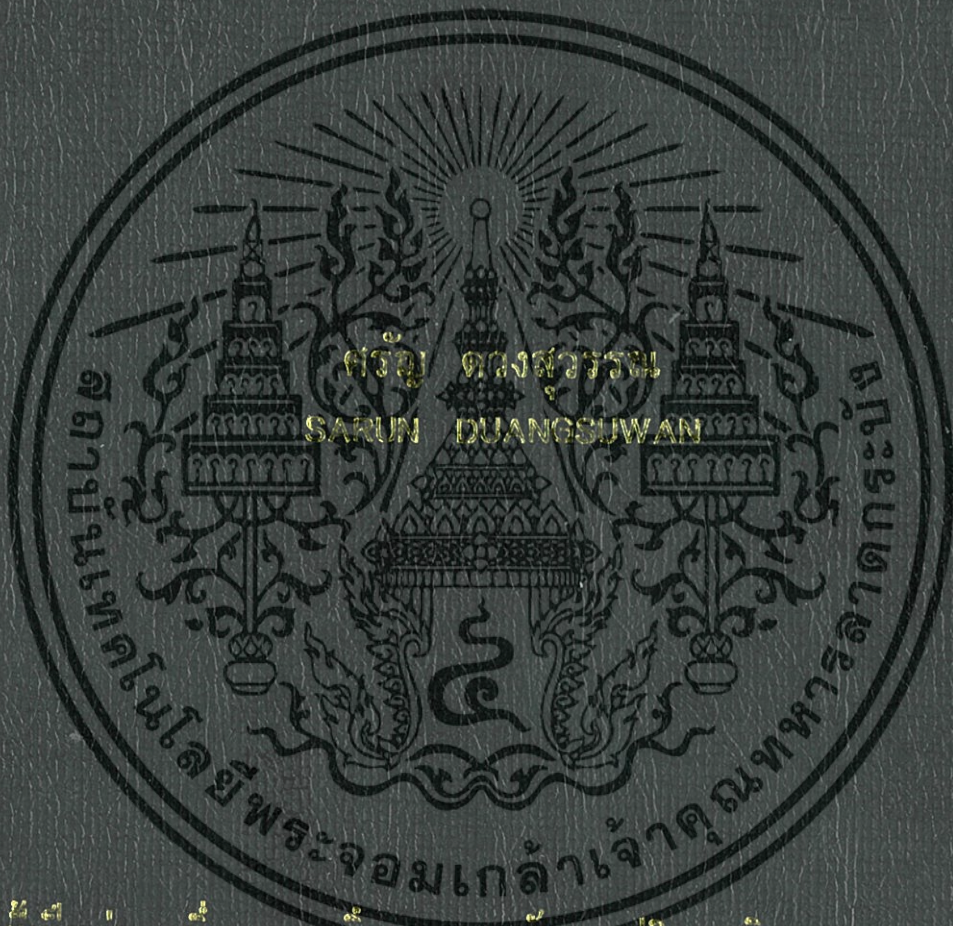


การศึกษาช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่  
วิทยุสำหรับระบบไร้สายระยะสั้น

A STUDY OF RFID PROPAGATION CHANNEL FOR SHORT RANGE  
WIRELESS SYSTEMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-230-008

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่  
วิทยุสำหรับระบบไร้สายระยะสั้น

A STUDY OF RFID PROPAGATION CHANNEL FOR SHORT RANGE  
WIRELESS SYSTEMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2553

KMITL-2010-EN-M-230-008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF RFID PROPAGATION CHANNEL FOR SHORT RANGE  
WIRELESS SYSTEMS**



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

**2010**

**KMITL 2010-EN-M-230-008**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2010**

**FACULTY OF ENGINEERING**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับระบบไร้สายระยะสั้น

Thesis Title A Study of RFID Propagation Channel for Short Range Wireless Systems

นักศึกษา นายศรัณย์ ดวงสุวรรณ






รหัสประจำตัว 51061018

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-230-008

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.พิชญ์ สุพรรณกูด	
ผศ.มนต์ชัย เข้มข้อย	
รศ.ดร.ประยูทธ อัครเอกมาลิน	
ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์	
ดร.สถาพร พรหมวงศ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันพุธที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2553 เวลา 09.30-11.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG


คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.  
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์  
วันที่ 11 เดือน มิ.ย. พ.ศ. 2553  
ลงชื่อ 

ใบนี้เป็นการรับรองการส่งงานเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบระบบ ตัวต้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับระบบไร้สายระยะสั้น
นักศึกษา	นายสรัญ ดวงสุวรรณ
รหัสประจำตัว	51061018
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สถาพร พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบการสื่อสารแบบระบบตัวต้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่ย่านความถี่ 2.4 GHz การวิเคราะห์ช่องสัญญาณการแพร่กระจายบนพื้นฐานทฤษฎีและหลักการส่งผ่านของฟรีส ซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและเป็นที่ยอมรับในสาขาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมการสื่อสารไร้สายเหมาะต่อการนำมาวิเคราะห์การสื่อสารแบบแถบแคบ ซึ่งในการทดลองวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุและทดสอบการถ่ายโอนของช่องสัญญาณทั้งทางขนาดและทางเฟสตามสมมติฐานของการใช้งานระบบระบบตัวต้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ซึ่งพิจารณาศึกษาถึงคุณลักษณะการเลี้ยวเบนของคลื่น คุณลักษณะการวางโพลาไรซ์ของสายอากาศและคุณลักษณะบริเวณแถบสนามระยะใกล้และไกลของแบบจำลองช่องสัญญาณ โดยใช้สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปความถี่ 2.4 GHz เป็นสายอากาศทดสอบทั้งทางด้านส่งและทางด้านรับของแต่ละแบบจำลอง ทำการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์และบันทึกผล จากนั้นนำเอาข้อมูลที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์ประเมินค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณทั้งทางขนาดและทางเฟส, ค่าการสูญเสียเชิงวิถี, ภาพตัดขวางการประวิงเวลา, สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และอัตราการผิดพลาดของบิต ซึ่งการศึกษาทดลองวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์และแนวทางการทำวิจัยพัฒนาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบระบบตัวต้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุต่อไปในอนาคต

<b>Thesis Title</b>	A Study of RFID Propagation Channel for Short Range Wireless Systems
<b>Student</b>	Mr. Sarun Duangsuwan
<b>Student ID.</b>	51061018
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Information Engineering
<b>Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Sathaporn Promwong

## ABSTRACT

This thesis is to study the characteristics of propagation channel of radio frequency identification (RFID) within an indoor environment. Because of significant to wireless 2.4 GHz communication system, the propagation channel analysis based on Friis transmission formula that is convenient and not complicated for use, which is approved in many files such as science and wireless communication engineering. Therefore, this formula is suitable for narrow band communications. In this thesis, we defined the model of propagation channel on usable hypothesis of radio frequency identification (RFID) as well as the magnitude and phase channel transfer function under test within an indoor environment, which considered to waves characteristic of diffraction, the antennas polarization and near-far field region of channel modeling. Using the microstrip patch antennas are operating frequency of 2.4 GHz test for the transmitter and receiver in each model, and using vector network analyzer (VNA) machine is employed for measuring and recording. The measured data from the experimental will be considered to fine the magnitude and phase of channel transfer function, path loss (PL), power delay profile (PDP), correlation coefficient ( $C_c$ ), and bit error rate (BER) are evaluated. This thesis very useful and can be used to developing and improving the performance of radio frequency identification communications in the future.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร. สถาพร พรหมวงศ์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ให้การอนุเคราะห์และสนับสนุนงานวิจัย คอยอบรมสั่งสอนชี้แนะแนวทางการดำเนินการเกี่ยวกับงานวิจัยได้อย่างดีเยี่ยม ตลอดจนถ่ายทอดวิชาความรู้ความสามารถให้ศิษย์ได้เข้าใจได้อย่างเต็มที่และให้คำปรึกษาทุกเรื่องด้านการวิจัยและการศึกษาตลอดมา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถในการนำเสนองานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งใจต่อความเป็นอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ

ขอบพระคุณคณาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและวิจัย

ขอบคุณ คุณณรงค์ศักดิ์ มีโนสทธิชัย คุณสนธิ เตียวลิม และเพื่อนๆ น้องๆ ที่คอยให้ข้อเสนอแนะและคอยสอบถามถึงความคืบหน้าของงานวิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งสนับสนุนในทุกด้านของการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอบอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศรัณู ดวงสุวรรณ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 กล่าวนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 การเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	4
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	6
บทที่ 2 เทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	7
2.1 กล่าวนำ.....	7
2.2 ความเป็นมาของเทคโนโลยีระบุตัวตนคลื่นความถี่วิทยุ.....	8
2.3 คุณลักษณะของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนคลื่นความถี่วิทยุ.....	9
2.3.1 องค์ประกอบที่สำคัญ.....	9
2.3.2 หลักการทำงานเบื้องต้น.....	11
2.3.3 การสื่อสารแบบไร้สายของเทคโนโลยีระบุตัวตนคลื่นความถี่วิทยุ.....	11
2.3.3.1 วิธีการสื่อสารระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ.....	12
2.3.3.2 รูปแบบการสื่อสารระหว่างเครื่องส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ.....	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 ระยะการรับส่งข้อมูลและกำลังส่ง.....	14
2.3.5 อัตราการรับส่งข้อมูลและแบนด์วิดท์.....	15
2.4 คลื่นพาหะและมาตรฐานของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	15
2.4.1 แนวความคิดของมาตรฐานระบบเปิด กับระบบปิด.....	17
2.4.2 มาตรฐานในการใช้งาน.....	18
2.4.3 กฎข้อบังคับของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในประเทศไทย.....	19
2.4.3.1 ย่านความถี่ 920 MHz ถึง 925 MHz.....	19
2.4.3.2 การได้รับการยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาต.....	19
2.4.3.3 การตรวจสอบลักษณะทางวิชาการ.....	19
2.4.3.4 สิทธิการคุ้มครอง.....	19
2.5 การนำเทคโนโลยีแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุไปใช้งาน.....	20
2.6 บทสรุป.....	21
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	22
3.1 กล่าวนำ.....	22
3.2 ช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นและระบบการสื่อสารระยะสั้น.....	22
3.2.1 คุณลักษณะของคลื่นวิทยุ.....	24
3.2.2 คุณสมบัติของคลื่นวิทยุที่เกิดภายในช่องสัญญาณ.....	25
3.2.2.1 การลดทอนคลื่น.....	25
3.2.2.2 สิ่งกีดขวางมีผลต่อช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น.....	25
3.2.3 การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction).....	26
3.2.3.1 Fresnel Zone Geometry.....	27
3.2.3.2 วงกลมเฟรสเนล โซน (Fresnel zone circle).....	29
3.2.3.3 Knife-edge diffraction model.....	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.4 การแพร่กระจายคลื่น.....	32
3.3 ทฤษฎีและหลักการส่งผ่านในช่องสัญญาณอวกาศสำหรับการสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	33
3.3.1 ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของระบบส่ง (Effective isotropic radiated power; EIRP).....	34
3.3.2 การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss).....	35
3.4 วิเคราะห์แบบการถ่ายโอนช่องสัญญาณของฟรีสในอวกาศสำหรับการสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	36
3.4.1 โพลาริเซชัน (Polarization).....	37
3.4.2 การแพร่กระจายของสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล (Near-Far field).....	38
3.4.3 พารามิเตอร์การกระจายทางเวลา.....	39
3.4.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	41
3.4.5 อัตราความผิดพลาดของบิต.....	41
3.5 บทสรุป.....	43
บทที่ 4 การวัดและขั้นตอนการทดลองวิจัย.....	44
4.1 กล่าวนำ.....	44
4.2 การทดลองวัดช่องสัญญาณ.....	45
4.2.1 ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ.....	45
4.2.2 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่.....	46
4.3 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลองวิจัย.....	48
4.3.1 สายอากาศที่ใช้ในการทดลองวิจัย.....	48
4.3.1.1 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....	49
4.3.2 ลักษณะของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่ใช้ในการทดลอง.....	50
4.3.3 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์.....	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น.....	53
4.4.1 แบบจำลองการวัดที่ 1 คุณลักษณะช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นใน สภาวะแวดล้อมภายในอาคาร.....	53
4.4.1.1 แบบจำลองการวัดรอบทิศทาง.....	53
4.4.1.2 แบบจำลองการวัดในระยะทางตรง.....	54
4.4.2 แบบจำลองการวัดที่ 2 คุณลักษณะช่องสัญญาณการแพร่กระจายจากการ เดี่ยวเบนของคลื่น.....	56
4.4.3 แบบจำลองการวัดที่ 3 คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจาก การโพลาริเซชันของสายอากาศ.....	58
4.4.4 แบบจำลองการวัดที่ 4 คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นใน สนามระยะใกล้และสนามระยะไกล (Near-Far field).....	61
4.5 บทสรุป.....	63
บทที่ 5 ผลการทดลองวิจัยช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	64
5.1 กล่าวนำ.....	64
5.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์แบบจำลองการวิจัยวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น.....	64
5.2.1 แบบจำลองการวัดที่ 1-1.....	64
5.2.1.1 ผลการวัดขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอน.....	64
5.2.1.2 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี.....	66
5.2.1.3 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา.....	67
5.2.2 แบบจำลองการวัดที่ 1-2.....	69
5.2.2.1 ผลการวัดขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอน.....	69
5.2.2.2 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี.....	70
5.2.2.3 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา.....	71
5.2.2.4 อัตราบิตผิดพลาด.....	73

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.3 แบบจำลองการวัดที่ 1.....	73
5.2.3.1 ผลการวัดขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอน.....	73
5.2.3.2 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี.....	76
5.2.3.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	77
5.2.3.4 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา.....	78
5.2.4 แบบจำลองการวัดที่ 3.....	79
5.2.4.1 ผลการวัดขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอน.....	79
5.2.4.2 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา.....	85
5.2.4.3 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี.....	88
5.2.4.4 อัตราบิดผิพลาสด.....	89
5.2.5 แบบจำลองการวัดที่ 4.....	92
5.2.5.1 ผลการวัดขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ.....	92
5.2.5.2 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี.....	94
5.2.5.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	95
5.3 บทสรุป.....	96
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	98
6.1 กล่าวนำ.....	98
6.2 สรุปการศึกษาทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากแบบจำลองที่ 1.....	99
6.3 สรุปการศึกษาทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากแบบจำลองที่ 2.....	100
6.4 สรุปการศึกษาทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากแบบจำลองที่ 3.....	101
6.5 สรุปการศึกษาทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากแบบจำลองที่ 4.....	101
6.6 ข้อเสนอแนะ.....	102
เอกสารอ้างอิง.....	103

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	128



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อภา IX ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ย่านความถี่ต่างๆ ของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุและการใช้งาน.....	16
3.1 ค่าคงที่สภาวะแวดล้อมในแต่ละกรณี.....	35
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบจำลองที่ 1-1.....	54
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบจำลองที่ 1-2.....	55
4.3 แสดงระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ.....	56
4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบจำลองที่ 2.....	57
4.5 รัศมีของระยะเฟสเนลโซน.....	58
4.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบจำลองที่ 3.....	60
4.7 แสดงระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ.....	60
4.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบจำลองที่ 4.....	61
5.1 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี.....	67
5.2 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา.....	68
5.3 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี.....	71
5.4 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา.....	72
5.5 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี.....	77
5.6 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างละเอียด.....	78
5.7 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา.....	79
5.8 กำลังงานการสูญเสียจากการส่งผ่านช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น.....	89
5.9 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี.....	96
5.10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ .....	1
2.1 การสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในอวกาศว่าง.....	7
2.2 การใช้หลักการสะท้อนกลับในการสื่อสารของระบบเรดาร์ [1].....	9
2.3 องค์ประกอบหลักในการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ [2].....	10
2.4 คุณลักษณะของการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องรับ-ส่งหรือแท็ก [3].....	12
2.5 สเปกตรัมความถี่วิทยุในการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นวิทยุ [4].....	13
2.6 บริเวณการแบ่งกลุ่มประเทศสำหรับการกำหนดย่านความถี่ที่ใช้งาน.....	16
3.1 เทคโนโลยีการสื่อสารในระบบระยะสั้น.....	23
3.2 ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [4].....	24
3.3 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ [4].....	24
3.4 การเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อเจอสิ่งกีดขวาง.....	26
3.5 แบบจำลองกรณีกำหนดให้ความสูงของสายอากาศด้านส่ง-รับมีความสูงเท่ากัน.....	27
3.6 แบบจำลองกรณีกำหนดให้ความสูงของสายอากาศด้านส่งสูงกว่าสายอากาศด้านรับ.....	27
3.7 แบบจำลองกรณีกำหนดให้ความสูงของสายอากาศรับมีระดับที่ต่ำสุด.....	28
3.8 ขอบเขตเฟรสเนลโซน.....	29
3.9 การเกิดหน้าคลื่นใหม่เมื่อเจอสิ่งกีดขวาง.....	30
3.10 อัตราการขยายของการเลี้ยวเบนแปรผันตามพารามิเตอร์ $v$ [6].....	31
3.11 การจางหายในรูปแบบสเกลแคบและแบบสเกลกว้าง [7].....	32
3.12 การสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในอวกาศว่าง.....	33
3.13 บล็อกโคอะแกรมการถ่ายโอนช่องสัญญาณของฟรีสในอวกาศว่าง.....	36
3.14 คุณลักษณะของการโพลาไรเซชันสายอากาศ [9].....	37
3.15 ระดับค่าเฉลี่ยการประวิงเวลา [12].....	40
3.16 กราฟความน่าจะเป็นต่ออัตราความผิดพลาดของบิต.....	42
4.1 ระบบการวัดผลตอบสนองทางความถี่ในโดเมนความถี่ [7].....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบและความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่.....	46
4.3 การวัดช่องสัญญาณการสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	47
4.4 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz.....	50
4.5 $S_{11}$ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....	50
4.6 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์.....	51
4.7 โพล์ซาร์ตของขั้นตอนการทดลองวิจัย.....	52
4.8 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองวัดแบบจำลองรอบทิศทาง.....	53
4.9 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองวัดแบบจำลองระยะทางตรง.....	55
4.10 สมมุติฐานการเลี้ยวเบนของคลื่นในระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	57
4.11 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากการเลี้ยวเบน.....	57
4.12 แบบจำลองการวัด โพลาริเซชันของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....	59
4.13 การจัดวางตำแหน่งในการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากการโพลาไรเซชันของสายอากาศ.....	60
4.14 การจัดวางตำแหน่งการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในสนามระยะใกล้และไกล.....	62
5.1 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	65
5.2 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	65
5.3 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	66
5.4 ภาพตัดขวางการประวิงเวลาของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	68
5.5 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	69
5.6 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	70
5.7 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	69
5.8 ภาพตัดขวางการประวิงเวลาของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	72
5.9 อัตราบิดผิพลาต.....	73
5.10 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสายอากาศส่งในแบบจำลองการเลี้ยวเบนคลื่นวิทยุ.....	74

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนสายอากาศส่งในแบบจำลองการเลี้ยวเบนคลื่นวิทยุ.....	74
5.12 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายจากการเลี้ยวเบนคลื่น.....	75
5.13 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายจากการเลี้ยวเบนคลื่น.....	75
5.14 กำลังงานการสูญเสียของช่องสัญญาณการเลี้ยวเบนของคลื่นจากการวัด.....	76
5.15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากการเลี้ยวเบน.....	77
5.16 ภาพตัดขวางการประวิงเวลาของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของการเลี้ยวเบน.....	78
5.17 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งจากการวัด.....	80
5.18 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งจากการวัด.....	80
5.19 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่น ความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Vertical).....	81
5.20 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่น ความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Vertical).....	81
5.21 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่น ความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Horizontal).....	82
5.22 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่น ความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Horizontal).....	82
5.23 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่น ความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Horizontal).....	83
5.24 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่น ความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Horizontal).....	83
5.25 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่น ความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Vertical).....	84
5.26 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่น ความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Vertical).....	84
5.27 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Vertical).....	86

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.28 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Horizontal).....	86
5.29 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Horizontal).....	87
5.30 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Vertical).....	87
5.31 การสูญเสียจากการส่งผ่านของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุทั้งกรณี Co-polarization และ Cross-polarization ของสายอากาศ.....	88
5.32 อัตราบิดผิพลาต (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Vertical).....	90
5.33 อัตราบิดผิพลาต (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Horizontal).....	89
5.34 อัตราบิดผิพลาต (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Horizontal).....	91
5.35 อัตราบิดผิพลาต (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Vertical).....	91
5.36 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งจากการวัด.....	93
5.37 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งจากการวัด.....	93
5.38 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณของแถบสนามระยะใกล้และระยะไกล.....	94
5.39 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณของแถบสนามระยะใกล้และระยะไกล.....	94
5.40 การสูญเสียเชิงวิถีของการแพร่กระจายในแถบสนามระยะใกล้และระยะไกล.....	95
5.41 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการแพร่กระจายในแถบสนามระยะใกล้และระยะไกล.....	97

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

กำลังส่งออกอากาศสมมูลแบบไอโซโทรปิก (Equivalent isotropic radiated power)	EIRP
คณะกรรมการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communication Commission)	FCC
หน่วยงานกำหนดแถบรหัส (Electronic Product Code)	EPC
สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union)	ITU
หน่วยงานกำหนดมาตรฐานสากล (International Standard Organization)	ISO
ระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Identification)	RFID
ย่านความถี่สำหรับใช้ในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ (Industrial Scientific Medical)	ISM
เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer)	VNA
คลื่นวิทยุ (Radio Frequency)	RF
ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (Power delay profile)	PDP
ระดับแนวสายตา (Line of sight)	LOS
อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio)	SNR
อัตราผิดพลาดบิต (Bit error rate)	BER
เครื่องส่ง (Transmitter)	Tx
เครื่องรับ (Receiver)	Rx
เดซิเบล (Decibel)	dB
เฮิรตซ์ (Hertz)	Hz
กิกะเฮิรตซ์ (Gigahertz)	GHz
เมตร (meter)	m
วินาที (second)	s
นาโนวินาที (nanosecond)	ns
มิลลิวัตต์ (milliwatt)	ms
ความเร็วแสง (Velocity of light)	$c$
ความถี่ (Frequency)	$f$
ฟังก์ชันการถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency transfer function)	$H(\omega)$

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญญาณอินพุท (Input signal)	$X(\omega)$
สัญญาณเอาต์พุท (Output signal)	$Y(\omega)$
แบนด์วิดท์ (Bandwidth)	$B$
เวลา (Time), วินาที	$t$
จำนวนจุดของความถี่	$N_{\text{smp}}$
อัตราส่วนของแรงดันต่อคลื่นนิ่ง (Voltage standing wave ratio)	VSWR
ความยาวคลื่น (Wavelength)	$\lambda$
ขั้วของสัญญาณรับ	$\hat{\theta}_r$
ขั้วของสัญญาณส่ง	$\hat{\theta}_t$
พลังงานเฉลี่ยต่อบิต	$E_b$
ความหนาแน่นกำลังงานของสัญญาณรบกวน	$N_0$
ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต (Probability of error)	$P_B$
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)	$C_c$
การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss)	$PL$
สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient)	$S_{21}$
อัตราความเร็วบิต (Bit rate)	$R_b$
อัตราการขยายในตัวกลางอวกาศว่าง	$G_f$
อัตราการขยายของสายอากาศส่ง	$G_t$
อัตราการขยายของสายอากาศรับ	$G_r$
กำลังงานของเครื่องส่ง	$P_t$
กำลังงานของเครื่องรับ	$P_r$
ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ	$d$
ระยะทางอ้างอิงสนามระยะไกล	$d_0$
สเกลทางเวลา (Time scaling)	$\tau$
ค่าการเฉลี่ยประวิงเวลา (Mean exceed delay)	$\bar{\tau}$

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ค่าความถี่บนของระบบการสื่อสาร	$f_H$
ค่าความถี่ล่างของระบบการสื่อสาร	$f_L$
สัมประสิทธิ์ช่องเปิด (Aperture effective)	$A_e$
ขนาดของสายอากาศ (Antenna diameter)	$D$
ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่ง	$H_t(f)$
ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศรับ	$H_r(f)$
ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณอวกาศว่าง	$H_f(f)$
สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศทางด้านส่ง	$\Gamma_t$
สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศทางด้านรับ	$\Gamma_r$
เวกเตอร์โพลาริเซชันของสายอากาศทางด้านส่ง	$\hat{p}_t$
เวกเตอร์โพลาริเซชันของสายอากาศทางด้านรับ	$\hat{p}_r$



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Identification: RFID) มีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อการระบุและจำแนกสิ่งของและได้เข้ามามีบทบาทอย่างยิ่งในชีวิตประจำวัน ซึ่งระบบการสื่อสารของเทคโนโลยีนี้มีประโยชน์อันหลากหลายมากกว่าเทคโนโลยีบ่งชี้อัตโนมัติอื่นๆ อาทิเช่น เทคโนโลยีรหัสแถบ (Barcode) เป็นต้น โดยข้อดีและจุดเด่นของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนี้คือ ความสามารถในการอ่านข้อมูลของวัตถุได้พร้อมกันหลายๆ วัตถุโดยไม่ต้องมีการสัมผัส สามารถอ่านได้ในขณะที่วัตถุกำลังเคลื่อนที่และมีทัศนวิสัยที่ไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้นแรงดันสะเทือน การกระทบกระแทก สามารถอ่านข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว และสามารถสื่อสารผ่านตัวกลางได้หลายอย่าง อาทิเช่น พลาสติก กระดาษ หรือวัสดุทึบแสงชนิดอื่นๆ



รูปที่ 1.1 ระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ [1]

ระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นระบบที่ใช้คลื่นความถี่พาห์แบบแถบแคบ ย่านความถี่ที่ได้รับการจัดสรรให้มีการใช้งาน อาทิเช่น ย่านความถี่ต่ำ 125 kHz, ย่านความถี่สูง 13.56 MHz, ย่านความถี่สูงยิ่ง 868 MHz และ 920 MHz, ย่านความถี่ไมโครเวฟ 2.4 GHz และ 5.8 GHz เป็นต้น ในกรณีที่มีการใช้งานระบบแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในระยะไกลมากกว่า 1 เมตรขึ้นไป ระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่าย จะทำให้เกิดการลดทอนประสิทธิภาพของการรับส่งสัญญาณ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง การสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่ายจะสื่อสารกันในระยะใกล้ๆ เนื่องจากเป็นลักษณะการสื่อสารด้วยการเหนี่ยวนำด้วยคลื่นแม่เหล็ก แต่ในทางกลับกัน ระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่สูงยิ่งและย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น การสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่ายจะสื่อสารได้ในระยะที่ไกลขึ้น ด้วยเนื่องจากคุณลักษณะจะเป็นการสื่อสารด้วยการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งความถี่ยิ่งสูง ความยาวคลื่นสั้น ก่อผลดีในด้านการออกแบบสายอากาศที่มีขนาดเล็ก ทั้งยังมีสมรรถนะในการรับส่งสัญญาณที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้งานของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่ต่ำกว่า 30 MHz

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณในการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนั้น คือ สภาพแวดล้อมภายในอาคาร อาทิเช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ประตู หน้าต่าง กำแพง ผนัง และอื่นๆ เป็นต้น ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุได้ทั้งสิ้น ดังนั้น การศึกษาถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการออกแบบระบบและปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนั้น กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันและต่อไปอนาคต ได้มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยอย่างกว้างขวาง และมีบริษัทได้ผลิตขึ้นมาใช้กันบ้างแล้ว แต่ไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควรเนื่องจากประสิทธิภาพการสื่อสารได้ในระยะที่ใกล้ๆ เท่านั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ย่านความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่ใช้งานในทางอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ การแพทย์ และมีแนวโน้มนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากข้อดีคือ ขนาดเล็ก ใช้งานง่ายและราคาถูกรวมถึงมีประสิทธิภาพในการสื่อสารได้ดีในกลุ่มอุปกรณ์ไร้สายระยะสั้นด้วยกัน แต่สิ่งที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงและต้องพิจารณาเป็นอย่างยิ่งคือ ช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในอวกาศว่างและสภาพแวดล้อมที่เป็นผลต่อประสิทธิภาพการสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่

วิทยุย่านความถี่นี้จึงจำเป็นต้องศึกษาและวิจัย เนื่องจากการศึกษาถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุนี้เป็นสิ่งที่ไม่สามารถกำหนดและทำนายได้ ถือเป็นคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละระบบขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ระบบนั้นๆ ที่ถูกนำไปใช้งาน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สร้างแบบจำลองช่องสัญญาณส่งผ่านการแพร่กระจายคลื่นของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz เพื่อคาดการณ์และศึกษาถึงคุณลักษณะและผลกระทบของช่องสัญญาณถ่ายโอนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมภายในอาคารที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก การออกแบบแบบจำลองช่องสัญญาณของการแพร่กระจายสร้างขึ้นเพื่อทดสอบตามสมมุติฐานของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ทั้งนี้ประโยชน์ของการศึกษาช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนี้ขึ้นเพื่อสามารถเข้าใจถึงคุณลักษณะและการวิเคราะห์ปัญหาต่อความผิดเพี้ยนของช่องสัญญาณถ่ายโอนของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในแต่ละแบบจำลองได้ด้วยพื้นฐานการวิเคราะห์การถ่ายโอนของช่องสัญญาณอวกาศสว่างของฟรีส ตลอดจนได้เข้าใจวิธีการใช้อุปกรณ์ในการทดลองวิจัยต่างๆ รวมถึงทฤษฎีและหลักการสื่อสารของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุมากยิ่งขึ้น และเป็นฐานข้อมูลของแบบแผนการวิจัยในการพัฒนาเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนี้ต่อไปในอนาคต

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนี้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นวิทยุในการสื่อสาร ซึ่งในย่านความถี่สูงยิ่งหรือย่านความถี่ไมโครเวฟนั้นใช้หลักการการสื่อสารแบบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้น แบบจำลองการสื่อสารของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมเช่นเดียวกับการใช้งานจริงจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาและวิจัย ซึ่งคุณลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นนั้นขึ้นอยู่กับสายอากาศที่ใช้ สมมุติฐานของการศึกษานั้นเพื่อให้เป็นไปตามคุณลักษณะของการใช้งานจริงในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารของเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุจากแบบจำลองของการวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น เพื่อสามารถทำการวิเคราะห์ถึงผลที่ได้จากการวัดซึ่งมีการลดทอนกำลังงานของการแพร่กระจายคลื่นระหว่างสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างกัน หากพิจารณาถึงการลดทอน (Attenuation) ต่อการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอาจเกิดจากการสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการกระจัดกระจาย (Scattering) ก็เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการลดทอนกำลังงานการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องมาจากเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นการสื่อสารแบบดิจิทัล (Digital) หากการลดทอนเพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของ

สัญญาณ ซึ่งพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความผิดเพี้ยน คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) นอกจากนี้ พารามิเตอร์อื่นๆ ที่สำคัญ เช่น ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ (Magnitude and phase channel transfer function) การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss) ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (Power delay profile) และอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate) สามารถอธิบายถึงประสิทธิภาพและคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในการสื่อสารของระบบระบบตัวต้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

#### 1.4 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาค้นคว้าถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบการสื่อสารแบบระบบตัวต้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งทำการวัดผลแบบจำลองการวิจัยตามสภาวะแวดล้อมภายในอาคารที่สามารถนำเทคโนโลยีระบบตัวต้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุไปใช้งานได้ โดยพิจารณาถึงการวัดตามทฤษฎีและหลักการการส่งผ่านของฟรีส (Friis' transmission formula) ซึ่งหลักการนี้ได้รับความเชื่อถือในการนำมาวิเคราะห์ระบบการสื่อสารความถี่แถบแคบ (Narrow band) มาวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณทางโคไซน์ความถี่จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer: VNA) จากนั้นนำเอาสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่มีลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง (Directional) ทำการวัดตลอดช่วงความถี่ 2 GHz ถึง 3 GHz ครอบคลุมความถี่การใช้งาน 2.4 GHz ของระบบระบบตัวต้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยทำการสร้างแบบจำลองการวัดการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทั้งแบบรอบทิศทาง แบบระยะทางตรง แบบจำลองคุณลักษณะการเลี้ยวเบนคลื่น แบบจำลองการวางโพลาไรซ์ของสายอากาศทั้งแบบร่วมกัน (Co-polarization) และแบบไขว้กัน (Cross-polarization) รวมถึงแบบจำลองคุณลักษณะของแถบสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล ซึ่งสามารถที่จะพิจารณาถึงการประเมินผลของการถ่ายโอนของช่องสัญญาณทั้งทางขนาดและทางเฟส การสูญเสียเชิงวิถี ภาพตัดขวางการประวิงเวลา สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และอัตราบิตผิดพลาดเป็นสำคัญ

#### 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

มีงานวิจัยส่วนหนึ่งทำการวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบระบบตัวต้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้วยปัจจัยต่างๆ ที่จะนำมาแก้ไขปัญหาด้านประสิทธิภาพและความเที่ยงตรงในการสื่อสารของระบบ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นย่านความถี่ต่ำกว่า 30 MHz และจำลองแบบ

เสมือนการวัดจริงมาวิเคราะห์ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอถึงคุณลักษณะช่องสัญญาณการแพร่กระจายในสถานะแวดล้อมที่สามารถนำเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุไปใช้งานได้จริงในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านที่ใช้สำหรับการศึกษาและวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ ทั้งนี้ การทดสอบช่องสัญญาณภายใต้สถานะแวดล้อมที่ต้องนำเอาระบบไปใช้งาน เสมือนกับว่าคุณลักษณะและพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์นั้นเป็นค่าของช่องสัญญาณนั้นจริงๆ เพื่อนำไปประเมินการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น

## 1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการทำงานของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz โดยทำการศึกษาวิเคราะห์ด้วยแบบแผนการวิจัยการศึกษาถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายตามทฤษฎีและหลักการการส่งผ่านของฟรีส มาวิเคราะห์การถ่ายโอนของช่องสัญญาณในอากาศ การสูญเสียเชิงวิถี ภาพตัดขวางการประวิงเวลา รวมถึงทฤษฎีของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และอัตราบิดผลผลิตของช่องสัญญาณด้วย โดยการสร้างสมมติฐานในการออกแบบแบบจำลองการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายภายในสถานะแวดล้อมภายในอาคารในแต่ละแบบจำลอง อาทิ แบบจำลองการวัดรอบทิศทาง แบบจำลองการวัดระยะแนวตรง แบบจำลองการวัดคุณลักษณะการเลี้ยวเบนของคลื่น แบบจำลองการวัดแนวการวางโพลาริซชันของสายอากาศและแบบจำลองการวัดคุณลักษณะของแถบสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล โดยใช้สายอากาศทดสอบเป็นสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปความถี่ 2.4 GHz มีการแพร่กระจายแบบมีทิศทาง ซึ่งง่ายต่อการใช้งานและราคาถูก นำมาใช้ในการทดสอบการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายของแต่ละแบบจำลองด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ทำการวัดและบันทึกผลเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และประเมินผลทั้งทางขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ การสูญเสียเชิงวิถี ภาพตัดขวางการประวิงเวลา สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และอัตราบิดผลผลิต ตลอดจนได้มาซึ่งผลสรุปการทดลองวิจัยและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย ซึ่งทั้งหมดเป็นไปตามหลักการและแนวทางศึกษาค้นคว้าวิจัยเพื่อนำไปพัฒนาและออกแบบระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึง บทนำความเป็นมาและความสำคัญต่างๆ จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการนำเสนอแบบใหม่และแบบเดิม ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึง เทคโนโลยีแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ องค์ประกอบและการทำงาน จุดเด่นของระบบ ย่านความถี่และมาตรฐาน และข้อบังคับในระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุประเทศไทย

บทที่ 3 กล่าวถึง ช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในระบบการสื่อสารระยะสั้น ทฤษฎีของการเลี้ยวเบนคลื่นความถี่วิทยุ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของฟรีสในอวกาศสว่างและหลักการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้นำมาวิเคราะห์

บทที่ 4 กล่าวถึง การวัดและขั้นตอนการทดลองวิจัย ประกอบไปด้วย แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ อาทิ แบบจำลองการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุแบบรอบทิศทางและแบบแนวตรง แบบจำลองการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุของการเลี้ยวเบนคลื่น แบบจำลองการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุแบบสายอากาศโพลาริเซชันร่วมกันและแบบข้ามกัน แบบจำลองการวัดคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในสนามระยะใกล้และไกล รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิจัยและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดในงานวิจัย

บทที่ 5 กล่าวถึง ผลการวัดจากแบบจำลองการวิจัยแต่ละแบบ

บทที่ 6 กล่าวถึง การสรุปผลในงานวิจัยและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมของการวิจัยในอนาคต

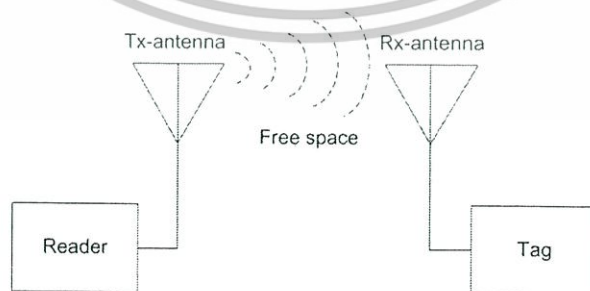
## บทที่ 2

# เทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

### 2.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นเทคโนโลยีการระบุข้อมูลและตำแหน่งแสดงเอกลักษณ์ของวัตถุ คน สัตว์ หรือสิ่งของด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ถูกพัฒนามาในยุค 1970 เพื่อวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งานในการบ่งชี้วัตถุในระยะใกล้และไกลได้ โดยมีจุดเด่นที่สามารถอ่านข้อมูลจากตัวรับสัญญาณได้หลายตัวอย่างไร้การสัมผัส และแม้แต่ในที่ที่มีทัศนวิสัยไม่ดี มีความคงทนต่อการสิ้นสะท้อนและแรงกระแทก ทนต่อความเปียกชื้น และสามารถอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง ซึ่งมีหน่วยความจำหรือไมโครชิปอยู่ภายในตัวรับสัญญาณ ในปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ นอกเหนือจากการนำมาใช้แทนระบบรหัสแบบแท่งหรือบาร์โค้ด

เทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทและความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการนำไปใช้งานในรูปแบบที่หลากหลายด้วยจุดประสงค์ที่แตกต่างกันแต่ขึ้นอยู่กับพื้นฐานเดียวกัน คือ การใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อการบ่งชี้หรือระบุเอกลักษณ์ของวัตถุสิ่งของต่างๆ ด้วยหลักการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่วิทยุในการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ 2 ชนิดที่เรียกว่า ป้ายอิเล็กทรอนิกส์ (Tag) และเครื่องอ่าน โดยการนำข้อมูลที่ต้องการส่งมาทำการมอดูเลชัน (Modulation) กับคลื่นพอร์ (Carrier) แล้วส่งผ่านทางสายอากาศซึ่งจะแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านตัวกลางคือ อวกาศว่าง (Free space) ไปยังสายอากาศของตัวรับสัญญาณข้อมูลเพื่อแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป เพื่อระบุตัวตน หรือสิ่งของด้วยลักษณะเฉพาะ



รูปที่ 2.1 การสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในอวกาศว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติและความเป็นมารายละเอียดการทำงาน คลื่นความถี่และมาตรฐาน รวมถึงข้อกำหนดต่างๆ ในการนำไปใช้งานของเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

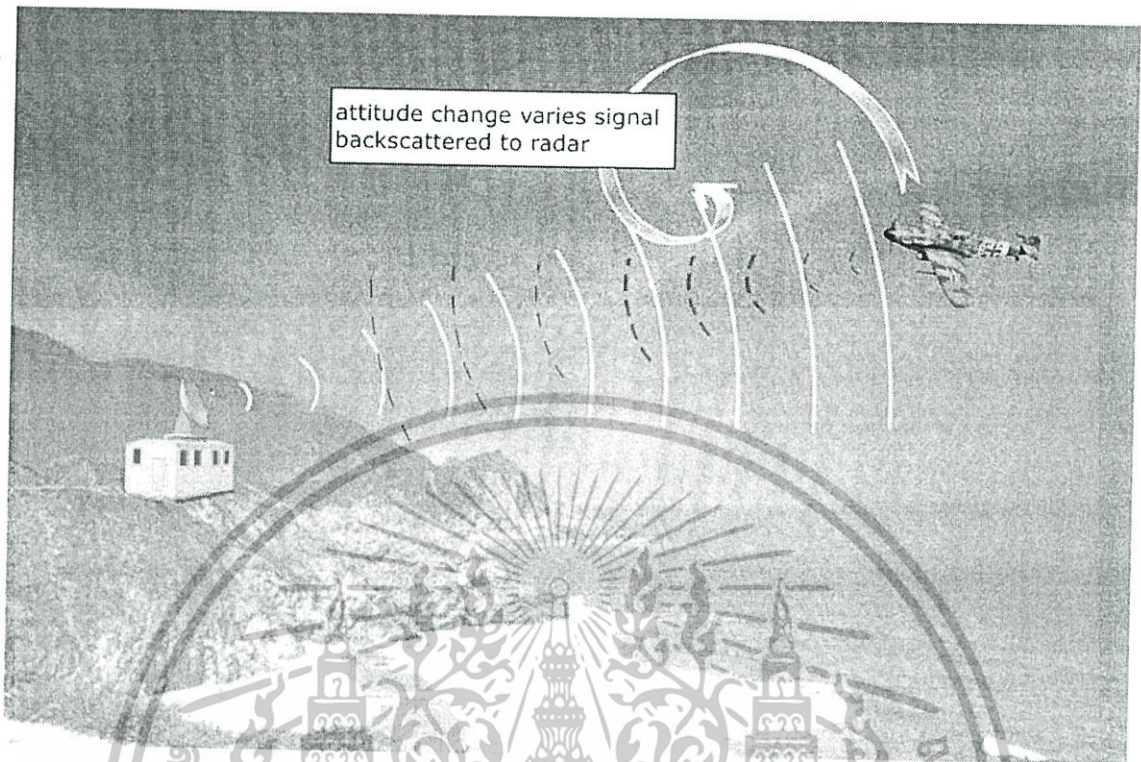
## 2.2 ความเป็นมาของเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

ประวัติการเริ่มต้นของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนั้น ย้อนกลับไปได้เมื่อสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งประเทศกลุ่มพันธมิตรและกลุ่มอักษะได้มีการใช้เรดาร์ที่ถูกสร้างโดย โรเบิร์ต อเล็กซานเดอร์ ในการตรวจจับและเตือนเครื่องบินที่กำลังบินเข้ามา แต่ปัญหาคือไม่สามารถแยกแยะเครื่องบินรบได้ว่าเป็นของฝ่ายไหน โดยทางฝ่ายเยอรมันค้นพบว่าเมื่อนักบินบินหมุนตัวกลับแล้วจะทำให้มีการสะท้อนสัญญาณเรดาร์ที่เปลี่ยนไป ทำให้ทราบว่าเป็นเครื่องบินที่เข้ามาเป็นของฝ่ายไหน ซึ่งเป็นจุดกำเนิดของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการสะท้อนคลื่นวิทยุ (แบบกระตุ้น)

เมื่อเทคโนโลยีเรดาร์มีการพัฒนาขึ้น นักบินสามารถสื่อสารได้กับเครื่องบินและสถานีภาคพื้นดินหรือระหว่างนักบินด้วยกันเอง ที่เรียกว่าระบบการแยกแยะระหว่างมิตรหรือศัตรู (Identification friend or foe; IFF) โดยเมื่อเครื่องบินได้รับสัญญาณจากรีทรังจากภาคพื้นดินหรือนักบินด้วยกัน ตัวเครื่องบินก็จะส่งสัญญาณตอบกลับทำให้ทราบว่าเป็นเครื่องบินของฝ่ายไหน ซึ่งก็ถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบวัตถุประสงค์สัญญาณจากตัวเอง (แบบกระตุ้นเอง)

การสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่สูงยิ่งได้รับความนิยมอีกครั้งในปี ค.ศ. 1999 เมื่อองค์กร Uniform code council (UCC) องค์กร EAN international บริษัทโปรเคอร์ เกมเบอร์ และบริษัทจีเอสแอล ได้ร่วมกันก่อตั้งศูนย์การสื่อสารแบบระบุตัวตนแบบอัตโนมัติ (Auto ID) ขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1999 – 2003 ทำให้การสื่อสารแบบระบุตัวตนแบบอัตโนมัติได้รับการสนับสนุนจากบริษัทเอกชนจำนวนมาก และได้มีการขยายตลาดไปยังประเทศออสเตรเลีย อังกฤษ สวิตเซอร์แลนด์ ญี่ปุ่นและจีน จึงมีการพัฒนามาตรฐานใหม่ที่เรียกว่ารหัสสินค้าอิเล็กทรอนิกส์

ในช่วงต้นปี ค.ศ. 1990 บริษัทไอบีเอ็มได้พัฒนาและจดสิทธิบัตรการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra high frequency) คือย่านความถี่ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 3000 MHz แต่เมื่อบริษัทไอบีเอ็มมีปัญหาทางการเงินได้ขายสิทธิบัตรให้กับบริษัท อินเตอร์เมค ซึ่งช่วงนั้นการใช้งานยังไม่ค่อยแพร่หลายเนื่องจากอุปกรณ์ยังมีราคาแพงอยู่มาก



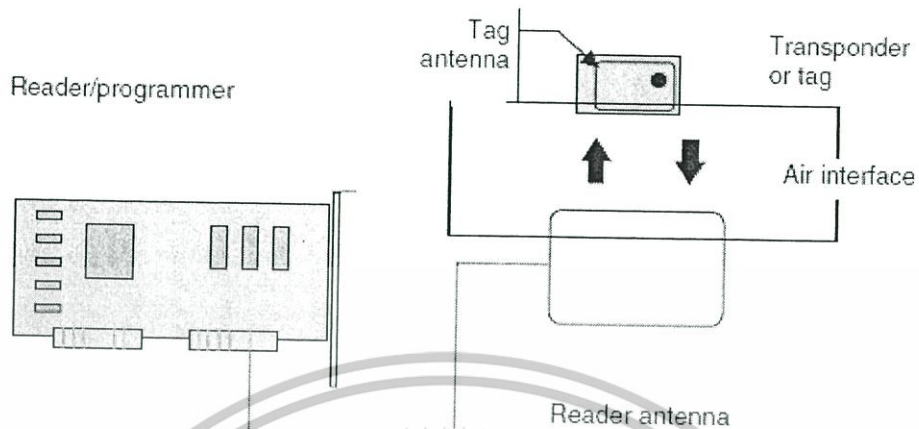
รูปที่ 2.2 การใช้หลักการสะท้อนกลับในการสื่อสารของระบบเรดาร์ [1]

