

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาของสัญญาณสอดแทรกของการสูญเสียในการส่งผ่านในอวกาศว่างจากการสะท้อนจากพื้นสำหรับวิทยุอิมพัลส์แถบกว้างยิ่ง

A Study of Interference Signal of Free Space Transmission Loss from Ground Reflection for UWB Impulse Radio



เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....62722

วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ค. 2549

b.....41790000
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A Study of Interference Signal of Free Space Transmission Loss from Ground  
Reflection for UWB Impulse Radio**



By

**Mr.KRITTAPONG SAWANGSRI**

**Mr.TUNTIPONG TONGKUM**

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

**2005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาโท การศึกษาของสัญญาณสอดคล้องของการสูญเสียในการส่งผ่านในอากาศ  
ว่างจากการสะท้อนจากพื้นสำหรับวิทยุอิมพัลส์แถบกว้างยิ่ง

ชื่อนักศึกษา นายกฤตพงศ์ แสงศรี รหัสนักศึกษา 46015615  
นายตันติพงษ์ ทองคำ รหัสนักศึกษา 46015624

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์  
ผศ.พิชญ สุพรรณกุล

ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์  
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา 2548

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
รับปริญญาโทฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ สถาพร พรหมวงศ์)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.พิชญ สุพรรณกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาโท การศึกษาของสัญญาณสอดแทรกของการสูญเสียในการส่งผ่านในอากาศ  
ว่างจากการสะท้อนจากพื้นสำหรับวิทยุอิมพัลส์แถบกว้างยิ่ง

ชื่อนักศึกษา นายกฤตพงศ์ แสงศรี รหัสนักศึกษา 46015615  
นายต้นดิพงษ์ ทองคำ รหัสนักศึกษา 46015624

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์  
ผศ.พิชญ สุพรรณกุล

ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์  
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา 2548

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ ( Ultra-Wideband ; UWB ) ได้เป็นที่สนใจอย่างกว้างขวางสำหรับทางด้านเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย โครงการนี้ได้นำเสนอการศึกษาและการวิเคราะห์สัญญาณการสอดแทรกของการสะท้อนจากพื้นสู่อากาศว่างสำหรับวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งในรูปแบบจำลอง 2 เส้นทางได้ทำแบบจำลองช่วงสัญญาณในสภาวะแวดล้อมบริเวณค่าน้ำฟ้าอาคารสโโลป วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและได้ใช้อุปกรณ์วิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ในช่วงความถี่ 3-11 GHz ผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์หาสัญญาณที่ได้รับจากเสาภาครับ การสูญเสียเชิงวิถี อัตราขยายของการส่งผ่าน และข้อมูลการหน่วงกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis Title** A Study of Interference signal of Free space Transmission Loss from Ground Reflection for UWB Impulse Radio

**Student** Mr.Krittapong Sawangsri ID 46015615  
Mr.Tuntipong Tongkum ID 46015624

**Advisor** Mr.Sathaporn Promwong  
Asst.Prof.Pichaya Supanakoon

**Graduate Level** Bachelor Degree of Information Engineering

**Department** Information Engineer

**Academic Year** 2005

### ABSTRACT

In present, Ultra-Wideband : UWB Technology is very widely interest for Wireless communication systems. A study of Interference Signal of Ground Reflection to Free Space for UWB Impulse Radio, is presented. UWB channel is modeled in a deck of faculty in Engineering King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang. A Vector Network Analyzer(VNA) is used to measure in the frequency band of 3-11GHz. The magnitude and phase of measurement transfer function are shown and are used to estimate the antenna transfer function the receive signal is valuated the output of optimum filter are shown correlation path loss gain of optimum matched filter are consider. And analyzer received signal wave from and break point .

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเป็นผลเนื่องมาจากความมานะอดทน และช่วยเหลือเกื้อกูลกันของเพื่อนๆและผู้มิได้เอ่ยนามอีกหลายท่าน ตลอดระยะเวลาการทำโครงการ ได้รับการสนับสนุนจาก อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ และ อาจารย์พิชญ์ สุพรรณกุล รวมถึงอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำเกี่ยวกับรายละเอียดในโครงการนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนทางการศึกษา อีกทั้งสิ่งดีๆและทุกอย่างมาโดยตลอด รวมทั้งญาติพี่น้องทุกท่าน ที่คอยเป็นขวัญและกำลังใจเสมอมา

ผู้จัดทำ

นาย กฤตพงศ์ แสงศรี

นาย ต้นติพงษ์ ทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 1.1 เปรียบเทียบแบนวิคท์ของอุลตราไวด์แบนด์กับคลื่นชนิดอื่น	1
รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์	3
รูปที่ 2.1 ระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่ง	5
รูปที่ 2.2 ลักษณะของสัญญาณพัลส์ใน โดเมนเวลาและแถบกำลังงานของสัญญาณ ในเมนความถี่	6
รูปที่ 2.3 ลักษณะการใช้งานอุปกรณ์มัลติมีเดียร์ภายในบ้าน	6
รูปที่ 2.4 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของระบบแถบกว้างยิ่ง ภายในอาคาร	11
รูปที่ 2.5 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของระบบแถบ กว้างยิ่งภายนอกอาคาร	11
รูปที่ 2.6 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่	13
รูปที่ 2.7 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน โมโน โไซเคิลทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่	13
รูปที่ 2.8 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนดับสี่ทังทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่	14
รูปที่ 2.9 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามขนาด 4 ระดับ	15
รูปที่ 2.10 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตทางตามตำแหน่งของพัลส์	15
รูปที่ 2.11 สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแบบสองเฟส	15
รูปที่ 2.12 (a) และ (b) สายอากาศรูปเลขาคณิตและการแพร่กระจายคลื่นแบบทรงกลม	17
รูปที่ 2.13 สนามแม่เหล็กและสนาม ไฟฟ้าและความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของ สายอากาศไบโคเนคคอล	18
รูปที่ 2.14 ระบบ โคออดิเนทสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	20
รูปที่ 2.15 แพทเทอร์นของสายอากาศชี้ทิศทาง (ออมนิไดเรกชันแนล)	21
รูปที่ 2.16 โลบต่างๆและบีมวิคท์ของแบบรูปสายอากาศ	22
รูปที่ 2.17 แบบรูปในแบบเชิงเส้น	22
รูปที่ 2.18 ลักษณะการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณ	26
รูปที่ 2.19 บล็อกไดอแกรมของระบบการส่งสัญญาณที่ได้มีการเพิ่มเติมจากสูตรของฟรีด (Friis' transmission) เพื่อนำมาใช้กับระบบอุลตราไวด์แบนด์	28
รูปที่ 2.20 บล็อกไดอแกรมของระบบการส่งสัญญาณ	30
รูปที่ 2.21 การ Interference ของ direct rays และ ground - reflected rays	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 2.22 Radiation Pattern with interference	34
รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ได้รับจากผลกระทบมลพิษทางฟิสิกส์และขาโค่วิ่ง	36
รูปที่ 2.24 ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนกับผิวเรียบต่อสัญญาณที่รับได้	37
รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการหน่วงกำลังของคลื่นภายในอาคาร	40
รูปที่ 3.1 คลื่นสัญญาณที่ใช้ในการส่ง	41
รูปที่ 3.2 สเปกตรัมของสัญญาณอุตสาหกรรมไร้สาย	41
รูปที่ 3.3 แบบจำลองการวัดสัญญาณ UWB	42
รูปที่ 3.4 รูปแสดงโมเดลโดยมองจากทางด้านข้างภาคส่งสูง 1.5 เมตรภาครับ 1.5 เมตร	43
รูปที่ 3.5 รูปแสดงโมเดลโดยมองจากทางด้านข้างภาคส่งสูง 2.0 เมตรภาครับ 2.0 เมตร	44
รูปที่ 3.6 รูปแสดงโมเดลโดยมองจากทางด้านข้างภาคส่งสูง 2.5 เมตรภาครับ 2.5 เมตร	44
รูปที่ 3.7 สายอากาศไบโคนิคอล (Biconical)	45
รูปที่ 3.8 แมกนิจูดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศไบโคนิคอล	45
รูปที่ 4.1 เครื่องวัดคุณสมบัติของสายอากาศ	47
รูปที่ 4.2a โมเดลที่ใช้ในการวัดระยะเสาสูง 1.5 เมตร เสารับ 1.5 เมตร	49
รูปที่ 4.2b ภาพถ่ายรูปการวัดสัญญาณ Free Space กับสัญญาณ Ground Reflection	49
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบ Path Loss ระหว่าง Free Space กับ Ground Reflection	50
รูปที่ 4.4a การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ระยะทาง 1 เมตร	51
รูปที่ 4.4b การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ระยะทาง ๓ เมตร	51
รูปที่ 4.4c การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ระยะทาง 8 เมตร	52
รูปที่ 4.5a ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 1 เมตร	53
รูปที่ 4.5b ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 9 เมตร	53
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า Correlation Coefficient ของสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection	54
รูปที่ 4.7a ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Free Space	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.7b ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Ground Reflection	56
รูปที่ 4.8a การเปรียบเทียบ RMS Delay Spared ของ Free Space กับ Ground Reflection	58
รูปที่ 4.8b การเปรียบเทียบ Mean excess delay ของ Free Space กับ Ground Reflection	58
รูปที่ 4.9a โมเดลที่ใช้ในการวัดระยะเสาส่ง 2.0 เมตร เสารับ 2.0 เมตร	59
รูปที่ 4.9b ภาพถ่ายรูปการวัดสัญญาณ Free Space กับสัญญาณ Ground Reflection	59
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบ Path Loss ระหว่าง Free Space กับ Ground Reflection	60
รูปที่ 4.11a การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 1 เมตร	61
รูปที่ 4.11b การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 5 เมตร	61
รูปที่ 4.11c การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 8 เมตร	62
รูปที่ 4.12a ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 1 เมตร	63
รูปที่ 4.12b ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 8 เมตร	63
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่า Correlation Coefficient ของสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection	64
รูปที่ 4.14a ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Free Space	66
รูปที่ 4.14b ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Ground Reflection	66
รูปที่ 4.15a การเปรียบเทียบ RMS Delay Spared ของ Free Space กับ Ground Reflection	68
รูปที่ 4.15b การเปรียบเทียบ Mean excess delay ของ Free Space กับ Ground Reflection ระยะทาง 9 เมตร	68
รูปที่ 4.16a โมเดลที่ใช้ในการวัดระยะเสาส่ง 2.5 เมตร เสารับ 2.5 เมตร	69
รูปที่ 4.16b ภาพถ่ายรูปการวัดสัญญาณ Free Space กับสัญญาณ Ground Reflection	69
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบ Path Loss ระหว่าง Free Space กับ Ground Reflection	70
รูปที่ 4.18a การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 1 เมตร	71
รูปที่ 4.18b การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 5 เมตร	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.18c การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ระยะทาง 8 เมตร	72
รูปที่ 4.19a ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 1 เมตร	73
รูปที่ 4.19b ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 8 เมตร	73
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่า Correlation Coefficient ของสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection	74
รูปที่ 4.21a ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Free Space	76
รูปที่ 4.21b ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Ground Reflection	76
รูปที่ 4.22a การเปรียบเทียบ RMS Delay Spared ของ Free Space กับ Ground Reflection	78
รูปที่ 4.22b การเปรียบเทียบ Mean excess delay ของ Free Space กับ Ground Reflection	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร	10
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร	11
ตารางที่ 4.1 ค่า Path Loss ที่ระยะความสูงของเสาที่ 1.5 เมตร	50
ตารางที่ 4.2 ค่า Correlation และค่าการสูญเสียเชิงวิถี	55
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบสัญญาณด้านรับเมื่อผ่าน Optimum Matched Filter กับ Isotropic Matched Filter	57
ตารางที่ 4.4 ค่า Path Loss ที่ระยะความสูงของเสาที่ 2 เมตร	60
ตารางที่ 4.5 ค่า Correlation และค่าการสูญเสียเชิงวิถี	65
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบสัญญาณด้านรับเมื่อผ่าน Optimum Matched Filter กับ Isotropic Matched Filter	67
ตารางที่ 4.7 ค่า Correlation และค่าการสูญเสียเชิงวิถี	75
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบสัญญาณด้านรับเมื่อผ่าน Optimum Matched Filter กับ Isotropic Matched Filter	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการงาน	2
1.3 ขอบเขตของ โครงการงาน	2
1.4 องค์ประกอบหลักของโครงการงาน	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ทฤษฎีและหลักการของระบบการสื่อสารแบบออลดรีวาไวด์แบนด์	4
2.2 ลักษณะเฉพาะของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง	5
2.2.1 จุดเด่นของระบบแบบแถบกว้างยิ่ง	7
2.3 กฎข้อบังคับของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง	8
2.3.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา	8
2.3.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป	10
2.4 รูปแบบของสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง	12
2.4.1 คำจำกัดความของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง	12
2.4.2 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์	12
2.4.3 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์โมนอไซเคิล	13
2.4.4 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์ดับเลต	14
2.5 เทคนิคการมอดูเลตในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งขึ้น	14
2.5.1 การมอดูเลตทางขนาดของพัลส์	14
2.5.2 การมอดูเลตทางตำแหน่งของพัลส์	15
2.5.3 การมอดูเลตแบบเฟส	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 ทฤษฎีสายอากาศไบโคนิคอล (Biconical)	16
2.6.1 สนามการแพร่กระจายคลื่น	16
2.7 พารามิเตอร์ของสายอากาศ (Antenna Parameter)	19
2.7.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	19
2.7.2 แพทเทอร์นแบบไอโซโทรปิก ไดรเรคชันเนล และออมนิไดเรคชันเนล	20
2.7.3 แพทเทอร์นหลัก	21
2.7.4 โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)	21
2.7.5 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)	23
2.7.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)	24
2.7.7 บีมวิดท์ (Beamwidth)	24
2.7.8 แบนด์วิดท์ (Bandwidth : BW )	25
2.7.9 บริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศ	25
2.8 การวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณ UWB	26
2.8.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับช่องสัญญาณแบบอูลตราไวด์แบนด์	26
2.8.2 Match filter	30
2.9 การส่งผ่านคลื่นสัญญาณ	32
2.9.1 การสะท้อน (Reflection)	32
2.9.2 การหักเห (Refraction)	32
2.9.3 การเลี้ยวเบน (Diffraction)	32
2.9.4 การกระจาย (Scattering)	32
2.9.5 การสอดแทรก (Interference)	33
2.10 การสูญเสียกำลัง ( Path Loss)	36
2.10.1 การสูญเสียเชิงวิถีในอากาศว่าง (Free Space Path Loss)	36
2.10.2 การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ (Plane Path Loss)	36
2.11 การลดทอนของสัญญาณ (Path Gain)	37
2.12 ผลกระทบของฮาโดว์อิง (Shaddowing)	38
2.13 ปัญหาของมัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath Fading)	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.14 โปรไฟล์การหน่วงกำลัง (Power Delay Profile)	38
2.14.1 ดีเลย์สเปรด (Delay Spread)	38
<b>บทที่ 3 การเตรียมการของระบบวัด</b>	
3.1 การวัดช่องสัญญาณ UWB	41
3.1.1 รูปแบบการส่งผ่านแถบความถี่กว้างยิ่ง	41
3.1.2 แบบจำลองการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณ UWB	42
3.2 โมเดลที่ใช้ในการทดลอง	43
3.3 คุณลักษณะของสายอากาศไบโคนิคอน (Biconical)	45
3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ( Parameter )	46
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	
4.1 การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณ UWB	47
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	47
4.1.2 ขั้นตอนการวัด	48
4.2 ผลการทดลอง	48
4.2.1 การประมวลผลสัญญาณ	48
4.3 โมเดลที่ 1 (Model 1)	50
4.4 โมเดลที่ 2 (Model 2)	60
4.5 โมเดลที่ 3 (Model 3)	69
<b>บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง</b>	
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง	79
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการดำเนินโครงการ	79
5.3 ปัญหาที่พบในระหว่างการดำเนินโครงการ	80
5.4 แนวทางในการแก้ปัญหา	80
5.5 สรุป	80
<b>บรรณานุกรม</b>	81

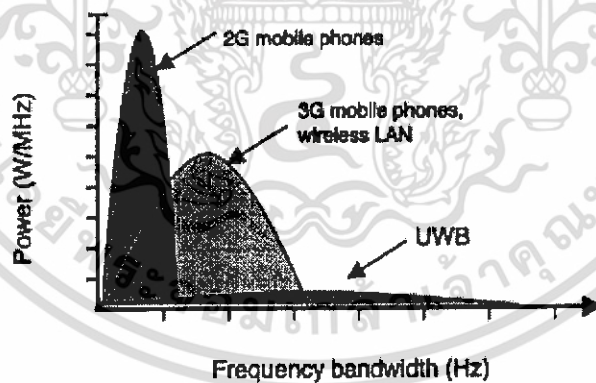
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 แนวคิดและที่มาของโครงการ

ปัจจุบัน ความต้องการในการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งานเริ่มมีสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมต่อเครือข่ายภายในอาคารสำนักงาน หรือการเชื่อมต่อเครือข่ายเพื่อความบันเทิงภายในแหล่งที่พักอาศัย โดยมีเทคโนโลยีไร้สายที่นิยมใช้เพื่อการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย Wi-Fi , Bluetooth และเทคโนโลยีคลื่นสั้น (Short-Length) อย่างไรก็ตาม ปัจจุบัน ได้เกิดกระแสความสนใจในวงกว้างเกี่ยวกับเทคโนโลยี Ultrawideband (UWB) ซึ่งคาดว่าจะเข้ามาเปลี่ยนแปลงระบบการสื่อสารข้อมูลครั้งใหญ่ ด้วยความสามารถที่เหนือกว่าเทคโนโลยีเดิมอย่าง Wi-Fi หรือ Bluetooth อย่างเห็นได้ชัด โดยที่คลื่นอุลตราไวด์แบนด์ซึ่งเป็นคลื่นที่ใช้ความหนาแน่นกำลังในการส่งต่ำแต่มีแบนด์วิธที่กว้างมากดังแสดงในรูปที่ 1.1 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้คลื่นอุลตราไวด์แบนด์มีความจุในการรับส่งข้อมูลได้มากซึ่งทำให้เกิดการส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 1.1 เปรียบเทียบแบนด์วิธของอุลตราไวด์แบนด์กับคลื่นชนิดอื่น

และระดับสัญญาณของคลื่นอุลตราไวด์แบนด์ยังมีระดับสัญญาณที่ต่ำกว่าระดับสัญญาณรบกวน ดังนั้นสัญญาณของคลื่นอุลตราไวด์แบนด์จึงไม่ไปรบกวนกับระบบการสื่อสารชนิดอื่น จึงสามารถใช้ความถี่ร่วมกับแถบความถี่ของระบบสื่อสารอื่นได้ ด้วยคุณสมบัติของการสื่อสารโดยใช้คลื่นอุลตราไวด์แบนด์ จึงต้องการศึกษาการส่งสัญญาณระหว่างเสาส่งและเสารับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาทดลองการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งโดยใช้สายอากาศแบบใบ โคนิคอน ที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว ทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนจากพื้นดินทำให้เกิดการแทรกสอดของสัญญาณตรงกับสัญญาณที่สะท้อนจากพื้น ทำให้ลักษณะของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจึงมีผลทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณสูงไปกว่าเดิมหรือต่ำไปกว่าเดิม จึงทำให้เกิดการศึกษาแทรกสอดของสัญญาณเพื่อนำไปแก้ปัญหาด้านการณ การแทรกสอดของสัญญาณซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมของการสื่อสาร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่ง ( UWB ) และการออกแบบจำลอง 2 เส้นทาง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาของสัญญาณการสอดแทรกของการสะท้อนจากพื้นสู่อากาศว่างสำหรับวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

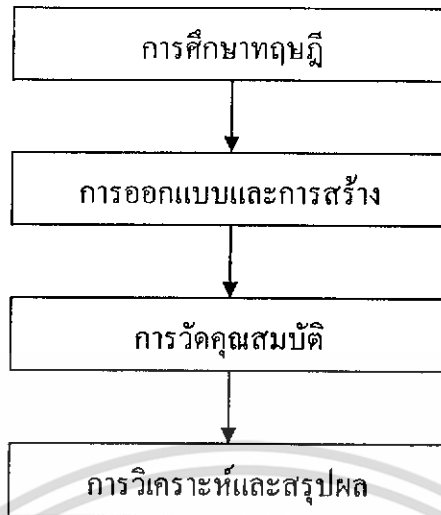
- 1.3.1 ศึกษาเกี่ยวกับระบบแบบแถบกว้างยิ่ง UWB และศึกษาระบบแบบจำลอง 2 เส้นทาง
- 1.3.2 ศึกษาของสัญญาณการสอดแทรกของการสะท้อนจากพื้นสู่อากาศว่างสำหรับวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง
- 1.3.3 ทำการวิเคราะห์

## 1.4 องค์ประกอบหลักของโครงการ

โครงการนี้ได้ออกแบบและทำการสร้างโมเดลเพื่อทำการวิเคราะห์หาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของ โดยจะศึกษาจากทฤษฎีการแทรกสอดของสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นสู่อากาศว่าง

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้มีการศึกษาวางแผนและทำงานตามขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

การศึกษาทฤษฎีจะอยู่ในบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่ควรรู้และใช้ประโยชน์ ประกอบในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการแทรกสอดของสัญญาณความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีคลื่นวิทยุพื้นฐานของสายอากาศไบโคเนคัล

การเตรียมการของระบบการวัดจะอยู่ในบทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและขั้นตอนการเซต และการติดตั้งโมเดล

การวัดคุณสมบัติจะอยู่ในบทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการวัดและผลการวัดคุณสมบัติของแทรกสอดของสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นสู่อากาศว่าง

วิเคราะห์และสรุปผลจะอยู่ในบทที่ 5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดและสรุปของผลการวัดคุณสมบัติของการแทรกสอดของสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นสู่อากาศว่าง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ทฤษฎีและหลักการของระบบการสื่อสารแบบอุลตราไวด์แบนด์

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง (Ultra - Wideband; UWB) มีประวัติย้อนหลังมายาวนานตั้งแต่สมัยที่ มาร์โคนี (Marconi) ได้ทดลองสาริตเครื่องส่งสปาร์กเก็ป (spark gap) ในการส่งสัญญาณวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกในปี 1901 จากนั้นเทคโนโลยีอุลตราไวด์แบนด์ได้ถูกนำมาใช้ในโครงการที่เป็นความลับของกองทัพสหรัฐฯ ในช่วงระหว่างปี 1960 - 1990 ซึ่งพบว่าเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งเหมาะที่จะนำมาใช้กับการสื่อสารของเรดาร์และการติดต่อสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยสูง ต่อมาเมื่อเดือนพฤษภาคมปี ค.ศ. 2000 ทางคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission; FCC) ได้ออกหนังสือ Notice of Proposed Rule Making (NPRM) ซึ่งเชิญชวนให้หน่วยงานต่าง ๆ นำเสนอข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่จะนำมาปรับปรุงแก้ไขกฎข้อบังคับของ FCC เพื่อควบคุมและกำจัดการส่งสัญญาณของระบบอุลตราไวด์แบนด์ โดยข้อบังคับใหม่นี้ได้ถูกประกาศออกมาใช้งานเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ปี ค.ศ. 2002 ที่ผ่านมา

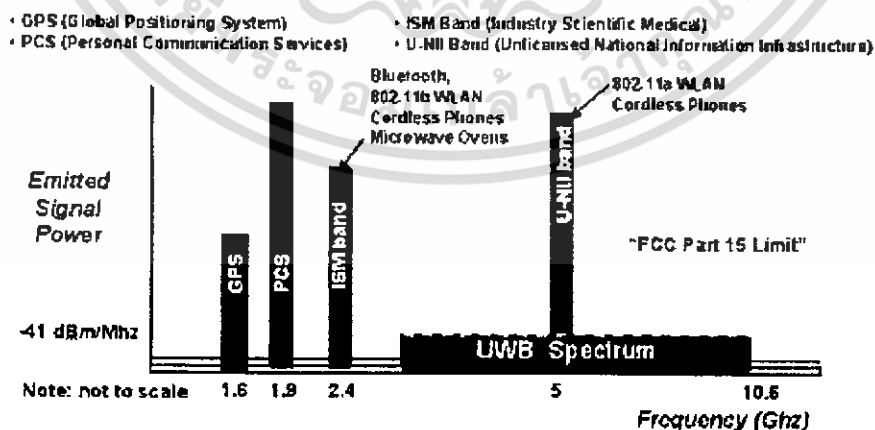
ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีของสวิตซ์ตัดต่อความเร็วสูงทำให้ระบบการสื่อสารแบบอุลตราไวด์แบนด์ได้รับความสนใจสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารประเภทต่างๆ มากขึ้น โดยการสื่อสารแบบอุลตราไวด์แบนด์นั้นนับได้ว่าเป็นวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารไร้สาย โดยมีการใช้แถบความถี่ในการส่งที่กว้างมากประกอบกับใช้กำลังส่งที่น้อย ซึ่งสัญญาณของระบบอุลตราไวด์แบนด์นั้นมีความแตกต่างกับระบบสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน 2 ประการ คือ การส่งสัญญาณอุลตราไวด์แบนด์นั้นจะทำการส่งสัญญาณในลักษณะที่เป็นอิมพัลส์โดยไม่มีการนำเอาสัญญาณข้อมูลไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาห้ อีกประการหนึ่งสัญญาณอุลตราไวด์แบนด์จะใช้แบนวิดท์ในการส่งมากกว่า 25% ของแถบความถี่กลาง หรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่า 1.5 GHz ซึ่งจะพบว่ามีค่ามากกว่าแถบความถี่ระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาก โดยที่ทาง FCC ได้กำหนดแถบความถี่ที่ใช้ในระบบการสื่อสารแบบอุลตราไวด์แบนด์ไว้ที่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งมีแบนวิดท์เท่ากับ 7.5 GHz จากการที่ระบบการสื่อสารแบบอุลตราไวด์แบนด์ใช้แถบความถี่กว้างมากโดยที่แถบความถี่ที่ใช้นั้นได้มีการทับซ้อนกับระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งทาง FCC กำหนดระดับของความหนาแน่นของกำลังส่งต่อความถี่ในการส่งสัญญาณในระบบอุลตราไวด์แบนด์ไม่เกิน -41.3 dBm/MHz ซึ่งจากการที่ระบบการสื่อสารแบบอุลตราไวด์แบนด์มีความหนาแน่นของกำลังงานของสัญญาณต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ที่ต่ำ จึงทำให้สัญญาณที่ใช้ส่งในระบบการสื่อสารแบบอุตสาหกรรมไร้สายแบบไวด์แบนด์ได้รับผลกระทบของสัญญาณรบกวนมาก ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอผลการวิจัยต่าง ๆ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงผลดังกล่าวในการสื่อสารแบบอุตสาหกรรมไร้สายแบบไวด์แบนด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดีขึ้น โดยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ที่มีต่อช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะกล่าวถึงในบทต่อไป โดยที่ในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการพื้นฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ ของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

