าวไปแล้วในตอนต้น จากนั้นใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละแบบจำลองซึ่งจะมีความแตกต่างกัน โดยส่วนแรกได้ทำการวิเคราะห์และนำเสนอคือ ค่าการสูญเสียเชิงวิถี ความหนาแน่นความน่าจะเป็น ฟังก์ชันความหนาแน่นสะสม และค่าการแผ่ประวิงทั้งหมดที่กล่าวมาเพื่อที่ได้แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียของสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งในแต่ละระยะทางที่ได้กำหนดเอาไว้ในแบบจำลองในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร

4.6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด

เมื่อนำผลการวิจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ในการทดลองวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าการลดลงของระดับกำลังงานที่รับได้ในระยะต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น จึงสามารถที่จะแทนผลการวิจัยนั้นด้วยการประมาณค่าฟังก์ชัน โดยวิธีการประมาณค่าการถดถอยของกำลังสองแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด ส่วนเหตุผลที่เลือกการสูญเสียของระดับกำลังงานนั้นก็เพราะว่าต้องการที่จะให้เห็นถึงการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่ง

การประมาณค่าฟังก์ชัน โดยการแทนผลที่ได้จากการวิจัยเลือกให้ฟังก์ชัน โพลีโนเมียลกำลัง 2 เพราะให้ค่าผิดพลาดน้อยที่สุด โดยแสดงการแทนผลที่ได้จากการวิจัยในฟังก์ชัน โพลีโนเมียลกำลัง 2 ได้ดังนี้

- o แบบจำลองการถดถอยของฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลัง 2

(2-Degree polynomial regression model)

สมการของโพลีโนเมียลกำลัง 2 มีนิยามคือ

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

โดยที่

a, b, c คือ ค่าคงที่ที่ต้องการทราบ

e คือ ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าฟังก์ชันและข้อมูลจริง

เมื่อกำหนดจุดหรือข้อมูลที่ต้องการพิจารณา คือ

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

และค่าผิดพลาดรวม (Total square error) คือ

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

จากนั้นทำการหาอนุพันธ์ย่อย (Partial derivative) เทียบกับตัวแปร a, b, c ตามลำดับซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ทำให้ค่าผิดพลาดรวมน้อยที่สุด

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

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

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

นำ -2 หารตลอดทั้ง (4.4) (4.5) และ (4.6) จะได้สมการทั่วไปคือ

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

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

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

โดยสามารถหาค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (root mean square error) ได้จาก

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

จะเห็นได้ว่าเราควรจะเลือกวิธีที่มีค่าผิดพลาด (e) น้อยที่สุดเป็นซึ่งต่อไปจะแสดงการแทนผลที่ได้จากการวิจัยลงในสมการดังกล่าวเพื่อหาสมการที่ใช้แทนผลที่ได้จากการวิจัยดังนี้

แทนผลที่ได้จากการวิจัยแบบจำลองการถดถอยของฟังก์ชัน โพลีโนเมียลกำลัง 2 ซึ่งได้แก่ ค่าการสูญเสียเชิงวิถึในการทดลองวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1 ซึ่งเป็นข้อมูลในระยะ 3 เมตร

$$(1, 57.7352), (2, 57.3476), (3, 62.2543)$$

จะเห็นได้ว่า ค่า $n = 3$ เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าลงใน (4.7) (4.8) และ (4.9) จะได้

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^3 x_j &= 6, \quad \sum_{j=1}^3 x_j^2 = 14, \quad \sum_{j=1}^3 x_j^3 = 36, \quad \sum_{j=1}^3 x_j^4 = 98 \\ \sum_{j=1}^3 y_j &= 171.34, \quad \sum_{j=1}^3 x_j y_j = 353.19, \quad \sum_{j=1}^3 x_j^2 y_j = 841.41 \end{aligned}$$

สมการทั่วไปคือ

$$3a + 6b + 14c = 171.34$$

$$6a + 14b + 36c = 353.19$$

$$14a + 36b + 98 = 841.41$$

โดยผลเฉลยของสมการทั่วไปคือ

$$a = 45.417, \quad b = 6.6709, \quad c = -0.35285$$

จาก (4.10) ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองคือ

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2} = 0.1535$$

เมื่อแทนค่าลงใน (4.2) จะได้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นคือ

$$y = 45.417 + 6.6709x - 0.35285x^2 \pm 0.1535$$

ผลที่ได้จากการวิจัยในรูปแบบจำลองการถดถอยของฟังก์ชัน โพลีโนเมียลกำลัง 2 ซึ่งได้แก่ ค่าการสูญเสียเชิงวิถีในการทดลองวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 2 บริเวณที่ 1 ซึ่งเป็นข้อมูล 4 ชุดข้อมูล

$$(1, 67.1442), (2, 65.6639), (3, 70.1914), (4, 72.6121)$$

จะเห็นได้ว่า ค่า $n = 4$ เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าลงใน (4.7) (4.8) และ (4.9) จะได้

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^4 x_j &= 10, \quad \sum_{j=1}^4 x_j^2 = 30, \quad \sum_{j=1}^4 x_j^3 = 100, \quad \sum_{j=1}^4 x_j^4 = 354 \\ \sum_{j=1}^4 y_j &= 275.61, \quad \sum_{j=1}^4 x_j y_j = 699.49, \quad \sum_{j=1}^4 x_j^2 y_j = 2123.3 \end{aligned}$$

สมการทั่วไปคือ

$$4a + 10b + 30c = 275.61$$

$$10a + 30b + 100c = 699.49$$

$$30a + 100b + 354 = 2123.3$$

โดยผลเฉลยของสมการทั่วไปคือ

$$a = 68.546, \quad b = -2.7831, \quad c = 0.97525$$

จาก (4.10) ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองคือ

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2} = 0.90724$$

เมื่อแทนค่าลงใน (4.2) จะได้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นคือ

$$y = 68.546 - 2.7831x + 0.97525x^2 \pm 0.90724$$

ผลที่ได้จากการวิจัยในรูปแบบจำลองการถดถอยของฟังก์ชัน โพลีโนเมียลกำลัง 2 ซึ่งได้แก่ ค่าการสูญเสียเชิงวิถีในการทดลองวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 2 บริเวณที่ 2 ซึ่งเป็นข้อมูล 4 ชุดข้อมูล

$$(1, 67.6892), (2, 69.7711), (3, 72.7063), (4, 76.5172)$$

จะเห็นได้ว่า ค่า $n = 4$ เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าลงใน (4.7) (4.8) และ (4.9) จะได้

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^4 x_j &= 10, & \sum_{j=1}^4 x_j^2 &= 30, & \sum_{j=1}^4 x_j^3 &= 100, & \sum_{j=1}^4 x_j^4 &= 354 \\ \sum_{j=1}^4 y_j &= 275.61, & \sum_{j=1}^4 x_j y_j &= 699.49, & \sum_{j=1}^4 x_j^2 y_j &= 2123.3 \end{aligned}$$

สมการทั่วไปคือ

$$4a + 10b + 30c = 286.63$$

$$10a + 30b + 100c = 731.42$$

$$30a + 100b + 354 = 2225.4$$

โดยผลเฉลยของสมการทั่วไปคือ

$$a = 66.477, b = 0.78067, c = 0.43225$$

จาก (4.10) ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองคือ

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2} = 0.0025044$$

เมื่อแทนค่าลงใน (4.2) จะได้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นคือ

$$y = 66.477 + 0.78067x + 0.43225x^2 \pm 0.0025044$$

ผลที่ได้จากการวิจัยในรูปแบบจำลองการถดถอยของฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลัง 2 ซึ่งได้แก่ค่าการสูญเสียเชิงวิธีในการทดลองวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 3 ซึ่งเป็นข้อมูล 4 ชุดข้อมูล

$$(1, 72.1126), (2, 72.2468), (3, 72.2133), (4, 73.5180)$$

จะเห็นได้ว่า ค่า $n = 4$ เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าลงใน (4.7) (4.8) และ (4.9) จะได้

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^4 x_j &= 10, \quad \sum_{j=1}^4 x_j^2 = 30, \quad \sum_{j=1}^4 x_j^3 = 100, \quad \sum_{j=1}^4 x_j^4 = 354 \\ \sum_{j=1}^4 y_j &= 290.09, \quad \sum_{j=1}^4 x_j y_j = 727.32, \quad \sum_{j=1}^4 x_j^2 y_j = 2187.3 \end{aligned}$$

สมการทั่วไปคือ

$$4a + 10b + 30c = 290.09$$

$$10a + 30b + 100c = 727.32$$

$$30a + 100b + 354 = 2187.3$$

โดยผลเฉลยของสมการทั่วไปคือ

$$a = 72.94, \quad b = -1.0449, \quad c = 0.29262$$

จาก (4.10) ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองคือ

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j - cx_j^2)^2} = 0.16836$$

เมื่อแทนค่าลงใน (4.2) จะได้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นคือ

$$y = 72.94 - 1.0449x + 0.29262x^2 \pm 0.16836$$

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนในการเตรียมการวัดสัญญาณ การกำหนดพารามิเตอร์ในการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างซึ่งรวมถึง การกำหนดแบบจำลองในการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยั้งทั้งสามแบบ เพื่อให้เห็นถึงค่าการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยั้งว่าในแต่ละแบบจำลองนั้นมีค่าการสูญเสียต่างกันมากน้อยเพียงใด โดยในบทนี้ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบใช้กับชุดข้อมูลในแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1 แบบที่ 2 และ แบบที่ 3 ตามลำดับ ผลที่ได้จากรูปแบบ และ ขั้นตอนการวิจัยในบทนี้จะแสดงในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

5.1 กล่าวนำ

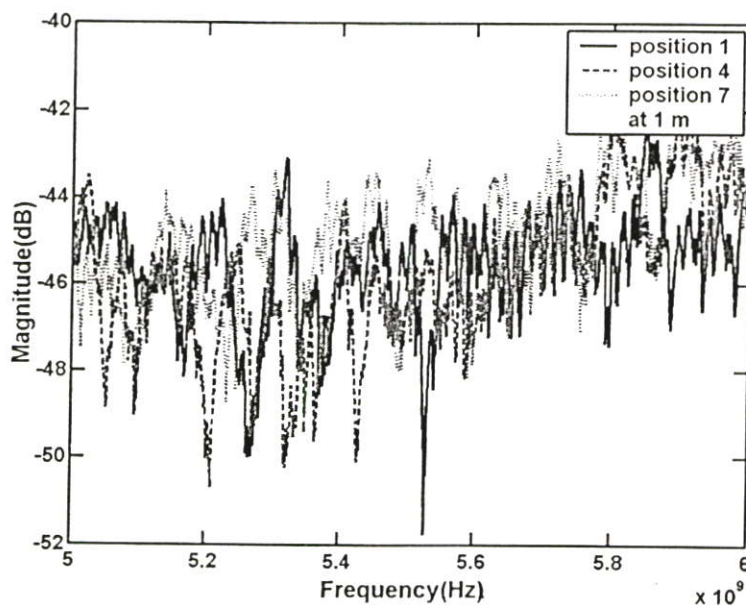
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ข้อมูลของช่องสัญญาณที่ได้จากการวัดในห้องทั้ง 3 รูปแบบจำลองโดยแสดงในพารามิเตอร์หลักทั้งหมด ซึ่งได้แก่ค่าการสูญเสียเชิงวิถีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นสะสม ผลการเปรียบเทียบการวัดสัญญาณในแต่ละสถานะแวดล้อม เป็นต้น

5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1

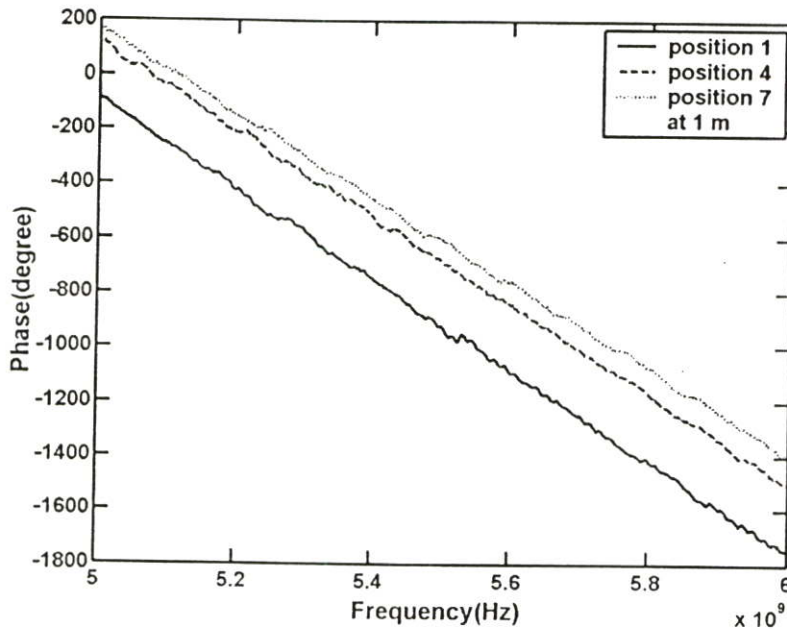
ลักษณะการวัดในแบบที่ 1 นี้ได้ทำภายในห้องประชุมซึ่งจะสามารถเห็นได้ชัดในรูปของสถานที่วัดสัญญาณในบทที่ 4 โดยจะพิจารณาในแต่ละส่วนตามลำดับ ตั้งแต่สัญญาณที่รับได้ไปจนถึงค่าความสูญเสียในแต่ละตำแหน่งของการวัด