## 2.3 คุณลักษณะของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

### 2.3.1 องค์ประกอบหลักที่สำคัญ

ระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นเทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถใช้ในการระบุค้นหาและเก็บข้อมูลของกลุ่ม คน สัตว์ สิ่งของ หรือส่วนประกอบต่างๆ โดยการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุจะประกอบด้วยส่วนสำคัญหลักๆ ดังนี้

เครื่องอ่าน ทำหน้าที่ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุไปยังสายอากาศทางด้านรับ และอ่านข้อมูลของวัตถุที่ส่งกลับมาพร้อมด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ผลที่ได้ของสัญญาณจะเก็บไว้ในเครื่องอ่าน เพื่อที่จะถ่ายโอนข้อมูลไปยังระบบฐานข้อมูลในภายหลังหรือส่งไปในเวลานั้นเลยก็ได้



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบหลักในการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ [2]

เครื่องรับ-ส่ง ซึ่งจะประกอบไปด้วย ไมโครชิปทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุในรูปสัญญาณดิจิทัล และสายอากาศทำหน้าที่เป็นตัวรับและส่งคลื่นความถี่วิทยุกลับไปยังเครื่องอ่านพร้อมทั้งข้อมูลของวัตถุภายในไมโครชิป โดยภายในไมโครชิปจะบรรจุโปรแกรมที่มีข้อมูลหรือตัวเลขของวัตถุ คน สัตว์ สิ่งของ ไว้ในฐานะข้อมูลซึ่งสามารถวางไว้ภายในหรือพื้นผิวของวัตถุเพื่อทำหน้าที่บันทึกข้อมูลของวัตถุที่ต้องการระบุตัวตน โคนเราสามารถแบ่งชนิดของเครื่องรับออกเป็น 2 แบบ คือ

- เครื่องรับแบบกระตุ้นตัวเอง (Active transponder) เครื่องรับ-ส่งสัญญาณชนิดนี้จะมีแบตเตอรี่อยู่ภายในเพื่อป้อนพลังงานไฟฟ้าให้ทำงาน โดยเราจะสามารถอ่านและเขียนข้อมูลลงได้และ การที่ต้องใช้แบตเตอรี่จึงทำให้เครื่องรับแบบชนิดนี้มีอายุการใช้งานจำกัดของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่หมดก็ต้องนำไปทิ้งไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อย่างไรก็ตามถ้าเราสามารถออกแบบวงจรให้กินกระแสไฟน้อยๆ ก็อาจจะมีอายุการใช้งานได้นานหลายปี

- เครื่องรับแบบถูกกระตุ้นตัวเอง (Passive transponder) เครื่องรับ-ส่ง ชนิดนี้จะไม่มียแบตเตอรี่อยู่ภายใน แต่จะทำงานโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องอ่าน จึงทำให้เครื่องรับ-ส่งแบบถูกกระตุ้นจึงมีน้ำหนักเบาว่าเครื่องรับ-ส่งแบบกระตุ้นตัวเอง ราคาถูกกว่า และมีอายุการใช้งานไม่จำกัด แต่ข้อเสียก็คือ ระยะการรับ-ส่งไม่ไกล และเครื่องอ่านจะต้องมีความไวในการอ่านข้อมูลสูง นอกจากนี้มักจะมีปัญหาเมื่อนำไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสูงอีกด้วย แต่ข้อได้เปรียบในเรื่องราคาและอายุการใช้งานทำให้เครื่องรับ-ส่งแบบถูกกระตุ้นเป็นที่นิยมมากกว่า

ส่วนสุดท้ายคือ การเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล ประกอบด้วยซอฟต์แวร์โปรแกรมดำเนินการเกี่ยวกับข้อมูลระบบคอมพิวเตอร์ต่างๆ เพื่อทำการบ่งชี้ข้อมูล ประมวลผล และแสดงข้อมูลตามต้องการ

### 2.3.2 หลักการทำงานเบื้องต้น

เริ่มแรกเครื่องอ่านจะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาตลอดเวลาและคอยตรวจจับว่ามีเครื่องรับเข้ามาอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไม่ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการคอยตรวจจับว่ามีการมอดูเลตสัญญาณเกิดขึ้นหรือไม่

เมื่อมีเครื่องรับ-ส่งเข้ามาอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เครื่องรับ-ส่งก็จะได้รับพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้เครื่องรับ-ส่งเริ่มทำงาน โดยอาศัยหลักการตามแนวความคิดของ ไมเกิล ฟาราเดย์ เรื่องแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กจากเครื่องอ่านที่มีค่าความเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time varying magnetic field) พุ่งผ่านสายอากาศของเครื่องรับ-ส่งเมื่อเครื่องอ่านและเครื่องรับ-ส่งตั้งห่างกันเป็นระยะ 0.16 เท่าของความยาวคลื่นพาหะที่ใช้เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า Transformer-type coupling ซึ่งปรากฏการณ์แบบเดียวกันกับการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิ (Primary) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) ในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นวงจรพื้นฐานสำหรับอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นในการส่งข้อมูลกลับของเครื่องรับ-ส่งไปยังเครื่องอ่าน

คลื่นพาหะที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องรับ-ส่ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ความถี่ หรือเฟส โดยวงจรของสายอากาศทำการมอดูเลตข้อมูลขึ้นอยู่กับวิธีการมอดูเลต

เครื่องอ่านข้อมูลจะตรวจจับความเปลี่ยนแปลงออกมาเป็นข้อมูลแล้วทำการถอดรหัสเพื่อนำข้อมูลไปในส่วนของการแสดงผลต่อไป

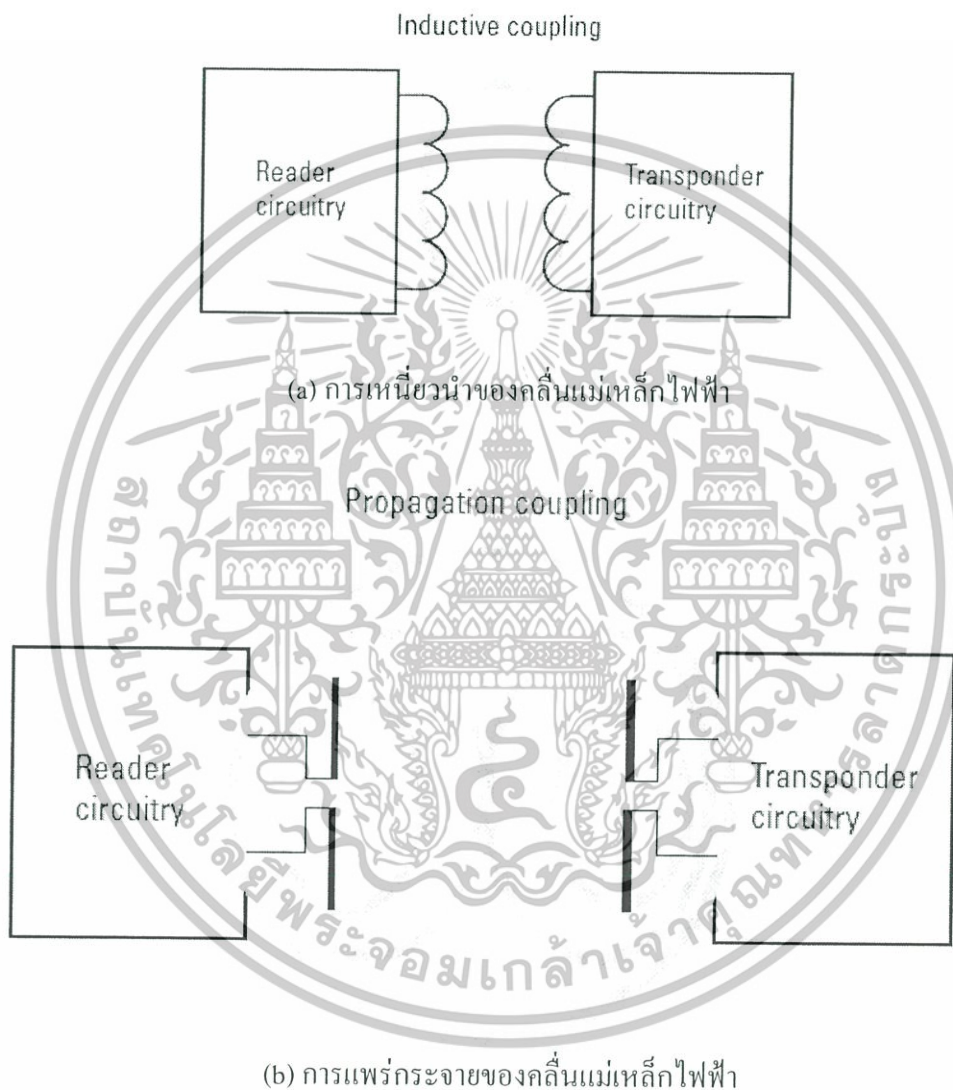
### 2.3.3 การสื่อสารแบบไร้สายของเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

#### 2.3.3.1 วิธีการสื่อสารระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ

ในการสื่อสารข้อมูลของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนั้นคือระหว่างเครื่องอ่านข้อมูล (Reader) และเครื่องรับ-ส่ง (Tag) จะสื่อสารแบบไร้สายผ่านอากาศ โดยนำข้อมูลมาทำการมอดูเลตกับคลื่นพาหะที่เป็นคลื่นความถี่วิทยุ โดยมีสายอากาศ (Antenna) ที่อยู่ในเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ

1. วิธีการเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Inductive coupling) สำหรับย่านความถี่ต่ำ (Low frequency) ต่ำกว่า 150 kHz และย่านความถี่สูง (High frequency) 13.56 MHz

2. วิธีการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic propagation coupling) สำหรับย่านความถี่สูงยิ่ง 920 MHz และ 925 MHz สำหรับประเทศไทย และย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) 2.4 GHz และ 5.8 GHz



รูปที่ 2.4 คุณลักษณะของการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องรับ-ส่งหรือแท็ก [3]

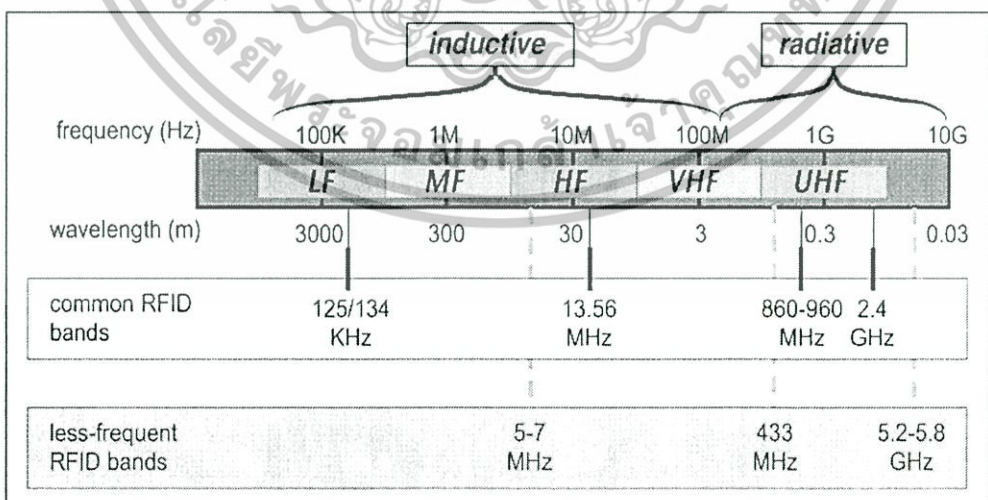
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการมอดูเลตข้อมูลเข้ากับคลื่นพาหะก็มีด้วยกันหลายวิธี เช่น ASK (Amplitude shift keying), FSK (Frequency shift keying) หรือ PSK (Phase shift keying) ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบจะเลือกให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภท

**การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด (ASK)** ความถี่ของคลื่นพาหะ (Carrier wave) ซึ่งทำหน้าที่นำสัญญาณอนาล็อกผ่านตัวกลางสื่อสารนั้นจะคงที่ ลักษณะของสัญญาณมอดูเลตเมื่อค่าของบิตของสัญญาณข้อมูลดิจิทัลมีค่าเป็น 1 ขนาดของคลื่นพาหะจะสูงขึ้นกว่าปกติ และเมื่อบิตมีค่าเป็น 0 ขนาดของคลื่นพาหะจะตกลงกว่าปกติ การมอดูเลต ASK มักจะไม่ค่อยได้รับความนิยมเพราะจะถูกรบกวนจากสัญญาณอื่นได้ง่าย

**การมอดูเลตเชิงเลขทางความถี่ (FSK)** ในการมอดูเลตแบบ FSK ขนาดของคลื่นพาหะจะไม่เปลี่ยนแปลงที่เปลี่ยนแปลงคือความถี่ของคลื่นพาหะนั้นคือ เมื่อบิตมีค่าเป็น 1 ความถี่ของคลื่นพาหะจะสูงขึ้นกว่าปกติและเมื่อบิตมีค่าเป็น 0 ความถี่ของคลื่นพาหะก็จะต่ำกว่าปกติ

**การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส (PSK)** หลักการของ Phase shift keying (PSK) คือ ค่าของขนาดและความถี่ของคลื่นพาหะจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่ที่จะเปลี่ยนคือ เฟสของสัญญาณกล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของบิตจาก 1 ไปเป็น 0 หรือเปลี่ยนจาก 0 ไปเป็น 1 เฟสของคลื่นจะเปลี่ยน (Shift) ไป 180 องศาด้วย หลักการ PSK สามารถทำได้ทั้งแบบ 2 เฟส (0, 90, 180 และ 270 องศา) และแบบ 8 เฟส (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 และ 315 องศา) ในการมอดูเลตเพื่อเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อกทั้ง 3 แบบ วิธีการแบบ PSK จะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นน้อยที่สุด ได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีที่สุดแต่วงจรการทำงานจะยุ่งยากกว่าและราคาสูงกว่า



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมความถี่วิทยุในการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นวิทยุ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.2 รูปแบบการสื่อสารระหว่างเครื่องส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ

เราแบ่งรูปแบบการสื่อสารตามทิศทางของการสื่อสารหรือจำนวนของช่องสัญญาณสื่อสารได้ 3 แบบ คือ

แบบทิศทางเดียว (Simplex; SPX) คือ ฝ่ายหนึ่งจะส่งได้เพียงฝ่ายเดียวและอีกฝ่ายหนึ่งจะรับได้เพียงอย่างเดียว การสื่อสารแบบทิศทางเดียวนี้ต้องการช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวในการสื่อสาร เช่น ระบบการส่งวิทยุกระจายเสียง (Broad casting)

แบบกึ่งสองทาง (Half duplex; HDX) เป็นการสื่อสารแบบ 2 ทางแต่สลับเวลากันในขณะที่ฝ่ายหนึ่งเป็นฝ่ายส่ง และอีกฝ่ายหนึ่งเป็นฝ่ายรับ การสื่อสารแบบกึ่งสองทางนี้ต้องการช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวในการสื่อสาร ตัวอย่างเช่น วิทยุโทรคมนาคม

แบบสองทาง (Full duplex; FDX) เป็นการสื่อสารแบบสองทิศทาง โดยที่ทั้งสองฝ่ายสามารถรับส่งได้พร้อมกันในเวลาเดียวกัน การสื่อสารแบบสองทิศทางนี้ต้องการช่องสัญญาณการสื่อสารสองช่อง ตัวอย่างเช่น โทรศัพท์ และโทรศัพท์เคลื่อนที่

### 2.3.4 ระยะเวลาการรับส่งข้อมูลและกำลังส่ง

การถ่ายโอนข้อมูลในระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุขึ้นอยู่กับการปัจจัยสำคัญต่างๆ คือ กำลังส่งของเครื่องอ่าน กำลังส่งของเครื่องรับ-ส่ง และสภาพแวดล้อมสำหรับการออกแบบสายอากาศของตัวส่งสัญญาณจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศ ดังนั้นระยะเวลาการรับส่งข้อมูลบางที่อาจขึ้นอยู่กับมุมการรับส่งระหว่างตัวส่งและตัวรับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสำคัญ

กำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปจะลดลงตามระยะทางโดยแปรผกผันกับระยะทางกำลังสอง แต่ในบางสภาพแวดล้อมซึ่งอาจมีการสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสิ่งต่างๆ รอบตัว เช่น โลหะ ก็อาจทำให้กำลังงานความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วหรือแม้แต่กระทั่งความชื้นของอากาศก็มีผลต่อคลื่นความถี่วิทยุอันความถี่สูงๆ ดังนั้นการนำเอาระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุไปใช้งานก็ควรคำนึงถึงเรื่องสภาพแวดล้อม เพราะจะมีผลต่อการรับส่งข้อมูล และพยายามติดตั้งให้ห่างจากโลหะต่างๆ ซึ่งจะทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

กำลังส่งของแท่งที่ส่งกลับมายังตัวอ่านข้อมูลนั้น โดยทั่วไปจะมีกำลังที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับกำลังส่งของ ตัวอ่านข้อมูล ดังนั้นความไวในการตรวจจับสัญญาณของตัวอ่านข้อมูล ก็เป็นอีกจุดหนึ่งที่ต้องพิจารณา

ถึงแม้ในทางเทคนิคเราจะสามารถทำให้ตัวอ่านข้อมูลมีกำลังส่งมากแค่ไหนก็ได้ แต่โดยทั่วไปก็จะถูกจำกัดโดยกฎหมายของแต่ละประเทศ เช่นเดียวกับความถี่ ดังนั้นในระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยทั่วไปจะมีกำลังส่งเพียงระหว่าง 100-500 mW

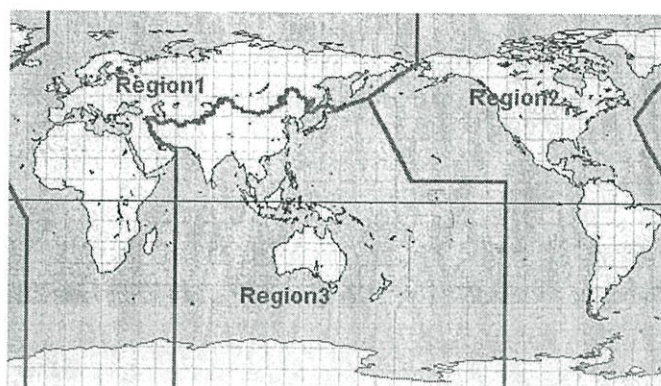
### 2.3.5 อัตราการรับส่งข้อมูลและแบนด์วิดท์

อัตราการรับส่งข้อมูล (Data transfer rate) จะขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นพาหะ โดยปกติถ้าความถี่ของคลื่นพาหะยิ่งสูง อัตราการรับส่งข้อมูลก็จะยิ่งสูงตามไปด้วย ส่วนการเลือกแบนด์วิดท์หรือย่านความถี่นั้นก็จะมีผลต่ออัตราการรับส่งข้อมูลเช่นกัน โดยมีหลักว่า แบนด์วิดท์ควรจะมีค่ามากกว่าอัตราการรับส่งข้อมูลที่ต้องการอย่างน้อยสองเท่า ยกตัวอย่างเช่น ถ้าใช้แบนด์วิดท์ในช่วง 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz ก็จะสามารถรองรับอัตราการรับส่งข้อมูลได้ถึงประมาณ 2 Mbps เป็นต้น แต่การใช้แบนด์วิดท์ที่กว้างเกินไปก็อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนมาก หรือทำให้ SNR (Signal to noise ratio) ต่ำลงนั่นเอง ดังนั้นการเลือกใช้แบนด์วิดท์ให้ถูกต้องก็เป็นส่วนสำคัญในการพิจารณา

## 2.4 คลื่นพาหะและมาตรฐานของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

ในปัจจุบันได้มีการรวมกลุ่มระหว่างแต่ละประเทศ เพื่อทำการกำหนดมาตรฐานความถี่คลื่นพาหะของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยมีสามกลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มประเทศในยุโรปและอเมริกา (Region 1), กลุ่มประเทศอเมริกาเหนือและอเมริกาใต้ (Region 2) และสุดท้ายคือกลุ่มประเทศตะวันออกไกลและออสเตรเลีย (Region 3) ซึ่งแต่ละกลุ่มประเทศจะกำหนดแนวทางในการเลือกใช้ความถี่ต่างๆ ให้แก่บรรดาประเทศสมาชิก

อย่างไรก็ตาม ความถี่ของคลื่นพาหะที่นิยมใช้งานในย่านความถี่ต่ำ ย่านความถี่ปานกลาง และย่านความถี่สูงก็คือ 125 kHz, 13.56 MHz และ 2.4 GHz ตามลำดับดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 นอกจากนี้รัฐบาลของแต่ละประเทศ โดยทั่วไปจะมีการออกกฎหมายเกี่ยวกับระเบียบการใช้งานย่านความถี่ต่างๆ รวมถึงกำลังส่งของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้วย



รูปที่ 2.6 บริเวณการแบ่งกลุ่มประเทศสำหรับการกำหนดย่านความถี่ที่ใช้งาน

ตารางที่ 2.1 ย่านความถี่ต่างๆ ของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุและการใช้งาน

ย่านความถี่	คุณลักษณะ	การใช้งาน
ย่านความถี่ต่ำ 100-500 kHz ความถี่มาตรฐานที่ใช้งาน ทั่วไปคือ 125 kHz	-ระยะการรับส่งข้อมูลใกล้ -ต้นทุนไม่สูง -ความเร็วในการอ่านข้อมูลต่ำ -ความถี่ในย่านนี้เป็นที่แพร่หลายทั่วโลก	-Access Control -บุคคลทั่วไป -ระบบคงคลัง -รถยนต์
ย่านความถี่กลาง 10-15 MHz ความถี่มาตรฐานที่ใช้งาน ทั่วไปคือ 13.56 MHz	-ระยะการรับส่งข้อมูลปานกลาง -ราคามีแนวโน้มถูกลงในอนาคต -ความเร็วในการอ่านข้อมูลปานกลาง -ความถี่ในย่านนี้เป็นที่แพร่หลายทั่วโลก	-Access Control -สมาร์ทการ์ด
ย่านความถี่สูง 850-950 MHz 2.4-5.8 GHz ความถี่มาตรฐานที่ใช้งาน ทั่วไปคือ 2.4 GHz	-ระยะการรับส่งข้อมูลไกล (10 เมตร) -ความเร็วในการอ่านข้อมูลสูง -ราคาแพง	-รถไฟ -ระบบเก็บค่าผ่านทาง

ในแง่ของราคาและความเร็วในการสื่อสารข้อมูล เมื่อเทียบกันแล้วระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุซึ่งใช้คลื่นพาหะย่านความถี่สูงเป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุดและมีราคาแพงที่สุดด้วยเช่นกัน ส่วนระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้คลื่นพาหะย่านความถี่ต่ำก็จะมี การส่งข้อมูลต่ำและราคาก็จะต่ำลงตามลงไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.1 แนวความคิดของมาตรฐานระบบเปิด กับระบบปิด

**ระบบเปิด** (Open system) คือ ระบบที่มีรูปแบบของข้อมูลที่ส่งในลักษณะกลุ่มมีกฎระเบียบที่สามารถอ่านได้จากเครื่องอ่านจำนวนมาก ความเป็นมาตรฐานจะถูกกำหนดจากเครื่องมือที่สร้างข้อมูล ผู้ใช้โดยทั่วไปสามารถอ่านข้อมูลดังกล่าวได้ ซึ่งอาจจะเกิดจากการใช้วิธีการหลาย ๆ อย่างรวมกัน

**ระบบปิด** (Closed system) คือ ระบบที่กฎของการเข้ารหัส (Encode) และการถอดรหัส (decode) ถูกกำหนดไว้โดยเฉพาะเจาะจง หรือรู้เฉพาะกลุ่มผู้ใช้ที่เป็นเจ้าของ

สำหรับฝ่ายระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุปัจจุบันนี้ถือว่ายังเป็นมาตรฐานระบบเปิด ดังนั้นผู้ขาย (Vendor) ต้องผลิต และสนับสนุนระบบของตนเอง ส่วนเทคโนโลยีบาร์โค้ด เป็นระบบที่มีความเป็นมาตรฐานทั้งระบบเปิดและระบบปิด

อย่างไรก็ดี ปัจจุบันนี้มีอุตสาหกรรมและองค์กรมาตรฐานจำนวนมากที่พยายามพัฒนาระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุให้มีความเป็นมาตรฐานยิ่งขึ้นมาก The International Standards Organization (ISO) Sub-Committee (SC 31) ซึ่งเป็นข้อตกลงที่อยู่ภายใต้การสำรวจเทคโนโลยีบาร์โค้ด และระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุของ ISO

ในปัจจุบัน SC 31 จะเน้นที่ระบบมาตรฐานแบบเปิด โดยประเด็นที่องค์กรมาตรฐานได้คำนึงถึงได้แก่

- วิธีการเปลี่ยนป้ายของระบบปิดไปเป็นระบบเปิด เครื่องอ่านต้องสามารถแยกได้ทั้งสองระบบ
- เพราะวาระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ สามารถอ่านป้ายหลายป้ายได้ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นความเป็นมาตรฐานต้องไม่มีความซ้ำซ้อนกันระหว่างข้อมูลหลากหลายที่มีเข้ามา
- ระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุบางชนิดยอมให้อ่าน / เขียนข้อมูลได้ แต่บาร์โค้ดไม่สามารถทำได้ และข้อบังคับจะทำให้เกิดผลเล็กน้อยกับการติดตั้งภายนอก ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณา

ความสำคัญของการใช้ระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุจะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาไปสู่ความเป็นมาตรฐานไม่ได้เน้นไปที่จำนวนองค์กรจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ว่ามีส่วนร่วมกับ SC 31 มากน้อยเพียงใด แม้ว่าส่วนใหญ่จะเป็นการทำงานร่วมกัน มีการแสดงให้เห็นถึงกลุ่มผลประโยชน์ต่าง ๆ ออกมา แต่ก็มีหลักฐานแสดงให้เห็นว่า มีองค์กรในอุตสาหกรรมระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุจำนวนมากที่ไม่ค่อยคำนึงถึงความเป็นมาตรฐาน ทำให้คนทั่ว ๆ ไปเชื่อว่านี่คือ การขาดความเป็นมาตรฐาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ขัดขวางการพัฒนาเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

117110

## 2.4.2 มาตรฐานในการใช้งาน

มาตรฐานของการใช้งานระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุมีหลายมาตรฐาน ได้แก่ American national standards Institute (ANSI), Automotive industry action group (AIAG), European article numbering association international, European telecommunication standards institute (ETSI), European radio communication office (ERO), American society for testing and materials (ASTM) และ Electronic product code global (EPC global) เป็นต้น โดยมาตรฐานหลักที่นิยมใช้กันคือ International Organization of standard (ISO)

โดยได้กำหนดมาตรฐานไว้ 4 ด้านดังนี้

มาตรฐานด้านเทคโนโลยี (Technology standards)

ISO/IEC 18001-6 เทคโนโลยีด้านข่าวสารสำหรับการจัดการในการสื่อสารแบ่งออกเป็น 6 ส่วนคือ

- พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศสำหรับความถี่ที่ยอมรับโดยทั่วไป
- พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 135 kHz
- พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศย่านความถี่ 13.56 MHz
- พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศย่านความถี่ 2.45 GHz
- พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศย่านความถี่ 5.8 GHz
- พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency)

มาตรฐานด้านรูปแบบข้อมูล (Data format standard)

ISO/IEC 15418 การเจาะจงชุดของข้อมูลและแอปพลิเคชันสำหรับจุดประสงค์การเข้ารหัสข้อมูล รวมถึงการระบุองค์การรับผิดชอบสำหรับผู้ดูแลรักษา

ISO/IEC 15434 เทคโนโลยีด้านข่าวสารแบบเฉพาะเจาะจงในการส่งผ่านสำหรับการสื่อสารที่มีความสูง

ISO/IEC 15459 ว่าด้วยมาตรฐานเกี่ยวกับเทคนิค ทฤษฎี และมาตรฐานเกี่ยวกับขั้นตอนกระบวนการส่งข้อมูล

มาตรฐานด้านการทดสอบ (Conformance standard)

ISO/IEC 18047 โครงสร้างของอุปกรณ์การสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับการทดสอบ

มาตรฐานด้านการใช้งาน (Application standard) ปัจจุบันมีด้วยกันหลายมาตรฐาน ได้แก่

ISO 10374 มาตรฐานการขนส่งสินค้าแบบระบุตัวตนอัตโนมัติ

ISO 11785 มาตรฐานการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้กับสัตว์

ISO 18185 มาตรฐานการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

### 2.4.3 กฎข้อบังคับของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในประเทศไทย

2.4.3.1 ย่านความถี่ 920 MHz ถึง 925 MHz กำลังส่งให้ส่งออกอากาศสมมูลแบบไอโซทรอปิก (Equivalent isotropic radiated power; EIRP) ไม่เกิน 4 W เว้นแต่คณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติเห็นว่ามีจำเป็นหรือมีเหตุผลอื่นที่เหมาะสม

2.4.3.2 การได้รับการยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาต อุปกรณ์แบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งมีกำลังส่งออกอากาศสมมูลแบบไอโซทรอปิกไม่เกิน 0.5 W (EIRP) ได้รับการยกเว้นใบอนุญาต มีใช้และนำออกเครื่องวิทยุโทรคมนาคม

2.4.3.3 การตรวจสอบลักษณะทางวิชาการ อุปกรณ์แบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุจะต้องผ่านการทดสอบลักษณะทางวิชาการจาก คณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ หรือจากห้องปฏิบัติการทดสอบรับรองมาตรฐานเครื่องวิทยุโทรคมนาคมที่ยอมรับได้

2.4.3.4 สิทธิการคุ้มครอง การใช้งานอุปกรณ์แบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุไม่ได้สิทธิคุ้มครองการรบกวนหากก่อให้เกิดการรบกวนอย่างรุนแรงต่อการใช้ความถี่วิทยุของข่ายสื่อสารวิทยุโทรคมนาคมอื่นในบริเวณใดบริเวณหนึ่งผู้ใช้ต้องระงับการใช้อุปกรณ์แบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ก่อให้เกิดการรบกวนในบริเวณนั้นทันทีเนื่องจากเทคโนโลยีแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นสื่อกลางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องถูกข่าย จึงจำเป็นต้องออกมาตรฐานควบคุมเพื่อป้องกันมิให้อุปกรณ์แบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุส่งผลกระทบต่อระบบการสื่อสารและโทรคมนาคมอื่นๆ ที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ได้รับการจัดสรรอยู่ก่อนแล้ว ไม่ว่าจะเป็นระบบส่งวิทยุและโทรทัศน์ เครื่องข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ วิทยุตำรวจ เครื่องข่ายวิทยุสื่อสาร วิทยุเดินเรือ และระบบวิทยุการบิน ย่านความถี่คลื่นที่ได้รับการจัดสรรโดยองค์กรสากลทางด้านการสื่อสารนานาชาติ เพื่อใช้กิจการต่างๆ โดยมีการกำหนดเพิ่มย่านความถี่สำหรับใช้งานกับระบุระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ทั้งนี้มีข้อสรุปให้ใช้ย่านความถี่ ISM (Industrial, Scientist and Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่สากลสำหรับใช้ในวงการอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์สำหรับเทคโนโลยีแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ นอกจากนั้นยังมีความเป็นไปได้ที่จะนำความถี่ในย่านต่ำกว่า 135 kHz และต่ำกว่า 400 kHz ใช้กับเทคโนโลยีการรับส่งสัญญาณระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) เป็นพิเศษอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การนำเทคโนโลยีแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุไปใช้งาน

เราสามารถนำระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุไปใช้งานได้หลากหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นในอุตสาหกรรมการผลิต การค้า หรือการบริการต่างๆ ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลที่ต้องการได้ เช่น บันทึกเวลาการทำงานของพนักงาน เก็บเงินค่าใช้บริการทางด่วน หรือระบบกันขโมยรถยนต์ แต่การพิจารณานำระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุมาใช้งานยังคงต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ในการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาพแวดล้อม หรือกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับระเบียบการใช้คลื่นความถี่วิทยุและกำลังส่งของแต่ละประเทศ ปัจจุบันการนำระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุมาประยุกต์ใช้งาน เช่น

ระบบการตรวจสอบการเข้าออก (Security access control) หรือการเข้าออกอาคาร แทนการใช้บัตรแม่เหล็กแบบรูด เนื่องจากบัตรแม่เหล็กเมื่อใช้งานมากๆ ก็จะเสื่อมเร็ว แต่บัตรแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Proximity card) ใช้เพียงแตะหรือแสดงผ่านหน้าเครื่องอ่านเท่านั้น

ระบบหนังสือเดินทางอิเล็กทรอนิกส์ (E-passport) ที่ทางประเทศสหรัฐอเมริกากำลังกำหนดมาตรฐานการเข้าออกของประเทศเพื่อป้องกันผู้ก่อการร้าย รวมไปถึง E-citizen ด้วย

ระบบตั๋วอิเล็กทรอนิกส์และบัตรสมาชิก (E-ticket/Member card/Toll tags) เช่น บัตรทางด่วน บัตรรถไฟฟ้าใช้ดิน บัตรเครดิตหรือเดบิต

ระบบกุญแจอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic immobilizer) ในรถยนต์ป้องกันกุญแจผิดในการขโมยรถยนต์ (Smart key entry) พวกเขาไม่ต้องใช้กุญแจหรือ keyless ในรถยนต์ราคาแพงบางรุ่นก็เริ่มนำมาใช้งานบางแล้ว

ระบบ Animal tracking ในการพัฒนาด้านปศุสัตว์ให้เป็นระบบฟาร์มออโตเมชันด้วยชิประบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ติดตัวสัตว์เลี้ยง ทำให้สามารถทราบเจ้าของ ตรวจสอบสายพันธุ์ การให้อาหารและควบคุมติดต่อในสัตว์รวมถึงการสร้าง food traces ability

ระบบ Logistic ภาพที่เห็นในโรงงานอนาคต คือสามารถติดแท็กไว้กับชิ้นงานเมื่อชิ้นงานผ่านสายพานขนส่วสินค้าในโรงงาน แต่ละแผนกจะรู้ว่าต้องทำอะไร ติดอะไรบ้าง และต้องส่งไปที่ไหนต่อ รวมถึงการจัดการสินค้าในคลังสินค้าว่ารับสินค้ามาเมื่อใด จะต้องเก็บไว้ที่ไหน จะส่งไปยังไง ใครจะมารับ ส่วนภาพที่ผู้บริโภคเห็นคือ การซื้อสินค้าในซูเปอร์มาเก็ต เวลาซื้อก็หยิบสินค้าใส่ตะกร้า คิดเงินผ่านเครื่องอ่านระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุครั้งเดียวคิดเงินได้ทันที โดยไม่ต้องหยิบสินค้ามายิงบาร์โค้ดทีละชิ้นให้เสียเวลาและเตือนผู้ซื้อได้หากสินค้าที่ซื้อหมดอายุ

## 2.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อันประกอบด้วยรายละเอียดโครงสร้างหลักการทำงาน ย่านความถี่และมาตรฐานต่างๆ รวมถึงการนำไปใช้งานของเทคโนโลยีแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งเทคโนโลยีนี้กำลังมีบทบาทและความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยการประยุกต์เทคโนโลยีนี้มาใช้งานในรูปแบบที่หลากหลายด้วยจุดประสงค์ที่แตกต่างกันแต่ขึ้นอยู่กับหลักการพื้นฐานเดียวกัน นั่นคือการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อการระบุตัวตนของคน สัตว์ สิ่งของ แทนการระบุด้วยวิธีการอื่นๆ ซึ่งวิธีการนี้ช่วยเพิ่มความแม่นยำและมีประสิทธิภาพได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

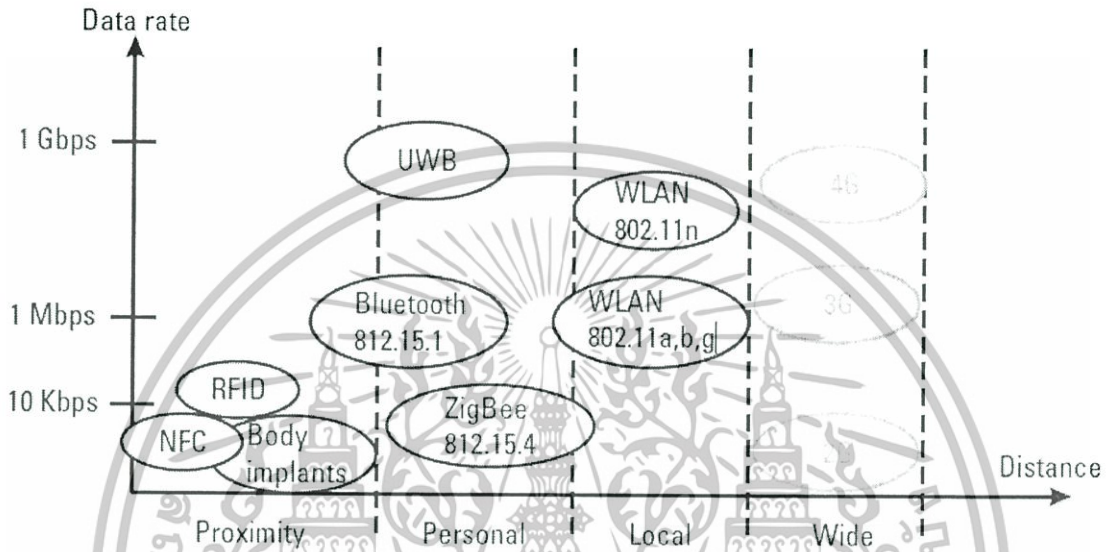
### 3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ได้อธิบายถึงทฤษฎีและหลักการในการนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับการสื่อสารระยะสั้น (Short range communications) ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณไม่ว่าจะเป็นระดับของกำลังงานทางด้านรับ เวลาประวิงที่เกิดขึ้นหรือแม้แต่การสูญเสียของกำลังงานแต่ละเส้นทางที่คลื่นเดินทางมาถึงภาครับ โดยผลกระทบที่เกิดต่อช่องสัญญาณการสื่อสารและการศึกษาถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการสื่อสารจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการแก้ไขปัญหาทางด้านรับและประสิทธิภาพในการตรวจจับสัญญาณของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ทั้งนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยและทดสอบด้วยการจำลองคุณลักษณะของช่องสัญญาณการสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้วยการวัด จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดลองวัดหรือที่เรียกว่า ข้อมูลดิบมาทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่ได้ต่างๆ ตามแบบแผนการวิจัย เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบหรือการเปลี่ยนแปลงที่มีต่อช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยทฤษฎีและหลักการในบทนี้จะได้นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ เพื่อให้ทราบถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลองวิจัยให้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ซึ่งจะกล่าวโดยรายละเอียดในบทนี้

### 3.2 ช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นและระบบการสื่อสารระยะสั้น

อุปกรณ์การสื่อสารคลื่นวิทยุระยะสั้นมีการใช้งานมาหลายปีด้วยกันแล้วด้วยการบริการที่ราคาถูกและรวดเร็ว อย่างเช่น ระบบการสื่อสารโทรสาร (Telemetry) ด้วยระยะทางสั้นๆ เสียงและการสื่อสารวีดิโอสตรีมมิ่ง วิทยุภายในเครือข่ายท้องถิ่นและระบบรักษาความปลอดภัย จากนั้นได้มีการกำหนดให้เครื่องส่งมีกำลังส่งต่ำลงเพื่อลดการเกิดสัญญาณแทรกสอดต่ออุปกรณ์ที่ใช้คลื่นวิทยุอื่นๆ เมื่อเร็วๆ นี้ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารระบบระยะสั้นไปเป็นระบบไร้สาย โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุในการสื่อสาร ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเทคโนโลยีแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก็เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีตัวนี้ด้วยเหมือนกันและเนื่องด้วยเทคโนโลยีนี้ใช้คลื่นความถี่วิทยุในสื่อสาร ดังนั้นจึงต้องกล่าวถึงคุณลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ซึ่งในทอมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นการ

แสดงถึงคุณลักษณะพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ณ พื้นที่นั้นๆ เปรียบเสมือนมีความสัมพันธ์ต่อคลื่นที่แผ่กระจายออกมา พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถระบุคุณลักษณะได้โดยความยาวคลื่น และความถี่ ซึ่งความถี่จะเท่ากับจำนวนหนึ่ง



รูปที่ 3.1 เทคโนโลยีการสื่อสารในระบบระยะสั้น  
(Communications Technology in Short-Range Systems) [4]

รอบความถี่ในหนึ่งวินาทีและความยาวคลื่นเป็นระยะทางระหว่างยอดคลื่นสูงสุดลูกแรกไปถึงยอดคลื่นลูกถัดไป คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านตัวกลางคือ อากาศด้วยความเร็วเท่ากับแสง โดยความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นส่วนผกผันต่อกันตามสมการนี้

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{3.1}$$

โดย  $c$  คือความเร็วที่คลื่นเดินทางได้ นั่นคือ ความเร็วของแสง ( $3 \times 10^8$  m/s)

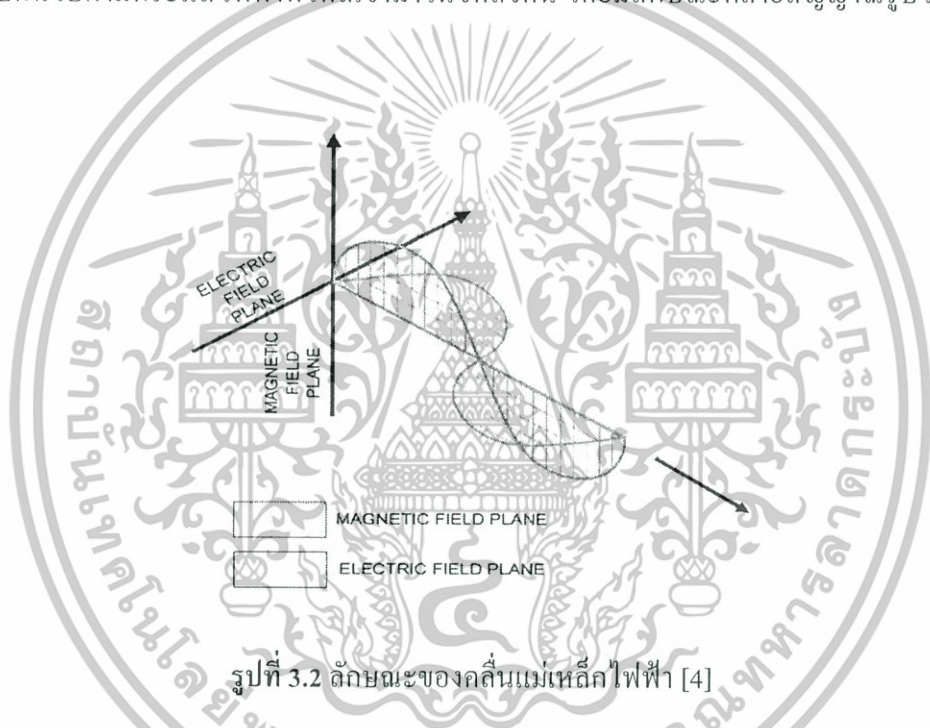
$\lambda$  คือความยาวของคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

$f$  คือความถี่ของคลื่นวิทยุ มีหน่วยเป็น GHz

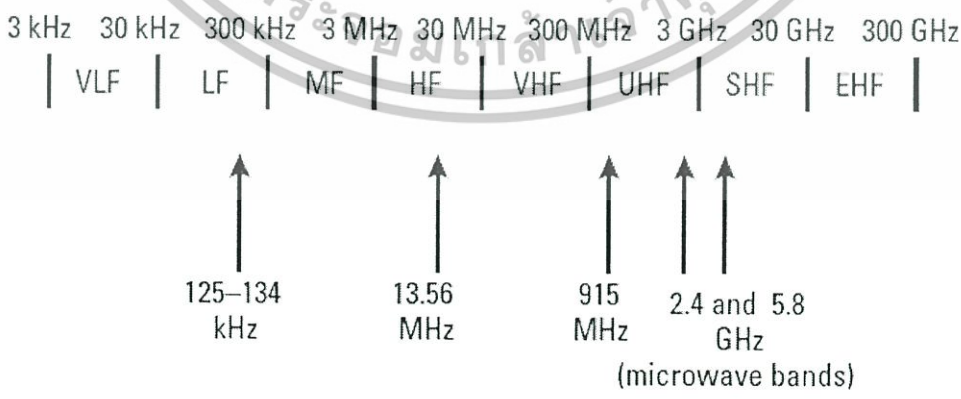
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 คุณลักษณะของคลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุเป็นเพียงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่งในสเปกตรัมเท่านั้น สามารถเดินทางด้วยความเร็วเท่ากับแสง ในการใช้คลื่นวิทยุรับ-ส่งข้อมูลนั้น ข้อมูลจะเดินทางไปถึงปลายทางในเกือบจะทันที แต่คลื่นวิทยุส่วนใหญ่ไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติต้องอาศัยกระบวนการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นกับระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ต้องอาศัยหลักการนี้เช่นเดียวกัน ในการปล่อยกระแสไฟฟ้าเป็นความถี่ผ่านขดลวดตัวนำเป็นจังหวะซ้ำๆ กัน จากนั้นสนามไฟฟ้าก็จะแผ่ออกมาจากขดลวด โดยความเข้มจะสูงขึ้นแล้วค่อยๆ ลดลงตามระยะทางกำลังสอง ในทิศทางตรงกันข้ามสลับกันไปตามกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามาในขดลวดนี้ โดยมีลักษณะคล้ายสัญญาณรูปไซน์ (Sine Wave)



รูปที่ 3.2 ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [4]