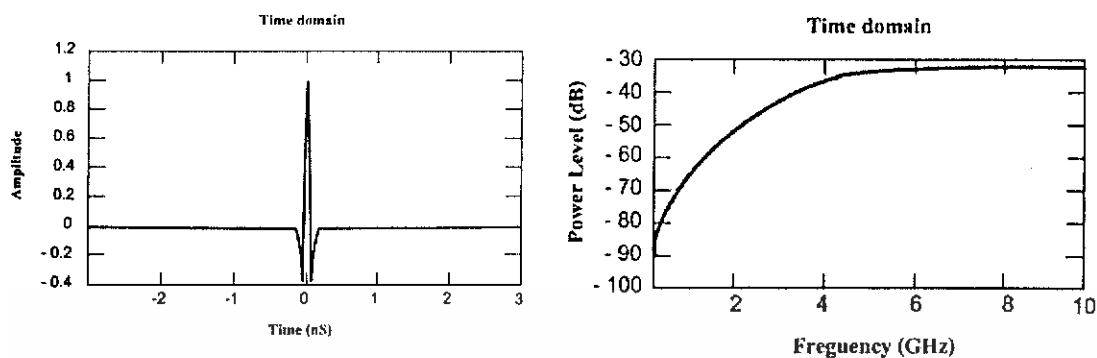
## 2.2 ลักษณะเฉพาะของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ระบบแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่แตกต่างจากการสื่อสารทางคลื่นความถี่วิทยุแบบอื่น โดยจุดเด่นของระบบแบบแถบกว้างยิ่งก็คือ เป็นระบบสื่อสารที่ไม่ต้องใช้คลื่นพาหะ (radio frequency, RF) เหมือนในระบบอื่น สัญญาณของระบบแบบกว้างยิ่งจะเป็นสัญญาณพัลส์ (pulse) โดยจะเป็นพัลส์แคบ ๆ ขนาดประมาณ 0.2 นาโนวินาที จึงทำให้มีความหนาแน่นแถบความถี่ (spectral density) ที่กว้างมาก ซึ่งโดยจะแผ่กระจายครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้างในระดับกิกะเฮิร์ต (GHz) และเนื่องด้วยระบบนี้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงทำให้สามารถที่จะรองรับอัตราการส่งข้อมูลได้สูงถึง 110 Mbps ในระยะประมาณ 10 เมตร ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าสัญญาณพัลส์ที่ใช้มีขนาดที่แคบมากจึงทำให้คิวตี้ไซเคิล (duty cycle) มีค่าต่ำจึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบนี้มีการใช้กำลังที่ต่ำลงไปด้วยในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงระดับความหนาแน่นแถบกำลังในระบบแถบกว้างยิ่ง โดยเปรียบเทียบกับระบบอื่น ๆ โดยรูปที่ 2.2 แสดงถึงลักษณะของสัญญาณพัลส์ในโดเมน เวลาและแถบกำลังงานของสัญญาณในโดเมนความถี่



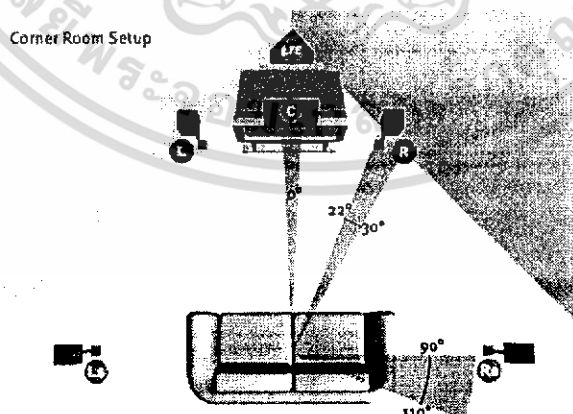
รูปที่ 2.1 ระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ลักษณะของสัญญาณพัลส์ใน โดเมนเวลาและแถบกำลังงานของสัญญาณในเมนความถี่

ทั้งนี้หากเปรียบเทียบระบบนี้กับเทคโนโลยีอย่าง wi-Fi หรือ Bluetooth แล้วก็จะพบว่าระบบแถบกว้างซึ่งจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีดังกล่าวทั้งด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูล การใช้พลังงานที่ต่ำรวมถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลทะลุทะลวงผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ โดยระบบแถบกว้างซึ่งจะมีความเร็วในการส่งรับข้อมูลสูงถึง 480 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 2 เมตรและความเร็ว 110 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 10 เมตร ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในขณะที่ wi-Fi สามารถรับส่งข้อมูลสูงสุด 54 Mbps และหากเปรียบเทียบกับ Bluetooth ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมสำหรับเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลในปัจจุบัน ระบบแถบกว้างยังมีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงกว่า Bluetooth ถึง 100 เท่า ซึ่งด้วยความเร็วในระดับดังกล่าวระบบแถบกว้างจึงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ประเภทโฮมเอนเตอร์เทนเมนต์ภายในบ้าน



รูปที่ 2.3 ลักษณะการใช้งานอุปกรณ์มัลติมีเดียร์ภายในบ้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 จุดเด่นของระบบแบบแถบกว้างยิ่ง

ถ้าจะกล่าวถึงระบบแบบแถบกว้างยิ่งหรือรวมถึงอิมพัลส์ (impulse) พัลส์แคบ (short – pulse) สัญญาณที่ไม่ใช่ไซน์ซอซด์ (non- sinusoidal) สัญญาณที่ปราศจากคลื่นพาห้ (carrier less ) แถบกว้างยวดยิ่ง (super wideband) การอัดพัลส์แบบเอฟเอ็มอย่างรวดเร็ว (fast frequency chirp) และ พัลส์แบบโมน (mono – pulse) [Taylor, 1995] ซึ่งเป็นระบบที่มีจุดเด่นที่น่าสนใจสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารอวกาศเช่น

- เป็นระบบที่มีความซับซ้อนและต้นทุนต่ำ

ความซับซ้อนและต้นทุนที่ต่ำของระบบแบบแถบกว้างยิ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยทางลักษณะเบสแบนด์ (base band) ของการส่งสัญญาณซึ่งไม่เหมือนกับระบบการส่งสัญญาณวิทยุแบบอื่น ๆ โดยที่เครื่องส่งจะทำการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมาก ๆ ในโดเมนทางเวลาซึ่งสามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นออกไปโดยปราศจากการเพิ่มความถี่วิทยุหรือคลื่นพาห้รวมเข้าไปและในส่วนของารรวมสัญญาณวิทยุนั้นจะเป็นการนำเอาสัญญาณเบสแบนด์รวมเข้าไปกับคลื่นพาห้เพื่อย้ายสัญญาณไปยังแถบความถี่ที่มีคุณลักษณะในการแพร่กระจายคลื่นตามต้องการซึ่งสัญญาณจะถูกแพร่กระจายได้ดีโดยปราศจากความถี่ในการเพิ่มการแปลงความถี่ให้สูงขึ้น (up – conversion) และการเพิ่มกำลังให้สูงขึ้น (amplification) โดยในกระบวนการกลับกันการแปลงความถี่ลง (down – conversion) และตัวผลิตความถี่ (local oscillator) จึงไม่จำเป็นในเครื่องรับแบบแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกันทำให้ลดความซับซ้อนของระบบและต้นทุนในการผลิตลงไปได้มาก

- มีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน (noise)

เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานต่ำและลักษณะเฉพาะในการสุ่มเทียบ (pseudo – random) ของสัญญาณส่งจึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนี้มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณรบกวนซึ่งทำให้การตรวจหาสัญญาณทำได้ยากและยังปรากฏในเอกสารทางการวิจัยว่าการส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นไม่ก่อให้เกิดผลการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบคลื่นความถี่วิทยุอื่น ๆ เนื่องจากสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งนั้นมีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับต่ำโดยอยู่ในระดับของสัญญาณรบกวน (noise floor) จึงทำให้ระบบอื่นมองว่าสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนี้คือสัญญาณรบกวนเลยถูกกำจัดออกจากพิจารณาของระบบ

- มีความต้านทานต่อคลื่นหลายวิถี (multipath) และการรบกวนของสัญญาณใกล้เคียงในระบบการมอดูเลตทางเวลา (time modulation) แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะทำการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงในระดับหลักร้อยเมกกะบิต ต่อวินาที อีกทั้งยังได้ถูกประเมินในส่วนของจำนวนของผู้ใช้งานในระบบการสื่อสารแบบคลื่นวิทยุแบบอิมพัลส์ว่าได้จำนวนที่มากกว่าระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั่วไปและเนื่องด้วยมีแบนด์วิธของสัญญาณส่งที่กว้างจึงทำให้ได้รับผลจากคลื่นหลายวิถีอย่างมาก เมื่อระบบมีแบนด์วิธที่กว้างนั้นทำให้เกิดความแตกต่างทางความถี่อย่างมากซึ่งรวมเข้ากับการส่งสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องจึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยังมีการมอดูเลตทางเวลานั้นมีความต้านทานต่อการแพร่กระจายของคลื่นหลายวิถีรุนแรงและการรบกวนหรือแทรกสอดจากสัญญาณความถี่ใกล้เคียงได้

- มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลาสำหรับการกำหนดตำแหน่งและการประยุกต์ใช้ในระบบติดตาม (tracking)

ด้วยพัลส์ที่มีลักษณะทางโดเมนเวลาที่แคบมาก ๆ หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมาก ๆ นั้นหมายถึง ระบบคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยังมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมจังหวะและคำนวณเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่าระบบดาวเทียมบอกพิกัด (global positioning system: GPS) และระบบคลื่นวิทยุแบบอื่น ๆ อีกทั้งด้วยคุณสมบัติในการทะลุผ่านวัสดุได้ดีจึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยังที่มีการมอดูเลตทางเวลาถูกนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ระยะสั้น เช่นในการช่วยเหลือชีวิตและปฏิบัติการป้องกันอาชญากรรม เช่นเดียวกับการใช้ในงานสำรวจและในอุตสาหกรรมการทำเหมือง เป็นต้น

## 2.3 กฎข้อบังคับของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ได้ถูกกำหนดขึ้นในการสื่อสารแบบแถบกว้างยืงนั้นคือการจตุรความถี่ในการใช้งานซึ่งได้มีกลุ่มทำงานในสหรัฐอเมริกาได้พยายามทำการจำกัดของข้อกำหนดในการใช้งานช่วงความถี่ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจากกฎข้อบังคับเดิมของคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา โดยกลุ่มงานนี้ก็ก่อตั้งขึ้นอย่างเป็นทางการโดยใช้ชื่อว่า Ultra – Wideband Working Group (UWBWG) เพื่อทำการเจรจาหาข้อตกลงร่วมกับ FCC เช่นเดียวกันกับในยุโรปก็ได้มีการหาข้อตกลงการจัดสรรคลื่นความถี่และการสอดแทรกของความถี่วิทยุซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีการกำหนดแถบความถี่สำหรับการใช้งานในระบบแถบกว้างในสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standards Institute : ETSI) หรือ สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union : ITU)

### 2.3.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา

ในปี ค.ศ. 1998 FCC ได้ออกประกาศเกี่ยวกับการตรวจสอบหรือ Notice of Inquiry (NOI) โดยถึงแม้ว่าจะได้คาดการณ์ถึงระดับกำลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณที่มีระดับต่ำมาก ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วก็ตาม ยังมีกลุ่มผู้ที่สนับสนุนในระบบเดิมที่มีใช้งานกันอยู่ได้ทำการต่อต้านการนำระบบแถบกว้างยิ่งมาใช้งานสำหรับการสื่อสารของพลเรือนซึ่งเรียกร่อง โดยมากจะเกี่ยวข้องกับการคาดการณ์ถึงการเพิ่มขึ้นของระดับการสอดแทรกในแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด อาทิเช่น แถบความถี่ในการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ แถบความถี่ที่สำรองไว้สำหรับคลื่นวิทยุทางดาราศาสตร์และระบบ GPS โดยที่องค์กรบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกาหรือ FAA (Federal Aviation Administration) ได้แสดงความเป็นห่วงต่อการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบความปลอดภัยในกิจการการบินและทิศทางในการค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องส่งในระบบแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกัน

เมื่อเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้ถูกนำเสนอสำหรับการนำมาใช้ในกิจการการสื่อสารของพลเรือน ซึ่งยังไม่ได้มีการกำหนดใด ๆ สำหรับลักษณะสัญญาณที่จะนำมาใช้ จึงได้มีหน่วยงานหนึ่งที่ชื่อว่า DARPA (Defense Advanced Research Project Agency) ได้ทำการออกข้อกำหนดฉบับที่หนึ่งสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งอยู่บนพื้นฐานอัตราส่วนแบนด์วิดท์ (Bf) ของสัญญาณโดยต้องมีค่ามากกว่า 0.25 โดยสามารถกำหนดได้ตามสมการที่ 2.1 (Taylor, 1995)

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

โดยที่  $f_L$  คือความถี่ต่ำสุดและ  $f_H$  คือความถี่สูงของแถบความถี่ที่ใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่ง

ในวันที่ 14 กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 FCC ได้ออกกฎส่วนรับระบบแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับระบบแถบกว้างยิ่งและยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของคำประกาศและระเบียบการฉบับที่หนึ่งได้เผยแพร่ต่อสาธารณชนในวันที่ 22 เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งในเอกสารได้กล่าวถึงการอนุญาตใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่งทั้ง 4 ประเภทและการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายพลังงานสำหรับการใช้ในประเภทต่าง ๆ โดยจากนิยามข้างต้นได้ทำการลดค่าการจำกัด  $B_f$  ไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 0.2 ตามสมการที่ 2.1 และข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC ได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1 สำหรับใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร

ความถี่ (เมกกะเฮิรต์)	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

### 2.3.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป

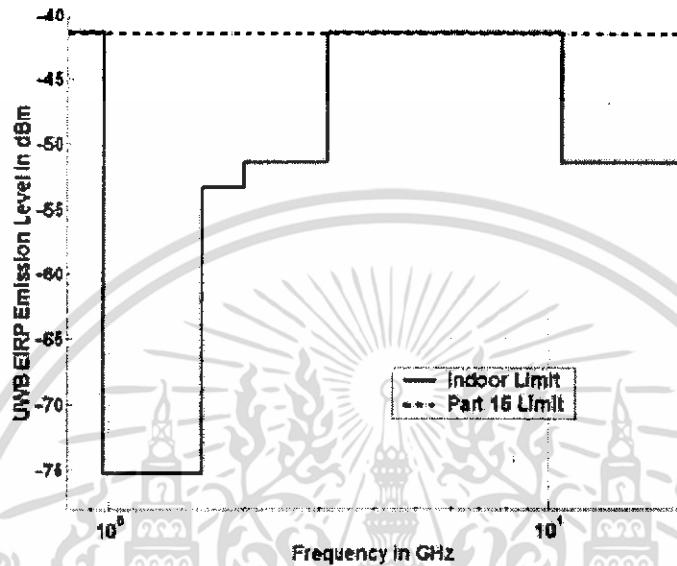
ปัจจุบันโครงสร้างของข้อกำหนดระบบแถบกว้างยิ่งในทวีปยุโรปอยู่ในช่วงรอข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวกับผลกระทบของระบบแถบกว้างยิ่งบนระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่โดยทางยุโรปนั้น บางส่วนของข้อกำหนดจะรัดกุมกว่าของทางสหรัฐอเมริกา เพราะทางด้านยุโรปนั้นในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ต้องแสดงให้เห็นว่าส่งผลกระทบน้อยหรือไม่ส่งผลกระทบต่อระบบเดิมที่มีอยู่โดยข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย ITU หรือ ETSI แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร

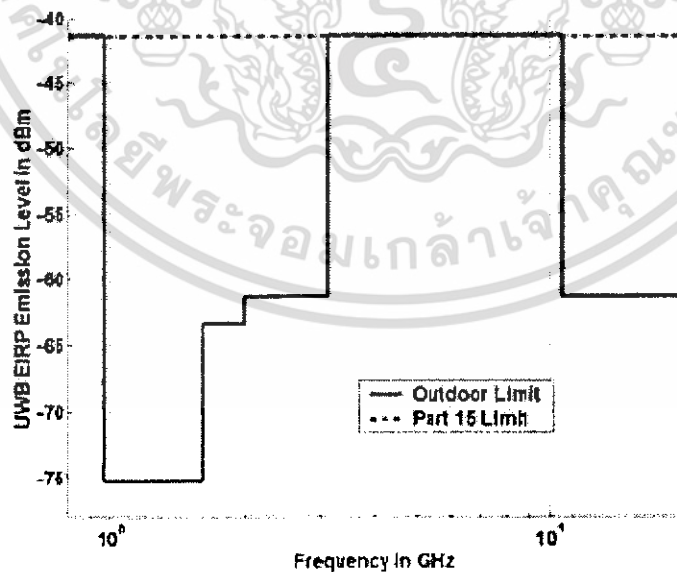
	Frequency range [GHz]		
	$f < 3.1$	$3.1 < f < 10.6$	$f > 10.6$
Indoor mask	$-51.3 + 87 \log(f / 3.1)$	-41.3	$-51.3 + 87 \log(f / 10.6)$
Outdoor mask	$-61.3 + 87 \log(f / 3.1)$	-41.3	$-61.3 + 87 \log(f / 10.6)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในรูปที่ 2.4 และ 2.5 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่าง FCC และ ETSI ภายในและภายนอกอาคารตามลำดับ



รูปที่ 2.4 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของระบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคาร



รูปที่ 2.5 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของระบบแถบกว้างยิ่งภายนอกอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 รูปแบบของสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

### 2.4.1 คำจำกัดความของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

ถ้าจะกล่าวถึงลักษณะเฉพาะ โดยทั่วไปของสัญญาณแถบกว้างยิ่งและระบบของสัญญาณแล้วก็น่าจะเกี่ยวกับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งและระบบการวัด เช่น การสื่อสารความเร็วสูงภายในบ้านหรือแม้กระทั่งอุปกรณ์เครือข่ายทางธุรกิจ โดยอุปกรณ์นั้นต้องทำงานอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz ซึ่งอุปกรณ์นั้นจะถูกออกแบบเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถที่จะทำงานได้ภายในอาคารเท่านั้นหรือต้องเข้ากันได้กับอุปกรณ์ขนาดมือถือ ซึ่งอาจจะถูกนำมาใช้ในลักษณะการสื่อสารแบบจุดต่อจุด โดยตัวแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งนั้นต้องทำการออกแบบและตรวจสอบเพื่อรับรองว่าการแพร่กระจายคลื่นในช่วงแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 20 dB ลงมาจากระดับสูงสุดของสเปกตรัมที่กำหนดไว้ต้องอยู่ภายในแถบความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่ง อีกทั้งช่วงแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดวัด ณ ตำแหน่งที่ต่ำกว่าระดับสูงสุดของการแพร่กระจายลงมา 10 dBm หรือเท่ากับ 500 MHz โดยระดับที่นิยมนิยมให้แพร่กระจายกำลังงานสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นถูกกำหนดไว้ที่  $-41.3 \text{ dBm} / \text{MHz}$  ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานกำหนดใช้รูปแบบของสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่ง แต่โดยทั่วไปมักจะนิยมใช้สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสามารถที่จะแยกเป็นประเภทต่างๆ ของสัญญาณได้ดังนี้

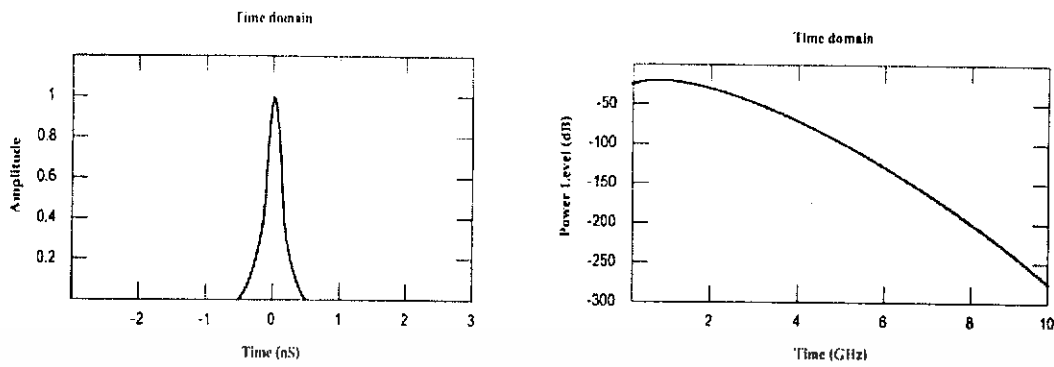
### 2.4.2 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์

ประเภทของรูปคลื่นที่เรียกว่ารูปคลื่นแบบเกาส์ (Gaussian waveform) นั้นได้มาจากกรณีที่มีนิยามทางคณิตศาสตร์เหมือนกับฟังก์ชันเกาส์ ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำโดยส่วนสำคัญของรูปคลื่นแบบเกาส์นั้นคือพัลส์แบบเกาส์ซึ่งมีนิยามเป็นไปตามสมการ 2.2 และแสดงรูปคลื่นของสัญญาณดังรูปที่ 2.6

$$s(t) = A \exp \left[ -\left( \frac{t - T_c}{\tau} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

โดยที่	$A$	คือ ขนาดของสัญญาณ
	$\tau$	คือ ค่าตัวแปรของสัญญาณพัลส์ (Pulse Shape Parameter)
	$T_c$	คือ ค่าคาบเวลาของสัญญาณชีพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

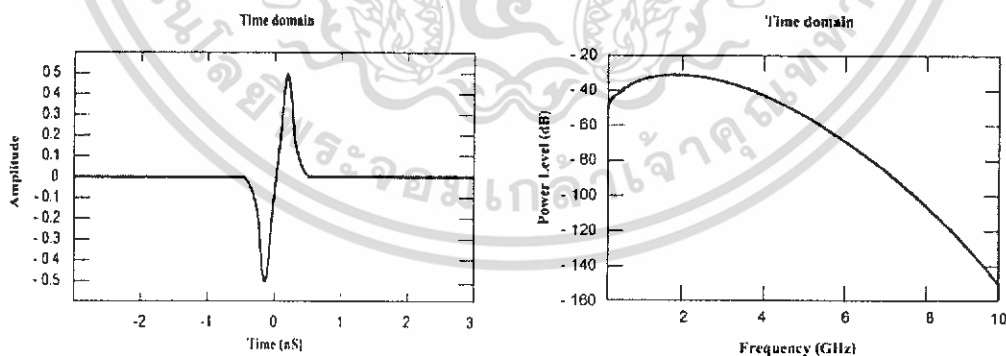


รูปที่ 2.6 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่

### 2.4.3 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์โมนอไซเคิล

สัญญาณพัลส์แบบเกาส์โมนอไซเคิล (Gaussian monocycle) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของพัลส์แบบเกาส์โดยมีรูปแบบตามสมการที่ 2.3 และแสดงรูปสัญญาณดังรูปที่ 2.7

$$s(t) = \frac{2A}{\tau} \sqrt{\exp} \times \exp^{-2x\left[\frac{(t-Tc)}{\tau}\right]^2} \quad (2.3)$$



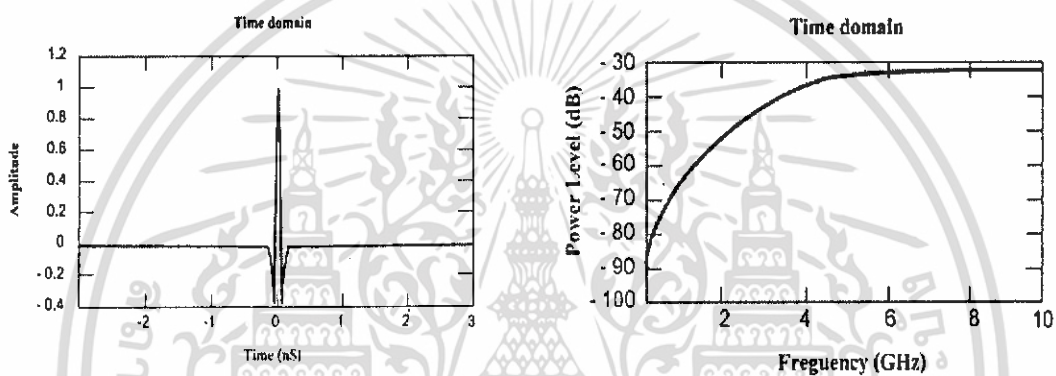
รูปที่ 2.7 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน โมนอไซเคิลทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์ดับเบิล

สัญญาณพัลส์แบบเกาส์ดับเบิล (Gaussian doublet) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอนุพันธ์อันดับสองของพัลส์แบบเกาส์โดยมีรูปแบบตามสมการที่ 2.4 และแสดงรูปสัญญาณดังรูปที่ 2.8

$$s(t) = \left[ 1 - 4\pi \left( \frac{t}{\tau_m} \right)^2 \right] \exp \left[ -2\pi \left( \frac{t}{\tau_m} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$