5.2.1 ผลของการวัดขนาดและเฟส

ผลของการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อพิจารณาที่ขนาดและเฟสโดยการวัดระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ โดยระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณที่ระยะ 1 เมตร



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างขนาดของฟังก์ชันการส่งผ่านตำแหน่งที่ 1, 4 และ 7 ในระยะห่าง 1 เมตร



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านตำแหน่งที่ 1, 4 และ 7

จากรูปที่ 5.1 และ รูปที่ 5.2 แสดงค่าของขนาด และเฟส ของตำแหน่งที่ 1 ตำแหน่งที่ 4 และ ตำแหน่งที่ 7 โดยทั้งสามตำแหน่งอยู่ในระยะ 1 เมตรเท่ากันแต่ต่างกันตรงตำแหน่ง ของแต่ละ ตำแหน่ง ซึ่งจะเห็นได้จากแบบจำลองในที่ใช้ในการทดลอง โดยที่เมื่อวัดสัญญาณออกมานั้น ค่า ของขนาด จะมีค่าใกล้เคียงกันต่างกันในส่วนของเฟส ซึ่งเป็นตำแหน่งของสายอากาศตัวรับนั่นเอง และรูปภาพ เส้นทึบแสดงตำแหน่งตำแหน่งที่หนึ่ง เส้นปะแสดงตำแหน่งตำแหน่งที่สี่ เส้น ตำแหน่งไข่ปลาแสดงตำแหน่งตำแหน่งที่เจ็ด

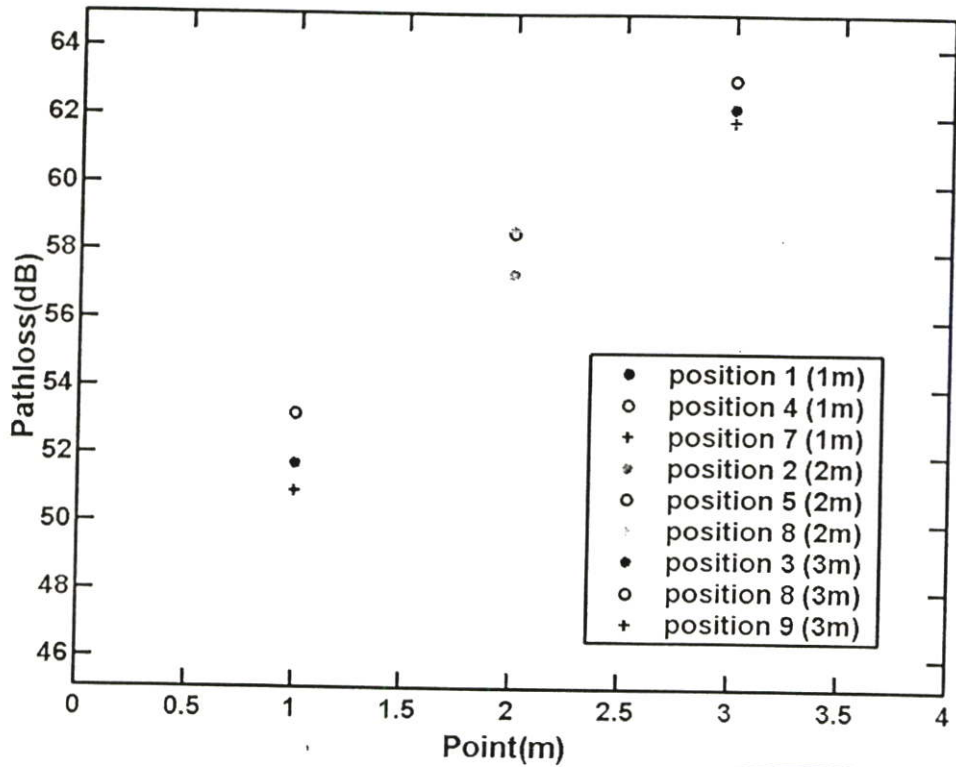
5.2.2 การพิจารณาของการสูญเสียเชิงวิถี

จากการทำการวิจัยที่ได้ทดสอบในการวัดสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่ง และตัวส่งสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งในแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1 เพื่อ หาค่าสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแล้วนำค่าที่ได้ทุกตำแหน่งมาสร้างกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง ตำแหน่งต่างๆ ที่ได้จากการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่ง โดยที่รูปแบบในการวัดจะขยับ ตัวรับสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่ง ให้ใช้ทุกๆ ตำแหน่งที่แสดงในแบบจำลองของการวัด ช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1 โดยที่ในการทดลองจะเริ่มจากระยะหนึ่งเมตร คือตำแหน่งที่ 1, 4, 7 ที่ระยะสองเมตรคือตำแหน่งที่ 2, 5, 8 และที่ระยะที่สาม คือ ตำแหน่งที่ 3, 6, 9 ซึ่งผลที่ได้จาก การทดลอง นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ในแต่ละตำแหน่งว่าการกำหนดระยะทางให้กับสายอากาศ ตัวรับจะมีผลอย่างไรกับรูปแบบของสัญญาณที่ส่งและสัญญาณที่รับ

ตารางที่ 5.1 ค่าสูญเสียเชิงวิถีต่อระยะทางในการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1

ตำแหน่ง	ค่าสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)
ที่ 1 ระยะ 1 เมตร	51.7352 dB
ที่ 2 ระยะ 2 เมตร	57.3476 dB
ที่ 3 ระยะ 3 เมตร	62.2543 dB
ที่ 4 ระยะ 1 เมตร	53.2156 dB
ที่ 5 ระยะ 2 เมตร	58.5454 dB
ที่ 6 ระยะ 3 เมตร	63.0854 dB
ที่ 7 ระยะ 1 เมตร	50.9300 dB
ที่ 8 ระยะ 2 เมตร	58.6322 dB
ที่ 9 ระยะ 3 เมตร	61.8688 dB

จากการทดลองเมื่อพิจารณาที่ผลของตารางที่ 5.1 ค่าสูญเสียเชิงวิถีต่อระยะทางในการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1 ซึ่งค่าของการสูญเสียเชิงวิถีมีค่าเพิ่มมากขึ้นในกรณีที่มีการเพิ่มระยะทางของสายอากาศทางด้านรับสัญญาณไปในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งสรุปได้ว่าในระยะที่เท่ากันแต่มุมต่างกันนั้นผลที่ได้จากการทดลองคือ ค่าการสูญเสียเชิงวิถีมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในระยะที่ต่างกันเริ่มตั้งแต่ 1 เมตร 2 เมตร 3 เมตร ตามลำดับนั้นค่าของการสูญเสียเชิงวิถีจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้างยิ่งนั้น จะมีค่าสูญเสียมากขึ้นเมื่อมีระยะทางเพิ่มมากขึ้น แต่ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมของการรับสัญญาณค่าการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นมีผลกระทบน้อยมาก ดังจะเห็นได้ใน ตำแหน่ง 1 ที่ระยะ 1 เมตร ตำแหน่ง 4 ที่ระยะ 1 เมตร และ ตำแหน่ง 7 ที่ระยะ 1 เมตร ค่าสูญเสียเชิงวิถีมีค่าใกล้เคียงกันคือ 51.7352 dB 53.2156 dB 50.9300 dB ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 ระยะของตำแหน่งในการทดลองและค่าสูญเสียเชิงวิถี

โดยที่ ในแต่ละตำแหน่งของการรับสัญญาณกำหนดสัญลักษณ์ไว้ดังนี้คือ

- * แทน ตำแหน่งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 ในระยะ 1, 2 และ 3 เมตร
- o แทน ตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 ตำแหน่งที่ 4 ในระยะ 1, 2 และ 3 เมตร
- + แทน ตำแหน่งที่ 7 ตำแหน่งที่ 8 ตำแหน่งที่ 9 ในระยะ 1, 2 และ 3 เมตร

โดยแบบจำลองที่กำหนดในการทดลองในห้องนั้น แบ่งออกเป็น 9 ตำแหน่ง ห่างกันตำแหน่งละ 1 เมตร โดยที่ 9 ตำแหน่งนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ระยะที่ 1, 2 และ 3 เมตร ดังที่แสดงในแบบจำลองในรูปการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1 ในบทที่ 4 ซึ่งได้แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการวัดสัญญาณเอาไว้แล้ว และนำสัญญาณที่วัดได้มาศึกษาเพื่อหาค่าของการส่งสัญญาณบนแถบความถี่ความกว้างยิ่ง และการรับสัญญาณบนแถบความถี่ที่มีความกว้างยิ่ง ในตำแหน่งที่มุมต่างกันและระยะที่ต่างกัน และค่าสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแถบความถี่ที่มีความกว้างยิ่ง ในแต่ละตำแหน่งซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าลดลงเมื่อระยะทางเริ่มห่างขึ้นไปตามลำดับ ซึ่งสามารถนำค่าที่ได้จากการทดลองนี้มาประยุกต์ เพื่อนำสัญญาณบนแถบความถี่ที่มีความกว้างยิ่งไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมแบบภายในอาคารได้

5.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 2

สิ่งที่ได้จากการวิเคราะห์ผลคือ ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (PDF) ของค่าสูญเสียเชิงวิถี (Path loss) ที่แสดงค่าที่มีความแตกต่างกันที่บริเวณ 1 และบริเวณ 2 โดยผลจากการวิเคราะห์ได้แสดงตารางต่อไปนี้ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 ค่าสูญเสียเชิงวิถีต่อระยะทางในการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารบริเวณที่ 1

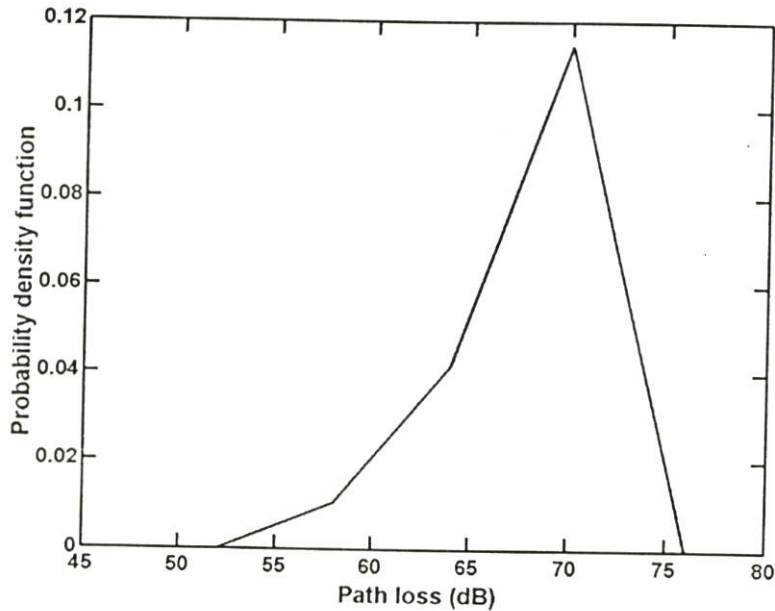
ตำแหน่ง	ค่าสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)
1	67.1442 dB
2	67.8666 dB
3	68.0445 dB
4	69.0207 dB
5	63.4795 dB
6	65.6639 dB
7	67.4850 dB
8	68.2078 dB
9	62.0774 dB
10	67.9969 dB
11	70.1914 dB
12	69.5374 dB
13	60.9263 dB
14	64.6164 dB
15	67.6388 dB
16	72.6121 dB

ตารางที่ 5.3 ค่าสูญเสียเชิงวิถีต่อระยะทางในการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารบริเวณที่ 2

