

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาทดลองวัดการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากพื้นผิวผนังอาคาร  
EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTROMAGNETIC WAVE SCATTERING  
FROM BUILDING SURFACE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTROMAGNETIC WAVE SCATTERING  
FROM BUILDING SURFACE**



BY  
**Mr. CHANKHANIT INTECHA**  
**Mr. APICHART KANLAYAWATTANACHAROEN**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การศึกษาทดลองวัดการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากพื้นผิว  
ผนังอาคาร

ชื่อนักศึกษา นายชาญคณิต อินตะชะ รหัสนักศึกษา 47015833  
นายอภิชาติ กัลยาวัฒนเจริญ รหัสนักศึกษา 47015857


อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์

ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา 2549

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
รับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์)

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาทดลองวัดการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากพื้นผิวผนังอาคาร		
ชื่อนักศึกษา	นายชาญคณิต อินตะชะ	รหัสนักศึกษา	47015833
	นายอภิชาติ กัลยาวิวัฒน์เจริญ	รหัสนักศึกษา	47015857
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์		
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ		
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ		
ปีการศึกษา	2549		

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง (UWB) ได้เข้ามามีบทบาทในระบบการสื่อสารไร้สายระยะสั้นเป็นอย่างมาก ดังนั้น เพื่อให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพสูงสุดในการสื่อสารของช่องสัญญาณแถบความถี่ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาถึงผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการสื่อสาร โครงการนี้ได้ศึกษาทดลองวัดและวิเคราะห์ผลของการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากผนังภายในอาคาร โดยพิจารณาพื้นผิวของอาคารในลักษณะที่เป็น ผนังอาคาร (อิฐ) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ วัดสัญญาณการส่งผ่านในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 5 GHz และใช้สายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง (Tx) และสายอากาศรับ (Rx) ผลที่ได้นี้จะนำมาวิเคราะห์หาผลกระทบที่เกิดจากการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากผนังอาคารและเพื่อการพัฒนาปรับปรุงแก้ไขให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณย่านแถบกว้างยิ่งที่สุด

**Thesis Title** Experimental Study of Electromagnetic Wave Scattering from Building Surface

**Student** Mr.Chankhanit Intecha ID 47015833  
Mr.Apichart Kanlayawattanacharoen ID 47015857

**Advisor** Mr.Sathaporn Promwong

**Graduate Level** Bachelor Degree of Information Engineering

**Department** Information Engineering

**Academic Year** 2006

## ABSTRACT

Nowadays, an ultra wideband (UWB) technology is become to be important part of wireless communication systems. According to the best performance, the effects from the wireless communication technology are necessary to study. This proposal studies and analyzes the effect from the electromagnetic wave scattering from building surface. The this thesis considered the wall (brick). By using the vector network analyzer (VNA) is to measurement at frequency range from 3 GHz to 5 GHz. The biconical antennas are used as the transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. The results are analyzed to consider the effects from the electromagnetic wave scattering from building surface and improve the transmission performance.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำชี้แนะแนวทางการทำงานพร้อมทั้งการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินงาน

จากท่าน อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมปริญญาบัตร ทางผู้จัดทำปริญญาบัตร ขอขอบพระคุณในความกรุณาทั้งหมดที่มีให้ด้วยความเคารพอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ที่สุวรรณ จันทร์อินทร์ ที่ให้คำแนะนำเนื้อหาเพิ่มเติมที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำปริญญาบัตร ชี้แนะแนวทางในการดำเนินชีวิต ทั้งยังเป็นกำลังใจในการทำปริญญาบัตรตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ที่อภิเชต สมบูรณ์ผล ที่ให้คำแนะนำตลอดจนช่วยแนะนำแนวทางในการทำปริญญาบัตร ตรวจสอบข้อบกพร่องพร้อมทั้งแนะนำการแก้ไข

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิศา มารดา ผู้ซึ่งเป็นกำลังใจในการศึกษา ให้ความรักและห่วงใยในทุกๆด้านมาโดยตลอด

ชาญคณิต อินตะระ

อภิชาติ กัลยาวัฒนเจริญ

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 แนวคิดและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 แบบจำลองในการวัดสัญญาณ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b>	
2.1 ทฤษฎีและหลักการของระบบสื่อสาร Ultra Wideband	5
2.2 ลักษณะเฉพาะของ Ultra Wideband	7
2.2.1 จุดเด่นของ Ultra Wideband	8
2.3 ข้อกำหนดของเทคโนโลยี Ultra Wideband	10
2.3.1 กฎข้อบังคับของ Ultra Wideband ในสหรัฐอเมริกา	10
2.3.2 กฎข้อบังคับของ Ultra Wideband ในยุโรป	12
2.4 รูปแบบของสัญญาณในระบบการสื่อสาร Ultra Wideband	14
2.4.1 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน (Gaussian pulse)	14
2.4.2 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนโมโนไซเคิล (Gaussian monocycle pulse)	15
2.4.3 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเบิล (Gaussian doublet pulse)	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 วิธีการมอดูเลตในระบบการสื่อสาร Ultra Wideband	16
2.5.1 การมอดูเลตตามขนาด (PAM)	17
2.5.2 การมอดูเลตตามตำแหน่งพัลส์ (PPM)	17
2.5.3 การมอดูเลตแบบสองเฟส (Bi-phase)	18
2.6 การส่งผ่านคลื่นสัญญาณ	19
2.6.1 คุณสมบัติการลดทอนของสัญญาณ	19
2.6.2 การสูญเสียกำลัง (Path loss)	21
2.6.3 ผลกระทบของการบดบังสัญญาณ (Shadowing)	22
2.6.4 ปัญหาการจางหายของสัญญาณต่อคลื่นหลายวิถี (Multipath Fading)	22
2.7 โพรไฟล์การหน่วงกำลัง (Power Delay Profile)	23
2.8 ทฤษฎีทางสถิติและความน่าจะเป็น	24
2.8.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF)	24
2.8.2 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Cumulative Distribution Function: CDF)	25
2.9 ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Correlation function)	26
2.9.1 สหสัมพันธ์อัตโนมัติ (Autocorrelation)	26
2.9.2 สหสัมพันธ์ข้าม (Cross correlation)	26
2.9.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)	26
2.10 Linear Least Squares	27
2.11 สรุปการสื่อสารแบบ Ultra Wideband	28
2.11.1 ข้อดีของระบบ Ultra Wideband (UWB)	28
2.11.2 แอปพลิเคชันต่าง ๆ ที่นำเทคโนโลยี Ultra Wideband มาประยุกต์ใช้	29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 ทฤษฎีของสายอากาศแบบกรวยคู่	31
2.12.1 สนามการแพร่กระจายคลื่น	33
2.13 พารามิเตอร์ของสายอากาศ (Antenna Parameter)	33
2.13.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	33
2.13.2 แพทเทอร์นแบบไอโซโทรปิก ไครเรชันเนล และออมนิไครเรชันเนล	34
2.13.3 แพทเทอร์นหลัก	34
2.13.4 โลบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)	35
2.13.5 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)	36
2.13.6 บริเวณต่าง ๆ ของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศ	37
<b>บทที่ 3 การวัดและแบบจำลอง</b>	
3.1 สาเหตุและที่มา	38
3.2 พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ	38
3.2.1 Friis' Transmission Formula	38
3.2.2 การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss)	39
3.3 แบบจำลองการวัดการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	40
3.3.1 สายอากาศด้านส่งและด้านรับอยู่ในแนวตั้ง	41
3.3.2 สายอากาศด้านส่งและด้านรับอยู่ในแนวนอน	41
3.3.3 สายอากาศด้านส่งมีลักษณะการโพลาไรซ์แบบ (Cross Polarization)	42
3.4 ขั้นตอนในการวัด	42
3.4.1 ขั้นตอนในการวัดตามแบบจำลองที่ 1 และ 2	42
3.4.2 ขั้นตอนในการวัดตามแบบจำลองที่ 3	43

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์</b>	
4.1 การวิเคราะห์สัญญาณ	44
4.2 ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณ	44
4.2.1 ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณ ในแบบจำลองที่ 1	44
4.2.2 ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณ ในแบบจำลองที่ 2	47
4.2.3 ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณ ในแบบจำลองที่ 3	50
<b>บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลจากการวัดและวิเคราะห์สัญญาณ	54
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการดำเนินโครงการ	54
5.3 ปัญหาที่พบในระหว่างการดำเนินโครงการ	55
5.4 แนวทางในการแก้ปัญหา	55
5.5 ข้อเสนอแนะ	55
<b>บรรณานุกรม</b>	56
<b>เว็บไซต์อ้างอิง</b>	56
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	58
ภาคผนวก ข การเตรียมเครื่อง Vector Network Analyzer ก่อนทำการวัด	60
ภาคผนวก ค ขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ผล	63

## สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 1.1 แบบจำลองในการวัดสัญญาณ เมื่อตั้งสายอากาศตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวตั้ง	2
รูปที่ 1.2 แบบจำลองในการวัดสัญญาณ เมื่อตั้งสายอากาศตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวนอน	3
รูปที่ 1.3 แบบจำลองในการวัดสัญญาณ เมื่อตั้งสายอากาศตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวนอน แต่ทำมุมกับผนังอิฐ	3
รูปที่ 1.4 ขั้นตอนในการทำปริภูมิพันธ์	4
รูปที่ 2.1 กำลังงานและความถี่ของ UWB เมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารในปัจจุบัน	6
รูปที่ 2.2 ลักษณะของสัญญาณพัลส์ใน โดเมนเวลาและแถบกำลังงานของสัญญาณใน โดเมนความถี่	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะการใช้งานอุปกรณ์มัลติมีเดียภายในบ้าน	8
รูปที่ 2.4 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC ของUWB ภายในอาคาร	13
รูปที่ 2.5 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC ของUWB ภายนอกอาคาร	13
รูปที่ 2.6 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่	15
รูปที่ 2.7 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนโมโนไซเคิลทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่	15
รูปที่ 2.8 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเลตทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่	16
รูปที่ 2.9 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามขนาด 4 ระดับ	17
รูปที่ 2.10 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามตำแหน่ง	18
รูปที่ 2.11 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบสองเฟส	18
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงลักษณะระดับของสัญญาณที่รับได้เนื่องจากผลกระทบของมัลติพาทเฟคดิ้ง และชาโคว์อิ้ง	20
รูปที่ 2.13 ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนกับพื้นผิวเรียบต่อสัญญาณที่รับได้	22
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการหน่วงกำลังของคลื่นภายในอาคาร	24
รูปที่ 2.15 สายอากาศแบบกรวยคู่	31
รูปที่ 2.16 คุณสมบัติของสายอากาศแบบกรวยคู่	31
รูปที่ 2.17 อัตรากาจรส่งผ่านความถี่ของสายอากาศแบบกรวยคู่	32
รูปที่ 2.18 เฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านความถี่ของสายอากาศแบบกรวยคู่	32
รูปที่ 2.19 ระบบ โคออดิเนทสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	33
รูปที่ 2.20 แพทเทอรันแบบออมนิไดเรกชันแนล(Omni-directional)	34
รูปที่ 2.21 โลบต่าง ๆ และบีมวิคท์	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 2.22 สเปกตรัมในแบบเชิงเส้น	35
รูปที่ 3.1 มุมมองด้านบนของตำแหน่งการวางสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ในแบบจำลองที่ 1	41
รูปที่ 3.2 มุมมองด้านบนของตำแหน่งการวางสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ในแบบจำลองที่ 2	41
รูปที่ 3.3 มุมมองด้านบนของตำแหน่งการวางสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ในแบบจำลองที่ 3	42
รูปที่ 3.4 ลักษณะในการวัดสัญญาณตามแบบจำลองที่ 3	43
รูปที่ 4.1 ฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะทาง 0.4 เมตร ในแบบที่ 1	44
รูปที่ 4.2 ฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะทาง 4 เมตร ในแบบที่ 1	45
รูปที่ 4.3 ค่าการสูญเสียเชิงวิถีเมื่อเทียบกับระยะทาง	45
รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อเทียบกับระยะทาง	46
รูปที่ 4.5 ค่า power delay profile เมื่อเทียบกับเวลา	46
รูปที่ 4.6 ฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะ 0.4 เมตร ในแบบที่ 2	47
รูปที่ 4.7 ฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะ 4 เมตร ในแบบที่ 2	47
รูปที่ 4.8 ค่าการสูญเสียเชิงวิถีเมื่อเทียบกับระยะทาง	48
รูปที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อเทียบกับระยะทาง	48
รูปที่ 4.10 ค่า power delay profile เมื่อเทียบกับเวลาในแบบที่ 2	49
รูปที่ 4.11 แบบจำลองที่ 3 ใช้ในการวัดสัญญาณที่มุม 30 องศา	50
รูปที่ 4.12 แบบจำลองที่ 3 ใช้ในการวัดสัญญาณที่มุม 45 องศา	50
รูปที่ 4.13 แบบจำลองที่ 3 ใช้ในการวัดสัญญาณที่มุม 60 องศา	51
รูปที่ 4.14 ฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะห่างระหว่าง สายอากาศ 2 เมตร ที่มุม 30 องศา	51
รูปที่ 4.15 ฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะห่างระหว่าง สายอากาศ 3 เมตร ที่มุม 45 องศา	52
รูปที่ 4.16 ฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะห่างระหว่าง สายอากาศ 4 เมตร ที่มุม 60 องศา	52

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดสัญญาณเดียวกัน แต่สายอากาศทำมุมต่างกัน	53
รูปที่ ก.1 เครื่อง Vector Network Analyzers (VNA)	58
รูปที่ ก.2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ร่วมกับ VNA	58
รูปที่ ก.3 สาย Coaxial Cable Semi rigid	59
รูปที่ ก.4 เสาที่ใช้ในการติดตั้งสายอากาศ	59
รูปที่ ก.1 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ผล	63



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดย FCC สำหรับการใช้งาน ในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร	11
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดย ETSI สำหรับการใช้งาน ในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร	12
ตารางที่ 4.1 ผลที่ได้จากการวัดและวิเคราะห์สัญญาณในแบบจำลองต่างๆ	49
ตารางที่ 4.2 แสดงการสูญเสียเฉลี่ยของการกระจายของสัญญาณ	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 แนวคิดและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น รวมถึงได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว โดยในการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายนั้นมีจุดประสงค์เพื่อที่จะตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ในด้านต่างๆ อาทิ จำนวนข้อมูลที่สามารถส่งได้, อัตราความเร็วในการส่งข้อมูล, จำนวนของผู้ใช้ในระบบ, ระยะทางที่สามารถส่งได้ และความสามารถในการทำงานร่วมกัน เป็นต้น

เพื่อรองรับสื่อแบบมัลติมีเดียที่เพิ่มขึ้น จึงได้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra-Wideband communication systems : UWB) การสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งได้รับการกำหนดให้อยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.3a มีย่านความถี่ที่ถูกกำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission : FCC) อยู่ในช่วง 3.1GHz ถึง 10.6 GHz และมีสเปกตรัมความหนาแน่นกำลังในการส่งให้อยู่ที่ระดับไม่เกิน -41.3 dBm/MHz อันเป็นระดับกำลังงานของสัญญาณรบกวน เพื่อไม่ให้ระบบการสื่อสารนี้ไปกวนกับระบบการสื่อสารเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

ดังนั้นจึงจะเห็น ได้การสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่สำคัญและควรนำมาทำการศึกษาทดลอง โดยในการศึกษาทดลองนั้นได้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical Antenna) ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง ซึ่งในการแพร่กระจายคลื่นแบบดังกล่าวนี้จะเกิดปรากฏการณ์ของคลื่นหลายลักษณะด้วยกัน โดยปรากฏการณ์หนึ่งที่สำคัญคือการกระจัดกระจายของคลื่น (Scattering) กล่าวคือ เมื่อคลื่นตกกระทบกับพื้นผิวขรุขระจะมีการกระจัดกระจายไปในหลายทิศทาง จึงได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ดังกล่าวและผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและวัดสัญญาณการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบกับพื้นผิวขรุขระ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบต่างๆ ที่เกิดกับระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

1.2.3 ผลที่ได้จากการศึกษาในโครงการนี้ จะเป็นพื้นฐานในการศึกษาวิจัยของระบบ

โครงข่ายการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งอื่น ๆ ต่อไป

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ออกแบบแบบจำลองที่ใช้ในการวัดสัญญาณ โดยแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ

- สายอากาศตัวส่งและตัวรับตั้งอยู่ในแนวแกนตั้ง (Vertical)
- สายอากาศตัวส่งและตัวรับตั้งอยู่ในแนวแกนนอน (Horizontal)
- สายอากาศตัวส่งและตัวรับตั้งอยู่ในแนวแกนนอนแต่ทำมุมกับผนังอิฐ

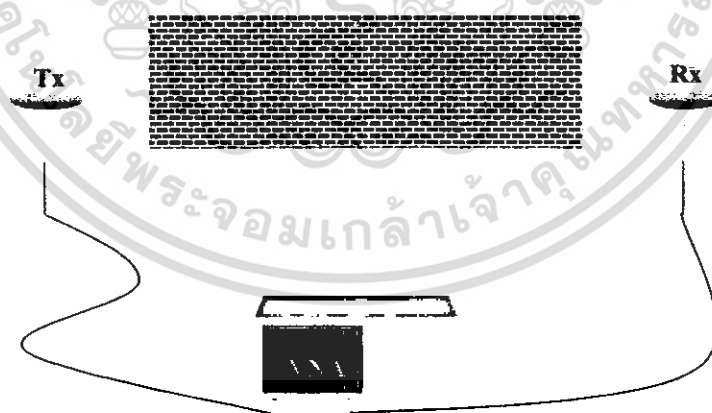
1.3.2 วัดสัญญาณตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้

1.3.3 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม Matlab

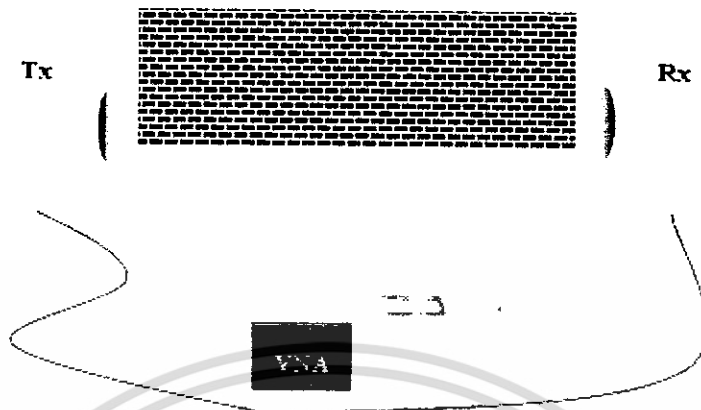
1.3.4 นำเสนอผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ ในรูปแบบของค่าแมกนิจูด (Magnitude) และ เฟส (phase) ของฟังก์ชันการส่งผ่านความถี่, รูปสัญญาณทางด้านรับเมื่อผ่านสายอากาศ, ค่าการสูญเสียเชิงวิถี (path loss), ค่าการหน่วงเวลา (Time Dispersion) และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ในระบบสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

### 1.4 แบบจำลองในการวัดสัญญาณ

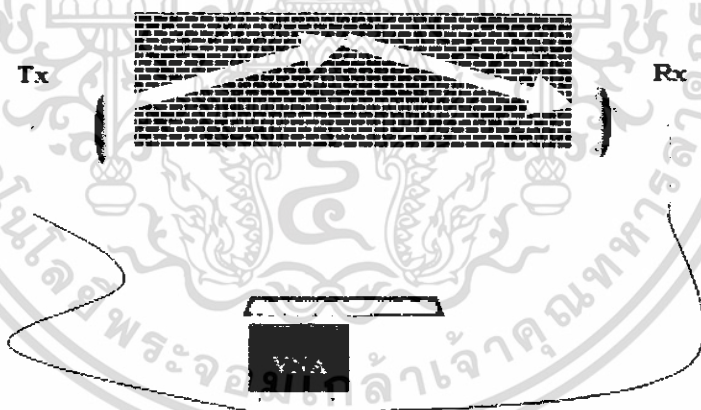
โครงการนี้ได้ออกแบบแบบจำลองการวัดเป็นสามลักษณะคือ ให้สายอากาศตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวตั้ง (Vertical) ให้สายอากาศตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวนอน (Horizontal) และสายอากาศตัวส่งและตัวรับตั้งอยู่ในแนวแกนนอนแต่ทำมุมกับผนังอิฐ แสดงดังรูปที่ 1.1 ถึง 1.3