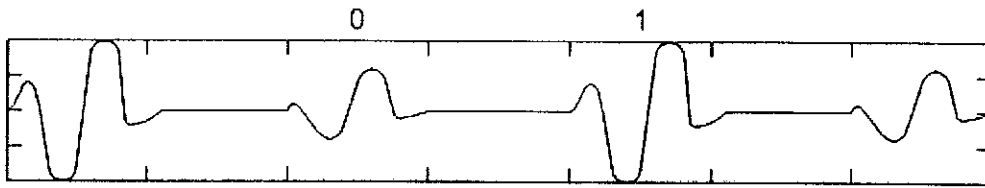
รูปที่ 2.8 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เขียนทับเล็ททั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่

### 2.5 เทคนิคการมอดูเลตในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งยวด

การส่งข้อมูลข่าวสารในระบบแถบกว้างยิ่งยวด มีความจำเป็นต้องทำการเพิ่มส่วนของข้อมูลข่าวสารที่เป็นดิจิทัลเข้าไปในสัญญาณพัลส์แบบอนาล็อกหรือในความหมายของการมอดูเลต โดยในระบบแถบกว้างยิ่งยวดนั้นมีวิธีการมอดูเลตอยู่มากมายที่ถูกนำมาใช้ ซึ่งในที่นี้จะขอ ยกตัวอย่างถึงวิธีการทั่วไปของการมอดูเลตดังนี้

#### 2.5.1 การมอดูเลตทางขนาดของพัลส์

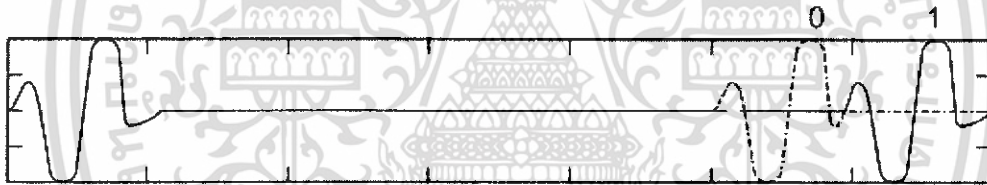
การมอดูเลตสัญญาณทางขนาดของพัลส์ (PAM) นั้นจะต้องอยู่บนพื้นฐานการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลกับขนาดของสัญญาณพัลส์ โดยที่ในรูปที่ 2.9 แสดงสัญญาณอูตราไวด์แบนด์ที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ ตามขนาดโดยมีทั้งหมด 4 ระดับ



รูปที่ 2.9 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามขนาด 4 ระดับ

### 2.5.2 การมอดูเลตทางตำแหน่งของพัลส์

การมอดูเลตสัญญาณทางตำแหน่ง (PPM) นั้นจะทำการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลตามตำแหน่งของสัญญาณพัลส์โดยที่ตำแหน่งของสัญญาณพัลส์ที่ใช้แทนสัญญาณข้อมูลสามารถมีได้สองตำแหน่งหรือมากกว่านั้น โดยมีในรูปที่ 2.10 แสดงการมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามตำแหน่งปกติ (Nominal – Position) และบิต “1” จะแทนตำแหน่งพัลส์ที่อยู่ก่อนตำแหน่งปกติ โดยช่วงเวลาประวิงเวลาระหว่างตำแหน่งของสัญญาณทั้งสองต้องมีค่าที่มากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการแทรกสอดกันระหว่างสัญญาณอิมพัลส์



รูปที่ 2.10 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตทางตามตำแหน่งของพัลส์

### 2.5.3 การมอดูเลตแบบเฟส

การมอดูเลตสัญญาณแบบสองเฟส (Bi-phase) นั้นจะอยู่พื้นฐานของการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลตามเฟสของสัญญาณพัลส์โดยที่ในกรณีนี้จะแทนสัญญาณข้อมูลหนึ่งบิตด้วยสัญญาณพัลส์หนึ่งลูกคลื่น ซึ่งการมอดูเลตสัญญาณพัลส์แบบสองเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแบบสองเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ทฤษฎีสายอากาศไบโคนิคอล (Biconical)

เป็นรูปร่างลักษณะที่ไม่ซับซ้อนที่สามารถใช้กับคุณสมบัติของบรอดแบนด์ได้ รูปร่างของสายอากาศไบโคนิคอลนั้นเป็นรูปทรงกรวยที่มีขนาดไม่จำกัดวางเข้าด้วยกันไว้ดังในรูปที่ 2.12(a) นั้นแสดงในรูปของสายส่งเมื่อใช้ค่าแรงดันอินพุต( $V_i$ )ที่ขั้วจะมีผลออกมาเป็นคลื่นทรงกลมดังในรูปที่ 2.12 (b) ซึ่งในผลสะท้อนในจุดใดๆ ( $r, \theta = \theta_c, = \phi$ ) จะมีกระแส ( $I$ ) ตามพื้นผิวของรูปทรงกรวยและแรงดัน ( $V$ ) ระหว่างทรงกรวยทั้งสอง (รูปที่ 2.13) สามารถหาคุณลักษณะพิเศษของอิมพีแดนซ์ (impedance) ของทรงเรขาคณิตนั้น ดังแสดงการหาค่าตัวแปรระยะของทรงกรวยที่จะทำให้ใช้เป็นสายส่งได้

### 2.6.1 สนามการแพร่กระจายคลื่น

เริ่มต้นโดยการวิเคราะห์เป็นอย่างแรกหาการแพร่กระจายคลื่นไฟฟ้า ( $E$ ) และการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( $H$ ) ระหว่างทรงกรวยซึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้นแบบโหมด TEM สนามไฟฟ้า ( $E$ ) และสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) มีการแพร่แบบเส้นตรงโดยทิศทางตัดขวางกัน ถ้ากำหนดจุดหลายๆจุด ( $r, \theta, \phi$ ) ค่าแรงดันและกระแสที่อยู่ในจุดต่างๆบนพื้นผิวทรงกรวย ( $r, \theta = \theta_c, = \phi$ ) จากกฎของฟาราเดย์เราสามารถเขียนได้ดังนี้

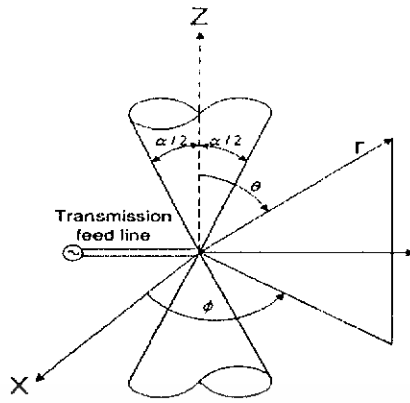
$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (2.5)$$

ซึ่งถ้าหากแสดงให้อยู่ในพิกัดทรงกลมและซึ่งในสนามไฟฟ้า ( $E$ ) อย่างเดียวมี  $E_\theta$  เป็นตัวประกอบอิสระคือ  $\phi$  จะได้

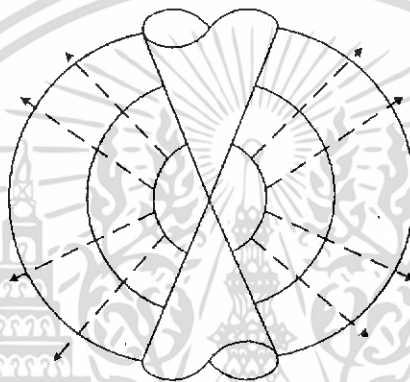
$$\nabla \times E = \hat{a}_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE_\theta) = -j\omega\mu (\hat{a}_r H_r + \hat{a}_\theta H_\theta + \hat{a}_\phi H_\phi) \quad (2.6)$$

โดยที่สนามแม่เหล็ก( $H$ ) มีส่วนประกอบในทิศทาง  $H_\phi$  อย่างเดียวจำเป็นสำหรับโหมด TEM  $E_\phi$  ในสมการที่ (2.6) สามารถเขียนได้

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE_\theta) = -j\omega\mu H \quad (2.6a)$$



(a) รูปร่างไบโคนิคอล



(b) คลื่นทรงกลม

รูปที่ 2.12 (a) และ (b) สายอากาศรูปเลขาคณิตและการแพร่กระจายคลื่นแบบทรงกลม

สำหรับกฎของแอมแปร์ (Ampere) มีดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{H} = +j\omega \epsilon \mathbf{E} \quad (2.7)$$

ซึ่งแสดงในพิกัดทรงกลมและมีส่วนประกอบในทิศทางของสนามไฟฟ้า  $E_\theta$  อย่างเดียวและส่วนในทิศทางของสนามแม่เหล็ก  $H_\phi$  เป็นตัวประกอบอิสระสำหรับ  $\phi$  ก็จะได้

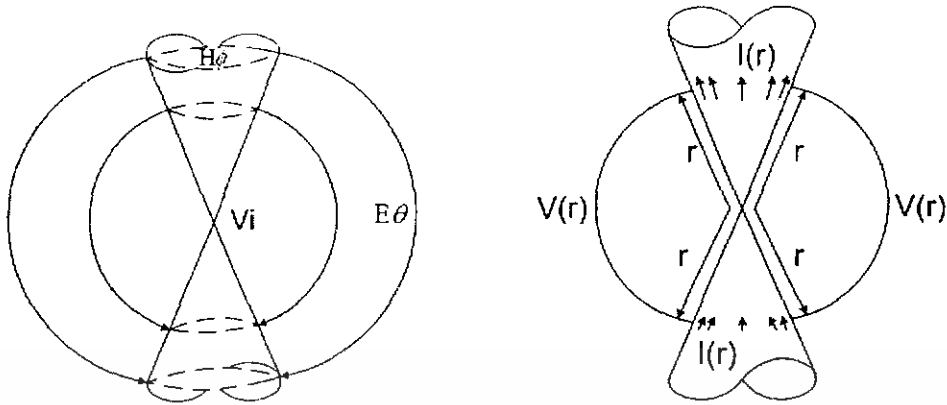
$$\hat{a}_r = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} (r \sin \theta H_\phi) \right] - \hat{a}_\theta \frac{1}{r \sin \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (r \sin \theta H_\phi) \right] = +j\omega \epsilon (\hat{a}_\theta E_\theta) \quad (2.8)$$

ซึ่งจะเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (r \sin \theta H_\phi) = 0 \quad (2.9a)$$

$$\frac{1}{r \sin \theta r} \frac{\partial}{\partial \theta} (r \sin \theta H_\phi) = -j\omega \epsilon E_\theta \quad (2.9b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าและความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของสายอากาศไบโคนิคอล

ซึ่งจะเขียนใหม่จากสมการ(2.9b)ได้เป็น

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rH_\phi) = -j\omega \epsilon E_\theta \quad (2.10)$$

และเมื่อนำไปแทนในสมการ (2.6a) จะได้สมการในทิศทาง  $H_\phi$  ดังนี้

$$\frac{1}{j\omega \epsilon r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (rH_\phi) \right] = -j\omega \mu H_\phi \quad (2.11)$$

หรือ

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} (rH_\phi) = -\omega^2 \mu \epsilon (rH_\phi) = -k^2 (rH_\phi) \quad (2.11a)$$

หรือ การแก้สมการของ (2.11a) ได้โดยแทนสมการที่ (2.9a) ที่เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับสมการ (2.11a) เมื่อ  $\theta$  แปรผันของสนามแม่เหล็กในทิศทาง  $H_\phi$  จะได้รูปสมการคือ

$$H_\phi = \frac{f(r)}{\sin \theta} \quad (2.12)$$

สำหรับการแก้สมการของ(2.11a) ซึ่งต้องกำหนดให้เหมาะสมเหมือนกับสมการที่(2.12) และแสดงการแพร่กระจายคลื่นคือ

$$H_\phi = \frac{H_0}{\sin \theta} \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.13)$$

ซึ่ง

$$f(r) = H_0 \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.13a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนการแ่การแพร่กระจายคลื่นที่ไม่เหมาะสมกับโครงสร้างที่ยาวมากเมื่อสนามในโหมด TEM ดูจากสนามไฟฟ้าที่มีสนามแม่เหล็กที่เป็นอิสระกันและเขียนได้ดังนี้

$$E_\theta = \eta H_\phi = \eta \frac{H_0}{\sin \theta} \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.14)$$

ในรูปที่ 2.13 เราสามารถเห็นเส้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในอากาศ (free space) ระหว่างโครงสร้างทรงกรวยทั้งสองเมื่อจ่ายแรงดันให้จุดที่ตรงกันของทรงกรวยที่มีระยะรัศมี (r) จากจุดศูนย์กลางพิสูจน์โดย

$$V(r) = \int_{\alpha/2}^{\pi-\alpha/2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_{\alpha/2}^{\pi-\alpha/2} (\hat{a}_\theta E_\theta) \cdot (\hat{a}_r r d\theta) = \int_{\alpha/2}^{\pi-\alpha/2} E_\theta r d\theta \quad (2.15)$$

หรือโดยใช้สมการที่ (2.6)

$$V(r) = \eta H_0 e^{-jkr} \int_{\alpha/2}^{\pi-\alpha/2} \frac{d\theta}{\sin \theta} = \eta H_0 e^{-jkr} \ln \left[ \frac{\cot(\alpha/4)}{\tan(\alpha/4)} \right]$$

$$V(r) = 2\eta H_0 e^{-jkr} \ln \left[ \cot\left(\frac{\alpha}{4}\right) \right] \quad (2.16a)$$

เมื่อกระแสที่ไหลผ่านพื้นผิวทรงกรวยที่มีระยะห่างรัศมี (r) จากจุดศูนย์กลางพิสูจน์โดยใช้สมการที่ (2.13) ดังนี้

$$I(r) = \int_0^{2\pi} H_0 r \sin \theta d\phi = H_0 e^{-jkr} \int_0^{2\pi} d\phi = 2\pi H_0 e^{-jkr} \quad (2.17)$$

ในรูปที่ 2.13 (b) เราสามารถเห็นแรงดันและกระแสไหลในรัศมีสั้นจากจุดศูนย์กลาง

## 2.7 พารามิเตอร์ของสายอากาศ (Antenna Parameter)

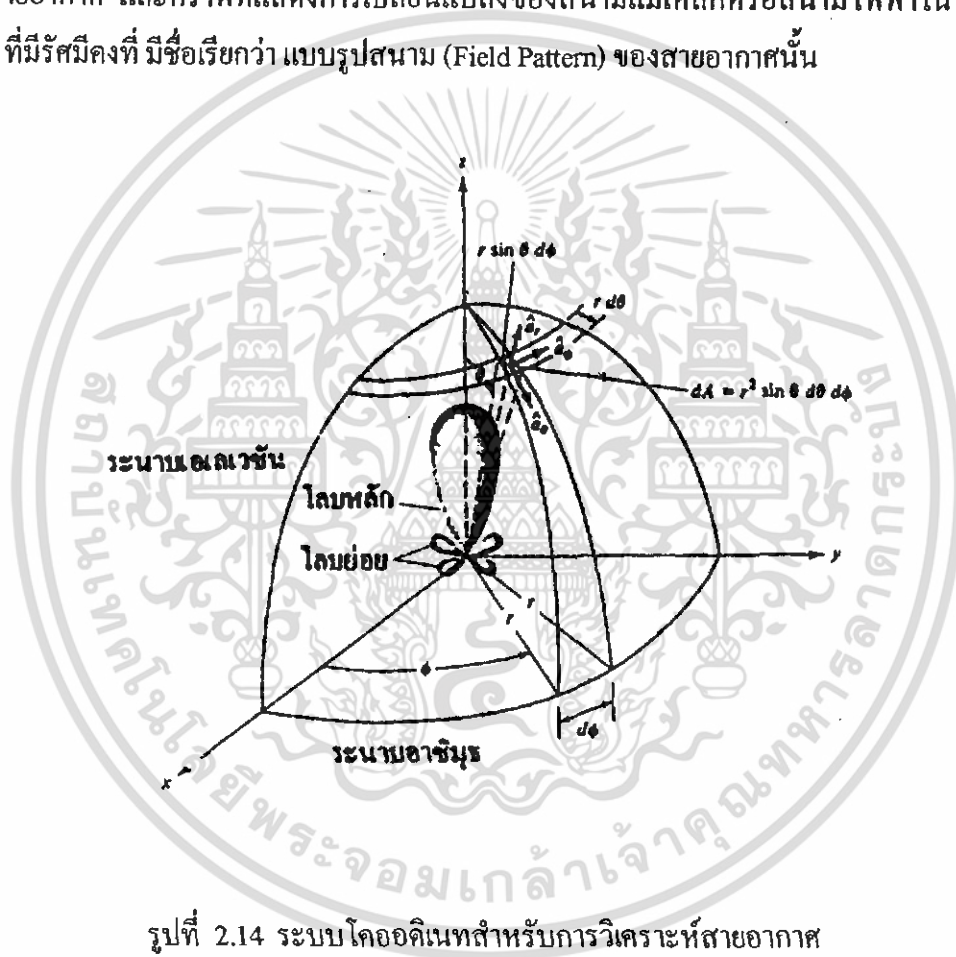
### 2.7.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้ มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอธิบายคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือ โพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงาน เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.14 แสดงระบบ โคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น เพื่อแสดง กำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



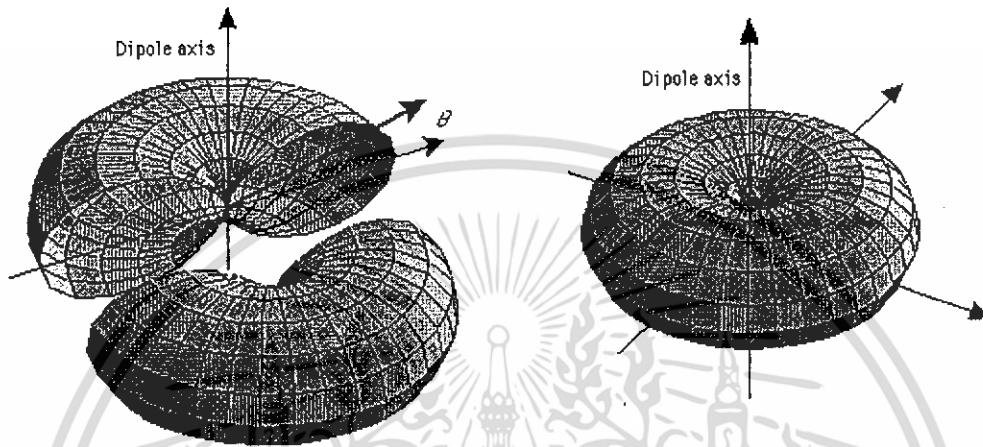
รูปที่ 2.14 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

### 2.7.2 แพทเทอร์นแบบไอโซโทรปิก ไดรেকชันเนล และออนนิไดเรกชันเนล

ตัวแผ่คลื่นไอโซโทรปิก (Isotropic Radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น พอยท์ซอร์ส (Point Source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวแทนเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบออมินิไดเรกชันแนล (Omni directional Antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้มีดังแสดงในรูป 2.15



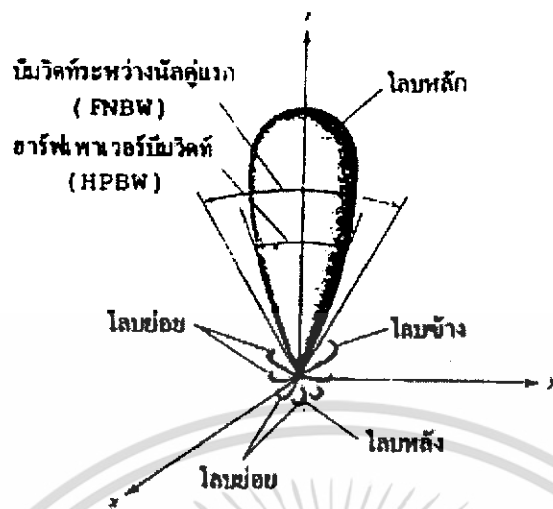
รูปที่ 2.15 แพทเทอรันของสายอากาศชี้ทิศทาง (ออมินิไดเรกชันแนล)

### 2.7.3 แพทเทอรันหลัก

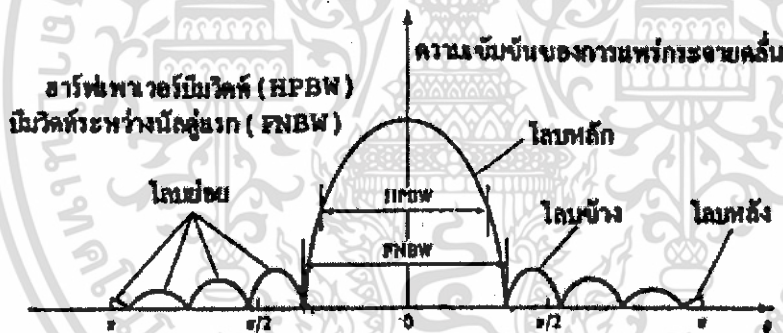
เรามักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแพทเทอรันหลัก (Principal Pattern) ของสนามไฟฟ้า  $E$  และสนามแม่เหล็ก  $H$  สำหรับสายอากาศลิเนียร์ลิโพลาริเซชัน (Linearly Polarization) แพทเทอรันในระนาบ  $E$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแพทเทอรันในระนาบ  $H$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรง

### 2.7.4 โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

โลบของการแพร่กระจายคลื่น ( Radiation Lobe ) เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูป 2.16 แสดงแบบรูปแบบโพลาร์ (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นโลบต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 2.16 โลบต่างๆและเบีมวิดท์ของแบบรูปสายอากาศ



รูปที่ 2.17 แบบรูปในแบบเชิงเส้น

โลบหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นโลบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูป 2.17 มีโลบหลักอยู่ในทิศทาง  $\theta=0$  สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีโลบหลักมากกว่าหนึ่งโลบ เช่น สายอากาศแยกเบีม (Split Beam Antenna)

โลบย่อย (Minor Lobe) ได้แก่โลบอื่นๆนอกเหนือไปจากโลบหลัก

โลบข้างหรือไซด์โลบ (Side Lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ติดกับโลบหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโลบหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลบหลัง (Back Lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโลบหลัก ปกติแล้วโลบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ

ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโลบเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับของโลบย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานใน โลบที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโลบหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของไซด์โลบ (Side Lobe Ratio) หรือระดับของไซด์โลบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า  $-20$  dB

### 2.7.5 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คำจำกัดความของค่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $U$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W / หน่วยมุมตัน)

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

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2 \cdot \eta} \cdot \left[ |E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.19)$$

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

$N$  = อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึง ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน กำลังงานทั้งหมดนี้ หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นตาม (2.18) และ (2.19) ตลอดมุมตัน  $4\pi$  ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางต่างๆ เทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_0(\text{dBi}) = 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}}\right) \approx 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi(180/\pi)^2}{\theta_E \theta_H}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{41253}{\theta_E \theta_H}\right) \quad (2.21)$$

เมื่อ  $U_{\max}$  = ค่าสูงสุดของความเข้มการแผ่กระจายคลื่น

$P_{\text{rad}}$  = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (2.22)$$

### 2.7.7 บีมวิทท์ (Beamwidth)

บีมวิทท์ คือ จัดเป็นการวัดความกว้างของลำคลื่น เพื่ออธิบายถึงโคเรลิตีวิตี้ของสายอากาศได้ดี โดยกำหนดให้มีหน่วยเป็นมุมที่คิดจากกรณีดังนี้

- ที่จุดซึ่งค่าพลังงานในการแผ่คลื่นลดลงเหลือครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุด
- หรือจุดที่ค่าความเข้มสนามเหลือ  $1/\sqrt{2}$  หรือ 0.707 เท่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด
- หรือจุด 3 dB บนรูปแบบการแผ่คลื่นจะได้สมการดังนี้

$$\theta_{BH} = 2 \cos^{-1} \left( \frac{1}{2 \left( 1 + \frac{k_0 w}{2} \right)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

$$\theta_{BE} = 2 \cos^{-1} \left( \frac{7.03}{(3k_0^2 L^2 + k_0 h^2)} \right)^{-1} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$\theta_{BH}$  คือ มุมที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของบีมหลักในแนวระนาบของสนามแม่เหล็ก

$\theta_{BE}$  คือ มุมที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของบีมหลักในแนวระนาบของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.8 แบนด์วิดท์ (Bandwidth : BW )

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศในมาตรฐานที่กำหนดให้อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพของการแพร่พลังงาน อัตราการขยาย อิมพีแดนซ์ รูปแบบการแพร่พลังงาน ความกว้างลำ (Beamwidth) การโพลาไรซ์เซชัน และระดับพลู้อย (Side Lobe) เป็นต้น ให้อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติที่ความถี่ที่ออกแบบไว้ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านั้นผิดไปจากข้อกำหนด หรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้าง มักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ใช้งานได้ทางด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานทางด้านต่ำ แบนด์วิดท์มักจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้นดังสมการ

$$\%BW = \left( \frac{f_H - f_L}{f_r} \right) \times 100 \quad (2.25)$$

เมื่อ

$BW$  คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศ

$f_H$  คือ ความถี่ที่ใช้งานได้ทางด้านสูง

$f_L$  คือ ความถี่ที่ใช้งานได้ทางด้านต่ำ

$f_r$  คือ ความถี่กลางของแบนด์วิดท์

### 2.7.9 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศเป็น 3 ส่วน คือสนามรีแอคทีฟระยะใกล้ (Reactive – Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating – Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field)

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

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอคทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้น แปรผันตามระยะทางจากสายอากาศเมื่อสายอากาศมี

ขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง  $0.62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R \leq 2D^2/\lambda$

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

## 2.8 การวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณ UWB

### 2.8.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับช่องสัญญาณแบบอุลตราไวด์แบนด์

การวิเคราะห์ระบบ UWB โดยใช้สูตรของฟรีด (Friis' Formula)