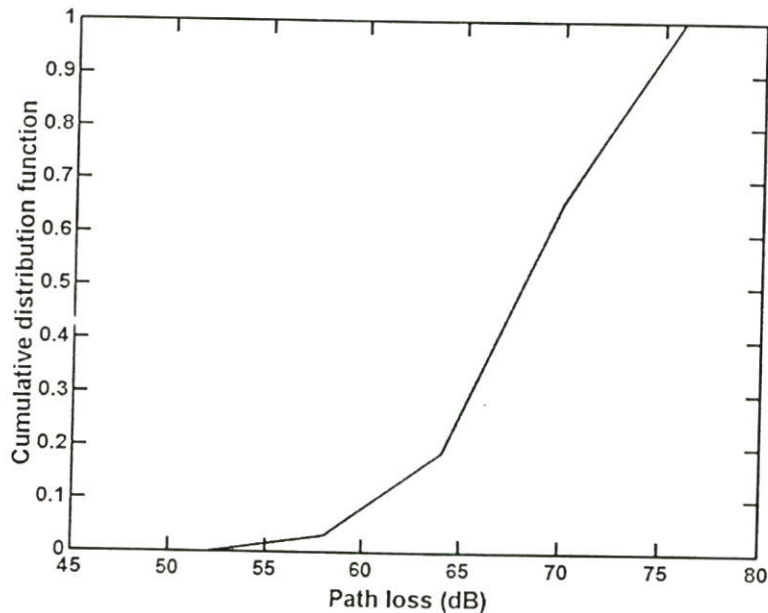
ตำแหน่ง	ค่าสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)
1	67.6892 dB
2	71.3223 dB
3	70.3553 dB
4	75.1858 dB
5	69.0862 dB
6	69.7711 dB
7	69.6602 dB
8	75.2313 dB
9	71.6781 dB
10	71.8441 dB
11	72.7063 dB
12	74.3946 dB
13	72.7673 dB
14	70.7841 dB
15	70.0633 dB
16	76.5172 dB

จากแบบจำลองที่ได้กำหนดเอาไว้ให้มีระยะห่างในแต่ละตำแหน่งเท่ากับ 0.3 เมตรเพื่อต้องการที่จะทราบว่าในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกันระหว่าง บริเวณที่ 1 บริเวณที่ 2 และบริเวณที่ 3 มีความแตกต่างของการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งอย่างไรในแบบจำลองลักษณะเดียวกันระยะห่างของแต่ละตำแหน่งเท่ากัน ซึ่งถ้าพิจารณาทีละ 1 แบบจำลองจากการวัดสัญญาณแถบกว้างยิ่งในบริเวณที่ 1 จะเห็นได้ว่าในตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4 มีค่าสูญเสียเชิงวิถีตามลำดับซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่ 2 ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันคือ 1, 2, 3, 4 จะเห็นได้ว่าค่าสูญเสียเชิงวิถีมีการเพิ่มขึ้นอย่างมากในตำแหน่งที่ 4 นั้นแสดงให้เห็นว่าอาจจะเกิดจากผลกระทบของสภาวะแวดล้อมภายในบริเวณนั้น ซึ่งหมายความว่าไม่ใช่เพียงแต่ระยะทางอย่างเดียวที่เราควรพิจารณาสำหรับตรวจสอบการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น สิ่งที่มีผลกระทบอีกอย่างคือ

สภาวะแวดล้อม โดยเมื่อดูจากตำแหน่งของแบบจำลองในบริเวณที่สองหากจำเป็นต้องมีการติดตั้งตัวรับสัญญาณควรที่จะหลีกเลี่ยงสภาวะแวดล้อมแบบตำแหน่งที่ 4 ของบริเวณที่สองนั่นเอง



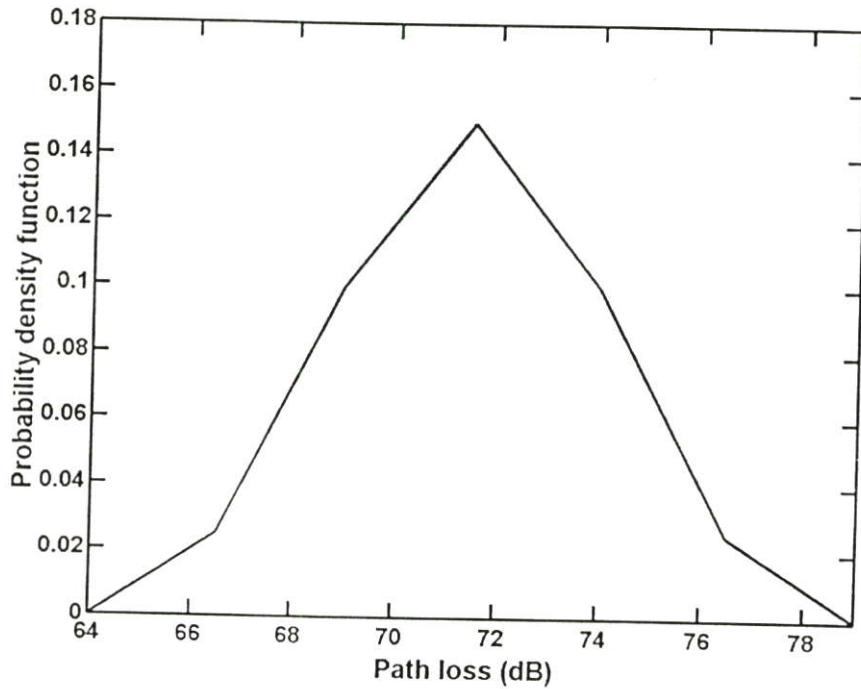
รูปที่ 5.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่บริเวณ 1



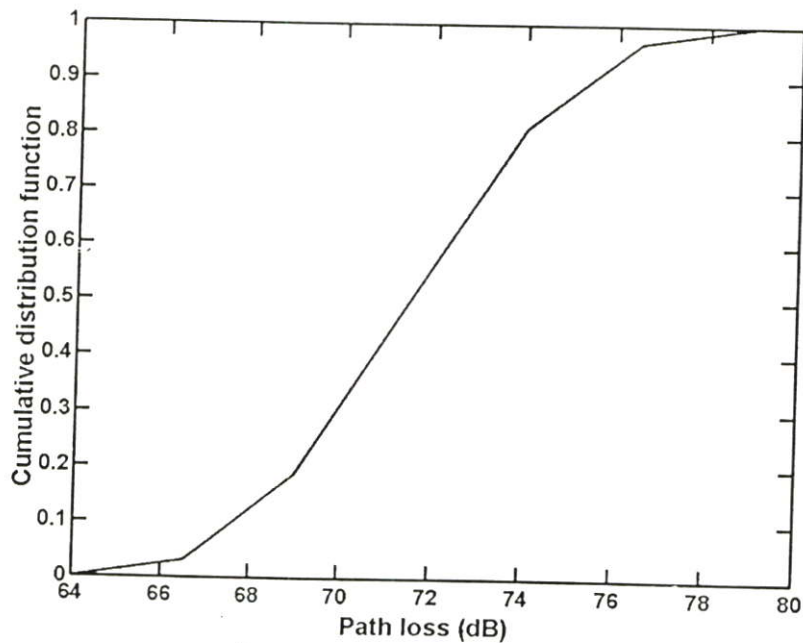
รูปที่ 5.5 ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นสะสมที่บริเวณ 1

ผลการวิเคราะห์เพื่อแสดงให้เห็นค่าฟังก์ชันความหนาแน่นฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นในระยะของค่าการสูญเสียเชิงวิถีตั้งแต่ 53 เดซิเบลไปจนถึง 76 เดซิเบลว่ามีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่จะสูญเสียมากน้อยเท่าไรและคิดร่วมกับค่าเฉลี่ยหรือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นสะสมที่ระยะของการสูญเสียเชิงวิถีที่ระยะเดียวกันเช่นที่ค่าความหนาแน่นความน่าจะเป็น

ที่ 0.5 มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีเท่ากับ 68 เดซิเบล โดยในรูปที่ 5.5 และ 5.7 จะเป็นค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นในระยะของค่าการสูญเสียเชิงวิถีในบริเวณที่ 2 ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 64 เดซิเบล ไปจนถึง 79 เดซิเบล โดยที่เมื่อพิจารณากับความหนาแน่นสะสมในบริเวณที่ 2 ซึ่งที่ค่าความหนาแน่นสะสมที่ 0.5 จะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีอยู่ที่ 72 เดซิเบล ซึ่งสามารถพิจารณาที่ค่าตามลำดับจากรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.6 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่บริเวณ 2



รูปที่ 5.7 ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นสะสมที่บริเวณ 2

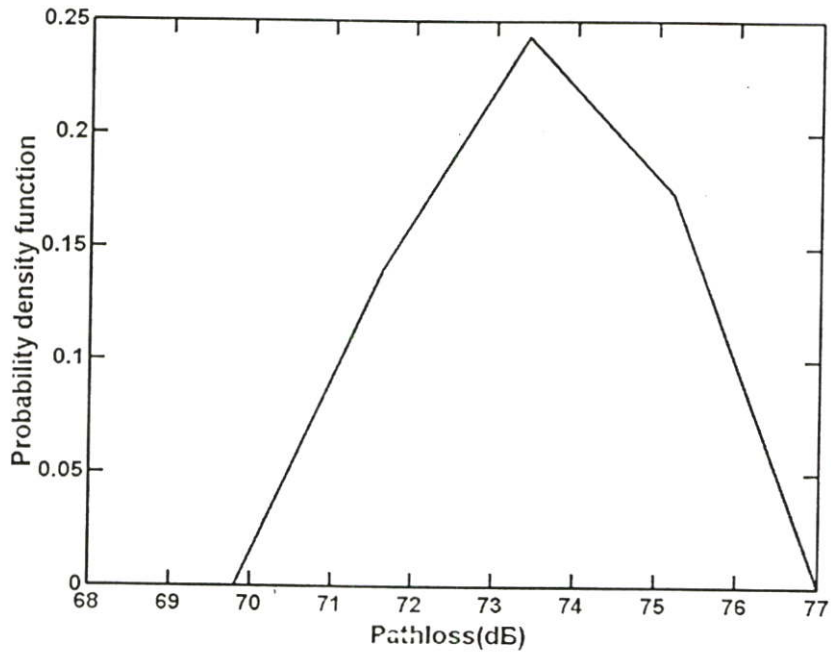
5.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 3

จากการวิเคราะห์ผลที่ได้ คือ ความหนาแน่นความน่า , ค่าความหนาแน่นสะสม, ค่าสูญเสียเชิงวิถี, ความหนาแน่นความน่าจะเป็นเมื่อเทียบกับ การแผ่ประวิงความหนาแน่นสะสมกับ การแผ่ประวิงที่แสดงค่า ที่มีความแตกต่างกันที่บริเวณที่ 1 และ บริเวณที่ 3 โดยผลจากการวิเคราะห์ได้แสดงในรูปต่อไปนี้ตามลำดับ

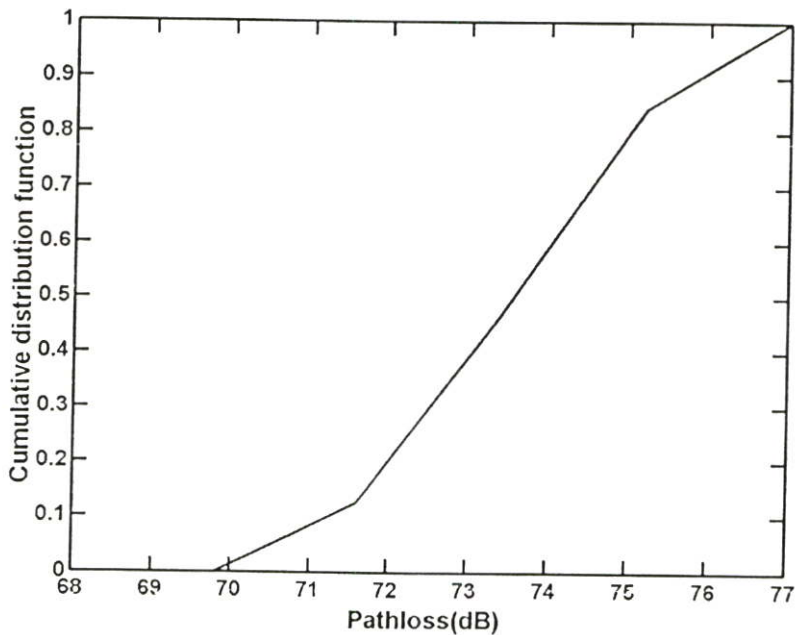
ตารางที่ 5.4 ค่าสูญเสียเชิงวิถีต่อระยะทางในการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารบริเวณที่ 3