รูปที่ 1.1 แสดงแบบจำลองในการวัดสัญญาณ เมื่อตั้งสายอากาศตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวตั้ง



รูปที่ 1.2 แสดงแบบจำลองในการวัดสัญญาณ เมื่อตั้งสายอากาศตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวนอน

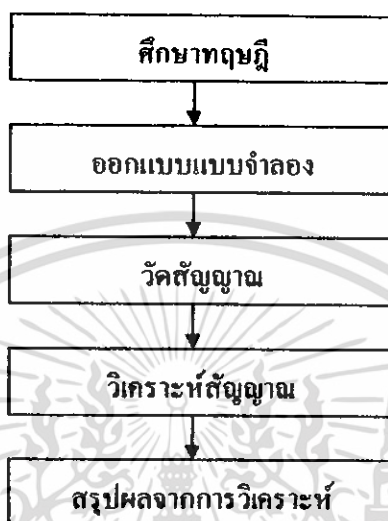


รูปที่ 1.3 แสดงแบบจำลองในการวัดสัญญาณ เมื่อตั้งสายอากาศตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวนอนแต่ทำมุมกับผนังอิฐ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

ในการดำเนินโครงการได้แบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็นส่วนๆ ดังนี้



รูปที่ 1.4 ขั้นตอนในการทำปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในบทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงวัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์ ขอบเขตของโครงการ และขั้นตอนการดำเนินโครงการ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีโดยรวมของการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง ซึ่งจะประกอบไปด้วยลักษณะเฉพาะของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง, รูปสัญญาณที่ใช้ในการส่ง การเข้าถึงช่องสัญญาณ, วิธีในการมอดูเลตสัญญาณ, คุณสมบัติการส่งผ่านคลื่น และคุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบแบบจำลองที่ใช้ในการวัดสัญญาณ, ขั้นตอนการทดสอบสัญญาณ, อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสัญญาณ และพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

บทที่ 4 กล่าวถึงผลที่ได้จากการวัดสัญญาณและผลการวิเคราะห์สัญญาณ ตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุป ปัญหาที่พบระหว่างดำเนินโครงการ แนวทางในการแก้ไขปัญหา รวมถึงงานในอนาคตหากมีการศึกษาต่อเพิ่มเติม

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ทฤษฎีและหลักการของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง นั้นไม่ได้เป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ โดยที่เทคโนโลยีนี้ได้ถูกนำมาใช้ในโครงการของกองทัพสหรัฐอเมริกา ในช่วงระหว่างปี 1960-1990 ซึ่งเริ่มต้นใช้งานในระบบเรดาร์เป็นหลัก อันเนื่องมาจากคุณสมบัติข้อหนึ่งของระบบการสื่อสารประเภทนี้ที่มีการใช้แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในระบบการสื่อสารที่มากทำให้สามารถได้รับข้อมูลที่มีความแม่นยำในด้านตำแหน่งของวัตถุที่เกี่ยวข้องตรงมาก จนกระทั่งปัจจุบันได้เริ่มนำเอาเทคโนโลยีนี้มาใช้งานในระบบการสื่อสารมากขึ้น เทคโนโลยีนี้ได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้ในระบบการสื่อสารแบบมัลติมีเดีย หรือระบบการสื่อสารที่ต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง

โดยที่เทคโนโลยีนี้จะมีความแตกต่างจากเทคโนโลยีการสื่อสารที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น การสื่อสารแบบแถบแคบ และการสื่อสารแบบแถบกว้าง อยู่ด้วยกัน 2 ประการ คือ

1. มีการใช้แบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณมากกว่า 25% ของความถี่กลาง โดยที่การหาค่าเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2.1)

$$\%BW = 2 \cdot \frac{(f_H - f_L)}{(f_H + f_L)} \times 100 \quad (2.1)$$

โดยที่  $f_H$  คือ ค่าขอบความถี่บนของระบบการสื่อสาร

$f_L$  คือ ค่าขอบความถี่ล่างของระบบการสื่อสาร

ระบบนี้จะกำหนดแบนด์วิดท์ของระบบได้จากช่วงห่างระหว่างความถี่บน และความถี่ล่างของระบบ โดยที่ค่าของความถี่ทั้ง 2 นี้จะกำหนดได้จากความถี่ที่ให้ระดับกำลังงานของสัญญาณต่ำกว่าระดับกำลังงานสูงสุด 10 dB ซึ่งเป็นระดับของกำลังสัญญาณรบกวนพื้น (noise floor) ของระบบการสื่อสารประเภทอื่น

2. Ultra Wideband เป็นระบบการสื่อสารที่ไม่ต้องมีการมอดูเลตสัญญาณพาห์เข้ากับสัญญาณข้อมูลก่อนทำการส่งข่าวสาร ดังนั้นในภาคส่งของ Ultra - Wideband จึงไม่ต้องใช้อุปกรณ์ประเภทการมอดูเลตความถี่ ( RF Modulation) และเครื่องส่งที่มีกำลังมาก จึงเป็นการลดต้นทุนของระบบการสื่อสาร

ความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารของ Ultra - wideband ที่ทาง FCC ได้อนุญาตให้ใช้ในระบบการสื่อสารนี้จะอยู่ในช่วง 3.1GHz ถึง 10.6 GHz และจากการที่ช่วงความถี่ที่ทาง FCC กำหนดให้ใช้มีขนาดที่กว้างมาก ดังนั้นเทคโนโลยี Ultra - Wideband จึงสามารถส่งผ่านข้อมูลข่าวสารในระบบการสื่อสารได้เป็นจำนวนมาก โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความจุของระบบการสื่อสารกับแบนด์วิดท์ที่ใช้ในระบบการสื่อสารนี้ แสดงได้ดังสมการที่ (2.2)

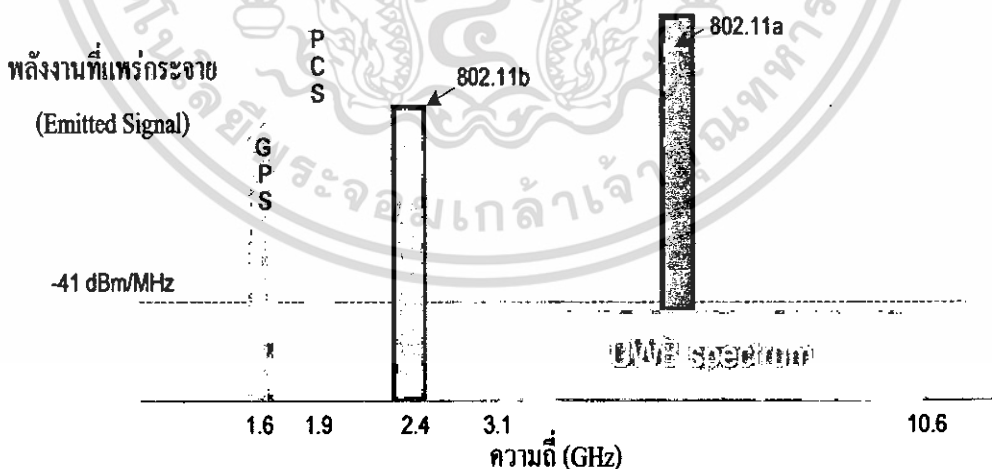
$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.2)$$

โดยที่  $C$  คือ ความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) มีหน่วยเป็น bps

$B$  คือ แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูลมีหน่วยเป็น Hz

$\frac{S}{N}$  คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน

Ultra - Wideband เป็นระบบการสื่อสารที่มีแบนด์วิดท์ของระบบที่กว้างมาก และได้ไปทับซ้อนกับระบบการสื่อสารที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น ระบบเครือข่ายไร้สายท้องถิ่น (Wireless Local Area Networks หรือที่เรียกว่า WLAN) เป็นต้น ดังนั้นทาง FCC จึงได้มีการกำหนดกำลังงานของระบบที่แพร่ออกมาในช่องสัญญาณของระบบการสื่อสารประเภทนี้ไว้ที่ระดับ  $-41.3$  dBm/MHz ซึ่งเป็นระดับของกำลังงานของสัญญาณรบกวนโดยในรูปที่ 2.1 แสดงระดับกำลังงานและช่องความถี่ของ Ultra - Wideband เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารอื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

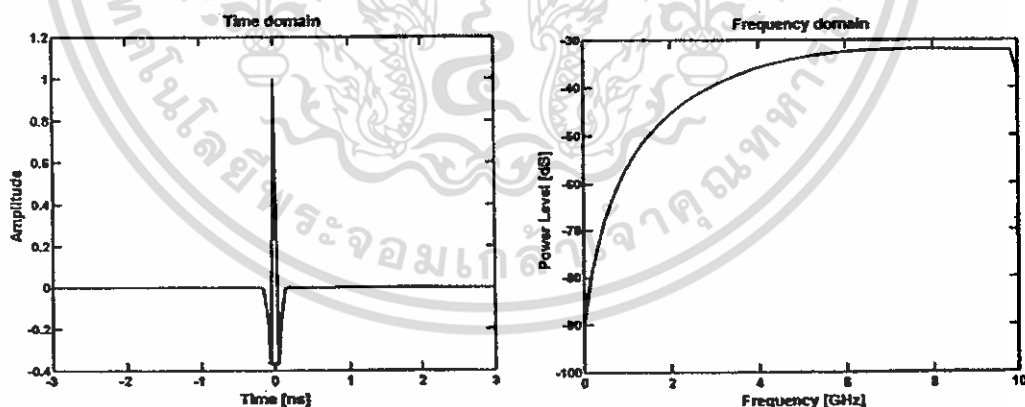


รูปที่ 2.1 แสดงกำลังงานและความถี่ของ UWB เมื่อเทียบกับระบบการสื่อสาร ในปัจจุบัน

จากรูปที่ 2.1 จะพบว่าระดับกำลังงานของ Ultra - Wideband จะอยู่ในระดับที่ต่ำ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารในปัจจุบัน ดังนั้นสัญญาณของ Ultra - Wideband จึงไม่ไปรบกวนกับสัญญาณของระบบการสื่อสารเดิม ซึ่งเป็นเหตุให้สามารถนำเอาเทคโนโลยี Ultra - Wideband ไปใช้งานในหลายๆ มีระบบการสื่อสารเดิมใช้อยู่ได้

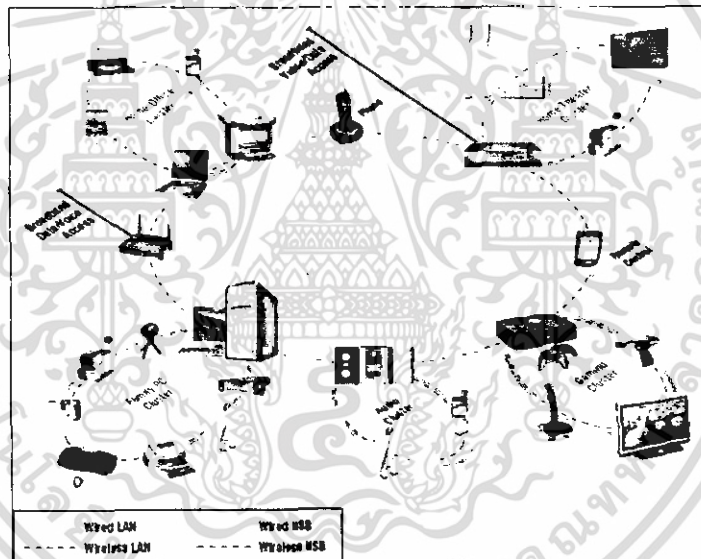
## 2.2 ลักษณะเฉพาะของ Ultra - Wideband

Ultra - Wideband เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่แตกต่างจากการสื่อสารทางคลื่นความถี่วิทยุแบบอื่น โดยจุดเด่นของเทคโนโลยี Ultra - Wideband เป็นระบบสื่อสารที่ไม่ต้องใช้คลื่นพาห์ (Radio Frequency, RF) เหมือนในระบบอื่น สัญญาณของ Ultra - Wideband จะเป็นสัญญาณพัลส์ (Pulse) โดยจะเป็นพัลส์แคบๆ ขนาดประมาณ 0.2 นาโนวินาที จึงทำให้มีความหนาแน่นแถบความถี่ (Spectral density) ที่กว้างมาก ดังนั้นจึงแผ่กระจายครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้างในระดับกิกะเฮิรต์ (GHz) และเนื่องด้วยระบบนี้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงทำให้สามารถที่จะรองรับต่ออัตราการส่งข้อมูลได้สูงถึง 110 Mbps ในระยะทางประมาณ 10 เมตร ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าสัญญาณพัลส์ที่ใช้มีขนาดที่แคบมากจึงทำให้ดีวตีไซเคิล(duty cycle) มีค่าจึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบนี้มีการใช้กำลังที่ต่ำลงไปด้วยในรูปที่ 2.2 แสดงถึงลักษณะของสัญญาณพัลส์ในโดเมนเวลาและแถบกำลังงานของสัญญาณในโดเมนความถี่



รูปที่ 2.2 ลักษณะของสัญญาณพัลส์ในโดเมนเวลาและแถบกำลังงานของสัญญาณในโดเมนความถี่

หากเปรียบเทียบระบบนี้กับเทคโนโลยีอย่าง Wi - Fi หรือ Bluetooth แล้วก็จะพบว่า Ultra - Wideband จะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีดังกล่าวทั้งด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูล การใช้พลังงานที่ต่ำกว่า รวมถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลทะลุทะลวงผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ UWB จะมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงถึง 480 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 2 เมตร และความเร็ว 110 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 10 เมตร ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในขณะที่ Wi - Fi สามารถรับส่งข้อมูลสูงสุด 54 Mbps และหากเปรียบเทียบกับ Bluetooth ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมสำหรับเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลในปัจจุบัน UWB มีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงกว่า Bluetooth ถึง 100 เท่าซึ่งด้วยความเร็วในระดับดังกล่าว UWB จึงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ประเภทให้ความบันเทิงภายในบ้าน (Home Entertainment)



รูปที่ 2.3 ลักษณะการใช้งานอุปกรณ์มัลติมีเดียภายในบ้าน

### 2.2.1 จุดเด่นของ Ultra - Wideband

ถ้าจะกล่าวถึง Ultra - Wideband หรือรวมถึงพัลส์ (Impulse) พัลส์แคบ (short - pulse) สัญญาณที่ไม่ใช่ไซน์ซอoidal (non-sinusoidal) สัญญาณที่ปราศจากคลื่นพาห์ (carrier less) แถบกว้าง ขวดยิ่ง (super wideband) การอัดพัลส์แบบเอฟเฟอเินอย่างเร็ว (fast frequency chirp) และพัลส์แบบ

โมโน (mono pulse) ซึ่งเป็นระบบที่มีจุดเด่นที่น่าสนใจสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ใน ระบบสื่อสารอวกาศเช่น

- เป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อยและมีต้นทุนต่ำ ความซับซ้อนที่น้อยและต้นทุนที่ต่ำของ Ultra - Wideband เกิดขึ้นจากปัจจัยทางลักษณะของสัญญาณดั้งเดิมที่ยังไม่ผ่านการมอดูเลต (base band) ของการส่งสัญญาณซึ่งไม่เหมือนกับระบบการส่งสัญญาณวิทยุแบบอื่นๆ โดยที่เครื่องส่งจะทำการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากๆ ในโดเมนทางเวลาซึ่งสามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นออกไปโดยปราศจากการเพิ่มความถี่วิทยุหรือคลื่นพาห์รวมเข้าไป และใน ส่วนของการรวมสัญญาณวิทยุนั้นจะเป็นการนำเอาสัญญาณเบสแบนด์รวมเข้าไปกับคลื่นพาห์เพื่อย้ายสัญญาณไปยังแถบความถี่ที่มีคุณลักษณะในการแพร่กระจายคลื่นตามต้องการซึ่งสัญญาณจะถูกแพร่กระจายได้ดีโดยปราศจากความถี่ในการเพิ่มการแปลงความถี่ให้สูงขึ้น (up - conversion) และการเพิ่มกำลังให้สูงขึ้น (amplification) โดยในกระบวนการกลับกันการแปลงความถี่ลง (down - conversion) และตัวผลิตความถี่ (local oscillator) จึงไม่จำเป็นในเครื่องรับ Ultra - Wideband ด้วยเช่นกันทำให้ลดความซับซ้อนของระบบและต้นทุนในการผลิตลงไปมาก

- มีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน (Noise) เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานต่ำและลักษณะเฉพาะในการสุ่มเทียบ (Pseudo - random) ของสัญญาณส่งจึงทำให้สัญญาณ Ultra - Wideband นี้มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณรบกวนซึ่งทำให้การตรวจหาสัญญาณทำได้ยาก และยังปรากฏในเอกสารทางการวิจัยว่าการส่งสัญญาณ Ultra - Wideband นั้นไม่ก่อให้เกิดผลการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบคลื่นความถี่วิทยุอื่นๆ เนื่องจากสัญญาณของ Ultra - Wideband นั้นมีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับต่ำโดยอยู่ในระดับของสัญญาณรบกวนพื้น (noise floor) จึงทำให้ระบบอื่นมองว่าสัญญาณ Ultra - Wideband นี้คือสัญญาณรบกวนเลยถูกกำจัดออกจากการพิจารณาของระบบ

- มีความต้านทานต่อคลื่นหลายวิถี (multipath) และการรบกวนของสัญญาณใกล้เคียงในระบบการมอดูเลตทางเวลา (time modulation) แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะทำการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงในระดับหลักร้อยเมกะบิตต่อวินาที อีกทั้งยังได้ถูกประเมินในส่วนของจำนวนของผู้ใช้งานในระบบการสื่อสารแบบคลื่นวิทยุแบบอิมพัลส์ว่าได้จำนวนที่มากกว่าระบบทั่วไป และเนื่องด้วยมีแบนด์วิดท์ของสัญญาณส่งที่กว้างจึงทำให้ได้รับผลจากคลื่นหลายวิถีอย่างมาก เมื่อระบบมีแบนด์วิดท์ที่กว้างนั้นทำให้เกิดความแตกต่างทางความถี่อย่างมากซึ่งรวมเข้ากับ

การส่งสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องจึงทำให้ Ultra - Wideband มีการมอดูเลตทางเวลานั้นมีความด้านทานต่อการแพร่กระจายของคลื่นหลายวิธีรุนแรง และการรบกวนหรือแทรกสอดจากสัญญาณความถี่ใกล้เคียง

- มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลาสำหรับการกำหนดตำแหน่งและการประยุกต์ใช้ในระบบติดตาม (tracking) ด้วยพัลส์ที่มีลักษณะทางโดเมนเวลาที่แคบมากๆ หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากๆ นั้นหมายถึง ระบบคลื่นวิทยุ Ultra - Wideband มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมจังหวะและกำหนดเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่าระบบดาวเทียมบอกพิกัด (GPS) และระบบคลื่นวิทยุแบบอื่นๆ อีกทั้งด้วยคุณสมบัติในการทะลุผ่านวัสดุได้จึงทำให้ Ultra - Wideband ที่มีการมอดูเลตทางเวลาถูกนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ระยะสั้น เช่น ในการช่วยเหลือชีวิตและปฏิบัติการป้องกันอาชญากรรม เช่นเดียวกับการใช้งานสำรวจและในอุตสาหกรรมการทำเหมือง เป็นต้น