ในบทความนี้ได้ทำการศึกษาถึงการแพร่กระจายของสัญญาณในระบบอุลตราไวด์แบนด์ โดยในระบบ แบนโรแบนด์ (narrowband) โดยปรกติมันจะถูกกำหนดโดยใช้ Friis' transmission formula แต่มันไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับการส่งสัญญาณในระบบอุลตราไวด์แบนด์ โดยในสูตรนั้นมันมีข้อจำกัดในเรื่องของความถี่ แต่อย่างไรก็ตามรูปร่างของสัญญาณนั้น อาจจะผิดเพี้ยนไปเนื่องจาก คุณสมบัติในการตอบสนองความถี่ของสายอากาศโดยได้มีการปรับปรุงสมการของฟรีด (Friis') เพื่อวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ โดยสมการของฟรีด (Friis') สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ



รูปที่ 2.18 ลักษณะการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณ

$$G_{\text{Friis}}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} = G_t(f) \cdot G_r(f) \cdot G_f(f) \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $P_t(f)$  และ  $P_r(f)$  คือกำลังของสัญญาณด้านส่งและสัญญาณด้านรับในรูปของกำลังงาน และ  $G_t(f)$  และ  $G_r(f)$  เป็นอัตราขยายของสัญญาณด้านส่งและสัญญาณด้านรับในรูปของเดซิเบล

$$G_f(f) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi d f}\right)^2 \quad (2.27)$$

โดยที่  $G_f(f)$  คืออัตราขยายของช่องสัญญาณในอวกาศว่าง (Free Space) หรือทิศทางที่มองเห็น (Line of sight, LOS) หรือเขียนอยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันคังสมการ

$$H_{e-friis}(f, d) = H_f(f, d)H_r(f)H_t(f) \quad (2.28)$$

โดย  $H_f$  คือทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของอวกาศว่างและ  $H_r$  และ  $H_t$  คือทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของสายอากาศด้านส่งและด้านรับและสำหรับกรณี ไอโซโทรปิก (isotropic)

$$H_{e-Friis', Iso}(f) = H_f \cdot H_i \quad (2.29)$$

และสามารถคำนวณหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของอวกาศว่างได้จากสมการที่ 2.30

$$H_f(f, d) = \frac{c}{4\pi d f} \exp(-jkd) \quad (2.30)$$

โดย  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

แต่สมการ Friis's transmission formula ตามสมการที่ (2.28) เมื่อนำมาใช้กับระบบสื่อสารที่เป็นแบบไวต์แบนด์ เช่น อุลตราไวต์แบนด์ จะพบว่ามีความขัดแย้งในเรื่องของความถี่ที่มีช่วงกว้าง ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมการของ Friis's transmission formula เป็นตามสมการที่ (2.31) ซึ่งเรียกว่า Extension Friis's transmission formula โดยมีการแต่จะเขียนอยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน โดยการเพิ่ม

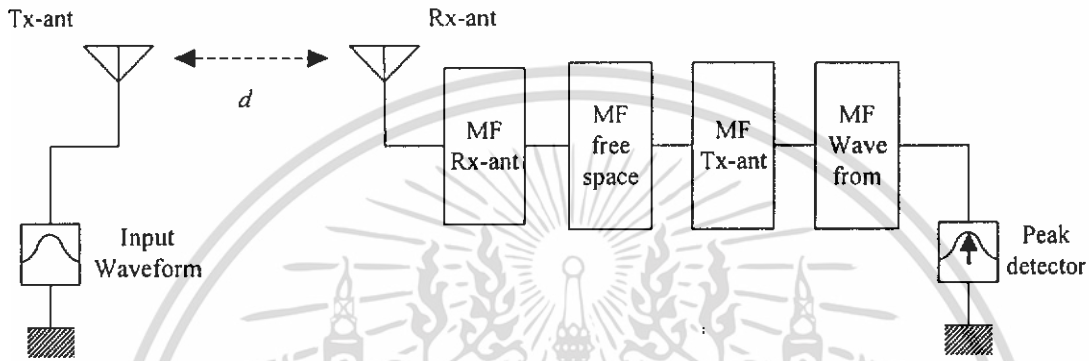
ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของ Generator pulse filter,  $H_g$ ,

$$H_{e-friis}(f, d) = H_g(f, d)H_r(f)H_t(f)H_i(f) \quad (2.31)$$

และผลตอบสนองทางอิมพัลส์ของอวกาศว่างสามารถคำนวณได้จาก Inverse Fourier Transform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $H_f$  นั้นเป็นฟังก์ชันการส่งผ่านสัญญาณในอากาศ  $H_t(f)$  และ  $H_r(f)$  เป็นฟังก์ชันการส่งผ่านสัญญาณของสายอากาศตัวรับ และตัวส่งตามลำดับ โดยที่สายอากาศด้านรับนั้นได้ใช้ Matched filter ในการกรองความถี่  $H_{Friis}(f)$  และถูกนำมาหาค่าสูงสุดของสัญญาณเอาท์พุททางด้านรับดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.19 บล็อกไดอแกรมของระบบการส่งสัญญาณที่ได้มีการเพิ่มเติมจากสูตรของฟรีต (Friis' transmission) เพื่อนำมาใช้กับระบบอุลตราไวด์แบนด์

$$H_{MF}(f) = \frac{\sqrt{2fb}H_{e-Friis}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}^*(f)|^2 df}} \tag{2.32}$$

และสำหรับสมการไอโซโทรปิก(Isotropic)

$$H_{MF,Iso}(f) = \frac{\sqrt{2fb}H_{e-Friis,Iso}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis,Iso}^*(f)|^2 df}} \tag{2.33}$$

ซึ่งจาก สมการที่ได้ ค่ากำลังของสัญญาณรบกวนที่ได้จะมีค่าคงที่ ดัง สมการดังนี้

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_{MF}(f)|^2 df = 2fb \tag{234}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในกรณีนี้ รูปร่างของสัญญาณเอาต์พุต  $E$ , และสเปกตรัมทางด้านรับจะได้ เป็น  $h_{e-Friis}(t)$  และ  $H_{e-Friis}(f)$  ตามลำดับ รูปร่างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มาจาก แมตซ์ฟิลเตอร์  $v_{MF}(t)$  จะเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} v_{MF}(t) &= h_{e-Friis}(t) * h_{MF}(t) \\ &= \frac{\sqrt{2fb} h_{e-Friis}(t) * h_{e-Friis}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{e-Friis}^2(t) dt}} \end{aligned} \quad (2.35)$$

และสำหรับกรณี ไอโซโทรปิก(Isotropic)

$$\begin{aligned} v_{MF,Iso}(t) &= h_{e-Friis}(t) * h_{MF,Iso}(t) \\ &= \frac{\sqrt{2fb} h_{e-Friis,Iso}(t) * h_{e-Friis,Iso}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{e-Friis,Iso}^2(t) dt}} \end{aligned} \quad (2.36)$$

สำหรับสเปกตรัมของเอาต์พุตที่มาจากแมตซ์ฟิลเตอร์  $V_{MF}(f)$

$$\begin{aligned} V_{MF}(f) &= H_{e-Friis}(f) H_{MF}(f) \\ &= \frac{\sqrt{2fb} H_{e-Friis}(f)^2}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df}} \end{aligned} \quad (2.37)$$

ค่าสูงสุดของสัญญาณจะได้เป็น

$$\begin{aligned} \max_t v_{MF}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} V_{MF}(f) df \\ &= \sqrt{2fb} \int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df \end{aligned} \quad (2.38)$$

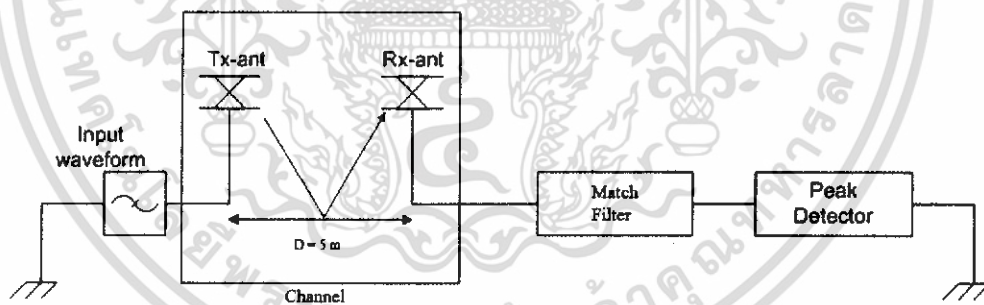
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.38) เป็นการปรับปรุงสมการของฟรีสโดยการเพิ่มเติมไป 3 ค่า ซึ่งถูกเรียกโดยรวมว่า คุณสมบัติของความถี่เมื่อมีการแพร่กระจายในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร และสเปกตรัมของสัญญาณที่ใช้ในการส่งซึ่งนำมาปรับปรุงอัตราการขยายรวม โดยผลที่ได้จะเป็นดังสมการที่ (2.38) สำหรับกรณี โดยทั่วไปที่มีการใช้สายอากาศแบบไอโซโทรปิก (isotropic) นั้น จะประกอบด้วย  $H_{iso}(f) = 1$  อัตราการขยายในการส่งในย่านอุลตราไวด์แบนด์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$G_{UWB} = \frac{\max_t v_{MF}(t)}{\max_t v_{MF,iso}(t)} \quad (2.39)$$

### 2.8.2 Matched filter

ในสัญญาณด้านรับมีการนำเอาแมตซ์ฟิลเตอร์มาใช้ในปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณด้านรับหรืออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) โดยดูจากบล็อกไดอะแกรมจะอยู่หลังจากสายอากาศด้านรับ แมตซ์ฟิลเตอร์ ในการกรองความถี่  $H_{MF}(f)$  สามารถหาคำนวณได้สมการที่ (2.40)



รูปที่ 2.20 บล็อกไดอะแกรมของระบบการส่งสัญญาณ

$$H_{MF}(f) = \frac{H_{e-Fris}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Fris}^*(f)|^2 df}} \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากสมการที่ ได้ ค่ากำลังของสัญญาณรบกวนที่ได้จะมีค่าคงที่ ดังสมการที่ (2.41)

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_{MF}(f)|^2 df = 1 \quad (2.41)$$

โดยในกรณีนี้ รูปร่างของสัญญาณเอาต์พุต  $E$ , และสเปกตรัมทางด้านรับจะได้เป็น  $h_{e-Friis}(t)$  และ  $H_{e-Friis}(f)$  ตามลำดับ รูปร่างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มาจาก แมตซ์ฟิลเตอร์  $v_{MF}(t)$  จะเป็นดังนี้

$$v_{MF}(t) = h_{e-Friis}(t) * h_{MF}(t) \quad (2.42)$$

$$= \frac{h_{e-Friis}(t) * h_{e-Friis}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{e-Friis}^2(t) dt}} \quad (2.43)$$

สำหรับสเปกตรัมของเอาต์พุตที่มาจากแมตซ์ฟิลเตอร์  $V_{MF}(f)$

$$V_{MF}(f) = H_{e-Friis}(f) H_{MF}(f) \quad (2.44)$$

$$= \frac{H_{e-Friis}(f)^2}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}^*(f)|^2 df}} \quad (2.45)$$

ค่าสูงสุดของสัญญาณจะได้เป็น

$$\max v_{MF}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{MF}(f) df \quad (2.46)$$

$$= \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}^*(f)|^2 df} \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 การส่งผ่านคลื่นสัญญาณ

ผลกระทบต่อลักษณะการส่งผ่านสัญญาณ คือ การสะท้อน (Reflection) การหักเห (Refraction) การเลี้ยวเบน (Diffraction) การกระจาย (Scattering) การสอดแทรก (Interference)

### 2.9.1 การสะท้อน (Reflection)

ของคลื่นสัญญาณเกิดขึ้นเมื่อคลื่นมีการเคลื่อนที่จากสื่อกลางประเภทหนึ่งไปสู่อีกสื่อกลางอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สื่อกลางชนิดที่สองจะต้องมีพื้นผิวที่ใหญ่มากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือคลื่นบางส่วนจะมีการสะท้อนออกและส่วนที่เหลือก็เคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่สื่อกลางชนิดที่สอง ตัวอย่างของการสะท้อนของคลื่นที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งก็เช่น การที่คลื่นเคลื่อนที่เข้ากระทบกำแพงหรือพื้นผิวโลกของโลก เป็นต้น

### 2.9.2 การหักเห (Refraction)

ของคลื่นวิทยุเกิดขึ้นเมื่อคลื่นวิทยุเดินทางจากตัวกลางหนึ่ง ไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าไม่เหมือนกัน โดยที่มุมตกกระทบ ณ ตัวกลางที่สองไม่เป็นมุมฉาก พลังงานคลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับเข้าไปยังตัวกลางที่หนึ่ง โดยมีมุมตกเท่ากับมุมสะท้อน แต่ยังมีพลังงานคลื่นอีกส่วนหนึ่งเดินทางเข้าไปยังตัวกลางที่สอง การเดินทางเข้าไปยังตัวกลางที่สองนี้ จะไม่เป็นแนวเส้นตรงต่อไปจากแนวทางเดินในด้านตัวกลางแรก แต่จะหักเหออกไปมากขึ้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวกลางทั้งสอง สาเหตุที่เกิดการหักเหของทางเดินของคลื่นวิทยุเนื่องจาก ความเร็วของคลื่นวิทยุในตัวกลาง ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกันจะไม่เท่ากัน เช่น คลื่นวิทยุจะเดินทางในน้ำบริสุทธิ์จะช้ากว่าเดินทางในอากาศถึง 9 เท่า เป็นต้น

### 2.9.3 การเลี้ยวเบน (Diffraction)

ของคลื่นเกิดขึ้นในกรณีที่มีวัตถุบางอย่างที่มีขอบกีดขวางอยู่ระหว่างอุปกรณ์รับและอุปกรณ์ส่งสัญญาณ ทำให้ไม่มีเส้นทางตรง (line-of-sight) ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองที่คลื่นสัญญาณสามารถส่งผ่านได้ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นก็คือคลื่นสัญญาณเลี้ยวอ้อมวัตถุนั้น ๆ การเลี้ยวเบนของสัญญาณนี้เองที่ทำให้เรายังสามารถรับสัญญาณได้บางส่วนถึงแม้ว่าเครื่องรับสัญญาณจะถูกบดบังด้วยสิ่งกีดขวางด้วยเหตุนี้การเลี้ยวเบนของคลื่นสัญญาณจึงมีประโยชน์ต่อการส่งผ่านสัญญาณ

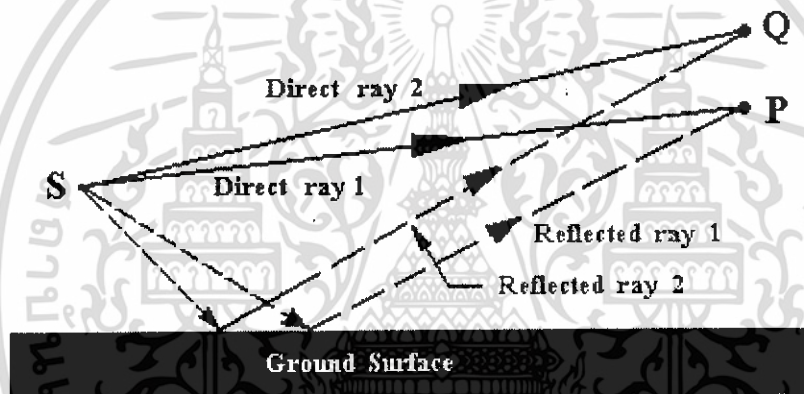
### 2.9.4 การกระจาย (Scattering)

เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่กระทบวัตถุหรือพื้นผิวที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณ ทำให้คลื่นสัญญาณเกิดการกระจายของสัญญาณ เช่น ป้ายจราจร เสาโคมไปตามถนน ใบไม้และพื้นผิวที่ขรุขระ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.5 การสอดแทรก (Interference)

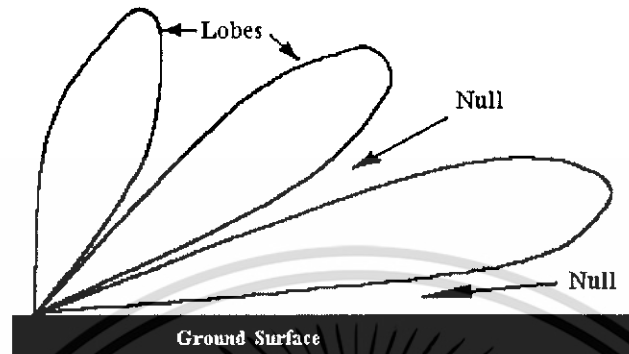
การสอดแทรก ของ คลื่น เรื่องนี้ เกี่ยวข้องกับ คุณสมบัติ ทาง optical ของ คลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า เรา พิจารณา เรื่อง Interference ต่อไป สิ่งนี้ เกิดขึ้น เมื่อ 2 คลื่น ที่ ออกจาก แหล่ง จำย อันเดียว และ เดินทาง มา ด้วย เส้นทาง ที่ ต่างกัน มาถึง จุด หนึ่ง พร้อมกัน สิ่งนี้ เกิดขึ้น บ่อยมาก ในการ เดินทาง ของ High - frequency Sky - Wave propagation และใน Microwave space - wave propagation ( กรณี ของ แบบนี้ จะ อธิบาย ใน หัวข้อนี้ ) มันเกิดขึ้น เมื่อ สายอากาศ ของ ไมโครเวฟ ถูก ตั้ง อยู่ใกล้กับ พื้นดิน และ คลื่นที่ มา ถึง จุดรับ ไม่ใช่ เพียง จาก ทิศทางตรง แต่ เป็น คลื่นที่ หลังจาก สะท้อน จาก พื้นดิน ด้วย ดังแสดง ในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การ Interference ของ direct rays และ ground - reflected rays

จากรูปที่ 2.21 จะเห็นได้ว่า เส้นทางของคลื่นตรง ( Direct ray ) สั้นกว่า เส้นทาง จาก การ สะท้อน ( Reflected ray ) สำหรับ บางครั้ง การ รวมกัน ของ ความถี่ และ ความสูง ของ สายอากาศ เหนือ พื้นโลก ความ แตกต่าง ระหว่าง เส้นทาง Direct ray 1 กับ Reflected ray 1 เท่ากับ ประมาณ ครึ่ง ความยาวคลื่น สิ่งนี้ จะเป็น การหักล้าง อย่าง สมบูรณ์ ณ จุดรับ P ถ้า พื้นโลก เป็นตัวสะท้อนที่สมบูรณ์ และหักล้างกันบางส่วนสำหรับพื้นโลกที่ไม่สมบูรณ์ ส่วนจุดรับอื่น ๆ (P) ด้วยเหตุที่เส้นทางแตกต่างระหว่าง Direct ray 2 กับ Reflected ray 2 มีค่าเท่ากับหนึ่ง ความยาวคลื่นพอดี ในกรณีนี้การเสริมกันของคลื่นที่รับได้จะเกิดขึ้น ณ จุดนี้ และจะเป็นเฉพาะ บางส่วนหรือทั้งหมด ขึ้นอยู่กับความสามารถการสะท้อนของพื้นโลก การเกิดอย่างต่อเนื่องของจุด นี้มากกว่าหนึ่งอัน ที่จุดอื่น ๆ อาจพบได้อีก จะได้เป็น Interference Pattern ขึ้น ซึ่งประกอบด้วยจุด

หักล้างกัน ( cancellation ) และจุดเสริมกัน ( Reinforcement ) สลับกัน Pattern ของรูปแบบดังกล่าวนี้ แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 Radiation Pattern with interference

กราฟจากรูปที่ 2.22 คือ จุดต่อกันของ Electric intensity ที่เท่า ๆ กัน pattern นี้เกิดขึ้นโดยสายอากาศ ณ จุดความสูงจากพื้นโลกประมาณ 1 ความยาวคลื่น ด้วยการสะท้อนจากพื้นโลก ( ถือว่าเป็นแผ่นระนาบและตัวนำที่สมบูรณ์ ) ทำให้เกิดการสอดแทรก Pattern ดังแสดง อาจคำนวณหรือพล็อตได้จากการวัด Field - Strength อย่างถูกต้อง "Flower petals" ( กลีบดอกไม้ ) ของ pattern นี้ เรียกว่า Lobes ซึ่งตรงจุดที่เสริมกัน ดังเช่นจุด  $q$  ของรูปที่ผ่านมา ขณะที่ Nulls ระหว่าง Lobes ตรงกับจุดที่หักล้างกัน เช่นจุด  $P$  ของรูปที่ 2.21

การสอดแทรกเป็นผลจากการที่คลื่นอย่างน้อย 2 ขบวนวิ่งมาพบกัน บางตอนก็เสริมกัน บางตอนก็หักล้างกันหายไป จนบางทีเราแทบพิจารณาไม่ได้ว่าเป็นคลื่นจากทิศไหน เช่น การโยนก้อนหิน 2 ก้อนลงในสระน้ำ ณ ที่ 2 แห่ง ห่างกันเล็กน้อย ก้อนหินที่โยนลงไปแต่ละก้อนก่อให้เกิดคลื่นกระจายออกไปรอบตัว เมื่อคลื่นที่กระจายออกไปนั้นไปซ้อนกันเข้าก็จะสังเกตเป็นการเสริมและหักล้างกันได้ชัดเจนพอสมควร

กลไกทั้ง 5 อย่างนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการนำไปวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะการส่งผ่านคลื่นสัญญาณซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปนี้

จากการศึกษาพบว่า คุณลักษณะการลดทอนของสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss) เป็นการลดทอนของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับสัญญาณ โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณจะลดลงตามค่า  $d^{-n}$  โดย  $d$  คือระยะทางระหว่างภาครับและภาคส่ง ส่วน  $n$  เป็นค่าคงที่หนึ่งที่มีขนาดแตกต่างกันไปตามสภาพบริเวณที่สัญญาณส่งผ่าน ตัวอย่างของค่า  $n$  สำหรับการคำนวณค่าการสูญเสียเชิงวิถี ในบริเวณต่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

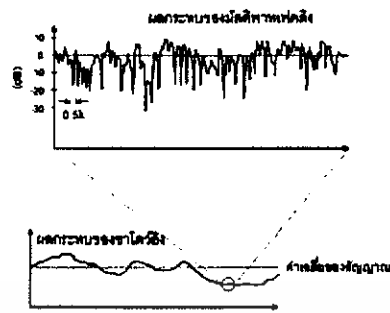
ๆ ในตาราง สังเกตว่าค่าอัตราการลดทอนของสัญญาณมีขนาดที่สูงในบริเวณเมืองใหญ่ เมื่อเทียบกับบริเวณที่ว่างเปล่าเพราะมีปัญหาการบดบังของสัญญาณเนื่องมาจากตึก อาคาร และสถานที่

สภาพแวดล้อม	n
อวกาศว่าง	2
บริเวณพื้นที่ในเมือง	2.7 – 3.5
บริเวณพื้นที่ในเมืองที่มีการบดบัง	3 - 5
ภายในอาคารที่มีเส้น LOS	1.6 – 1.8
ภายในอาคารที่มีสิ่งกีดขวาง	4 – 6

ซาโดว์อิง (Shadowing) เกิดจากการที่สัญญาณบางส่วนถูกบดบังทั่วไปชั่วขณะจากสิ่งแวดลอมรอบข้าง เช่น อาคาร และเนินเขา เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้นสัญญาณที่รับได้ก็จะมีกำลังแรงคั้งเดิม ดังระดับของสัญญาณที่ได้มักจะเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเท่า ๆ กับขนาดของสิ่งกีดขวางซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ประมาณหลายสิบเมตร ตัวอย่างลักษณะของสัญญาณรูปที่ 2.21

มัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath fading) เกิดจากการที่สายอากาศของเครื่องรับสัญญาณอยู่ใกล้กับพื้นผิวมากเกินไป ดังนั้นสิ่งกีดขวางต่าง ๆ รอบข้างจึงส่งผลให้เกิดการสะท้อนและการหักเหของสัญญาณในหลายทิศทางส่งผลให้ทำสัญญาณที่ได้รับประกอบด้วยสัญญาณจำนวนสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณที่เดินทางมาจากทิศทางที่แตกต่างกัน โดยมีทั้งขนาดและเฟสที่แตกต่างกัน ผลกระทบของมัลติพาทเฟดดิ้งทำให้ระดับของสัญญาณที่ได้รับได้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างบ่อยครั้งมากและการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงระยะเดียวกันกับขนาดของความยาวคลื่น

การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอาจจะเกิดขึ้นได้มากถึง 30-40 dB เพียงผู้ใช้โทรศัพท์ที่มีการเคลื่อนที่ด้วยระยะเพียงเศษส่วนของความยาวคลื่น รูปที่ 2.23 ประกอบ



รูปที่ 2.23 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ได้รับจากผลกระทบมัลติพาทเฟดดิ้ง และ  
ชาโดว์อิง

## 2.10 การสูญเสียกำลัง ( Path Loss)

### 2.10.1 การสูญเสียเชิงวิถีในอากาศว่าง (Free Space Path Loss)

การสูญเสียกำลังในอากาศว่าง ซึ่งเกิดจากการที่คลื่นแพร่กระจายออกไปด้วยมุมที่กว้าง ทำให้ความเข้มของกำลังคลื่นสัญญาณอ่อนตัวลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นแบบยกกำลังสอง คำว่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณในอากาศว่างนี้ได้นิยามให้เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังของสัญญาณที่ถูกส่งออกมา โดยที่คลื่นมีการแพร่กระจายในบริเวณที่ว่างเปล่า (Free space propagation) อัตราส่วนมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$P_L = 20 \log_{10} \left( \frac{\max |v_r(t)|}{\max |v_t(t)|} \right) \quad (2.48)$$

โดยที่

$P_L$  คือ กำลังการสูญเสียระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ

$V_t$  คือ ขนาดแอมพลิจูดทางด้านส่ง

$V_r$  คือ ขนาดแอมพลิจูดทางด้านรับ

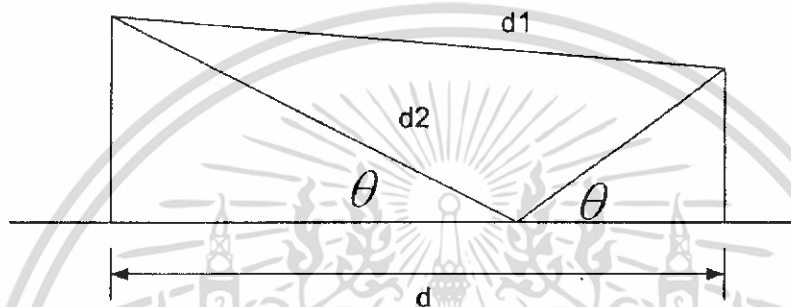
### 2.10.2 การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ (Plane Path Loss)

ในส่วนต่อนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของพื้นผิวต่อการส่งผ่านสัญญาณ โดยเปรียบเทียบกับการส่งผ่านสัญญาณในอากาศว่าง ทั้งนี้สมมติให้การส่งผ่านสัญญาณนี้เกิดขึ้นในบริเวณที่มีพื้นผิวเรียบไม่มีกีดขวางใด ๆ หรือเนินเขาในบริเวณนั้นเลย ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จะประกอบด้วยสัญญาณเพียง 2 ส่วน คือ ส่วนที่แพร่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยตรงและส่วนที่สะท้อนจากพื้นผิวดังที่แสดงดังรูปที่ 2.24 ซึ่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างจากในกรณีของการส่งผ่านสัญญาณใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อวกาศว่างตรงที่ได้รับสัญญาณเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งสัญญาณจากส่วนที่สะท้อนกับพื้นผิวและเราจะเรียก การสูญเสียของสัญญาณในสภาพแวดล้อมลักษณะนี้ว่า การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ (plane path loss)

ถ้าหากเราสมมติว่าพื้นผิวที่สะท้อนมีลักษณะราบเรียบและมีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดัดคลื่นที่ กระทบกับผิวจะสะท้อนออกเกือบทั้งหมดโดยที่มีเฟสเปลี่ยนไป 180 องศา



รูปที่ 2.24 ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนกับผิวเรียบต่อสัญญาณที่รับได้

## 2.11 การลดทอนของสัญญาณ (Path Gain)

Path Gain ใช้ในการวิเคราะห์หาการลดทอนของสัญญาณด้านรับโดย path gain เป็นส่วนกลับของ path loss

และสามารถคำนวณหา Path Loss ในแบบจำลอง ground reflection เป็นอัตราส่วนของขนาดของคลื่นที่สูงสุดของสัญญาณด้านส่งกับขนาดของยอดคลื่นที่สูงสุดของสัญญาณด้านรับ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูป Decibel ดังสมการ 2.49

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{\max |v_r(t)|}{\max |v_s(t)|} \right) \quad (2.49)$$

แต่จากสัญญาณด้านส่งจะมีขนาดของยอดคลื่นที่สูงสุดที่ ณ เวลาเท่ากับ 0 มีค่าเท่ากับ 1

$$\max |v_r(t)| = \max |v_r(0)| = 1 \quad (2.50)$$

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่า path loss ดังสมการที่ 2.51

$$L_p = -20 \log_{10} (\max |v_r(t)|) \quad (2.51)$$

และ path gain เป็นส่วนกลับของ path loss ดังสมการที่ 2.52

$$G_p = 20 \log_{10} (\max |v_r(t)|) \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.12 ผลกระทบของซาโดว์อิง (Shaddowing)

การลดทอนของสัญญาณเนื่องจาก Path Loss ที่ได้อธิบายไว้ นั้นเป็นการคำนวณหาค่าของสัญญาณที่คาดว่าจะรับได้ตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่า ณ ตำแหน่งที่ห่างจากภาคส่งสัญญาณเท่า ๆ กันก็จะได้รับสัญญาณที่มีกำลังเท่ากันด้วย แต่ในทางปฏิบัติสัญญาณที่รับได้ในบริเวณอาจจะมีกำลังที่ไม่เท่ากันก็ได้ ถึงแม้ว่าจะอยู่ห่างจากสถานีส่งด้วยระยะที่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะกำลังของสัญญาณที่รับได้นั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในบริเวณที่สัญญาณส่งผ่านด้วย ดังนั้นในสภาพความเป็นจริงสัญญาณเหล่านี้จะมีการกระเพื่อมขึ้นและลงอยู่บนค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จาก Path Loss ซึ่งได้จากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในลักษณะนี้ เราพบว่าสามารถจำลองได้ด้วยการใช้ตัวแปรแรนดอมที่มีกระจายแบบ log-normal distribution

## 2.13 ปัญหาของมัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath Fading)

การสะท้อนของคลื่นสัญญาณกับพื้นผิว หรือสิ่งต่าง ๆ รอบข้างส่งผลให้สัญญาณที่รับได้ประกอบด้วยสัญญาณที่แพร่มามากกว่าหนึ่งทิศทาง และโดยทั่วไปแล้วสัญญาณเหล่านี้มักจะเดินทางมาถึงภาครับด้วยเวลาที่แตกต่างกัน และมีขนาดที่แตกต่างกันด้วยเมื่อสัญญาณเหล่านี้มารวมเข้าด้วยกัน จะได้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงได้อย่างมาก ปัญหานี้มีชื่อเรียกว่า มัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath Fading) ซึ่งโดยทั่วไปลักษณะการแปรเปลี่ยนของสัญญาณในสภาวะดังกล่าวสามารถจำลองได้ด้วยการแปรแรนดอมที่มีการกระจายแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution)

## 2.14 โพรไฟล์การหน่วงกำลัง (Power Delay Profile)

### 2.14.1 คีเลย์สเปรด (Delay Spread)

จากการอธิบายมาตั้งแต่ต้นแล้วว่าเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณ ระหว่างเครื่องรับมายังเครื่องส่งสัญญาณแต่ละส่วนมักจะส่งผ่านในเส้นทางที่มีระยะทางไม่เท่ากัน สัญญาณบางส่วนอาจจะเดินทางเป็นเส้นตรงระหว่างภาคส่งและภาครับ (Line of sight: LOS) สัญญาณส่วนนี้มักจะเดินทางถึงภาครับได้เร็ว ในขณะที่สัญญาณส่วนอื่นที่มีการตกกระทบพื้นผิวของวัตถุและเกิดการสะท้อนหลายครั้ง ก็จะเดินทางถึงภาครับสัญญาณมักใช้เวลาในการแพร่กระจายที่ยาวนานกว่า ความล่าช้าในการเดินทางของสัญญาณแต่ละส่วนก่อให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า คีเลย์สเปรด (Delay Spread) ขึ้น นั่นคือสัญญาณแต่ละส่วนใช้เวลาเดินทางถึงจุดหมายไม่เท่ากัน กล่าวคือ ถ้าสัญญาณที่ส่งมีแบนด์วิดท์ที่แคบมากเมื่อเทียบกับส่วนกลับของความแตกต่างของเวลาการมาถึง เราสามารถละทิ้งผลกระทบของคีเลย์สเปรดได้ แต่หากสัญญาณที่ส่งมีแบนด์วิดท์ที่สูงมากขึ้น ในการวิเคราะห์แบบจำลองช่องสัญญาณมัลติพาทจำเป็นที่เราจะต้องนำปัญหาของคีเลย์สเปรดมารวมคิดด้วย

เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของช่องสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง และทำการพัฒนาเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบระบบสื่อสารไร้สาย โดยใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาโปรไฟล์การหน่วงกำลังประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยของดีเลย์ (mean excess delay), การแพร่การหน่วง rms (rms delay spread), ค่าดีเลย์สเปรดสูงสุด (maximum delay spread)

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

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (2.53)$$

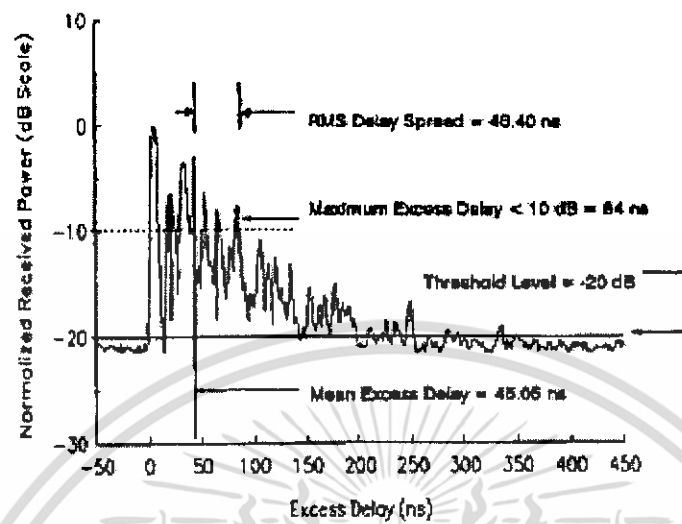
โดยที่  $P(\tau_k)$  คือ กำลังของสัญญาณเส้นทางที่  $k$   
พารามิเตอร์ที่สองค่า rms delay spread

$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (2.54)$$

โดย

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (2.55)$$

พารามิเตอร์สุดท้ายที่เราให้ความสนใจคือ ค่าดีเลย์สเปรดสูงสุด (maximum delay spread) หรือ  $\tau_{\max}$  ซึ่งนิยามให้เป็นค่าดีเลย์สูงสุดวัด ณ จุดที่กำลังของสัญญาณมัลติพาทมีค่าต่ำกว่าค่ากำหนดค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการหน่วงกำลังของคลื่นภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

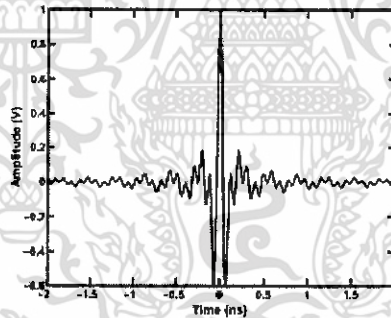
## บทที่ 3

### การเตรียมการของระบบการวัด

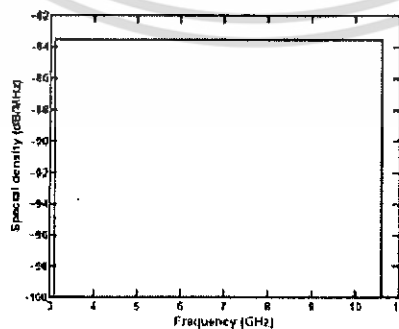
#### 3.1 การวัดช่องสัญญาณ UWB

##### 3.1.1 รูปแบบการส่งผ่านแถบความถี่กว้างยิ่ง

ผลกระทบการบิดเบือนของรูปคลื่นสัญญาณเป็นปัญหามากเมื่อความกว้างของคลื่นกว้างมากขึ้นการกำหนดรูปคลื่นของสัญญาณที่ใช้ในการส่งพิจารณาสัญญาณอิมพัลส์ของคลื่นวิทยุที่ครอบคลุมช่วงความถี่ของ FCC 3.1 – 10.6 GHz ค่าศูนย์กลางของความถี่และแถบความถี่คลื่นถูกกำหนดเป็นค่า  $f_0 = 6.85$  GHz และ  $f_h = 7.5$  GHz การส่งผ่านรูปคลื่นสัญญาณ ในการจำลองเป็นสัญญาณพัลส์ ASK แบบเดี่ยวด้วยความถี่ของคลื่นพาห้  $f_0$  ผ่านไปยังแถบความถี่คลื่นที่ต้องการคือค่า  $f_h$  ความยาวของพัลส์กำหนดที่  $2/f_h$  ค่อยจากนั้นจะจำกัดแถบคลื่นโดยวงจรกรองความถี่ Nyquist roll-off ด้วยค่า roll-off  $\theta = 0$  และตัวกรองความถี่กลาง ( $f_0 - f_h/2, f_0 + f_h/2$ ) ดังแสดงในรูป เป็นรูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ในการส่ง



รูปที่ 3.1 คลื่นสัญญาณที่ใช้ในการส่ง



รูปที่ 3.2 สเปกตรัมของสัญญาณอุตราไวต์แบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

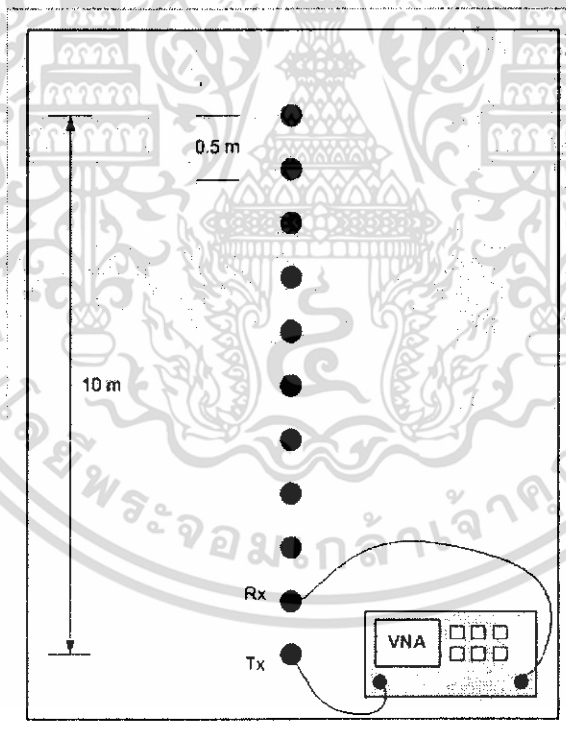
รูปสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยังมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์รูปสัญญาณในโดเมนเวลานั้นจะแสดงโดยค่า  $v_r(t)$

$$v_r(t) = \frac{1}{f_b} [f_{\max} \text{sinc}(2f_{\max}t) - f_{\min} \text{sinc}(2f_{\min}t)] \quad (3.1)$$

โดยที่

- $f_{\max}$  คือ ค่าสูงสุดของความถี่ กำหนดให้เท่ากับ 10.6 GHz
- $f_{\min}$  คือ ค่าต่ำสุดของความถี่ กำหนดให้เท่ากับ 3.1 GHz
- $f_b$  คือ ความหนาแน่นของช่วงความถี่ เท่ากับ 7.5 GHz

### 3.1.2 แบบจำลองการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณ UWB



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการวัดสัญญาณ UWB

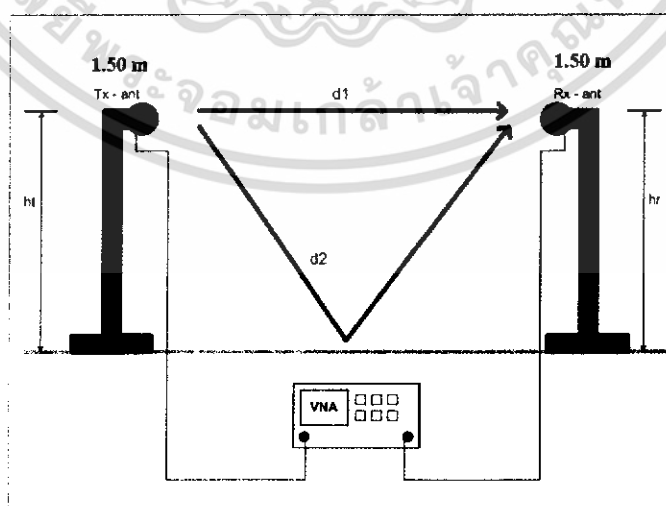
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองของการวัดจากเครื่อง Vector Network Analysis ที่ความถี่ 3-11 GHz โดยให้พอร์ต 1 เป็นพอร์ตทางด้านส่ง และพอร์ต 2 เป็นพอร์ตทางด้านรับ สายอากาศทางด้านรับและทางด้านส่งถูกกำหนดความสูงเริ่มต้นที่ 1.5 เมตร ซึ่งเป็นสายอากาศแบบไบโคเน็คคอนทิงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

การวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณ UWB ได้ทำการวัดบริเวณทางด้านฟ้าของอาคาร สโกลป วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยให้สายอากาศทางด้านรับและส่งอยู่กับที่และสายอากาศทางด้านรับเคลื่อนที่ภายในระยะทาง 10 เมตร สายอากาศทางด้านรับและส่งอยู่ห่างกันที่ระยะเริ่มต้น 1 เมตร และเคลื่อนที่สายอากาศทางด้านรับออกจากสายอากาศทางด้านส่งโดยเพิ่มระยะห่างขึ้นทีละ 0.5 เมตร แล้วทำการบันทึกค่าผลการตอบสนองความถี่ 3 –11 GHz แต่ละครั้งด้วยเครื่อง Vector Network Analysis ซึ่งควบคุมโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

### 3.2 โมเดลที่ใช้ในการทดลอง

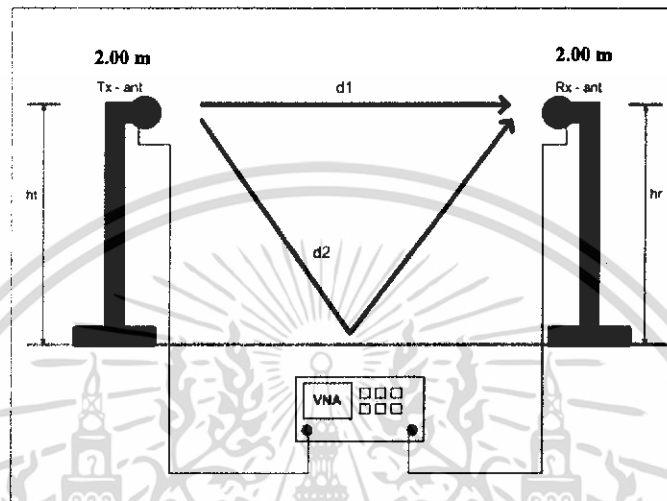
จัดวาง โมเดลตามรูปที่ 3.4 จะใช้ลักษณะของพื้นเป็นแบบผิวเรียบ (Smooth Ground) ใช้การจัดวางสายอากาศแบบ Horizontal Polarization ซึ่งความสูงของสายอากาศด้านส่ง (Transmitter Antenna) กำหนดให้มีความสูง 1.5 เมตร และความสูงของสายอากาศด้านรับ (Receiver Antenna) กำหนดให้มีความสูง 1.5 เมตร โดยระดับของเสาอากาศจะอยู่ในระดับที่เท่ากันทั้งทางด้านส่งและทางด้านรับ และมีระยะทางระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับเท่ากับตั้งแต่ 1~10 เมตร โดยเริ่มต้นที่ 1 เมตรเมื่อวัดเสร็จจากนั้นทำการเคลื่อนเสาทางด้านรับออกทีละ 0.5 เมตรจนครบ 10 เมตร



รูปที่ 3.4 รูปโมเดล โดยมองจากทางด้านข้างภาคส่งสูง 1.5 เมตรภาครับ 1.5 เมตร

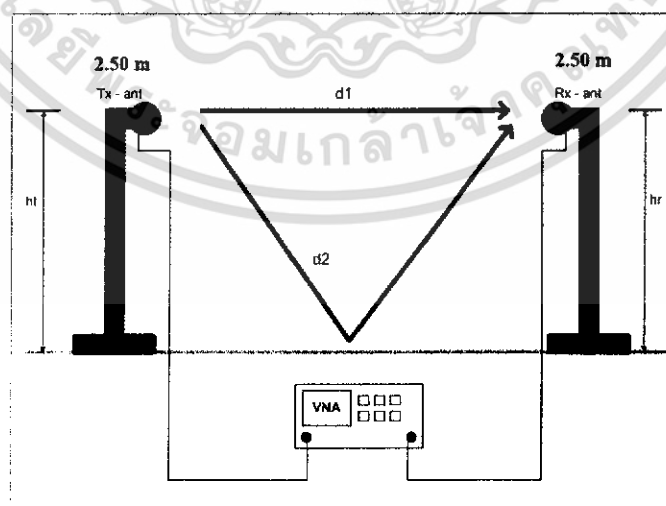
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจัดวางโมเดลตามรูปที่ 3.5 ปรับความสูงของสายอากาศด้านส่ง (Transmitter Antenna) กำหนดให้มีความสูง 2.0 เมตร และความสูงของสายอากาศด้านรับ (Receiver Antenna) กำหนดให้มีความสูง 2.0 เมตร แล้วทำการวัดเริ่มต้นที่ 1 เมตรเมื่อวัดเสร็จทำการเลื่อนไปที่ละ 0.5 เมตรจนครบ 10 เมตร



รูปที่ 3.5 รูปโมเดลโดยมองจากทางด้านข้างภาคส่งสูง 2.0 เมตรภาครับ 2.0 เมตร

จากนั้นจัดวางโมเดลตามรูปที่ 3.6 ปรับความสูงของสายอากาศด้านส่ง (Transmitter Antenna) กำหนดให้มีความสูง 2.5 เมตร และความสูงของสายอากาศด้านรับ (Receiver Antenna) กำหนดให้มีความสูง 2.5 เมตร แล้วทำการวัดเริ่มต้นที่ 1 เมตรเมื่อวัดเสร็จทำการเลื่อนไปที่ละ 0.5 เมตรจนครบ 10 เมตร

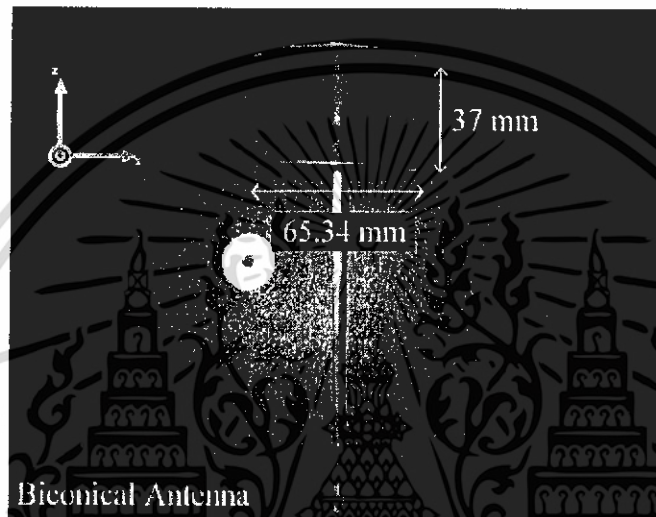


รูปที่ 3.6 รูปโมเดลโดยมองจากทางด้านข้างภาคส่งสูง 2.5 เมตรภาครับ 2.5 เมตร

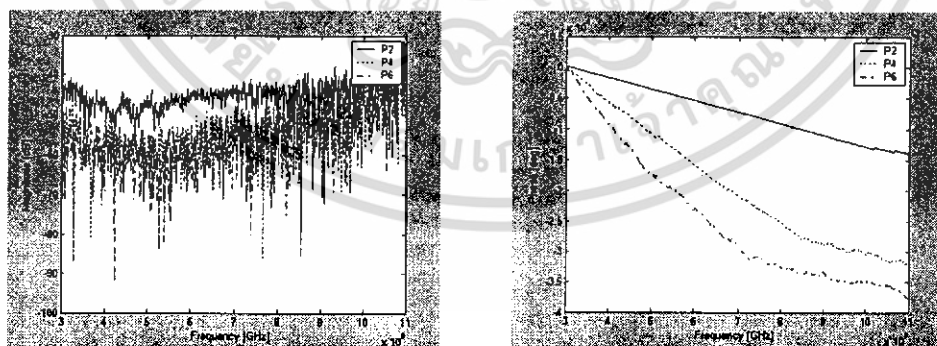
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 คุณลักษณะของสายอากาศไบโคนิคอน (Biconical)

สายอากาศไบโคนิคอนเป็นสายอากาศที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว การพิจารณาสายอากาศไบโคนิคอนนี้ได้พิจารณาจากการกระจายของสายอากาศซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับกับรูปคลื่นสัญญาณแบบพัลส์ โดยที่กรวยด้านบนของสายอากาศใช้ติดต่อกับสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุขณะที่กรวยด้านล่างใช้ติดต่อกับกราวด์



รูปที่ 3.7 สายอากาศไบโคนิคอล (Biconical)



รูปที่ 3.8 แมกนิจูดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศไบโคนิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ( Parameter )

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการทดลอง ได้แสดงให้เห็นในตาราง ที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่ที่ทำการทดลอง	3.0 ~ 11.0 GHz
จำนวนของตำแหน่งความถี่	801
ความสูงของสายอากาศด้านส่ง	1.5 m, 2.0 m, 2.5 m
ความสูงของสายอากาศด้านรับ	1.5 m, 2.0 m, 2.5 m
ระยะห่างระหว่าง Tx กับ Rx	1 ,2 ,3 ,4 ,5 ,5.5 ,6 ,6.5 ,7 ,7.5 ,8 ,8.5 ,9 ,9.5 ,10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

#### 4.1 การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณ UWB

การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณ UWB เป็นการวัดคุณสมบัติของสัญญาณ เพื่อดูการเกิด การสอดแทรกของสัญญาณในระยะทางที่ต่างกันและเปลี่ยนขนาดความสูงของเสาให้มากขึ้นตามลำดับ

##### 4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 1. อุปกรณ์วัดสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วย

1.1 เครื่อง 8150C Network Analyzer

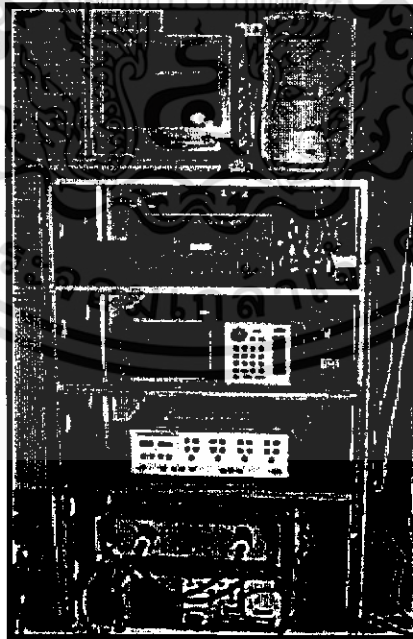
1.2 เครื่อง 8514B S-Parameter Test Set (45 MHz – 20 GHz)