ตำแหน่ง	ค่าสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)
1	72.1126 dB
2	70.7155 dB
3	75.9425 dB
4	74.5253 dB
5	73.2128 dB
6	72.2468 dB
7	75.3931 dB
8	75.6962 dB
9	74.3681 dB
10	73.3530 dB
11	72.2133 dB
12	74.2641 dB
13	72.9188 dB
14	72.2924 dB
15	73.2960 dB
16	73.5180 dB

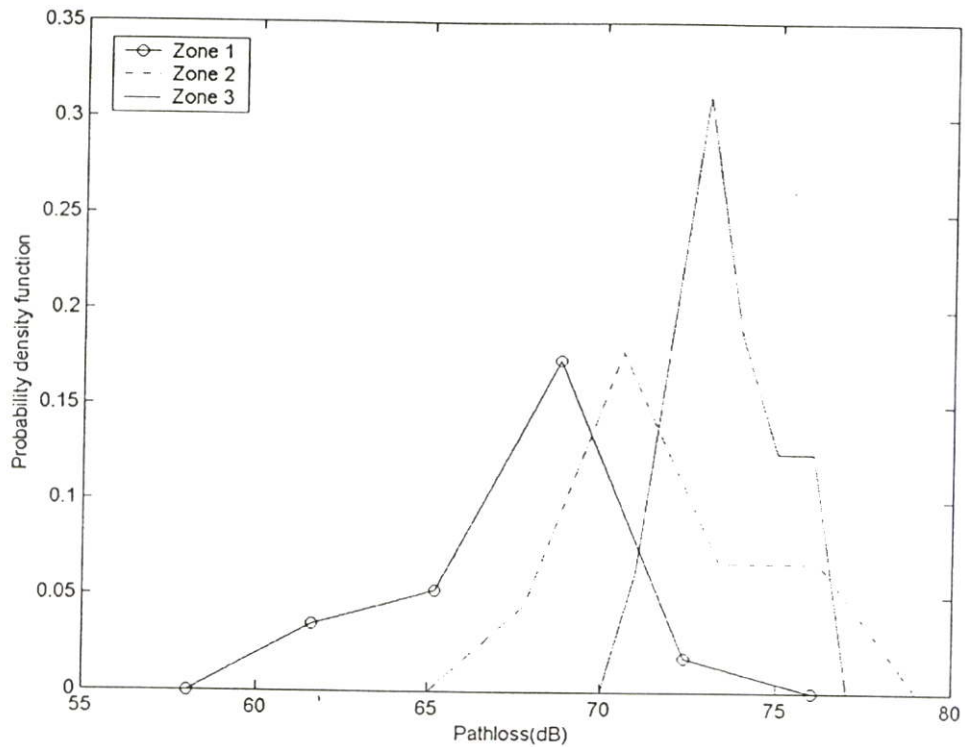
เมื่อพิจารณาถึงค่าสูญเสียเชิงวิถีในบริเวณที่ 3 ค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่มีค่ามากที่สุดจะอยู่ในช่วงตำแหน่งที่ 7, 8, 9 ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากกำแพงที่กั้นระหว่างการวัดสัญญาณรวมถึงสภาพแวดล้อมที่มีการปิดกั้นทั้งตัวส่งและตัวรับสัญญาณในบริเวณที่ 3



รูปที่ 5.8 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่บริเวณ 3



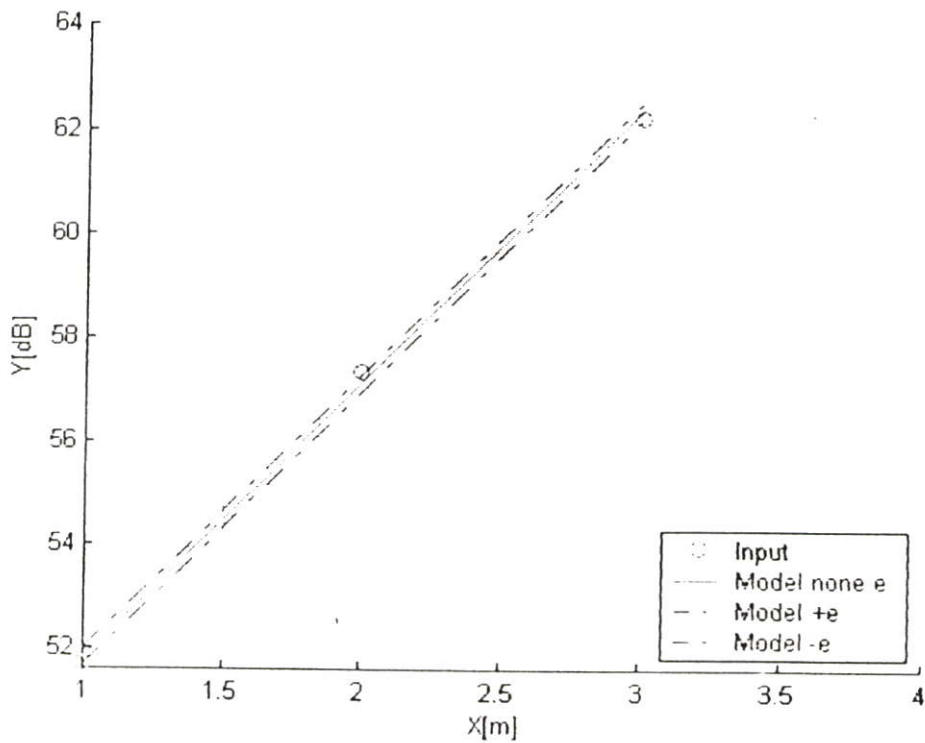
รูปที่ 5.9 ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นสะสมที่บริเวณ 3



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบความหนาแน่นความน่าจะเป็นในแต่ละบริเวณ

จากรูปที่ 5.10 เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของสัญญาณที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละบริเวณได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เราจึงกำหนดระยะของค่าสูญเสียเชิงวิถีที่ทำให้สามารถมองเห็นรูปแบบของสัญญาณของทั้ง สามบริเวณได้ทั้งหมด โดยกำหนดให้เส้นที่บกลมแสดงผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียเชิงวิถีบริเวณที่ 1 เส้นปะตำแหน่งแสดงผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียเชิงวิถีบริเวณที่ 2 และเส้นที่บสุดท้ายแสดงผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียเชิงวิถีบริเวณที่ 3 ตามลำดับ

5.1 ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองการวัดภายในอาคารแบบที่ 1



รูปที่ 5.11 แบบจำลองเชิงเส้นของค่าการสูญเสียเชิงวิถีแบบที่ 1

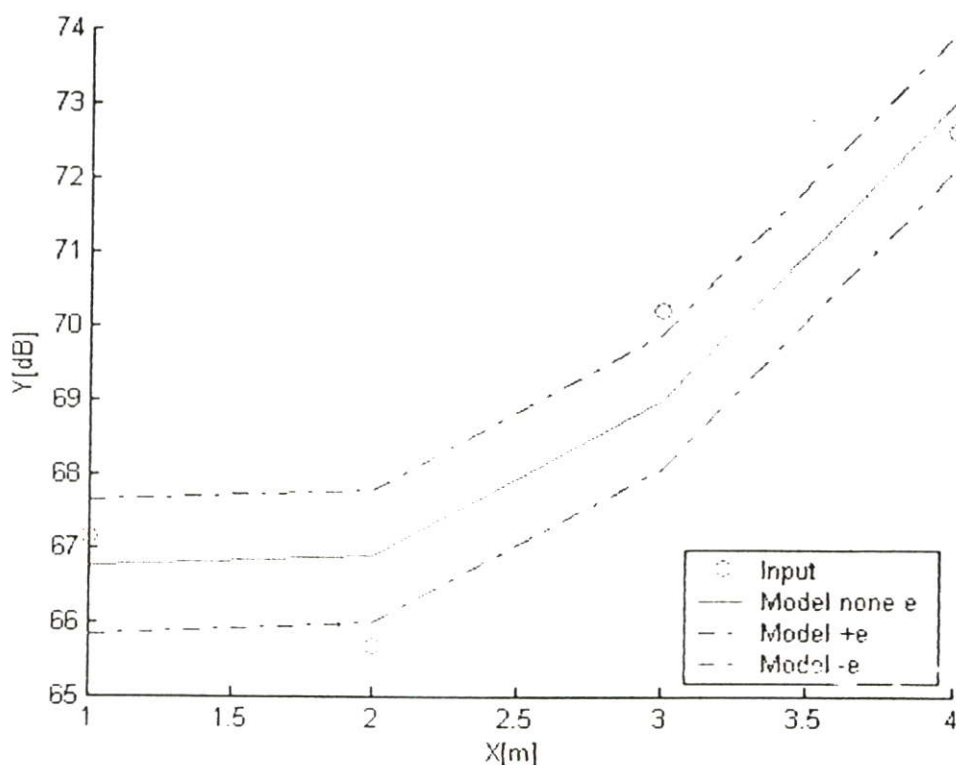
แสดงถึงผลการจำลองค่าการสูญเสียเชิงวิถีด้วยวิธีการที่เรียกว่าการประมาณค่าการถดถอยแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ซึ่งในการจำลองนั้น ได้เลือกเอาชุดข้อมูลค่าการสูญเสียเชิงวิถีการวัดของสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1 โดยเลือกจากที่ ระยะ 1 เมตร 2 เมตร 3 เมตร ตามลำดับ

จากบทที่ 3 สามารถที่จะแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสูญเสียเชิงวิถีการวัดของสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1 ตามชุดข้อมูลตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ชุดข้อมูลสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัดของสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 1

point	Data 1	Data 2	Data 3
1	51.7352	53.2156	50.93
2	57.3476	59.5454	56.6322
3	62.2543	63.0854	61.8688

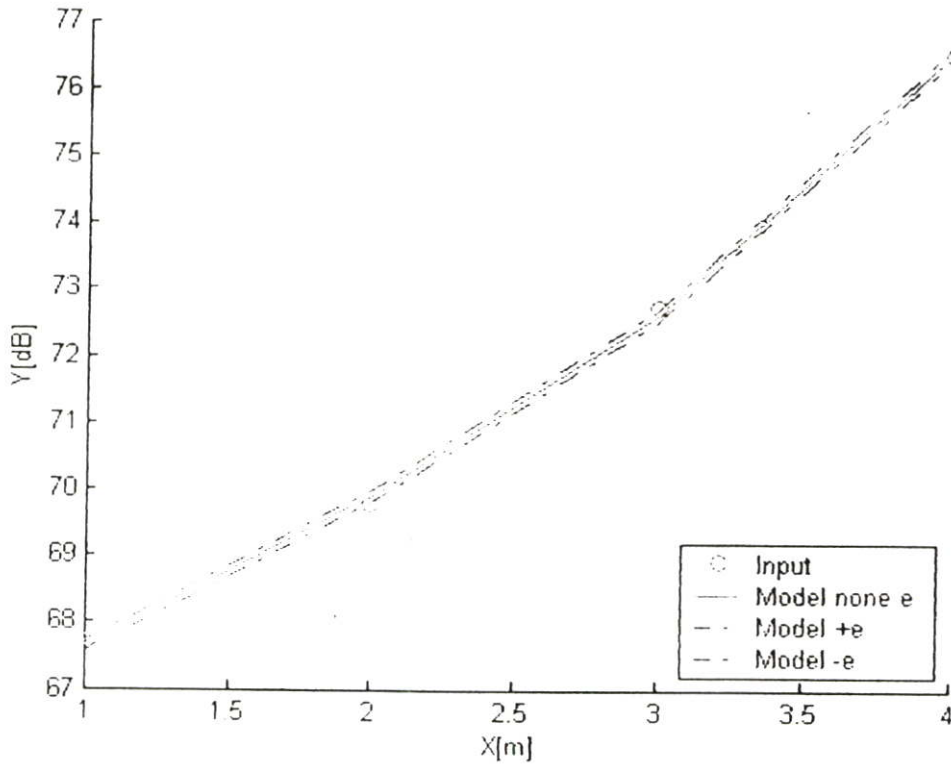
5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 บริเวณที่ 1



รูปที่ 5.12 แบบจำลองเชิงเส้นของค่าการสูญเสียเชิงวิถีแบบที่ 2 บริเวณที่ 1

แสดงถึงผลการจำลองค่าการสูญเสียเชิงวิถีด้วยวิธีการที่เรียกว่าการประมาณค่าการถดถอยแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ซึ่งในการจำลองนั้นได้เลือกเอาชุดข้อมูลค่าการสูญเสียเชิงวิถีการวัดของสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 2 บริเวณที่ 1 โดยเลือกจากที่ ระยะ 1 เมตร 2 เมตร 3 เมตร 4 เมตร ตามลำดับ