รูปที่ 3.3 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 คุณสมบัติของคลื่นวิทยุที่เกิดภายในช่องสัญญาณ

คลื่นที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณโดยทั่วไปแล้วจะเกิดเนื่องจากจากคลื่นวิทยุได้แพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณที่เป็นตัวกลางคืออากาศและช่องสัญญาณนั้นๆ อาจจะมีวัตถุขวางกั้นหรือเกิดจากการกระทบจากวัตถุและอาจถูกรบกวนด้วยสัญญาณในระบบการสื่อสารต่างๆ จึงอธิบายคุณสมบัติของคลื่นบางประการที่จำเป็นต่อระบบการสื่อสารระยะสั้น

#### 3.2.2.1 การลดทอนของคลื่น

การแพร่กระจายของคลื่นวิทยุก็คล้ายกับแสงไฟ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นแสงจากหลอดไฟก็จะมีแสงที่ลดลง เพราะคลื่นวิทยุก็เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งเหมือนกัน ความแรงของสัญญาณวิทยุก็จะลดลงตามระยะห่างจากต้นกำเนิดเป็นอัตราผกผันกำลังสอง ความแรงของสัญญาณจะลดลงมากเป็นทวีคูณตามสมการกำลังงานความเข้มของฟรีส (Friis) [5]

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r \quad (3.2)$$

โดย  $P_r$  คือ ความเข้มกำลังงานของเครื่องรับ

$P_t$  คือ กำลังงานจากเครื่องส่ง

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

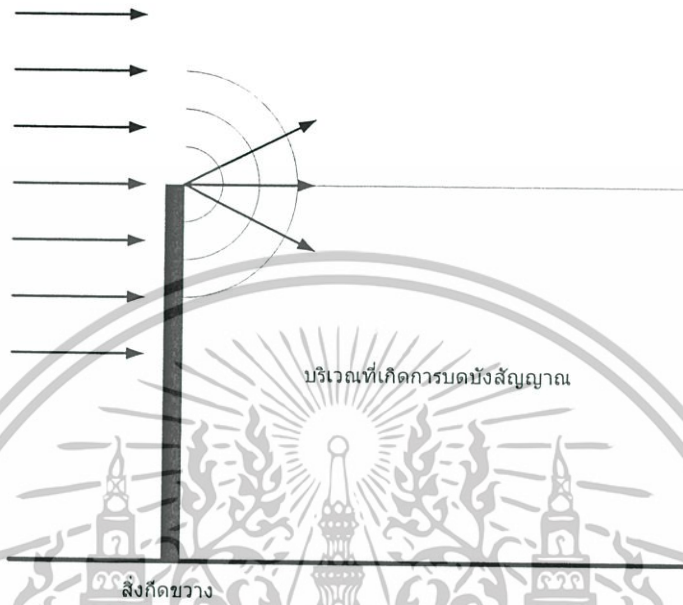
$G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง

$G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

#### 3.2.2.2 สิ่งกีดขวางมีผลต่อช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น

ในสภาวะการใช้งานทั่วไป สิ่งกีดขวางไม่ได้ที่จะมีสิ่งกีดขวางต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอาคาร ต้นไม้ ผนังห้อง หรือกระจก สิ่งเหล่านี้อาจเป็นคุณสมบัติการลดทอนและดูดซับคลื่น ซึ่งวัสดุที่มีผลกระทบต่อคลื่นวิทยุ เช่น โลหะ หรือผนังคอนกรีตจะมีอัตราการลดทอนสัญญาณสูง ลักษณะของสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่ทำให้เกิด (Shadow) อาคารนี้มักจะเกิดเมื่ออยู่หลังอาคารสูงๆ หรือภูเขา และอาจส่งผลให้เกิดการสะท้อน (Reflection) และการเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction) ได้เช่นกันซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการเลี้ยวเบนของคลื่นที่มีผลกระทบต่อช่องสัญญาณการสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของการเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุเมื่อเกิดจากสิ่งกีดขวางการแพร่กระจายคลื่นวิทยุดังต่อไปนี้

### 3.2.3 การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction)



รูปที่ 3.4 การเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อเจอสิ่งกีดขวาง

ตามทฤษฎีพื้นฐานของไฮเซน (Huygen's) กล่าวว่าเมื่อมีการแพร่กระจายคลื่นออกไปแล้วหน้าคลื่นที่แพร่กระจายออกมาเคลื่อนที่ไปชนสิ่งกีดขวาง จะส่งผลให้มีการเกิดหน้าคลื่นใหม่ที่บริเวณขอบสิ่งกีดขวาง ซึ่งหน้าคลื่นใหม่นี้จะส่งผลให้เกิดที่ถูกลบบังสัญญาณ สามารถพิจารณาดังรูปที่ 3.4

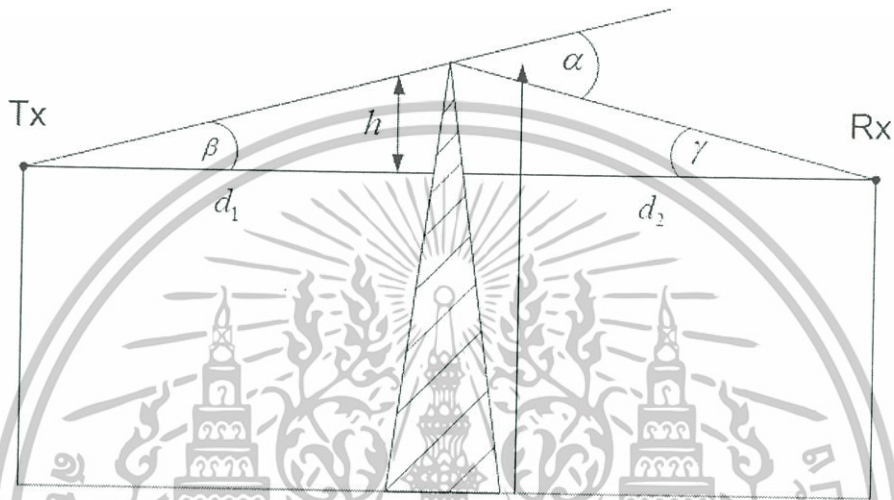
ซึ่งบริเวณที่เกิดการบดบังสัญญาณนี้ จะส่งผลให้สัญญาณบริเวณนั้นมีปริมาณน้อย ดังนั้นเราจำเป็นต้องวิจัยและศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเลี้ยวเบนของสัญญาณเมื่อไปเจอกับสิ่งกีดขวาง โดยจะทำการวัดสัญญาณนี้ โดยจะสมมุติให้สิ่งกีดขวางนี้เปรียบเสมือนร่างกายมนุษย์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านแล้วส่งผลอย่างไรต่อด้านรับบ้าง

ในการศึกษาผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของสัญญาณเราจึงต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความยาววิถีเฟรสเนลโซน (Fresnel zone), ความยาววิถีเข้าถึง (Excess path length  $\Delta$ ), การสูญเสียจากการเลี้ยวเบน (Diffraction loss) ซึ่งสามารถอธิบายตามสมการดังต่อไปนี้

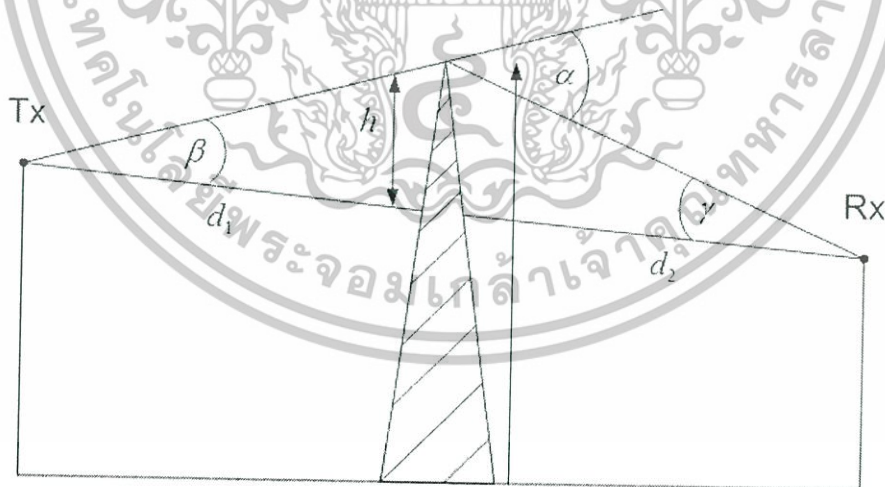
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3.1 Fresnel Zone Geometry

เมื่อพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นจากด้านส่งไปยังด้านรับ โดยกำหนดให้คลื่นจะเดินทางไปยังด้านรับซึ่งจะประกอบไปด้วยเส้นทางการเดินทางในระดับสายตาและเส้นทางการเดินทางที่เกิดจากการเลี้ยวเบนจากสิ่งกีดขวาง

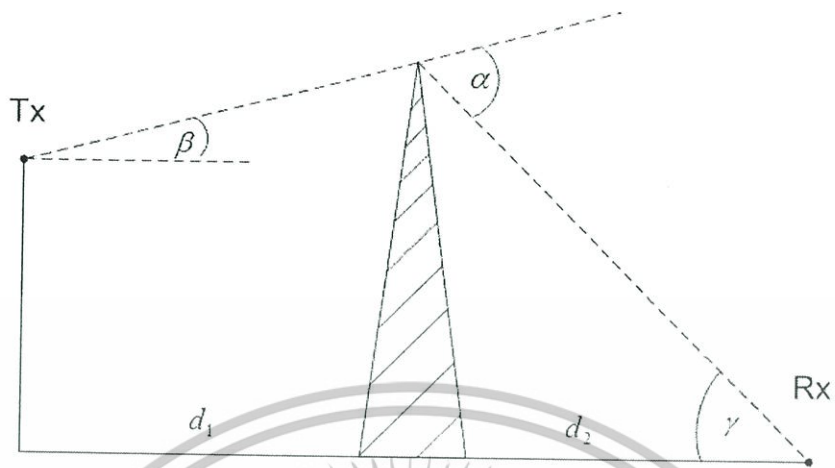


รูปที่ 3.5 แบบจำลองกรณีกำหนดให้ความสูงของสายอากาศด้านส่ง-รับมีความสูงเท่ากัน



รูปที่ 3.6 แบบจำลองกรณีกำหนดให้ความสูงของสายอากาศด้านส่งสูงกว่าสายอากาศด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แบบจำลองกรณีกำหนดให้ความสูงของสายอากาศรับมีระดับที่ต่ำสุด

จากรูปที่ 3.5 ทำให้สามารถทราบผลต่างระหว่างเส้นทางการเดินทางของคลื่นจาก เส้นทางการเดินทางในระดับสายตาและเส้นทางการเดินทางจากการเลี้ยวเบนจากสิ่งกีดขวางซึ่งจะอธิบายถึงสมการผลต่างระหว่างเส้นทางการเดินทางในระดับสายตาและเส้นทางการเลี้ยวเบนของสัญญาณจากสิ่งกีดขวางซึ่งเรียกว่าความยาววิถีที่เข้าถึง (Excess path length  $\Delta$ )

$$\Delta \approx \frac{h^2 (d_1 + d_2)}{2 d_1 d_2} \quad (3.3)$$

ผลต่างของมุมคือ

$$\phi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi h^2 (d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2} \quad (3.4)$$

และเมื่อ  $\tan x \approx x$ , แล้ว  $\alpha = \beta + \gamma$  จะได้

$$\alpha \approx h \left( \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right) \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.5) เป็นสมการที่ใช้บ่อยในการหาเกี่ยวกับพารามิเตอร์การเลี้ยวเบน เฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์ (Fresnel-Kirchoff)

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = \alpha \sqrt{\frac{2d_1 d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}} \quad (3.6)$$

เมื่อให้  $\alpha$  เป็นมุมในเรเดียน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.5 โดยพารามิเตอร์  $v$  ใช้คำนวณหาค่ามุมต่างเฟสระหว่างเส้นทางของคลื่นในระดับสายตา กับเส้นทางการเดินทางของคลื่นที่เกิดจากการหักเห ดังเช่น

$$\phi = \frac{\pi}{2} v^2 \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.8 ขอบเขตเฟรสเนลโซน

การสูญเสียจากการหักเหเป็นการสูญเสียเนื่องจากเส้นทางเดินทางของคลื่นเมื่อผ่านพื้นสิ่งกีดขวางซึ่งแสดงไว้โดยเฟรสเนล โซนซึ่งมันจะบอกถึงปริมาณวิถีการสูญเสียจากด้านส่งไปยังด้านรับ (Excess path length;  $\Delta$ ) โดยกำหนดให้ ความยาววิถีจะเท่ากับ  $n \lambda / 2$

จากรูปที่ 3.8 แสดงรัศมีวงกลมของ Fresnel zone circle ซึ่งจะมีแกนร่วมกันที่จุด  $o$  ซึ่งจะสนใจในส่วนที่  $n = 1$  เพราะมันจะมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดถ้ารัศมีของเฟรสเนลถูกคบบังโดยสิ่ง

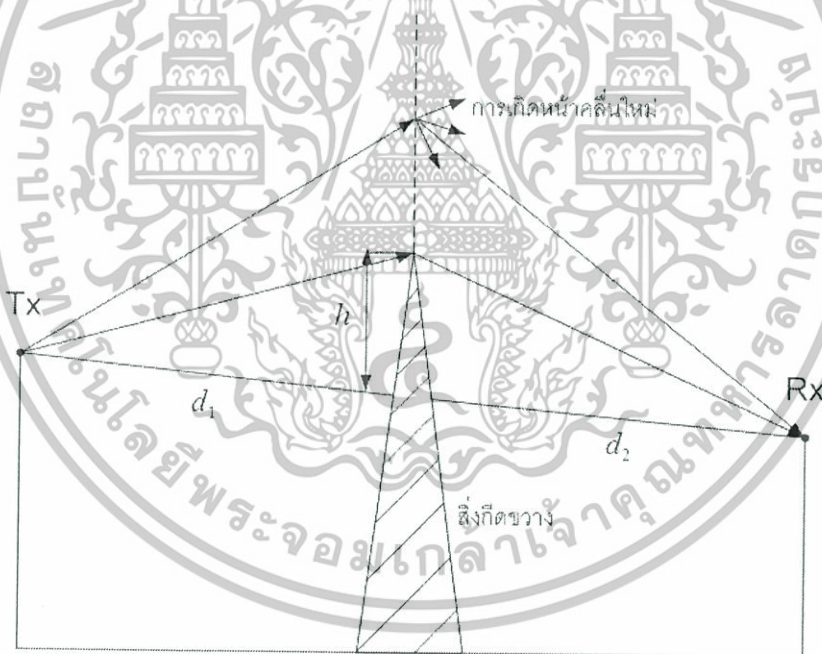
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กีดขวางทั้งหมดก็จะเป็นผลการแพร่กระจายคลื่นจากด้านส่งไปยังด้านรับสามารถคำนวณหาค่า  $r_n$  ได้จากสมการนี้

$$r_n \approx \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (3.8)$$

### 3.2.3.3 Knife-edge diffraction model

สัญญาณการลดทอนที่เกิดเนื่องจากที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง แล้วเกิดการเลี้ยวเบนเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาเพื่อสันนิษฐานเกี่ยวกับปริมาณของคลื่นในพื้นที่นั้นๆ แต่ในความจริงแล้วมันเป็นไปได้ที่จะคาดคะเนการสูญเสียจากการเลี้ยวเบน ในการศึกษาเกี่ยวกับการสูญเสียการเลี้ยวเบนนั้นใช้หลักการในการศึกษาโดยการพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการวัด



รูปที่ 3.9 การเกิดหน้าคลื่นใหม่เมื่อเจอสิ่งกีดขวาง

เมื่อพิจารณาความสูงของสายอากาศด้านรับเมื่ออยู่ในระยะที่ถูกบดบังสัญญาณดังรูปที่ 3.9 ซึ่งแสดงผลรวมทางเวกเตอร์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตรงที่ความสูงของสายอากาศด้านรับซึ่งตามทฤษฎีของไฮเซน (Huygen's) ได้อธิบายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดเหนือสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณการสูญเสียจากการเลี้ยวเบนของคลื่นนั้นจะแสดงในหน่วยของ Decibel (dB) ซึ่งจะสัมพันธ์กับความอัตรการขยาย (Gain) ที่แปรผกผันซึ่งกันและกัน โดยจะแบ่งการหาค่าอัตรการขยายของการเลี้ยวเบนเป็นช่วงๆ จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์  $v$

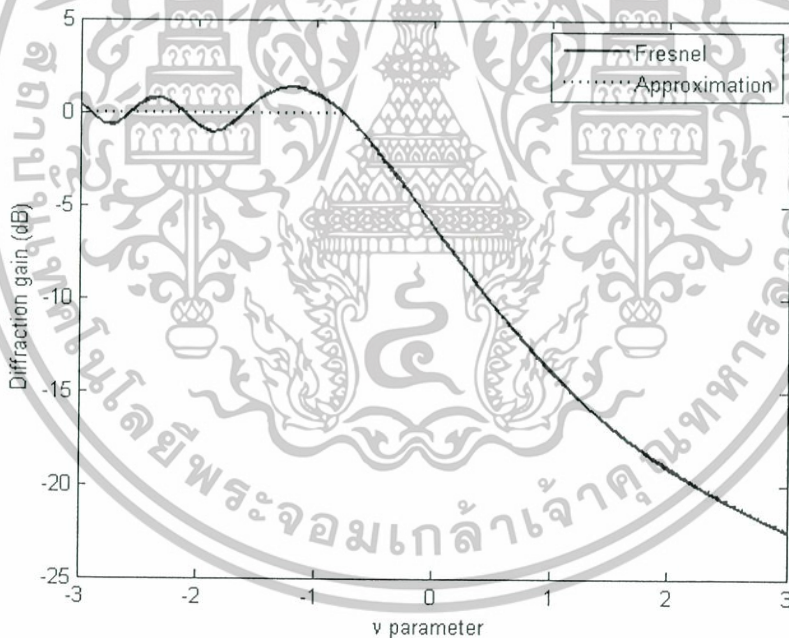
$$G_d(\text{dB}) = 0 \quad v \leq -1 \quad (3.9a)$$

$$G_d(\text{dB}) = 20 \log(0.5 - 0.62v) \quad -1 \leq v \leq 0 \quad (3.9b)$$

$$G_d(\text{dB}) = 20 \log(0.5 \exp(-0.95v)) \quad 0 \leq v \leq 1 \quad (3.9c)$$

$$G_d(\text{dB}) = 20 \log(0.4 - \sqrt{0.11844 - (0.38 - 0.1v)^2}) \quad 1 \leq v \leq 2.4 \quad (3.9d)$$

$$G_d(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{0.225}{v}\right) \quad v > 2.4 \quad (3.9e)$$



รูปที่ 3.10 อัตรการขยายของการเลี้ยวเบนแปรผันตามพารามิเตอร์  $v$  [6]

### 3.2.4 การแพร่กระจายคลื่น

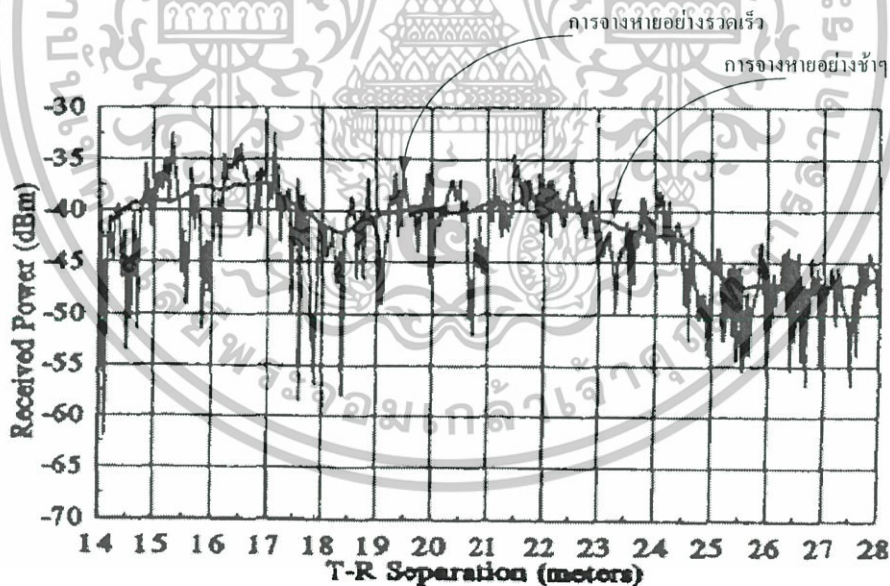
โดยปกติเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านตัวกลางหรืออวกาศว่าง (Free space) จะเกิดการแพร่กระจายคลื่น (Propagation) ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากจุดลวดทอนและรบกวนจากสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารอื่นๆ หรือผลกระทบจากวัตถุที่ล้อมรอบบริเวณเหล่านั้น และเนื่องจากระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้นยิ่งส่งผลให้ความเข้มกำลังงานแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าลดลง รวมทั้งอาจจะทำให้เกิดการจางหายหลายวิถี (Multipath fading)

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะอยู่บนพื้นฐานของค่าความเข้มเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ตามระยะทางที่กำหนด โดยระยะทางระหว่างเครื่องส่งไปยังเครื่องรับจะถูกนำมาใช้ในการประมาณพื้นที่ระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง ถ้าระยะทางมีขนาดหลายร้อยเมตรขึ้นไปจะเรียกรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ว่า “การจางหายแบบสเกลกว้าง (Large scale fading)” สำหรับในช่วงระยะทางสั้นๆ หรือระยะทางไม่กี่โกลมากันั้น จะเรียกรูปแบบนี้ว่า “การจางหายแบบสเกลแคบ (Small scale fading)”

ถ้าเครื่องรับเคลื่อนที่ด้วยระยะทางไม่กี่โกลมากันั้นความเข้มกำลังงานของสัญญาณที่ได้รับนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจนทำให้เกิดการจางหายที่เป็นการจางหายแถบความถี่แคบ ซึ่งอาจทำให้สัญญาณมีขนาดลดลงประมาณ 30-40 dB แต่ถ้าเครื่องรับมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการจางหายแบบนี้เรียกว่าการจางหายแบบสเกลกว้าง



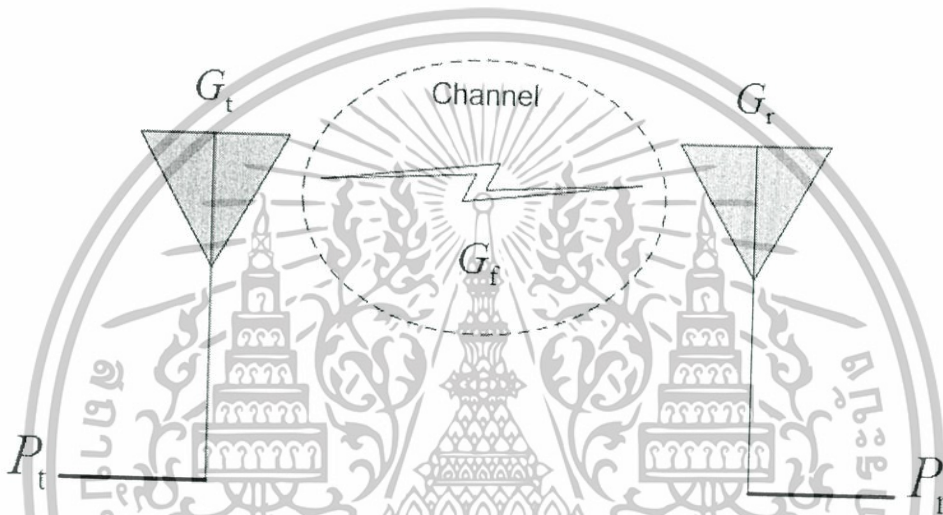
รูปที่ 3.11 การจางหายในรูปแบบสเกลแคบและแบบสเกลกว้าง [7]

รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างของระบบการสื่อสารภายในอาคารที่สัญญาณทางด้านรับมีการเปลี่ยนแปลงรูปการจางหายแบบสเกลแคบและการจางหายแบบสเกลกว้าง จากรูปจะเห็นว่า การจางหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนั้นจะเกิดขึ้นตามการเคลื่อนที่ของเครื่องรับ แต่ถ้าเป็นการจางหายแบบสเกลกว้าง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเป็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น

### 3.3 ทฤษฎีและหลักการส่งผ่านในช่องสัญญาณอวกาศสำหรับการสื่อสารแบบระบบ ระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 3.12 การสื่อสารแบบระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในอวกาศว่าง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นและคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคารที่ส่งผลกระทบต่อระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งพิจารณาได้จากฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณและความไวสัญญาณทางด้านรับของแบบจำลองการส่งผ่านคลื่นวิทยุ ซึ่งได้คำนึงถึงหลักการการส่งผ่านของฟรีสในการประมาณหาค่าแถบสัญญาณในช่องแถบแคบ (Narrow band) ที่อยู่ในระดับสายตา (Line of sight; LOS) เนื่องจากสมการการส่งผ่านของฟรีสได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์การสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น [7]

$$P_r(f, d) = \frac{P_t(f)G_t(f)G_r(f)\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $P_t(f)$  คือ กำลังงานของเครื่องส่งในโดเมนความถี่  
 $P_r(f, d)$  คือ กำลังงานของเครื่องรับในโดเมนความถี่  
 $d$  คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ  
 $L$  คือ การสูญเสียของระบบ ( $L = (4\pi d/\lambda)^2$ )  
 $G_f(f, d)$  คือ อัตราการขยายในอวกาศว่าง

$$G_f(f, d) = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.11)$$

อัตราขยายของสายอากาศส่งเป็นความสัมพันธ์ต่อค่าสัมประสิทธิ์ช่องเปิด (Effective aperture;  $A_e$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อขนาดของสายอากาศด้วยกัน เขียนได้เป็น

$$G_t = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (3.12)$$

โดยที่  $A_e = \eta A_p$  เมื่อ  $\eta$  เป็นประสิทธิภาพของสายอากาศ (ประมาณ 50 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์) และ  $A_p$  เป็นพื้นที่ทางกายภาพของสายอากาศ

### 3.3.1 ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของระบบส่ง (Effective isotropic radiated power; EIRP)

ในระบบส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ หากกำลังส่งของเครื่องส่งอย่างเดียวเป็นตัวบอกว่าคลื่นแพร่กระจายออกมาดีเพียงใดก็จะบอกได้ไม่เที่ยงตรง จึงต้องมีการนำเอาตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบส่ง เช่น อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) และค่าการสูญเสียภายในสายส่ง (Cable loss) มาพิจารณาด้วย เมื่อค่าเหล่านี้มารวมกันก็สามารถบอกถึงประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นได้อย่างแท้จริง สามารถคำนวณได้จาก

$$EIRP(dB) = P_t G_t - Loss_{\text{Cable}} \quad (3.13)$$

EIRP นี้เป็นค่าที่ FCC (Federal communication commission) ซึ่งเป็นองค์กรควบคุมความถี่ของอเมริกาใช้ควบคุมกำลังส่งของอุปกรณ์ไร้สายแบบต่างๆ ไม่ให้มีค่านี้มากเกินไป เพราะหากค่านี้

มากขึ้นไปหมายความว่าคลื่นเดินทางได้ไกลกว่าปกติ ซึ่งอาจจะไปรบกวนอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย บริเวณข้างเคียงได้

**3.3.2 การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss)**

ในระบบการสื่อสารแบบไร้สายนั้นเป้าหมายหลักของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นคือ การคาดการณ์ถึงค่าการสูญเสียเชิงวิถีของช่องสัญญาณ (PL) เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นส่งผลกระทบต่อได้หลายปัจจัยต่อระบบการสื่อสาร โดยตัวแปรที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ สมการค่าการสูญเสียของกำลังงานสัญญาณสัมพันธ์กับสมการที่ 3.12 ซึ่งเหมาะกับการคาดการณ์สัญญาณของเครื่องรับและแบบจำลองการสูญเสียในอวกาศว่างแสดงได้ดังสมการที่ 3.15 ส่วนค่าการสูญเสียของ  $d_0$  ระยะทางอ้างอิงในสนามไฟฟ้าระยะไกล (Far field) ซึ่งมีสูตรสัมพันธ์กับขนาดของสายอากาศ  $d_0 = \frac{2D^2}{\lambda}$ ,  $D > \lambda$  คือ ขนาดของสายอากาศ (Antenna diameter) ซึ่งขึ้นอยู่กับ การพิจารณาค่าคงที่ในแต่ละสถานะแวดล้อมดังตารางที่ 3.1 [7]

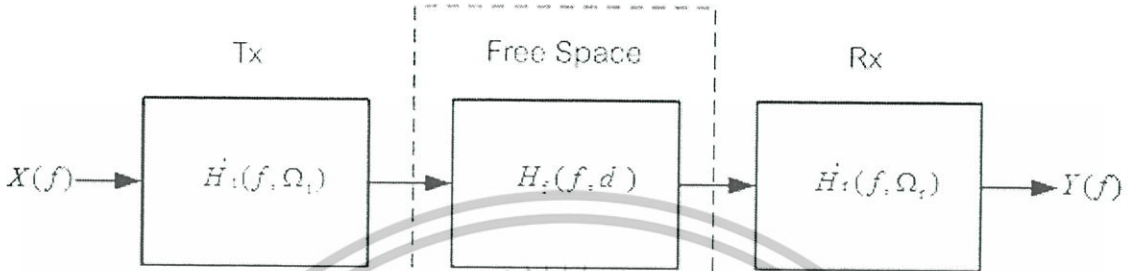
$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} \tag{3.14}$$

$$PL(dB) = 20 \log \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad d \geq d_0 \tag{3.15}$$

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่สถานะแวดล้อมในแต่ละกรณี

สถานะแวดล้อม	ค่าคงที่ $n$
อวกาศว่าง	2
ภายในอาคารระดับสายตา	1.6-1.8
ถูกกีดขวางภายในอาคาร	4-6
บริเวณในเมือง (นอกอาคาร)	2.7-3.5
ถูกบดบังในเมือง (นอกอาคาร)	3-5

3.4 วิเคราะห์แบบการถ่ายโอนช่องสัญญาณของฟรีสในอวกาศว่างสำหรับการสื่อสารระบบ  
ระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมการถ่ายโอนช่องสัญญาณของฟรีสในอวกาศว่าง

ฟังก์ชันการถ่ายโอนในรูปแบบเชิงซ้อนสำหรับช่องสัญญาณอวกาศว่างของฟรีส แสดงดัง  
สมการที่ 3.17 [8]

$$H_c(f, d) = \overline{H}_t(f, \Omega_t) \cdot \overline{H}_r(f, \Omega_r) H_r(f, d) \tag{3.16}$$

โดยที่สมมุติว่า  $H_a(f) = H_a(\theta_a, \phi_a, f)$  (3.17)

$$= \hat{\theta}_a H_{a\theta}(\theta_a, \phi_a, f) + \hat{\phi}_a H_{a\phi}(\theta_a, \phi_a, f)$$

$\alpha = r \text{ or } t$

$$\overline{H}_r(f) = \sqrt{\frac{H_c(f)}{H_r(f, d)}} \tag{3.18}$$

- ซึ่ง  $H_t(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศด้านส่ง
- $H_r(f)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศด้านรับ
- $H_c(f, d)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ

สำหรับฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณอวกาศว่าง  $H_f(f)$  ในรูปแบบเชิงซ้อนสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.19 ซึ่งสมการนี้มีคุณสมบัติของความถี่บวกและความถี่ลบเป็นไปตามคุณสมบัติของความสมเหตุสมผล

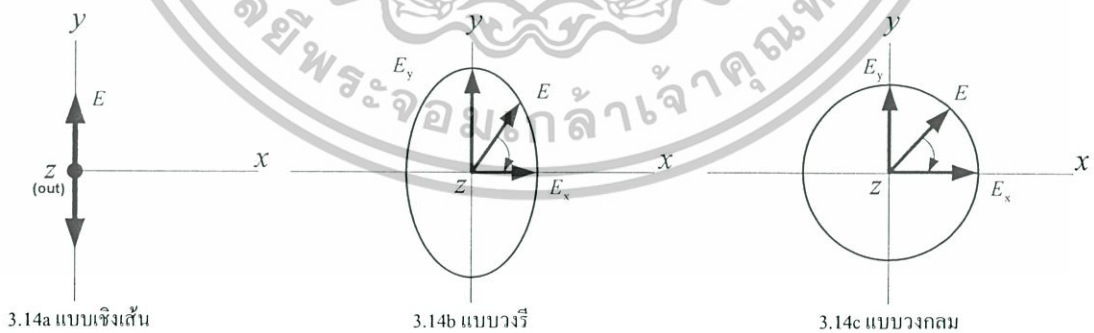
$$H_f(f) = \frac{\lambda}{4\pi d} \exp(-jkd), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.19)$$

โดยกำหนดให้เวกเตอร์มีขั้ว (Polarize) และความสัมพันธ์ (Relate) เป็นไปตามสมการที่ 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ

$$\Omega_r = \pm \Omega_t \quad (3.20)$$

### 3.4.1 โพลาริเซชัน (Polarization)

ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางกายภาพของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุและบอกถึงทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งโพลาริเซชันของคลื่นในระบบระบุตัวคนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบสายอากาศของเครื่องรับ-ส่ง หรือแท็ก ในระบบระบุตัวคนด้วยคลื่นความถี่วิทยุโพลาริเซชันสามารถเป็นได้ทั้ง โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear polarization), โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circle polarization) และโพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical polarization)



รูปที่ 3.14 คุณลักษณะของการโพลาริเซชันสายอากาศ [9]

ได้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบของสายอากาศ ถ้าหากสายอากาศของเครื่องอ่าน (Reader) เป็นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นและสายอากาศของเครื่องรับ-ส่ง หรือแท็ก (Tag) เป็นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นเช่นกัน ดังนั้นเครื่องอ่านกับแท็กจะสามารถสื่อสารกันได้ต่อเมื่อมีโพลาไรเซชันแบบเดียวกัน มันเป็นการยากที่จะคาดการณ์ทิศทางของสนามไฟฟ้าในแถบสนามระยะใกล้ (Near field) เพราะว่าสายอากาศส่งไม่ได้พิจารณาเป็นจุดต้นกำเนิด (Point source) ในแถบนี้ ส่วนในสนามระยะไกล สายอากาศกลายเป็นจุดต้นกำเนิด ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากในทิศทางการแพร่กระจายคลื่น และคุณลักษณะของโพลาไรเซชันก็จะไม่เปลี่ยนแปลงตายระยะทาง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงคุณลักษณะของการโพลาไรเซชันแบบเดียวกัน (Co-polarization) และการโพลาไรเซชันแบบไขว้กัน (Cross polarization) ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้หลักการการส่งผ่านของฟรีสสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 3.2 โดยใช้สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปทำการทดสอบซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในบทถัดไป

$$P_r(f, d) = P_t G_t(f, \Omega_t) G_r(f, \Omega_r) G_f(f, d) \eta_p(f) \quad (3.21)$$

โดย  $G_t(f, \Omega_t), G_r(f, \Omega_r)$  เป็นอัตราขยายของสายอากาศส่งและรับของระยะพิกัดทรงกลม (Spherical coordinate) ตามลำดับ  
 $\eta_p(f)$  เป็นประสิทธิภาพการแมตซ์โพลาไรเซชันระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับ

$$\eta_p(f) = (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2) |\hat{p}_t \cdot \hat{p}_r|^2 \quad (3.22)$$

โดย  $\Gamma_t$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศทางด้านส่ง

$\Gamma_r$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศทางด้านรับ

$\hat{p}_t$  คือ เวกเตอร์โพลาไรเซชันของสายอากาศทางด้านส่ง

$\hat{p}_r$  คือ เวกเตอร์โพลาไรเซชันของสายอากาศทางด้านรับ

#### 3.4.2 การแพร่กระจายของสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล (Near-Far field)

ในระบบของการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนี้มีการสื่อสารทั้งสนามไฟฟ้าระยะใกล้ ซึ่งก็คือการใช้หลักการการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่

สูงส่วนลักษณะของสนามไฟฟ้าระยะไกล นั้นซึ่งก็คือใช้หลักการการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านความถี่สูงยิ่งและย่านไมโครเวฟ เป็นต้น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ออกจากสายอากาศผ่านตัวกลางคือ อวกาศว่าง (Free space) จะเรียกกระนาบคลื่นนั้นในสนามระยะไกล ซึ่งเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กเป็นค่าคงที่ ในสูญญากาศ  $120\pi$  หรือ  $377\Omega$  และสามารถประมาณระยะทางขอบเขตของสนามไฟฟ้าระยะไกล พื้นที่นี้ได้คือ [9]-[10]

$$d_0 = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (3.23)$$

จากหัวข้อที่ 3.3.2 นี้ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้โดย

$$d_0 < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.24)$$

สนามระยะไกล คือ บริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้น แปรผันตามระยะทางจากสายอากาศเมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามบริเวณนี้อาจจะไม่เกิดขึ้น

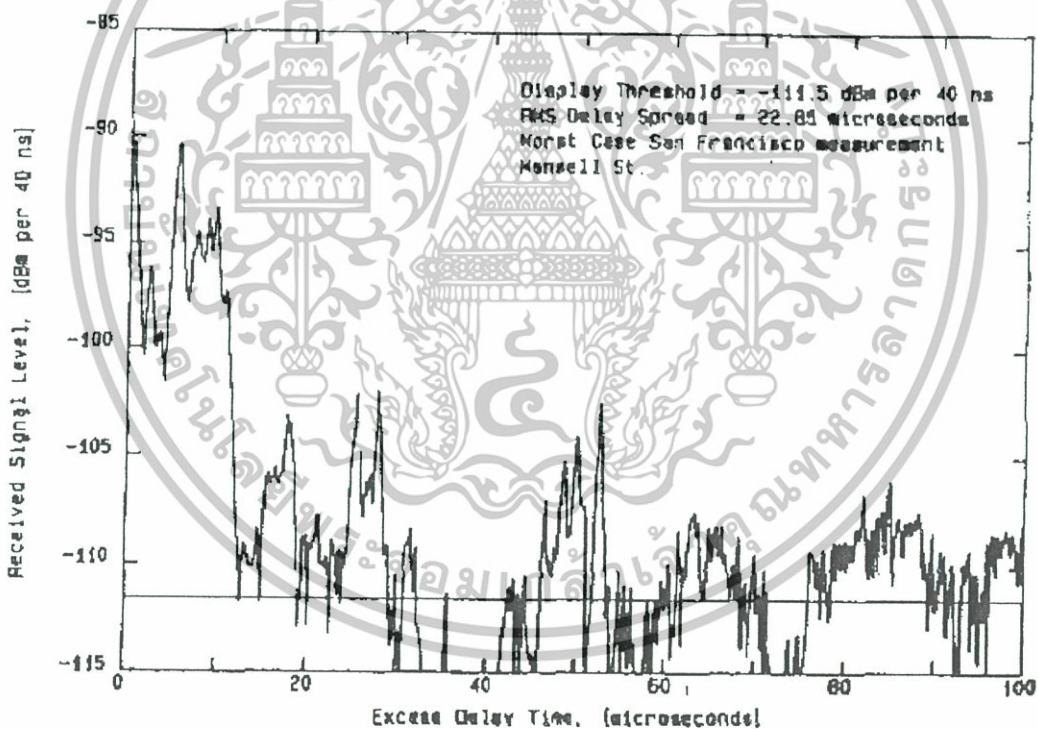
สนามระยะไกล คือ เป็นบริเวณที่ใช้จัดวางสายอากาศที่ทำการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น หรือทำการวัดคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ ในกรณีที่มีความยาวของสายอากาศสั้นและสายอากาศรับ มีขนาดแตกต่างกัน จะต้องแทนค่า  $D$  ของสายอากาศที่มีความยาวสูงสุด ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองและวิจัยถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นกรณีที่มีผลกระทบจากสนามระยะไกล และสนามระยะไกล ด้วยสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่ใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟและรายละเอียดของผลการทดลองจะกล่าวไว้ในบทที่ 5

### 3.4.3 พารามิเตอร์การกระจายทางเวลา

เพื่อที่จะเปรียบเทียบช่องสัญญาณหลายทิศทางสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย สัญญาณแต่ละส่วนที่ส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับไม่เท่ากัน สัญญาณบางส่วนมักจะเดินทางมาถึงภาครับได้อย่างรวดเร็วและมีการสูญเสียอันเนื่องมาจากการสะท้อนหลายทิศทางกว่า

มักจะเดินทางมาถึงภาครับได้อย่างรวดเร็วและมีการสูญเสียอันเนื่องมาจากการสะท้อนหลายทิศทางกว่าที่จะเดินทางมาถึงภาครับมักใช้เวลาในการแพร่กระจายที่นานกว่า ส่งผลถึงความล่าช้าในระบบก่อให้เกิดปัญหาการประวิงเวลา (Delay) ขึ้น ดังนั้นมีความสำคัญต่อระบบการสื่อสารไร้สายเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาถึงเวลาที่ถูกลื่อนออกไปของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับ โดยในส่วนของพารามิเตอร์ของการกระจายทางเวลา (Time dispersion parameter) นั้น สามารถที่จะวิเคราะห์จากพารามิเตอร์ของสัญญาณหลายวิถี (Multipath channel) ที่อยู่ในรูปแบบของภาพตัดขวางการประวิงเวลา (Power delay profile) มีชื่อเรียกว่า ค่าเฉลี่ยประวิงเวลา (Mean excess delay;  $\bar{\tau}$ ) ซึ่งถูกนิยามดังสมการดังต่อไปนี้ [11]

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.15 ระดับค่าเฉลี่ยการประวิงเวลา [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวว่ามีความสัมพันธ์ต่อกันหรือไม่มากน้อยอย่างไร โดยนำข้อมูลของตัวแปรทั้งสองตัวนั้นมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งสามารถบอกถึงระดับความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่าง 2 ตัวแปร ซึ่งในที่นี้หมายถึงสัญญาณทางด้านส่งและสัญญาณทางด้านรับ และจะมีค่าความสัมพันธ์อยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ถ้าเป็นลบแสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้าม แต่ถ้าเป็นบวกแสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์ตามกัน ส่วนถ้าระดับความสัมพันธ์เท่ากับ 1 ไม่ว่าจะ เป็นบวกหรือลบแสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าเป็น 0 ก็แสดงว่าตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นต่อกันเลยหรือแตกต่าง โดยอย่างสิ้นเชิง ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.26

$$C_c = \frac{|V_{cr}(f)|}{\sqrt{V_t(f)V_r(f)}} \quad (3.26)$$

โดย  $V_{cr}(f)$  คือ Cross correlation ของสัญญาณส่งและสัญญาณรับใน โดเมนความถี่  
 $V_t(f), V_r(f)$  คือ สัญญาณส่งและสัญญาณรับใน โดเมนความถี่ ตามลำดับ

### 3.4.5 อัตราความผิดพลาดของบิต

ในกรณีของระบบแอนะล็อกพารามิเตอร์ที่สำคัญคืออัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวนและในกรณีของระบบดิจิทัลคือค่าอัตราส่วนพลังงานเฉลี่ยบิตต่อความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของสัญญาณรบกวน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการนี้ [13]

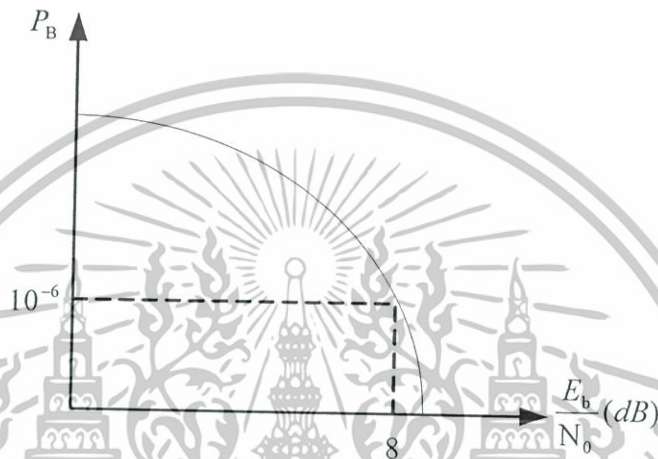
$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \cdot \frac{B}{R_b} \quad (3.27)$$

เมื่อ  $B$  คือ แบนด์วิดธ์ของระบบ

$R_b$  คือ อัตราเร็วบิต

ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารดิจิทัลนั้นขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลที่รับได้ ซึ่งระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ก็เป็นระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลดังนั้นการที่จะสามารถรู้ได้หรือไม่ว่าระบบมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด จึงต้องมีพารามิเตอร์ที่มาเป็นเครื่องยืนยันว่าระบบนั้นเป็นอย่างไรซึ่งจะแสดงในรูปอัตราความผิดพลาดของบิต (Bit error rate;  $P_B$ ) ซึ่งเป็นค่าทางสถิติที่นิยามมาจากค่าความน่าจะเป็นที่เกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้คือเมื่อค่าอัตราส่วนพลังงานเฉลี่ยบิตต่อความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นจะทำให้  $P_B$  ลดลง ดังรูปที่ 3.16 เช่น

เครื่องส่งส่งข้อมูล 1000000 บิต ปรากฏว่าข้อมูลที่รับได้มีข้อมูลที่ผิดเพียง 1 บิต แสดงว่าค่าอัตราความผิดพลาดของบิตมีค่าเท่ากับ  $1/1000000$  หรือ  $10^{-6}$  เป็นต้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio; SNR) และอัตราความผิดพลาดของบิตมีความผกผันซึ่งกันและกัน



รูปที่ 3.16 กราฟความน่าจะเป็นต่ออัตราความผิดพลาดของบิต

โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ข้าม  $K_{\mu}$  ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของสัญญาณทั้งสองได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_B = Q\left(\frac{E_b(1-V_{tr})}{N_0}\right) \quad (3.28)$$