1.3 เครื่อง 8360 Series Synthesized Sweeper (10 MHz – 20 GHz)

2. สาย Semi-rigid และหัวต่อ (connector) ชนิดความสูญเสียต่ำ (low loss)

3. สายอากาศที่จะนำมาทำการวัดและสายอากาศที่นำมาใช้ในการส่งสัญญาณ

4. เครื่องคอมพิวเตอร์นำมาใช้ในเก็บค่าที่วัดได้



รูปที่ 4.1 เครื่องวัดคุณสมบัติของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ขั้นตอนการวัด

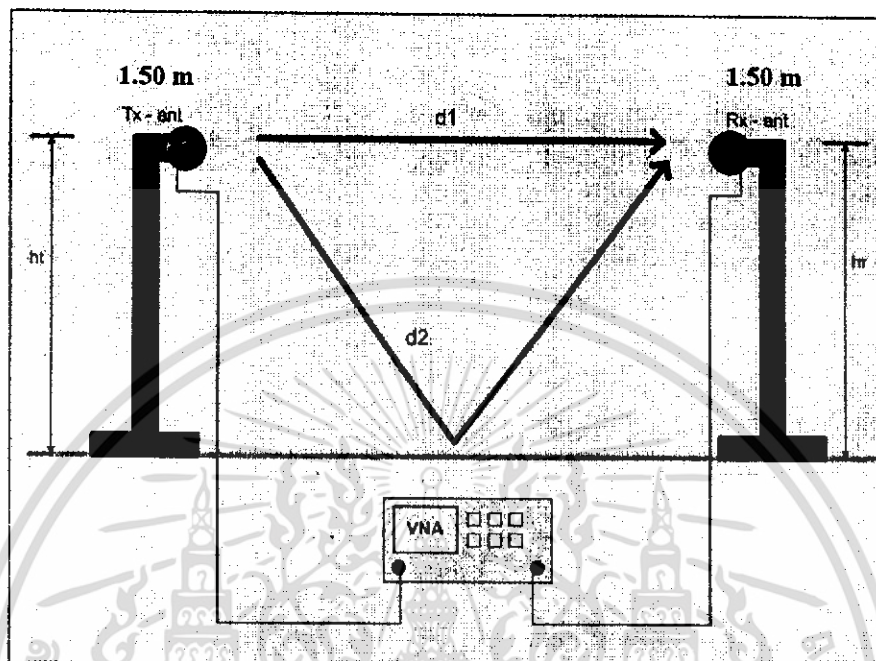
1. เปิดเครื่องวัดคุณสมบัติสายอากาศทุกตัว
2. ทำการปรับเทียบค่าเครื่องด้วยชุดเปรียบเทียบค่าซึ่งประกอบไปด้วยตัววัดวงจร (Shot circuit), ตัวเปิดวงจร (Open circuit) และ โหลดบอร์คแบนด์ (Load Broadband)
3. ต่อสายอากาศที่ต้องการวัดเข้ากับชุดวัดคุณสมบัติสายอากาศ
4. เลือกเมนู (Menu) วัดค่า เอช – พารามิเตอร์, ค่าอัตราคลื่นนิ่งต่อแรงดันและค่าเฟส
5. บันทึกค่าที่วัดได้

#### 4.2 ผลการทดลอง

##### 4.2.1 การประมวลผลสัญญาณ

สิ่งที่ได้จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง คือ ผลตอบสนองอิมพีแดนซ์ ซึ่งเราได้นำผลนี้ไปทำการวิเคราะห์โดยประยุกต์ร่วมกับรูปสัญญาณแบบอูลตราไวด์แบนด์เพื่อดูการสอดคล้องของสัญญาณ โดยแสดงผลจากการจำลองให้เห็นในรูปแบบฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัด ฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศ รูปคลื่นสัญญาณทางด้านรับเมื่อผ่านสายอากาศ ค่าสัญญาณด้านรับเมื่อผ่าน Matchd Filter ในกรณีที่ผ่านสายอากาศ Isotopic สัญญาณด้านรับเมื่อผ่าน Optimum Matched Filter และ Power Delay Profile ตารางเปรียบเทียบค่า Gain และเปรียบเทียบ Path loss ที่เกิดการสูญเสียจากระยะห่างระหว่างเสาทั้ง 2 ด้านของสัญญาณเมื่อผ่านสายอากาศแบบไบโคเน็คอนผลจากการวิเคราะห์ที่ได้แสดงตามลำดับ

### 4.3 โมเดลที่ 1 (Model 1)



รูปที่ 4.2a โมเดลที่ใช้ในการวัดระยะเสาสูง 1.5 เมตร เสารับ 1.5 เมตร

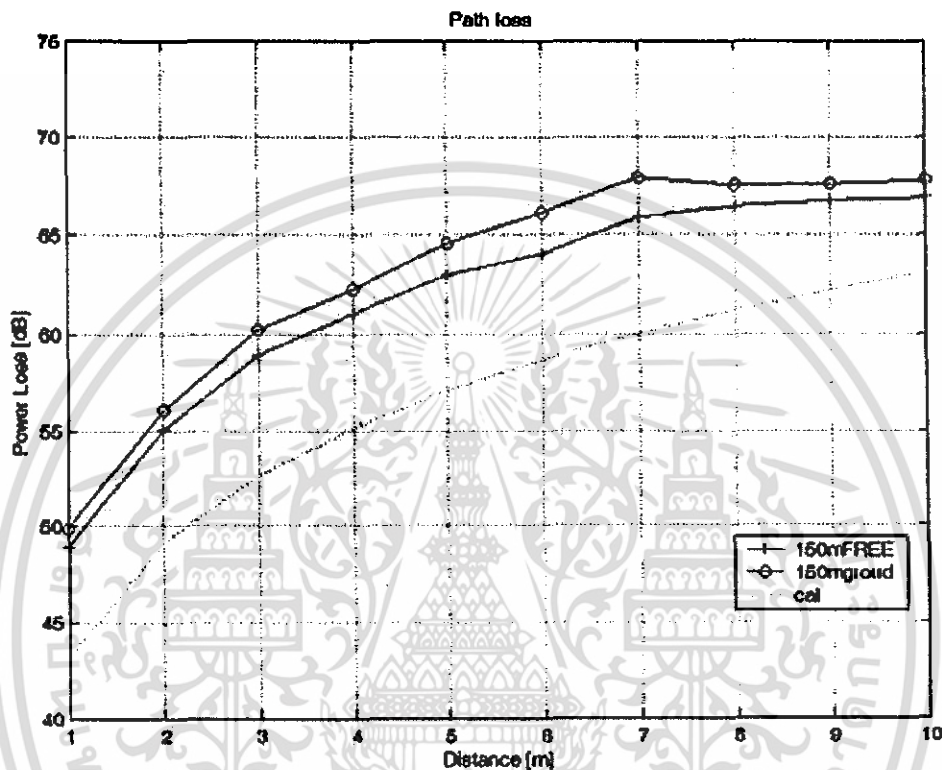


รูปที่ 4.2b ภาพถ่ายรูปการวัดสัญญาณ Free Space กับสัญญาณ Ground Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

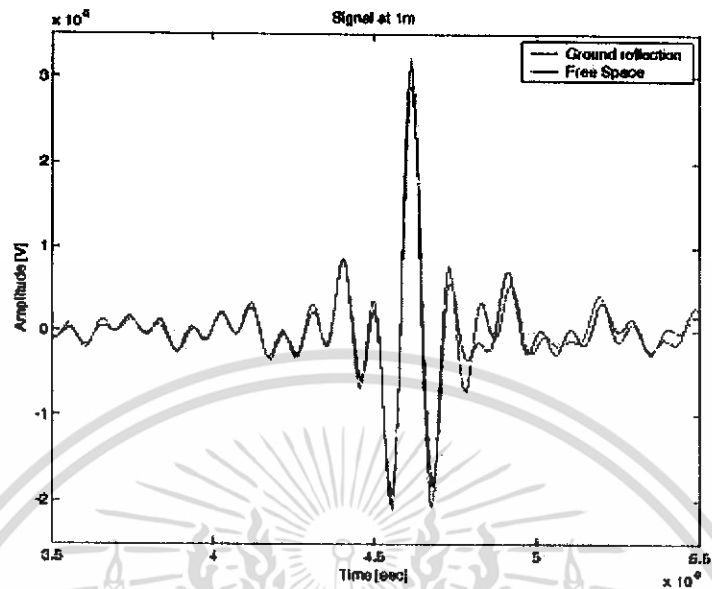
ผลการทดลองโมเดลที่ 1

ตารางที่ 4.1 กราฟ Path Loss ที่ระยะความสูงของเสาที่ 1.5 เมตร

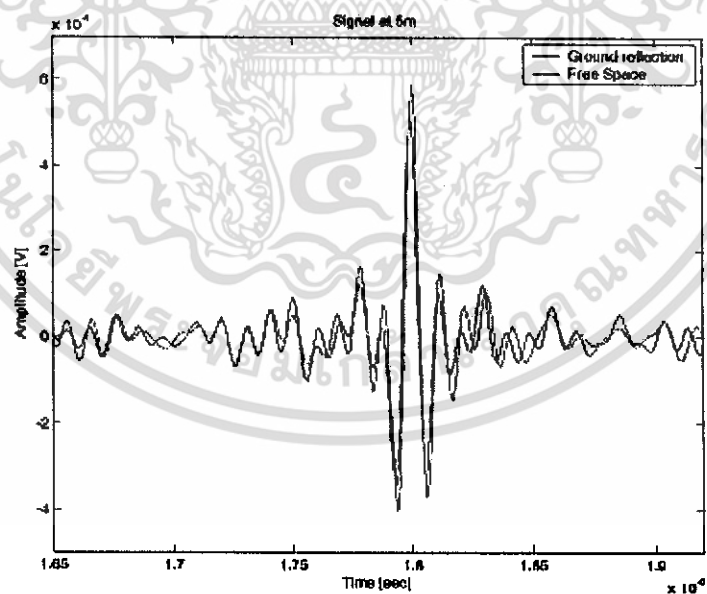


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบ Path Loss ระหว่าง Free Space กับ Ground Reflection

จากกราฟค่าแสดงค่าความแตกต่างของสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection และจะเห็นได้ว่ายิ่งระยะทางไกลออกไปค่า PL ก็จะมีมากขึ้น นั่นก็แสดงถึงการรับสัญญาณในระยะที่ตำแหน่งใกล้ๆจะรับได้ดีกว่าที่ระยะไกลออกไป

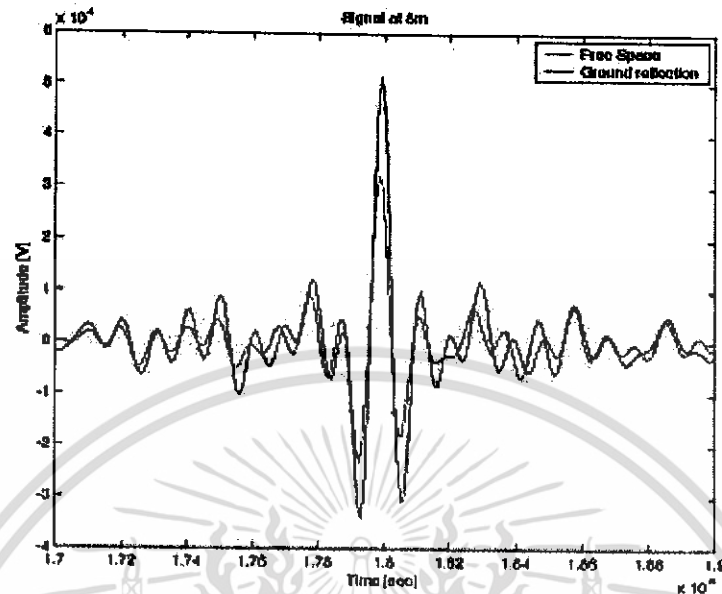


รูปที่ 4.4a การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 1 เมตร



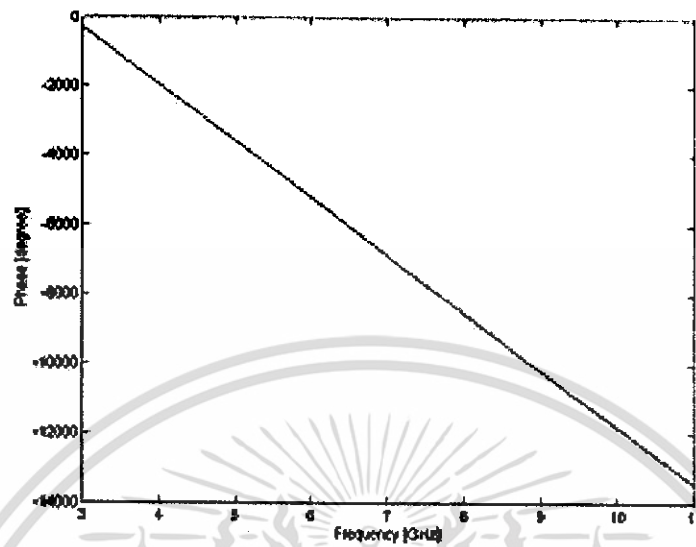
รูปที่ 4.4b การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

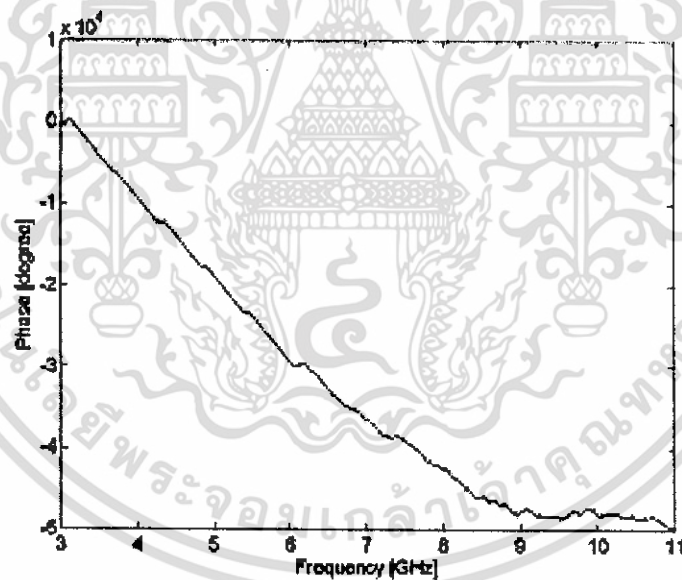


รูปที่ 4.4c การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 8 เมตร

จากกราฟของรูปสัญญาณที่รับได้จากภาครับในระยะที่ 1 เมื่อนำสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection มาเปรียบเทียบกันสามารถอธิบายได้ว่า Amplitude ของสัญญาณ Ground จะต่ำกว่าของ Free Space เนื่องจากเกิดการแทรกสอดของสัญญาณทำให้สัญญาณที่รับได้เกิดการทับซ้อนกันทำให้ Amplitude ของสัญญาณ Ground ลดลงสัญญาณ



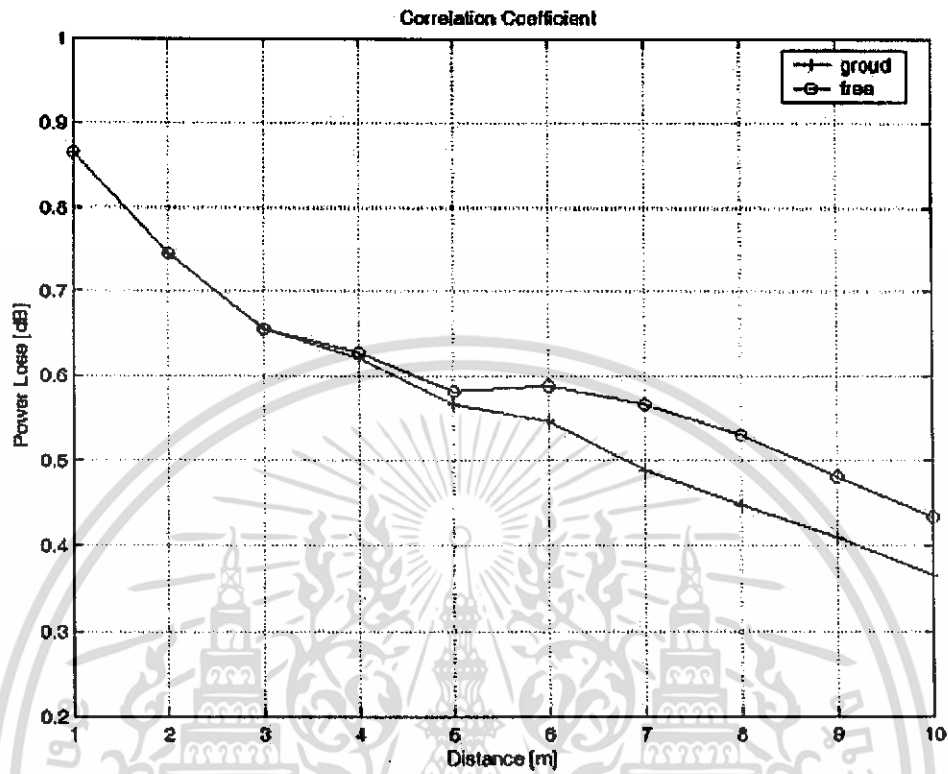
รูปที่ 4.5a ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 1 เมตร



รูปที่ 4.5b ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 9 เมตร

จากรูปแสดงฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0 dB ที่ระยะทาง 1 เมตร และระยะทางที่ 9 เมตรค่าเฟสเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นในช่วงความถี่ประมาณ 4 – 11GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



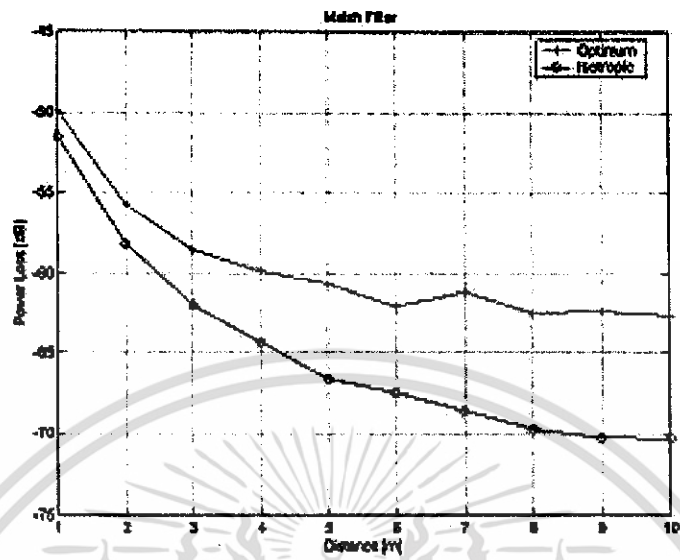
รูปที่ 4.6 กราฟค่า Correlation Coefficient ของสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

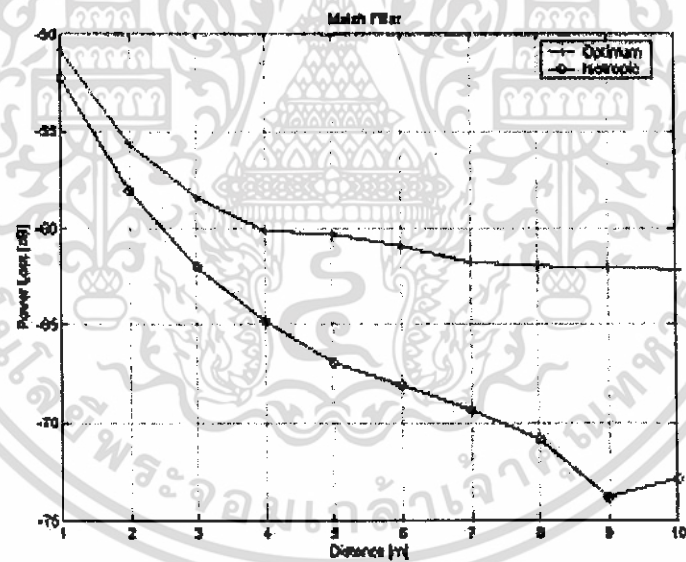
ตารางที่ 4.2 กราฟ Correlation และค่าการสูญเสียเชิงวิถี

ระยะห่างระหว่าง Tx และ Rx	Correlation Coefficient	Path Loss(dB)
1 m	63.59%	50.73
2 m	49.22%	57.31
3 m	40.38%	61.21
4 m	31.11%	63.41
5 m	17.68%	65.74
5.5 m	17.21%	66.79
6 m	32.05%	68.06
6.5 m	31.40%	69.01
7 m	16.62%	69.56
7.5 m	16.23%	69.48
8 m	21.63%	70.12
8.5 m	21.45%	70.77
9 m	21.13%	73.58
9.5 m	20.79%	71.97
10 m	19.55%	72.87

ในตารางที่ 4.2 ค่า Correlation และค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ระยะทั้งหมด 15 จุด จะเห็นว่าที่ระยะห่างของ Tx และ Rx ที่ 1 เมตร ค่า Correlation Coefficient อยู่ที่ 63.59% เป็นเปอร์เซ็นต์ที่สูงที่สุดแสดงว่าเกิดการบิดเบือนของรูปคลื่นสัญญาณ (Distortion) น้อยมากและมีค่าการสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) ที่ 50.73 dB ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำสุดจากระยะทางทั้งหมด



รูปที่ 4.7a ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Free Space



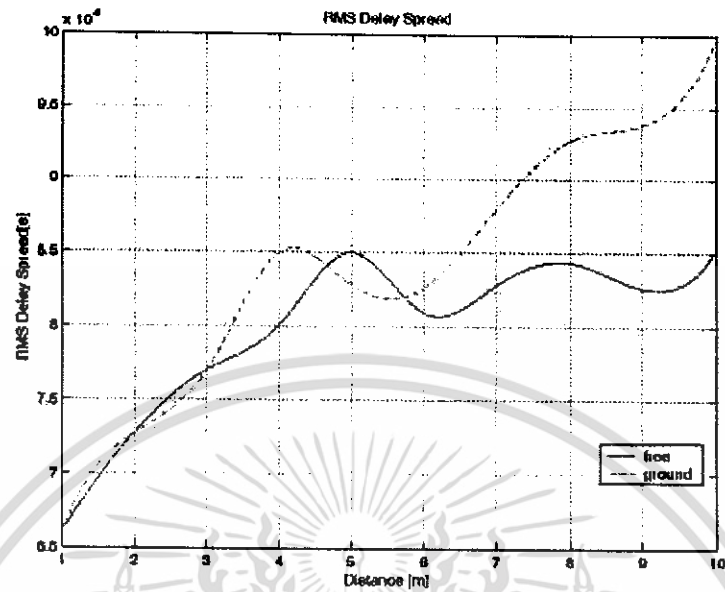
รูปที่ 4.7b ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Ground Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

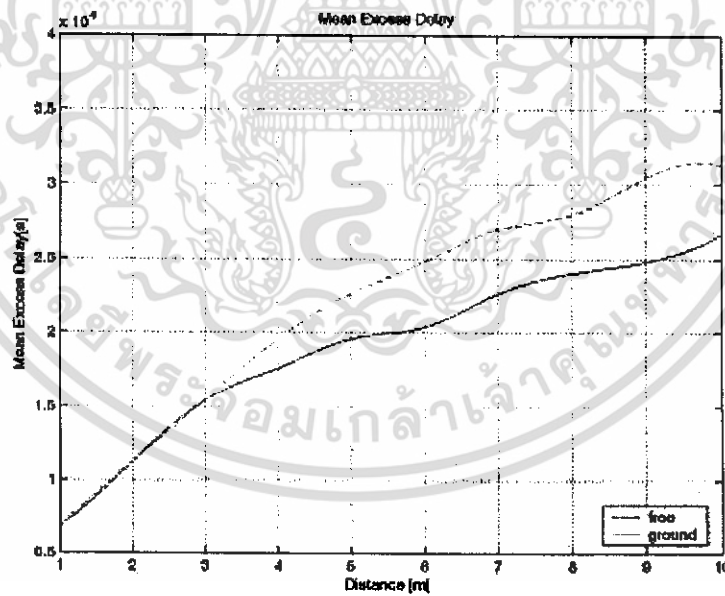
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบสัญญาณด้านรับเมื่อผ่าน Optimum Matched Filter กับ Isotropic Matched Filter

ระยะห่างระหว่าง Tx และ Rx	Optimum Matched Filter	Isotropic Matched Filter
1 m	-49.88	-51.51
2 m	-55.75	-58.15
3 m	-58.54	-61.91
4 m	-59.82	-64.28
5 m	-60.61	-66.64
5.5 m	-60.85	-66.95
6 m	-61.99	-67.48
6.5 m	-61.36	-68.20
7 m	-61.12	-68.62
7.5 m	-62.15	-69.32
8 m	-62.39	-69.75
8.5 m	-62.39	-70.10
9 m	-62.40	-70.27
9.5 m	-62.45	-70.29
10 m	-62.59	-70.33

จากกราฟแสดงความแตกต่างระหว่าง Optimum Matched Filter และ Isotropic Matched Filter โดยเมื่อระยะทางที่ทำการวัดสัญญาณทั้งหมด 15 จุด ดังกราฟ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ระยะทาง 1 เมตร มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับที่ระยะทางอื่น ๆ จะส่งผลให้ความแตกต่างระหว่าง Optimum Matched Filter และ Isotropic Matched Filter แตกต่างกันมากขึ้นซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า Correlation Coefficient