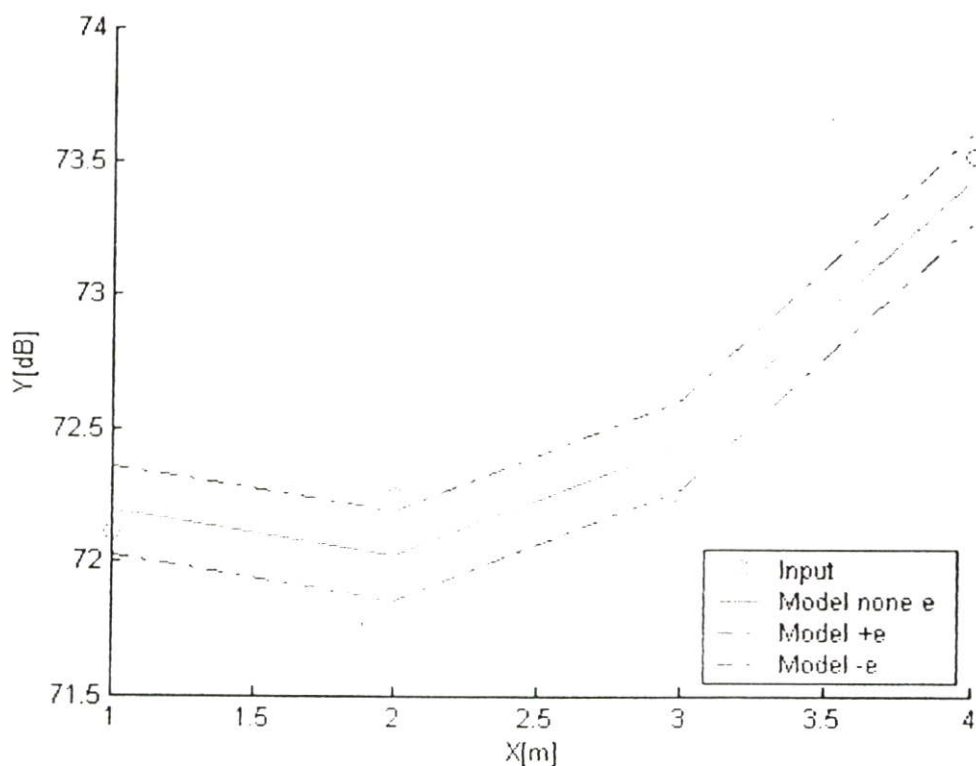
5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองการวัดภายในอาคารแบบที่ 2 บริเวณที่ 2



รูปที่ 5.13 แบบจำลองเชิงเส้นของค่าการสูญเสียเชิงวิถีแบบที่ 2 บริเวณที่ 2

แสดงถึงผลการจำลองค่าการสูญเสียเชิงวิถีด้วยวิธีการที่เรียกว่าการประมาณค่าการถดถอยแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ซึ่งในการจำลองนั้นได้เลือกเอาชุดข้อมูลค่าการสูญเสียเชิงวิถีการวัดของสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 2 บริเวณที่ 2 โดยเลือกจากที่ ระยะ 1 เมตร 2 เมตร 3 เมตร 4 เมตร ตามลำดับ

5.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองการวัดภายในอาคารแบบที่ 3



รูปที่ 5.14 แบบจำลองเชิงเส้นของค่าการสูญเสียเชิงวิถึแบบที่ 3

แสดงถึงผลการจำลองค่าการสูญเสียเชิงวิถึด้วยวิธีการที่เรียกว่าการประมาณค่าการถดถอยแบบเชิงเส้นที่น้อยที่สุด ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ซึ่งในการจำลองนั้นได้เลือกเอาชุดข้อมูลค่าการสูญเสียเชิงวิถึการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารแบบที่ 3 โดยเลือกจากตำแหน่งที่ ระยะ 1 เมตร 2 เมตร 3 เมตร 4 เมตร ตามลำดับ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งยวดศึกษาถึงผลจากสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ที่มีต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งยวดซึ่งพิจารณาบนพื้นฐานของการวัด โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว (Omni-directional) ทำการวัดตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 ~ 11 กิกะเฮิร์ตครอบคลุมช่วงความถี่ที่กำหนดให้ใช้งานในการสื่อสาร คือตั้งแต่ 3.1 ~ 10.6 กิกะเฮิร์ตส่วนในสภาพแวดล้อมนั้นเราได้แบ่งออกเป็นสามรูปแบบโดยแต่ละรูปแบบทดลองในสภาวะแวดล้อมแบบภายในอาคารในภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

6.1 สรุปผลการวิเคราะห์การวัดช่องสัญญาณในรูปแบบที่ 1

การทดลองนี้ได้นำเสนอถึงการวัดและวิเคราะห์ สัญญาณบนแถบความถี่ที่มีความกว้างยิ่งยวด โดยได้สร้าง แบบจำลองให้มีลักษณะที่คล้ายกับการใช้งานส่วนมากในลักษณะของการใช้ภายในอาคารหรือห้องประชุม โดยแบบจำลองที่กำหนดในการทดลองในห้องนั้น แบ่งออกเป็น 9 ตำแหน่งห่างกันตำแหน่งละ 1 เมตร โดยที่ 9 ตำแหน่งนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ระยะที่ 1 2 และ 3 เมตร ดังที่แสดงในแบบจำลองในรูปที่ 4 และนำสัญญาณที่วัดได้มาศึกษาเพื่อหาค่าของการส่งสัญญาณบนแถบความถี่ที่มีความกว้างยิ่งยวด การรับสัญญาณบนแถบความถี่ที่มีความกว้างยิ่งยวด ในจุดที่มุมต่างกันและระยะที่ต่างกัน และ ค่าสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแถบความถี่ที่มีความกว้างยิ่งยวด ในแต่ละตำแหน่งซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าลดลงเมื่อระยะทางเริ่มห่างขึ้นไปตามลำดับ ซึ่งสามารถนำค่าที่ได้จากการทดลองนี้มาประยุกต์ เพื่อนำสัญญาณบนแถบความถี่ที่มีความกว้างยิ่งยวดไปใช้งานในสภาวะแวดล้อม

โดยที่ถ้าพิจารณาจากผลของค่าสูญเสียเชิงวิถี ในการทดลองจะเริ่มจากระยะหนึ่งเมตร คือตำแหน่งที่ 1, 4, 7 ที่ระยะสองเมตรคือตำแหน่งที่ 2, 5, 8 และที่ระยะที่สาม คือตำแหน่งที่ 3, 6, 9 จะเป็นได้ว่าตำแหน่งที่เหมาะสมกับการวางจุดรับสัญญาณนั้นจะต้องเป็นตำแหน่งที่ใกล้ กับตัวส่งสัญญาณ และไม่ได้ขึ้นอยู่กับมุมของการรับสัญญาณในสภาวะ สภาพแวดล้อมที่ไม่มีอะไรปิดกั้นตามแบบจำลองที่ได้นำเสนอในการวัดช่องสัญญาณแบบที่ 1 เพราะที่ใช้สายอากาศแบบแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว ทำให้จุดรับสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งยวดที่อยู่ในมุม 45 องศา หรือ 180 องศา ไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อระยะทาง

6.2 สรุปผลการวิเคราะห์การวัดช่องสัญญาณในรูปแบบที่ 2

เราสามารถที่จะสรุปได้ว่าระยะทางและสภาพแวดล้อมล้วนแล้วแต่มีผลต่อการแพร่กระจายของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งคือ การรับสัญญาณของภาครับมีความแตกต่างกันไปตามจุดต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดโดยอ้างอิงจากแบบจำลอง อันอาจเป็นผลเนื่องมาจากการสะท้อนของคลื่นเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมภายในห้อง และยังส่งผลให้เกิดการกระจายทางเวลาของสัญญาณ ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของสัญญาณที่เข้ามาถึงยังภาครับบริเวณที่ 2 เพราะ บริเวณที่ 1 มีระยะที่ใกล้กว่าทำให้รับสัญญาณได้ชัดเจนกว่าแต่ก็มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายใน จุดที่กำหนด 16 จุด ที่ บริเวณที่ 1 เองเหมือนกันจะเห็นได้ว่าหากต้องการเลือกตำแหน่งในการวางเครื่องรับตำแหน่งที่ 1 ของบริเวณที่ 1 จะเป็นจุดที่ดีที่สุดเนื่องจากมีค่าการสูญเสียที่น้อยที่สุด

6.3 สรุปผลการวิเคราะห์การวัดช่องสัญญาณในรูปแบบที่ 3

จากการวิเคราะห์ผลการวัดช่องสัญญาณทั้ง บริเวณที่ 1 และ บริเวณที่ 2 เราจะเห็นถึงความแตกต่างของสัญญาณที่เข้ามาถึง ณ ตำแหน่งสายอากาศด้านรับ คือ ระยะและจุดที่กำหนดในระยะที่ห่างกัน 0.3 เมตร โดยที่ผลการทดลองของ บริเวณที่ 1 ถือได้ว่าดีกว่า บริเวณที่ 2 ซึ่งอาจจะยังไม่แตกต่างกันมากเพราะค่าสูญเสียเชิงวิถียังมีค่าใกล้เคียงกัน โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้น เมื่อเราพิจารณาถึงสภาวะการนำไปใช้งานจริง ภายในอาคารที่มีสภาพแวดล้อมอันประกอบไปด้วยอุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ เช่น ผนัง โถ๊ะ เก้าอี้ เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งทั้งสิ้น และจากการทดลองทำให้ทราบว่า นอกเหนือจาก ปัจจัยดังกล่าวข้างต้นแล้ว ตำแหน่งของการวาง อุปกรณ์ ตัวรับและ ตัวส่งสัญญาณ ล้วนแล้วแต่เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งผลกระทบดังกล่าวนี้ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของสัญญาณในภาครับ สัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่ง

6.4 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ คือต้องการที่จะตรวจสอบว่าในสภาวะการแพร่กระจายสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ภายในอาคารนั้นในสภาพแวดล้อมที่เป็นแบบภายในอาคาร มีผลต่อช่องสัญญาณอย่างไร ซึ่งจากการทดลองและวิเคราะห์ผลที่ได้ เราสามารถที่จะสรุปได้ว่า ระยะทางและสภาพแวดล้อมล้วนแล้วแต่มีผลต่อการแพร่กระจายของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง คือ การรับสัญญาณของภาครับมีความแตกต่างกันไปตามจุดต่าง ๆ ที่ถูก กำหนดโดยอ้างอิงจากแบบจำลอง อันอาจเป็นผลเนื่องมาจากการการกระทบของคลื่นเมื่อเกิดการบังจากสภาพแวดล้อมภายในห้องและยังส่งผลให้เกิดการกระจายทางเวลาของสัญญาณ ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของ

สัญญาณที่เข้ามาถึงยังภาครับที่ บริเวณ 2 เพราะ บริเวณ 1 มีระยะที่ใกล้กว่าทำให้รับสัญญาณได้ชัดเจนกว่าแต่ก็มีผลกระทบ จาก สภาพแวดล้อมภายใน จุดที่กำหนด 16 จุด ที่ บริเวณ 1 เองเหมือนกัน

ผู้เขียนเห็นว่าควรจะทำกรเพิ่มการวัดสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งโดยการพัฒนาเป็นการระบุไปถึงค่าของการสูญเสียที่มีต่อวัตถุ ภายในสภาพแวดล้อม ซึ่งจะรวมไปถึงการนำลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นแถบความถี่กว้างยิ่งมาวิเคราะห์ถึง เส้นทางของช่องสัญญาณในการกระจายของคลื่นความถี่แถบกว้างยิ่ง ซึ่งจะทำได้สามารถนำผลของช่องสัญญาณนั้นไปใช้ในการวิเคราะห์หาผลในกรณีอื่นๆ ได้อีกในโอกาสต่อไปยกตัวอย่างเช่น

- การศึกษาวิจัยในสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคาร
- การศึกษาวิจัยถึงผลกระทบของวัตถุที่อยู่บริเวณรอบๆสายอากาศ
- การศึกษาวิจัยการแผ่กระจายช่องสัญญาณภายในอาคารในกรณีที่มีสายอากาศส่งมากกว่า 1 ตัว

เอกสารอ้างอิง

- [1] FCC Opens Proceedings on Smart Radios,(Online):< http://www.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-243312A1.pdf>, 2003
- [2] Theodore S. Rappaport. **Wireless Communications Principles and Practice**. USA: Prentice-Hall Inc. 1996.
- [3] Kazimierz S. and Debra M. **Ultra-Wideband Radio Technology**. England : John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [4] James D. Taylor. **Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems**. USA : CRC Press. 1995.
- [5] M. Ghavami, L.B. Michael and R. Kohno. **Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering**. England : John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [6] Theodore S. Rappaport. **Wireless Communications Principles and Practice**. USA : Prentice-Hall Inc. 1996.
- [7] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, and P. Tangtisanon, “**Measurement and Analysis of UWB-IR Antenna Performance For WPANs**”, Thammasat IntJ. Sc.Tech., Vol.8,No.4, Oct-Dec. 2003.
- [8] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, and P. Tangtisanon, “**Path Loss and Matched Filter Gain for UWB System**”, **Proc. ISAP'04**, Sendai, Japan, pp. 97-100, Aug. 2004.
- [9] K. Leechaikitjaroen, S. Promwong and P. Supanakoon, S. Kaewmechai, and S.Chensirikul, “**Indoor Measurement Results of UWB Impulse Radio for Shot-Range Wireless Systems with RMS Delay Spread and Path Loss**,” ISCIT, Beijing China, OCT 2005.
- [10] K. Leechaikitjaroen, S. Promwong and P. Supanakoon, “**Probability and Cumulative Density Function of RMS Delay Spread and Path Loss for Ultra Wideband Indoor Environments**,” EECON28, Phuket Thailand, OCT 2005.