เมื่อ  $Q(x)$  เป็นฟังก์ชันของความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตในการส่ง โดยปกติค่านี้สามารถหาได้ในกรณีที่ว่า  $x \gg 3$  ก็จะประมาณจากสมการ

$$Q(x) \approx \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ สำหรับระบบไร้สายระยะสั้น โดยเป็นแบบแผนของการศึกษาของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ที่เป็นส่วนสำคัญในการศึกษาพัฒนางานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยรายละเอียดของคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุผ่านช่องสัญญาณถ่ายโอนภายในอาคาร อาทิ หลักการในการเลี้ยวเบนของคลื่น การโพลาไรเซชัน สนามระยะใกล้และสนามระยะไกล ทฤษฎีหลักการการส่งผ่านของฟรีสสำหรับช่องสัญญาณในอวกาศว่าง ทฤษฎีในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ประเมินผลการทดลองทั้ง การสูญเสียเชิงวิถี ภาพตัดขวางการประวิงเวลา สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และอัตราบิดผิดพลาด รวมถึงหลักการในการวิเคราะห์การถ่ายโอนของช่องสัญญาณในระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และในบทถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนและการดำเนินการทดลองวิจัยเพื่อพิจารณาตามทฤษฎีและอยู่บนพื้นฐานของแบบแผนงานวิจัยเป็นสำคัญ



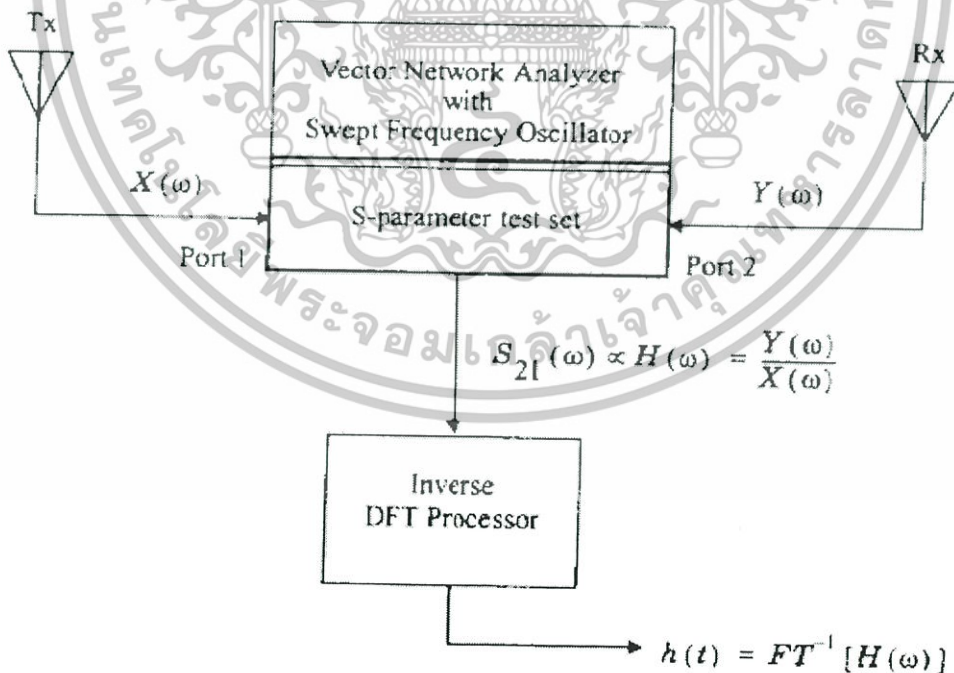
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การวัดและขั้นตอนการทดลองวิจัย

### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนในการทดลองวัดช่องสัญญาณการสื่อสาร (Channel measurement) ซึ่งเป็นการตรวจสอบผลการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบระบบตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบที่เรียกว่า เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer; VNA) ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์โครงข่ายบนโดเมนความถี่ซึ่งแสดงแบบการวัดตามรูปที่ 4.1 โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นและศึกษาถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณถ่ายโอนจากการแพร่กระจายคลื่นตามแบบจำลองที่คิดว่าจะมีผลต่อการสื่อสารระบบระบบตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งทำการทดสอบภายในสถานะแวดล้อมภายในอาคารเปรียบเสมือนกับว่าได้มีการนำเอาระบบระบบตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุมาใช้ภายในอาคาร และรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดนั้นจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.1 ระบบการวัดผลตอบสนองสองทางความถี่ในโดเมนความถี่ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

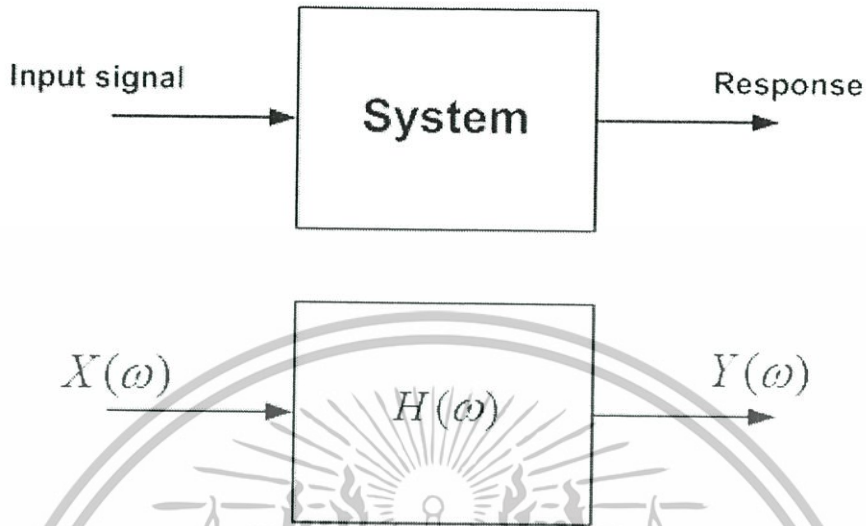
อย่างที่กล่าวมาแล้วว่าระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุในการสื่อสารต่อกันและยังย่านความถี่ไมโครเวฟยังมีผลกระทบมากมายจากการแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นการศึกษาถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากทำให้สามารถออกแบบระบบและวิเคราะห์ในการนำไปใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม ในการทดลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากด้านส่งไปยังด้านรับ ซึ่งได้พิจารณาและคำนึงถึงทฤษฎีที่กระทบต่อการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุได้ อาทิเช่น คุณลักษณะของการเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุ คุณลักษณะของการสื่อสารในระยะใกล้และระยะไกล และคุณลักษณะการโพลาไรเซชันของสายอากาศ ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการทดลองจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

## 4.2 การทดลองวัดช่องสัญญาณ

การทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นสำหรับระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุซึ่งใช้อุปกรณ์วิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เทคนิคการกวาดความถี่ (Frequency sweeping technique) สามารถทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่ (Frequency domain) ซึ่งสามารถทราบถึงผลตอบสนองของความถี่ของช่องสัญญาณและสามารถทดสอบจากการวัดได้หรือที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient;  $S_{21}$ )

### 4.2.1 ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ

เมื่อทดสอบช่องสัญญาณโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ สิ่งที่ต้องทำความเข้าใจคือ ระบบและสัญญาณ โดยระบบคือ กลุ่มที่อยู่รวมกันซึ่งสามารถทำงานร่วมกันเพื่อให้สำเร็จตามจุดมุ่งหมายที่ต้องการ ส่วนสัญญาณคือ ปริมาณทางกายภาพบางอย่างที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ เรียกว่าสัญญาณอินพุตของระบบ และจะมีสัญญาณเอาต์พุตซึ่งเป็นปริมาณทางกายภาพที่ออกจากระบบ หรือที่เรียกว่า ผลตอบสนอง (Response) ของระบบ ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวนั้นจะเป็นสิ่งที่ใช้แสดงถึงคุณสมบัติของระบบ และจากการทดสอบก็คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณซึ่งแปรผันตรงกับฟังก์ชันการถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency transfer function;  $H(\omega)$ ) ของช่องสัญญาณ โดยฟังก์ชันการถ่ายโอนทางความถี่ดังกล่าวนี้จะแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการพิจารณาอยู่ซึ่งประกอบด้วยผลตอบสนองทางขนาด (Magnitude response) และผลตอบสนองทางเฟส (Phase response) ของสัญญาณ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัญญาณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณนั้นกำหนดตามสมการที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบและความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (4.1)$$

#### 4.2.2 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่

อุปกรณ์หลักในการสร้างและรับสัญญาณเพื่อทำการทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่นั้นคือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จัดการเกี่ยวกับการทดสอบทั้งหมดโดยสัญญาณที่ใช้ตรวจสอบนั้นจะเป็นกลุ่มของสัญญาณแถบแคบรูปไซน์ (Sinusoid) ซึ่งทำการกวาดตลอดย่านความถี่ที่ต้องพิจารณาประกอบกับการใช้สายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบแคบ โดยในการจำลองช่องสัญญาณแบบระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนี้สามารถที่จะทำได้ในส่วนของ การประมวลผลข้อมูล และเมื่อใช้วิธีการทดสอบสัญญาณในโดเมนความถี่ช่วงเวลาของช่องสัญญาณที่ทำการทดสอบต้องถูกกำหนดให้คงที่ เพื่อรักษาเงื่อนไขของช่องสัญญาณในช่วงการกวาดความถี่โดยที่ค่าสูงสุดของเวลาการกวาดความถี่ถูกจำกัดโดยเวลาร่วมนัย (Coherence time) ของช่องสัญญาณ ถ้าเวลาการกวาดนานกว่าเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณแล้วช่องสัญญาณอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเวลาในการกวาดความถี่ ประสิทธิภาพของการทดสอบในโดเมนความถี่นั้นจะถูกกำหนดโดยค่าสูงสุดของเวลา

ประวิงของช่องสัญญาณซึ่งขอบเขตด้านบนของเวลาการประวิงที่ตรวจพบสามารถกำหนดโดยจำนวนจุดของความถี่ที่ใช้ในการกวาดในแต่ละครั้งต่อโดยใช้แบนด์วิดท์ ซึ่งสามารถนิยามดังสมการนี้

$$\tau_{\max} = \frac{(N_{\text{smp}} - 1)}{B} \quad (4.2)$$

โดยที่  $N_{\text{smp}}$  คือ จำนวนจุดของความถี่  
 $B$  คือ แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

ในการที่จะทำการทดสอบสัญญาณโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์นั้นผลที่ได้จากการทดสอบคือ ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณหรือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในโดเมนของความถี่



รูปที่ 4.3 การวัดช่องสัญญาณการสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลองวิจัย

#### 4.3.1 สายอากาศที่ใช้ในการทดลองวิจัย

ในการรับส่งสัญญาณไร้สายนั้นสิ่งที่ขาดไม่ได้เลยและมีความสำคัญอย่างหนึ่งคือ สายอากาศ (Antenna) ซึ่งจะติดอยู่กับเครื่องส่งและเครื่องรับมีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแพร่กระจายคลื่นสัญญาณผ่านออกไปยังสายอากาศทางด้านรับที่อยู่กับเครื่องรับแล้วเปลี่ยนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าตามเดิม โดยสายอากาศที่มีประสิทธิภาพที่ดีนั้นสามารถรู้ได้จากพารามิเตอร์หลักๆ เช่น สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficient;  $S_{11}$ ), อัตราส่วนคลื่นนิ่งและแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และอัตราขยายของสายอากาศ (Antenna gain)

#### สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

เป็นพารามิเตอร์ที่ดูว่าสายอากาศมีการแมตซ์ซึ่งระหว่างเครื่องส่งกับสายอากาศกันหรือไม่ ซึ่งมีหน่วยอยู่ในรูปเดซิเบลและเป็นการเปรียบเทียบอัตรากำลังงานที่สะท้อนกลับจากตัวสายอากาศกับกำลังงานที่ป้อนเข้าสู่เครื่องส่ง กรณีที่มีการแมตซ์ซึ่งต่อกันทำให้ความสัมพันธ์ของค่า  $VSWR = 1$  ในทางอุดมคติ ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากมากและสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ต่อกันได้เป็น

$$S_{11} (dB) = -20 \log \left( \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right) \quad (4.3)$$

โดยที่ความสัมพันธ์ของ VSWR กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $S_{11}$  เป็น

$$VSWR = \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} \quad (4.4)$$

ในการทดลองวัดนี้ได้เลือกใช้สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปทั้งสายอากาศทางด้านส่ง (Tx) และสายอากาศทางด้านรับ (Rx) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) เป็นแบบมีทิศทาง (Directional) และเป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้ในระบบเทคโนโลยีการระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 2.3 GHz ถึง 2.6 GHz ตามข้อกำหนดย่านความถี่การใช้งานของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ทาง ISO 1800-4 wherenet (ANSI 371.1) โดยแบนด์วิดธ์ของสายอากาศนั้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$BW(\%) = \frac{100(f_H - f_L)}{f_c} \quad (4.5)$$

โดยที่  $f_H$  คือ ความถี่สูงสุดของย่าน  
 $f_L$  คือ ความถี่ต่ำสุดของย่าน  
 $f_c$  คือ ความถี่กลางของย่าน

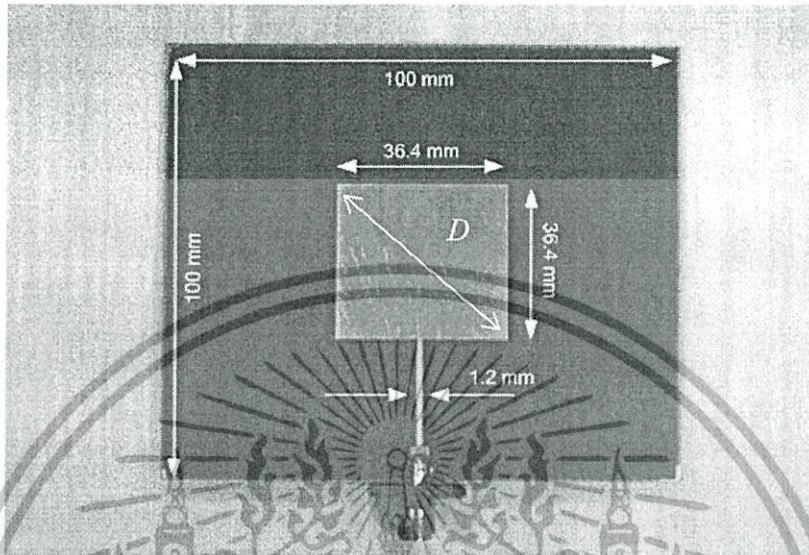
#### 4.3.1.1 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

ข้อดีของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศชนิดอื่นที่ใช้ย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยมีความถี่ใช้งานอยู่ที่ช่วง 100-MHz – 50 GHz

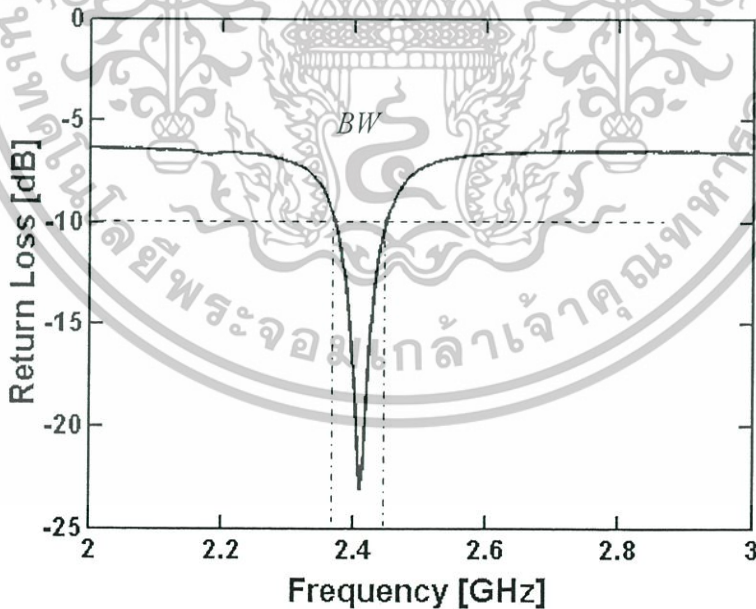
- น้ำหนักเบา, ขนาดเล็ก, โครงสร้างเป็นแบบราบ ซึ่งสามารถทำเป็นรูปต่างๆ ได้ง่าย
- ราคาถูก, กระบวนการสร้างไม่ยุ่งยาก
- มีลักษณะบาง, ทำให้ติดตั้งเข้ากับยานพาหนะได้ง่าย
- ง่ายต่อการติดตั้งบนจรวดและดาวเทียม
- สายอากาศมีการแผ่กระจายตามแนวภาคตัดขวางน้อย
- สามารถทำให้มีการโพรงไรซ์แบบเชิงเส้นหรือวงกลมได้ง่ายเพียงแค่เปลี่ยนตำแหน่งของจุดป้อน
- สามารถทำเป็นสายอากาศสองความถี่ได้ง่าย
- ไม่ต้องใช้โพรงด้านหลัง
- ไมโครสตริปสามารถเชื่อมต่อเข้ากับการออกแบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์โซลิดสเตต (Solid state) เช่น วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรขยาย สวิตช์ ตัวเลื่อนเฟสได้ง่าย
- สามารถสร้างให้มีการป้อนและการแมทซ์อิมพีแดนซ์ได้พร้อมๆกัน ในโครงสร้างสายอากาศ

บ่อยครั้งที่มักเรียกสายอากาศไมโครสตริปว่า สายอากาศแผ่น (Patch antenna) โดยส่วนที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่นและส่วนที่ใช้ในการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศจะอยู่บนวัสดุฐานรองเดียวกัน ส่วนที่ใช้ในการแผ่กระจายคลื่นหรือแพ็ทช์นี้อาจมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นแผ่นบางๆหรือไดโพล วงกลม วงรี สามเหลี่ยม หรือรูปร่างอื่นๆ [9]-[10]

#### 4.3.2 ลักษณะของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.4 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz



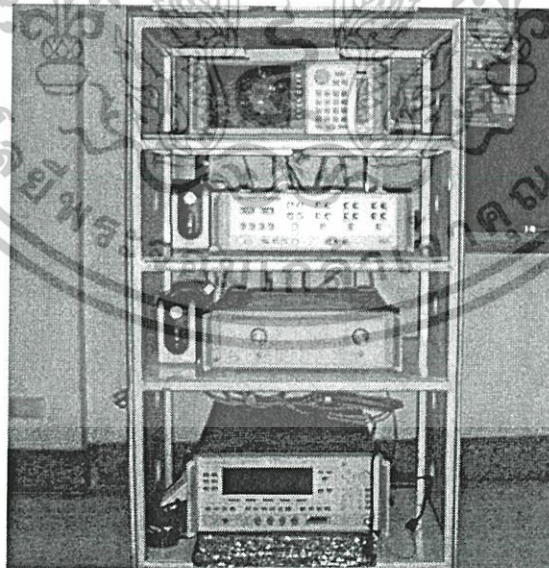
รูปที่ 4.5  $S_{11}$  ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในรูปที่ 4.5 นั้น แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ เป็นคุณลักษณะของสายอากาศ แผ่นแบบไมโครสตริป โดยตามมาตรฐานนั้นสายอากาศที่ดีควรที่จะมีค่านี้นี้ต่ำกว่า  $-10$  dB ในช่วงความถี่ ตั้งแต่  $2.3$  GHz –  $2.6$  GHz ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปนี้เหมาะสมที่จะนำมาทำการมาทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

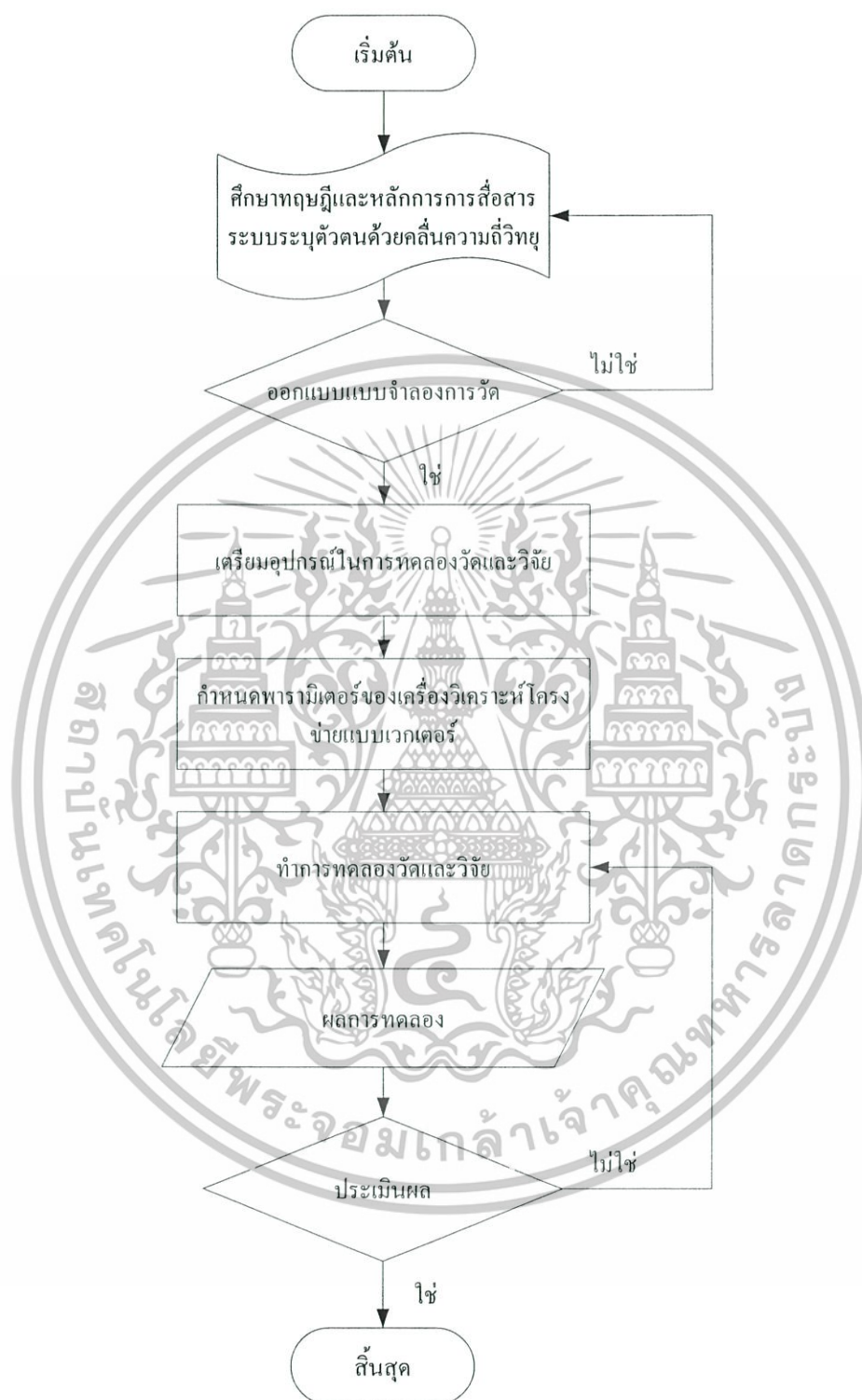
#### 4.3.3 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

องค์ประกอบสำคัญในการทดสอบช่องสัญญาณการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ นั้นอุปกรณ์หลักที่สำคัญนอกเหนือจากสายอากาศแล้วคือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ รุ่น HP-8510C ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-Parameter test set) รุ่น HP-8514B และเครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesized sweeper) รุ่น HP-83620A เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบช่องสัญญาณสามารถแสดงดังรูปที่ 4.6 และจำเป็นต้องควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ซึ่งเชื่อมต่อผ่านช่องสื่อสารแบบ GPIB (General purpose interface bus) เพื่อทำการควบคุมเครื่องพร้อมทำการบันทึกผลการตอบสนองของช่องสัญญาณที่ทำการทดสอบได้ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์นี้มีพอร์ตการใช้งานอยู่สองพอร์ตด้วยกันคือ พอร์ตหนึ่งต่ออยู่กับสายอากาศส่งและพอร์ตสองต่ออยู่กับสายอากาศรับแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.6 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 โฟลว์ชาร์ตของขั้นตอนการทดลองวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

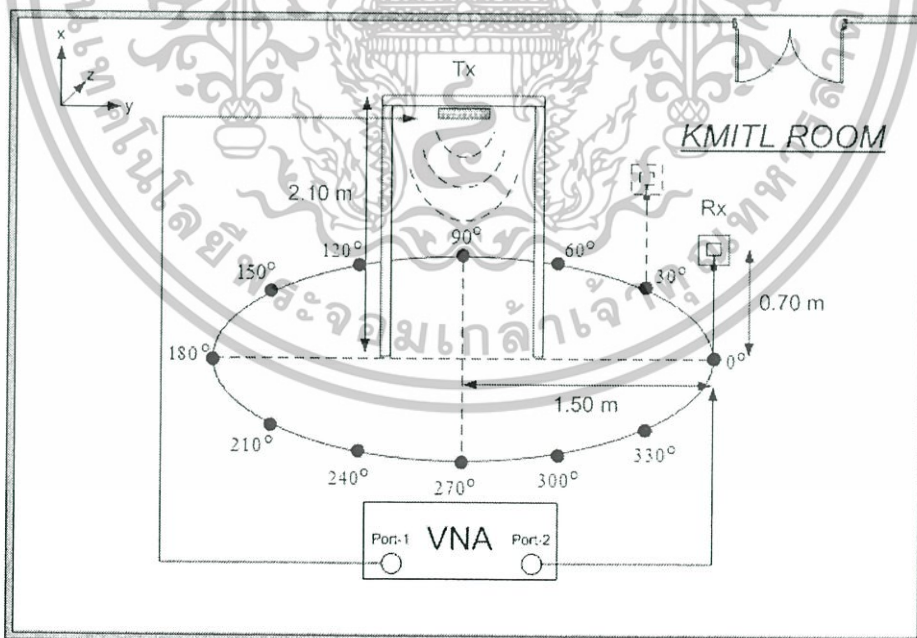
## 4.4 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น

### 4.4.1 แบบจำลองการวัดที่ 1 คุณลักษณะช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร

เนื่องจากระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุมีการใช้งานในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารในปัจจุบันเป็นอย่างมากและสภาวะแวดล้อมนี้เป็นส่วนปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณการสื่อสารเป็นอย่างมาก รวมถึงประสิทธิภาพของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ หากนำไปใช้งานควรคำนึงถึงสภาวะแวดล้อมด้วยเช่นกัน ดังนั้น จึงทำการศึกษาทดลองและวิจัยจากแบบจำลองตามสมมุติฐานของการใช้งานภายในอาคารของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุซึ่งสามารถกล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.4.1.1 แบบจำลองการวัดรอบทิศทาง

เป็นการสมมุติฐานของการใช้งานในลักษณะที่มีการเคลื่อนที่ที่เข้าหาประตูแบบรอบทิศทางตามระยะทางที่กำหนดของการวัด โดยมีสายอากาศส่งเป็นแผ่นแบบไมโครสตริปในการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุในลักษณะติดกับประตูทางเข้าและใช้สายอากาศรับเป็นแผ่นแบบไมโครสตริปที่มีคุณลักษณะของสายอากาศเช่นเดียวกันทำการเคลื่อนที่แบบรอบทิศทาง ดังแสดงตามรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองวัดแบบจำลองรอบทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบจำลองที่ 1-1

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	2-3 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
พิสัยพลวัตกำลังงาน VNA	80 dB
ความสูงของสายอากาศส่ง	1.50 เมตร
ความสูงของสายอากาศรับ	0.70 เมตร
ระยะห่างของสายอากาศส่ง-รับ	1.50 เมตร
มุมของสายอากาศรับ	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 และ 360 องศา
สายอากาศที่ใช้	แผ่นแบบไมโครสตริป

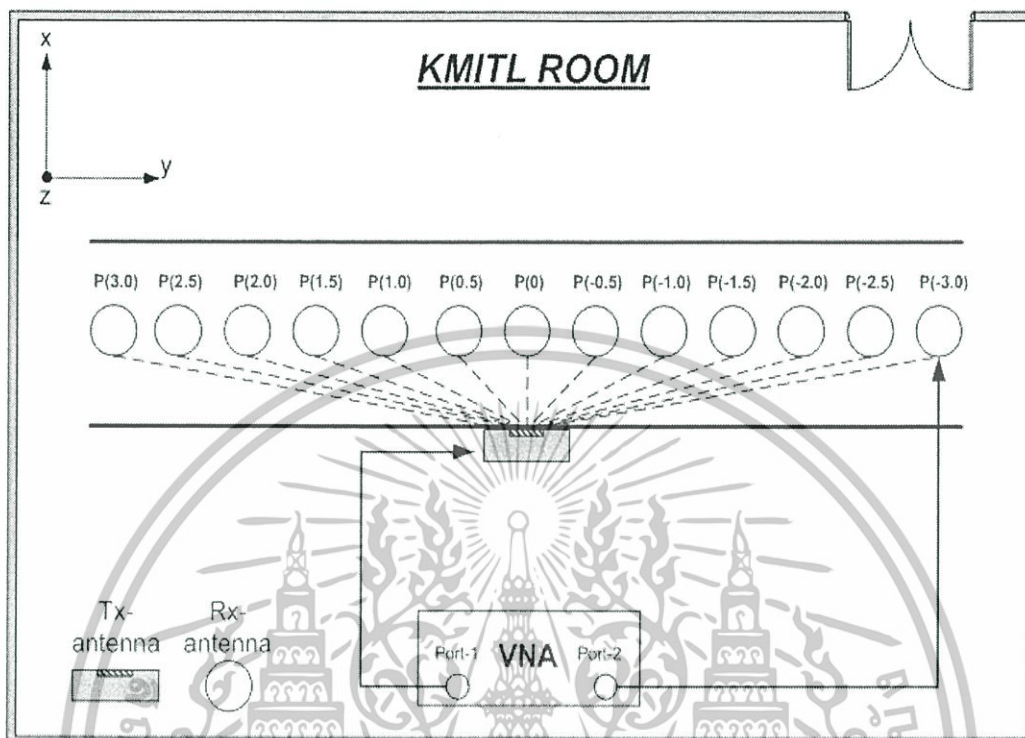
#### 4.4.1.2 แบบจำลองการวัดในระยะทางตรง

เป็นการสมมุติฐานของการใช้งานระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบควบคุมการเข้าออก (Access control) ภายในอาคารอย่างเช่น การใช้งานในห้องสมุดและอื่นๆ ซึ่งแบบจำลองนี้ทำการทดลองวิจัยด้วยสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปทั้งส่งและรับ โดยกำหนดสายอากาศส่งให้คงที่และเคลื่อนที่สายอากาศรับเปรียบเสมือนราวกับว่าเป็นวัตถุหรือบุคคลผ่านเข้าออกทั้งหมด 13 จุด ดังแสดงดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบจำลองที่ 1-2

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	2-3 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
พิสัยพลวัตกำลังงาน VNA	80 dB
ความสูงของสายอากาศส่ง-รับ	1.50 เมตร
ตำแหน่งของสายอากาศรับ	P(-3.0), P(-2.5), P(-2.0), P(-1.5), P(-1.0), P(-0.5), P(0), P(0.5), P(1.0), P(1.5), P(2.0), P(2.5), P(3.0)
สายอากาศที่ใช้	แผ่นแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองวัดแบบจำลองระยะทางตรง

ตารางที่ 4.3 แสดงระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ

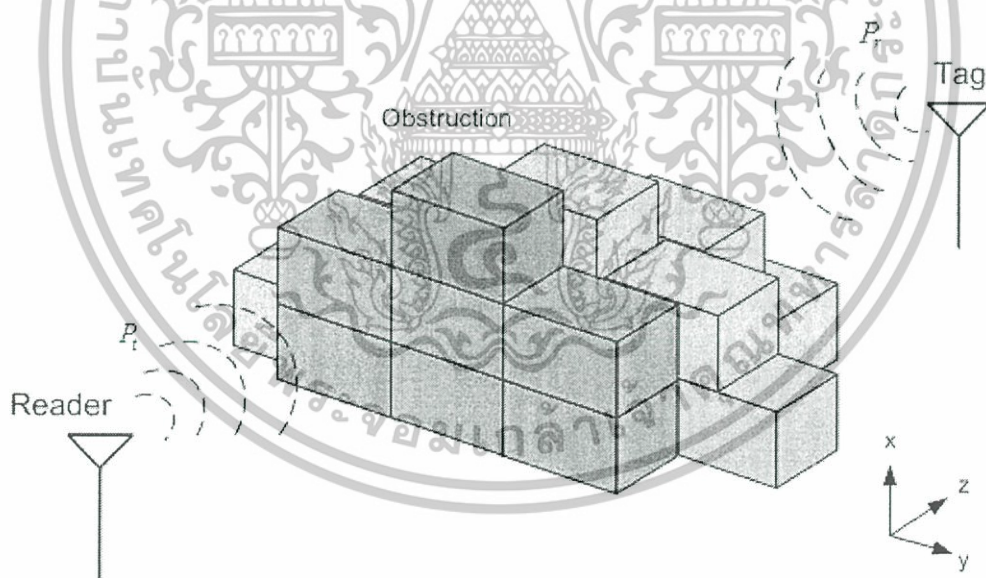
ตำแหน่ง P0	ระยะทางระหว่าง Tx-Rx (เมตร)
-3.0 และ 3.0	3.53 เมตร
-2.5 และ 2.5	3.15 เมตร
-2.0 และ 2.0	2.87 เมตร
-1.5 และ 1.5	2.56 เมตร
-1.0 และ 1.0	2.17 เมตร
-0.5 และ 0.5	1.83 เมตร
0	1.50 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

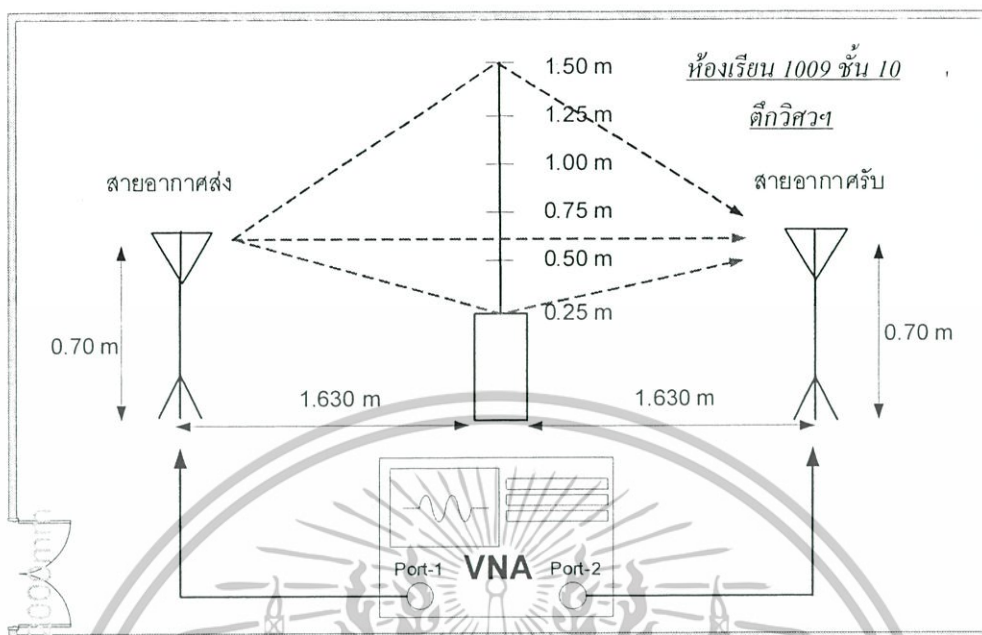
#### 4.4.2 แบบจำลองการวัดที่ 2 คุณลักษณะช่องสัญญาณการแพร่กระจายจากการเลี้ยวเบนของคลื่น

กรณีนี้เราคิดว่าจากทฤษฎีและหลักการในบทที่ 3 ทำให้เกิดสมมุติฐานในการที่จะทดลองวิจัยช่องสัญญาณการแพร่กระจายจากการเลี้ยวเบนของคลื่นซึ่งระบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุที่มีการใช้งานหลากหลายแอปพลิเคชันและสิ่งกีดขวางที่ส่งผลกระทบต่อการสื่อสาร อย่างเช่น คน, กำแพง, โຕ้ะ, หรือกล่องต่างๆ ที่ใช้ระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุมาใช้งาน ดังแสดงแบบจำลองการใช้งานในรูปที่ 4.10 จากทฤษฎีของการเลี้ยวเบนแบบไนไฟเอคค์ ทำให้เรารู้ว่าตัวแปรที่สำคัญคือ ความสูงของสิ่งกีดขวาง ซึ่งในการทดลองนี้เราพิจารณาความสูงของตัวกลางหรือสิ่งกีดขวางกรณีที่มีความสูงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนบดบังการสื่อสารในระดับสายตาระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับ

แบบจำลองการทดลองการวัดช่องสัญญาณการเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุซึ่งทำการทดสอบด้วยสถานะแวดล้อมภายในอาคาร และแบบการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งกับด้านรับห่างกัน 3.26 เมตร ในระยะทางอ้างอิงของสนามไกล  $d_0$  ที่ 1.63 เมตร



รูปที่ 4.10 สมมุติฐานการเลี้ยวเบนของคลื่นในระบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ



รูปที่ 4.11 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากการเดินบน

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบจำลองที่ 2

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	2-3 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
พิสัยพลวัตกำลังงาน VNA	80 dB
โพลาริเซชันของสายอากาศส่ง-รับ	แนวตั้ง
ระยะห่างของ $d_1$ และ $d_2$	1.63 เมตร
ความสูงของสิ่งกีดขวาง	0.25 เมตร, 0.50 เมตร, 0.75 เมตร, 1.00 เมตร, 1.25 เมตร และ 1.50 เมตร
ความสูงของสายอากาศส่ง-รับ	0.70 เมตร
สายอากาศที่ใช้	แผ่นแบบไมโครสตริบ

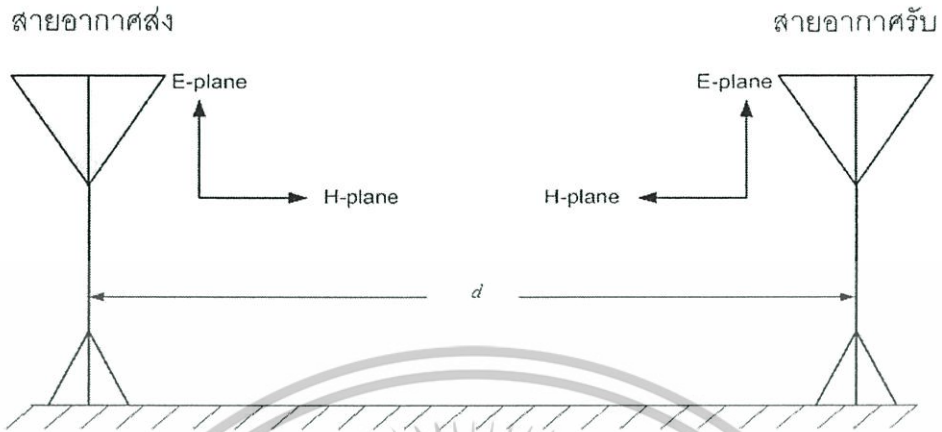
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 รัศมีระยะของเฟรสเนลโซน  $r_n$

$h$ (m)	$\Delta$ (m)	$r_n$ (m)
0.15	0.0138	0.1840
0.40	0.0982	0.4909
0.65	0.2592	0.7579
0.90	0.4969	1.1040

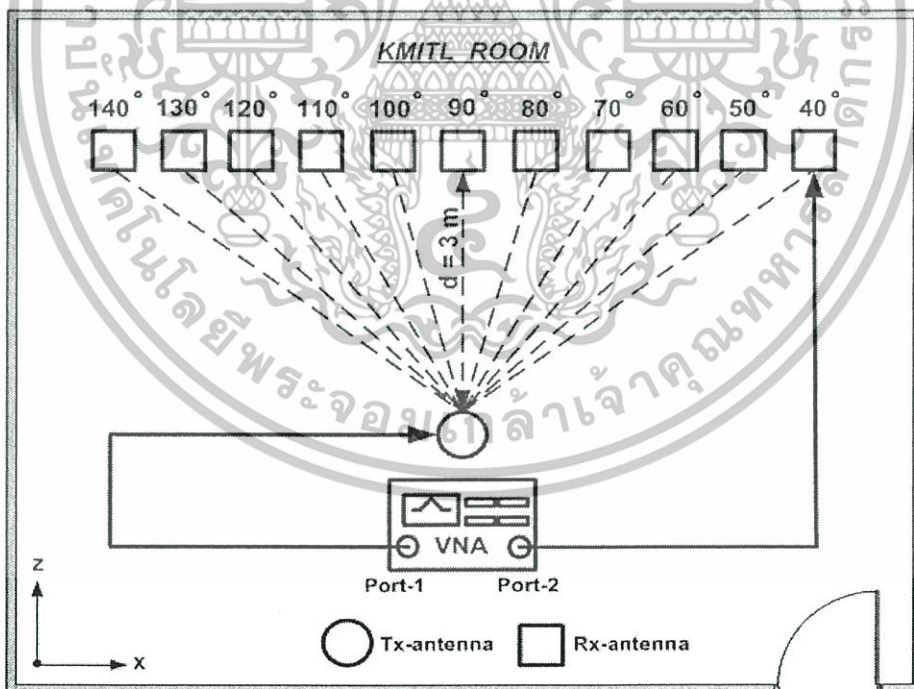
#### 4.4.3 แบบจำลองการวัดที่ 3 คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากการโพลาริเซชันของสายอากาศ

เนื่องจากสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานของเครื่องอ่าน (Reader) หรือเครื่องรับ-ส่ง (Tag) ในเทคโนโลยีระบบตัวตนด้วยความถี่วิทยุเป็นอย่างมากด้วยข้อดีหลากหลายประการต่างๆ และเนื่องด้วยสายอากาศชนิดนี้สามารถออกแบบให้มีการโพลาริเซชันของการแพร่กระจายคลื่นได้อย่างง่าย ซึ่งในกรณีออกแบบเป็นโพลาริเซชันแบบเชิงเส้นสามารถออกแบบให้ฟีดป้อน (Feed) ได้ทั้งแนวตั้ง (Vertical) และแนวนอน (Horizontal) โดยไม่ต้องสลับสายอากาศในการวัด ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีอีกอย่างหนึ่งของสายอากาศชนิดนี้ ในการทดลองที่ 2 นี้ เนื่องจากเราได้ใช้หลักการวิเคราะห์การส่งผ่านของฟรีสในการทดลองและวิเคราะห์ ดังนั้น จากสมการที่ 3.22 ทำให้เราได้ทำการนำเสนอแบบจำลองการส่งผ่านการวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากการโพลาริเซชันของสายอากาศในกรณีแบบโพลาริเซชันแบบเดียวกัน (Co-polarization) และแบบต่างกัน (Cross-polarization) ระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ดังแสดงรูปแบบการจัดวางสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปของการวัดในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แบบจำลองการวัดโพลาไรเซชันของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริบ

แบบจำลองการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากการโพลาไรเซชันของสายอากาศสามารถแสดงดังรูป 4.13



รูปที่ 4.13 การจัดวางตำแหน่งในการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากการโพลาไรเซชันของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบจำลองที่ 3

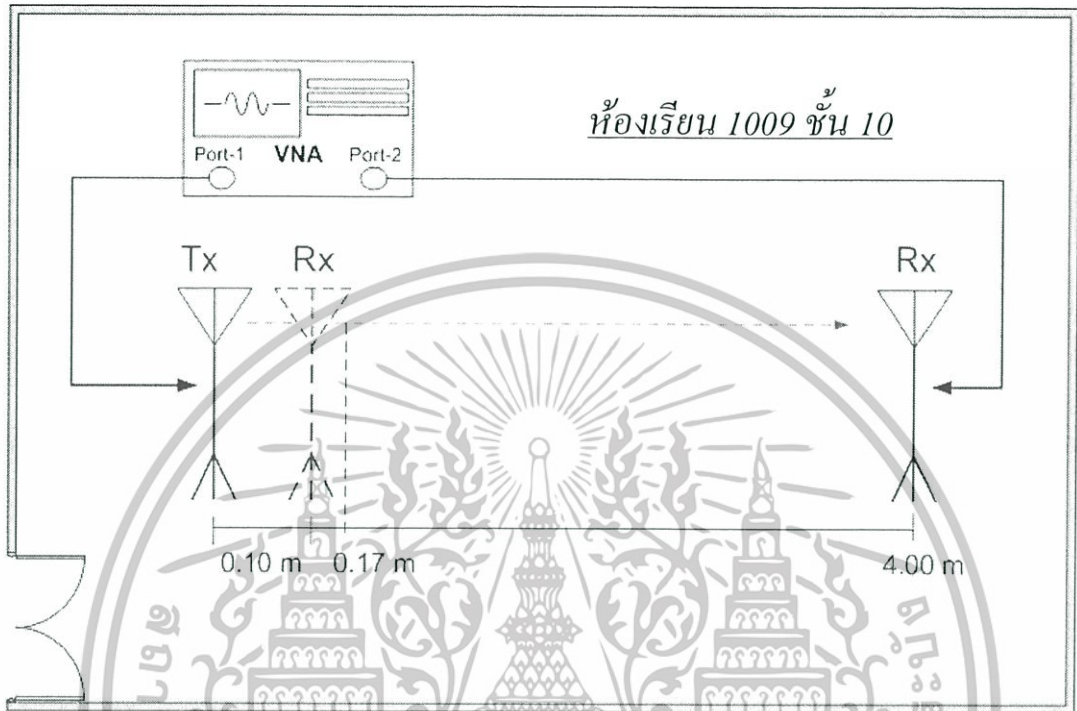
พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	2-3 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
พิสัยพลวัตกำลังงาน VNA	80 dB
โพลาริเซชันของสายอากาศส่ง-รับ	แนวตั้ง-แนวนอน
ความสูงของสายอากาศส่ง-รับ	1.50 เมตร
มุมของสายอากาศรับ	40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 องศา
สายอากาศที่ใช้	แผ่นแบบ ไมโครสตริป

ตารางที่ 4.7 แสดงระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ

ตำแหน่งมุม ( $\theta$ )	ระยะทางระหว่าง Tx-Rx (เมตร)
40 และ 140	3.86
50 และ 130	3.71
60 และ 120	3.64
70 และ 110	3.59
80 และ 100	3.35
90	3.00

#### 4.4.4 แบบจำลองการวัดที่ 4 คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล (Near-Far field)

เนื่องจากระบบระบุตัวคนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนี้มีการใช้งานทั้งในสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล ซึ่งในย่านความถี่ไมโครเวฟถือได้ว่าอาศัยหลักการการแพร่กระจายคลื่นในการสื่อสารและพิจารณาในแถบสนามระยะไกล ดังนั้น หากเราต้องการพิจารณาในสนามระยะใกล้ คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในการสื่อสารจะมีผลอย่างไร ซึ่งจากทฤษฎีและหลักการคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นแบบ ไมโครสตริปนั้นเป็นสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทางและจะมีคุณลักษณะที่ดีในแถบสนามระยะไกล ในการทดลองนี้แบบจำลองการจัดวางการวัดตามรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การจัดวางตำแหน่งการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในสนามระยะใกล้และไกล