### 2.3 ข้อกำหนดของเทคโนโลยี Ultra - wideband

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ได้ถูกกำหนดขึ้นใน Ultra - Wideband นั้นคือการจัดสรรความถี่ในการใช้งานซึ่งได้มีกลุ่มทำงานในสหรัฐอเมริกาได้พยายามทำการจำกัดข้อกำหนดในการใช้งานช่วงความถี่ของ Ultra - Wideband จากกฎข้อบังคับเดิมของคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา โดยกลุ่มงานนี้ก็ก่อตั้งขึ้นอย่างเป็นทางการ โดยใช้ชื่อว่า Ultra - Wideband Working Group (UWBWG) เพื่อทำการเจรจาข้อตกลงร่วมกับเอฟซีซีเช่นเดียวกันกับในยุโรปก็ได้มีการหาข้อตกลงการจัดสรรคลื่นความถี่และการสอดแทรกของความถี่วิทยุซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดแถบความถี่สำหรับการใช้งานในระบบแถบกว้างในสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standards Institute : ETSI) หรือสหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union : ITU)

#### 2.3.1 ข้อกำหนดของ Ultra - Wideband ในสหรัฐอเมริกา

ในปี ค.ศ. 1998 FCC ได้ออกประกาศเกี่ยวกับการตรวจสอบหรือ Notice of Inquiry (NOI) โดยถึงแม้ว่าจะได้คาดการณ์ถึงระดับกำลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณที่มีระดับต่ำมากๆ แล้วก็ตาม ยังมีกลุ่มผู้ที่สนับสนุนในระบบเดิมที่มีใช้งานกันอยู่ได้ทำการต่อต้านการนำ Ultra - Wideband มาใช้งานสำหรับการสื่อสารของพลเรือนซึ่งเรียกร้องโดยมากจะเกี่ยวข้องกับคาดการณ์ถึงการเพิ่มขึ้นของระดับการสอดแทรกในแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด อาทิเช่น แถบความถี่ในการ

กระจายสัญญาณโทรทัศน์ แถบความถี่ที่สำรองไว้สำหรับคลื่นวิทยุทางดาราศาสตร์และระบบ GPS โดยที่องค์กรบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกาหรือ FAA (Federal Aviation Administration) ได้แสดงความเห็นห่วงต่อการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบความปลอดภัยในกิจการการบินและทิศทางในการค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องส่งใน Ultra Wideband ด้วยเช่นกัน

Ultra Wideband ได้ถูกนำเสนอสำหรับการนำมาใช้ในกิจการการสื่อสารของพลเรือน ซึ่งยังไม่ได้มีการกำหนดใดๆ สำหรับลักษณะสัญญาณที่จะนำมาใช้ จึงได้มีหน่วยงานหนึ่งที่ชื่อว่า DARPA (Defense Advanced Research Project Agency) ได้ทำการออกข้อกำหนดฉบับที่หนึ่งสำหรับ Ultra Wideband ซึ่งอยู่บนพื้นฐานอัตราส่วนแบนด์วิดท์ ( $B_f$ ) ของสัญญาณโดยต้องมีค่ามากกว่า 0.25 โดยสามารถกำหนดได้ตามสมการที่ (2.1) ที่แสดงไว้แล้วข้างต้น ในวันที่ 14 กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 FCC ได้ออกกฎส่วนรับ Ultra Wideband ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับ Ultra Wideband และยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของคำประกาศและระเบียบการฉบับที่หนึ่งได้เผยแพร่ต่อสาธารณชนในวันที่ 22 เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งในเอกสารได้กล่าวถึงการอนุญาตใช้งานใน Ultra Wideband ทั้ง 4 ประเภทและการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายพลังงานสำหรับการใช้ในประเภทต่างๆ โดยจากนิยามข้างต้นได้ทำการลดค่าการจำกัด  $B_f$  ไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 0.2 ตามสมการที่ 2.1 และข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานโดย เอฟซีซี (FCC) ได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1 สำหรับการใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร

ตารางที่ 2.1 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร

ความถี่ (เมกกะเฮิร์ตซ์)	ภายใน	ภายนอก
	EIRP in dBm	EIRP in dBm
960 – 1610	-75.3	-75.3
1610 – 1990	-53.3	-63.3
1990 – 3100	-51.3	-61.3
3100 – 10600	-41.3	-41.3
สูงกว่า 10600	-51.3	-61.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

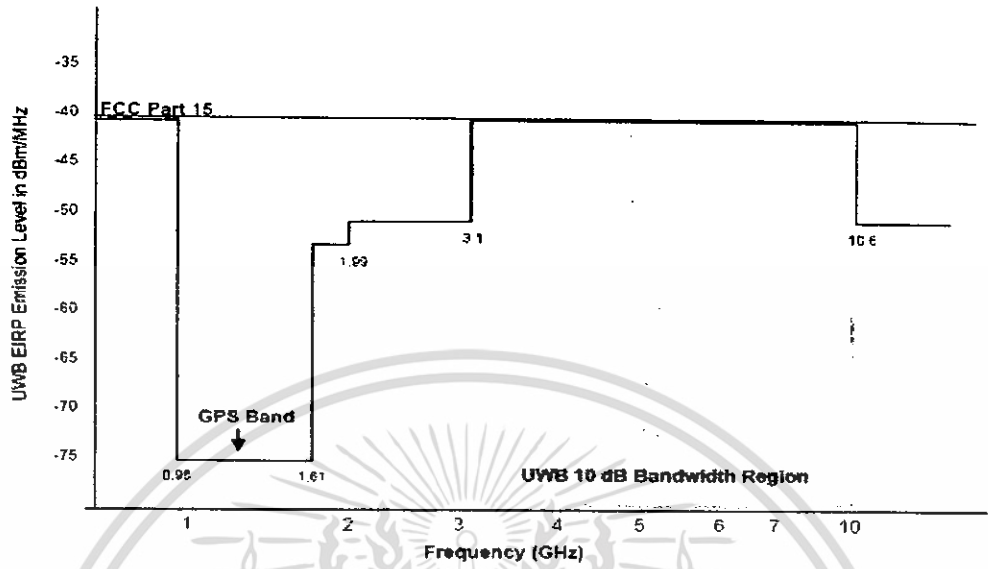
### 2.3.2 ข้อกำหนดของ Ultra - Wideband ในยุโรป

ปัจจุบันโครงร่างของข้อกำหนด Ultra - Wideband ในทวีปยุโรปอยู่ในช่วงรอข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวกับผลกระทบของ Ultra - Wideband บนระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่โดยทางยุโรปนั้น บางส่วนของข้อกำหนดจะรัดกุมกว่าของทางสหรัฐอเมริกา เพราะทางด้านยุโรปนั้นในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ต้องแสดงให้เห็นว่าส่งผลกระทบน้อยหรือไม่ส่งผลกระทบต่อระบบเดิมที่มีอยู่โดยข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย ไอทียู (ITU) หรือ อีทีเอสไอ (ETSI) แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2

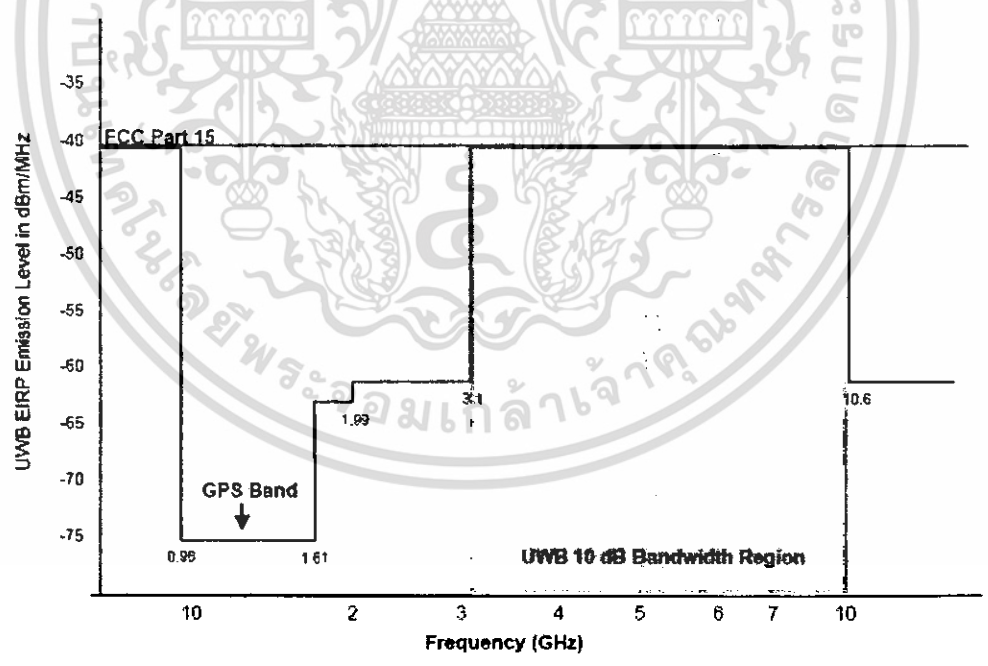
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร

สถานที่	ขอบเขตความถี่ [GHz]		
	$f < 3.1$	$3.1 < f < 10.6$	$f > 10.6$
ภายใน	$-51.3 + 87 \log(f/3.1)$	-41.3	$-51.3 + 87 \log(f/10.6)$
ภายนอก	$-61.3 + 87 \log(f/3.1)$	-41.3	$-61.3 + 87 \log(f/10.6)$

จากการศึกษาทั้งหมดนี้เราได้แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่ของ Ultra - Wideband ภายในและภายนอกอาคาร ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC ของUWB ภายในอาคาร



รูปที่ 2.5 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC ของUWB ภายนอกอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 รูปแบบของสัญญาณในระบบการสื่อสาร Ultra - Wideband

Ultra - Wideband เป็นระบบการสื่อสารที่ไม่ใช้สัญญาณพาห้ในการนำพาเอาสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่งออกไปสู่ช่องสัญญาณ โดยที่สัญญาณที่ใช้ใน Ultra - Wideband จะใช้สัญญาณที่มีรูปแบบเป็นสัญญาณอิมพัลส์ในการส่งข้อมูล โดยสัญญาณอิมพัลส์ที่ใช้ในการส่งจะมีคาบของสัญญาณที่สั้นมาก ดังนั้นเมื่อทำการแปลงสัญญาณที่ทำการส่งจะมีแถบความถี่ที่กว้างมาก โดยที่ในการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลามาเป็นโดเมนความถี่นี้จะสัมพันธ์กันดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.3)$$

โดยที่  $s(t)$  คือ สัญญาณที่ใช้ในการส่งในโดเมนเวลา

$S(f)$  คือ สัญญาณที่ใช้ในการส่งเมื่อถูกแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่

รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูลในUWB นั้นจะมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท เช่น สัญญาณพัลส์แบบเกาส์ (Gaussian waveform) สัญญาณพัลส์แบบเกาส์โมโนไซเคิล (Gaussian monocycle) และสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ดับเบิล (Gaussian doublet) เป็นต้น โดยที่สัญญาณที่ใช้ในการส่งในระบบการสื่อสารประเภทนี้จะมีคุณสมบัติที่สอดคล้องกันอยู่หนึ่งข้อคือ สัญญาณอิมพัลส์ที่ใช้ในการส่งนั้นเมื่อทำการแปลงสัญญาณในโดเมนความถี่แล้ว จะต้องสอดคล้องกับช่วงความถี่ที่ทาง FCC กำหนด

### 2.4.1 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน (Gaussian pulse)

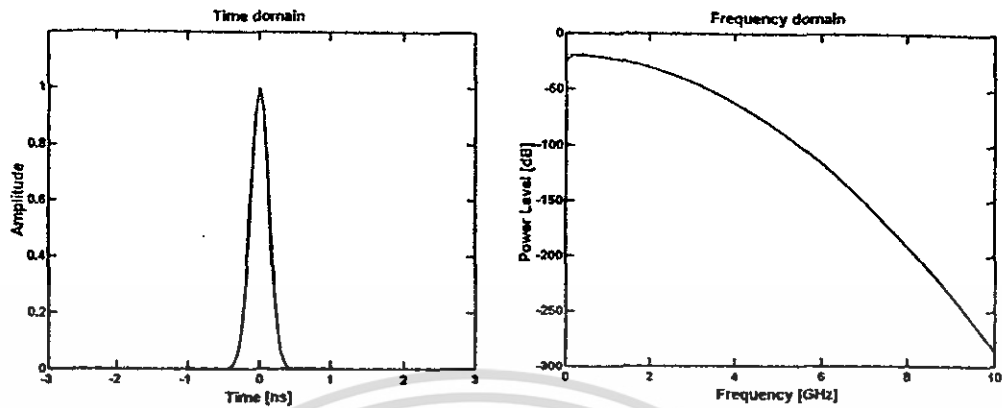
สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนนั้นจะแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่ารูปร่างของสัญญาณจะมีรูปร่างเหมือนการแจกแจงข้อมูลที่มีลักษณะแบบปกติ (Normal distribution) โดยที่สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$s(t) = Ae^{-\left[\frac{(t-T_c)}{\tau}\right]^2} \quad (2.4)$$

โดยที่  $A$  คือ ขนาดของสัญญาณ

$\tau$  คือ ค่าตัวแปรของสัญญาณพัลส์ (Pulse Shape parameter)

$T_c$  คือ ค่าคาบเวลาของสัญญาณชีพ



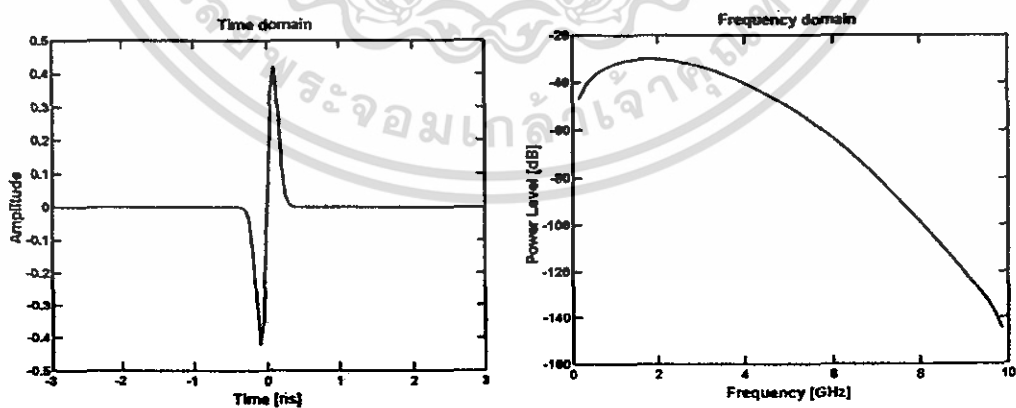
รูปที่ 2.6 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่

#### 2.4.2 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนโมโนไซเคิล (Gaussian monocycle pulse)

สัญญาณพัลส์แบบ โมโนไซเคิลนั้นจะมีรูปร่างของสัญญาณคล้ายกับสัญญาณพัลส์แบบ เกาส์เซียนอันดับที่ 2 โดยที่สัญญาณพัลส์นี้สามารถสร้างได้จากสมการที่ (2.5) โดยที่ตัวแปรต่างๆ ในสมการนี้จะเหมือนกับตัวแปรที่ได้อธิบายมาก่อนแล้วในสมการที่ (2.4)

$$s(t) = \frac{2A}{\tau} \sqrt{e^{-(t-T_c)/\tau}} \times e^{-2\pi \left[ \frac{(t-T_c)}{\tau} \right]^2} \quad (2.5)$$

และรูปร่างของสัญญาณพัลส์แบบโมโนไซเคิลจะแสดงในรูปที่ 2.7



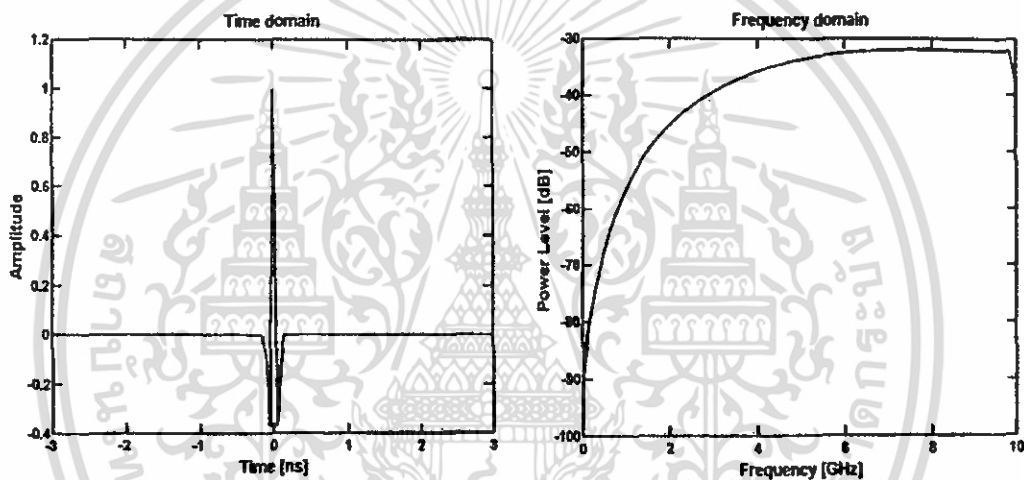
รูปที่ 2.7 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนโมโนไซเคิลทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเบิ้ล (Gaussian doublet pulse)

สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเบิ้ลเป็นสัญญาณที่ได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่ 2 ของสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน ซึ่งสัญญาณแบบเกาส์เซียนดับเบิ้ลสามารถสร้างได้จากสมการที่ (2.6)

$$s(t) = \left[ 1 - 4\pi \left( \frac{t}{\tau_m} \right)^2 \right] e^{-2\pi \left( \frac{t}{\tau_m} \right)^2} \quad (2.6)$$



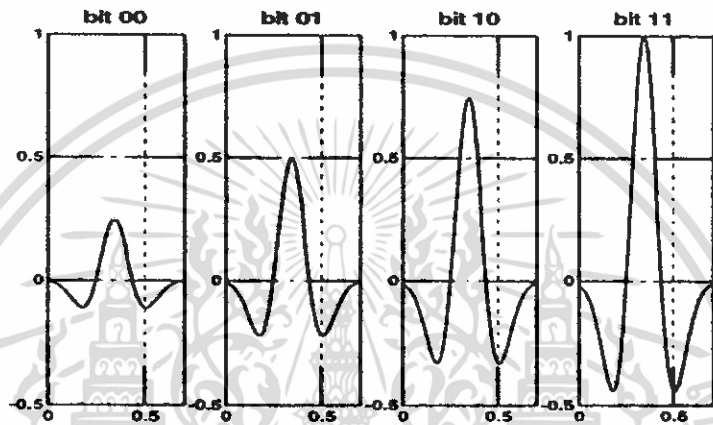
รูปที่ 2.8 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเบิ้ลทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่

### 2.5 วิธีการมอดูเลตในระบบการสื่อสาร Ultra - Wideband

ในการส่งสัญญาณข่าวสารในระบบการสื่อสาร Ultra - Wideband นั้นสามารถทำการมอดูเลตได้หลายวิธีแต่ที่นิยมนำมาใช้มีอยู่ด้วยกัน 3 วิธีคือ การมอดูเลตแบบสองเฟส (Bi - Phase Modulation) การมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามตำแหน่ง (Pulse Position Modulation) และการมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามขนาดของสัญญาณ (Pulse Amplitude Modulation) เป็นต้น

**2.5.1 การมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามขนาด (PAM)**

การมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามขนาด (PAM) นั้นจะอยู่บนพื้นฐานการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลกับขนาดของสัญญาณพัลส์ โดยที่ในรูปที่ 2.9 แสดงสัญญาณข้อมูลในระบบการสื่อสาร Ultra - Wideband ที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามขนาด โดยมีทั้งหมด 4 ระดับ ซึ่งการมอดูเลตตามขนาดนั้นจะมีข้อเสียในด้านอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวน

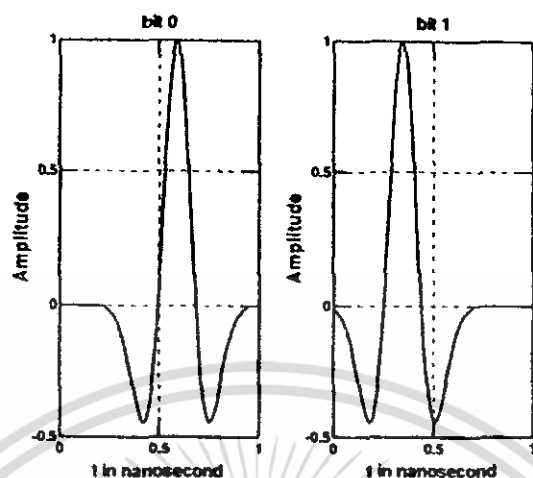


รูปที่ 2.9 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามขนาด 4 ระดับ

**2.5.2 การมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามตำแหน่ง (PPM)**

การมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามตำแหน่ง (PPM) นั้นจะทำการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลตามตำแหน่งของสัญญาณพัลส์ โดยที่ตำแหน่งของสัญญาณพัลส์ที่ใช้แทนสัญญาณข้อมูลสามารถมีได้สองตำแหน่งหรือมากกว่านั้น โดยที่ในรูปที่ 2.10 แสดงการมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามตำแหน่งแบบ 2 ตำแหน่ง โดยที่ในรูปที่ 2.10 นั้นบิต “0” จะแทนตำแหน่งของสัญญาณพัลส์ที่อยู่หลังตำแหน่งปกติ (Nominal-Position) และบิต “1” จะแทนตำแหน่งพัลส์ที่อยู่ก่อนตำแหน่งปกติ โดยช่วงเวลาประวิงเวลาระหว่างตำแหน่งของสัญญาณทั้งสองต้องมีค่าที่มากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการแทรกสอดกันระหว่างสัญญาณอิมพัลส์

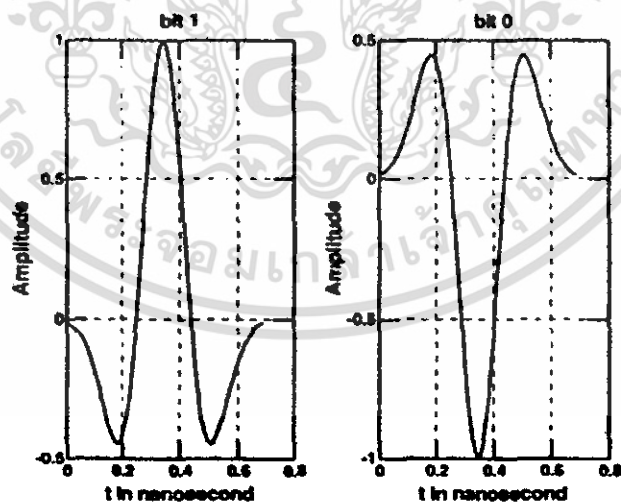
72102



รูปที่ 2.10 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามตำแหน่ง

### 2.5.3 การมอดูเลตแบบสองเฟส (Bi-phase)

การมอดูเลตสัญญาณแบบสองเฟสนั้นจะอยู่บนพื้นฐานของการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลตามเฟสของสัญญาณพัลส์ โดยในกรณีนี้จะแทนสัญญาณข้อมูลหนึ่งบิตด้วยสัญญาณพัลส์หนึ่งลูกคลื่น ซึ่งการมอดูเลตสัญญาณพัลส์แบบสองเฟสแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบสองเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การส่งผ่านคลื่นสัญญาณ

ผลกระทบต่อการส่งผ่านสัญญาณ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้ คือ การสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) การแตกกระจาย (Scattering) ซึ่งจะได้อธิบาย ต่อไป

### - การสะท้อน (Reflection)

การสะท้อนของคลื่นสัญญาณเกิดขึ้นเมื่อคลื่นมีการเคลื่อนที่จากสื่อกลางประเภทหนึ่งไปสู่สื่อกลางอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สื่อกลางชนิดที่สองจะต้องมีพื้นผิวที่ใหญ่มากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ คลื่นบางส่วนจะมีการสะท้อนออกและส่วนที่เหลือก็เคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่สื่อกลางชนิดที่สอง ตัวอย่างของการสะท้อนของคลื่นที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งก็เช่น การที่คลื่นเคลื่อนที่เข้ากระทบกำแพง หรือพื้นผิวของโลก เป็นต้น

### - การเลี้ยวเบน (Diffraction)

การเลี้ยวเบนของคลื่นเกิดขึ้นในกรณีที่มีวัตถุบางอย่างที่มีขอบกีดขวางอยู่ระหว่างอุปกรณ์รับและอุปกรณ์ส่งสัญญาณ ทำให้ไม่มีเส้นทางตรง (Line-of-sight) ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองที่คลื่นสัญญาณสามารถส่งผ่านได้ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นก็คือ คลื่นสัญญาณจะเลี้ยวอ้อมวัตถุนั้นๆ การเลี้ยวเบนของสัญญาณนี้เองที่ทำให้เรายังสามารถรับสัญญาณได้บางส่วน ถึงแม้ว่าเครื่องรับสัญญาณจะถูกบดบังด้วยสิ่งกีดขวาง ด้วยเหตุนี้การเลี้ยวเบนของคลื่นสัญญาณจึงมีประโยชน์ต่อการส่งผ่านสัญญาณ

### - การแตกกระจาย (Scattering)

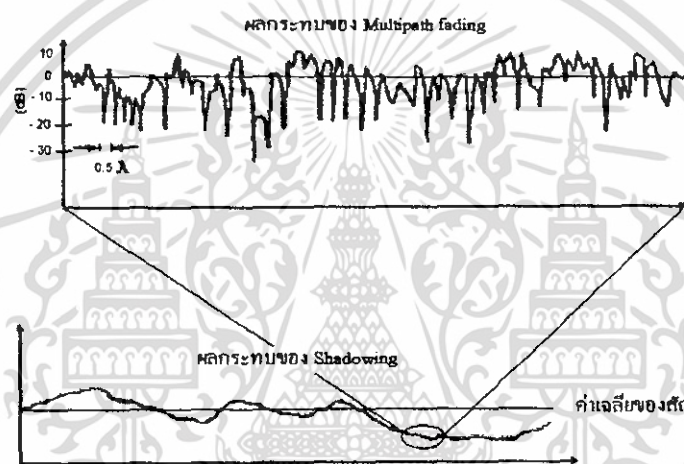
การแตกกระจายจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่กระทบวัตถุหรือพื้นผิวขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณ ทำให้คลื่นสัญญาณเกิดการกระเจิงของสัญญาณก็เช่น ป้ายจราจร เสาโคมไฟตามถนน ใบไม้ และพื้นผิวที่ขรุขระ เป็นต้น

## 2.6.1 คุณลักษณะการลดทอนของสัญญาณ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

- การสูญเสียกำลัง (Path loss) เป็นการลดทอนของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับสัญญาณ โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณจะลดลงตามค่า  $d^n$  โดย  $d$  คือ ระยะทางระหว่างภาครับและภาคส่ง ส่วน  $n$  เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งที่มีขนาดแตกต่างกันไปตามสภาพของบริเวณที่สัญญาณส่งผ่าน คู่ตัวอย่างของค่า  $n$  สำหรับการคำนวณค่า Path loss ในบริเวณต่างๆ

สังเกตว่าค่าอัตราการลดทอนของสัญญาณมีขนาดที่สูงในบริเวณเมืองใหญ่เมื่อเทียบกับบริเวณที่ว่างเปล่า เพราะมีปัญหาการบดบังของสัญญาณเนื่องมาจากตึก อาคาร และสถานที่

- การบดบังสัญญาณ (Shadowing หรือ Large-scale fading) เกิดจากการที่สัญญาณบางส่วนถูกบดบังไปชั่วขณะจากสิ่งแวดล้อมรอบข้าง เช่น อาคาร เนินเขา เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้น สัญญาณที่รับได้ก็จะมีกำลังแรงคั้งเดิม ดังนั้นระดับของสัญญาณที่รับได้มักจะเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะต่างๆ กับขนาดของสิ่งกีดขวาง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ประมาณหลายสิบเมตร ตัวอย่างลักษณะของสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากชาโคว์อิงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงลักษณะระดับของสัญญาณที่รับได้เนื่องจากผลกระทบของมัลติพาทเฟดดิ้ง และชาโคว์อิง

- การจางหายของสัญญาณต่อคลื่นหลายวิถี (Multipath fading หรือ Small-scale fading) คือ เกิดจากการที่สายอากาศของเครื่องรับสัญญาณอยู่ใกล้กับพื้นผิวมาก ดังนั้นสิ่งกีดขวางต่างๆ รอบข้างจึงส่งผลให้เกิดการสะท้อนและการหักเหของสัญญาณในหลายทิศทาง ส่งผลทำให้สัญญาณที่รับได้ ประกอบด้วย จำนวนสัญญาณหลายๆ สัญญาณที่เดินทางมาจากทิศทางที่แตกต่างกัน โดยมีทั้งขนาดและเฟสที่แตกต่างกัน ผลกระทบของมัลติพาทเฟดดิ้ง ทำให้ระดับของสัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างบ่อยครั้งมากและการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ โดยทั่วไปจะอยู่ในระดับเดียวกับกับขนาดของความยาวคลื่น การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอาจจะเกิดขึ้นได้มากถึง 30-40 dB เพียงผู้ใช้โทรศัพท์ที่มีการเคลื่อนที่ด้วยระยะเพียงเศษส่วนของความยาวคลื่น

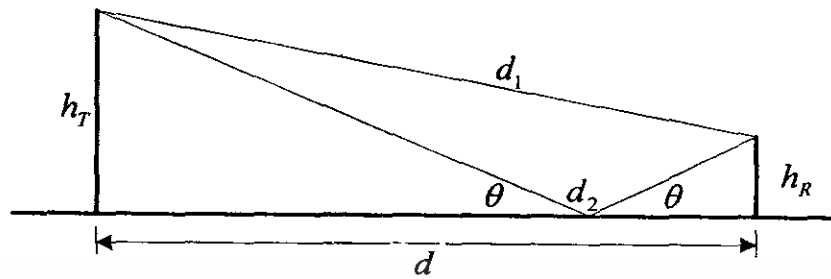
## 2.6.2 การสูญเสียกำลัง (Path loss)

- การสูญเสียกำลังในอากาศว่าง (Free Space Path Loss) ซึ่งเกิดจากการที่คลื่นแพร่กระจายออกไปด้วยมุมที่กว้าง ทำให้ความเข้มของกำลังคลื่นสัญญาณอ่อนตัวลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นแบบยกกำลังสอง คำว่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณในอวกาศว่างนี้ ได้นิยามให้เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังของสัญญาณที่ถูกส่งออกมา โดยที่คลื่นมีการแพร่กระจายในบริเวณที่ว่างเปล่า (free space propagation) อัตราส่วนนี้มีความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (2.7)$$

โดยที่  $P_R$  คือ กำลังของสัญญาณที่รับได้  
 $P_T$  คือ กำลังของสัญญาณที่ส่งออก  
 $G_R$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ  
 $G_T$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง  
 $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่น  
 $d$  คือ ระยะระหว่างภากรับและภาคส่ง (m)

- การสูญเสียกำลังเนื่องจากพื้นผิวเรียบ (Plane Path Loss) จะกล่าวถึงผลกระทบของพื้นผิวต่อการส่งผ่านสัญญาณ โดยเปรียบเทียบกับ การส่งผ่านสัญญาณในอวกาศว่าง ทั้งนี้สมมติให้การส่งผ่านสัญญาณนี้เกิดขึ้นในบริเวณที่มีพื้นผิวที่ราบเรียบไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ หรือเนินเขาในบริเวณนั้นเลย ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จะประกอบด้วยสัญญาณเพียง 2 ส่วน คือ ส่วนที่แพร่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยตรงและส่วนที่สะท้อนจากพื้นผิวดังที่แสดงไว้ในรูป 2.13 ซึ่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างจากในกรณีของการส่งสัญญาณในอวกาศว่างที่ได้รับสัญญาณเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งสัญญาณจากส่วนสะท้อนกับพื้นผิว



รูปที่ 2.13 ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนกับพื้นผิวเรียบต่อสัญญาณที่รับได้

### 2.6.3 ผลกระทบของการบดบังสัญญาณ (Shadowing)

การลดทอนของสัญญาณเนื่องจาก path loss ที่ได้อธิบายไว้เป็นการคำนวณหาค่าของสัญญาณที่คาดว่าจะได้รับตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่า ณ ตำแหน่งที่ห่างจากภาคส่งสัญญาณเท่าๆ กัน ก็จะได้รับสัญญาณที่มีกำลังเท่ากันด้วย แต่ในทางปฏิบัติสัญญาณที่รับได้ในแต่ละบริเวณอาจจะมีกำลังที่ไม่เท่ากันก็ได้ ถึงแม้ว่าจะอยู่ห่างจากสถานีส่งเท่ากัน ทั้งนี้เพราะกำลังของสัญญาณที่รับได้นั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในบริเวณที่สัญญาณส่งผ่านด้วย ดังนั้นในสภาพความเป็นจริง สัญญาณเหล่านี้จะมีการกระเพื่อมขึ้นและลงอยู่บนค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จาก path loss ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในลักษณะนี้ เราพบว่าสามารถจำลองได้ด้วยการใช้ตัวแปรแรนดอมที่มีการแจกแจงแบบ log-normal distribution

### 2.6.4 ปัญหาการจางหายของสัญญาณต่อคลื่นหลายวิถี (Multipath Fading)

การสะท้อนของคลื่นสัญญาณกับพื้นผิว หรือสิ่งต่างๆ รอบข้าง ส่งผลให้สัญญาณที่รับได้ประกอบด้วย สัญญาณที่แพร่มามากกว่าหนึ่งทิศทาง และโดยทั่วไปแล้วสัญญาณเหล่านี้มักจะเดินทางมาถึงภาครับด้วยเวลาที่แตกต่างกัน และมีขนาดที่แตกต่างกันด้วย เมื่อสัญญาณเหล่านี้มารวมเข้าด้วยกัน จะได้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดแปรเปลี่ยนได้อย่างมาก ปัญหานี้มีชื่อเรียกว่า “มัลติพาทเฟดดิ้ง” (Multipath Fading) ซึ่งโดยทั่วไปลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในสภาวะดังกล่าวสามารถจำลองได้ด้วยตัวแปรแรนดอมที่มีการกระจายแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution)

## 2.7 โปรไฟล์การหน่วงกำลัง (Power Delay Profile)

เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของช่องสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง และทำการพัฒนาเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบระบบสื่อสารไร้สาย โดยใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาโปรไฟล์การหน่วงกำลังประกอบด้วย การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay), การแผ่การหน่วงrms (rms delay spread) และการแผ่การหน่วงเฉลี่ย(excess delay spread)

โดยค่าการหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย ( $\bar{\tau}$ ) หาได้จาก

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (2.8)$$

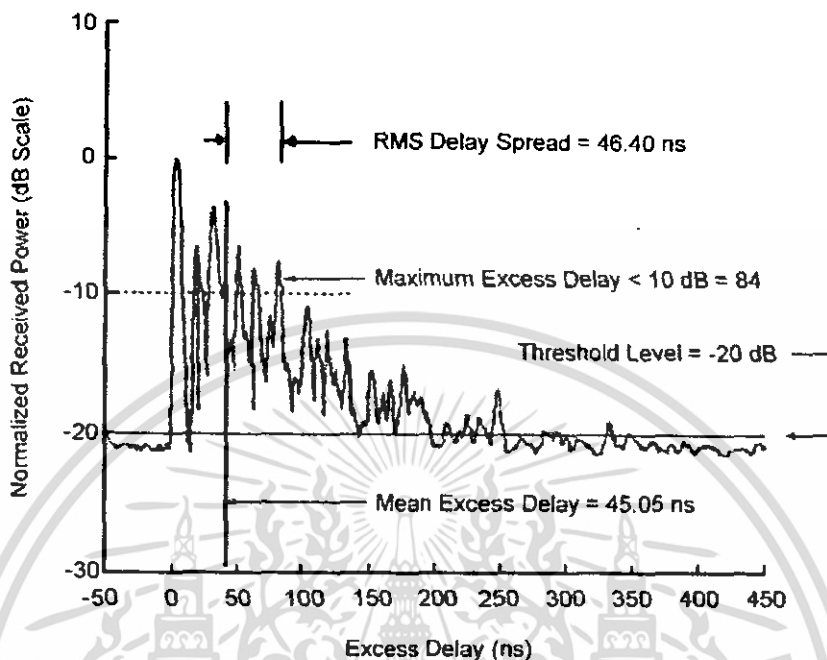
และค่าการแผ่การหน่วง rms หาได้จาก

$$\sigma_\tau = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (2.9)$$

โดยที่

$$\tau^2 = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการหน่วงกำลังของคลื่นภายในอาคาร

## 2.8 ทฤษฎีทางสถิติและความน่าจะเป็น

สัญญาณที่เราไม่สามารถรู้ค่าได้แน่นอน หรือ ไม่สามารถรู้ค่าล่วงหน้าได้ สัญญาณประเภทนี้จะเกิดขึ้นในระบบสื่อสารทั้งในลักษณะที่เป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการ คือเป็นสัญญาณรบกวน และเป็นสัญญาณที่ต้องการคือมีข่าวสารอยู่ เนื่องจากสัญญาณแรงคินเป็นสัญญาณที่เราไม่สามารถรู้การเปลี่ยนแปลงที่แน่นอนได้ การจัดการกับสัญญาณประเภทนี้จึงต้องใช้หลักการทางสถิติเข้ามาช่วย ประมาณคุณสมบัติของสัญญาณ โดยหาค่าเฉลี่ย ความแปรปรวน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ฟังก์ชันความหนาแน่น และการแจกแจงความน่าจะเป็น เพื่อทำแบบจำลองทางสถิติ

### 2.8.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF)

กำหนดให้ความน่าจะเป็น  $P\{X \leq x\}$  เป็นความน่าจะเป็นของเหตุการณ์  $\{X \leq x\}$  และจะกำหนดให้  $f_x(x)$  เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ซึ่งนิยามเป็น

$$f_x(x) = \frac{d}{dx} P\{X \leq x\} \tag{2.11}$$

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ

$$1. f_x(x) \geq 0$$

$$2. \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) dx = 1$$

$$3. F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(\xi) d\xi$$

$$4. P\{x_1 \leq X \leq x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} f_x(x) dx$$

### 2.8.2 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Cumulative Distribution Function: CDF)

กำหนดให้ ความน่าจะเป็น  $P\{X \leq x\}$  เป็นความน่าจะเป็นของเหตุการณ์  $\{X \leq x\}$  และจะกำหนดให้  $F_x(x)$  เป็นฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น ซึ่งนิยามเป็น

$$F_x(x) = P\{X \leq x\} \quad (2.12)$$

ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ

$$1. F_x(-\infty) = 0$$

$$2. F_x(\infty) = 1$$

$$3. 0 \leq F_x(x) \leq 1$$

$$4. F_x(x_1) \leq F_x(x_2) \text{ เมื่อ } x_1 < x_2$$

$$5. P\{x_1 < x \leq x_2\} = F_x(x_2) - F_x(x_1)$$

$$6. F_x(x^+) = F_x(x)$$

## 2.9 ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Correlation function)

### 2.9.1 สหสัมพันธ์อัตโนมัติ (Autocorrelation)

นิยามให้  $R_f(\tau)$  เป็น Autocorrelation ของ  $f(t)$  และ  $S_f(f)$  คือ Power spectrum Diversity เมื่อ

$$R_f(\tau) = F^{-1}\{S_f(f)\} \quad (2.13)$$

$$R_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^*(t) f(t + \tau) dt \quad (2.14)$$