ภาคผนวก

บทความวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์ทั้งในและต่างประเทศ

Electrical Engineering Conference

ภูเก็ต ประเทศไทย

International Symposium on Communications and Information Technologies

ปักกิ่ง ประเทศจีน

ภาคผนวก ก

บทความวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

1. K. Lecchaikitjaroen, S. Promwong and P. Supanakoon, *“Probability and Cumulative Density Function of RMS Delay Spread and Path Loss for Ultra Wideband Indoor Environments,”* EECON28, Phuket Thailand, OCT 2005.pp.662-666.

- 2 K. Lecchaikitjaroen, S. Promwong and P. Supanakoon, S. Kaewmechai, and S.Chensirikul, *“Indoor Measurement Results of UWB Impulse Radio for Shot-Range Wireless Systems with RMS Delay Spread and Path Loss,”* ISCIT, Beijing China, OCT 2005.pp.xx-xx.

Volume 1 of 2

ISCIT 2005

PROCEEDINGS

International Symposium on Communications
and Information Technologies 2005

October 12-14 2005

Fragrant Hill Hotel, Beijing, China

Sponsored by:

The National Natural Science Foundation of China

K.C. Wong Education Found, Hong Kong

IEEE Circuits and Systems Society

IEEE Communication Society Beijing Chapter

Beijing Association for Science and Technology

Beijing University of Posts and Telecommunications

Technical Co-Sponsored by

IEICE Japan

ECTI Thailand

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



Indoor Measurement Results of UWB Impulse Radio for Shot-Range Wireless Systems with RMS Delay Spread and Path Loss

Keatchai Leechaikitjaroen*, Sathaporn Promwong*, Pichaya Supanakoon*,

Somsak Chensirikul** and Sompoph Kaewmechai*

*Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,

**Electronic Research Center

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

E-mail: s6064605@kmitl.ac.th

Abstract—In this paper, we describe a simple method for measurement of the ultra-wideband (UWB) frequency response for evaluation of the path loss and RMS delay spread which are the important parameters for the wireless communications. probability and cumulative density of rms delay spread and path loss are evaluated based on the measurement of UWB indoor environment. For the measurement, the frequency responses of the UWB channel are acquired by using a vector network analyzer (VNA) over the frequency bandwidth of 3–11 GHz. The biconical antennas are used for both the transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. The probability density function and cumulative distribution function of the rms delay spread and path loss are shown. The results are discussed in this paper.

Keywords—Ultra wideband (UWB), RMS Delay Spread, Path loss

I. INTRODUCTION

The potential for ultra-wideband (UWB) is to provide wireless communications solutions for the indoor environment (e.g. home networking, and personal area networks (PANs) motivates which to consider need for a reliable channel model. Determining such a model requires measurements taken in a variety of different environments. UWB technology, a revolutionary approach to radio communications, allows systems to operate across a range of frequency bands 3.1~10.6GHz defined by FCC [1]

In this paper, measurement results and evaluation scheme of UWB impulse radio for short-range wireless systems UWB propagation indoor environment over the frequency bandwidth of 3 ~11 GHz. In our experiments, the biconical antennas are used at both the transmitter and the receiver. The probability density function and cumulative distribution function and RMS delay spread are considered and discussed. The results are show in this paper.

II. MEASUREMENT EQUIPMENT AND EXPERIMENT PROCEDURE

The UWB channel characterizations can be achieved by performing measurements in time domain or in frequency domain. The radio channel measurement system consists of the vector network analyzer (VNA) model HP-8510C, the s-parameter test set (HP-8514B), the frequency synthesized sweeper (HP-83620A), the biconical antenna pair and the personal computer. The VNA is operated in the response measurement mode, where port 1 is the Tx port and port 2 is the Rx port. The biconical antennas with the maximum diameter of 65.3 mm and the length of 37 mm are used at both the Tx and Rx. The antenna has typically an omni-directional radiation pattern. with a linearly phase response. Table 1 shows parameters of the experiments.

A. Signal Model

The rectangular density spectral waveform covering the FCC band [1], that is 3.1~10.6 GHz is used to test the distortion of the received UWB waveform. The UWB transmission signal is set in the full UWB spectrum bandwidth. The minimum and maximum frequencies are $f_{\min} = 3.1$ GHz and $f_{\max} = 10.6$ GHz, respectively. The spectral bandwidth is $f_b = 7.5$ GHz. and equation is

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

where $f_{\min} = 3.1$ GHz, $f_{\max} = 10.6$ GHz, $f_b = f_{\max} - f_{\min}$ and $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / (\pi x)$. This signal waveform in time domain is shown in Fig. 1.

B. Measurement Setup

We have chosen the biconical antenna for ease of fabrication, as well as it is often used as the standard antenna for the wideband application. The geometry and dimensions of the antenna and its characteristics are in Ref.[2]. The UWB radio channel transfer function is measure as S_{21} in frequency domain by using the VNA. In the experiment, point distance 0.3 m. The hights of Tx and Rx antennas are set to be 1.5 m.

III. PARAMETER ANALYSIS

We describe the parameters based on indoor measurement for ultra wideband impulse radio. The model for measurement is shown in Fig.2.

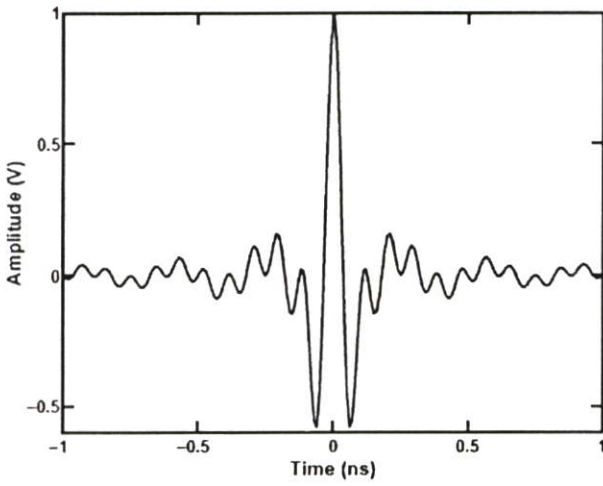


Fig.2 The transmission waveform of UWB signal

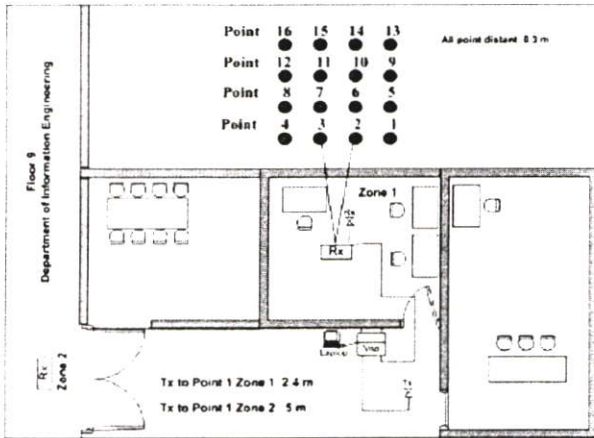


Fig.2 Model for measurement

TABLE I
SETUP PARAMETERS

Parameter	Value
Frequency range	3~11 GHz
Number of frequency points	801
Tx antenna height	1.5 m
Rx antenna height	1.5 m
Antenna type	Biconical
Distance between Point Model	0.3 m

A. Delay times

The minimum possible delay time in a channel impulse responses is given by the distance d between Tx and Rx. One has to keep in mind, that the number of propagation paths and the attenuation increases with increasing delay time. Therefore the delay times are generated according to:

$$t = \frac{d}{Co} \quad (2)$$

B. RMS Delay Spread

we considered the time delay of the arrived signal at the Rx, which the multiple reflections of the Tx signal may arrive at the Rx at different times, The time dispersion can be characterized by using the mean excess delay τ_m and the RMS delay spread τ_{rms} to illustrate the effects of environment Fig.2 The mean excess delay τ_m is defined as [3]

$$\tau_m = \frac{\int_0^{\infty} \tau \cdot |h(\tau)|^2 d\tau}{\int_0^{\infty} |h(\tau)|^2 d\tau}, \quad (3)$$

and the RMS delay spread τ_{rms} can be defined by

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (\tau - \tau_m)^2 \cdot |h(\tau)|^2 d\tau}{\int_0^{\infty} |h(\tau)|^2 d\tau}}. \quad (4)$$

C. Path Loss

The UWB path loss PL can be defined as the ratio between the maximum amplitude of the transmission and received signal waveforms [4]

$$PL(d)[dB] = 20 \text{Log} \left[\frac{\max |v_t(t)|}{\max |v_r(t)|} \right] \quad (5)$$

where $v_t(t)$ transmission signal waveform and $v_r(t)$ is the received signal waveform.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A statistical model for the indoor environment that using the VNA for measuring frequency transfer functions with the number of frequency points of 801 are taken in the indoor environment. The UWB transmission signal is set in the full UWB spectrum bandwidth. The probability and the cumulative density functions of the path loss at zone 1 are shown in Fig 3 and 4, respectively. At this zone, the average and standard values of the path loss are 67.03 dB and 0.03 dB, respectively. Figure 5 and 6 show the probability and the cumulative density functions of the rms delay spread at zone 1 respectively. The average and standard values of the rms delay spread are 22.8 ns and 2.61 ns, respectively. The probability and the cumulative density functions of the path loss at zone 2 are shown in Fig 7 and 8, respectively. At this zone, the average and standard values of the path loss are 71.81 dB and 2.49 dB, respectively. Figure 9 and 10 show the probability and the cumulative density functions of the rms delay spread at zone 2 respectively. The average and standard values of the rms delay spread are 27.79 ns and 1.11 ns, respectively