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแบบจำลองที่ 4

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	2-3 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
พิสัยพลวัตกำลังงาน VNA	80 dB
โพลาริเซชันของสายอากาศส่ง-รับ	แนวตั้ง
ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง-รับ	0.10, 0.20, 0.30, 0.60, 0.90, 1.20, 1.50, 1.80, 2.10, 2.40, 2.70, 3.00, 3.30, 3.60 และ 4.00 เมตร
สายอากาศที่ใช้	แผ่นแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนในการทดลองวัดช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบ ระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร (Indoor environment) ในรูปที่ 4.8, 4.9, 4.11, 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ การกำหนดแผนการทดลองและขั้นตอนทำการทดลองวิจัยให้คำนึงถึง ปัจจัยต่างๆ อันได้แก่ สถานที่ที่ทำการทดลองวิจัย ลักษณะในการจัดวางอุปกรณ์หรือแบบจำลองการ ทดสอบ สภาวะแวดล้อมรอบข้าง พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อให้สอดคล้องกับการนำไปใช้งาน จริงของเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนี้และให้ได้มาซึ่งผลงานวิจัยที่เชื่อถือได้ ในบทต่อไป จะได้กล่าวถึงรายละเอียดของผลการวัดและการทดสอบต่างๆ จากแบบจำลองในบทนี้



## บทที่ 5

# ผลการทดลองวิจัยช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น ระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

### 5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวัดแบบจำลองช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นตามสมมุติฐานการสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ซึ่งจากแบบจำลองการวิจัยทั้ง 4 แบบ ที่กล่าวถึงในบทที่ 4 จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองวัด และเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาวิเคราะห์คุณลักษณะของช่องสัญญาณหรือผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อช่องสัญญาณจากการแพร่กระจายคลื่นที่ทำให้ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนเปลี่ยนแปลงขึ้น และเพื่อศึกษาถึงการสูญเสียของการส่งผ่านช่องสัญญาณในอวกาศว่างซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการวิเคราะห์และออกแบบระบบการสื่อสารระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ กำถึงงานการประวิงเวลา สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และอัตราผิดพลาดของบิต ยังเป็นส่วนสำคัญเช่นกันที่จะนำมาวิเคราะห์ผลการทดลองวิจัยอย่างเช่นเดียวกัน

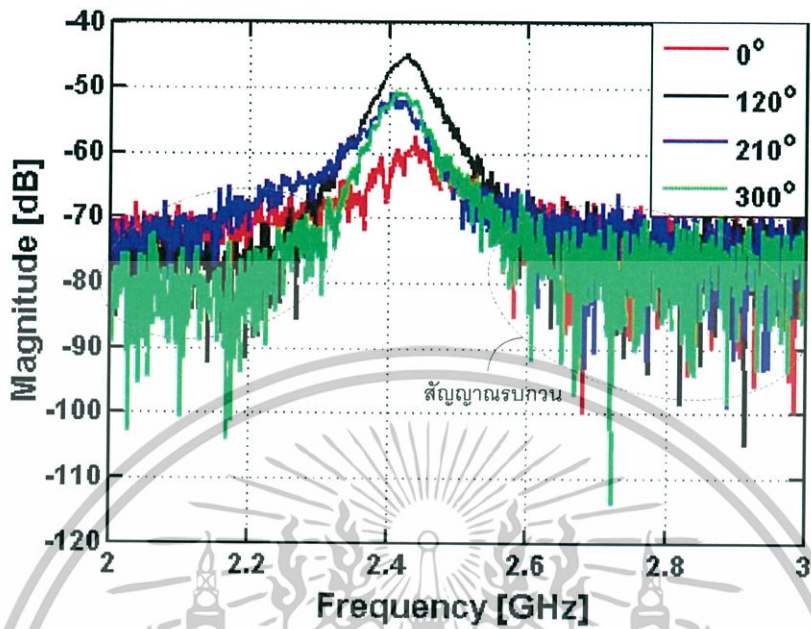
### 5.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์แบบจำลองการวิจัยวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น

#### 5.2.1 แบบจำลองการวัดที่ 1-1

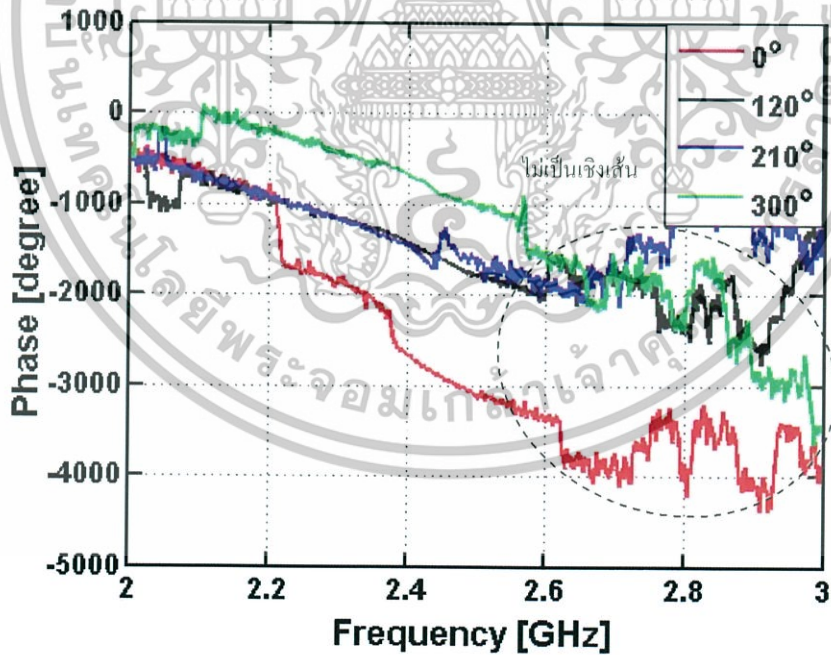
##### 5.2.1.1 ผลการวัดขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอน

จากการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุของแบบจำลองที่ 1-1 ผลของขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณแสดงดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ ซึ่งขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณแสดงตำแหน่งของมุมสายอากาศรับมา 4 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งมุม 120 องศา มีผลกระทบของช่องสัญญาณน้อยสุดและมีขนาดสูงสุด ณ แบนด์วิดธ์ความถี่ของสายอากาศที่ 2.4 GHz และความถี่นอกเหนือจากแบนด์วิดธ์ของสายอากาศนั้นมีการรบกวนของสัญญาณเกิดขึ้นมาก เช่นเดียวกับกับเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนมีความเป็นเชิงเส้น ณ ช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศและมีการรบกวนเฟสมากเมื่อเป็นช่วงความถี่นอกเหนือจากแบนด์วิดธ์ของสายอากาศ ซึ่งเป็นผลกระทบของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทั้งทางขนาดและเฟสของระบบการสื่อสารระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



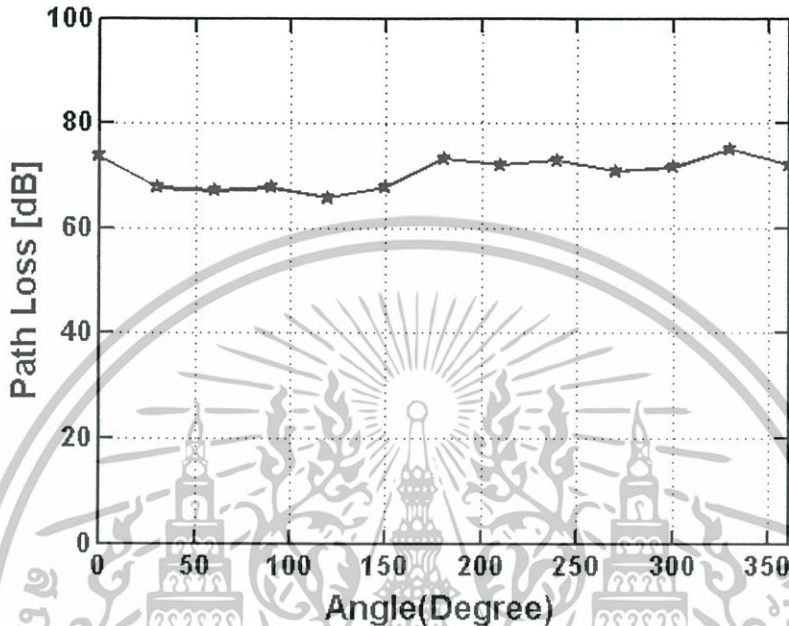
รูปที่ 5.1 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ



รูปที่ 5.2 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.1.2 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี



รูปที่ 5.3 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

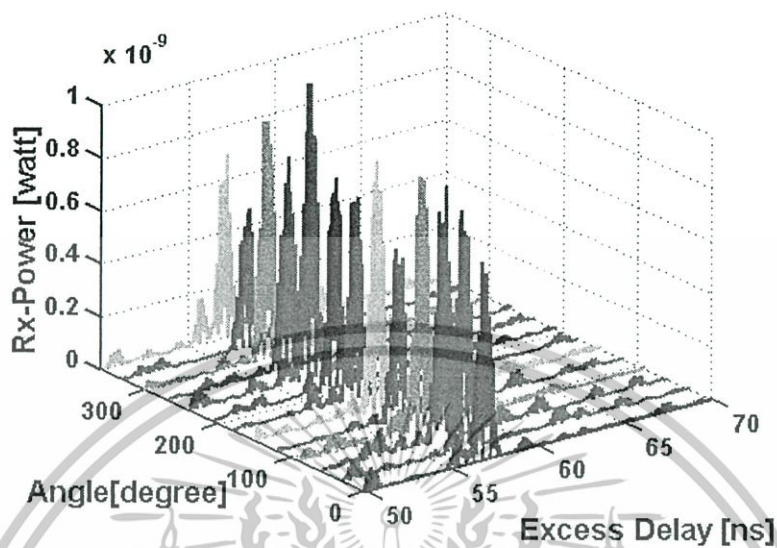
จากรูปที่ 5.3 แสดงกำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีในแต่ละมุมของสายอากาศรับแบบรอบทิศทางจากแบบจำลองซึ่งตำแหน่งที่มีกำลังงานการสูญเสียสูงคือ มุม 0 องศา, 180 องศา และ 330 องศา และตำแหน่งมุมที่มีกำลังงานการสูญเสียต่ำสุดคือ มุม 120 องศา โดยทั้งหมดอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงภายในอาคาร ซึ่งสามารถแสดงค่าของกำลังงานการสูญเสียของแต่ละมุมได้ดังตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์กำลังงานการสูญเสียเฉลี่ย 70 dB เนื่องจากคุณลักษณะของแบบจำลองการวัดของสายอากาศส่งและสายอากาศรับแนวของการรับคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปส่งผลต่อการเกิดการสูญเสีย

ตารางที่ 5.1 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี

ตำแหน่งมุมของสายอากาศรับ ( $\theta$ )	กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี (dB)
0	72.45
30	69.63
60	69.12
90	69.32
120	66.10
150	69.34
180	72.53
210	70.62
240	71.54
270	69.79
300	70.12
330	72.51
360	70.33

### 5.2.1.3 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา

ผลของภาพตัดขวางการประวิงเวลาของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุตั้งแต่คว่ำมีวิถีของคลื่นที่เดินทางมาถึงทางด้านรับนั้นหลายวิถีของแต่ละมุมของสายอากาศรับแต่วิถีแรกที่คลื่นเดินทางมาถึงนั้นสามารถแสดงถึงกำลังงานของสัญญาณที่สายอากาศรับ โดยคลื่นหลายวิถีสามารถส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสัญญาณที่เดินทางมาสู่สายอากาศรับ โดยค่าของการประวิงเวลาของกำลังงานที่มาถึงสายอากาศรับอยู่ในช่วง 54-58 ns และกำลังงานของสัญญาณที่รับได้อยู่ที่ระดับ  $1 \times 10^{-9}$  W ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ภายใต้อาการแวดล้อมจริงภายในอาคาร และแสดงค่าภาพตัดขวางการประวิงเวลาดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.4 ภาพตัดขวางการประวิงเวลาของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

ตารางที่ 5.2 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา

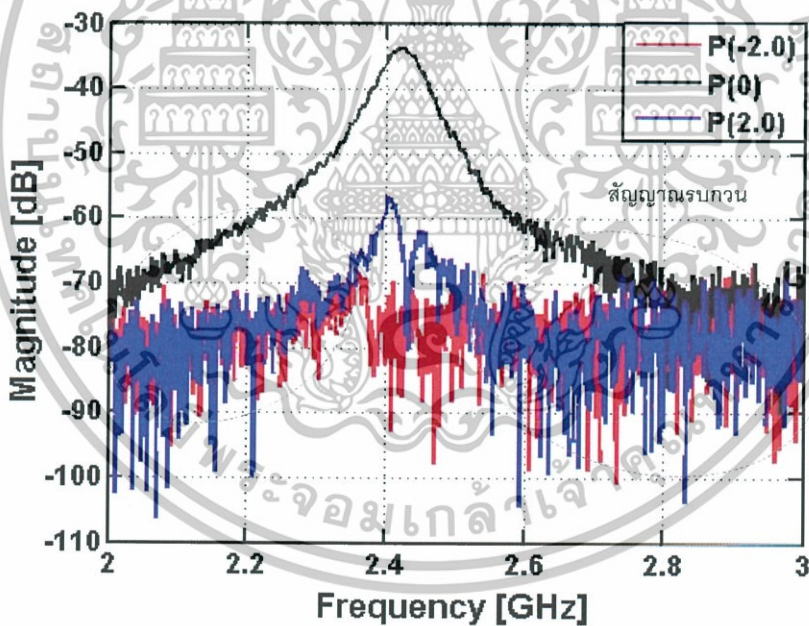
ตำแหน่งมุมของสายอากาศรับ ( $\theta$ )	ระดับกำลังงานที่รับ ( $10^{-9}$ W)	การประวิงเวลา (ns)
0	0.621	54.36
30	0.792	56.23
60	0.826	55.47
90	0.873	54.27
120	0.611	55.78
150	0.863	55.25
180	0.654	55.16
210	0.647	55.78
240	1.212	54.37
270	0.787	55.54
300	0.879	55.85
330	0.588	55.24
360	0.765	54.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

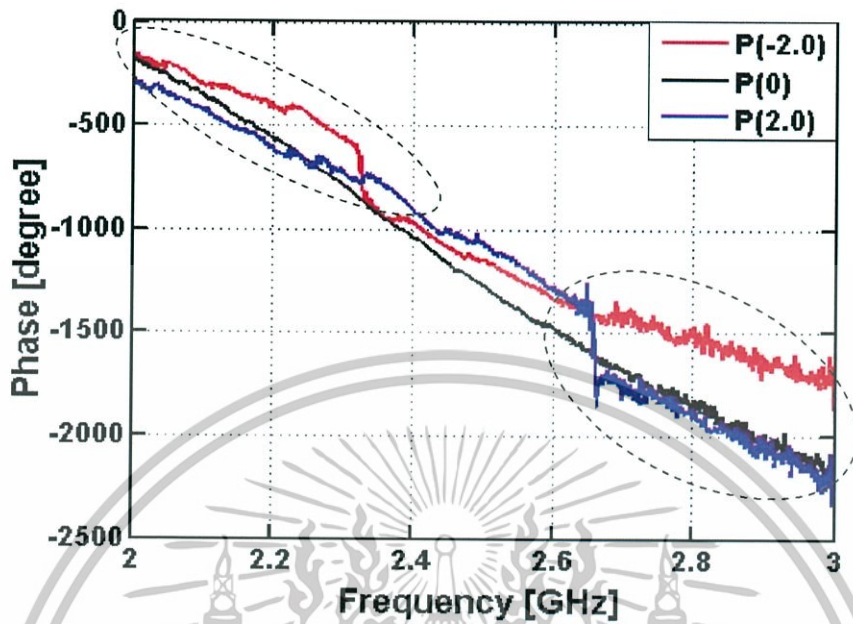
## 5.2.2 แบบจำลองการวัดที่ 1-2

### 5.2.2.1 ผลการวัดขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอน

โดยผลของการวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุทั้งทางขนาดและเฟส ซึ่งพิจารณาตำแหน่งที่ P(-2.0), P(0) และ P(2.0) เป็นกรณีตัวอย่างของขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ โดย ณ ตำแหน่งของ P(-2.0) และ P(2.0) ขนาดของช่องสัญญาณมีการรบกวนของสัญญาณมากเป็นผลให้บริเวณช่วงแบนด์วิดท์ความถี่ของสายอากาศมีการลดทอนทางขนาดเช่นกัน ในขณะที่ตำแหน่งของจุด P(0) ไม่มีการรบกวนของสัญญาณเข้ามา ณ ช่วงแบนด์วิดท์ความถี่ของสายอากาศส่วนความถี่นอกเหนือจากแบนด์วิดท์ของสายอากาศนั้นมีการสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเช่นกัน ดังแสดงดังรูปที่ 5.5 และเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณไม่มีความเป็นเชิงเส้นเนื่องจากสัญญาณรบกวนทั้งตำแหน่งของ P(-2.0) และ P(2.0) เช่นเดียวกัน ต่างกับตำแหน่งของ P(0) ที่เฟสมีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงแบนด์วิดท์ของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 5.6

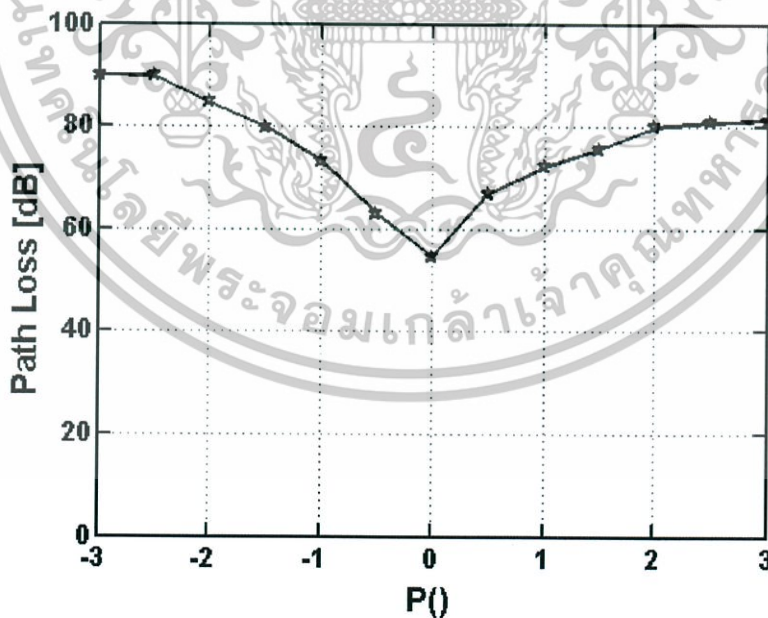


รูปที่ 5.5 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ



รูปที่ 5.6 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

#### 5.2.2.2 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี



รูปที่ 5.7 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

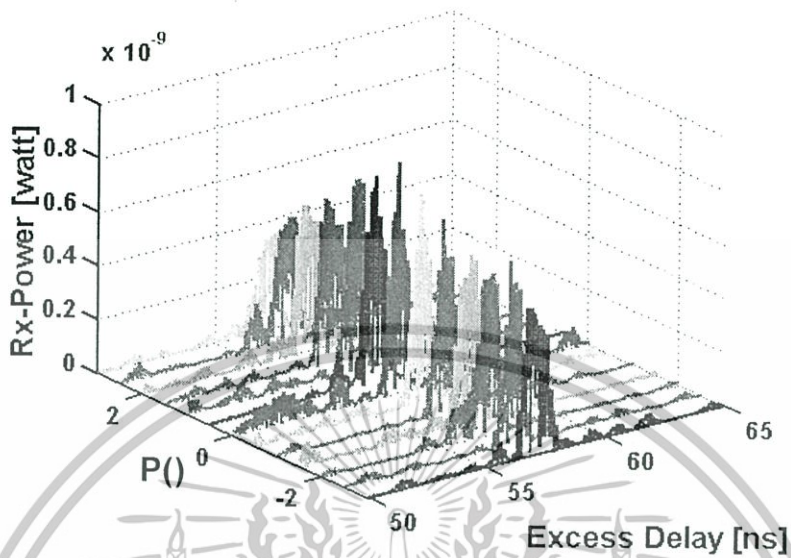
จากรูปที่ 5.7 กำลังงานของการสูญเสียเชิงวิถีจากการแพร่กระจายคลื่นวิทยุซึ่งกำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีจะแปรผันตามระยะทางกำลังสอง โดยจุดของ P(0) มีกำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีต่ำสุดเนื่องจากระยะห่างของสายอากาศทั้งสอง และแสดงค่าของกำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี

ตำแหน่งของสายอากาศรับ P0	กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี (dB)
-3.0	90.12
-2.5	90.11
-2.0	83.56
-1.5	80.02
-1.0	73.53
-0.5	62.23
0	57.32
0.5	68.65
1.0	76.21
1.5	78.15
2.0	80.78
2.5	81.32
3.0	81.75

### 5.2.2.3 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา

ภาพตัดขวางการประวิงเวลาของการวัดแสดงดังรูปที่ 5.8 ซึ่งระดับของกำลังงานทางด้านรับอยู่ที่  $1 \times 10^{-9}$  W โดยกำลังงานจะลดลงเมื่อกำลังงานของการสูญเสียเชิงวิถีเพิ่มขึ้นจากการวัดผลสังเกตได้ว่ามีสัญญาณที่เดินทางมาถึงสายอากาศรับหลายวิถีเป็นผลมาจากคุณลักษณะของสภาวะแวดล้อมจริงภายในอาคารซึ่งคลื่นหลายวิถีนี้สามารถทำให้เกิดการเสริมกันหรือหักล้างกันกับวิถีแรกของคลื่นที่เดินทางมาถึงซึ่งทำให้เกิดการประวิงเวลาอยู่ในช่วง 55-58 ns และแสดงค่าภาพตัดขวางการประวิงเวลาโดยละเอียดดังตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.8 ภาพตัดขวางการประวิงเวลาของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

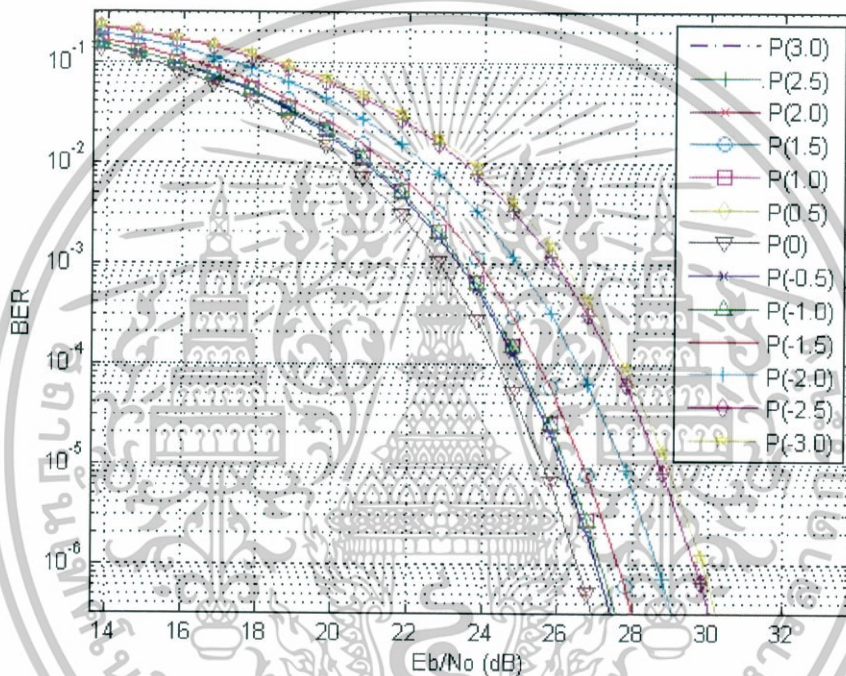
ตารางที่ 5.4 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา

ตำแหน่งของสายอากาศรับ $P(0)$	ระดับกำลังงานที่รับ ( $10^{-9}$ W)	การประวิงเวลา (ns)
-3.0	0.421	56.65
-2.5	0.532	56.23
-2.0	0.566	55.77
-1.5	0.613	57.21
-1.0	0.721	56.78
-0.5	0.783	56.54
0	0.854	56.16
0.5	0.787	55.77
1.0	0.722	55.47
1.5	0.637	56.88
2.0	0.589	56.02
2.5	0.502	55.34
3.0	0.405	56.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2.4 อัตราบิดผิดพลาด

โดยจากผลของการวัดช่องสัญญาณสามารถพิจารณาถึงอัตราบิดผิดพลาดของข้อมูล โดยตำแหน่งที่มีผลกระทบต่อช่องสัญญาณมากเป็นผลให้เกิดอัตราบิดผิดพลาดสูงตามไปด้วยและเนื่องจากเป็นระบบการสื่อสารแบบความถี่แถบแคบอัตราส่วนของกำลังงานต่อสัญญาณรบกวนจึงมากกว่า 20 dB ดังแสดงดังรูปที่ 5.9



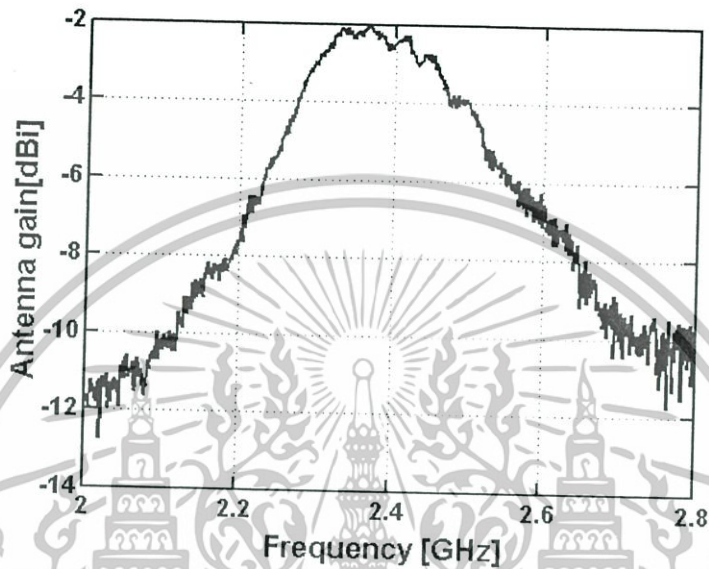
รูปที่ 5.9 อัตราบิดผิดพลาด

### 5.2.3 แบบจำลองการวัดที่ 2

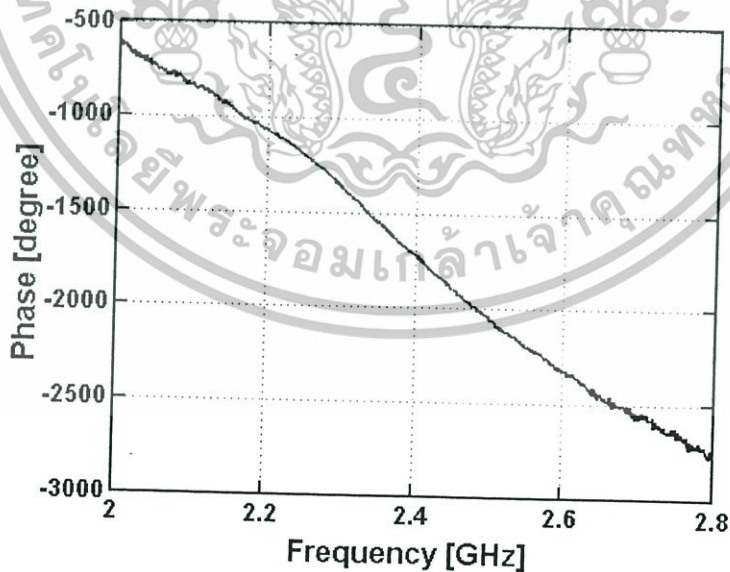
#### 5.2.3.1 ผลการวัดขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอน

ผลจากการวัดช่องสัญญาณการถ่ายโอนตามสมมุติฐานของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวต้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนในโดเมนความถี่ของช่องสัญญาณเกิดการรบกวนขึ้นทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเฟสและขนาดลดลงซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศสังเกตุว่าสายอากาศนั้นมีคุณสมบัติการแพร่กระจายที่ดี ณ ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นความถี่ของสายอากาศ ส่วนความถี่ที่นอกเหนือจากแบนด์วิธของสายอากาศ นั้นก็จะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น เช่นเดียวกับเฟสที่มีคุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นในช่วงความถี่ของสายอากาศ

เช่นเดียวกัน ดังแสดงขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนสายอากาศส่งรูปที่ 5.10, 5.11 ตามลำดับ และขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณรูปที่ 5.12, 5.13 ตามลำดับ

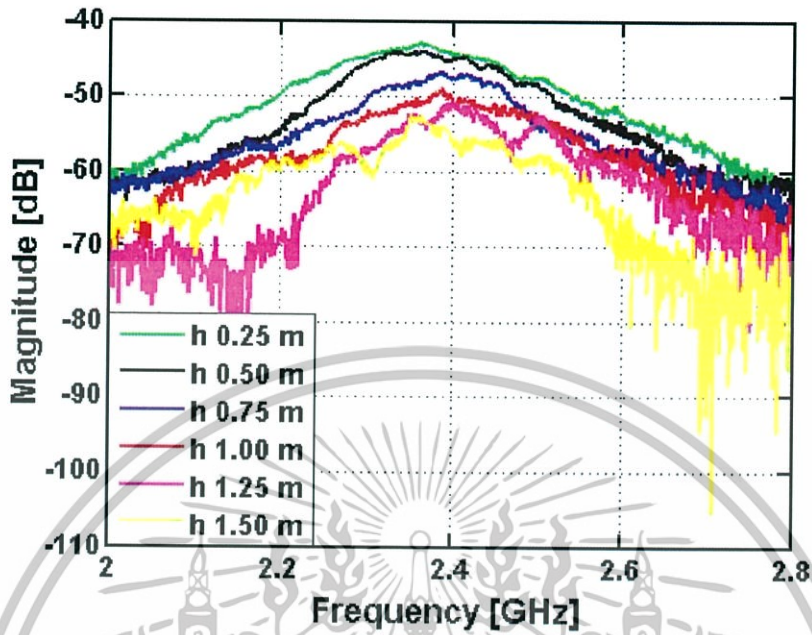


รูปที่ 5.10 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนสายอากาศส่งในแบบจำลองการเดี่ยวเบนคลื่นวิทยุ

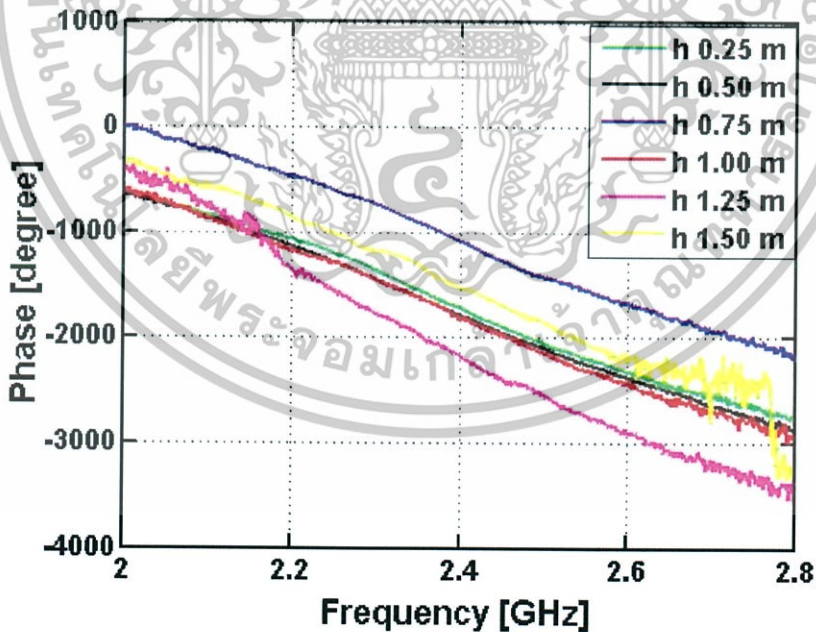


รูปที่ 5.11 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนสายอากาศส่งในแบบจำลองการเดี่ยวเบนคลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายจากการเดี่ยวเบนคลื่น

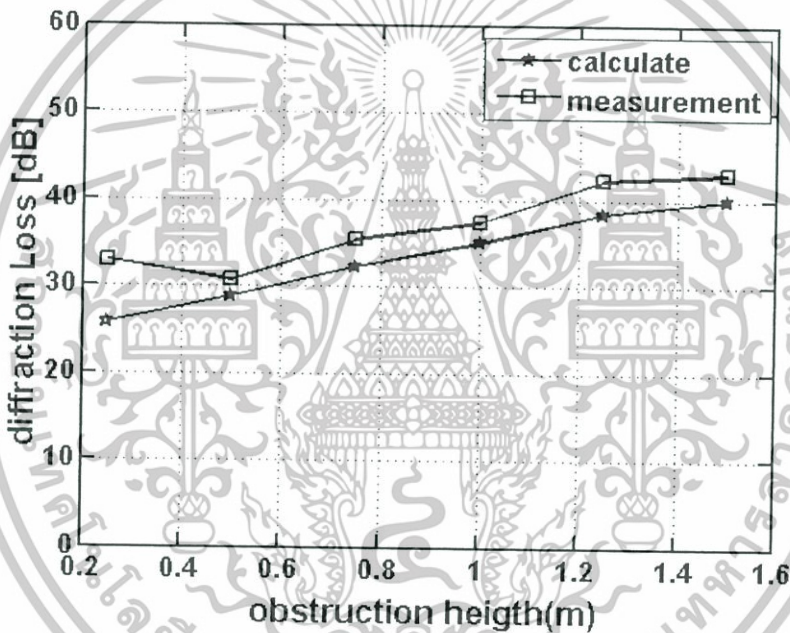


รูปที่ 5.13 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายจากการเดี่ยวเบนคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3.2 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี

จากรูปที่ 5.12, 5.13 ตามลำดับ ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณนั้นจะเปลี่ยนแปลงขนาดแอมพลิจูดลงขณะที่ความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นแบบขั้ววิถีในแนวระดับสายตา (Line of sight) ระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับ แต่เนื่องจากคุณลักษณะของสายอากาศใช้งานที่ความถี่ 2.4 GHz และเฟสของสายอากาศมีความเป็นเชิงเส้น เมื่อมีการบดบังคลื่นขึ้นทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นและสายอากาศทางด้านรับยังสามารถรับสัญญาณได้อยู่ทำให้เฟสของช่องสัญญาณยังมีความเป็นเชิงเส้น ณ ความถี่ของสายอากาศ



รูปที่ 5.14 กำลังงานการสูญเสียของช่องสัญญาณการเลี้ยวเบนของคลื่นจากการวัด

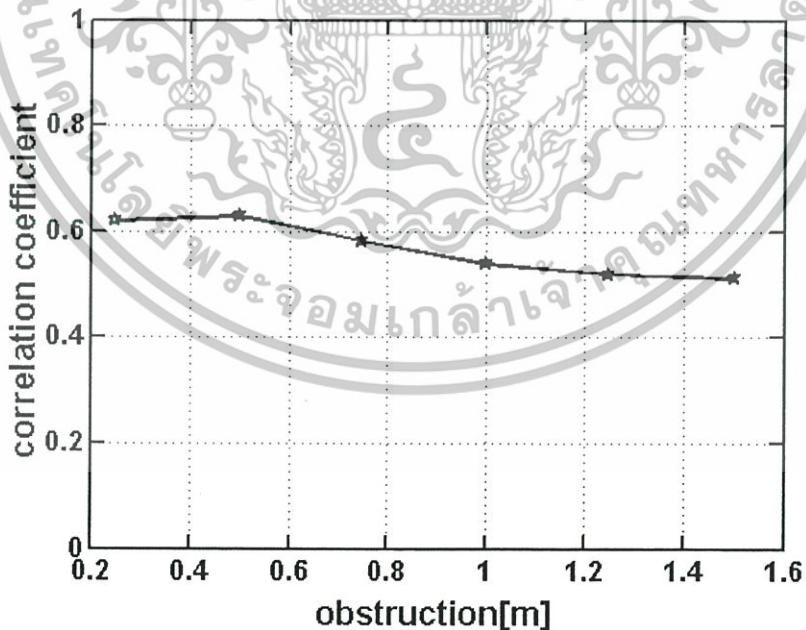
จากรูปที่ 5.14 นี้ สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับกำลังงานของคลื่นจะแปรผันกับระยะทางคือเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นโดยพื้นที่ของจุดที่เกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นตามทฤษฎีของไฮเกน พารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงคือ  $v$  เมื่อพารามิเตอร์นี้เพิ่มขึ้นส่งผลต่อกำลังการสูญเสียของการเลี้ยวเบนเพิ่มขึ้นด้วย สังเกตจากกราฟที่ได้จากการคำนวณซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าพารามิเตอร์นี้ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดก็สังเกตได้ว่ากำลังงานการสูญเสียจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งจากตำแหน่งแรกนั้นเราคาดการณ์ว่าอาจจะ

เป็นผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมภายในอาคารที่มีอิทธิพลต่อการวัด ดังนั้น เราสามารถสรุปค่ากำลังงานการสูญเสียได้ ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 กำลังงานการสูญเสียเชิงสถิติ

ความสูงของสิ่งกีดขวาง (m)	จำนวน (dB)	การวัดจริง (dB)
0.25	27.32	32.23
0.50	29.50	31.06
0.75	33.22	35.23
1.00	35.46	38.18
1.25	39.82	41.53
1.50	40.93	42.25
เฉลี่ย	34.76	36.75

### 5.2.3.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์



รูปที่ 5.15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากการเลี้ยวเบน

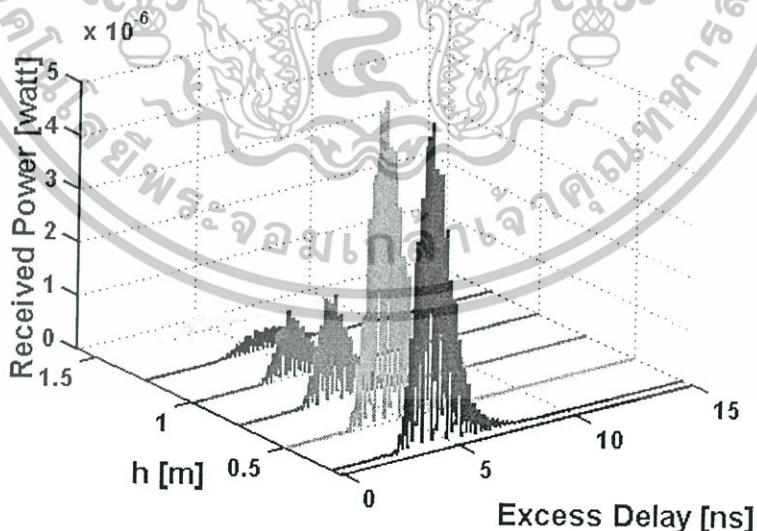
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากการวัดช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงสามารถบอกถึงความผิดเพี้ยนคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่รับได้และประสิทธิภาพระบบการสื่อสารของการแพร่กระจายคลื่น โดยจากผลสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นั้นอยู่ในช่วง 0.614 ถึง 0.535 ซึ่งจะลดลงเมื่อกำลังงานการสูญเสียเชิงวิดิเพิ่มสูงขึ้น สามารถสรุปรายละเอียดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างละเอียด

ความสูงของสิ่งกีดขวาง (m)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
0.25	0.614
0.50	0.635
0.75	0.588
1.00	0.552
1.25	0.543
1.50	0.535

#### 5.2.3.4 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา



รูปที่ 5.16 ภาพตัดขวางการประวิงเวลาของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของการเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพตัดขวางการประวิงเวลาจากผลการวัดรูปที่ 5.16 นั้น กำลังงานทางด้านรับลดลงเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นและทำให้กำลังงานเกิดการประวิงเวลาเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้น สามารถแสดงรายละเอียดของค่าได้ตามตารางที่ 5.7

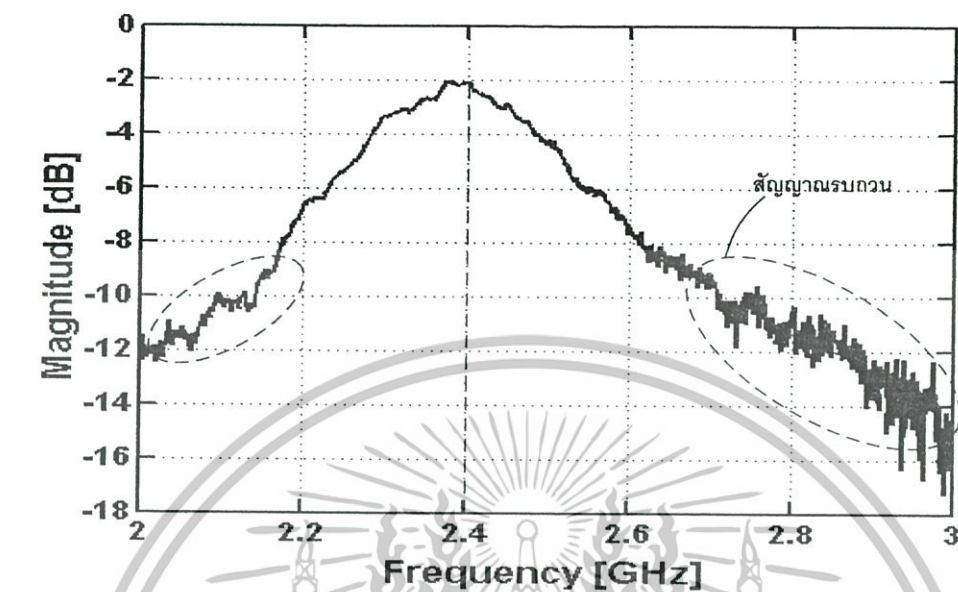
ตารางที่ 5.7 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา

ความสูงของสิ่งกีดขวาง (m)	ค่ากำลังงาน ( $10^{-6}$ W)	ค่าประวิงเวลา (ns)
0.25	4.73	3.23
0.50	5.32	3.56
0.75	2.48	3.87
1.00	1.53	4.02
1.25	0.69	4.15
1.50	0.25	4.36

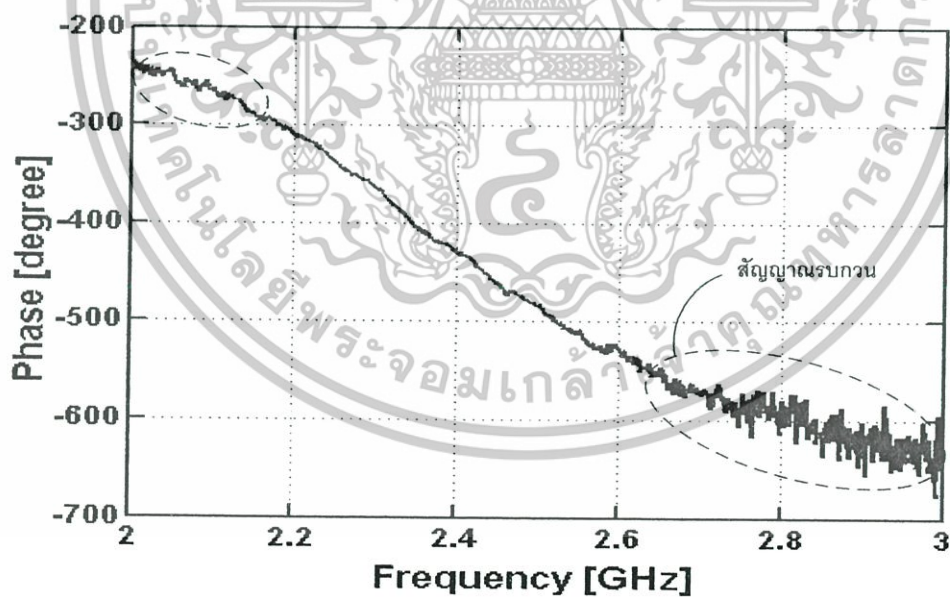
#### 5.2.4 แบบจำลองการวัดที่ 3

##### 5.2.4.1 ผลการวัดขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอน

ผลการวัดช่องสัญญาณการถ่ายโอนของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จากแบบจำลองนี้ได้ทำการทดสอบคุณลักษณะช่องสัญญาณการสื่อสารระหว่างสายอากาศทางด้านส่งและสายอากาศทางด้านรับด้วยคุณลักษณะโพลาริเซชันของสายอากาศ ด้วยสมมุติฐานว่ามี การนำสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปมาใช้งานในเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยเฉพาะสายอากาศที่มีคุณลักษณะโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น จากรูปที่ 5.17 แสดงขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่มีความถี่ 2.4 GHz เนื่องจากสายอากาศเป็นสายอากาศแบบความถี่แถบแคบ ดังนั้น จึงมีขนาดแอมพลิจูดที่สูง ณ ช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศเท่านั้น และรูปที่ 5.18 แสดงเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ ซึ่งเฟสมีความเป็นเชิงเส้น ณ ช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศ เช่นเดียวกัน โดยไม่มีสัญญาณรบกวนเข้ามากรณ ณ ช่วงความถี่นี้ จากนั้น ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนผ่านช่องสัญญาณตามแบบจำลองการวัดทั้ง 4 แบบ ซึ่งได้แสดงมุม 40, 90 และ 140 องศา ดังรูปที่ 5.19 ถึง 5.26