### 2.9.2 สหสัมพันธ์ข้าม (Cross correlation)

นิยามให้  $R_{fg}(\tau)$  เป็น Cross - Correlation ระหว่าง  $f(t)$  กับ  $g(t)$  เมื่อ

$$R_{fg}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^*(t) g(t + \tau) dt \quad (2.15)$$

### 2.9.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)

$C$  เป็น Correlation Coefficient ระหว่าง  $f(t)$  กับ  $g(t)$  เมื่อ

$$C = \frac{\max |r_{fg}(\tau)|}{\sqrt{\max |r_f(\tau)| \cdot \max |r_g(\tau)|}} = \frac{\max |r_{fg}(\tau)|}{\sqrt{E_f \cdot E_g}} \quad (2.16)$$

## 2.10 Linear Least Squares

แบบจำลองการถอยหลังแบบเป็นเชิงเส้น คือ

$$y = a + bx \pm e \quad (2.17)$$

โดยมีค่า

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

ผลรวมของค่าผิดพลาด

$$q = \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j)^2 \quad (2.18)$$

เงื่อนไขของผลรวมค่าผิดพลาดที่มีค่าต่ำสุดคือ

$$\frac{\partial q}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j)^2 = -2 \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j) = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial q}{\partial b} = \frac{\partial}{\partial b} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j)^2 = -2 \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j)x_j = 0 \quad (2.20)$$

สมการทั่วไปคือ

$$r, \theta, \phi \quad (2.21)$$

$$a \sum_{j=1}^n x_j + b \sum_{j=1}^n x_j^2 = \sum_{j=1}^n x_j y_j \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า root mean square error คือ

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j)^2} \quad (2.23)$$

## 2.11 สรุปลการสื่อสารแบบ Ultra - Wideband

การสื่อสารแบบความถี่กว้างยิ่ง เป็นระบบการสื่อสารที่ได้รับความนิยมที่จะใช้ในระบบการสื่อสารที่ต้องการอัตราเร็วส่งข้อมูลที่สูง เนื่องจากระบบการสื่อสารประเภทนี้ใช้แบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลที่มีขนาดที่กว้างมาก และทำให้สามารถรองรับผู้ใช้ได้เป็นจำนวนมาก โดยระบบการสื่อสารประเภทนี้จะไม่มีการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณพาห์ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้เครื่องส่งกำลังสูง ซึ่งส่งผลทำให้เครื่องส่งและเครื่องรับในระบบการสื่อสารนี้ใช้ต้นทุนที่ต่ำ สัญญาณที่ใช้ในการส่งในระบบการสื่อสารประเภทนี้จะใช้สัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สัญญาณที่สั้นมาก ในการส่งข้อมูล ในส่วนของการมอดูเลตสัญญาณในระบบการสื่อสารนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ การมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามขนาด การมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามตำแหน่ง และการมอดูเลตแบบสองเฟส จากการที่ระบบการสื่อสารนี้สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง ดังนั้นระบบการสื่อสารประเภทนี้จึงถูกนำเสนอให้ใช้ในระบบเครือข่ายส่วนบุคคลไร้สาย ระบบเครือข่ายเฉพาะที่แบบไร้สาย และระบบการสื่อสารแบบมัลติมีเดีย เป็นต้น

### 2.11.1 ข้อดีของระบบ Ultra wideband (UWB)

- มีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของสัญญาณมากกว่าเทคนิคอื่น ๆ เช่น Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) ด้วยแบนด์วิดท์ที่กว้างนี้รวมกับความหนาแน่นของสเปกตรัมของกำลังที่มีค่าน้อย ทำให้ Ultra Wideband สามารถใช้ความถี่ร่วมกับระบบอื่น ๆ ที่อยู่ในช่วงเดียวกันได้
- การรบกวนจากภายในระบบเองมีค่าน้อยมาก ทำให้สามารถนำระบบที่ใช้ Ultra Wideband จำนวนมากมาใช้ร่วมกันได้ในบริเวณที่กำหนด
- จากการ ใช้พัลส์ที่มีช่วงแคบทำให้ Ultra Wideband ไม่ได้รับผลจาก Multipath มากนัก พัลส์ที่สะท้อนกลับนั้นจะไม่เกิดการซ้อนทับกันจึงไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน
- สามารถให้ข้อมูลข่าวสารในด้านระยะทางที่มีความถูกต้องสูง (น้อยกว่า 1 เซนติเมตร) ทำให้สามารถบอกตำแหน่งได้โดยใช้ตัวส่งหลายตัวมาทำงานพร้อมกัน หรือแม้แต่การค้นหาคำแหน่งที่ต้องการซึ่งสามารถทำได้โดยใช้สายอากาศคู่กันหลาย ๆ อัน

### 2.11.2 แอปพลิเคชันต่าง ๆ ที่นำเทคโนโลยี Ultra Wideband มาประยุกต์ใช้

เทคโนโลยี Ultra Wideband ( UWB ) คือเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระยะใกล้ที่ใช้แถบความถี่ในช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และมีอัตราการส่งข้อมูลมากที่สุดเท่ากับ 110 Mb/s ภายในรัศมี 10 M และ 200 Mb/s ภายในรัศมี 4 M จะเห็นได้ว่า Ultra Wideband สามารถให้อัตราการส่งข้อมูลสูงกว่าเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นอย่างมาก และในการใช้งานจริงเราสามารถนำ Ultra Wideband มาประยุกต์ใช้งานได้ 2 โหมด เมื่อเราแบ่งตามอัตราการส่งข้อมูลคือ โหมดอัตราการส่งข้อมูลสูง ( High Data Rate : HDR ) หมายถึง มีอัตราการส่งข้อมูลเกินกว่า 100 Mb/s ในระยะใกล้ อีกโหนดหนึ่งคือ โหมดอัตราการส่งข้อมูลต่ำและค้นจากตำแหน่ง ( Low Data Rate and Location Tracking : LDR/LT ) หมายถึง มีอัตราการส่งข้อมูลลดลงเพื่อเริ่มระยะการสื่อสารไร้สาย สามารถรับบอกตำแหน่งของอุปกรณ์ได้อย่างแม่นยำเพื่อให้ผู้อ่านได้เห็นภาพว่าในอนาคตเราสามารถนำเทคโนโลยี Ultra Wideband มาประยุกต์ใช้งานเป็นแอปพลิเคชันต่าง ๆ ได้อย่างไรบ้าง แอปพลิเคชันที่ใช้ในอุตสาหกรรมและการบริการ มีดังนี้ คือ

-โครงข่ายส่วนบุคคลไร้สายความเร็วสูง (High-Data-Rate-Wireless Personal Area Network: HOR-WPAN) คือ โครงข่ายที่มีความหนาแน่นของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายปานกลาง (5-10 ชั้น/ห้อง) มีอัตราการส่งข้อมูลที่ความเร็ว 100-150 Mb/s ภายในระยะ 1 ถึง 10 M โทโปโลยีหลักที่ใช้ในการสื่อสารเป็นแบบ Peer-to-Peer และใช้ Relay/Bridge ในการเชื่อมโยงกับโครงข่ายภายนอกซึ่งจะเป็นแบบไร้สายหรือใช้สายเคเบิลก็ได้

#### -การเชื่อมโยงอีเทอร์เน็ตไร้สาย (Wireless Ethernet Interface Link: WEIL)

เป็นการขยายแนวคิดเพิ่มเติมจากการส่งสัญญาณที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง (HDR) ให้สูงยิ่งขึ้นไปอีก ( 1Gb/s, 2.5Gb/s ) ซึ่งการเชื่อมโยงไร้สายแบบนี้จะสามารถทำได้ภายในระยะสั้นมาก หรือภายในรัศมี 1-2 M โดยที่ WEIL เกิดขึ้นได้มาจากความต้องการของบริษัทผู้ผลิตเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต้องการให้เชื่อมโยงโครงข่ายอีเทอร์เน็ตที่ใช้สายเคเบิล เปลี่ยนไปใช้แบบไร้สายแทน และจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ต้องการให้การส่งสัญญาณวีดีโอแบบไร้สายระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับฉาก LCD มีคุณภาพสูง ( Wireless Digital Video Interface )

-โครงข่ายไร้สายอัจฉริยะ(Intelligent Wireless Area Network: IWAN) คือ โครงข่ายที่มีความหนาแน่นของอุปกรณ์สื่อสาร ไร้สายสูง ที่อยู่เป็นพื้นที่ภายในหรือพื้นที่สำนักงานทั่วไปภายในระยะ 30 M

-โครงข่ายภายนอกแบบเพียร์ทูเพียร์ (Outdoor Peer-to-Peer Network: OPPN) เป็นโครงข่ายสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร UWB ที่อยู่บริเวณภายนอก เป็นไปตามความต้องการของตลาดการให้บริการที่จะเกิดขึ้นใหม่ สำหรับ เครื่อง PDA ที่จะส่งข้อมูลหรือแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันและอย่างร้านให้บริการข้อมูลดิจิทัล ความเร็วสูง สำหรับควาน์โพลด์ข้อความ, หนังสือพิมพ์, รูปภาพ, ให้บริการเช่าม้วนเทป วิดีโอ, วีซีดี, ดีวีดี อัดโนมิตี เป็นต้น

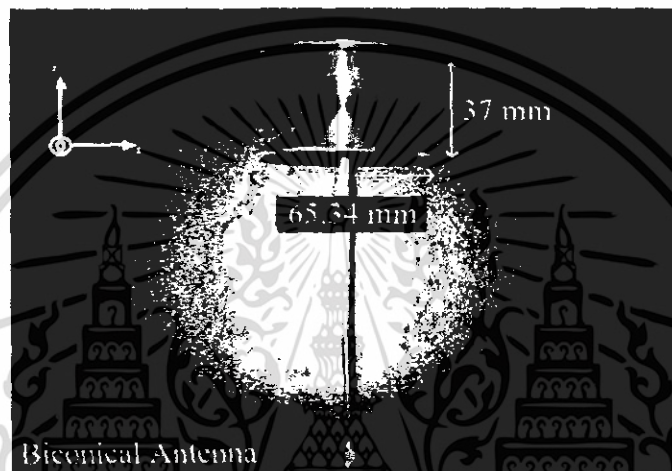
-โครงข่ายเซ็นเซอร์ การหาตำแหน่งและการพิสูจน์อุปกรณ์ (Sensor, Positioning, And Identification Network: SPIN) เป็นโครงข่ายของอุปกรณ์สื่อสาร ไร้สาย เช่น เซ็นเซอร์ที่มีความหนาแน่นสูง (หลายร้อยชิ้นต่ออาคาร 1 ชั้น) ที่อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม หรือ โรงเก็บสินค้า มีอัตราการส่งข้อมูลที่ความเร็วต่ำ (อยู่ประมาณช่วงหลายสิบลบ kb/s) และสามารถส่งสัญญาณข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของตัวอุปกรณ์เพื่อให้หาตำแหน่งได้ด้วย (มีความแม่นยำในการบอกตำแหน่งผิดพลาดไม่เกิน 1 M) โทโปโลยีของโครงข่ายระยะในการส่งสัญญาณไม่เกิน 100 M ระหว่างอุปกรณ์กับสถานีแม่ข่ายเป็นแบบ Master-slave)

-โครงข่าย SPIN มีความต้องการเชื่อมโยงสัญญาณที่มีความน่าเชื่อถือสูง (High Reliability) และคุณลักษณะของระบบที่ปรับเปลี่ยนตัวเอง ให้เหมาะสมเพื่อรองรับกับการเปลี่ยนแปลงแบบพลวัต ( Dynamic ) ของเครื่องอุปกรณ์ และเรื่องสัญญาณรบกวนการแพร่กระจายสัญญาณ โครงข่ายที่ 1 ถึง 3 เป็นโครงข่ายที่อุปกรณ์ Ultra Wideband อยู่ในบริเวณที่อยู่อาศัยหรือตามสำนักงานข้อมูลส่วนใหญ่ที่ใช้ส่งผ่านแบบไร้สาย จะเป็นสัญญาณวีดีโอเพื่อความบันเทิง,สัญญาณที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ ที่ใช้ในโหมด HDR โครงข่ายที่ 4 เป็นโครงข่ายสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้งานอยู่บริเวณภายนอกมีลักษณะแบบเพียร์ทูเพียร์ และ โครงข่ายที่ 5 เป็นโครงข่ายที่อยู่ในอุตสาหกรรมและการพาณิชย์

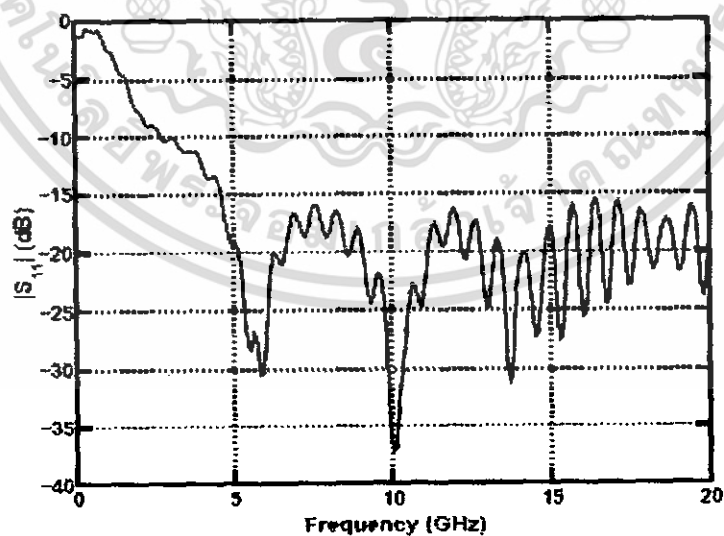
ในการพัฒนาและวิจัยที่จะมีต่อไปในอนาคตเรื่องการที่จะให้โครงข่ายต่าง ๆนี้รวมทั้งโครงข่ายสื่อสารไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบัน สามารถนำมาร่วมกันทำงานได้ (Integration) เพื่อให้เป็น Heterogeneous Networking

## 2.12 ทฤษฎีของสายอากาศแบบกรวยคู่

สายอากาศแบบกรวยคู่หรือที่รู้จักกันที่เรียกว่า สายอากาศแบบไบโคนิกอน เป็นสายอากาศที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว ลักษณะของเฟสจะเป็นแบบ Linear phase และเหมาะสำหรับใช้กับรูปคลื่นสัญญาณแบบพัลส์ โดยที่กรวยด้านบนของสายอากาศต่อกับสายสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ ขณะที่กรวยด้านล่างต่อกับกราวด์

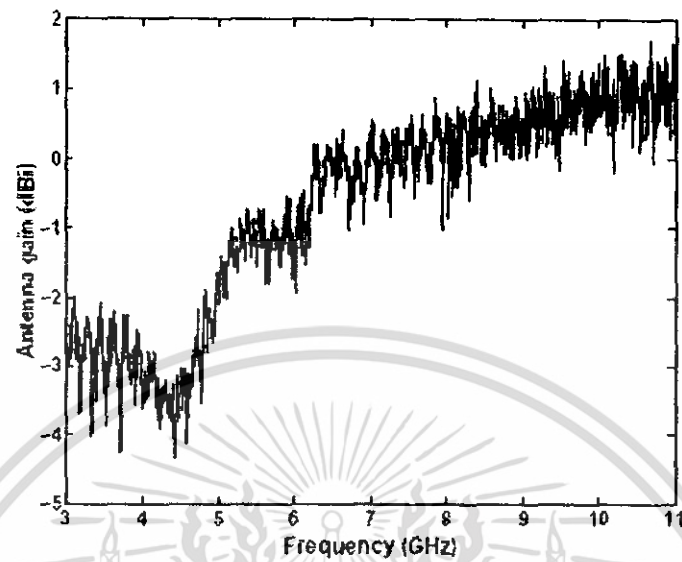


รูปที่ 2.15 สายอากาศแบบกรวยคู่

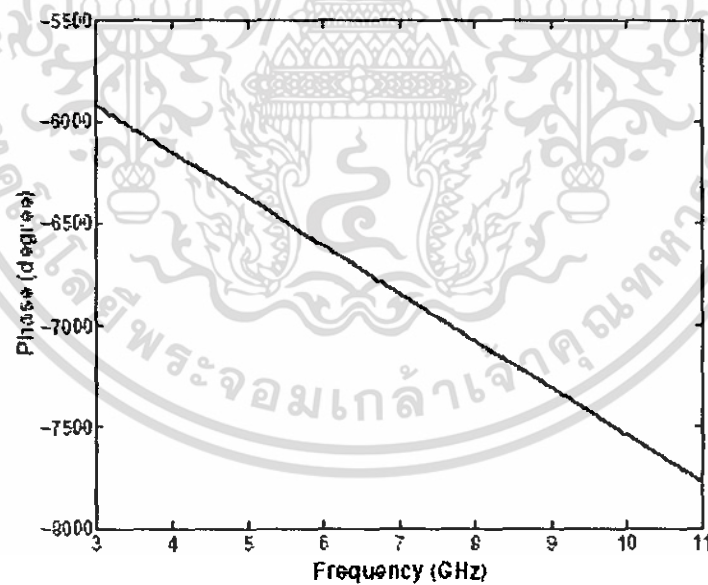


รูปที่ 2.16 คุณสมบัติของสายอากาศแบบกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 อัตราการส่งผ่านความถี่ของสายอากาศแบบกรวยคู่



รูปที่ 2.18 เฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านความถี่ของสายอากาศแบบกรวยคู่

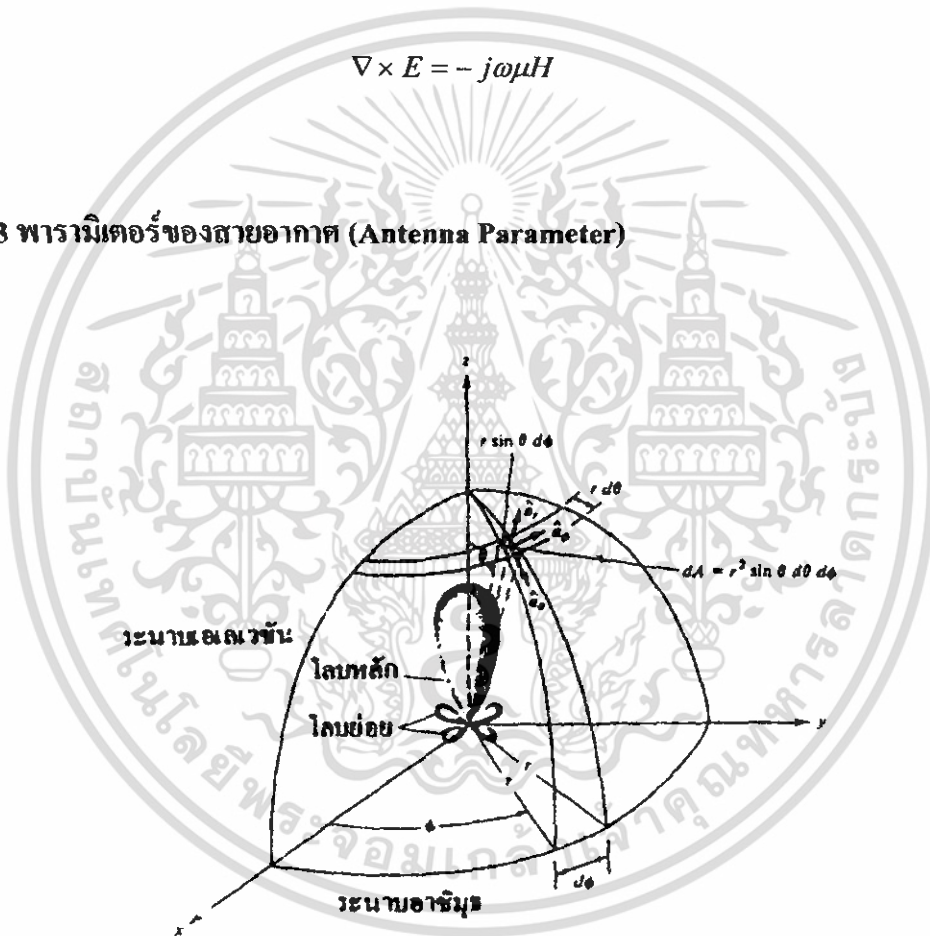
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.12.1 สนามการแพร่กระจายคลื่น

สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยการหาค่าการแพร่กระจายคลื่นไฟฟ้า (E) และการแพร่กระจายคลื่นไฟฟ้า (H) ระหว่างวัตถุทรงกรวยซึ่งอยู่ในสภาวะกระตุ้นแบบโหมด TEM โดยที่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มีการแพร่แบบเส้นตรงโดยทิศทางตัดขวางกัน ถ้ากำหนดจุดหลาย ๆ จุด  $(r, \theta, \phi)$  ค่าแรงดันและกระแสที่อยู่ในจุดต่าง ๆ บนพื้นผิวทรงกรวย  $(r, \theta = \theta_c, \phi)$  จากกฎของฟาราเดย์เราสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (2.24)$$

### 2.13 พารามิเตอร์ของสายอากาศ (Antenna Parameter)



รูปที่ 2.19 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

#### 2.13.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

การแพร่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะ

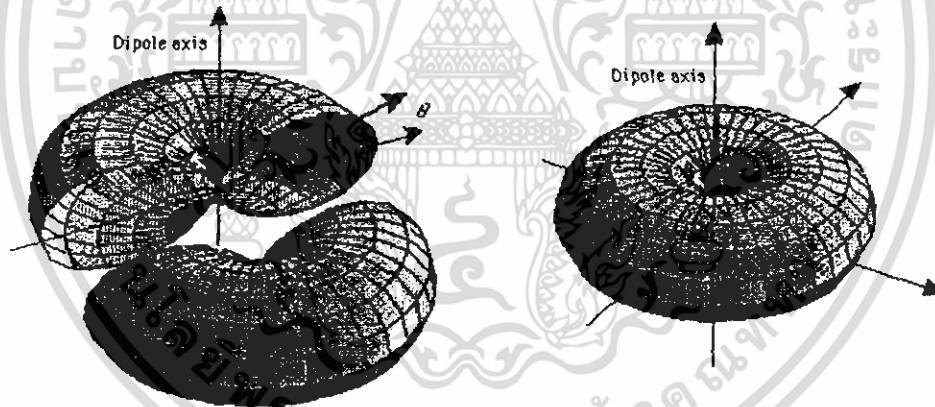
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field) ในที่นี้จะอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือโพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแฉงรูปของพลังงาน เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

### 2.13.2 แพทเทอร์นแบบไอโซโทรปิก ไครเรชันแนล และออมนิไดเรชันแนล

ตัวแพร่คลื่น ไอโซโทรปิก (Isotropic Radiator) คือ สายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น พอยท์ซอร์ส (Point Source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวแทนเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าว คือ สายอากาศแบบออมนิไดเรชันแนล (Omni directional Antenna)



รูปที่ 2.20 แพทเทอร์นแบบออมนิไดเรชันแนล (omni-directional)

### 2.13.3 แพทเทอร์นหลัก

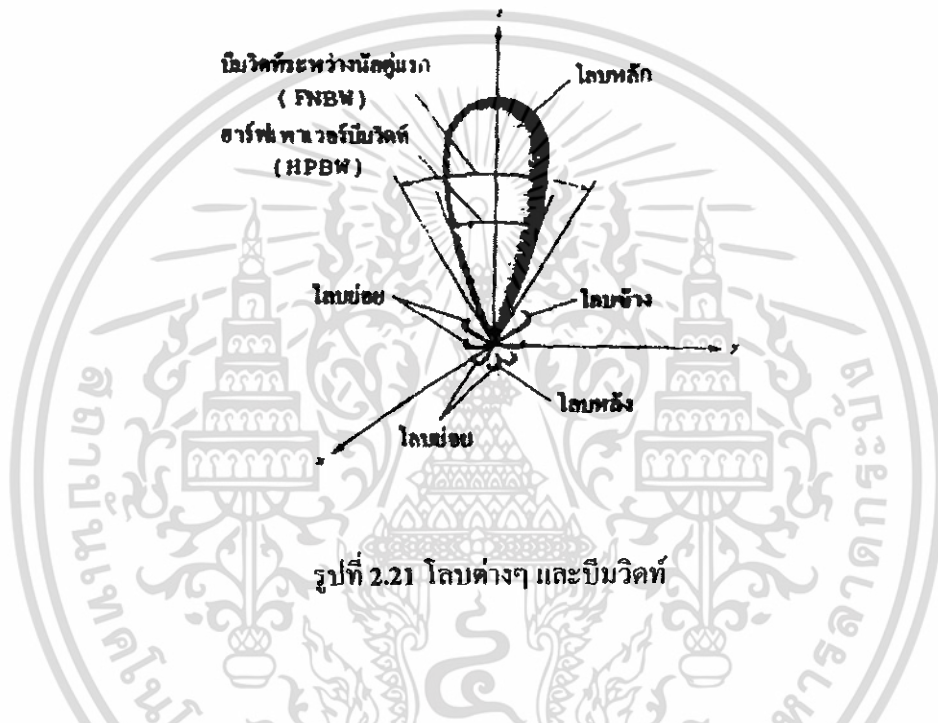
ทุกคนมักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแพทเทอร์นหลัก (Principal Pattern) ของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศลิเนียร์โพลาไรเซชัน (Linearly Polarization) แพทเทอร์นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

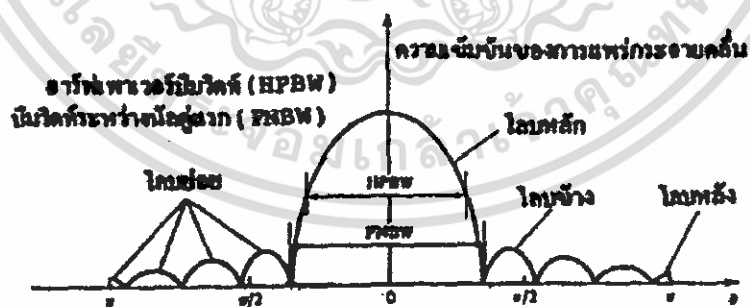
และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแพทเทิร์นในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรง

#### 2.13.4 โลบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

โอบของการแพร่กระจายคลื่น เป็นรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการรูปของโอบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 โอบต่างๆ และบีม วิต



รูปที่ 2.22 สเปกตรัมในแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.13.5 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้ คือ กำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $U$  = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)

$W_{rad}$  = ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น ( $W / m^2$ )

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ถ้าเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} \left[ |E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.26)$$

เมื่อ  $E_\theta, E_\phi$  = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$\eta$  = อินทรินสิคอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึง ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกัน กำลังงานทั้งหมดนี้ หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นตามสมการดังนี้ได้กล่าวมาแล้วนั้น ตลอดมุมตัน  $4\pi$  ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.27)$$

### 2.13.6 บริเวณต่าง ๆ ของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศ

โดยทั่ว ๆ ไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ ( Reactive – Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating – Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field)

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด มีสนามเป็นชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง  $R < 0.62 D^2 / \lambda$  จากผิวของสายอากาศเมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น และ  $D$  เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่และการกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้น แปรผันตามระยะทางจากสายอากาศเมื่อสายอากาศมีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง

$$0.62 \sqrt{D^3 / \lambda} \leq R \leq 2D^2 / \lambda \quad (2.28)$$

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ  $D$  บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง  $R$  มากกว่า  $2D^2 / \lambda$  จากสายอากาศ ในบริเวณนี้สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า  $R$  เท่ากับ  $2D^2 / \lambda$  และขอบนอกเป็นอนันต์

## บทที่ 3

### การวัดและแบบจำลอง

#### 3.1 สาเหตุและที่มา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่จะอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้ใช้งานได้มากขึ้น และเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยังเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่สำคัญและน่าจะนำมาทำการศึกษา โครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาและทดสอบการกระจายของสัญญาณในการส่งผ่านแบบแถบความถี่กว้าง ในกรณีที่สายอากาศตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวตั้งและในกรณีที่สายอากาศตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวนอน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงและผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อรูปสัญญาณ เพื่อนำไปอ้างอิงในการออกแบบใช้งานจริงให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

โดยในการออกแบบแบบจำลองนั้น ได้พยายามที่จะออกแบบแบบจำลองที่จะสามารถอธิบายการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากผนังอาคาร ซึ่งในการนี้จึงได้สร้างผนังอิฐขึ้นมาเพื่อใช้เป็นแบบจำลอง ทั้งนี้ในการสร้างแบบจำลองได้พิจารณาในส่วนของทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ร่วมด้วยทฤษฎีของแถบความถี่กว้างเป็นสิ่งสำคัญ

#### 3.2 พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ

##### 3.2.1 Friis' Transmission Formula

เป็นสมการเพื่อใช้หาฟังก์ชันการส่งผ่านความถี่ในอากาศว่าง (Free space) ในการหารูปแบบของสัญญาณการส่งผ่านได้พิจารณาจากฟังก์ชันการส่งผ่าน  $H_{Friis}$

$$H_{Friis}(f, d) = \frac{V_r(f)}{V_t(f, d)} = H_f(f, d)H_r(f)H_t(f) \quad (3.1)$$

โดยที่

$H_f$  คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านความถี่ในอากาศว่าง

$H_r$  คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศทางด้านรับ

$H_t$  คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศทางด้านส่ง

$V_r$  คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณทางด้านรับ

$V_t$  คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณทางด้านส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$f$  คือ ความถี่  
 $d$  คือ ระยะห่างระหว่างด้านส่งและด้านรับ

สมการ Transfer function ใน Free space สามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_f(f, d) = \frac{c}{4\pi d f} e^{-j2\pi f d / c} \quad (3.2)$$

รูปแบบสัญญาณทางด้านรับ  $v_r(t, d)$  หาได้จากสมการ

$$v_r(t, d) = v_t(t) \otimes h_{Friis}(t, d) \quad (3.3)$$

โดยที่

$v_t(t)$  คือ รูปแบบสัญญาณทางด้านส่ง

$\otimes$  คือ คอนโวลูชัน

$h_{Friis}(t, d)$  คือ Impulse response of the extension of Friis' formula หาได้จาก

$$h_{Friis}(t, d) = F^{-1}\{H_{Friis}(f, d)\} \quad (3.4)$$

### 3.2.2 การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss)

เป็นการลดทอนของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับสัญญาณ โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังของคลื่นสัญญาณจะลดลงตามค่า  $d^n$  โดย  $d$  คือระยะทางระหว่างภาครับและภาคส่ง ส่วน  $n$  เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งมีขนาดแตกต่างกันไปตามสภาพของบริเวณที่สัญญาณส่งผ่าน ซึ่งสามารถนิยามได้ตามสมการดังนี้

$$PL_{LWB}(d)[dB] = 20 \log \left[ \frac{\max|v_r(t)|}{\max|v_t(t, d)|} \right] \quad (3.5)$$

โดยที่

$v_s(t)$  คือ ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณทางค้ำส่ง

$v_r(t, d)$  คือ ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณทางด้านรับ

### 3.3 แบบจำลองการวัดการกระจัดกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โครงการนี้เป็นารวัดและวิเคราะห์การกระจัดกระจายของสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง โดยใช้เครื่อง Vector Network Analyzers (VNA) ทำการวัดในแถบความถี่ 3 GHz ถึง 11GHz ความสูงของสายอากาศทางด้านรับและค้ำส่งกำหนดไว้ที่ 1.65 เมตร สายอากาศที่ใช้เป็นแบบกรวยคู่ (Biconical Antenna) ทั้งค้ำส่งและค้ำรับ

การวัดได้ทำในห้อง 1001 บนชั้น 10 ของอาคาร E-12 คณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยให้สายอากาศค้ำส่งและสายอากาศค้ำรับเคลื่อนที่ภายในระยะทาง 4 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 โดยทำการวัดใน 2 แบบจำลอง คือ

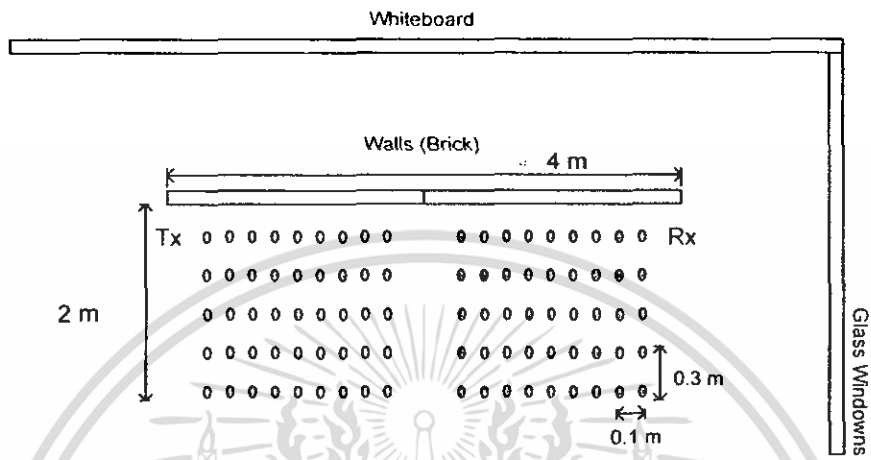
- สายอากาศค้ำส่งและค้ำรับมีการ โพลาริซแนตตั้ง (Vertical Polarization)
- สายอากาศค้ำส่งและค้ำรับมีการ โพลาริซแนตนอน (Horizontal Polarization)

ในส่วนองแบบจำลองที่ 3 นั้นได้ทำการวัดบริเวณสถานเอนกประสงค์ บนชั้น 12 ของอาคาร E-12 คณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยแบบจำลองมีลักษณะดังนี้คือ

- สายอากาศค้ำส่งและค้ำรับตั้งอยู่ในแนวนอนแต่ทำมุมกับผนังอิฐด้วยมุมต่างๆ คือ 30, 45 และ 60 ตามลำดับ โดยรูปของแบบจำลองนี้ได้แสดงดังรูปที่ 3.3

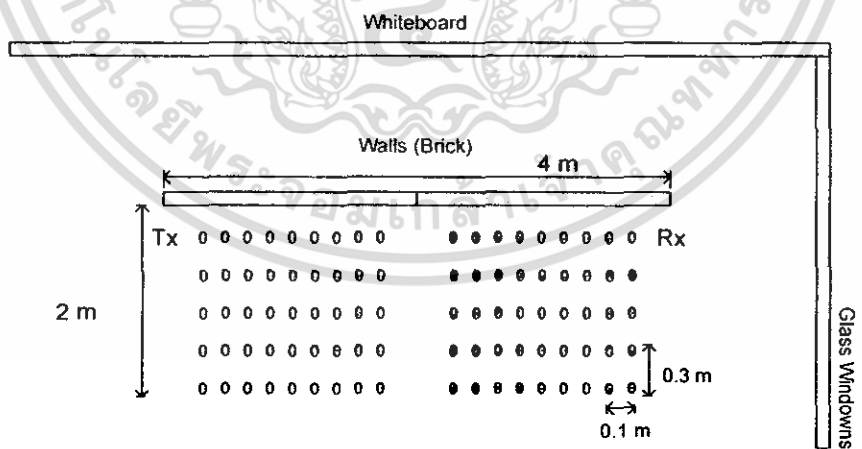
ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะนำมาทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Matlab และนำเสนอในรูปแบบของค่าแมกนิจูด (magnitude), ค่าการสูญเสียเชิงวิถี (path loss) และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ในย่านแถบความถี่กว้างยิ่ง โดยลักษณะการวางสายอากาศในแบบจำลองต่างๆ จะเป็นไปตามรูปดังนี้

3.3.1 สายอากาศด้านส่งและด้านรับอยู่ในแนวตั้ง



รูปที่ 3.1 มุมมองด้านบนของตำแหน่งการวางสายอากาศด้านส่งและด้านรับในแบบจำลองที่ 1

3.3.2 สายอากาศด้านส่งและด้านรับอยู่ในแนวนอน

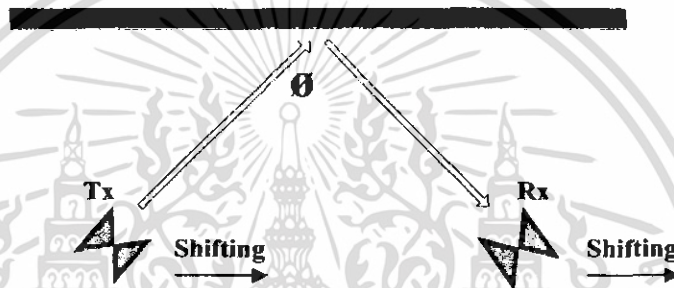


รูปที่ 3.2 มุมมองด้านบนของตำแหน่งการวางสายอากาศด้านส่งและด้านรับในแบบจำลองที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในแบบจำลองที่ 1 และ 2 แบบจำลองที่ใช้ในการวัดจะมีลักษณะที่เหมือนกันโดยต่างกันเพียงการโพลาไรซ์ของสายอากาศเท่านั้น การที่จำเป็นที่ต้องมีจุดในการวัดสัญญาณมากก็เพราะว่าต้องการข้อมูลที่มากพอที่จะใช้ในการนำไปวิเคราะห์สัญญาณ โดยอาศัยโปรแกรม Matlab ในการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้มาซึ่งผลการวิเคราะห์ที่สมบูรณ์ ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงมากที่สุดนั่นเอง

### 3.3.3 สายอากาศตัวส่งและตัวรับมีลักษณะการโพลาไรซ์แบบ Cross Polarization



รูปที่ 3.3 มุมมองด้านบนของตำแหน่งการวางสายอากาศด้านส่งและด้านรับในแบบจำลองที่ 3

ในส่วนของแบบจำลองที่ 3 นั้นมีลักษณะที่ต่างไปจากแบบจำลองอื่น ทั้งนี้เนื่องจากในแบบจำลองนี้เราต้องการทราบลักษณะของการกระจัดกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในจุดต่างๆ จะเห็นได้จากแบบจำลองว่า มีการใช้มุมต่างๆ ในการวัดสัญญาณ ทั้งนี้เนื่องจากมุมในการตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเองก็มีส่วนสำคัญที่จะทำให้สัญญาณที่รับได้นั้น มีประสิทธิภาพต่างกันไปในตัวเอง ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยเช่นกัน ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2

## 3.4 ขั้นตอนในการวัด

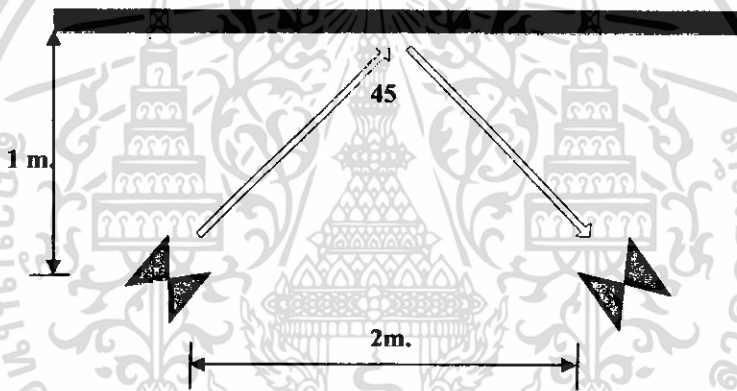
### 3.4.1 ขั้นตอนในการวัดตามแบบจำลองที่ 1 และ 2

หลังจากจัดวางแบบจำลองดังรูปที่แสดงข้างต้นแล้ว กำหนดให้ผลการตอบสนองของการวัดจากเครื่อง Vector Network Analyzer ที่ความถี่ 3GHz ถึง 11GHz โดยให้พอร์ต 1 เป็นพอร์ตด้านส่ง และพอร์ต 2 เป็นพอร์ตด้านรับ กำหนดความสูงของสายอากาศที่ 1.65 เมตร โดยให้สายอากาศมีการเคลื่อนที่ในระยะทาง 4 เมตร โดยในตอนแรกนั้นให้สายอากาศอยู่ใกล้กันจากนั้นจึงเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศให้ห่างกันออกไปเรื่อยๆ ทำเช่นเดียวกันนี้จนครบจุดในการวัด