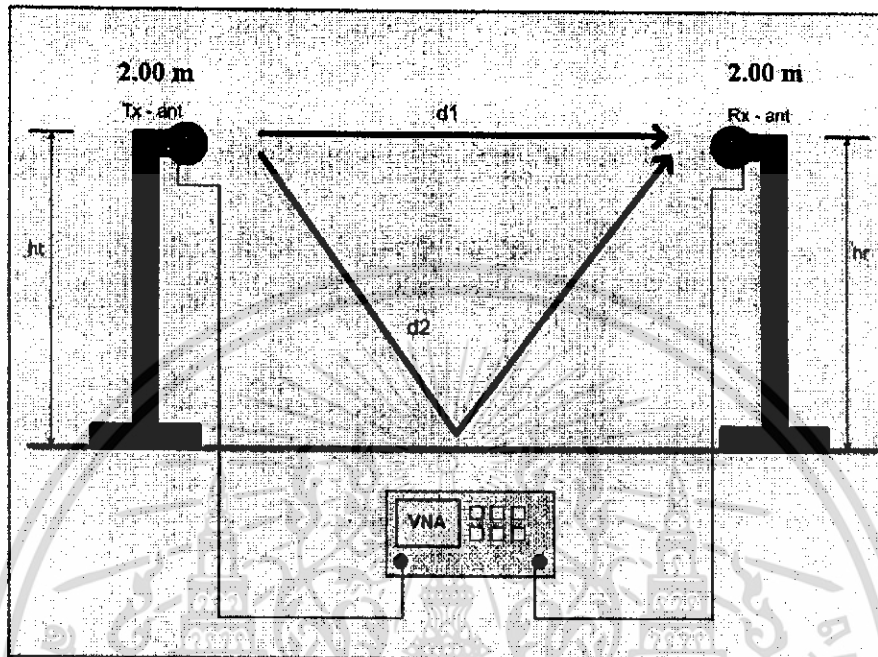
รูปที่ 4.8a การเปรียบเทียบ RMS Delay Spread ของ Free Space กับ Ground Reflection



รูปที่ 4.8b การเปรียบเทียบ Mean excess delay ของ Free Space กับ Ground Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 โมเดลที่ 2 (Model 2)



รูปที่ 4.9a โมเดลที่ใช้ในการวัดระยะเสาสูง 2.0 เมตร เสารับ 2.0 เมตร

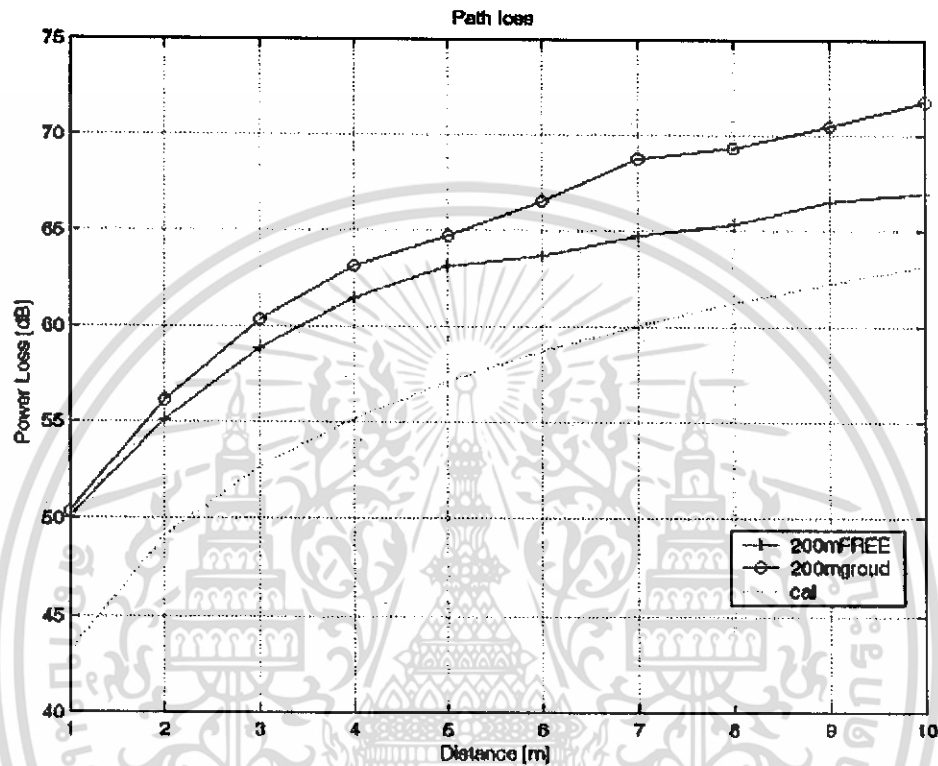


รูปที่ 4.9b ภาพถ่ายรูปการวัดสัญญาณ Free Space กับสัญญาณ Ground Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

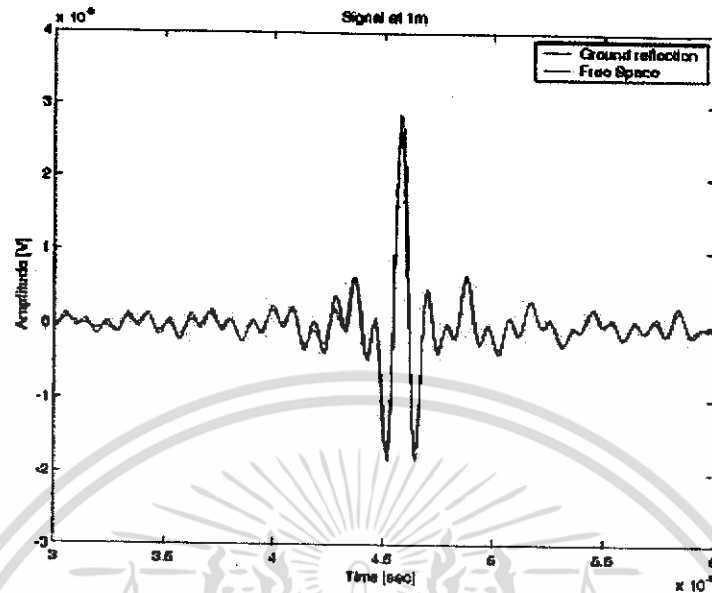
## ผลการทดลองโมเดลที่ 2

ตารางที่ 4.4 กราฟ Path Loss ที่ระยะความสูงของเสาที่ 2 เมตร

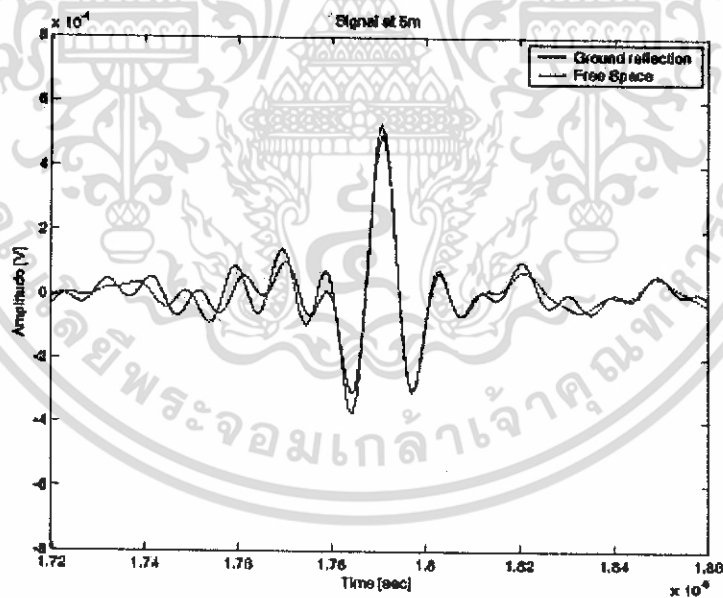


รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบ Path Loss ระหว่าง Free Space กับ Ground Reflection

จากกราฟค่าแสดงค่าความแตกต่างของสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection และจะเห็นได้ว่ายิ่งระยะทางไกลออกไปค่า PL ก็จะมีมากขึ้น นั่นก็แสดงถึงการรับสัญญาณในระยะที่ตำแหน่งใกล้ๆจะรับได้ดีกว่าที่ระยะไกลออกไป

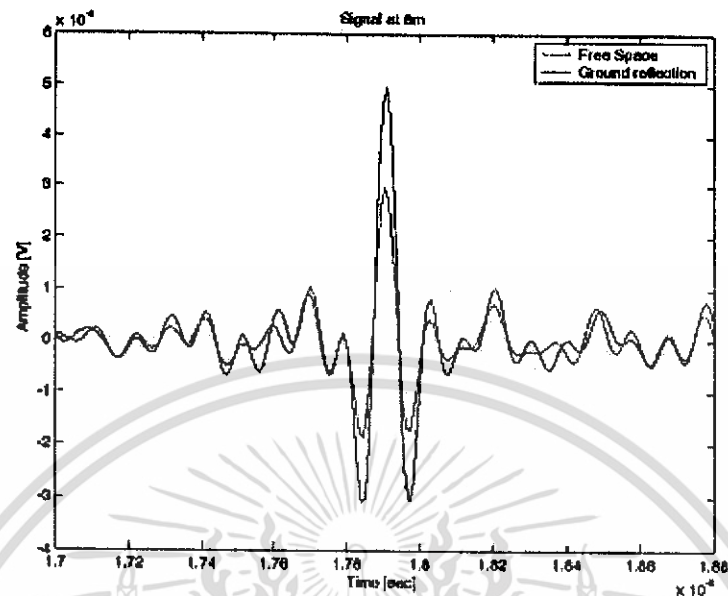


รูปที่ 4.11a การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 1 เมตร



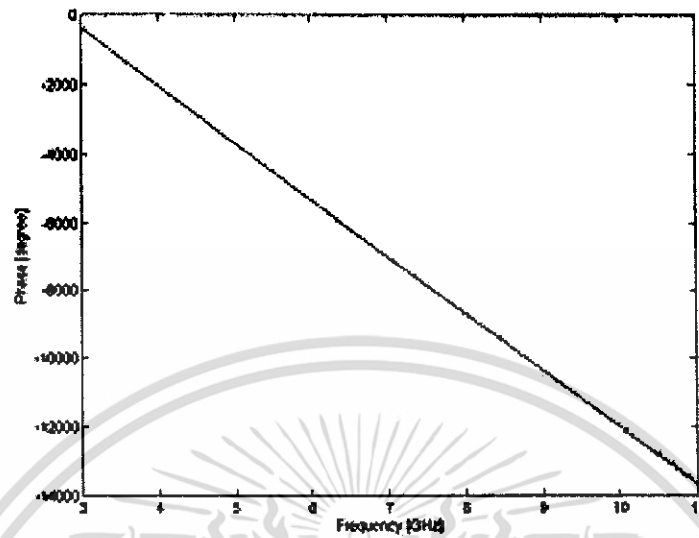
รูปที่ 4.11b การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

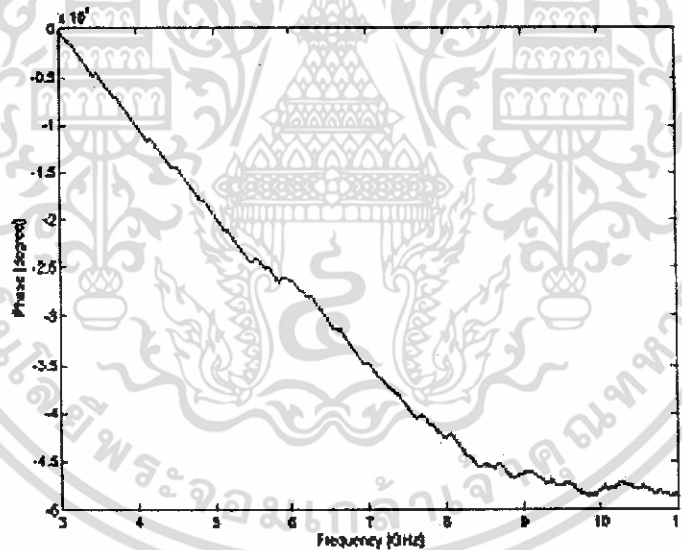


รูปที่ 4.11c การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 8 เมตร

จากกราฟของรูปสัญญาณที่รับได้จากภาครับในระยะที่ 1 เมื่อนำสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection มาเปรียบเทียบกันสามารถอธิบายได้ว่า Amplitude ของสัญญาณ Ground จะต่ำกว่าของ Free Space เนื่องจากเกิดการแทรกสอดของสัญญาณทำให้สัญญาณที่รับได้เกิดการหักล้างกันทำให้ Amplitude ของสัญญาณ Ground ลดลงสัญญาณ



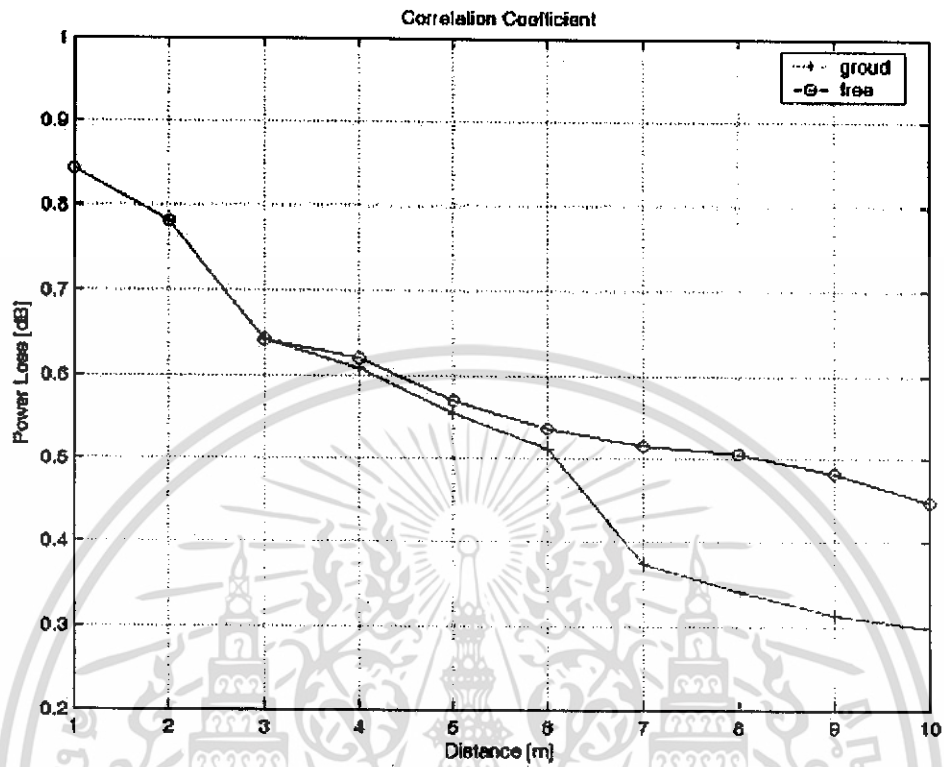
รูปที่ 4.12a ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 1 เมตร



รูปที่ 4.12b ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 8 เมตร

จากรูปเป็นผลที่ได้จากการวัดการเปรียบเทียบของ Phase กับ Frequency เมื่อเกิดการสอดแทรกของสัญญาณในระยะที่ภาคส่งและภาครับห่างกันที่ 9 เมตร ทำให้การเปลี่ยนแปลงของเฟสตั้งแต่ 5-11GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



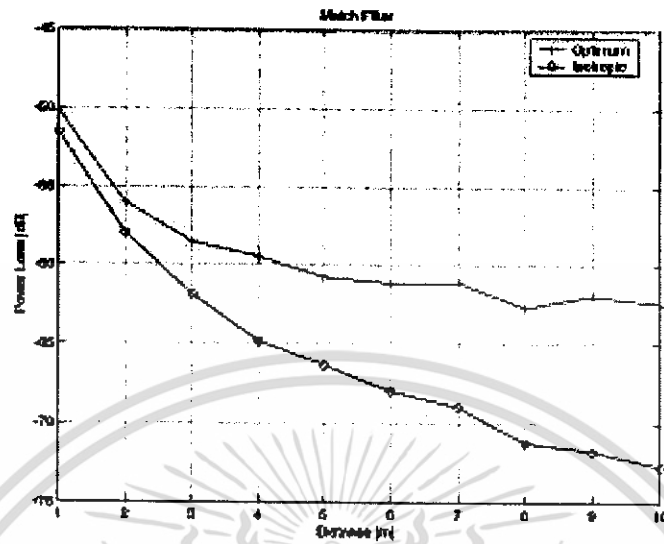
รูปที่ 4.13 กราฟค่า Correlation Coefficient ของสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

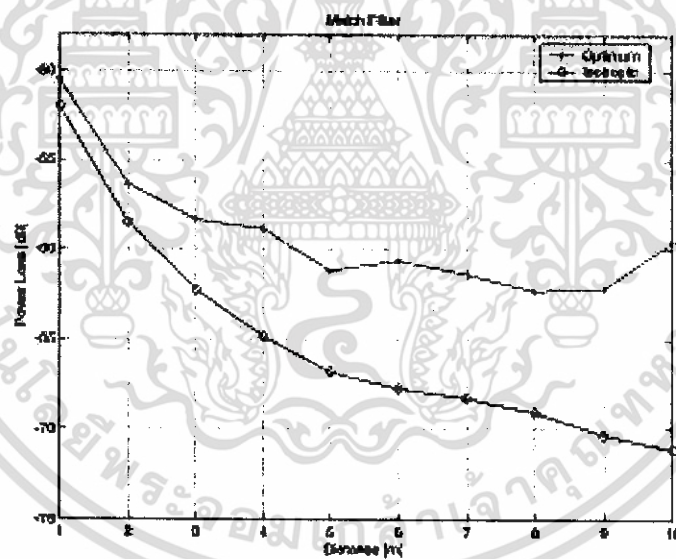
ตารางที่ 4.5 ค่า Correlation และค่าการสูญเสียเชิงวิถี

ระยะห่างระหว่าง Tx และ Rx	Correlation Coefficient	Path Loss(dB)
1 m	50.21%	51.55
2 m	47.66%	58.02
3 m	22.12%	61.91
4 m	79.96%	64.49
5 m	20.67%	66.07
5.5 m	20.10%	66.85
6 m	15.00%	67.51
6.5 m	15.56%	68.48
7 m	16.63%	69.78
7.5 m	16.55%	70.56
8 m	16.89%	71.57
8.5 m	12.36%	71.83
9 m	10.30%	73.80
9.5 m	10.12%	71.69
10 m	10.10%	73.15

ในตารางที่ 4.5 ค่า Correlation และค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ระยะทั้งหมด 15 จุด จะเห็นว่าที่ระยะห่างของ Tx และ Rx ที่ 1 เมตร ค่า Correlation Coefficient อยู่ที่ 50.21% เป็นเปอร์เซ็นต์ที่สูงที่สุดแสดงว่าเกิดการบิดเบือนของรูปคลื่นสัญญาณ (Distortion) น้อยมากและมีค่าการสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) ที่ 51.55 dB ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำสุดจากระยะทางทั้งหมด



รูปที่ 4.14a ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Free Space



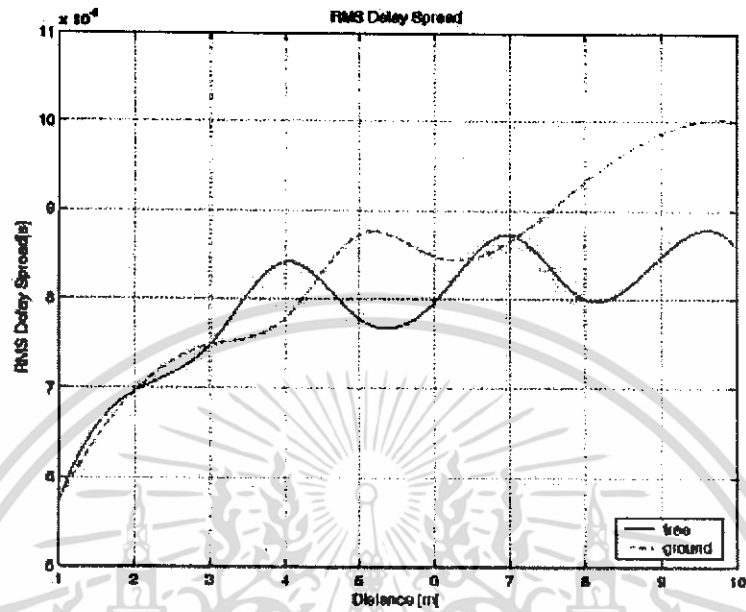
รูปที่ 4.14b ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Ground Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

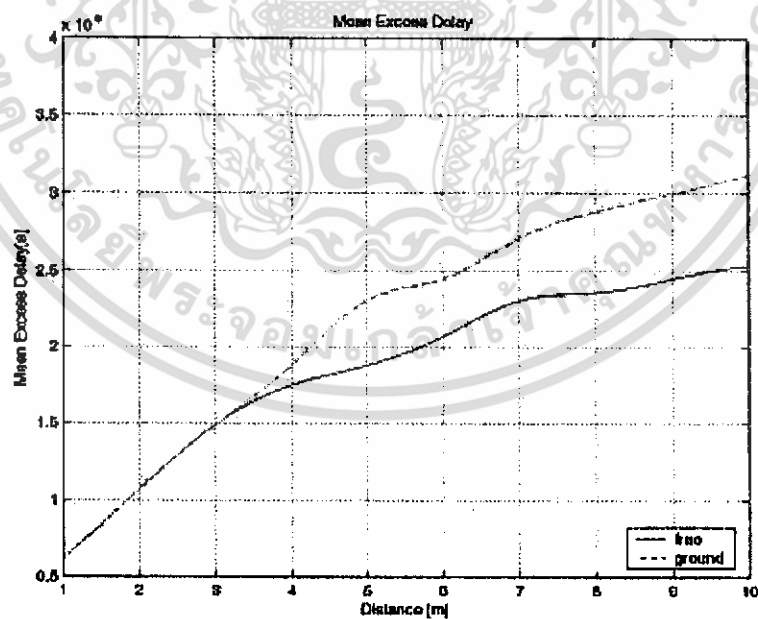
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบสัญญาณด้านรับเมื่อผ่าน Optimum Matched Filter กับ Isotropic Matched Filter

ระยะห่างระหว่าง Tx และ Rx	Optimum Matched Filter	Isotropic Matched Filter
1 m	-50.51	-52.03
2 m	-56.37	-58.50
3 m	-58.35	-62.27
4 m	-58.86	-64.83
5 m	-61.21	-66.79
5.5 m	-60.96	-67.36
6 m	-60.64	-67.71
6.5 m	-61.15	-68.03
7 m	-61.39	-68.29
7.5 m	-61.98	-68.84
8 m	-62.30	-69.06
8.5 m	-62.25	-69.89
9 m	-62.19	-70.30
9.5 m	-61.35	-71.90
10 m	-59.59	-71.06

จากกราฟแสดงความแตกต่างระหว่าง Optimum Matched Filter และ Isotropic Matched Filter โดยเมื่อระยะทางที่ทำการวัดสัญญาณทั้งหมด 15 จุด ดังกราฟ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ระยะทาง 1 เมตร มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับที่ระยะทางอื่น ๆ จะส่งผลให้ความแตกต่างระหว่าง Optimum Matched Filter และ Isotropic Matched Filter ต่างกันมากขึ้นซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า Correlation Coefficient



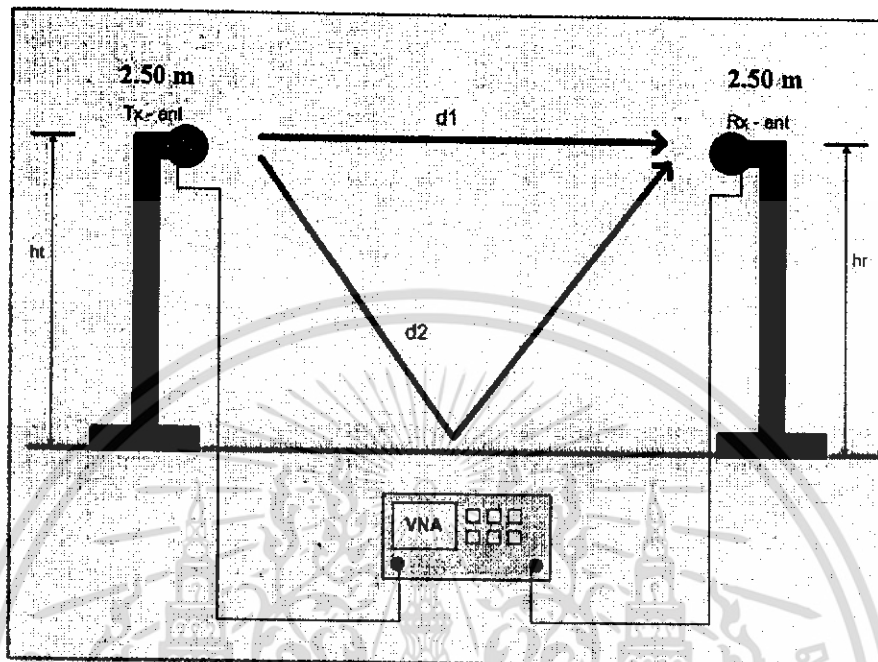
รูปที่ 4.15a การเปรียบเทียบ RMS Delay Spread ของ Free Space กับ Ground Reflection



รูปที่ 4.15b การเปรียบเทียบ Mean excess delay ของ Free Space กับ Ground Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.5 โมเดลที่ 3 (Model 3)