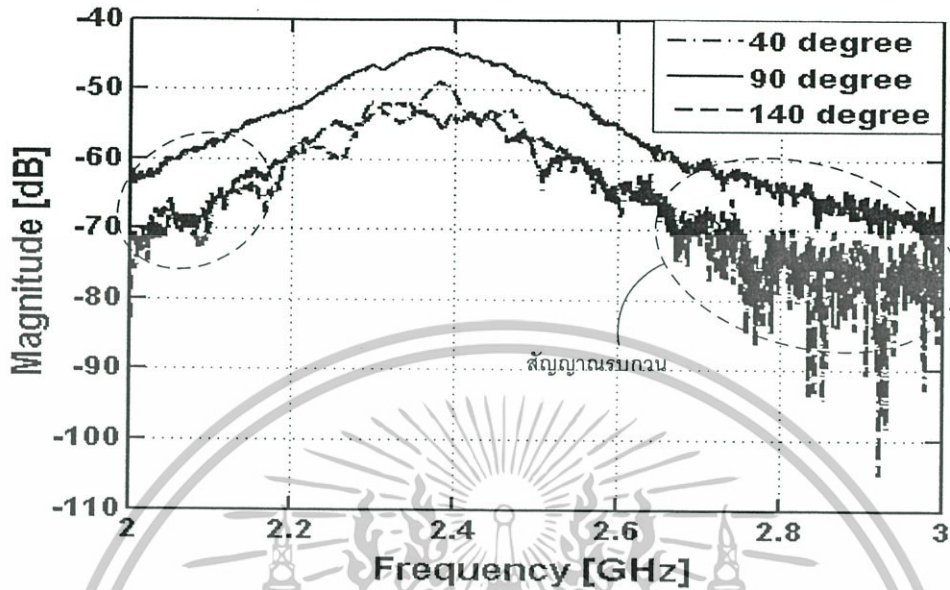


รูปที่ 5.17 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งจากการวัด

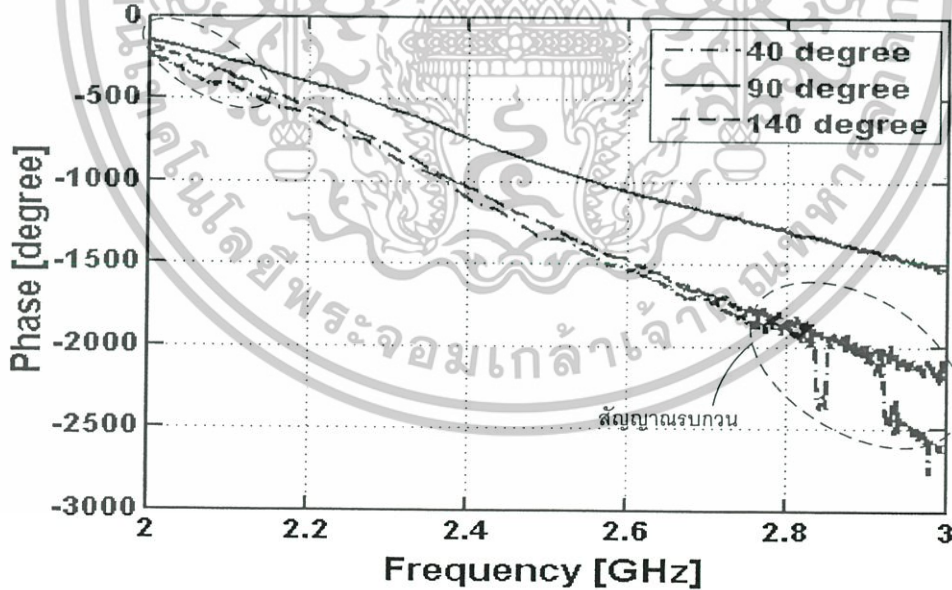


รูปที่ 5.18 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งจากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

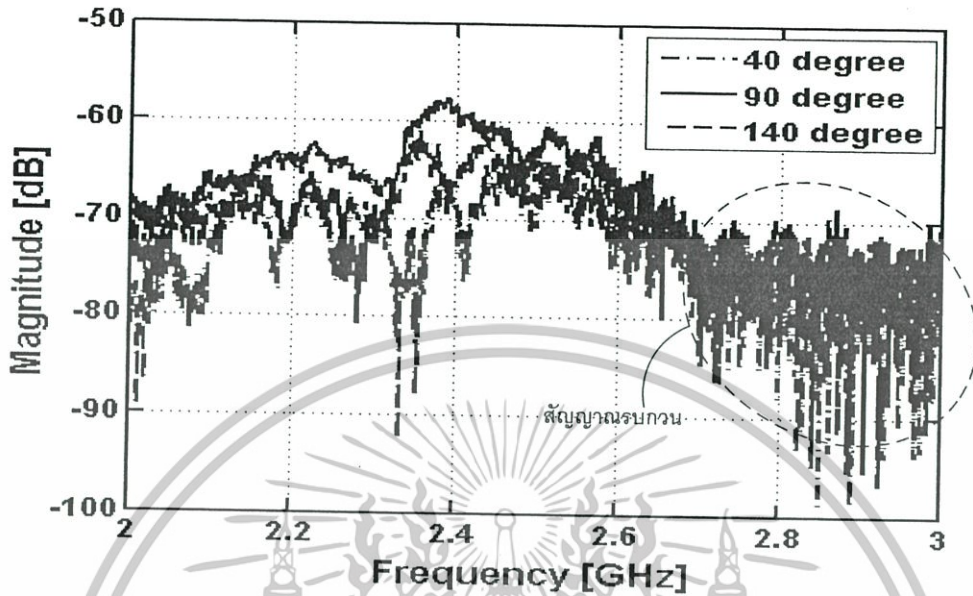


รูปที่ 5.19 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Vertical)

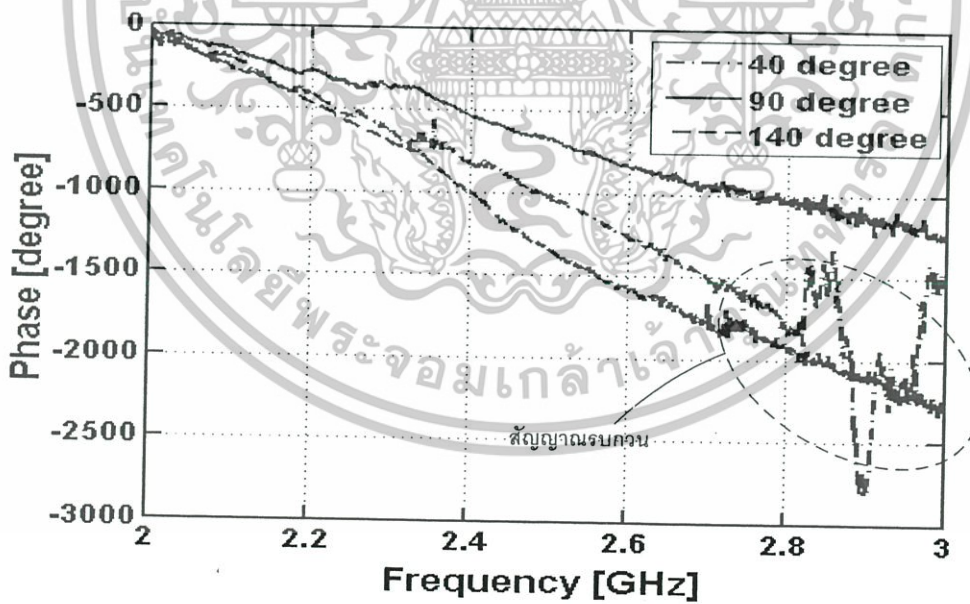


รูปที่ 5.20 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Vertical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

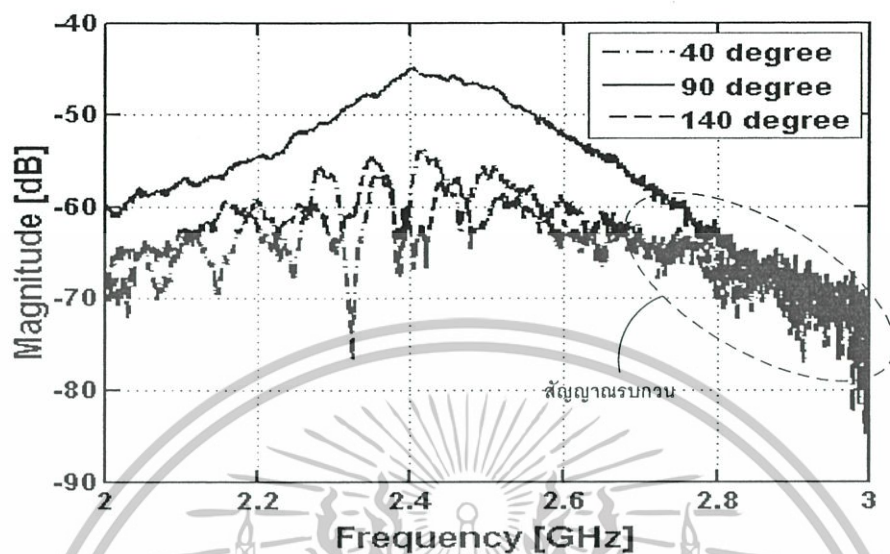


รูปที่ 5.21 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Horizontal)

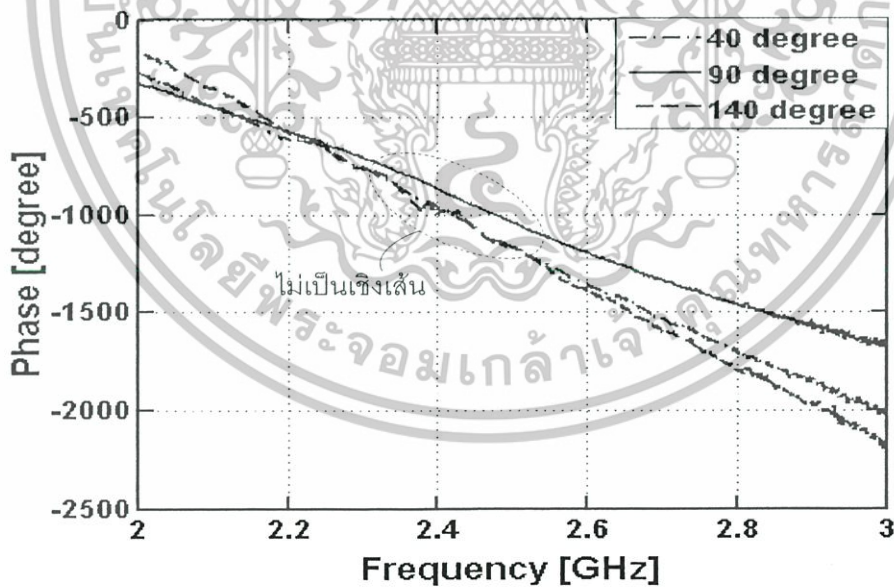


รูปที่ 5.22 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Horizontal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

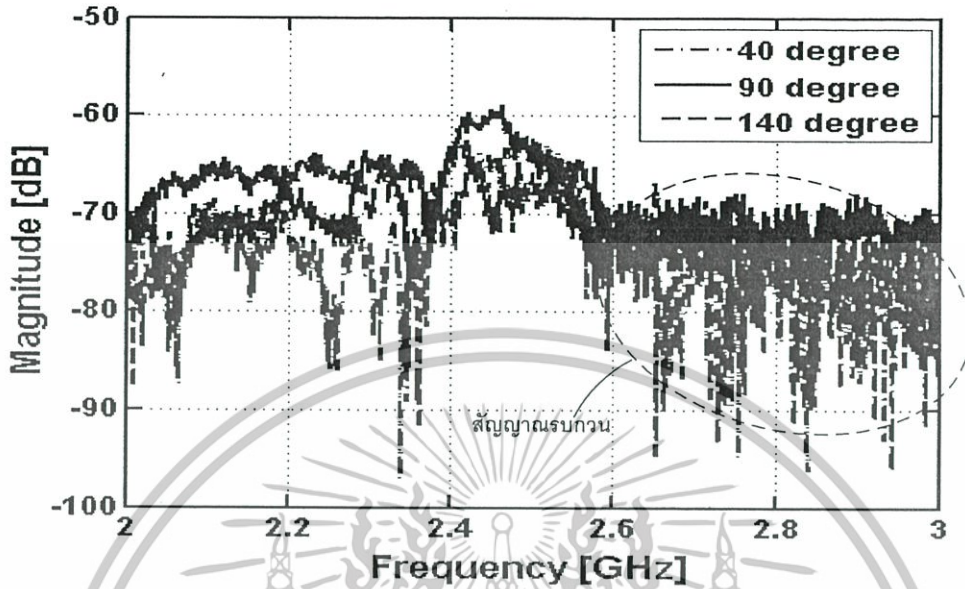


รูปที่ 5.23 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Horizontal)

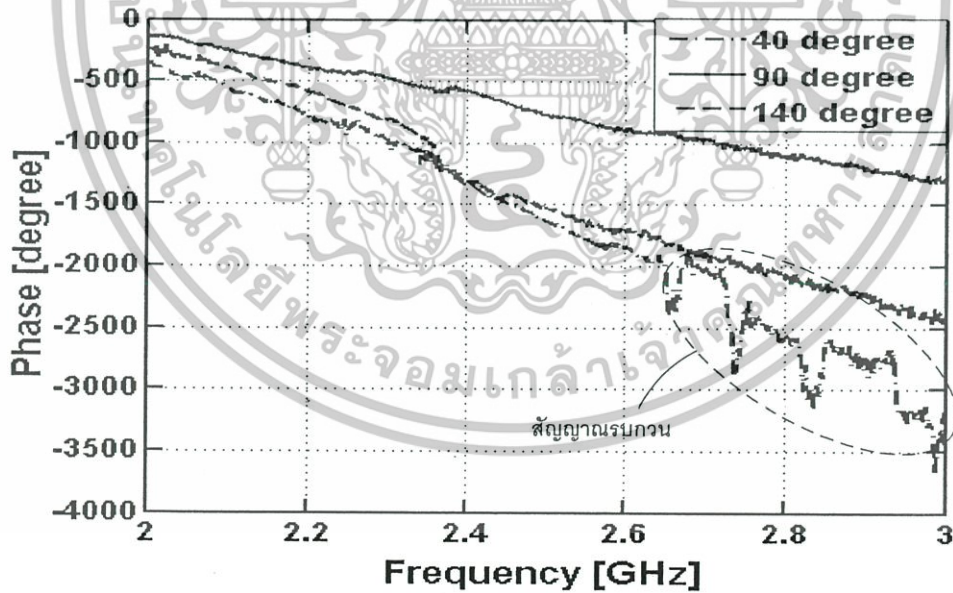


รูปที่ 5.24 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Horizontal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Vertical)



รูปที่ 5.26 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Vertical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

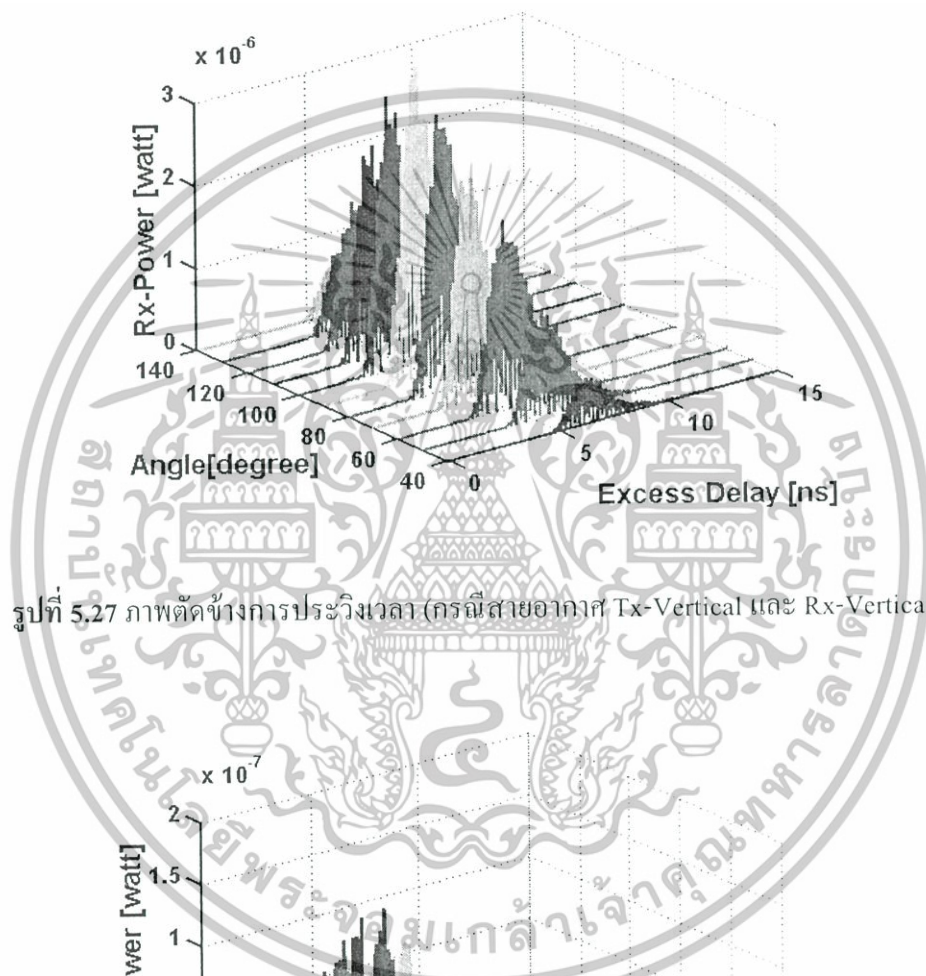
สามารถอธิบายผลของค่าขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณได้ดังนี้ ซึ่งจากรูปที่ 5.19, 5.20 และรูปที่ 5.23, 5.24 ตามลำดับ เป็นผลในกรณีสายอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับเป็นแบบโพลาริเซชันแบบเดียวกันในแนวตั้ง ซึ่งสนามไฟฟ้าของสายอากาศตั้งฉากกับพื้นและในแนวนอน สังเกตว่าขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่มุม 90 องศา ซึ่งเป็นในกรณีที่สายอากาศทางด้านส่งและทางด้านรับใกล้เคียงที่สุด ณ ความถี่ของสายอากาศขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ค่าสูงสุดและคุณลักษณะของช่องสัญญาณมีการรบกวนน้อยสุดด้วยเช่นกัน โดยทั้งในแนวตั้งและแนวนอนจะมีค่าขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณประมาณ -45 dB ซึ่งต่างจากมุม 40 และ 140 องศาซึ่งมีการผลกระทบต่อช่องสัญญาณการสื่อสารของขนาดลดลงเมื่อระยะทางระหว่างสายอากาศทั้งสองเพิ่มขึ้น และมีค่าขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณประมาณ -50 dB ถึง -60 dB ส่วนเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณมีความเป็นเชิงเส้นที่สุดในช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศและจะมีสัญญาณรบกวนเข้ามารบกวนคุณลักษณะของช่องสัญญาณมากเมื่อความถี่นอกเหนือแบนด์วิดธ์ของสายอากาศ แต่อย่างไรก็ตามสภาวะแวดล้อมก็มีผลสำคัญต่อระบบช่องสัญญาณ

จากนั้นในส่วนขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณในกรณีสายอากาศทางด้านส่งและทางด้านรับเป็นแบบโพลาริเซชันแบบไขว้ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน โดยรูปที่ 5.21, 5.22 และ 5.25, 5.26 ตามลำดับ สังเกตว่าฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณในช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศนั้นเกิดผลกระทบจากการโพลาไรซ์แบบไขว้ต่อการสื่อสารเป็นอย่างมากเนื่องจากสายอากาศทั้งสองไม่แมตซ์โพลาริเซชันต่อกัน ซึ่งมีค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณประมาณ -60 dB ถึง -70 dB ทั้งมุม 40, 90 และ 140 องศา และเนื่องด้วยจากการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งผลฟังก์ชันการถ่ายโอนทางเฟสของช่องสัญญาณในช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศในบางองศาหรือมุมอาจมีความไม่เป็นเชิงเส้นขึ้น เช่น มุม -500 ถึง -1000 องศา และในช่วงความถี่ที่นอกเหนือจากสายอากาศนั้นเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นทำให้เฟสไม่มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงนี้

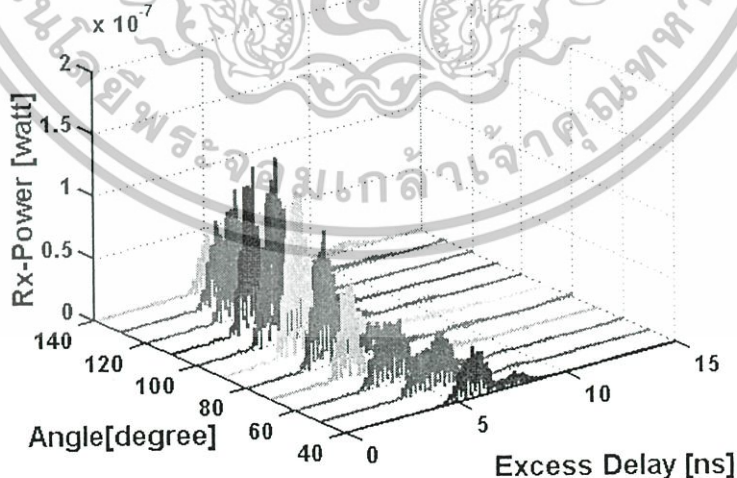
#### 5.2.4.2 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา

สามารถทราบถึงระดับกำลังงานทางด้านรับและภาพตัดขวางการประวิงเวลาของสัญญาณ ดังรูปที่ 5.27 และ 5.28 นั้น เป็นในกรณีโพลาริเซชันแนวตั้งทั้งสายอากาศด้านส่ง-รับ และในกรณีสายอากาศเป็นโพลาริเซชันแบบแนวตั้งและสายอากาศด้านรับเป็นโพลาริเซชันแบบแนวนอน ตามลำดับ โดยสังเกตได้ว่า ในกรณีแรกนั้น กำลังงานทางด้านรับสูงอยู่ในระดับ  $3 \times 10^{-6}$  วัตต์ ณ มุม 90 องศา และลดระดับกำลังงานลงเมื่อระยะทางระหว่างด้านส่งและรับห่างไกลขึ้น ส่วนในกรณีที่สองนั้น กำลังงานด้านรับลดลงต่ำอยู่ระดับ  $2 \times 10^{-7}$  วัตต์ ณ มุม 90 องศา นอกจากนั้น การแผ่ประวิงเวลา

จะเพิ่มขึ้นตามระยะทาง โดยกราฟทั้งสองมีความแตกต่างของการแผ่ประวิงเวลาไม่มากนัก เพราะทดสอบในสภาพแวดล้อมภายในอาคารที่เปิดโล่งไม่มีสิ่งกีดขวางและระยะห่างระหว่างด้านส่งและด้านรับอาจไม่ไกลมากนัก



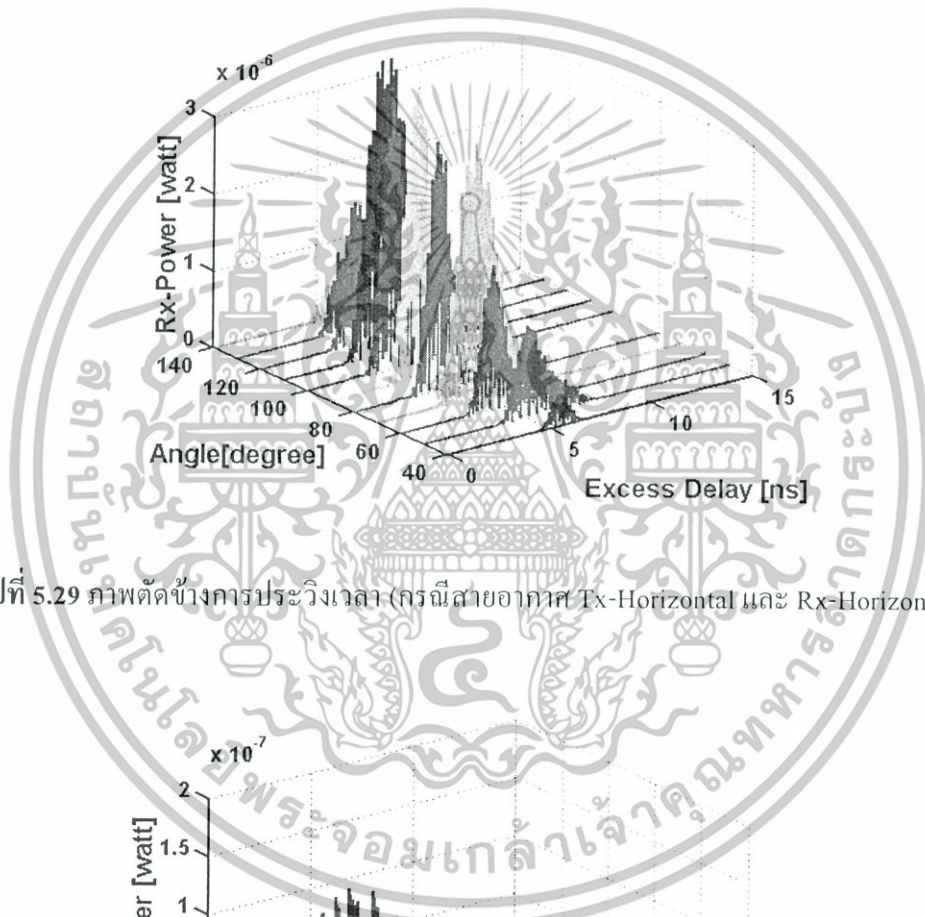
รูปที่ 5.27 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Vertical)



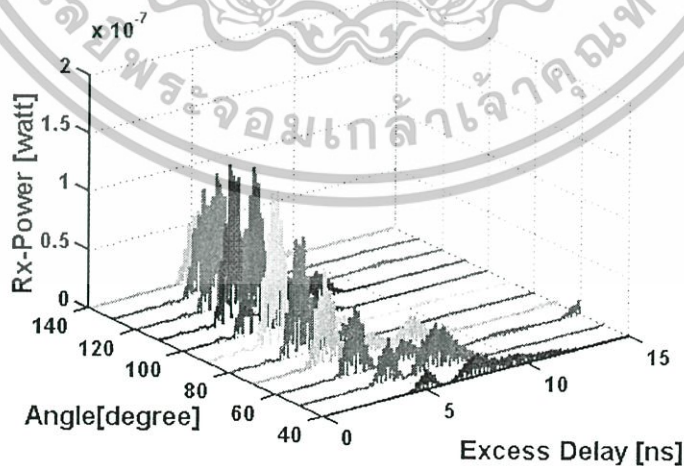
รูปที่ 5.28 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Horizontal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.29 และ 5.30 เป็นในกรณีของโพลาริเซชันแบบแนวนอนทั้งด้านส่ง-รับ และสายอากาศส่งเป็นโพลาริเซชันแบบแนวนอน และสายอากาศรับเป็นโพลาริเซชันแบบแนวตั้ง ซึ่งในกรณีแรกนั้น กำลังงานด้านรับอยู่ในระดับ  $3 \times 10^{-6}$  วัตต์ และกรณีที่สองอยู่ในระดับ  $2 \times 10^{-7}$  วัตต์ ส่วนค่าการแผ่ประวิงเวลาส่งเกินกว่ากรณีที่สองนั้นอาจมีสัญญาณที่เดินทางล่าช้าหรือหลายวิถีมาถึงสายอากาศด้านรับ



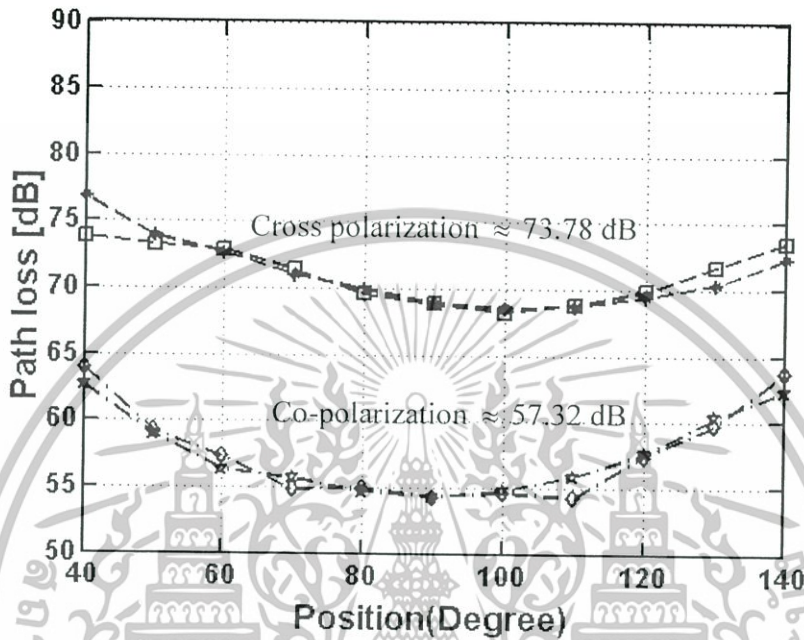
รูปที่ 5.29 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Horizontal)



รูปที่ 5.30 ภาพตัดขวางการประวิงเวลา (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Vertical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.4.3 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี



รูปที่ 5.31 การสูญเสียจากการส่งผ่านของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุทั้งกรณี Co-polarization และ Cross-polarization ของสายอากาศ

จากรูป 5.31 สามารถวิเคราะห์ได้ว่ากรณีสายอากาศที่มีคุณลักษณะของการโพลาไรเซชันแบบเดียวกันนั้นมีประสิทธิภาพในการสื่อสารมากกว่าโพลาไรเซชันแบบต่างกันและเนื่องจากกรณีของสายอากาศต่างโพลาไรเซชันทั้งด้านส่งและรับนั้นทำให้กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีสูง กำลังงานที่รับได้ต่ำ อาจส่งผลให้ระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสามารถตรวจจับสัญญาณได้อย่างขึ้น ดังนั้น การจัดวางสายอากาศโดยเฉพาะสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปนั้นที่ได้รับความนิยมนำมาใช้กับระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงและสามารถแสดงตารางค่าการสูญเสียเชิงวิถีโดยละเอียดดังตารางที่ 5.8

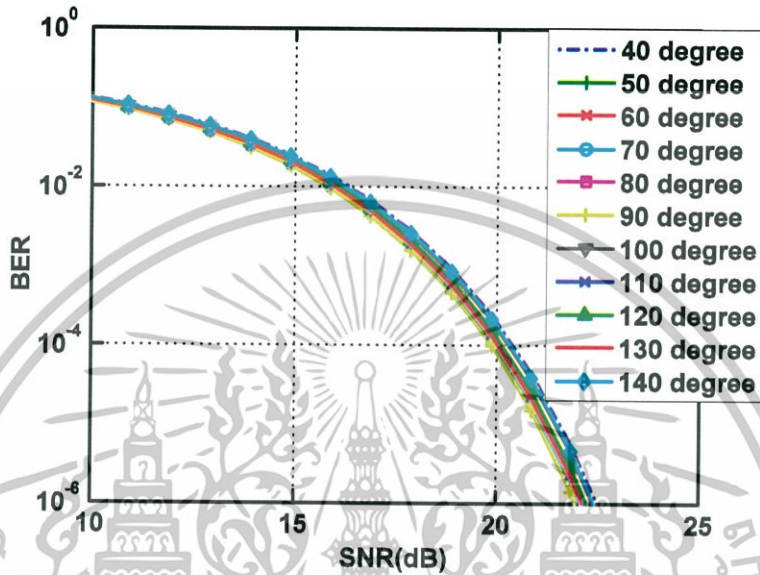
ตารางที่ 5.8 กำลังงานการสูญเสียจากการส่งผ่านช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น

องศา $\theta$	VV (dB)	VH (dB)	HH (dB)	HV (dB)
40	63.54	74.56	64.67	77.12
50	58.89	74.21	59.35	74.56
60	57.48	73.87	57.67	73.63
70	56.23	72.55	56.31	72.54
80	55.56	70.02	55.22	70.08
90	54.95	68.45	54.75	69.14
100	55.12	67.90	55.13	68.34
110	56.24	68.57	54.57	69.21
120	57.47	70.12	57.24	70.02
130	61.21	72.43	60.03	72.65
140	63.66	74.54	64.58	74.21

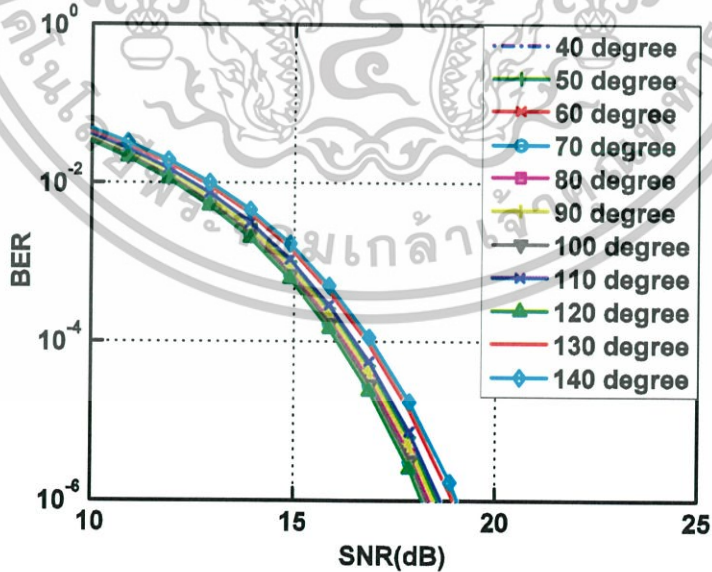
#### 5.2.4.4 อัตราบิดผิดพลาด

ส่วนการวิเคราะห์ค่าอัตราบิดผิดพลาดจากการทดลองวัดในช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงระหว่างสายอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับทั้งกรณีคุณลักษณะการโพลาไรเซชันของสายอากาศแบบเดียวกันและต่างกัน โดยผลของอัตราบิดผิดพลาดสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสัญญาณการส่งผ่านในการแพร่กระจายคลื่นของการสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งเป็นระบบการสื่อสารแบบความถี่แถบแคบ ดังนั้น อัตราบิดผิดพลาดมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio; SNR) ซึ่งต้องไม่ต่ำกว่า 20 dB สำหรับการสื่อสารแบบความถี่แถบแคบ โดยสามารถแสดงผลการของอัตราบิดผิดพลาดที่วิเคราะห์อัตราบิดที่  $10^{-6}$  ดังรูปที่ 5.32 และ 5.33 แสดงกราฟในแต่ละมุมตั้งแต่มุม 40 ถึง 140 องศา ในกรณีที่คุณลักษณะโพลาไรเซชันของสายอากาศแบบเดียวกัน โดยกราฟเส้นที่ต่ำสุดเป็นกราฟของมุม 90 องศา ซึ่งมีอัตราบิดผิดพลาดน้อยที่สุด และจุดที่มีอัตราบิดผิดพลาดมากที่สุดคือมุม 40 องศา และกราฟทั้งสองมีค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ยประมาณ 23 dB ที่ 1/1000000 บิต ส่วนรูปที่ 5.34 และ 5.35 แสดงกราฟในแต่ละมุมในกรณีที่คุณลักษณะโพลาไรเซชันของสายอากาศแบบต่างกัน เช่นเดียวกัน กราฟที่มุม 90 องศา มีอัตราบิดผิดพลาดที่ต่ำสุด ต่างที่อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่า 20 dB ซึ่งถือได้ว่าต่ำกว่ามาตรฐานที่ระบบการสื่อสารแบบความถี่แถบแคบยอมรับได้ ดังนั้น สามารถที่จะบ่งบอกได้ว่า

กรณีคุณลักษณะของช่องสัญญาณการสื่อสารแบบโพลาริเซชันแบบเดียวกันนั้นส่งผลให้มีประสิทธิภาพได้ดีกว่าการสื่อสารแบบโพลาริเซชันแบบต่างกัน

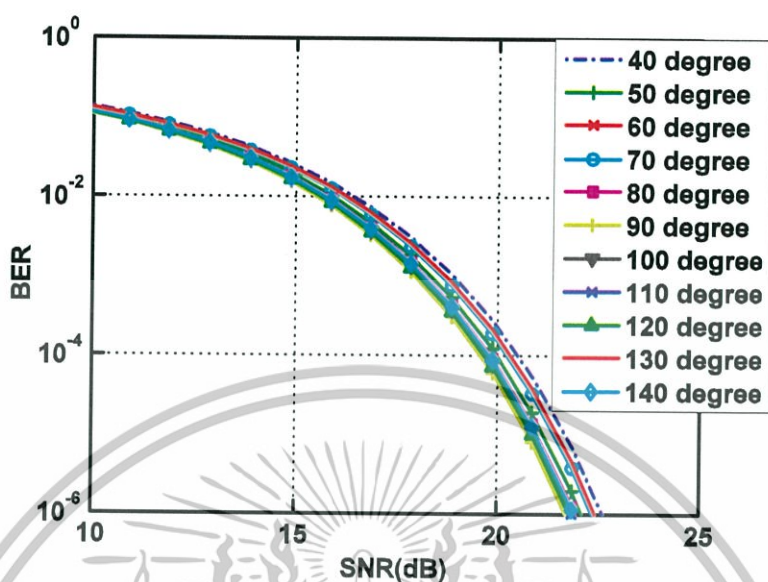


รูปที่ 5.32 อัตราบิตผิดพลาด (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Vertical)

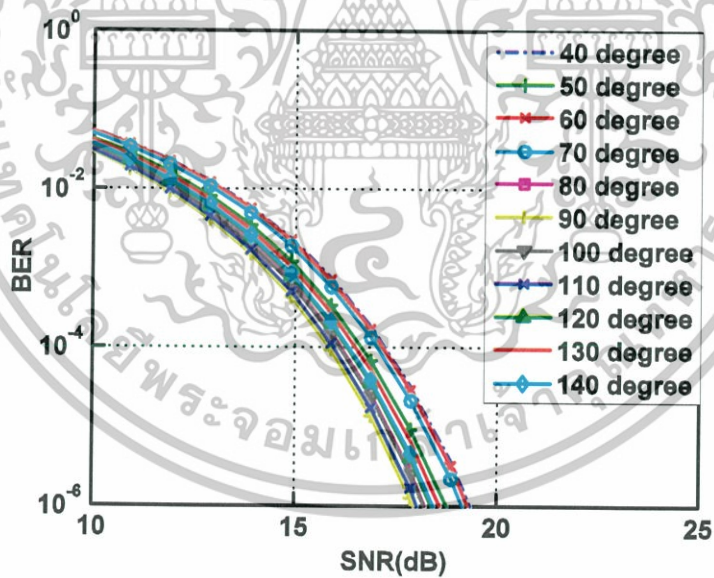


รูปที่ 5.33 อัตราบิตผิดพลาด (กรณีสายอากาศ Tx-Vertical และ Rx-Horizontal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 อัตราบิตผิดพลาด (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Horizontal)



รูปที่ 5.35 อัตราบิตผิดพลาด (กรณีสายอากาศ Tx-Horizontal และ Rx-Vertical)

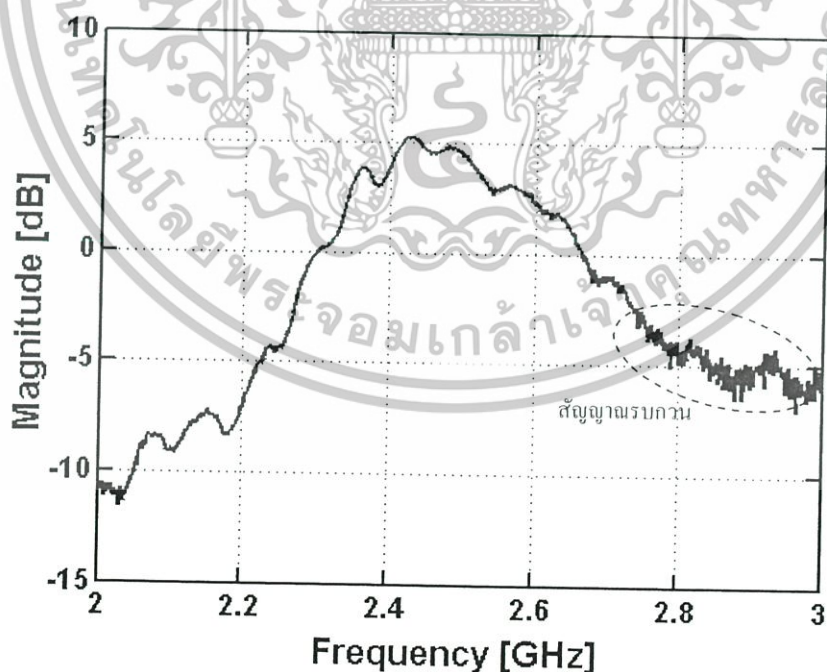
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2.5 แบบจำลองการวัดที่ 4

### 5.2.5.1 ผลการวัดขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ

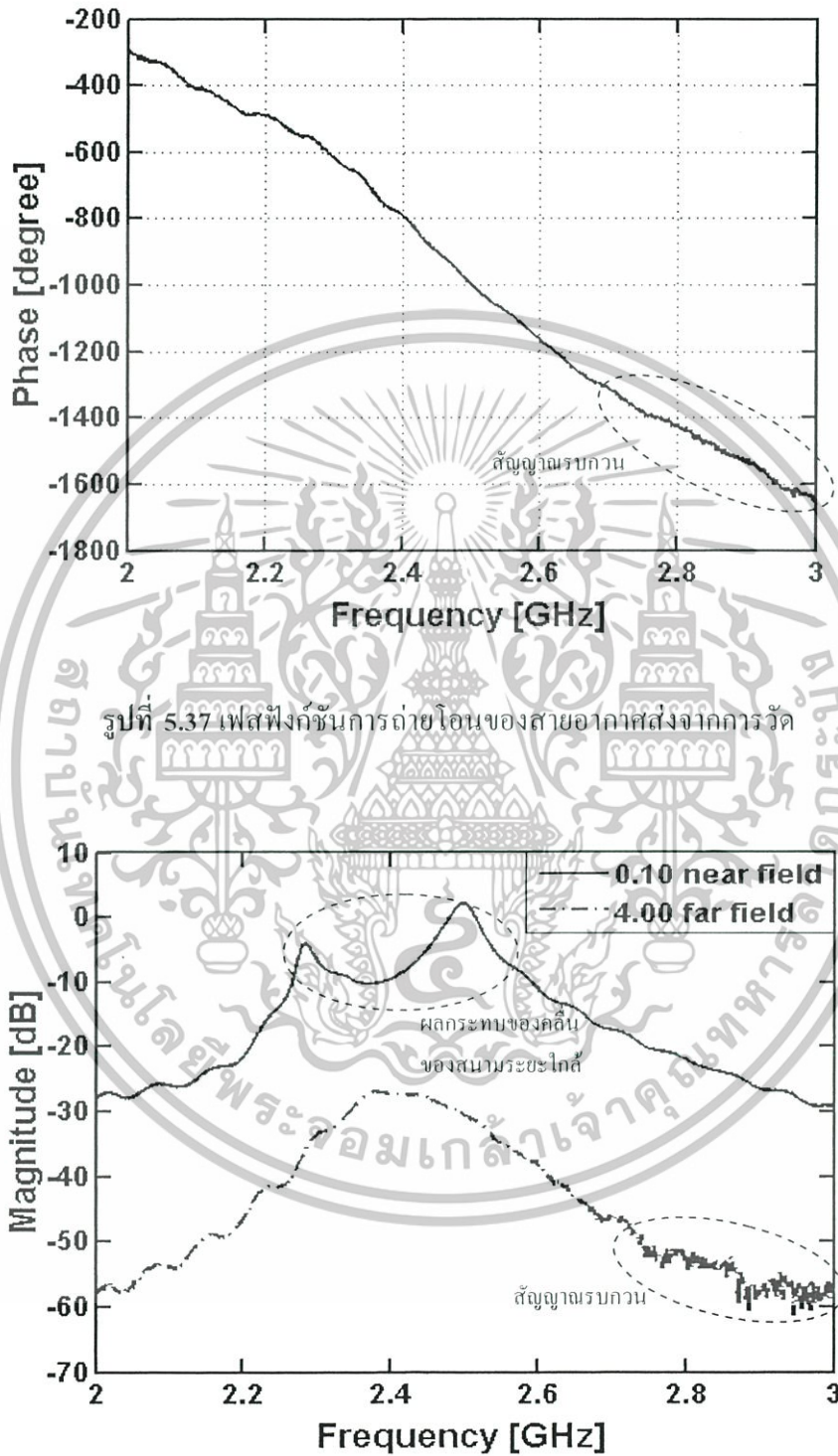
เนื่องจากสมมุติฐานของการวิจัยสนามไฟฟ้าระยะใกล้และระยะไกลมีผลกระทบอย่างไรต่อช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และจากแบบจำลองสามารถวิเคราะห์ฟังก์ชันเชิงซ้อนทางขนาดและเฟส ซึ่งรูปที่ 5.36 และ 5.37 แสดงขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศจากการวัดที่มีความถี่การทำงานที่ 2.4 GHz ซึ่งขนาดมีค่าสูงในช่วงความถี่การทำงานหรือช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศและเฟสมีความเป็นเชิงเส้น ณ ช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศด้วยเช่นกัน

จากนั้นทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนผ่านช่องสัญญาณการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณแสดงดังรูปที่ 5.38 ซึ่งเปรียบเทียบการวัดด้วยระยะทางระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับในสนามไฟฟ้าระยะใกล้และระยะไกลที่ระยะห่าง 0.10 เมตรและ 4.00 เมตร สังเกตได้ว่าผลกระทบต่อช่องสัญญาณในสนามระยะใกล้นั้นมีมากกว่าสนามระยะไกล เช่นเดียวกับเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณในสนามระยะใกล้ที่มีความเป็นเชิงเส้นไม่ต่อเนื่องก็มีผลกระทบต่อช่องสัญญาณด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 5.39



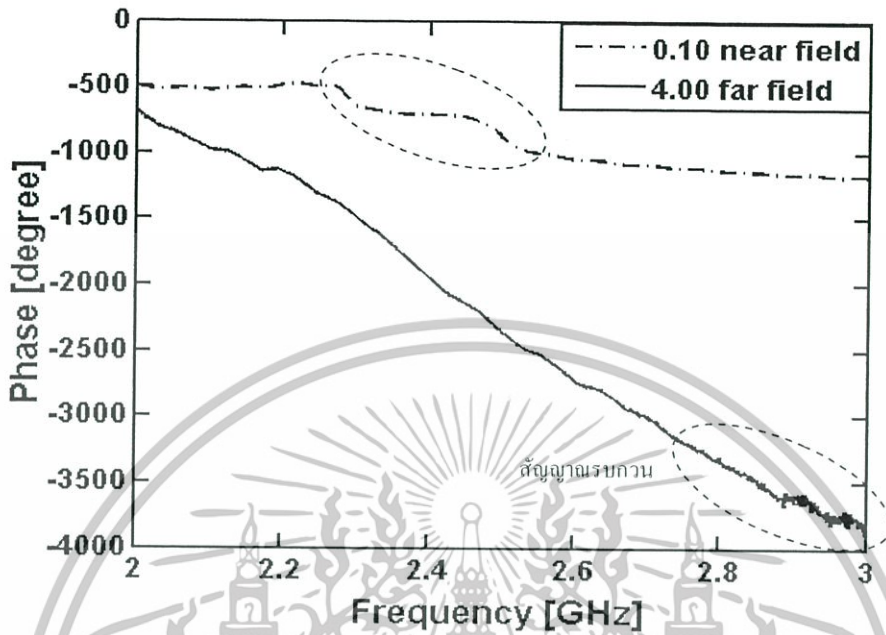
รูปที่ 5.36 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งจากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