สัญญาณ โดยในการบันทึกค่าตอบสนองที่ความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz แต่ครั้งทำด้วยเครื่อง Vector Network Analyzer ซึ่งควบคุมโดยเครื่องคอมพิวเตอร์

### 3.4.2 ขั้นตอนในการวัดตามแบบจำลองที่ 3

ทำการวัดสัญญาณคล้ายกันกับในแบบจำลองที่ 3 แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ จุดที่ใช้ในการตั้งสายอากาศนั้นจะต้องขึ้นอยู่กับมุมที่วัดสัญญาณด้วย กล่าวคือ ในการวัดการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นั้น ใช้หลักการของการการกระจาย และ สะท้อนเป็นสำคัญ โดยอาศัยหลักทฤษฎีที่ว่า “มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนกลับ” ดังนั้นถ้ามุมในการวัดเท่ากับ 45 องศา และให้ระยะห่างของสายอากาศจากกำแพง 1 เมตร ระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองก็คือ 2 เมตรนั่นเอง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะในการวัดสัญญาณตามแบบจำลองที่ 3

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

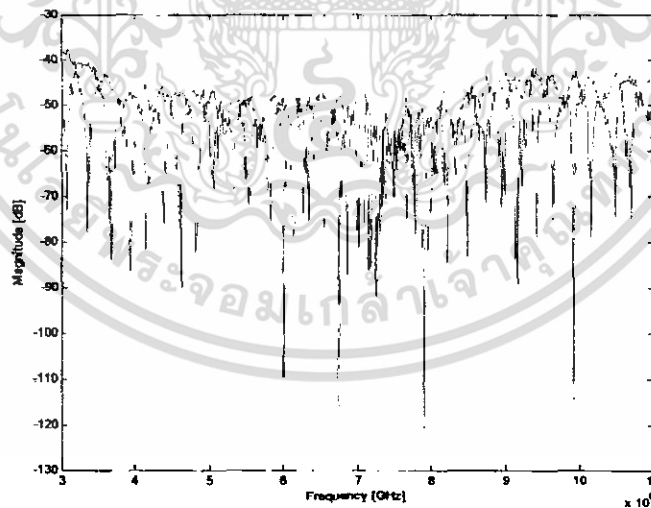
#### 4.1 การวิเคราะห์สัญญาณ

สิ่งที่ได้จากการวัดสัญญาณ คือ ค่าของฟังก์ชันการส่งผ่านความถี่ที่ 3 GHz ถึง 11 GHz ซึ่งได้นำผลนี้ไปทำการวิเคราะห์โดยประยุกต์ร่วมกับรูปสัญญาณที่ได้สร้างขึ้น ผลการวิเคราะห์จะแสดงออกมาในรูปแบบของค่าแมกนิจูด (Magnitude), ค่าการสูญเสียเชิงวิถี (path loss) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เมื่อเทียบกับระยะทาง เพื่อดูค่าการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณทางค้ำรับเมื่อเทียบกับสัญญาณทางค้ำส่ง

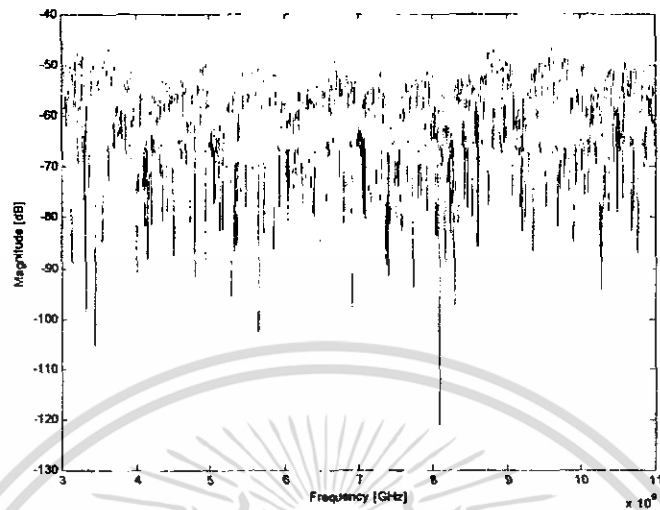
#### 4.2 ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณ

##### 4.2.1 ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณในแบบจำลองที่ 1

ในแบบจำลองที่ 1 กำหนดให้สายอากาศทั้งค้ำส่งและค้ำรับมีการโพลาไรซ์ในแนวตั้ง ผลจากการวัดและวิเคราะห์ได้แสดงตามรูปดังนี้

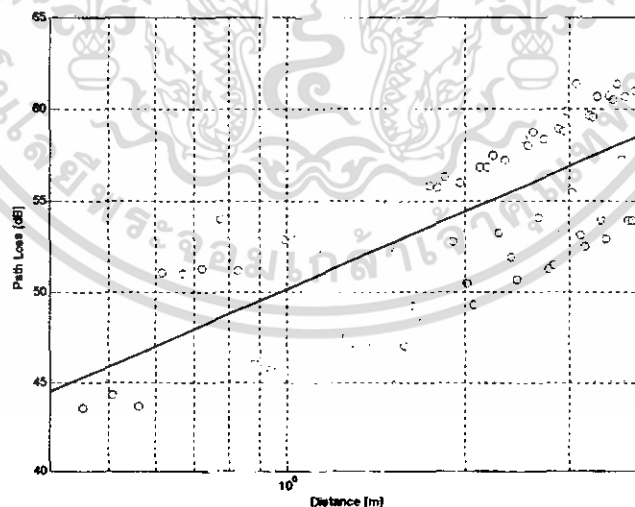


รูปที่ 4.1 ฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะทาง 0.4 เมตร



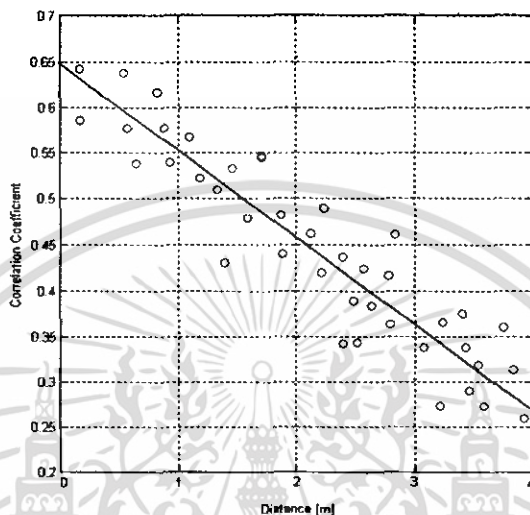
รูปที่ 4.2 ฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะทาง 4 เมตร

รูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดโดยมีค่าแมกนิจูดประมาณ -45 dB ถึง -65 dB ที่ระยะทาง 0.4 เมตร และที่ระยะทาง 4 เมตร จะมีค่าลดลงอยู่ที่ประมาณ -50 dB ถึง -75 dB ซึ่งเป็นไปตามคุณลักษณะของสายอากาศที่ใช้ในการทดลอง



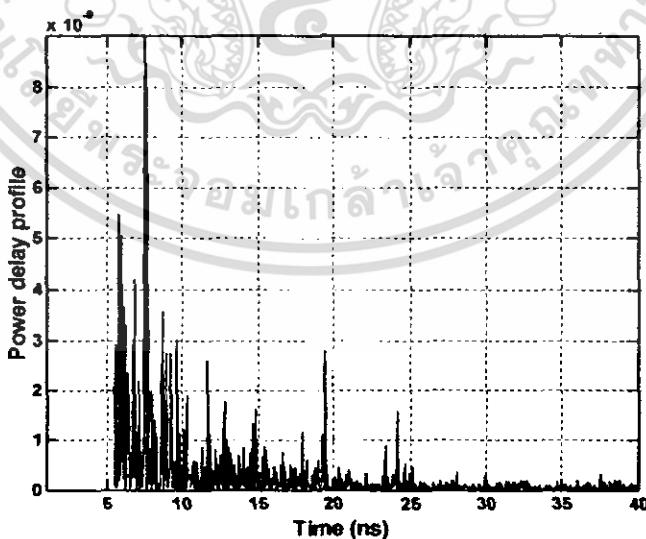
รูปที่ 4.3 ค่าการสูญเสียเชิงวิถีเมื่อเทียบกับระยะทาง

รูปที่ 4.3 แสดงค่าการสูญเสียเชิงวิถีเมื่อเทียบกับระยะทาง โดยที่ระยะทาง 0.4 เมตรจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีเท่ากับ 43 dB และมีค่าเท่ากับ 63 dB ที่ระยะทาง 4 เมตร จากรูปจะสังเกตเห็นว่าค่าการสูญเสียเชิงวิถีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อเทียบกับระยะทาง

รูปที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อเทียบกับระยะทาง โดยที่ระยะทาง 0.4 เมตรจะมีค่าประมาณ 66% และที่ระยะทาง 4 เมตร มีค่าประมาณ 25% จากรูปจะสังเกตเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น

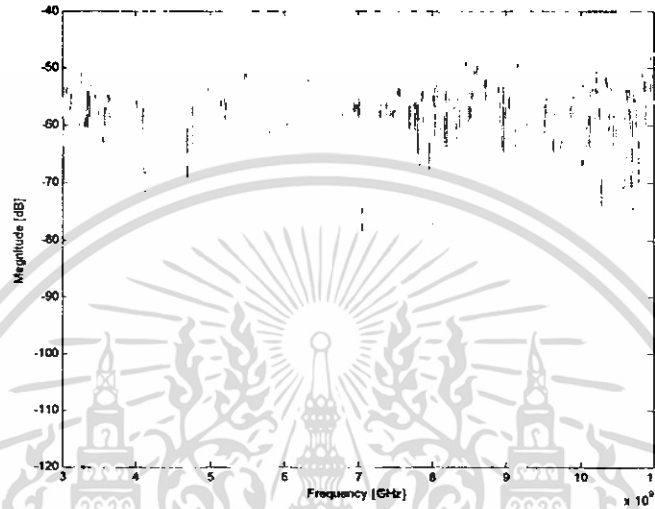


รูปที่ 4.5 ค่า power delay profile เมื่อเทียบกับเวลา

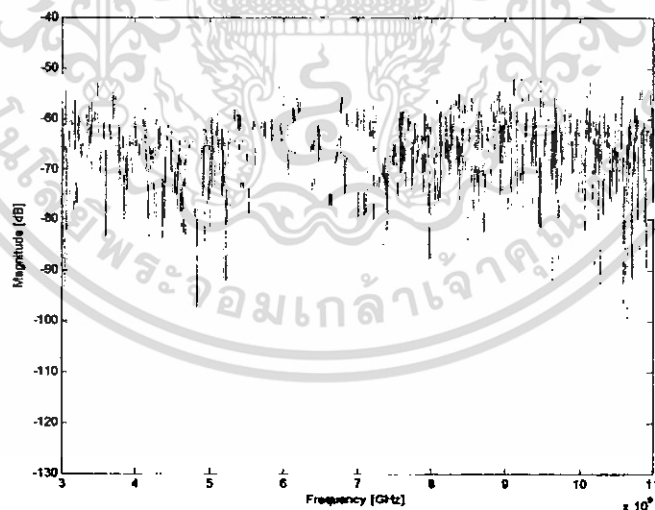
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณในแบบจำลองที่ 2

ในแบบจำลองที่ 2 กำหนดให้สายอากาศด้านส่งและด้านรับมีการโพลาไรซ์ในแนวนอน ผลจากการวัดและวิเคราะห์ที่ได้แสดงตามรูปดังนี้



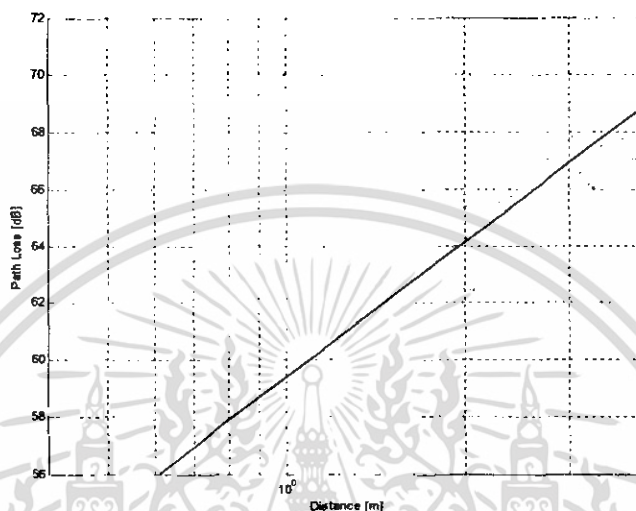
รูปที่ 4.6 ฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะ 0.4 เมตร



รูปที่ 4.7 ฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะ 4 เมตร

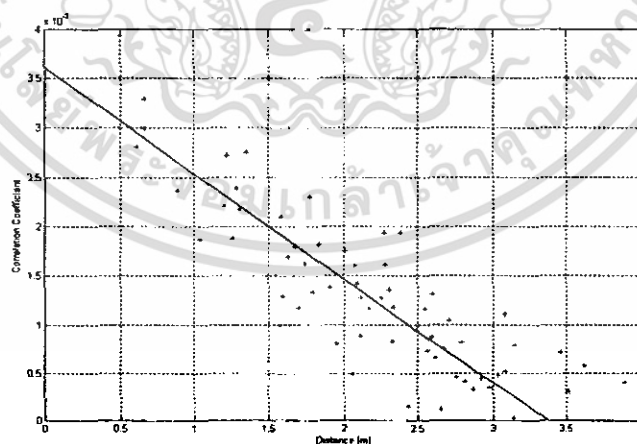
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดโดยมีค่าแมกนิจูดประมาณ -45dB ถึง -55 dB ที่ระยะทาง 0.4 เมตร และที่ระยะทาง 4 เมตร จะมีค่าลดลงอยู่ที่ประมาณ -50 dB ถึง -70 dB



รูปที่ 4.8 ค่าการสูญเสียเชิงวิถีเมื่อเทียบกับระยะทาง

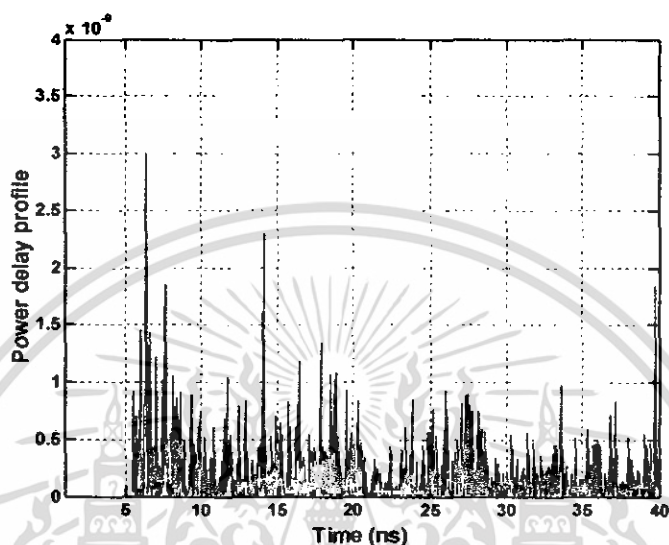
รูปที่ 4.8 แสดงค่าการสูญเสียเชิงวิถีเมื่อเทียบกับระยะทางโดยที่ระยะทาง 0.4 เมตรจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีค่าที่ต่ำสุดประมาณ 3 dB และมีค่าสูงสุดประมาณ 7 dB ที่ระยะทาง 4 เมตร



รูปที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อเทียบกับระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อเทียบกับระยะทาง โดยที่ระยะทาง 0.4 เมตร จะมีค่าประมาณ 33% และที่ระยะทาง 4 เมตร มีค่าประมาณ 3%



รูปที่ 4.10 ค่า power delay profile เมื่อเทียบกับเวลา

ตารางที่ 4.1 ผลที่ได้จากการวัดและวิเคราะห์สัญญาณในแบบจำลองต่างๆ

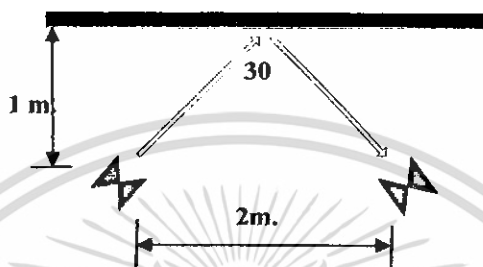
	แบบจำลองที่ 1		แบบจำลองที่ 2	
	0.4 เมตร	4 เมตร	0.4 เมตร	4 เมตร
ค่าการสูญเสียเชิงวิถี (dB)	45	55	50	70
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (%)	66	25	33	3

ตารางที่ 4.1 ผลที่ได้จากการวัดและวิเคราะห์สัญญาณในแบบจำลองต่างๆ โดยใช้ค่าเฉลี่ยจากสมการ Linear regression เพื่อให้ง่ายในการดูค่า เพราะผลที่ได้เป็นกลุ่มของข้อมูลที่มีการกระจาย

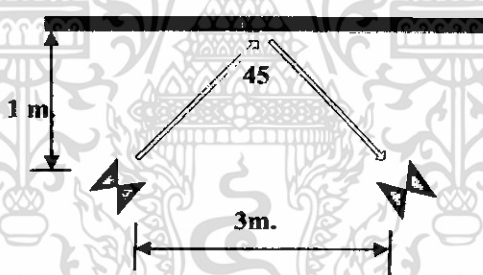
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณในแบบจำลองที่ 3

ในแบบจำลองที่ 3 สายอากาศตัวส่งและตัวรับตั้งอยู่ในแนวนอนแต่ทำมุมกับผนังอิฐด้วยมุมต่างๆ คือ 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

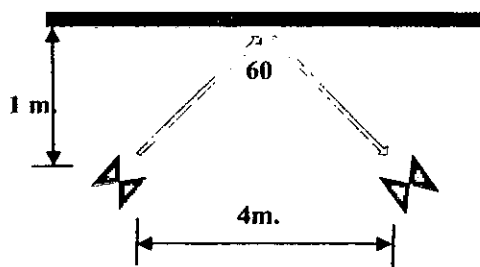


รูปที่ 4.11 แบบจำลองที่ 3 ใช้ในการวัดสัญญาณที่มุม 30 องศา

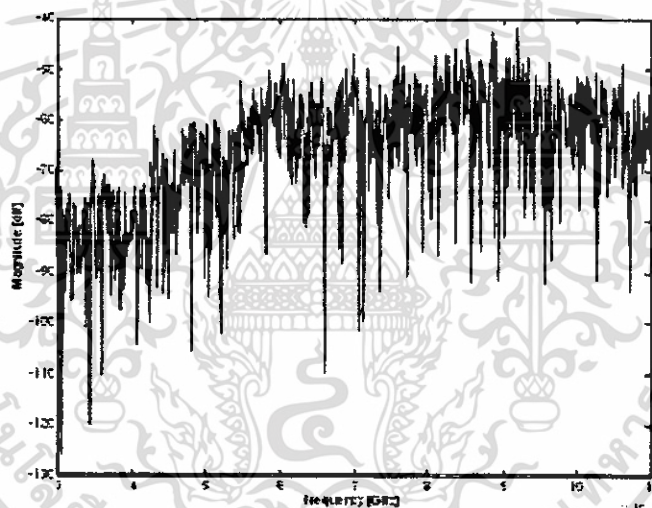


รูปที่ 4.12 แบบจำลองที่ 3 ใช้ในการวัดสัญญาณที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