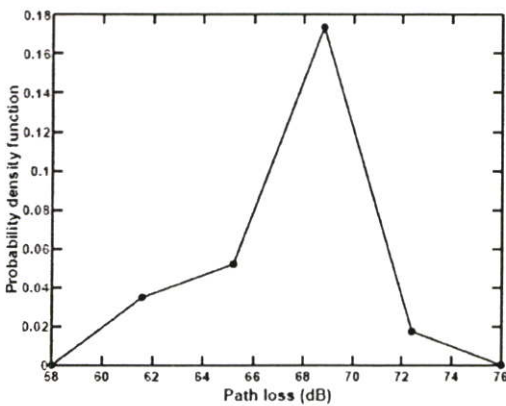


Fig.3 Probability density function of path loss at zone 1

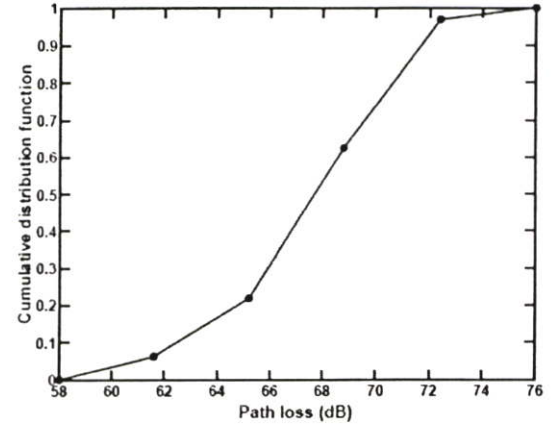


Fig.4 Cumulative density function of path loss at zone 1

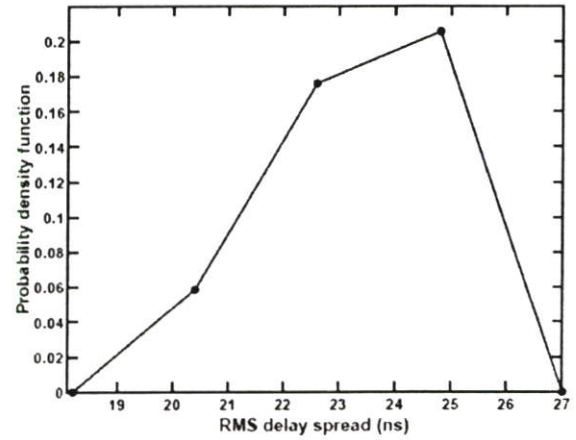


Fig.5 Probability density function of path loss at zone 1

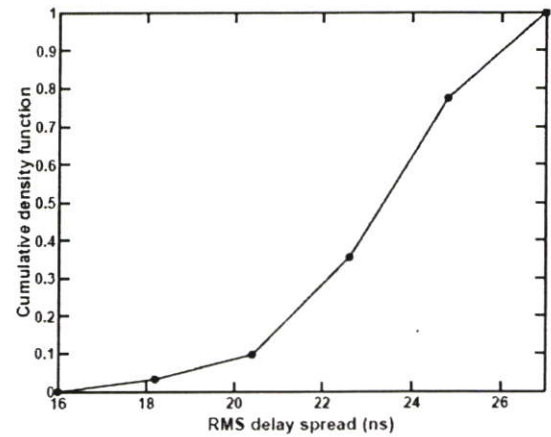


Fig.6 Cumulative density function of path loss at zone 1

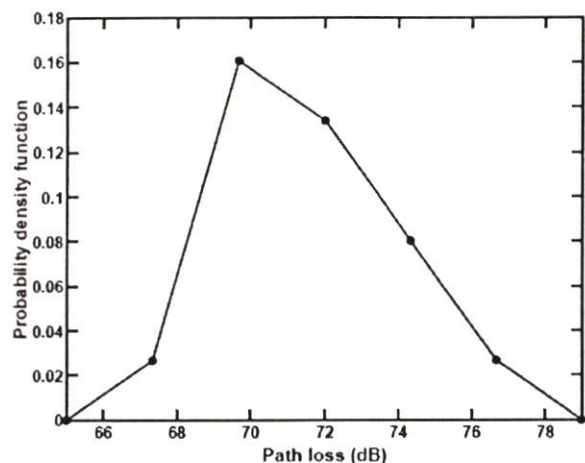


Fig.7 Probability density function of path loss at zone 2

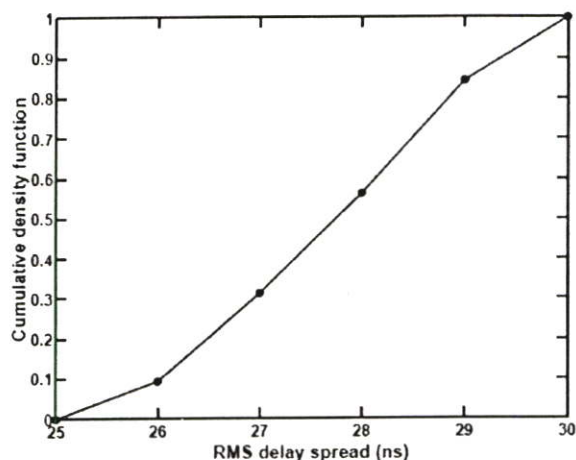


Fig.10 Cumulative density function of path loss at zone 2

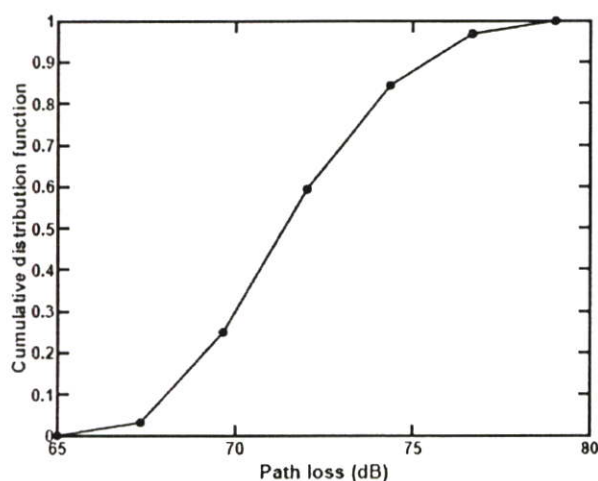


Fig.8 Cumulative density function of path loss at zone 2

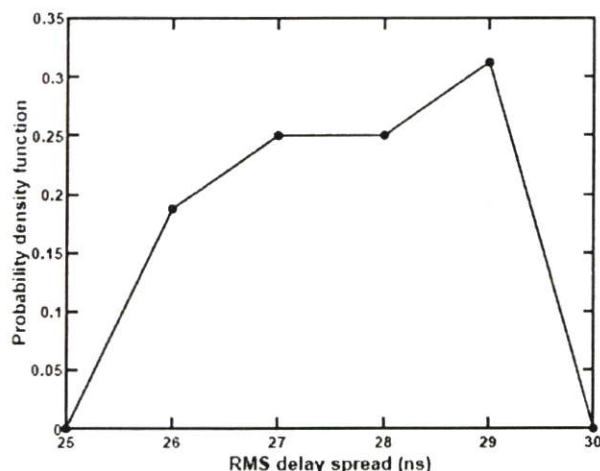


Fig.9 Probability density function of path loss at zone 2

V. CONCLUSIONS

This paper, we presented an indoor measurement results UWB impulse of radio for short-range wireless systems. We have shown probability and cumulative density of rms delay spread and path loss based on the measurement of UWB indoor environment. We can observe the probability and cumulative density of rms delay spread and the path loss at zone 1 and zone 2. Results the average and standard values of the path loss at zone 2 more than zone 1. Therefore, the UWB communication systems design must consider the effects of environment.

REFERENCES

- [1] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [2] S.Promwong, W.Hachitani, J.Takada, and P.Tangtisanon " Experimental Evaluation of Free Space Transmission Characteristics of Ultra -Wideband Antenna," IEICE Tech. Rep., AP 200342/SAT 200334/MW 200348/OPE 200335, pp. 712, Hakodate, Hokkaido, July 2003.
- [3] A. Pradubphon, S. Promwong, M. Chamchoy, P. Supanakoon, and J. Takada, "Influence of human body shadowing on Ultra-wideband Propagation channel," Proc. ICCAS 04, Aug. 2004.
- [4] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, and P. Tangtisanon, "path Loss and matched filter gain for UWB system," Proc. ISAP04, Sendai, Japan, Aug. 2004.

Electrical Engineering Conference, Phuket Thailand, OCT 2005

Probability and Cumulative Density Function of RMS Delay Spread and Path Loss for Ultra Wideband Indoor Environments

Keatchai Leechaikitjarune, Sathaporn Promwong, and Pichaya Supanakoon

Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.
Phone: +66 2 7372500-47 ext. 5040, Fax: +66 2 3264176
E-mail: s6064605@kmitl.ac.th

Abstract

RMS delay spread and path loss are important parameters for the wireless communications. In this paper, probability and cumulative density of rms delay spread and path loss are evaluated based on the measurement of ultra wideband (UWB) indoor environment. For the measurement, the frequency responses of the UWB channel are acquired by using a vector network analyzer (VNA) over the frequency bandwidth of 3 ~ 11 GHz. The biconical antennas are used for both the transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. The probability density function (pdf) and cumulative distribution function (cdf) of the rms delay spread and path loss are shown. The results are discussed in this paper.

Keywords: ultra wideband (UWB), path loss, RMS delay spread

1. Introduction

The potential for ultra-wideband (UWB) is to provide wireless communications solutions for the indoor environment (e.g. home networking, and personal area networks (PANs) motivates which to consider need for a reliable channel model. Determining such a model requires measurements taken in a variety of different environments. UWB technology, a revolutionary approach to radio communications, allows systems to operate across a range of frequency bands 3.1~10.6 GHz defined by FCC [1]

In this paper, measurement results and evaluation scheme of UWB impulse radio for short-range wireless systems UWB propagation indoor environment over the frequency bandwidth of 3~11 GHz. In our experiments, the biconical antennas are used at both the transmitter and the receiver. The probability density function and cumulative distribution function and RMS delay spread are considered and discussed. The results are show in this paper.

2. Description Of Measurement

The UWB channel characteristic can be achieved by performing measurements in time domain or in frequency domain. The radio channel measurement system consists of the vector network analyzer model

HP-8510C, the s-parameter test set (HP-8514B), the frequency synthesized sweeper (HP-83620A), the biconical antenna pair and the personal computer. The VNA is operated in the response measurement mode, where port 1 is the transmitter port Tx and port 2 is the receiver port Rx the biconical antennas with the maximum diameter of 65.3 mm and the length of 37 mm are used at both the transmitter and the receiver the antenna has typically an omni-directional radiation pattern, with a linearly phase response. Table 1 show parameters of the experiments.

2.1 Signal Model

The rectangular density spectral waveform covering the FCC band [1], that is 3.1 ~ 10.6 GHz is used to test the distortion of the received UWB waveform. The UWB transmission signal is set in the full UWB spectrum bandwidth. The minimum and maximum frequencies are $f_{\min} = 3.1$ GHz and $f_{\max} = 10.6$ GHz, respectively. The spectral bandwidth is $f_b = 7.5$ GHz and equation is

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

where $f_{\min} = 3.1$ GHz is the minimum frequency, $f_{\max} = 10.6$ GHz is the maximum frequency, $f_b = f_{\max} - f_{\min}$ and $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$. This signal waveform in time domain shown in Fig. 1

2.2 Measurement Setup

We have chosen the biconical antenna for ease of fabrication, as well as it is often used as the standard antenna for the wideband application. The geometry and dimensions of the antenna and its characteristics are in Ref.[2]. The UWB radio channel transfer function is measure as S_{21} in frequency domain by using the VNA. In the experiment, point distance 0.3 m. The heights of Tx and Rx antennas are set to be 1.5 m.

3. Parameter

We describe the parameters based on indoor measurement for ultra wideband impulse radio. The model for measurement is shown in Fig.2.

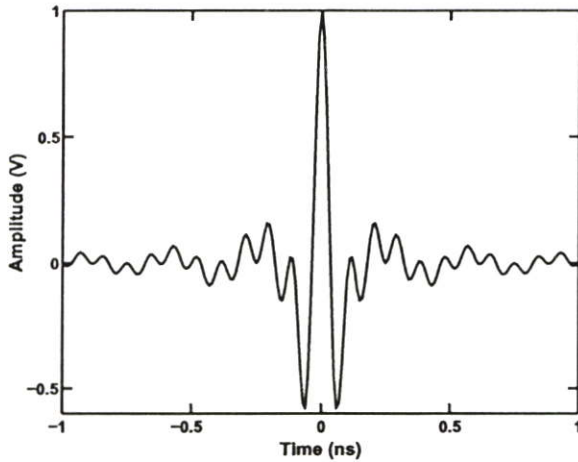


Fig. 1. The transmission waveform of UWB signal.