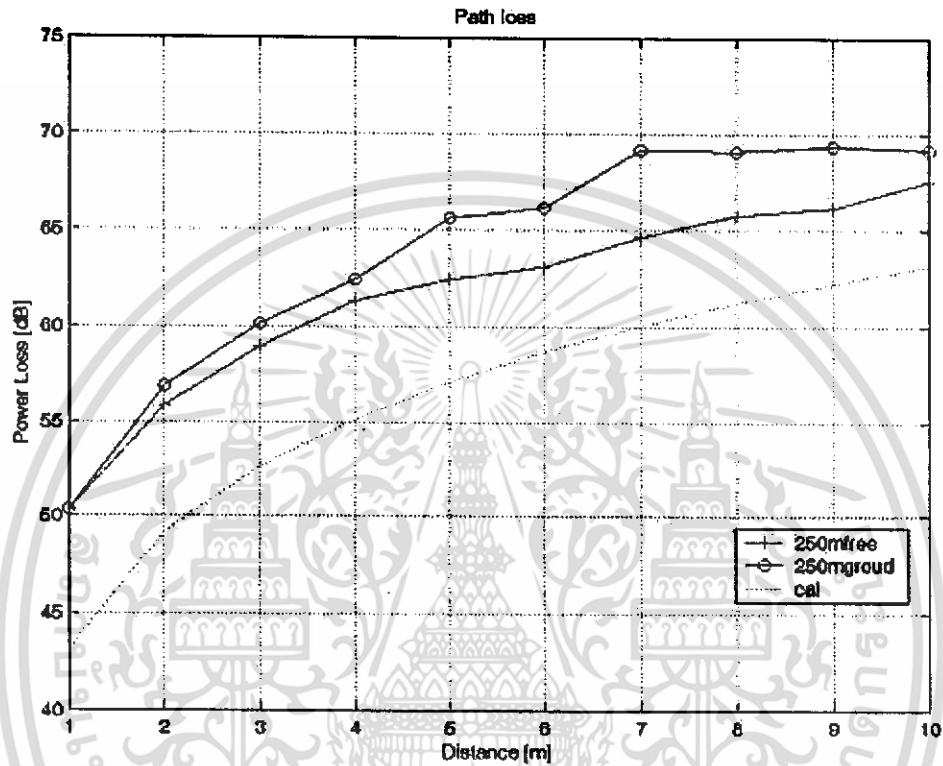
รูปที่ 4.16a โมเดลที่ใช้ในการวัดระยะเสาสูง 2.5 เมตร เสารับ 2.5 เมตร



รูปที่ 4.16b ภาพถ่ายรูปการวัดสัญญาณ Free Space กับสัญญาณ Ground Reflection

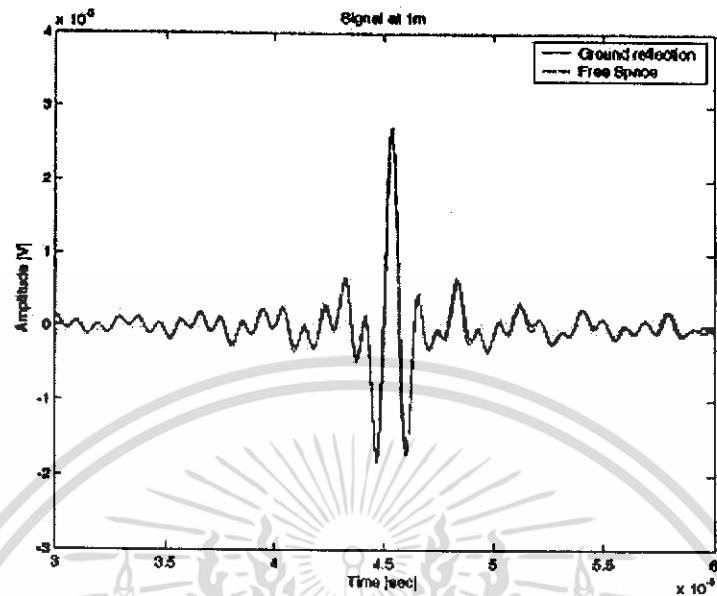
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลการทดลองโมเดลที่ 3

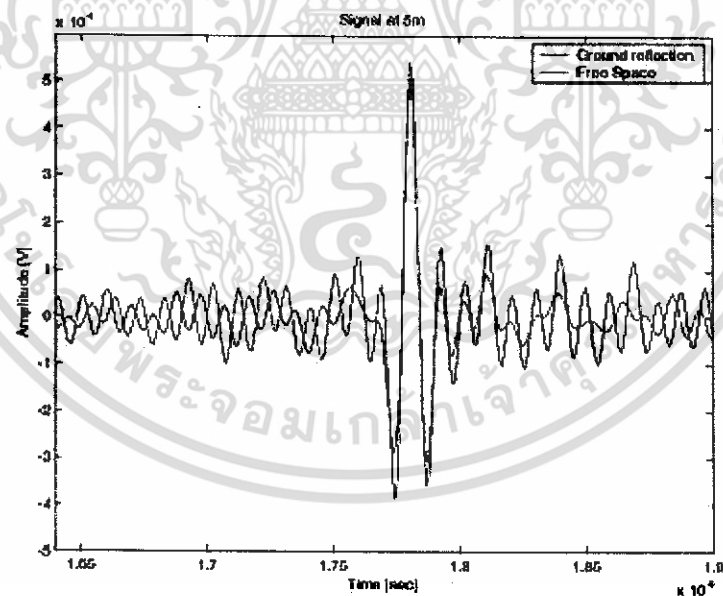


รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบ Path Loss ระหว่าง Free Space กับ Ground Reflection

จากกราฟค่าแสดงค่าความแตกต่างของสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection และจะเห็นได้ว่ายิ่งระยะทางไกลออกไปค่า PL ก็จะมีมากขึ้น นั่นก็แสดงถึงการรับสัญญาณในระยะที่ตำแหน่งใกล้ๆ จะรับได้ดีกว่าที่ระยะไกลออกไป

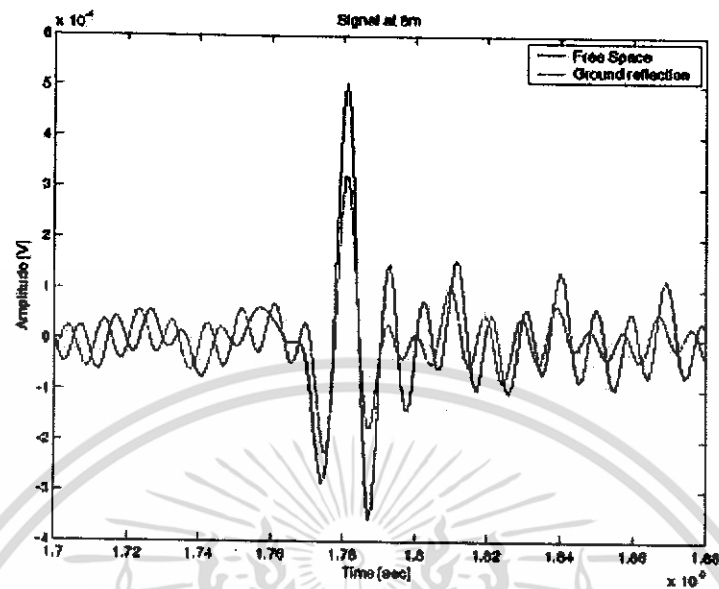


รูปที่ 4.18a การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 1 เมตร



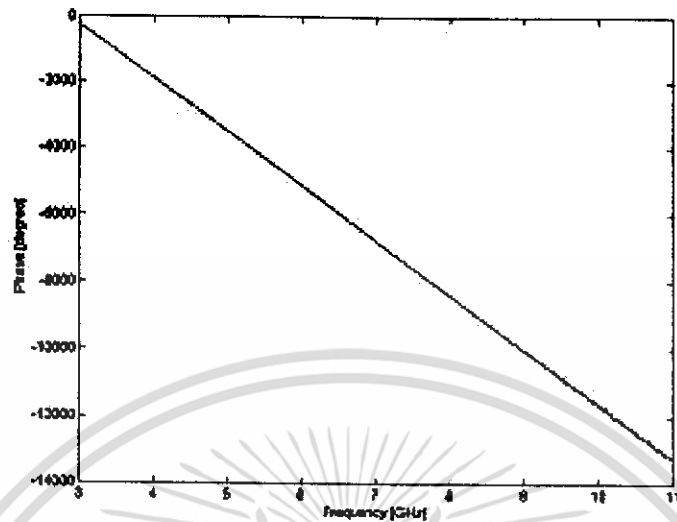
รูปที่ 4.18b การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

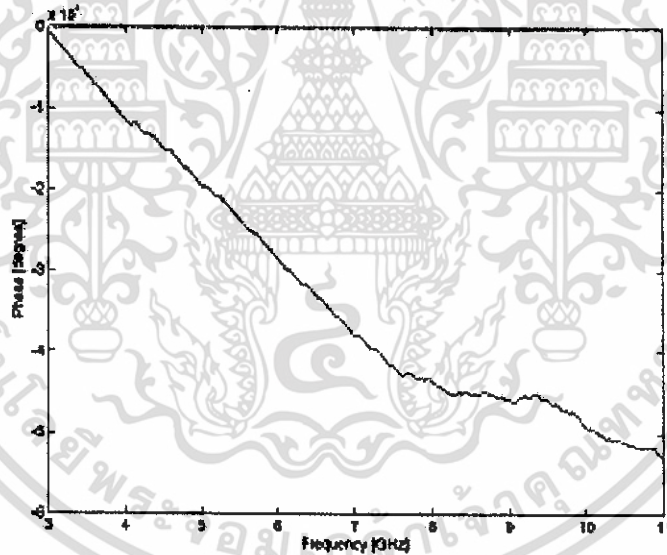


รูปที่ 4.18c การเปรียบเทียบสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection ทางด้านรับที่ ระยะทาง 8 เมตร

จากกราฟของรูปสัญญาณที่รับได้จากภาครับในระยะที่ 1 เมื่อนำสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection มาเปรียบเทียบกันสามารถอธิบายได้ว่า Amplitude ของสัญญาณ Ground จะต่ำกว่าของ Free Space เนื่องจากเกิดการแทรกสอดของสัญญาณทำให้สัญญาณที่รับได้เกิดการทับซ้อนกันทำให้ Amplitude ของสัญญาณ Ground ตกลงสัญญาณ



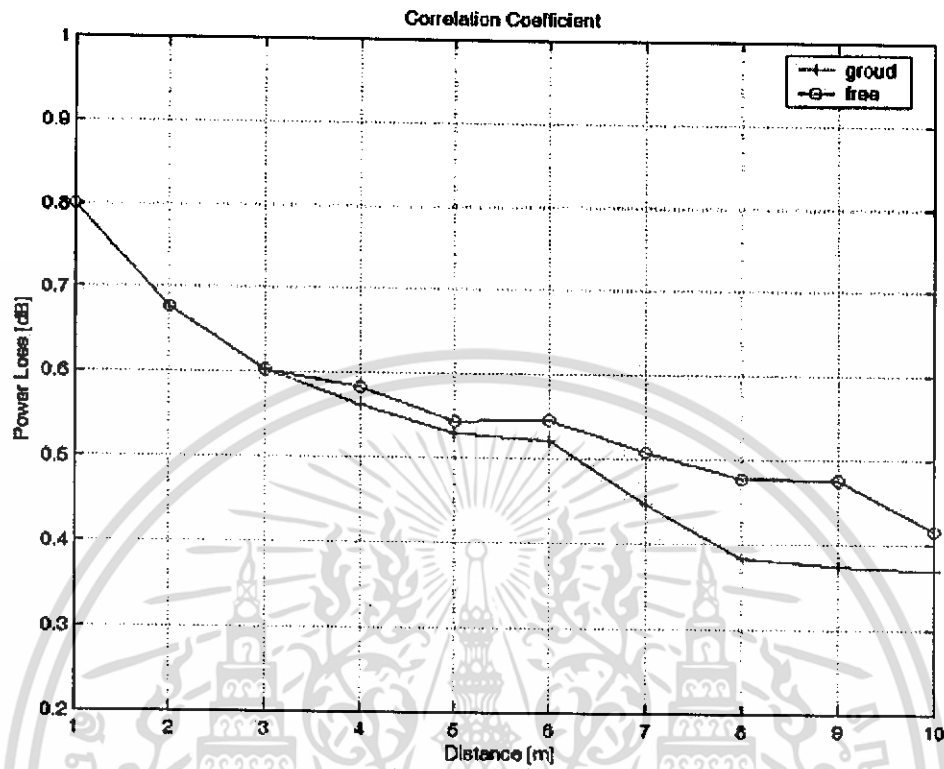
รูปที่ 4.19a ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 1 เมตร



รูปที่ 4.19b ความสัมพันธ์ของ Phase ที่มีผลต่อ Frequency ในระยะทางที่ 8 เมตร

จากรูปเป็นผลที่ได้จากการวัดการเปรียบเทียบของ Phase กับ Frequency เมื่อเกิดการสอดแทรกของสัญญาณในระยะที่ภาคส่งและภาครับห่างกันที่ 9 เมตร ทำให้การเปลี่ยนแปลงของเฟสตั้งแต่ 5-11GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



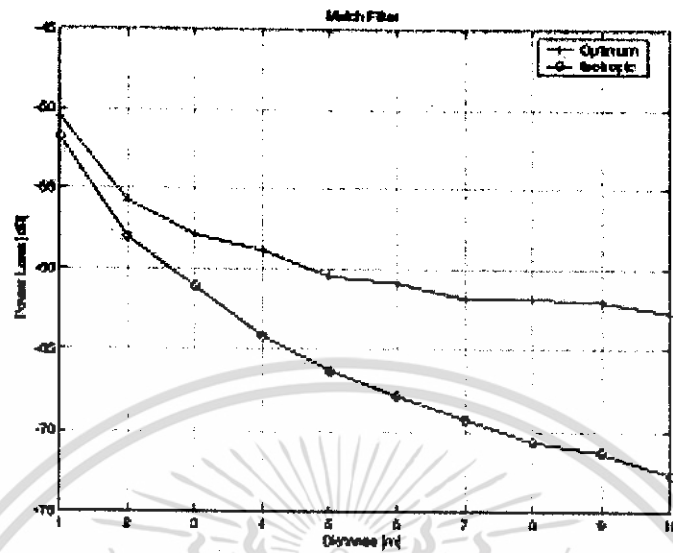
รูปที่ 4.20 กราฟค่า Correlation Coefficient ของสัญญาณ Free Space กับ Ground Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

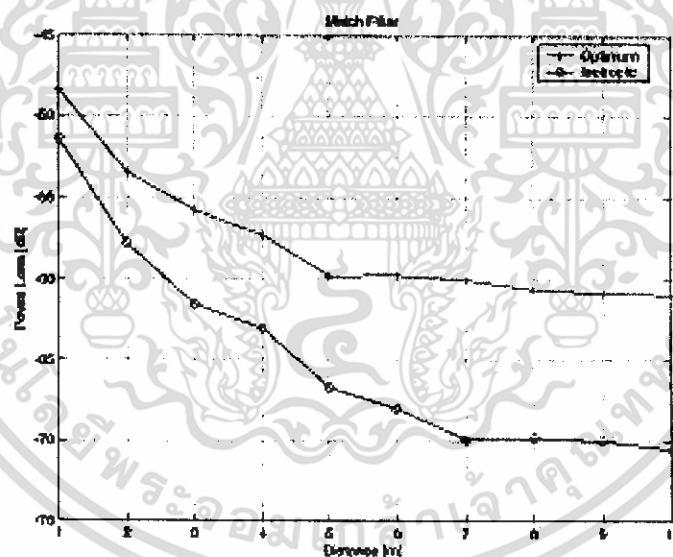
ตารางที่ 4.7 ค่า Correlation และค่าการสูญเสียเชิงวิถี

ระยะห่างระหว่าง Tx และ Rx	Correlation Coefficient	Path Loss(dB)
1 m	47.62%	51.26
2 m	42.99%	57.79
3 m	35.74%	59.99
4 m	28.73%	63.81
5 m	28.91%	65.89
5.5 m	28.98%	66.47
6 m	23.10%	67.66
6.5 m	23.46%	68.32
7 m	23.92%	69.35
7.5 m	20.23%	70.01
8 m	20.00%	70.66
8.5 m	26.76%	71.09
9 m	26.97%	70.77
9.5 m	21.11%	72.81
10 m	21.24%	72.76

ในตารางที่ 4.8 ค่า Correlation และค่าสูญเสียเชิงวิถีที่ระยะทั้งหมด 15 จุด จะเห็นว่าที่ระยะห่างของ Tx และ Rx ที่ 1 เมตร ค่า Correlation Coefficient อยู่ที่ 45.61% เป็นเปอร์เซ็นต์ที่สูงที่สุดแสดงว่าเกิดการบิดเบือนของรูปคลื่นสัญญาณ (Distortion) น้อยมากและมีค่าการสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) ที่ 51.26 dB ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำสุดจากระยะทางทั้งหมด



รูปที่ 4.21a ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Free Space



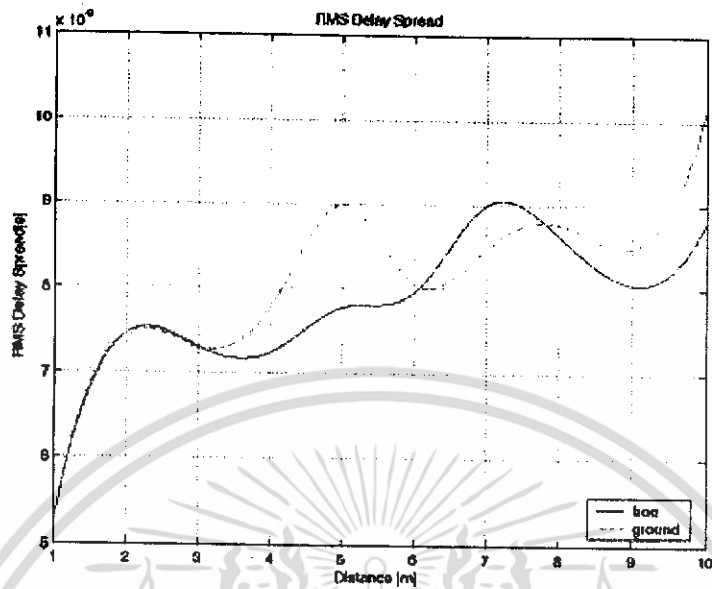
รูปที่ 4.21b ความแตกต่าง Optimum และ Isotropic ของสัญญาณ Ground Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

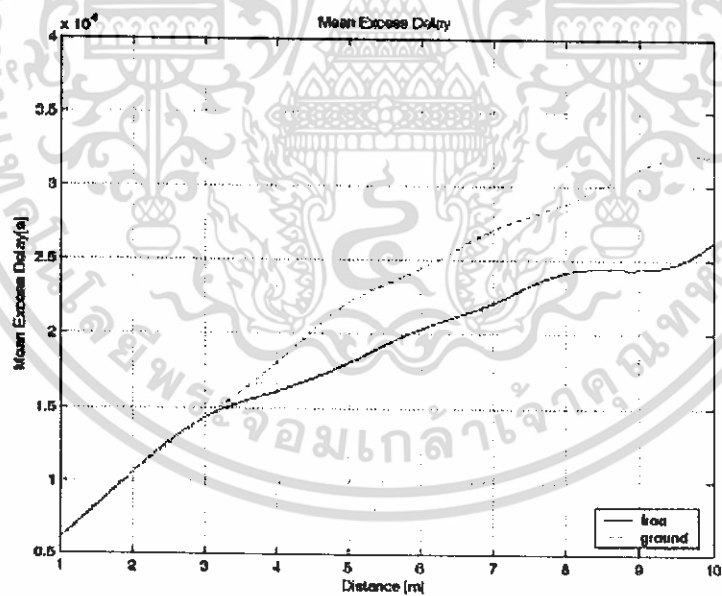
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบสัญญาณด้านรับเมื่อผ่าน Optimum Matched Filter กับ Isotropic Matched Filter

ระยะห่างระหว่าง Tx และ Rx	Optimum Matched Filter	Isotropic Matched Filter
1 m	-50.25	-51.87
2 m	-56.26	-58.42
3 m	-57.95	-61.73
4 m	-58.28	-64.50
5 m	-53.82	-66.62
5.5 m	-57.53	-67.01
6 m	-60.48	-67.30
6.5 m	-61.19	-68.10
7 m	-61.80	-68.39
7.5 m	-61.50	-68.92
8 m	-61.74	-69.08
8.5 m	-61.32	-69.45
9 m	-61.00	-69.93
9.5 m	-61.16	-70.51
10 m	-61.23	-70.72

จากกราฟความแตกต่างระหว่าง Optimum Matched Filter และ Isotropic Matched Filter โดยเมื่อระยะทางที่ทำการวัดสัญญาณทั้งหมด 15 จุด ดังกราฟ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ระยะทาง 1 เมตร มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับที่ระยะทางอื่น ๆ จะส่งผลให้ความแตกต่างระหว่าง Optimum Matched Filter และ Isotropic Matched Filter แตกต่างกันมากขึ้นซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า Correlation Coefficient



รูปที่ 4.22a การเปรียบเทียบ RMS Delay Spread ของ Free Space กับ Ground Reflection



รูปที่ 4.22b การเปรียบเทียบ Mean excess delay ของ Free Space กับ Ground Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

#### 5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

โครงการนี้ได้เสนอการวัดและวิเคราะห์การสอดแทรกของสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นสู่อากาศว่างในระบบแถบความถี่กว้างยิ่งเพื่อที่จะตอบสนองการใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สาย อุลตราไวด์แบนด์ที่ต้องใช้แบนด์วิธในการทำงานกว้างมากคือใช้ในแถบความถี่ 3.1 GHz ~10.6 GHz ซึ่งในโครงการนี้ได้ทำการกำหนดโมเดลที่ใช้ในการวัดขึ้นมา 3 แบบ คือ แบบแรกภาคส่งและภาครับมีระยะของความสูงที่ 1.5 เมตร แบบที่สองภาคส่งและภาครับมีระยะความสูงที่ 2 เมตร และแบบที่สามภาคส่งและภาครับมีระยะความสูงที่ 2.5 เมตร ในระยะห่างเริ่มต้นของเสาส่งและเสารับอยู่ที่ 1 เมตร และทำการเลื่อนออกทีละ 0.5 เมตร จนถึงที่ระยะ 10 เมตร

ซึ่งจะนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ และพารามิเตอร์แต่ละชนิดที่ใช้ในการวิเคราะห์และดูว่าการส่งสัญญาณในระยะห่างของภาคส่งและภาครับที่ 1~10 เมตร และที่ระดับความสูงทั้ง 3 ระดับด้วยระบบการสื่อสารไร้สายอุลตราไวด์แบนด์แบบแถบกว้างยิ่งว่ามีคุณสมบัติของการสูญเสียที่เกิดจากการสอดแทรก

#### 5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการดำเนินโครงการ

1. สามารถรู้หลักการของระบบการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่ง (UWB)
2. สามารถเปรียบเทียบหลักการของระบบการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่ง (UWB) ว่ามีข้อดีกว่าระบบ Wi-Fi และ Bluetooth อย่างไร
3. เพื่อนำผลที่ได้จากการวัดและวิเคราะห์ไปพัฒนาและแก้ไขในระบบการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งได้
4. สามารถนำระบบการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งไปใช้ในการส่งสัญญาณในระดับที่เกิดการสอดแทรกน้อยที่สุดได้

#### 5.3 ปัญหาที่พบในระหว่างการดำเนินโครงการ

1. ในการดำเนินการหาสถานที่การวัดยังไม่สามารถหาที่สถานที่ในการวัดที่โล่ง เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนของคลื่นสัญญาณที่ไม่ต้องการได้
2. เมื่อทำการวัดและนำผลการทดลองมาวิเคราะห์เราจะพบได้ว่าการสอดแทรกนั้นจะเกิดการสอดแทรกมากกว่าหนึ่งทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4 แนวทางในการแก้ปัญหา

1. ต้องทำการหาสถานที่ที่เกิดการสะท้อนของสัญญาณที่ไม่ต้องการเพื่อการทดลองและผลของการวิเคราะห์ออกมามีความผิดพลาดน้อยที่สุด
2. ในขั้นตอนการวัดและการสร้าง โมเดลจะต้องใช้ความรอบคอบให้มากที่สุดเพราะจะมีผลต่อการวิเคราะห์

#### 5.5 สรุป

จากการทดลอง A Study of Interference Signal from Ground Reflection to Free Space Transmission for UWB Impulse Radio โดยใช้แบบจำลองที่พิจารณาสัญญาณสองสัญญาณคือ สัญญาณที่มาจากทางตรง (direct path) เป็นสัญญาณเดินทางจากสายอากาศด้านส่งมาถึงสายอากาศด้านรับ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางในลักษณะ LOS และสัญญาณที่มาจากการสะท้อน (reflection path) เป็นสัญญาณที่เดินทางจากสายอากาศด้านส่งมาถึงสายอากาศด้านรับ โดยสัญญาณจะเดินทางกระทบพื้นผิวและสะท้อนกลับมา ซึ่งการสะท้อนของคลื่นที่กระทบพื้นผิวส่งผลให้สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับประกอบด้วยสัญญาณที่แพร่มาจากมากกว่าหนึ่งทิศทาง และโดยทั่วไปแล้วสัญญาณเหล่านี้มักจะเกิดทางมาถึงภาครับด้วยเวลาที่แตกต่างกัน และเมื่อมีขนาดที่แตกต่างกันด้วย เมื่อสัญญาณเหล่านี้มารวมเข้าด้วยกัน จะได้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดแปรเปลี่ยนได้อย่างมากและจากการทดลองจะมีการสูญเสียเชิงวิถี (path loss) เป็นการลดทอนสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างภาครับและภาครับสัญญาณ โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณจะลดลงตามค่า  $d^{-n}$  โดย  $d$  คือระยะทางระหว่างภาครับและภาครับ ส่วน  $n$  เป็นค่าคงที่หนึ่งมีขนาดแตกต่างกันไปตามสภาพบริเวณที่ส่งผ่าน

## บรรณานุกรม

1. พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์. ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่. กรุงเทพมหานคร: บริษัท สำนักพิมพ์ดวงกมล, 2542.
2. ตัญฉกร วุฒิสัทธาภิบาล. หลักการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
3. บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. หลักการไฟฟ้าสื่อสาร. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.
4. ตัญฉกร วุฒิสัทธาภิบาล. วิศวกรรมโทรคมนาคม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
5. Theodore S. Rappaport. **Wireless Communications: Principles & Practice**. 2<sup>nd</sup> ed. New jersey: Prentice Hall PTR, Inc., 1996.
6. M.GHAVAMI, L.B. MICHAEL, and R.KOHNO. **Ultra Wideband signals and systems in communication engineering**: John-Wiley & Sons ,2004.
7. Kazimierz Siwiak, Debra McKeown. **Ultra-Wideband radio technology**: John-Wiley & Sons ,2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้