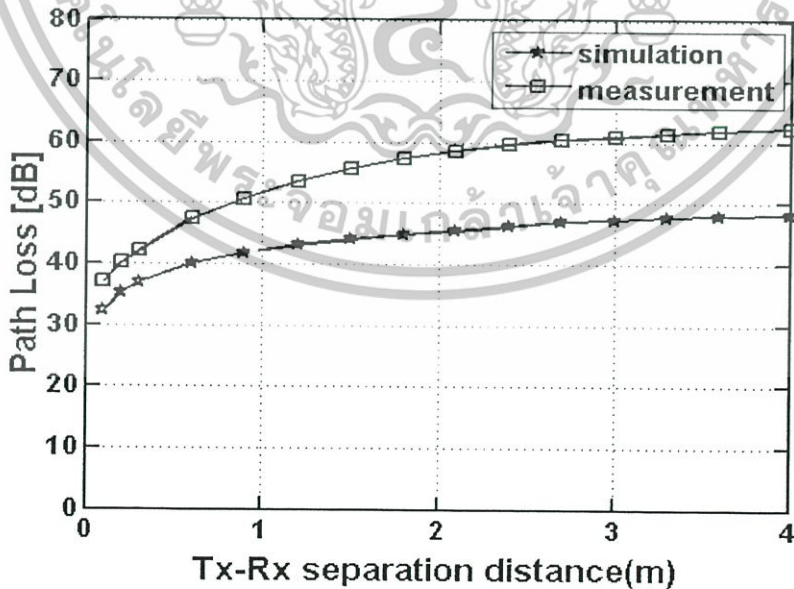
รูปที่ 5.38 ขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณของแถบสนามระยะใกล้และระยะไกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.39 เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณของแถบสนามระยะใกล้และระยะไกล

#### 5.2.5.2 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี



รูปที่ 5.40 การสูญเสียเชิงวิถีของการแพร่กระจายในแถบสนามระยะใกล้และระยะไกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.40 แสดงกราฟผลการสูญเสียเชิงวิถีของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบ ระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งทำการวัดในแนวระดับสายตาจากระยะทางตั้งแต่ 0.1 เมตรไปจนถึง 4 เมตร โดยระยะทางตั้งแต่ 0.17 เมตรขึ้นไปจะอยู่ในช่วงของสนามระยะไกล การสูญเสียเชิงวิถีจะเพิ่มขึ้นแปรผันตามกับระยะทาง ซึ่งสามารถแสดงค่าในแต่ละตำแหน่งดังตารางที่ 5.9

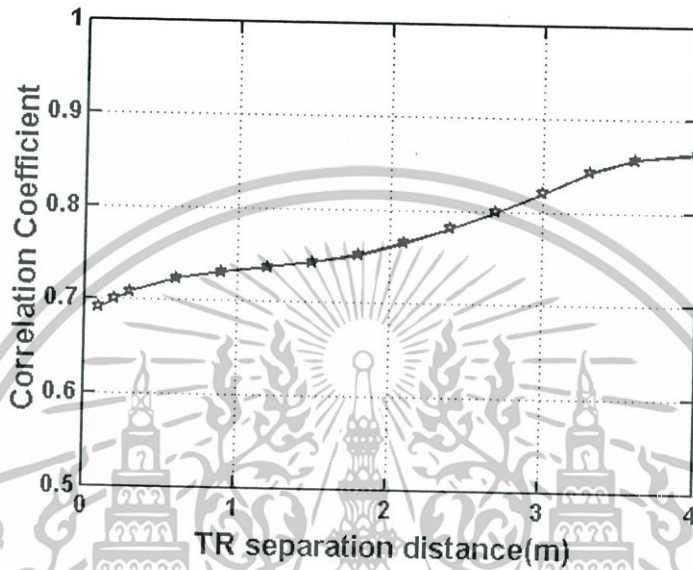
ตารางที่ 5.9 กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถี

ระยะห่างระหว่าง Tx และ Rx (เมตร)	ค่าการสูญเสียเชิงวิถี (dB)
0.10	12.72
0.20	18.13
0.30	21.45
0.60	28.36
0.90	31.89
1.20	36.53
1.50	38.85
1.80	39.56
2.10	40.78
2.40	41.23
2.70	42.12
3.00	42.67
3.30	42.98
3.60	43.32
4.00	43.78

### 5.2.5.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

รูปที่ 5.41 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นั้นเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศทางด้านส่งและทางด้านรับเพิ่มขึ้น สังเกตว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ความสัมพันธ์ของสัญญาณส่งกับสัญญาณที่รับได้นั้นมีคุณลักษณะที่ดีในสนามระยะไกลมากกว่าสนาม

ระยะใกล้ที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณการแพร่กระจายมากกว่า โดยสามารถแสดงค่าในแต่ละตำแหน่งของสายอากาศรับได้ดังตารางที่ 5.10



รูปที่ 5.41 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

ในการวิเคราะห์ผลของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ซึ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณด้านส่งและสัญญาณด้านทางรับมีความคลาดเคลื่อนน้อยเพียงใด เนื่องจากคุณลักษณะของสายอากาศที่ใช้มีการแพร่กระจายคลื่นที่ดีในสนามระยะไกล ดังนั้นระยะที่ไกลกว่าขนาดของสายอากาศทำให้ได้รับกำลังงานจากการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งได้ดีส่งผลให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพิ่มขึ้นของระยะทำการในสนามระยะไกล ต่างจากสนามระยะใกล้ที่มีผลของความสัมพันธ์ของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเกิดการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้ช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ถูกลดทอนมีความคลาดเคลื่อนสูงในแถบกำลังงานนี้ ซึ่งระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในระบบการสื่อสารย่านความถี่ไมโครเวฟควรที่จะคำนึงถึงการติดตั้งและออกแบบ เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบในย่านความถี่นี้จะแพร่กระจายคลื่นวิทยุในสนามระยะไกลได้ดีกว่าสนามระยะใกล้

ตารางที่ 5.10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ระยะห่างระหว่าง Tx และ Rx (เมตร)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
0.10	0.695
0.20	0.700
0.30	0.723
0.60	0.736
0.90	0.741
1.20	0.749
1.50	0.752
1.80	0.764
2.10	0.772
2.40	0.788
2.70	0.803
3.00	0.825
3.30	0.858
3.60	0.865
4.00	0.878

### 5.3 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการวัดของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร โดยผลที่ได้จากการวัดเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาวิเคราะห์คุณลักษณะของช่องสัญญาณหรือผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อช่องสัญญาณจากการแพร่กระจายคลื่นที่ทำให้ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนเปลี่ยนแปลงขึ้น และเพื่อศึกษาถึงการสูญเสียของการส่งผ่านช่องสัญญาณในอวกาศว่างซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการวิเคราะห์และออกแบบระบบการสื่อสารระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ รวมถึงการประยุกต์ใช้สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปมาวิเคราะห์รับและส่งผ่านช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น

## บทที่ 6

# บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 6.1 กล่าวนำ

เนื่องจากในปัจจุบันนั้นเทคโนโลยีการสื่อสารระบบตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลายทั้งในและนอกอาคาร และยังเป็นเทคโนโลยีที่สามารถช่วยเพิ่มความสะดวกรวดเร็วแก่ภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีบทบาทในชีวิตประจำวันแก่ผู้ใช้งานทั่วไป จึงเป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการนำมาศึกษาและวิจัยถึงคุณลักษณะขั้นตอนของการสื่อสารและเพิ่มเติมในส่วนที่จะสามารถพัฒนาการใช้งาน ด้วยเหตุนี้เห็นว่าเทคโนโลยีแบบระบบตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นเทคโนโลยีที่อาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแพร่กระจายคลื่นวิทยุในการสื่อสารระหว่างเครื่องรับ-ส่ง ดังนั้นการศึกษาวิจัยกระบวนการส่งผ่านช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุของเทคโนโลยีระบบตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาคูณลักษณะของช่องสัญญาณหากมีการนำไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่อาจมีผลกระทบต่อสื่อสารและการทำงาน ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอถึงการศึกษาของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุของระบบระบบตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับระบบไร้สายระยะสั้น โดยพิจารณาและวิเคราะห์ความถี่การใช้งานที่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านที่สามารถทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยได้โดยไม่มีข้อบังคับทางการใช้งานย่านความถี่สากล ด้วยข้อดีต่างๆ มากมายในย่านความถี่นี้ แต่ก็มีควมไวและผลกระทบต่อช่องสัญญาณการสื่อสารได้อย่างรวดเร็ว และอาจมีการจางหายของสัญญาณได้มากกว่าในย่านความถี่ต่ำทำให้คุณภาพและประสิทธิภาพของการสื่อสารลดน้อยลง ทั้งนี้ทั้งนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้คำนึงถึงสภาวะแวดล้อมการใช้งานจริงของเทคโนโลยีระบบระบบตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุภายในอาคาร การสูญเสียเชิงวิถีจากสภาวะแวดล้อมกำลังงานการแผ่ประเวงเวลาทางด้านรับ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธระหว่างสัญญาณส่งและสัญญาณรับหรือสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อัตราบิดผิดพลาด และที่สำคัญต่อการสื่อสารระบบเชิงเส้นแบบสัญญาณเชิงซ้อนคือ ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นสิ่งที่สามารถบ่งบอกคุณลักษณะของช่องสัญญาณการสื่อสารแบบจำลองการวัดการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ โดยแบบจำลองการวัดของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุระบบระบบตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ได้วิเคราะห์ถึงหลักการส่งผ่านด้วยทฤษฎีของฟรีสเป็นแนวความคิดหลักในการวิจัย คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลอง 1 ทั้งแบบที่ 1-1 และ 1-2 ตามลำดับ คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุได้วิเคราะห์จากคุณลักษณะการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวเบนของคลื่นในแบบจำลองที่ 2 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นวิทยุการโปลาไรเซชันของสายอากาศในแบบจำลองที่ 3 และคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในสนามระยะใกล้และระยะไกลในแบบจำลองที่ 4 ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองวิจัยได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

## 6.2 สรุปการศึกษาทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากแบบจำลองที่ 1

แบบจำลองการวัดของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุแบบจำลองการวัดที่ 1-1 โดยพิจารณาถึงภาวะแวดล้อมจริงภายในอาคาร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของภาวะแวดล้อมทำให้ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ตามสมมุติฐานของการศึกษาถึงช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุการโปลาไรเซชันในลักษณะตรวจจับวัตถุหรือบุคคลเข้าออกผ่านประตูแบบรอบทิศทาง โดยคำนึงถึงการใช้งานของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปของการทดลองวิจัยไปสู่การประยุกต์ถึงการใช้งานจริงในระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งผลของการทดลองวัดและวิจัยสามารถทราบถึงคุณลักษณะทางขนาดและเฟสของช่องสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละตำแหน่งมุมของสายอากาศทางด้านรับและกำลังงานที่รับรวมถึงคลื่นหลายวิถีและวิถีแรกที่คลื่นเดินทางมาถึง ซึ่งคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากผลของการสะท้อนจากพื้นหรืออื่นๆ ทำให้เกิดการประวิงเวลาขึ้นและคลื่นนี้ส่งผลให้เกิดการเสริมกันหรือหักล้างกันก็เป็นที่ทำให้กำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงขึ้นหรือลดลงก็เป็นที่ได้ กำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ยประมาณ 70 dB ซึ่งเป็นผลจากการคาดหมายว่าคุณลักษณะของการจัดวางสายอากาศส่งและสายอากาศรับและภาวะแวดล้อมประกอบด้วย เนื่องจากสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศแบบมีทิศทางจึงสามารถที่จะสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงเมื่อวางในแนวเดียวกัน จากนั้นพิจารณาแบบจำลองการวัดที่ 1-2 ในระยะทางตรงตามสมมุติฐานของการศึกษาถึงช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุของการใช้งานระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในลักษณะการตรวจจับวัตถุหรือบุคคลภายในภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ซึ่งผลของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีผลกระทบทั้งทางขนาดและทางเฟสของช่องสัญญาณสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เมื่อสายอากาศอยู่ในแนวลักษณะวิถีเดียวกันทำให้ผลของขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณมีผลกระทบน้อยสุด ซึ่งต่างกับระยะทางของสายอากาศทั้งสองที่มีระยะทางเพิ่มขึ้น ประกอบกับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้แปรผกผันกับกำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีที่ส่งผลต่อการเกิดอัตราบิดผิดผลาดของการส่งผ่านช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยค่าการสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ยประมาณ 66 dB ซึ่งเป็นผลจากการวัดภายใต้ภาวะแวดล้อมของการใช้งานจริงที่อาจส่งผลกระทบต่อ

เปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุได้ตลอดเวลา

### 6.3 สรุปการศึกษาทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากแบบจำลองที่ 2

แบบจำลองการวัดของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นวิทยุของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยพิจารณาถึงคุณลักษณะการเลี้ยวเบนของคลื่นภายในสถานะแวดล้อมภายในอาคารที่มีผลกระทบต่อช่องสัญญาณสื่อสาร แบบจำลองนี้พิจารณาถึงสิ่งกีดขวางของวัตถุที่บดบังเส้นทางการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและแท็ก ซึ่งสมมุติฐานของเครื่องอ่านและแท็กได้นำสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปทำการส่งและรับ เมื่อตัวกลางมีการเปลี่ยนแปลงความสูงเพิ่มขึ้นจนบดบังแนวของการสื่อสารของสายอากาศทั้งสองฝั่งทำให้คุณลักษณะของช่องสัญญาณการสื่อสารเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลของขนาดฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ณ ช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศมีผลกระทบของสัญญาณรบกวนทำให้ขนาดลดลง เมื่อตัวกลางสูงขึ้น และเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นมีความเป็นเชิงเส้นในช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศ เนื่องจากการวัดภายในสถานะแวดล้อมภายในอาคารและเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุนั้นถือได้ว่าเป็นระบบการสื่อสารไร้สายระยะสั้น ดังนั้นผลของการแผ่ประวิงเวลาในแต่ละตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของตัวกลางมีความคลาดเคลื่อนไม่มากนักทำให้เฟสมีความยังคงเชิงเส้นอยู่ แต่ ณ ช่วงความถี่นอกเหนือจากสายอากาศสังเกตว่าช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณอื่นๆ ได้ง่าย ดังนั้นตัวกลางที่พิจารณาสมมุติฐานได้ว่าอาจจะเป็นขอบของกำแพง ผนังของห้องหรือของวัตถุต่างๆ ที่มีการใช้งานภายในอาคาร ซึ่งสิ่งเหล่านี้ทำให้กำลังงานของสัญญาณลดน้อยลงและแปรผกผันกับกำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีที่เพิ่มขึ้น โดยผลของการสูญเสียเชิงวิถีนั้นจากทฤษฎีของการเลี้ยวเบนสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดกำลังงานการสูญเสียจากการเลี้ยวเบน ซึ่งผลของการคำนวณได้ทำการเปรียบเทียบกับผลของการวัดจริงซึ่งผลต่างของการสูญเสียเชิงวิถีต่างกันไม่เกิน 2 dB ถือได้ว่าผลของการวัดจริงนั้นเป็นไปตามทฤษฎีของการเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุ จากนั้นสามารถทราบถึงความสัมพันธ์ของสัญญาณจากสายอากาศทางด้านส่งและสายอากาศทางด้านรับ แสดงผลของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เปอร์เซ็นต์ความสัมพันธ์ของสัญญาณทั้งสองลดลงเมื่อกำลังงานการสูญเสียเชิงวิถีเพิ่มขึ้นหรือกล่าวได้ว่าพารามิเตอร์  $v$  ของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลต่างของสัญญาณส่งและรับเปลี่ยนแปลงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเลี้ยวเบนของคลื่นยังส่งผลให้สายอากาศทางด้านรับยังสามารถรับสัญญาณได้และอาจส่งผลกระทบต่อในสถานะแวดล้อมภายนอกอาคาร ซึ่งกระบวนการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ออกแบบการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่อาจมีสิ่งกีดขวางมาบดบังแนววิถีระดับสายตาของเครื่องอ่านและแท็กหรือพื้นที่ที่ต้องจัดวางอุปกรณ์ในแนวต่างวิถีกัน โดยต้องคำนึงถึงคุณลักษณะของการการแพร่กระจายจากเลี้ยวเบนของคลื่นด้วยเช่นกัน

#### 6.4 สรุปการศึกษาทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองที่ 3

แบบจำลองการวัดของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยวิเคราะห์คุณลักษณะของช่องสัญญาณส่งผ่านจากหลักการของฟรีสและนำสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปเป็นสมมุติฐานของเครื่องอ่านและแท็กของเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งสายอากาศชนิดนี้สามารถนำมาใช้งานกับระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุได้จริง ราคาถูก น้ำหนักเบาเหมาะกับการออกแบบเครื่องอ่านให้มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาได้ ดังนั้นพารามิเตอร์อีกอย่างหนึ่งที่สำคัญของสายอากาศนั้นคือ การโพลาไรเซชันของสายอากาศและเนื่องจากสายอากาศที่ใช้ในการทดลองการวัดช่องสัญญาณถูกออกแบบให้มีการโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น โดยมองในส่วนของสนามไฟฟ้าเป็นหลักซึ่งแบบจำลองนี้ได้ทดลองวิจัยว่าหากสายอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับมีการโพลาไรเซชันแบบต่างกันและเหมือนกันหรือแนวตั้ง แนวอนอนนั้นจะเกิดผลอย่างไรต่อช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ดังนั้นจากผลการทดลองในกรณีที่สายอากาศส่งและสายอากาศรับมีการโพลาไรเซชันแบบเดียวกันในแนวตั้งทั้งสองและในแนวอนอนทั้งสอง ซึ่งคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากผลของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับขนาดของการถ่ายโอน ณ ความถี่ของสายอากาศ 2.4 GHz สูงสุดในตำแหน่งของมุม 90 องศาและลดลงเมื่อมุมอื่นๆ มีระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองเพิ่มขึ้นและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนบอกได้ถึงเกิดการประวิงเวลาในช่วงนี้น้อยมาก ส่วนผลของการสูญเสียเชิงวิถีเป็นไปตามทฤษฎีของฟรีสที่กำลังงานจะลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น กำลังสองเช่นเดียวกับกับผลของกำลังงานการแผ่ประวิงเวลาที่มีระดับกำลังงานทางด้านรับอยู่ที่  $3 \times 10^{-6}$  วัตต์ของทั้งในแนวตั้งและแนวอนอนและผลที่สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารที่ดีนั้นต้องมีการโพลาไรเซชันของสายอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับที่เหมือนกันคือ อัตราบิดผิดพลาดของระบบเมื่ออัตราส่วนของกำลังงานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า 20 dB ถือว่าเป็นที่ยอมรับได้ในระบบการสื่อสารความถี่แถบแคบ การทดลองนี้สามารถบอกได้ว่าหลักการสื่อสารของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนั้นหากใช้สายอากาศที่มีการโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นควรคำนึงถึงแนวในการวางสายอากาศให้มีคุณลักษณะของสนามไฟฟ้าในแนวเดียวกันเพื่อให้ประสิทธิภาพของการสื่อสารหรือการระบุตัวตนของวัตถุเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.5 สรุปการศึกษาทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองที่ 4

แบบจำลองการวัดของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยการทดลองนี้สามารถที่จะวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณสื่อสารในกรณีของสนามระยะใกล้และระยะไกลซึ่งการสื่อสารของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนั้นมีทั้งคุณลักษณะของช่องสัญญาณสื่อสารแบบระยะใกล้และระยะไกลขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารซึ่งยิ่งย่านความถี่สูงยิ่งจนถึงความถี่ไมโครเวฟจะอาศัยคุณลักษณะในการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสนามระยะไกล ดังนั้นการทดลองนี้เห็นว่าในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมแก่การศึกษาและวิจัยสำหรับงานทางด้านอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และการแพทย์ เนื่องจากย่านความถี่นี้สนามระยะใกล้และระยะไกลก็มีผลกระทบต่อช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นเช่นกัน เพราะฉะนั้น จากแบบจำลองได้ทำการทดสอบช่องสัญญาณโดยวัดในช่วงความถี่ 2-3 GHz โดยใช้สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศทดสอบทั้งด้านรับและส่ง และระยะแถบฟริสเนล (Fresnel region) สามารถคำนวณได้ 0.173 เมตร ซึ่งจากผลการทดลองช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นหรือฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณสามารถเห็นได้ว่าช่องสัญญาณบริเวณของสนามระยะไกลนั้นถูกผลกระทบของสัญญาณหรือพื้นที่ประสิทธิภาพการแพร่กระจายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปทำให้ช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศมีคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่มีการบกกวนกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศทางด้านส่งในระยะ 0.1 เมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณในสนามระยะใกล้ที่ 4 เมตรนั้น คุณลักษณะของช่องสัญญาณจะมีความสมบูรณ์มากกว่า ณ ช่วงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศแต่ก็มีขนาดลดลงตามระยะทางระหว่างด้านรับและส่งเพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ระยะ 0.1 เมตร เฟสจะไม่มีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงสังเกตว่าช่วงความถี่ของสายอากาศก็จะมีการเบี่ยงเบนเล็กน้อยต่างกับเฟสของช่องสัญญาณที่วัดในสนามระยะใกล้ที่ 4 เมตร สังเกตว่าเฟสยังคงความเป็นตลอดช่วงความถี่ของสายอากาศ จากนั้นสามารถทราบถึงผลของการสูญเสียเชิงวิถีตลอดช่วงระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับซึ่งกำลังงานการสูญเสียจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างของสายอากาศ และผลการทดลองที่สามารถรู้ถึงความสัมพันธ์ของสัญญาณทางด้านส่งและรับมีคุณลักษณะอย่างไร นั่นก็คือสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ซึ่ง ณ ระยะทางที่มากกว่าแถบฟริสเนล โชนซึ่งเป็นสนามระยะใกล้นั้นสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถบอกได้ว่าสายอากาศทางด้านรับจะรับสัญญาณจากการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งได้ดีในสนามระยะใกล้ทำให้ช่องสัญญาณของการสื่อสารระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนั้นมีคุณลักษณะที่ดีเมื่อพิจารณาการถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะใกล้

## 6.6 ข้อเสนอแนะ

จากแนวความคิดที่ได้ทำการศึกษาถึงช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับการสื่อสารไร้สายระยะสั้นนั้น โดยได้พยายามเลือกและทำการทดสอบในสภาวะแวดล้อมที่สามารถนำมาใช้งานจริงได้ภายในอาคาร ดังนั้นในการใช้งานของระบบใดๆ ความต้องการของประสิทธิภาพการใช้งานจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระบบการส่งผ่าน สายอากาศส่งและรับ สภาวะแวดล้อม และช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทั้งการสะท้อนและกระเจิงของคลื่น ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึง รวมทั้งเทคนิคและวิธีการต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริง

ในการสร้างแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้นเป็นเพียงแบบจำลองที่พยายามสร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นสำหรับระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่สามารถใช้งานภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารจริง แต่ก็ยังมีสภาวะแวดล้อมอื่นๆ อีกที่มีการใช้งาน จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาและวิจัยถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นซึ่งมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากในแต่ละสภาวะแวดล้อม อีกทั้งเพื่อทำการศึกษาดังเส้นทางที่คลื่นเดินทาง เทคนิคและวิธีการในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์อื่นๆ นอกเหนือจากนี้ที่สามารถทำนายถึงทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น วิธีต่างๆ ที่คลื่นเดินทางมาถึงทางภาครับ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญของการศึกษาเพื่อประโยชน์ต่อการออกแบบระบบการสื่อสารของเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับการสื่อสารระยะสั้นในปัจจุบันนี้และอนาคต

สุดท้ายนี้สมมุติฐานต่างๆ ของการวิจัย ทฤษฎีหรือแนวความคิดต่างๆ ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น การออกแบบและการทดลองวัดจนกระทั่งได้ถึงผลของการทดลองวิจัยนั้นผู้เขียนหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเป็นประโยชน์และแนวทางที่ดีให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษาค้นคว้าถึงเรื่องช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุภายในประเทศออกสู่ระดับนานาชาติต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Daniel M. Dobkin, "The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice," Communication Engineering Series, 2007.
- [2] B. Fette, R. Aiello, P. Chandra, Daniel M. Dobkin, A. Bensky, D. Miron, David A. Lide, F. Dowla and R. Olexa, "RF & Wireless Technologies," Newnes, 2007.
- [3] H. Lehpamer, "RFID Design Principle," ARTECH HOUSE, INC, 2008.
- [4] S. AHSON and M. ILYAS, "RFID Handbook Application, Security, and Privacy," CRC, 2008.
- [5] Simon R.Saunders, "Antenna and Propagation for Wireless Communication System," University of surrey, Guildford, UK, 2004.
- [6] F. Perez Fontan and P. Marino Espincira, "Modeling the Wireless Propagation Channel A Simulation Approach with MATLAB", University of Vigo, Spain, 2008.
- [7] T.S. Rappaport, "wireless communication-Principles and Practice," Practice Hall, Second Edition, 2002.
- [8] S. Promwong, P. supanakoon and J. Takada, "Impact of Waveform Distortion Due to Antennas on Free Space Transmission in Ultra Wideband Impulse Radio," IEICE 2004, Tokyo, Japan.
- [9] Z. Ning Chen and K. MAN Luk, "Antenna for Base Station in Wireless Communication," Communication Engineering, McGrawHill, 2008.
- [10] Y. Huang and K. Boyle, "Antenna from Theory to Practice," University of Liverpool, UK, Wiley, 2008.
- [11] S. Prowong, P. Supanakoon, M. Chamchoy and J. Takada, "Near-Field Characterization of a Free Space Channel Model for Ultra Wideband Radio", ICEMCO 2005, Tokyo, Japan.
- [12] P. Muthu Chidambara Nathan, "Wireless Communication," Tiruchirappalli, Tamil Nadu, 2007.
- [13] S. Duangsuwan, S. Promwong, N. Sukutamantanti, "Measurement and Evaluation of RFID Propagation Channel with in an Indoor Environment," ICACTE, pp. 393-395, Dec. 2008.

- [14] S. Duangsuwan, S. Promwong, N. Chentanomwong, "Measurement and Evaluation of RFID Transmission Characteristic for Long Range Systems," ICFN, pp. 187-190, March, 2009.
- [15] S. Duangsuwan and S. Pormwong, "Polarimetric Transmission Loss of RFID Antenna at 2.4 GHz for Short Range Systems," ISCIT, pp. 907-910, September, 2009, Incheon, Korea.
- [16] S. Duangsuwan and S. Promwong, "Indoor Measurement and Modeling of Diffraction at a Shadowing for RFID Systems," ISAP, pp. 560-563, October, 2009, Bangkok, Thailand.
- [17] S. Duangsuwan, T. Leukachorn, S. Chinsawatpan and S. Promwong, "Experimental Study for Polarimetric Measurement of RFID Transfer Function with in an Indoor Environment," MICC, pp. 891-895, Kuala Lumpur, Malaysia, December, 2009





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

#### งานประชุมในระดับนานาชาติ

1. S. Duangsuwan, S. Promwong, N. Sukutamantanti, "Measurement and Evaluation of RFID Propagation Channel with in an Indoor Environment," ICACTE, pp. 393-395, Phuket, Thailand December. 2008.

#### งานประชุมในระดับนานาชาติ

2. S. Duangsuwan, S. Promwong, N. Chentanomwong, "Measurement and Evaluation of RFID Transmission Characteristic for Long Range Systems," ICFN, pp. 187-190, Bangkok, Thailand March, 2009.

#### งานประชุมในระดับนานาชาติ


3. S. Duangsuwan and S. Promwong, "Indoor Measurement and Modeling of Diffraction at a Shadowing for RFID Systems," ISAP, pp. 560-563, Bangkok, Thailand, October, 2009.

#### งานประชุมในระดับนานาชาติ

4. S. Duangsuwan, T. Leukachorn, S. Chinsawatpan and S. Promwong, "Experimental Study for Polarimetric Measurement of RFID Transfer Function with in an Indoor Environment," MICC, pp. 891-895, Kuala Lumpur, Malaysia, December, 2009

**ICACTE 2008**

2008  
International  
Conference  
on  
Advanced  
Computer  
Theory  
and  
Engineering

  
**IACSIT**

**ICACTE 2008**  
 International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering

๒๕๕๒  
 ๒๕๕๓  
 ๒๕๕๔  
 ๒๕๕๕  
 ๒๕๕๖  
 ๒๕๕๗  
 ๒๕๕๘  
 ๒๕๕๙  
 ๒๕๖๐  
 ๒๕๖๑  
 ๒๕๖๒  
 ๒๕๖๓  
 ๒๕๖๔  
 ๒๕๖๕  
 ๒๕๖๖  
 ๒๕๖๗  
 ๒๕๖๘  
 ๒๕๖๙  
 ๒๕๗๐  
 ๒๕๗๑  
 ๒๕๗๒  
 ๒๕๗๓  
 ๒๕๗๔  
 ๒๕๗๕  
 ๒๕๗๖  
 ๒๕๗๗  
 ๒๕๗๘  
 ๒๕๗๙  
 ๒๕๘๐  
 ๒๕๘๑  
 ๒๕๘๒  
 ๒๕๘๓  
 ๒๕๘๔  
 ๒๕๘๕  
 ๒๕๘๖  
 ๒๕๘๗  
 ๒๕๘๘  
 ๒๕๘๙  
 ๒๕๙๐  
 ๒๕๙๑  
 ๒๕๙๒  
 ๒๕๙๓  
 ๒๕๙๔  
 ๒๕๙๕  
 ๒๕๙๖  
 ๒๕๙๗  
 ๒๕๙๘  
 ๒๕๙๙  
 ๒๖๐๐

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Measurement and Modeling of RFID Propagation channel with in an Indoor Environment

S. Duangsuwan, S. Promwong and N. Sukumatantani  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Department of Information Engineering, Faculty of Engineering  
 Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
 Email: {x1061018, kpsathap, ksnikorn}@kmitl.ac.th

### Abstract

The radio frequency identification (RFID) technology was automatic identify becomes essential in the service an indoor environment such as contactless smart card and libraries [10] at high frequency in free space transfer function in wireless communication usually consider used Friis's formula for analysis. This paper the RFID propagation channel at 2.45 GHz with indoor environment. The measurement result are evaluation by using Friis's transmission formula to find the magnitude and phase channel transfer function, path loss, and power delay profile. This technique is very useful for analyzed the signal strength and radio propagation loss of RFID transmission signal.

**Keywords:** RFID, antenna transfer function, Friis's transmission formula, propagation channel

### 1. Introduction

Radio Frequency Identification RFID technology is used in short and long range communication technology [1]. It has several important advantage over the traditional barcode. and a small electronic assembly a transponder fitted to it that would respond with a burst of radio frequency (RF) carrier modulated identification data when interrogated by a RF signal on a different frequency from either a handheld scanner/reader. This burst of identifying data was intercepted by the scanner, decoded and used to both identify the tagged item and for it to be counted. The early RFID tagging means were battery powered so called active devices [4]. Since then RFID use, and potential, has greatly increased in large part due to the unit cost, size and power needs, of the essential tag having decreased by many orders [1]. RFID is used in radio waves for automatic identification about people or object and implement in work about business, logistic, industry, smart card, animal tagging and

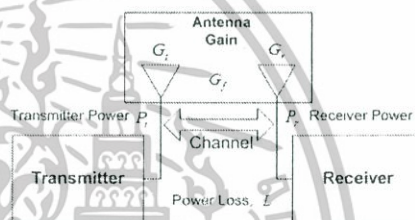


Figure 1. RFID transmission system.

keyless entry [12]. RFID operates in different frequency band such as LF 125 – 134.2 kHz, HF 13.56 MHz, UHF 868 – 915 MHz, Microwave 2.45 GHz. RFID system in which the gap between the reader and the transponder or tag RFID is greater than 3 meters are called long-range system and could accept transfer large packets of data quickly [1]. These system are operated at the microwave frequencies 2.45 GHz. The communication of RFID system between the reader and the transponder or tag is electromagnetic propagation coupling and high frequency are short range systems based on inductive coupling between the reader and the transponder or tag antennas through ultra-high frequency into microwave RFID system are long-range system [12].

This paper investigate measurement the part of Radio propagation behavior of RFID system in frequency range 2.45 GHz by this model is designed surrounding an indoor environment of RFID wireless system [8] after that analysis transmission loss [11] and transmission power by illustrated system analysis of RFID signal in Fig. 1. is waveform of experiment. The Friis's transmission formula for analysis the signal strength and radio propagation loss between the reader and the tag by using Tx and Rx as a microtrip

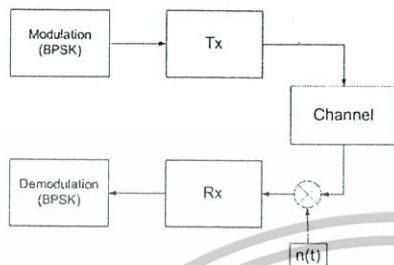


Figure 2. Block diagram of RFID transmission.

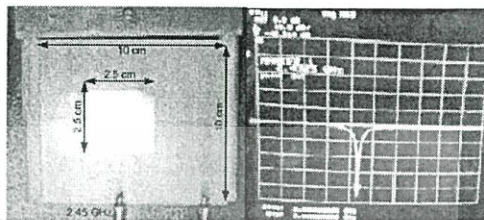


Figure 4.  $|S_{11}|$  characteristics of microstrip patch antenna.

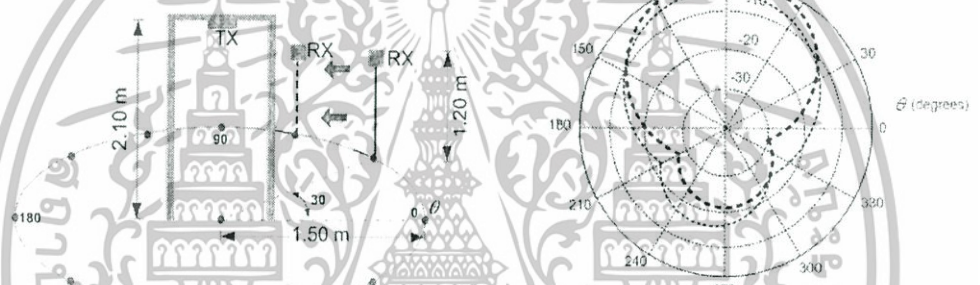


Figure 3. The measurement system modeling.

Figure 5. Radiation pattern of microstrip patch antenna.

antenna [7] with fix transmitter and distance thus move the receiver in each angle an indoor environment. The result of experiment such as magnitude and phase channel transfer function, path loss and power delay profile.

2. Theory of RFID Transmission system

2.1. Free space transfer function in RFID

We used Friss's transmission formula evaluate signal between transmitter and receiver in RFID system. Because Friss's transmission formula is suitable and agreeable for narrow band communication or wireless system [6]-[2].

The power transfer ratio in free space is give by

$$G_{Friss}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_r(f)G_t(f) \quad (1)$$

Where  $G_t$  and  $G_r$  are the antenna gain of the transmitting and receiver antennas, respectively. The free space propagation gain is the wavelength,  $\lambda = \frac{c}{f}$ ,  $c$  is the velocity of the light,  $f$  is the frequency and  $d$  is the distance between transmitter and receiver antennas. The Friis's transmission formula is extended taking into account the transmission waveform as [9]

$$H_{Friss}(f) = \frac{V_r}{V_t} = H_f(f)\vec{H}_r(f)\vec{H}_t(f) \quad (2)$$

Where is a complex transfer function vector of the antenna relative to the isotropic antenna [9],

$$H_f(f) = \frac{\lambda}{4\pi d} \exp(-jkd) \quad (3)$$

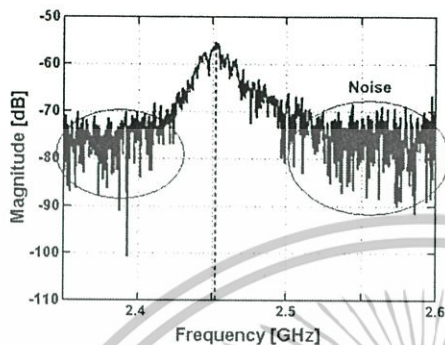


Figure 6. Channel transfer function at 90°: Magnitude

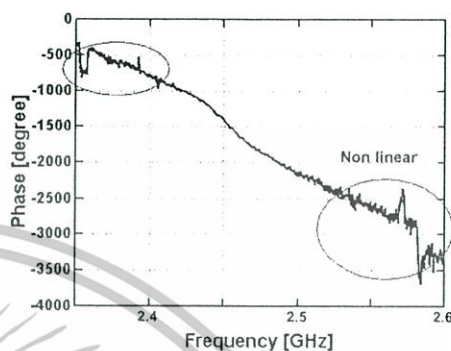


Figure 7. Channel transfer function at 90°: Phase

is the free space transfer function where

$$k = \frac{2\pi}{d} \tag{4}$$

is the propagations constant.

### 2.2. The transmission Signal and Path loss

The signal for transmit can be represented as

$$s_{BPSK}(t) = m(t) \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \sin(2\pi f_c t + \theta_c) \tag{5}$$

where  $\sin(2\pi f_c t + \theta_c)$  is applied as the carrier, and  $\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}}$  is the data signal,  $m(t)$  is applied as the modulated waveform [3].

The indoor environment path loss model chosen for the purpose of simulation is given in equation

$$P_L(dB) = P_L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \tag{6}$$

Where  $d_0$  is arbitrary reference distance;  $n$  is a value that depend on the surroundings and building types an indoor following Table 1 ;  $d$  is the separation distance between the antenna.

### 2.3. The Receiver Signal

The transmitted signal pass through the RFID channel including the transmitter and receiver antenna. However,

Table 1. Value of  $n$  characterizes different environment.

Environment	Value( $n$ )
Free space	2
Urban area	2.7-3.5
Shadowed urban area	3-5
Indoor LOS	1.6-1.8
Indoor NLOS	4-6

the total receiving signal for can be expressed as

$$r_{BPSK}(t) = m(t) \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \sin(2\pi f_c t + \theta_c) + n(t) \tag{7}$$

where  $n(t)$  is additive white Gaussian noise.

For wireless system which grossly quantify the multi path channel are used. The mean excess delay, rms delay spread, and excess delay spread are multi path channel parameter that can be determined from a power delay profile [5] is given by

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \tag{8}$$

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \tag{9}$$

$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \tag{10}$$

where  $\bar{\tau}$  is mean excess delay,  $\sigma_\tau$  is rms delay spread and  $P(\tau_k)$  is power delay profile

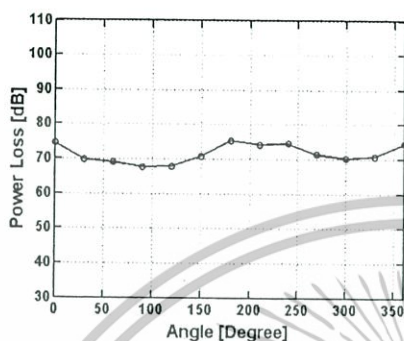


Figure 8. Path loss of RFID Propagation channel.

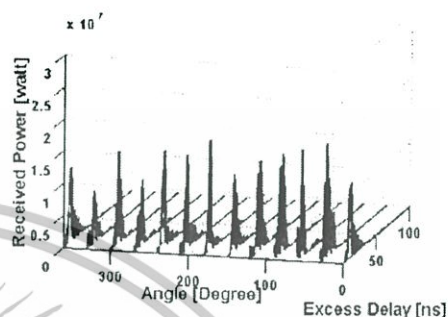


Figure 9. The power delay profile of transmission system.

Table 2. Experimental setup parameters.

Parameter	Value
Frequency range	2 GHz to 3 GHz
Number of frequency points	801
Dynamic power range	80 dB
Tx antenna height	2.10 m
Rx antenna height	1.20 m
Distance between Tx and Rx	1.50 m
Angel between Tx and Rx	0-360 $\theta$
Antenna type	Microstrip

### 3. Measurement system

By using the vector network analyzer (VNA) in the channel measurement, complex transfer function can be measured. The transfer functions were measured as  $S_{21}$  in the frequency domain. Calibrations, The VNA was operated in the response measurement mode, where Port-1 was used as the transmitter port (Tx) and Port-2 was used as the receiver port (Rx). The Tx antennas were fixed at the height of 2.10 meters and Rx antennas were fixed at the height 1.20 meters and distance between transmitter antennas with receiver antennas of 1.50 meters with the number of frequency point of 801 are taken in the indoor environment at the room of Department of information engineering (KMITL). by We will designed modeling in experiment to antenna between Tx and Rx in measured surrounding can be modeling an indoor environment of wireless communication system, This model can be test with body personal area network then however this model is tested transmission signal between Tx and Rx antenna an indoor environment propagation loss

of system and bit error rate. we have chosen the microstrip antenna for measurement is Tx and Rx antenna show in Fig. 4. The important parameters for the experiments are listed in Table 2.

### 4. Results

This from are measurement, transmission channel of system the magnitudes frequency responses at 2.45 GHz was considers of frequency by illustrated in the Fig. 6. was the transfer function of signal and indicate of energy power, The Observe frequency at 2.45 GHz has a little the noise signal, After that the observe phase transfer function has a interval of frequency response at 2.4 – 2.5 GHz so in this space was a little the noise signal but the best at 2.45 GHz by illustrated in the Fig. 7. The next is show path loss between transmitter and receiver has a low loss in the interval of angle at 30 – 150  $\theta$  and Finally was show illustrated of power delay profile in the Fig. 8 and 9.

### 5. Conclusion

This paper, may be the part of the research for implementation in the future of RFID technology in long range system or the detail of propagation channel, can be applied into operates about using fast identifies smart card and high speeds of data in an indoor environment, The result from transmission can be know different about propagation loss and characteristic channel of RFID system, path loss, and power delay profile. The can be analyzed the signal strength and radio wave propagation of RFID transmission signal in an indoor environment at different angle between the reader antenna and the transponder or tag antenna for frequency at

2009 International Conference on Future Networks (ICFN 2009)



# International Conference on Future Networks

Bangkok Thailand  
7-9 March 2009



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Measurement and Evaluation of RFID Transmission Characteristic for Long Range Systems

S. Duangsuwan, S. Promwong and P.Chengtanomwong  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Department of Information Engineering, Faculty of Engineering  
 Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
 Email: {x1061018, kpsathap, kspana}@kmitl.ac.th

**Abstract**—The radio frequency identification (RFID) is a wireless communications that lets computer reads the identity to tag at 2:45 GHz can be fast identified the high speeds at 3 meters read range guaranteed at speeds of 100 km/hr. This paper used the model for expressway by supposing receiver moves to fixed transmitter, the microstrip antenna was used for both transmitter and receiver. The Friis's transmission formula is used for analysis. We considered characteristics of antennas performance at each distance transmission channel, magnitude and phase channel transfer function, bit error rate, path loss and rms delay spread were the results of experimental. This technique is very to useful for analyzed the signal performance and transmission signal in the RFID networks

**Keywords**—RFID transmission signal, antenna transfer function, Friis's transmission formula

### I. INTRODUCTION

Radio Frequency Identification (RFID) is the next generation wireless communication technology applicable to various fields such as distribution, circulations, transportation networks, etc. [1] RFID is contact technology that identifies objects attached with tag or transponder. The reader and the tag consist of microstrip antennas RFID readers obtain the information of objects and direction through communication tag antenna. Minimizing attenuation among RFID reader and tag signals has a substantial effect on performance because tag recognition rate effectively determines RFID system performance. However, the RFID distance problem has short range system [2]. The communication between the reader and the tag RFID is greater above 1 meter are called long-range system and could accept transfer large packets of data quickly These system are operated at the microwave frequencies 2:45 GHz is short wavelengths of these frequency ranges facilitate the construction of antenna with far field smaller dimension and greater efficiency than would be possible using low frequency range [3]-[4]. The communication of RFID system this frequency between the

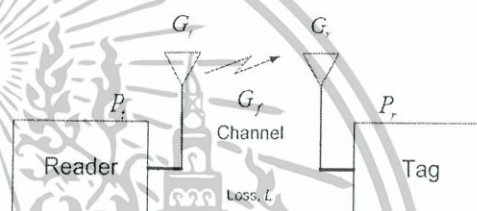


Figure 1. RFID Transmission system.

reader and the transponder or tag is electromagnetic propagation [5].

This paper is shows the part behavior of system in frequency range 2:45 GHz by analysis transmission loss and performance of RFID by show system analysis of signal in Fig.1. is waveform of experiment, by using Friiss transmission formula for analyzed these can be test the strength and radio propagation loss between the reader and the tag and then studies the performance of channel by considered the antenna using was the both microstrip patch antenna [6] between receiver and transmitter.

### II. THEORY OF RFID TRANSMISSION SYSTEM

#### A. Propagation Channel RFID

We used Friiss's transmission formula evaluate signal between transmitter and receiver in RFID system. Because Friis's transmission formula is suitable and agreeable for narrow band communication or wireless system [7]. The power transfer ratio in free space is give by

$$G_{Friis}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t(f) G_r(f) \quad (1)$$

Where  $G_t$  and  $G_r$  are the antenna gain of the transmitting and receiver antennas, respectively [8]. The free space propagation gain is the wavelength  $\lambda = \frac{c}{f}$ ,  $c$  is the velocity of the light,  $f$  is the frequency and  $d$  is the distance between transmitter and receiver antennas. The

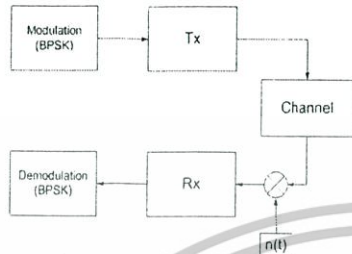


Figure 2. Block of RFID transmission.