Table 1 Estimate setup parameters

Parameter	Value
Frequency range	3 ~ 11 GHz
Number of frequency points	801
Tx antenna height	1.5 m
Rx antenna height	1.5 m
Antenna type	Biconical
Distance between Point Model	0.3 m

3.1 Delay times

The minimum possible delay time in a channel impulse responses is given by the distance d between Tx and Rx. One has to keep in mind, that the number of propagation paths and the attenuation increases with increasing delay time. Therefore the delay times are generated according to:

3.2 Delay times

The minimum possible delay time in a channel impulse responses is given by the distance d between Tx and Rx. One has to keep in mind, that the number of propagation paths and the attenuation increases with increasing delay time. Therefore the delay times are generated according to:

$$t_i = \frac{d}{c_0} \quad (2)$$

3.3 RMS Delay Spread

we considered the time delay of the arrived signal at the Rx, which the multiple reflections of the Tx signal may arrive at the Rx at different times, The time dispersion can be characterized by using the mean excess delay t_m and the RMS delay spread t_{rms} to illustrate the effects of environment Fig. 2 The mean excess delay t_m is defined as [3]

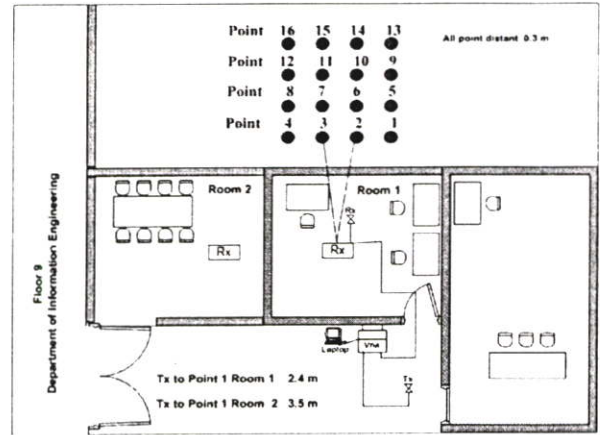


Fig. 2. Model for measurement

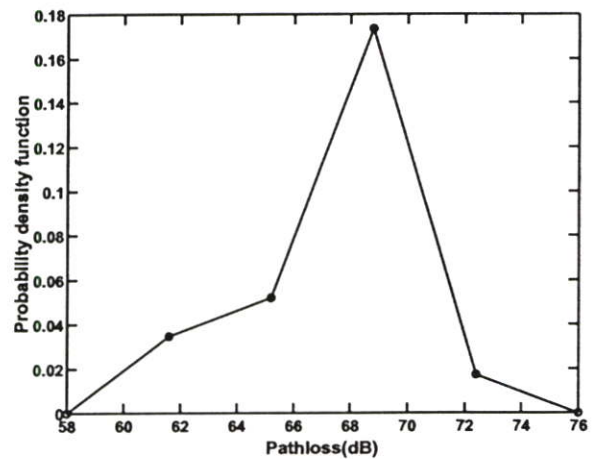


Fig. 3. Probability density function of path loss at room 1

$$\tau_m = \frac{\int_0^\infty \tau \cdot |h(\tau)|^2 d\tau}{\int_0^\infty |h(\tau)|^2 d\tau} \quad (3)$$

and the RMS delay spread, τ_{rms} , can be defined by

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty (\tau - \tau_m)^2 \cdot |h(\tau)|^2 d\tau}{\int_0^\infty |h(\tau)|^2 d\tau}} \quad (4)$$

3.4 Path Loss

The UWB path loss PL can be defined as the ratio between the maximum amplitude of the transmitted and received signal waveforms [4].

$$PL(d)[dB] = 20 \log \left[\frac{\max|v_t(t)|}{\max|v_r(t)|} \right] \quad (5)$$

where $v_t(t)$ is the maximum amplitude of the transmitted signal waveform and $v_r(t)$ is maximum amplitude of the received signal waveform [5].

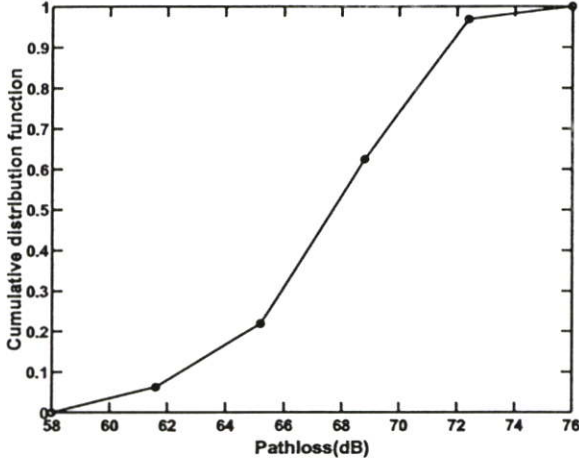


Fig. 4. Cumulative density function of path loss at room 1

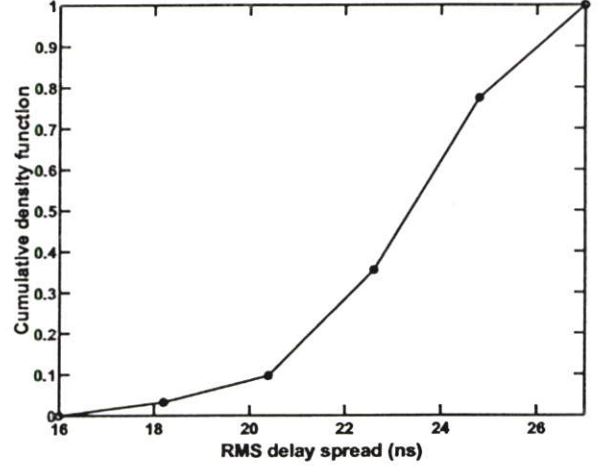


Fig. 6. Cumulative density function of Path loss at room 1

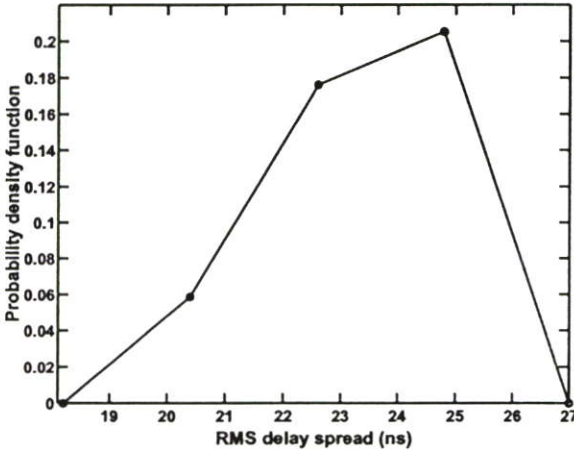


Fig. 5. Probability density function of Path loss at room 1

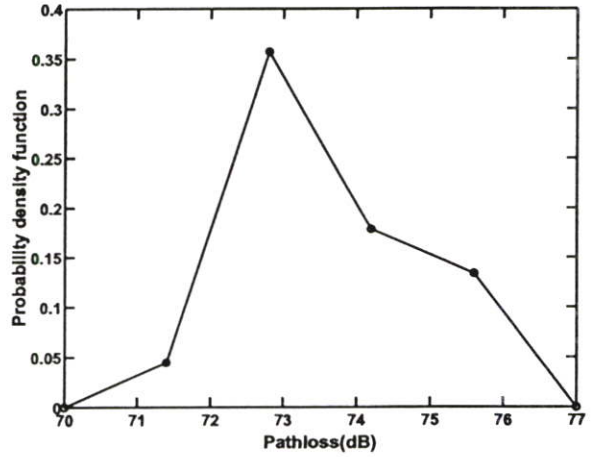


Fig. 7. Probability density function of Path loss at room 2

4. Results and Discussion

A statistical model for the indoor environment that using the VNA for measuring frequency transfer functions with the number of frequency points of 801 are taken in the indoor environment. The UWB transmission signal is set in the full UWB spectrum bandwidth. The probability and the cumulative density functions of the path loss at room 1 are shown in Fig 3 and 4, respectively. At this room, the average and standard values of the path loss are 67.03 dB and 0.03 dB, respectively. Figure 5 and 6 show the probability and the cumulative density functions of the rms delay spread at room 1 respectively. The average and standard values of the rms delay spread are 22.8 ns. and 2.61 ns, respectively. The probability and the cumulative density functions of the path loss at room 2 are shown in Fig 7 and 8, respectively. At this room, the average and standard values of the path loss are 71.81

dB. and 2.49 dB, respectively. Figure 9 and 10 show the probability and the cumulative density functions of the rms delay spread at room 2 respectively. The average and standard values of the rms delay spread are 27.79 ns. and 1.11 ns, respectively

5. Conclusions

In this paper, we presented an indoor measurement results UWB impulse of radio for short-range wireless systems. We have shown probability and cumulative density of rms delay spread and path loss based on the measurement of UWB indoor environment. We can observe the probability and cumulative density of rms delay spread and the path loss at room 1 and room 2. Results the average and standard values of the path loss at room 2 more than room 1. Therefore, the UWB communication systems design must consider the effects of environment.

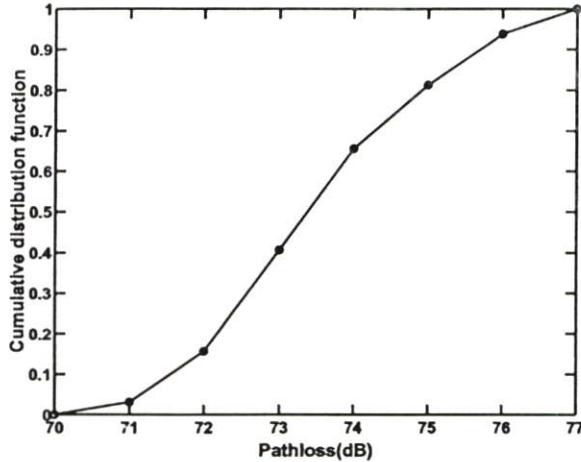


Fig. 8. Cumulative density function of Path loss at room 2

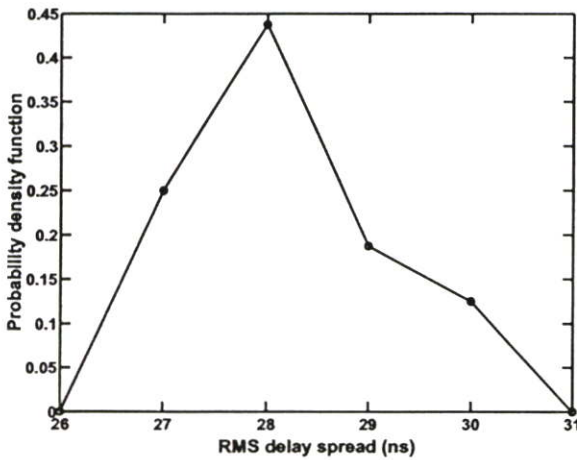


Fig. 9. Probability density function of Path loss at room 2

References

- [1] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [2] S. Promwong, W. Hachitani, J. Takada, and P. Tangtisanon, "Experimental Evaluation of Free Space Transmission Characteristics of Ultra-Wideband Antenna," IEICE Tech. Rep., AP 200342/SAT 2003 34/MW 200348/OPE 200335, pp. 712, Hakodate, Hokkaido, July 2003.
- [3] A. Pradubphon, S. Promwong, M. Chamchoy, P. Supanakoon, and J. Takada, "Influence of human body shadowing on Ultra-wideband propagation channel," Proc. IC-CAS 04, Aug. 2004.
- [4] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, and P. Tangtisanon, "Path loss and matched filter gain for UWB system," in *Proc. ISAP'04*, pp. 97-100, 2004.

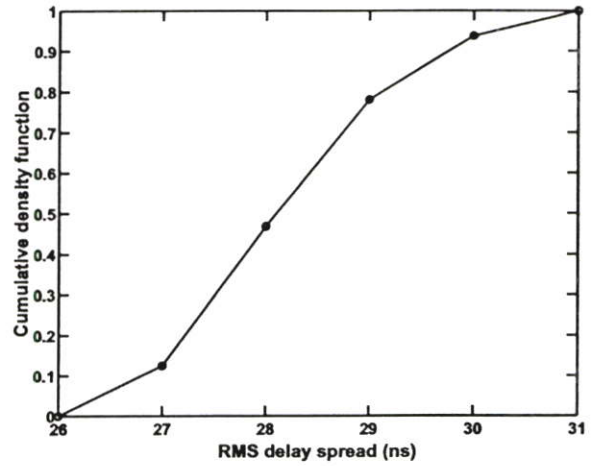


Fig. 10. Cumulative density function of Path loss at room 2

Table 2 Path loss

Position	Path loss Room 1	Path loss Room 2
position 1	67.1442	73.9090
position 2	67.8666	74.0494
position 3	68.0445	75.9581
position 4	69.0207	76.3557
position 5	63.4795	74.0648
position 6	65.6639	74.0991
position 7	67.4850	77.9826
position 8	68.2078	78.2714
position 9	62.0774	74.3046
position 10	67.9969	74.9086
position 11	70.1914	74.6032
position 12	69.5374	75.9996
position 13	60.9263	74.5678
position 14	64.6164	74.8582
position 15	67.6388	75.1885
position 16	72.6121	75.5272

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเกียรติชัย ลีชัยกิจเจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	11 มิถุนายน 2524
ที่อยู่	121/17 อาคารอาร์ เอส ทาวเวอร์ ถนนรัชดาภิเษก แขวงดินแดง เขตดินแดง กรุงเทพฯ 10400
ประวัติการศึกษา	2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ในระหว่างศึกษาระดับปริญญาโทมีบทความตีพิมพ์ทั้งในและต่างประเทศ 2 บทความดังนี้

K. Leechaikitjaroen, S. Promwong and P. Supanakoon, **“Probability and Cumulative Density Function of RMS Delay Spread and Path Loss for Ultra Wideband Indoor Environments,”** Electrical Engineering Conference, Phuket Thailand, OCT 2005.

K.Leechaikitjaroen, S.Promwongand, P.Supanakoon, S.Kaewmechai, and S. Chensirikul, **“Indoor Measurement Results of UWB Impulse Radio for Shot-Range Wireless Systems with RMS Delay Spread and Path Loss,”** International Symposium on Communication and Information Technologies, Beijing China, OCT 2005.