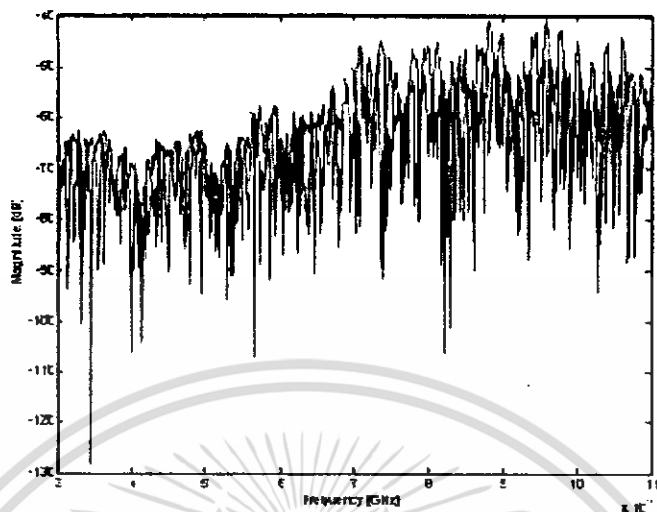


รูปที่ 4.13 แบบจำลองที่ 3 ใช้ในการวัดสัญญาณที่มุม 60 องศา

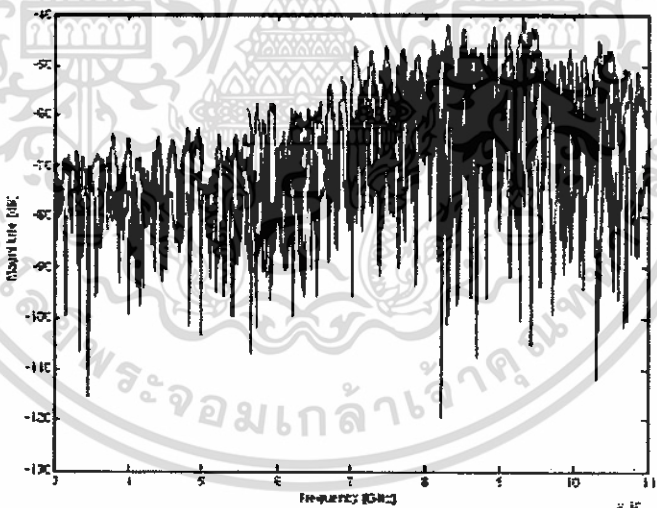


รูปที่ 4.14 พิกัดชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศ 2 เมตร ที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



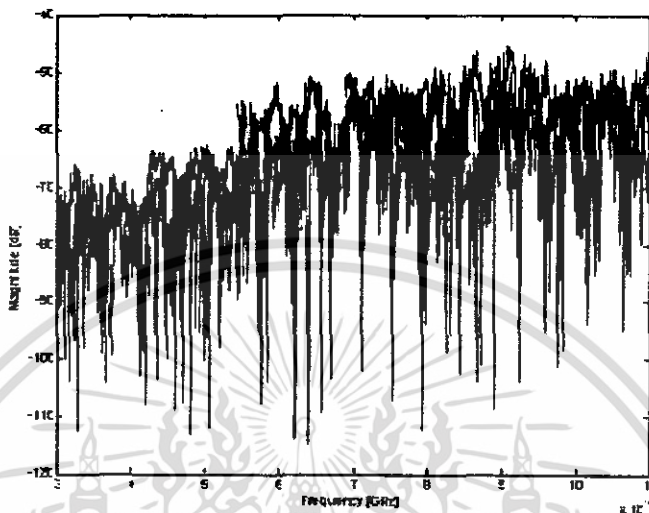
รูปที่ 4.15 พังค์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศ 3 เมตร ที่มุม 45 องศา



รูปที่ 4.16 พังค์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศ 4 เมตร ที่มุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบมุนทั้ง 3 ที่จุดวัดสัญญาณเดียวกันดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดสัญญาณเดียวกันแต่สายอากาศทำมุนต่างกัน

จากผลการทดสอบพบว่าที่มุนต่างๆ จะมีค่าของการสูญเสียเฉลี่ยต่างกันดังตารางที่ 4.2 คือ

ตารางที่ 4.2 แสดงการสูญเสียเฉลี่ยของการกระจายของสัญญาณ

มุน	30 องศา	45 องศา	60 องศา
ค่าการสูญเสียเฉลี่ย	5.5 dB	6.2 dB	8.4 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลจากการวัดและวิเคราะห์สัญญาณ

โครงการนี้ได้นำเสนอการวัดและวิเคราะห์การกระจายของสัญญาณการส่งผ่านความถี่ในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง โดยแบ่งแบบจำลองการวัดและวิเคราะห์สัญญาณให้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เดียวกันแต่ระยะทางต่างกัน เพื่อศึกษาผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นในระบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณสามารถสรุปได้ว่า คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศด้านส่งไปยังตำแหน่งของสายอากาศด้านรับที่กำหนดไว้โดยผ่านสภาพแวดล้อมเดียวกัน ระดับแรงดันและลักษณะของสัญญาณที่รับได้ก็จะมีค่าแตกต่างกันไปด้วย เมื่อระยะทางระหว่างสายอากาศด้านส่งกับด้านรับจะมีระยะทางที่ต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากคุณลักษณะการลดทอนของสัญญาณในการแพร่กระจายคลื่น อันเนื่องมาจากการสะท้อนของคลื่นที่มาจากทิศทางต่างๆ และสัญญาณบางส่วนเกิดการกระจายจากผนังพื้นผิวขรุขระที่สร้างขึ้น ทำให้ระดับของสัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลง และอาจเกิดการหักล้างกันเองของสัญญาณได้ หรือเกิดจากการที่สัญญาณบางส่วนถูกบดบังจากสิ่งแวดล้อมรอบข้างทำให้สัญญาณที่รับได้มีขนาดที่ลดลง

#### 5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการดำเนินโครงการ

1. สามารถรู้หลักการของระบบสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่ง Ultra Wideband
2. สามารถเปรียบเทียบหลักการของระบบการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่ง ว่ามีข้อดีที่ระบบอื่นๆ อย่างไร
3. เพื่อนำผลที่ได้จากการวัดและวิเคราะห์ไปพัฒนาและแก้ไขในระบบสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งต่อไป
4. สามารถนำระบบการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งไปใช้ในการส่งสัญญาณในระดับที่เกิดการลดทอนต่ำได้

### 5.3 ปัญหาที่พบในระหว่างการค้าเงินโครงการ

- สถานที่ที่ใช้ในการวัดสัญญาณนั้น ยังไม่มีความเหมาะสมมากพอ ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้นั้นยังมีผลของสภาพแวดล้อมเข้ามามีส่วนร่วมอยู่พอสมควร

### 5.4 แนวทางการแก้ปัญหา

- ควรใช้สถานที่ที่เกิดการสะท้อนของสัญญาณอื่นที่ไม่ต้องการมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อที่จะได้ผลของการวิเคราะห์สัญญาณที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

### 5.5 ข้อเสนอแนะ

การวัดและทดสอบสัญญาณในแบบจำลองต่างๆ ควรจะมีจำนวนจุดของการเลื่อนระยะห่างระหว่างสายอากาศทางด้านส่งและด้านรับ ในจำนวนที่มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อีกทั้งยังควรตั้งสายอากาศไว้ในระดับที่แตกต่างกันหลากหลายระดับเพื่อทดสอบคุณภาพของสัญญาณและการกระจัดกระจายของสัญญาณ เพิ่มระยะในการวัดและทดสอบให้มากขึ้นและเปลี่ยนวัสดุในการทดสอบการกระจัดกระจายของสัญญาณเช่น จากอิฐเป็นกระจกฝ้าที่มีพื้นผิวไม่เรียบเป็นต้นเพื่อความละเอียดและถูกต้องของข้อมูลในการนำไปอ้างอิงเพื่อใช้งานจริงได้

## บรรณานุกรม

1. K. Siwiak, D. McKeown. 2004. **Ultra wideband radio technology**. John Wiley-Sons., Ltd.
2. Ghavami, L.B.Michael, R.Kohno. 2004. **Ultra wideband signals and systems in communication engineering**. John Wiley-Sons, Ltd.
3. บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. 2541. **หลักการไฟฟ้าสื่อสาร**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
4. ถัญญกร วุฒิสัทธาภิบาล. 2544. **วิศวกรรมโทรคมนาคม**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
5. รศ.ดร. มนัส ตั้งวรศิลป์และวรรณี ภัทรอมรกุล. 2543. **คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์**. กรุงเทพฯ: อินโฟเพรส.

## เว็บไซต์อ้างอิง

1. [http://en.wikipedia.org/wiki/Ultra\\_wideband](http://en.wikipedia.org/wiki/Ultra_wideband)
2. <http://en.wikipedia.org/wiki/Pathloss>
3. [http://en.wikipedia.org/wiki/Friis'\\_formula](http://en.wikipedia.org/wiki/Friis'_formula)
4. [http://en.wikipedia.org/wiki/Matched\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Matched_filter)
5. <http://www.intel.com/technology/ultrawideband>
6. [http://engnet.anu.edu.au/DEcourses/engn4502/2.\\_Friis\\_Fomula.pdf](http://engnet.anu.edu.au/DEcourses/engn4502/2._Friis_Fomula.pdf)
7. <http://www.turbowave.com/documents/Wireless%20Networking.pdf>

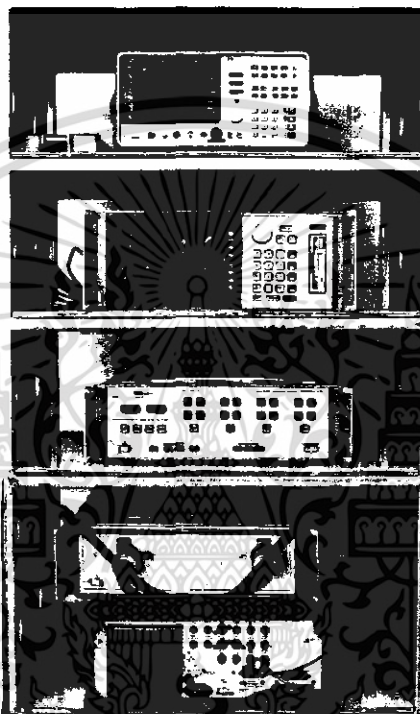
**ภาคผนวก**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ก.1 รูปเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.1 เครื่อง Vector Network Analyzers (VNA)



รูปที่ ก.2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ร่วมกับ VNA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 สาย Coaxial Cable Semi rigid



รูปที่ ก.4 เสาที่ใช้ในการติดตั้งสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การเตรียมเครื่อง Vector Network Analyzer ก่อนทำการวัด

การเตรียมเครื่อง Vector Network Analyzer ก่อนทำการวัดมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการต่อ Connector ที่หัวต่อ PORT 1 และที่หัวต่อ PORT 2 โดยใช้สายแบบ Coaxial Cable Semi rigid



PORT 1

PORT 2

2. กด MANU ในโหมด STIMULUS



- กด START ตามด้วย กดเลขตามความถี่ที่เราต้องการ ใช้ และกด ENTRY OFF
- กด STOP ตามด้วย กดเลขตามความถี่ที่เราต้องการ ใช้ และกด ENTRY OFF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. กด CAL ที่ MENUS



- เลือกกดที่ CAL 1 (3.5 mm. B.3)
- เลือกกดที่ FULL (2-PORT)
- เลือกกดที่ REFLECT'N

### 4. ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำชุด CAL มาใช้ในการ CAL ทำดังนี้

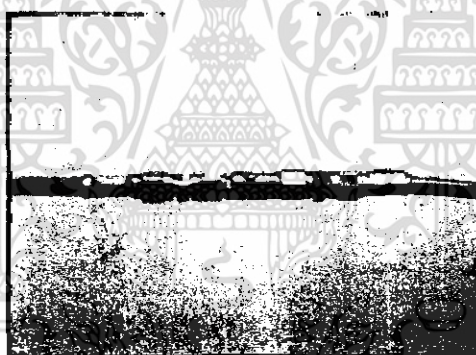
ที่หัวต่อ PORT 1 (S11)

- นำชุด CAL แบบ OPEN มาใส่ที่สาย Coaxial Cable (ด้านที่ไม่ได้ต่อเข้ากับเครื่อง VNA) จากนั้นกด OPEN
- นำชุด CAL แบบ SHORT มาใส่ที่สาย Coaxial Cable (ด้านที่ไม่ได้ต่อเข้ากับเครื่อง VNA) จากนั้นกด SHORT
- นำชุด CAL แบบ BROADBAND LOAD มาใส่ที่สาย Coaxial Cable (ด้านที่ไม่ได้ต่อเข้ากับเครื่อง VNA) จากนั้นกด LOAD
- เลือกกดที่ BROADBAND
- เลือกกดที่ DONE LOAD

ที่หัวต่อ PORT 2 (S22)

- นำชุด CAL แบบ OPEN มาใส่ที่สาย Coaxial Cable (ด้านที่ไม่ได้ต่อเข้ากับเครื่อง VNA) จากนั้นกด OPEN
- นำชุด CAL แบบ SHORT มาใส่ที่สาย Coaxial Cable (ด้านที่ไม่ได้ต่อเข้ากับเครื่อง VNA) จากนั้นกด SHORT
- นำชุด CAL แบบ BROUNDDBAND LOAD มาใส่ที่สาย Coaxial Cable (ด้านที่ไม่ได้ต่อเข้ากับเครื่อง VNA) จากนั้นกด LOAD
- เลือกกดที่ BROUNDDBAND
- เลือกกดที่ DONE LOAD
- เลือกกดที่ REFLECT'N DONE

5. ทำการต่อหัวต่อ ISORATOR เข้ากับสาย Coaxial Cable ทั้งสองด้าน จากนั้นจึงทำการกด TRANSMISSION และกดเลื่อนลงมาตามลำดับคือ



- กด FWD.TRANS.THURU
- กด FWD.MATCH.THURU
- กด REV.TRANS.THURU
- กด REV.MATCH.THURU

6. กด TRANS DONE

7. กด ISOLATION

- เลือกกดที่ OMIT ISOLATION

8. กด ISOLATION DONE

9. กด SAVE (2-PORT CAL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

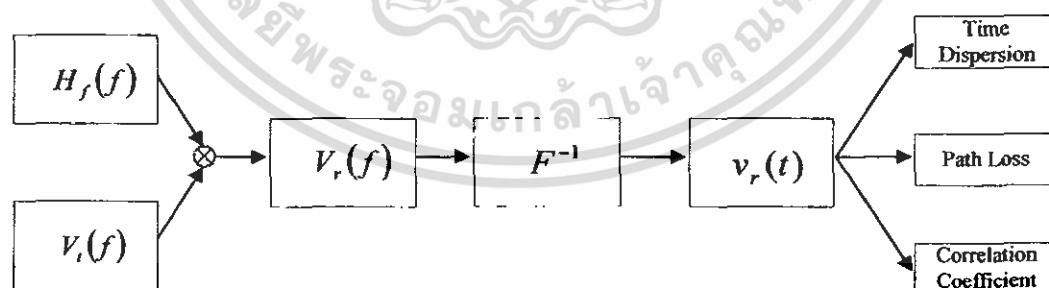
10. ทำการเลือกตำแหน่ง CAL SET โดยมีตั้งแต่ตำแหน่งที่ 1 ถึง 8 เพื่อใช้ในการเก็บบันทึกข้อมูลที่ทำการ CAL ไปแล้วข้างต้น (ถ้าตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกเดิมต้องทำการลบค่าเก่าที่ได้บันทึกไว้ออกก่อนถึงจะสามารถบันทึกค่าใหม่ได้)

## ภาคผนวก ก

### ขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ผล

#### ขั้นตอนในการทดลอง

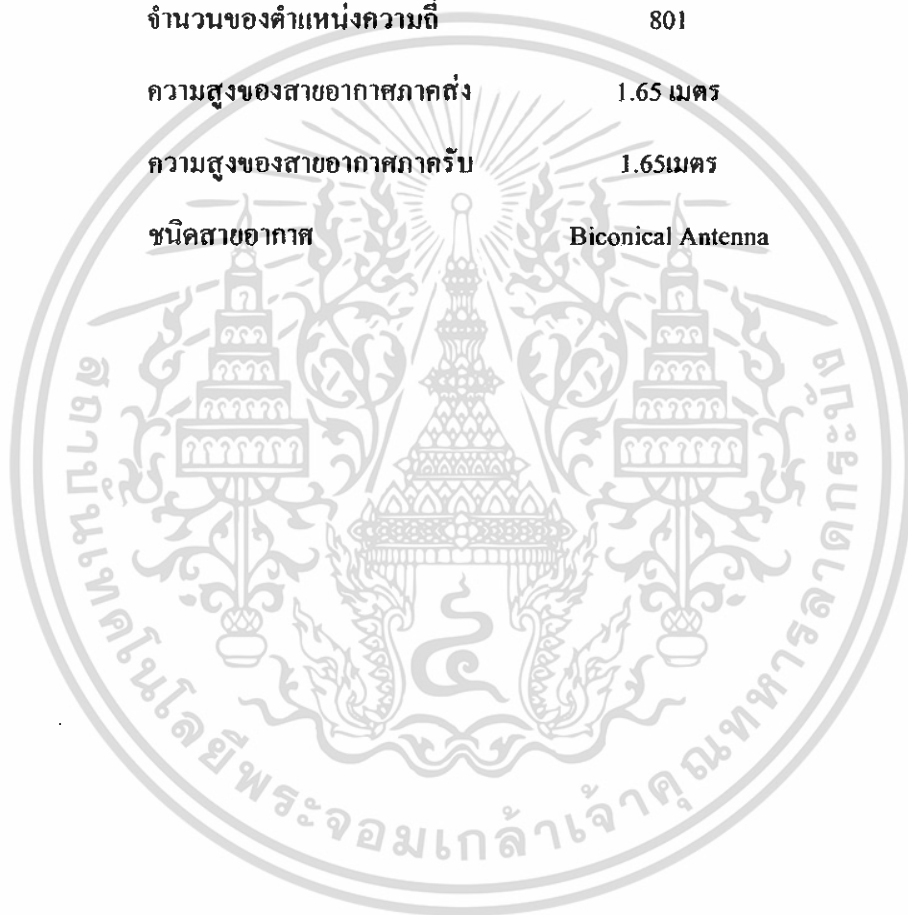
ในการทดลองหาผลตอบสนองของช่องสัญญาณนั้นจะนำเอาค่าฟังก์ชันการส่งผ่านความถี่ (Frequency Transfer function) ที่ได้จากการวัดมาคูณกับสัญญาณทางด้านส่งที่เราได้ทำการสร้างขึ้นก็จะได้สัญญาณทางด้านรับที่อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ ต่อไปนำสัญญาณที่ได้ผ่านกระบวนการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับ (Inverts Fourier) ก็จะได้สัญญาณทางด้านรับที่อยู่ในรูปของโดเมนเวลาเพื่อนำไปหาค่าต่างๆ ต่อไป ดังรูปที่ ก.1 โดยที่การวัดหาฟังก์ชันการส่งผ่านความถี่นั้นจะได้จากการวัดค่า  $S_{21}$  ในโดเมนความถี่ที่เครื่อง Vector Network Analyzer ซึ่งสถานะแวดล้อมในการวัดจะเป็นไปตามรูปแบบที่ออกแบบไว้ข้างต้นทั้ง 4 รูปแบบ โดยที่จะใช้สายอากาศส่งและรับเป็นแบบกรวยคู่ (Biconical Antenna) และระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับอยู่ที่ 2 เมตร ถึง 8 เมตร โดยแต่ละจุดห่างกัน 60 เซนติเมตร ความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเท่ากับ 1.65 เมตร โดยที่ตารางที่ ก.1 จะแสดงตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.1 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ผล

โดยในการทดลองนี้จำเป็นที่จะต้องทราบเกี่ยวกับค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองและค่าที่ใช้ในการทดลองว่าต้องใช้ในปริมาณเท่าไรซึ่งได้ทำการแสดงข้อมูลไว้ให้ทราบแล้ว ดังต่อไปนี้

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ช่วงความถี่	3 GHz ถึง 11GHz
จำนวนของตำแหน่งความถี่	801
ความสูงของสายอากาศภาคส่ง	1.65 เมตร
ความสูงของสายอากาศภาครับ	1.65เมตร
ชนิดสายอากาศ	Biconical Antenna



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้