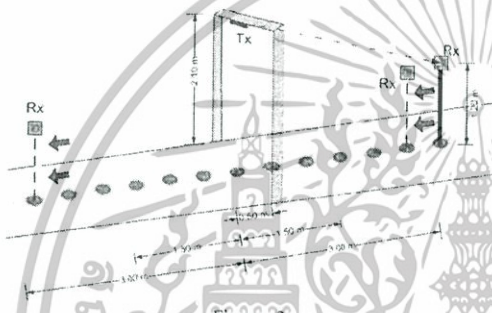


Figure 3.

Friis's transmission formula is extended taking into account the transmission waveform as

$$H_{Friis}(f) = \frac{V_r}{V_t} = H_f(f) \cdot \bar{H}_e(f) \cdot \bar{H}_r(f) \quad (2)$$

Where  $H_f$  is a complex transfer function vector of the antenna relative to the isotropic antenna [9]

$$H_f(f) = \frac{\lambda}{4\pi d} \exp(-jkd) \quad (3)$$

is the free space transfer function where

$$k = \frac{2\pi}{d} \quad (4)$$

is the propagations constant.

**B. The Transmission Signal Waveform**

The signal for transmit can be represented as

$$S_{BPSK}(t) = m(t) \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \sin(2\pi f_c t + \theta_c) \quad (5)$$

Where  $\sin(2\pi f_c t + \theta_c)$  is applied as the carrier, and

$\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}}$  is the data signal,  $\psi m(t)$  is applied as the modulated waveform.

Table 1. Value of  $n$  Characterizes different Environment.

Environment	Value( $n$ )
Free space	2
Urban area	2.7-3.5
Shadowed urban area	3-5
Indoor LOS	1.6-1.8
Indoor NLOS	4-6

**C. The Path Loss an indoor Enviroment**

The indoor environment path loss model chosen for the purpose of simulation is given in equation [10]

$$P_L(dB) = P_L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (6)$$

Where  $d_0$  is arbitrary reference distance;  $n$  is a value that depend on the surroundings and building types an indoor following Table 1 ;  $d$  is the separation distance between the antenna.

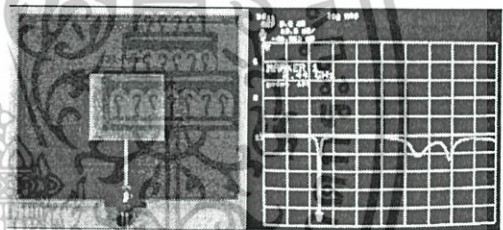


Figure 4.  $|S_{11}|$  Characteristic of microstrip patch antenna.

**D. The Receiver Signal Waveform**

The transmitted signal passes through the RFID channel including the transmitter and receiver antenna. However, the total receiving signal for can be expressed as

$$R_{BPSK}(t) = m(t) \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \sin(2\pi f_c t + \theta_c + n(t)) \quad (7)$$

Where  $n(t)$  is additive white Gaussian noise.

For wireless system which grossly quantifies the multi path channel are used. The mean excess delay, rms delay spread, and excess delay spread are multi path channel parameter that can be determined from a power delay profile [11] is given by

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (8)$$

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P_{(\tau_k)} \tau_k^2}{\sum_k P_{(\tau_k)}} \quad (9)$$

$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (10)$$

Where  $\bar{\tau}$  is mean excess delay,  $\sigma_\tau$  is rms delay spread and  $P_{(\tau_k)}$  is power delay profile Bit error rate (BER) are the probability of error receiver signal can also be defined in terms of probability of error [9], can be written as

$$BER = Q \sqrt{\frac{(E_b/N_0) f_b c_c}{b_r}} \quad (11)$$

Where  $c_c$  correlation coefficient of radio between receiver correlation and transmitter correlation is,  $f_b$  is wide region of frequency,  $b_r$  is rate of transfer (bps) as following [11] Can be represented as

$$c_c = \frac{\int_0^\infty V_i(\tau) V_r(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_0^\infty V_i(\tau) V_i(t+\tau) dt \cdot \int_0^\infty V_r(\tau) V_r(t+\tau) dt}} \quad (12)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \quad (13)$$

$Q$  is cumulative distribution function (Gaussian distribution),  $E_b$  is the energy in one bit and  $N_0$  is the noise power spectral density, so  $E_b/N_0$  is a form of signal to noise ratio [12].

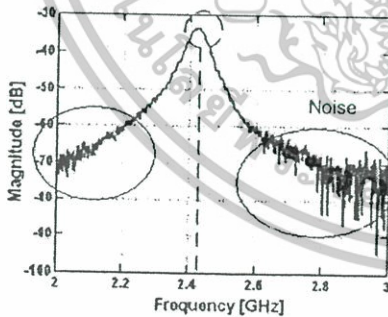


Figure. 5. Channel Transfer Function at 90  $\theta$ : Magnitude

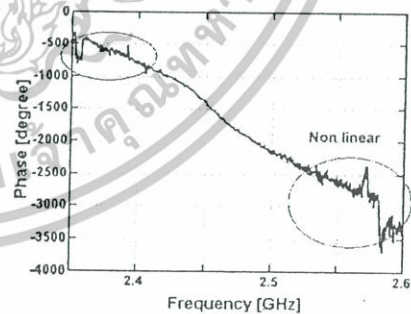


Figure. 6. Channel Transfer Function at 90  $\theta$ : Phase

### III. MEASUREMENT SYSTEMS

#### A. Parameter of Measurement

The measurement parameters are listed in Table 2. It is note that the calibration of VNA is done at the connectors of the cables to be connected to the antennas. Therefore, all impairment of the antenna characteristic are included in the measurement results.

#### B. Antenna Under Test

In this experiment, microstrip antenna with has a frequency at 2.45 GHz and size of patch 36.4  $\times$  36.4 mm. and size of ground 100  $\times$  100 mm. is used in both of side as antennas under test (AUT). The structure of the RFID antennas and the reflection coefficient  $S_{11}$  of the antenna feed point are show in Fig. 4.

Table. 2 Experiment Parameter Setup

Parameter	Value
Frequency range	2 GHz to 3 GHz
Number of frequency points	801
Tx antenna height	2.10 m
Rx antenna height	1.20 m
Distance between Tx and Rx	0-3 m
Power of Tx	1 W
Bit rate	1 Mbps
Antenna type	Microstrip

#### C. Measurement Setup

By using the vector network analyzer (VNA), complex transfer function can be measured. The transfer functions were measured as  $S_{21}$  in the frequency domain. The VNA was operated in the response measurement mode, where Port-1 was used as the transmitter port (Tx) and Port-2 was used as the receiver port (Rx). The TX antennas were fixed

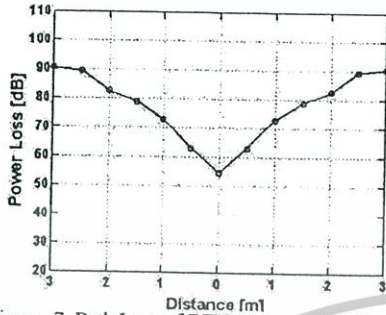


Figure 7. Path Loss of RFID Propagation Channel.

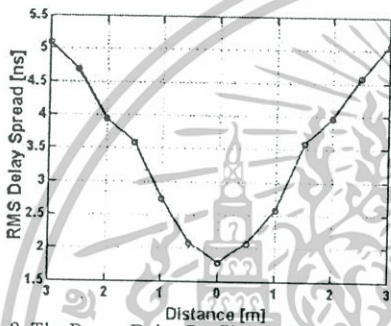


Figure 8. The Power Delay Profile of transmission system.

at the height of 2.10 m and Rx antennas were fixed at the height 1.20 m and moved distance between transmitter antennas with receiver antennas each 0.50 m.

IV. RESULTS

This all a results, we evaluated experiment results by using the vector network analyzer (VNA), the measured antenna transfer function with the number of frequency point of 801 are taken on the outdoor environment at the straight road a building side of faculty engineering (KMUTL). The data measured shows that radio propagation behavior of RFID communication in frequency range at 2:45 GHz. Show the magnitude and phase channel transfer function in Fig. 5 and 6. The Observed a results of frequency response magnitude of system had a linear in the range 2:45 GHz at the 0:50 meter being the microstrip antenna is linear polarization. Show the path loss and rms delay spread Fig. 7 and 8. The results of the model we can be conclusion the exceed distance addition is happen as the loss. Show bit error rate (BER) in Fig. 9.

V. CONCLUSION

In this paper, we evaluated of RFID using for expressway or highway and these researches was the essential to guideline-of performance analysis system in the future, It this study and analysis radio performance channel of RFID

transmission signal. The result from transmission signal knows different of distance in propagation loss and characteristic channel of RFID system. The bit error rate and signal to noise ratio, path loss and rms delay spread can be analyzed the signal strength and radio propagation loss of RFID transmission signal at different angle between the reader antenna and the transponder or tag antenna for frequency at 2:45 GHz is long range system. The experimental results are show. The transmission channel is necessary for analysis and we believe our study would give a good guideline for the research in future work.

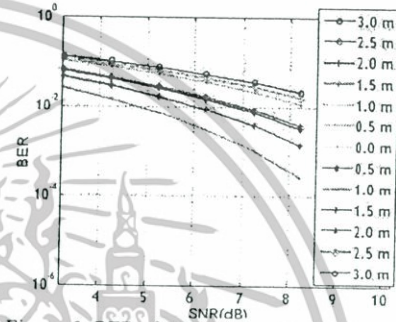


Figure 9. BER of RFID Transmission system.

ACKNOWLEDGMENT

The radio frequency identification has to the investigated more people or the development and researches in the best of application for implement.

This model can be for applies to the experiment increases by the authors will representations as the next opportunity.

REFERENCES

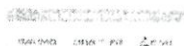
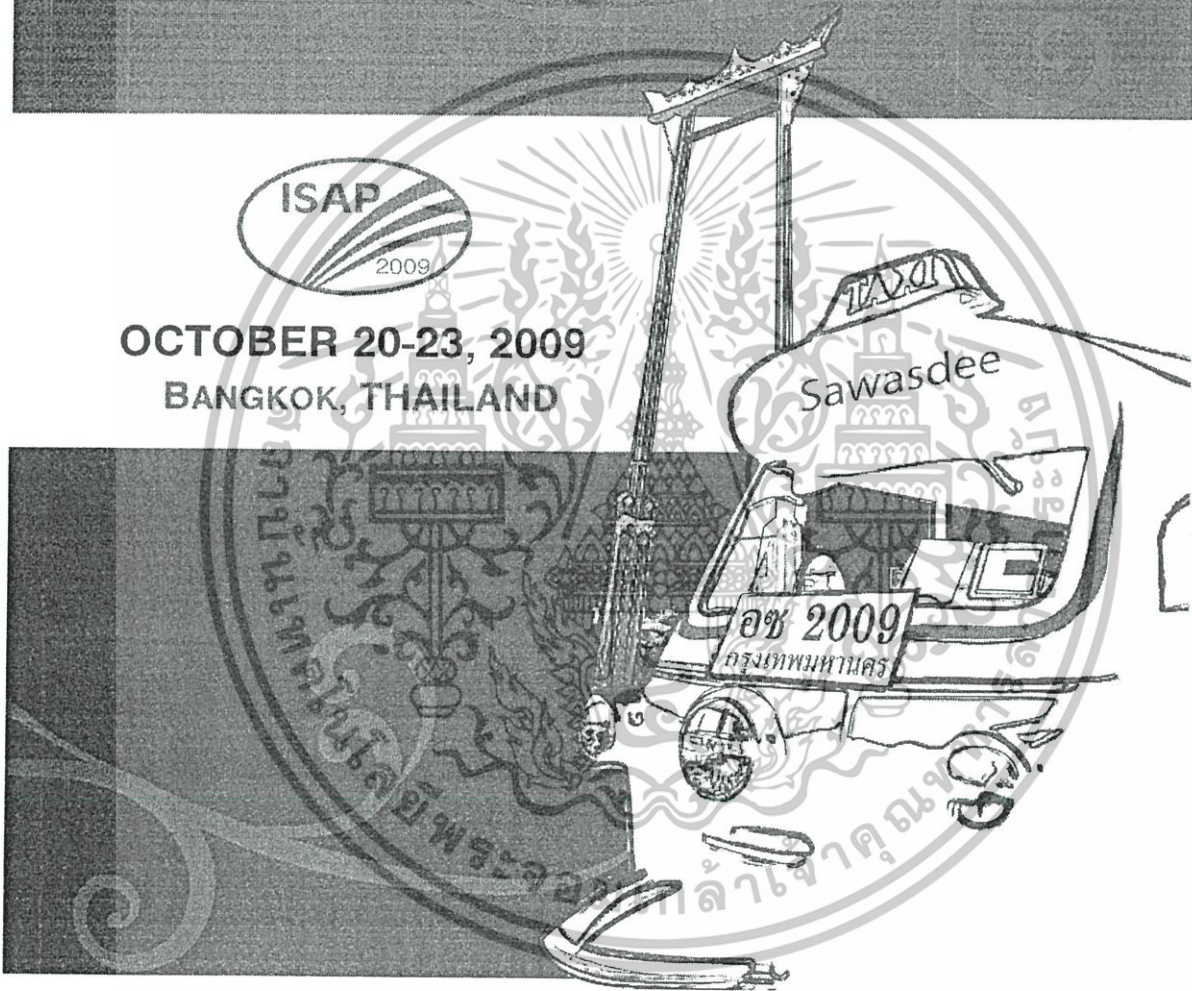
- [1] Rolf Clauserg, RFID and sensor network, University of St. Switzerland, Sep.27, 2004
- [2] A Basic Introduction of RFID Technology and its use in the supply chain January 2004.
- [3] A Basic Introduction of RFID Technology and its use in the supply chain, January 2004.
- [4] L. Jeremy, The history of RFID, IEEE Potentials, vol. 24, no. 4, pp. 811, 2005.
- [5] K. Finkenzeller, RFID Handbook, John Wiley and Sons, New York USA, 2nd edition, 2003.
- [6] Jean Francois Zurcher, Fred E.Gardioli Broadband Patch Antennas Attach House Boston-London
- [7] H.T. Friis, A note on a simple transmission formula, Proc. IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254256, May 1946
- [8] Simon R.Saunders, Antenna And Propagation for Wireless Communication System, University of surrey, Guildford, Uk
- [9] T.S. Rappaport, wireless communication - Principles and Practice, Practice Hall, Second Edition, 2002.
- [10] United States of America, Path loss calculations for ultra-wideband signals in indoor environments, ITUR Document 3K/30-E, pp. 1-14, Nov. 2003.
- [11] P. Malison, S. Promwong, N. Sukutamatanti, A Indoor measurement of RFID transmission gain for wireless BPAN.

The **2009** International Symposium on  
Antennas and Propagation (ISAP 2009)

**Program and Abstracts**



**OCTOBER 20-23, 2009**  
**BANGKOK, THAILAND**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Indoor Measurement and Modeling of Diffraction at a Shadowing for RFID Systems

S. Duangsuwan and S. Promwong

Dept. of Information Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.  
Email: x1061018, kpsathap@kmitl.ac.th

### Abstract

In present, RFID (Radio Frequency Identification) is an automatic identify wireless data collection technology becomes conveniences in detection with radio frequency. Therefore, mechanism of wave diffraction analyzed have very essential for wireless systems. At 2.4 GHz band was propagating by transmitter(Reader) towards receiver(Tag) in passive communication link. So, this paper we measured modeling and considered level obstruction of these characteristic wave diffracting which based on Friis' transmission formula. Furthermore, magnitude and phase antenna transfer function, diffraction loss, correlation coefficient and power delay, respectively are evaluate.

### 1 Introduction

The communication of RFID system between the reader and the transponder or tag is divided into 2 methods that are inductive coupling and electromagnetic propagation coupling. In case of low frequency and high frequency are short range systems or long wavelength based on inductive coupling or magnetic coupling which was a near field between the reader and the transponder or tag also at ultra-high frequency into microwave RFID system are long-range system or short wavelength base on backscatter coupling or electromagnetic coupling which was a far field between the reader and the antennas.

In this paper, we begin investigated characteristic receive signal when has the obstacle of RFID systems which modeling was tracking of product in logistic industrial. In our experiment we interested wave diffracting of level obstruction between transmitter(Reader) and receiver(Tag), which we analyzed as follow in knife-edge diffraction model based on Friis' transmission formula and extended waveform as transfer function. As the microstrip patch antenna was using both to transmitter and receiver antenna because easily to calibration and applies to actually.

### 2 RFID Propagation analysis

#### 2.1 Friis' Equation and Antenna Gains

It can be shown that the power received by RFID tag is determined by the version of Friis' equation that is listed below that takes into account the relative positions of the tag and the reader's antennas:

$$P_R = P_T \frac{G_T(\theta_T, \phi_T) G_R(\theta_R, \phi_R) \lambda^2}{(4\pi r)^2} (1 - |\Gamma_T|^2)(1 - |\Gamma_R|^2) |p_T \cdot p_R|^2 \quad (1)$$

where  $P_T$  and  $P_R$  are the power from the transmitting (reader) and the power from the receiving (tag) antenna.  $G_T$  and  $G_R$  represent, respectively, the antenna gains of the transmitting and receiving antennas,  $r$  is the distance separating the two antennas, and  $\lambda$  is the wavelength,  $(\theta_T, \phi_T)$  and  $(\theta_R, \phi_R)$  are the spherical coordinates to define transmitter antenna and receiver,  $p_T$  and  $p_R$  is the transmitter and receiver polarization vector,  $\Gamma_T$  and  $\Gamma_R$  is the transmitter and receiver reflection coefficient. [1]

The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009)  
October 20-23, 2009, Bangkok, THAILAND

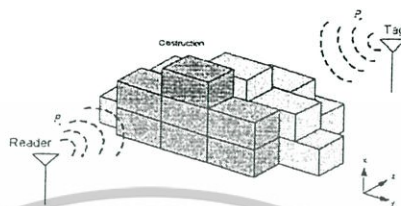


Figure 1: Isotropic model of RFID transmission.

## 2.2 RFID Knife-edge Diffraction model

This can be explained by Huygen's principle, consider a transmitter and receiver with an obstructing screen in between shown in Fig. 1. Let  $h_t$ ,  $h_r$  is Tx and Rx height respectively, an obstructing screen of effective height  $h$  with infinite width is placed between them at a distance  $d_1$  from the Tx and  $d_2$  from Rx. The difference between the direct path and diffracted path called exceed path length ( $\Delta$ ), can be calculated from the geometry [2]

$$\Delta = \sqrt{d_1^2 + h^2} + \sqrt{d_2^2 + h^2} - (d_1 + d_2) \quad (2)$$

The Equation (5) is normalized using a Fresnel diffraction parameter

$$\nu = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (3)$$

Then the diffraction loss is given by

$$-20 \log |F(\nu)| \quad (4)$$

## 2.3 Correlation Coefficient and Power Delay

The correlation coefficient is ratio between receive correlation and transmit correlation can be written show as

$$C_c = \frac{\int_0^\infty |V_r(f, d)|^2 df}{\int_0^\infty |V_t(f, d)|^2 df \cdot \int_0^\infty |H_c(f, d)|^2 df} \quad (5)$$

where  $V_r(f, d)$  and  $V_t(f, d)$  is receive signal and transmit signal, respectively.  $H_c(f, d)$  is the transfer function in systems. [3]

The mean excess delay and root mean square or RMS delay spread are multi path channel parameter that can be represented form power delay profile given by

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P_{(\tau_k)} \tau_k}{\sum_k P_{(\tau_k)}} \quad (6)$$

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P_{(\tau_k)} \tau_k^2}{\sum_k P_{(\tau_k)}} \quad (7)$$

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (8)$$

where,  $\bar{\tau}$  is mean excess delay,  $\sigma_\tau$  is RMS delay spread,  $P_{(\tau_k)}$  is power signal and  $a_k$  is amplitude of signal. [4]

The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009)  
October 20-23, 2009, Bangkok, THAILAND

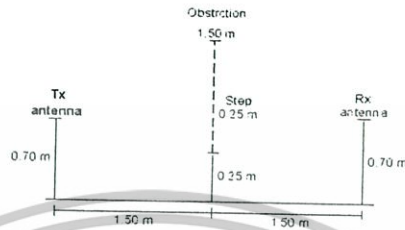


Figure 2: Measurement modeling setup.

Table 1: Experimental setup parameters.

Parameter	Value
Frequency range	2 GHz to 3 GHz
Number of frequency points	801
Dynamic power range	80 dB
Antenna type	Microstrip patch antenna
Polarization	Vertical

### 3 Measurement setup

By using the vector network analyzer (VNA), complex transfer function can be measured. The transfer functions were measured as  $S_{21}$  in the frequency domain. The model for measurement as show illustrated in Fig. 2, and chosen the microstrip patch antenna for experiment the both Tx and Rx antennas. The important parameters for the experiments are listed in Table 1.

#### 3.1 The Antenna Under Test

The microstrip patch antenna with has a frequency at 2.4 GHz and size of patch  $36.4 \times 36.4$  mm and size of ground  $100 \times 100$  mm is used the both of antenna under test and the characteristic of microstrip patch antenna has been reflection coefficient lower  $-20$  dB in directional pattern beamwidth.

### 4 Results

We proposed waveform analyze as following knife-edge diffraction model was interesting the antenna transfer function can be shown as Fig.3 which the magnitude about  $-5$  dB, as channel transfer function has very attenuation  $-50$  dB. Furthermore, we shown diffraction loss and correlation coefficient of signal in Fig. 3 also, which the indoor environment have affecting to measurement and correlation coefficient can describe to distortion between transmitter (reader) and receiver (tag) signal, and power delay of receive signal can be expressed as Fig.4. If consider as simulating knife-edge diffraction loss increase form level obstruction conversely, the result when obstacle higher than transmitter (reader) and receiver (tag) the wave diffracting may be insert between direct path and diffraction path possibly.

The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009)  
October 20-23, 2009, Bangkok, THAILAND

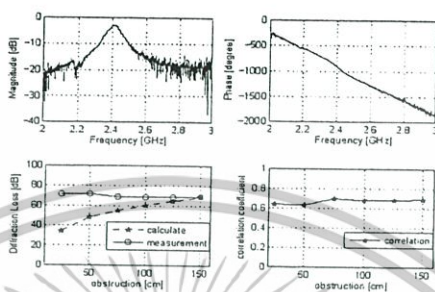


Figure 3: Measurement results.

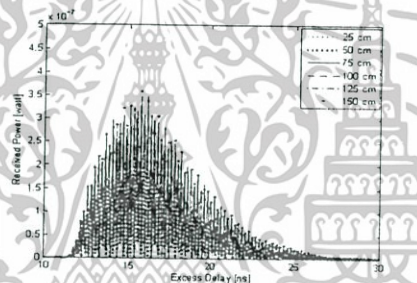


Figure 4: Power delay of receive signal.

## 5 Conclusion

This paper, a major propagation mechanism these diffraction the basis effect of attenuation and phase velocity which were introduced extremely, and provide a basis for practical prediction of RFID wireless communication system performance. Furthermore, this paper can be addition analysis in the investigate signal path by using *direction of arrival (DOA)* methodology which we will proposed in next paper.

## References

- [1] S. Ahson and M. Ilyas, *RFID Handbook: Application, Technology, Security, and Privacy*, CRC, 2008.
- [2] P. Muthu Chidambara Nathan, *Wireless Communications*, Tiruchirappalli, Tamil Nadu
- [3] S. Duangsuwan, S. Promwong and N. Sukutamantanti, *Measurement and Evaluation of RFID Propagation Channel with in an Indoor Environment*, ICACTE, pp. 393-395, 2008
- [4] S. Duangsuwan, S. Promwong and P. Chentanomwong, *Measurement and Evaluation of RFID Transmission Characteristic for Long Range Systems*, ICFN, pp. 65-68, 2009

PROCEEDINGS

# MICC 2009

2009 IEEE 9<sup>th</sup> Malaysia International  
Conference on Communications

with a Special Workshop on Digital TV Contents  
15 - 17 December 2009 . Seri Pacific Hotel, Kuala Lumpur

Editors :  
Mahamod Ismail, Borhanuddin Mohd Ali & Hafizal Mohamad

<http://micc.org.my>

Jointly Organized by:



IEEE  
COMMUNICATION  
SOCIETY  
Malaysia Chapter



IEEE



Malaysia  
VTS



In Co-operation with :



UPM  
UNIVERSITI  
PERTALIAN  
MELAYU

UNIVERSITI  
TENAGA  
NAGARA



UNIVERSITI  
KUALANGSAAN  
MALAYSIA  
National University of Malaysia



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Experimental Study for Polarimetric Measurement of RFID Transfer function with in an Indoor Environment

S. Duangsuwan <sup>1</sup>, T. Leukachorn <sup>2</sup>, S. Chinsawatpan <sup>3</sup> and S. Promwong <sup>4</sup>

Information Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

<sup>1</sup>kdsarun@kmitl.ac.th

<sup>2</sup>klthongc@kmitl.ac.th

<sup>3</sup>x2611334@kmitl.ac.th

<sup>4</sup>kpsathap@kmitl.ac.th

**Abstract**—Radio Frequency Identification (RFID), is unlicensed industrial, scientific, and medical (ISM) band at 2.4 GHz. The same principle as that used in long-range radio communication links. The reader's antenna generates a propagating radio wave use *far-field communication*, which is received by the antenna in the tag. This paper, the microstrip patch antennas used both for transmitter antenna and receiver antenna likewise the reader antenna and tag antenna, simple patch antenna of this type radiates a linearly polarized wave. We investigated the transmission loss the RFID short range systems. Furthermore, we believed our studies can be designed the antennas for RFID systems.

**Keywords**- polarimetric measurement, RFID transmission loss, Friis' transmission formula, channel transfer function.

### I. INTRODUCTION

In general terms, RFID represents a way of identifying objects or people using radio waves. Identification is possible by means of unique numbers that identify objects, people, and information, stored on microchips, which can be read automatically, unlike barcodes that need to be scanned manually. With the recent advancements in RFID technology, the automatic identification data capture industry is accelerating its efforts to identify new applications to take advantage of RFID. RFID is fundamentally based on wireless communication, making use of radio waves, which form part of the electromagnetic spectrum, and it is not unlike two other wireless technologies, WiFi and Bluetooth. The three technologies are all designed for very different uses and therefore have different functionalities, but there is shared ground between the three, with some hybrids starting to appear. RFID systems can utilize both WiFi and Bluetooth and need not see them as competitors [1].

All RFID systems are comprised of three main components

- 1) RFID tag, or transponder, which is located on the object to be identified and is the data carrier in the RFID system.
- 2) RFID reader, or transceiver, which may be able to both read data from and write data to a transponder.
- 3) Data processing subsystem, which utilizes the data obtained from the transceiver in some useful manner [2].

For our antennas size is comparable to wavelength (used in UHF, microwave RFID), the approximate boundary between the far field and the near field region in commonly given as  $r > \frac{2D^2}{\lambda}$  where  $D$  is the maximum antenna dimension and  $\lambda$  is the wavelength by  $D_t = D_r = 51$  mm. The largest dimension of the antenna considering the field regions are  $D = D_t + D_r = 102$  mm. For electrically small antennas (used in LF/HF RFID), the radiating near field region is small and the boundary between the far field and the near field region is commonly given as  $r < \frac{\lambda}{2\pi}$ .

In this paper, the experimental evaluation of the polarimetric transmission loss in RFID based on Friis' transmission formula also extended waveform in transfer function of free space. We care about at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) Thailand, by using microstrip patch antenna are evaluated.

### II. THEORETICAL ANALYSIS OF RFID TRANSMISSION.

Regardless of whether RFID deployment is at the pallet level or at the item level, RF has limited radio range. This is especially true for passive RFID tags, where such distance may range from a few centimeters for near-field inductive coupling to several meters for backscatter. It is also worth noting that the desired read range is case dependent and it is not necessarily always desirable for it to be as large as possible because in some cases, longer read range can be detrimental due to detecting unintended or irrelevant tags. It is important to realize that read ranges are based on a path loss model that considers that the power received by an RFID tag is only related to the path that the signal traverses [3].

$$P_R = P_T \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (1)$$

where  $P_T$  is the power from the transmitting (reader) antenna while  $P_R$  is the power received by the receiving (tag) antenna.  $G_T$  and  $G_R$  represent, respectively, the antenna gains of the transmitting and receiving antennas,  $d$  is the distance separating the two antennas, and  $\lambda$  is the wavelength,

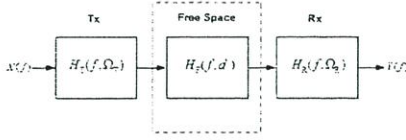


Fig. 1. Block diagram of free space transmission model for RFID system.

$$\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 = G_F \text{ is gains of free space and can written form [4]}$$

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T(\theta_T, \phi_T) G_R(\theta_R, \phi_R) G_F(1 - |\Gamma_T|^2)(1 - |\Gamma_R|^2) |p_T \cdot p_R| \quad (2)$$

where  $(\theta_T, \phi_T)$  and  $(\theta_R, \phi_R)$  are the spherical coordinates to define transmitter and receiver antenna orientation.  $\Gamma_T$  and  $\Gamma_R$  is the transmitter and receiver reflection coefficient, respectively, then,  $p_T$  and  $p_R$  is the transmitter and receiver polarization vector, respectively. Thus,  $|p_T \cdot p_R|^2$  is called the polarization loss factor (PLF) and reflects the loss due to the mismatch of the polarizations of a transmitter antenna and a receiver antenna such as (Tx-vertical, Rx-horizontal) or (Tx-horizontal, Rx-vertical) [5],[6].

The Friis transmission formula is first expressed in terms of power. Then it is extended in terms of the frequency domain to consider the transfer function,  $H_{Friis}$ , and assuming the polarization of transmitter and receiver antennas match perfectly [7],[8]. We obtain

$$H_C(f, d) = H_F(f, d) H_T(f, \Omega_T) H_R(f, \Omega_R) \quad (3)$$

Free space channel transfer function  $H_C(f, d)$  including the antennas is obtained by using the extension of Friis' transmission formula, where  $H_F(f, d)$  is the transfer function of free space,  $H_T(f, \Omega_T)$  and  $H_R(f, \Omega_R)$  are the transfer functions of the transmitting (Tx) and the receiving (Rx) antennas, which are implicit functions of directions, and  $d$  is the transmitter-receiver (TR) separation distance. The transfer function of free space can be written as

$$H_F(f, d) = \frac{c}{4\pi df} \exp^{-j2\pi d \frac{f}{c}} \quad (4)$$

Example, where  $H_a(f, \Omega_a)$  ( $a = \text{ort}$ ) is a complex transfer function vector of the antenna relative to the isotropic antenna towards the  $\Omega_a = (\theta_a, \phi_a)$  [9]

$$H_a(f, \Omega_a) = H_a(f, \theta_a, \phi_a) \quad (5)$$

and which has the relation as

$$\eta_a = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \|\vec{H}_a(f, \theta_a, \phi_a)\|^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (6)$$

where  $\eta_a$  is the antenna efficiency, [10] so that the value is normalized by that for isotropic antenna. Unit vectors  $\theta_a, \phi_a$  express the polarization and are with respect to the local polar coordinates of the antennas. The following relations can be easily derived as

$$\hat{\theta}_R = \hat{\theta}_T \quad (7)$$

TABLE I  
PATH LOSS EXPONENT.

Propagation Environment	Value(n)
Free space	2
Urban area	2.7-3.5
Shadow urban area	3-5
In-building line-of-sight	1.6-1.8
Obstructed in building	4-6
Obstruction in factory	2-3

$$\hat{\phi}_R = -\hat{\phi}_T \quad (8)$$

For the identical Tx and Rx antennas satisfying and the complex transfer functions of Tx and Rx antennas can be written as [11],[12]

$$H_T(f) = \sqrt{\frac{jcH_C(f)}{fH_F(f, d)}} \quad (9)$$

$$H_R(f) = \sqrt{\frac{fH_C(f)}{jcH_F(f, d)}} \quad (10)$$

with the relation between complex transfer functions of Tx and Rx antenna satisfying reciprocity theorem as

$$H_T(f) = j \frac{f}{c} H_R(f) \quad (11)$$

The RFID transmission signal, we consider cosine carrier signal in microwave band and modulating by amplitude shift keying (ASK), simulating as [13],[14]

$$s(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \phi(t)] \quad (12)$$

where  $A(t)$  is amplitude,  $\omega_0$  is center of frequency and  $\phi(t)$  is phase of carrier [15].

The paper, investigated transmission loss with in an indoor environment, for this reason, transmission loss that occurs in physical building and take of refraction, absorption, diffraction, scattering or other attenuation effect introduced by the presence of object indoor environment [16],[17]. The path loss for the purpose based on Friis' transmission formula can be written as

$$P_L(dB) = 20 \log \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (13)$$

where  $n$  is a value constants depend on propagated environment shown in table 1 [18],  $d_0$  is reference distance = 1.63 meters, in far field boundary [19].

### III. EXPERIMENTATION

#### A. Measurement Setup

The RFID channel transfer function [20] was measured as  $S_{21}$  in frequency domain by using a vector network analyzer (VNA) in an indoor environment. The VNA was operated in the response measurement mode, where Port-1 was the Tx port and Port-2 was the Rx port, respectively. Both Tx and Rx antennas were fixed at the height of 1.5 m and separated by 3 m at line-of-sight. We used a patch antenna as the

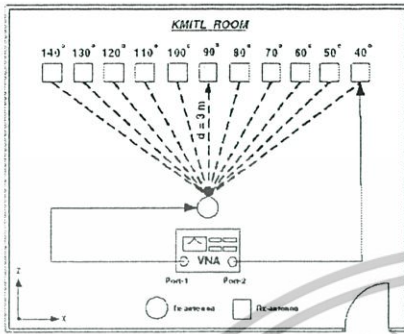


Fig. 2. The measurement system model.

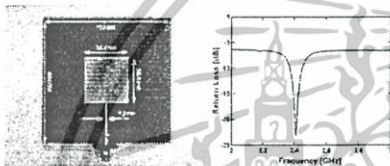


Fig. 3. Reflection coefficient of microstrip patch antenna.

Tx antenna, the model similar actually transport in logistic industry shown in Fig. 2. We have chosen this antenna for ease of the fabrication, as well as its low cost and directive beam width property. The geometry of the antenna is shown in Fig. 3 and shown the arranged between transmitter and receiver antenna in Fig. 4. The experimental parameters are listed in Table 2. It is noted that the calibration of VNA is done at the connectors of the cables to be connected to the antennas. Therefore, all the impairments of the antenna characteristics are included in the measurement results.

**B. The antenna under test.**

Patch antennas are based upon printed circuit technology to create flat radiating structure on top of dielectric, ground plane backed substrates. The appeal of such structures is in

TABLE II  
EXPERIMENTAL SETUP PARAMETERS.

Parameter	Value
Frequency range	2 GHz to 3 GHz
Number of frequency points	801
Dynamic range	80 dB
Tx-Rx antenna height	1.5 m
Distance between Tx and Rx	3 m
Angle of Rx antenna	40° to 140°
Rx enhance step	10°
Antenna polarize	linear

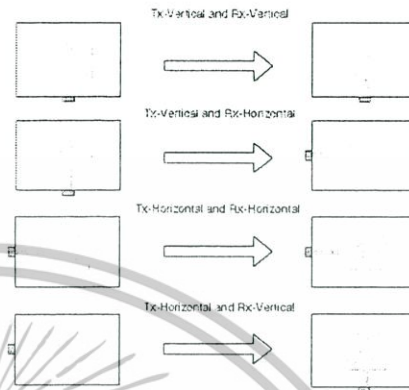


Fig. 4. Polarimetric measurement model.

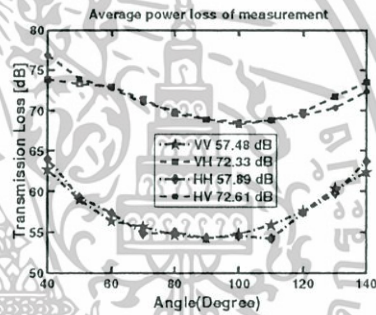


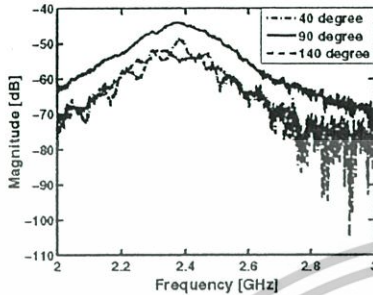
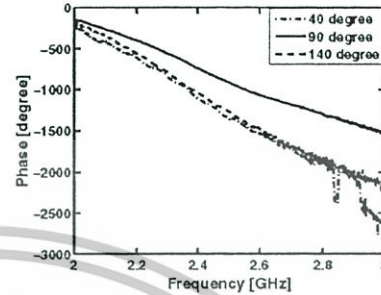
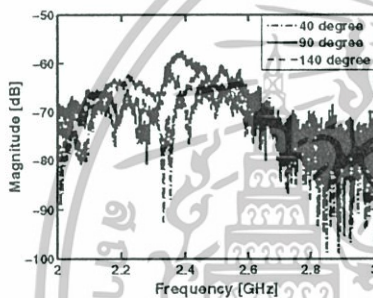
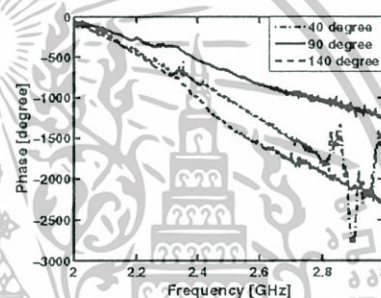
Fig. 5. The incident represented as loss of RFID experiment.

allowing compact antenna with low manufacturing cost and high reliability [21].

The microstrip patch antenna has a frequency at 2.4 GHz and size of patch width 36.4 and length 36.4 millimeters, and size of ground width and length 100 millimeters as the same, is used the both for antenna under test and the characteristic of microstrip patch antenna has the reflection coefficient lower -10 dB and directionally patterns beam width. A simple patch antenna of this type radiates a linearly polarized wave.

**IV. EXPERIMENT RESULTS**

In this section, the transmission losses of the patch antenna polarization between TR-separated can shown as in Fig. 5, which were compared in each arrangement, the certainly result, the polarizes as the same has to power loss lower than polarizes be difference. From free space channel transfer function, irrespective of magnitude and phase, we consider be prominent at 40°, 90° and 140° respectively, which (Tx-vertical, Rx-vertical) case both magnitude and phase shown

Fig. 6.  $|S_{21}|$  transfer function: magnitude (Tx-vertical, Rx-vertical).Fig. 8.  $|S_{21}|$  transfer function: phase (Tx-vertical, Rx-vertical).Fig. 7.  $|S_{21}|$  transfer function: magnitude (Tx-vertical, Rx-horizontal).Fig. 9.  $|S_{21}|$  transfer function: phase (Tx-vertical, Rx-horizontal).

in Fig. 6 and 8. In (Tx-vertical, Rx-horizontal) case shown in Fig. 7 and 9. In (Tx-horizontal, Rx-horizontal) case shown in Fig. 10 and 12. In (Tx-horizontal, Rx-vertical) case shown in Fig. 11 and 13 respectively.

#### V. CONCLUSION

This paper has presented how to investigate the transmission loss of the RFID antenna performance with cross polarization between TR-separate, which includes based on the Friis' transmission formula for narrow band systems, the polarimetric antennas, we summaries intermediated the differ polarize has transmission loss higher than the same polarize. However, may be occurs actual operates, which the reader antenna or the tag antenna has arranged those behaviors, which cause low performance systems. On the other hand, if taken the patch antenna implement also has to considered to polarization, irrespective of linear, circular or elliptical. This paper can be guideline and useful for RFID channel modeling.

#### ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank Mr. Sanit Teawlim form Information Engineering King Mongkut's Institute of Technol-

ogy Ladkrabang for calibration vector network analyzer and help in the experiments.

#### REFERENCES

- [1] Daniel M. Dobkin, *The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice*, Communication Engineering Series.
- [2] H. Lehpamer, *RFID Design Principle*, ARTECH HOUSE, INC.
- [3] H. T. Friis, *A note on a simple transmission formula*, in Proc. IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946
- [4] S. Ahson and M.Ilyas, *RFID Handbook (Application, Technology, Security and Privacy)*, CRC.
- [5] Simon R. Saunders, *Antenna And Propagation for Wireless Communication System*, University of surrey, Guildford, UK
- [6] T.S. Rappaport, *wireless communication-Principles and Practice*, Practice Hall, Second Edition, 2002.
- [7] S. Duangsuwan, S. Promwong, N. Sukutarnantani, *Measurement and Evaluation of RFID Propagation Channel with in an Indoor Environment*, ICACIE, pp. 393-395, December, 2008
- [8] S. Duangsuwan, S. Promwong, N. Chentanomwong, *Measurement and Evaluation of RFID Transmission Characteristic for Long Range Systems*, ICFN, pp. 187-190, March, 2009
- [9] S. Promwong, P. supanakoon and J. Takada, *Impact of Waveform Distortion Due to Antennas on Free Space Transmission in Ultra Wideband Impulse Radio*, IEICE, Tokyo, Japan.
- [10] A. O. Boryssenko, D. H. Schaubert, *Antenna link transfer function factorization applied to optimized channel design*, IEEE Trans. Antennas Propagat, vol. 54, no. 10, pp. 2878-2889, Oct. 2006.

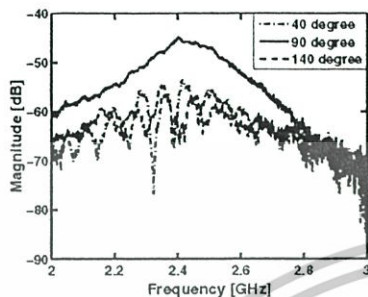


Fig. 10.  $|S_{21}|$  transfer function: magnitude (Tx-horizontal, Rx-horizontal).

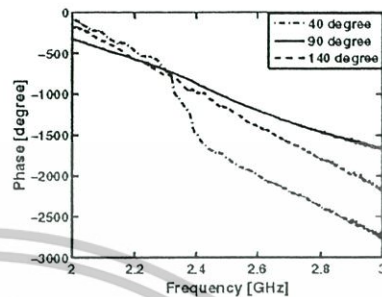


Fig. 12.  $|S_{21}|$  transfer function: phase (Tx-horizontal, Rx-horizontal).

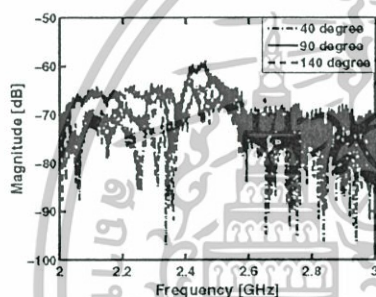


Fig. 11.  $|S_{21}|$  transfer function: magnitude (Tx-horizontal, Rx-vertical).

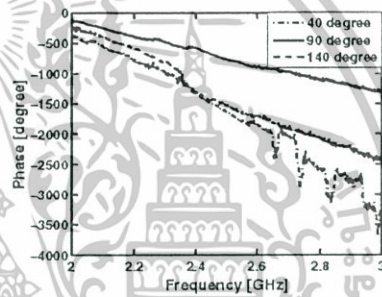


Fig. 13.  $|S_{21}|$  transfer function: phase (Tx-horizontal, Rx-vertical).

- [11] S. Promwong, W. Hachitani, and J. Takada, *Free Space Link Budget Evaluation of UWB-IR Systems*, 2004 Workshop Ultra Wideband System, (Joint UWBST and IWUWBS 2004), Kyoto, Japan, pp. 312-316, May 2004.
- [12] S. Promwong, P. Supanakoon, M. Chamchoy and J. Takada, *Near-Field Characterization of a Free Space Channel Model for Ultra Wideband Radio*, ICEMCO 2005, Tokyo, Japan.
- [13] Usman R-yohsae, S. Promwong, N. Sukutamatanti, *A Study on Free Space Propagation Loss for 2.45 GHz Radio Frequency Identification Band*, ICICT, Dec, 2007 Vientiane, Lao PDR.
- [14] Usman R-yohsae, S. Promwong, N. Sukutamatanti, *Interference Signal Analysis of IEEE 802.15.1 to RFID Communication System at 2.45 GHz*, ICCCE, pp. 1000-1004, May, 2009 Kuala Lumpur, Malaysia.
- [15] Usman R-yohsae, S. Promwong, N. Sukutamatanti, *Effect of IEEE 802.15.1 Interference on RFID Communication System at 2.45 GHz*, ECTI-CON, pp. 417-420, May 2008 Krabi, Thailand.
- [16] P. Malison, S. Promwong, N. Sukutamatanti and P. Juengkitigul, *An indoor measurement of RFID transmission gain for wireless body area network*, ICICT, pp. 21-24, Dec 2007, Lao PDR.
- [17] P. Malison, S. Promwong, N. Sukutamatanti, *Characterization of Double Directional RFID in an Indoor Environment with Human body*, ICCCE, pp. 1027-1031, May, 2008 Kuala Lumpur, Malaysia.
- [18] P. Malison, S. Promwong, N. Sukutamatanti, *Indoor Measurement and Modeling of RFID Transmission Loss at 5.8 GHz with Human Body*, ECTI-CON, pp. 421-424, May, 2008 Krabi, Thailand.
- [19] Lukas W. Mayer, M. Wulich, and S. Caban, *Measurements and Channel Modeling for Short Range Indoor UHF Application*, EuCAP, ESA SP-626, October, 2006.
- [20] Pavel N. Nikitin and K.V.S. Rao, *Antennas and Propagation in UHF RFID Systems*, IEEE RFID 2008 Conference Proceeding, Las Vegas, NV, April, 2008.
- [21] Tadeuz A. Wysocki and Hans-Juergen Zepernick, *Characterization of the indoor radio propagation channel at 2.4 GHz*, pp. 84-89, Journal of Telecommunications and Information Technology.

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายศรีณ ควงสุวรรณ  
 วัน เดือน ปีเกิด 13 ธันวาคม 2527  
 ที่อยู่ 43 หมู่ 5 ต. น้ำจืดน้อย อ. กระบุรี จ.ระนอง 85110  
 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรม  
 สารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
 ทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2550

### ผลงานวิจัย

- พ.ศ. 2551 S. Duangsuwan, S. Promwong, N. Sukutamantani, "Measurement and Evaluation of RFID Propagation Channel with in an Indoor Environment," ICACTE, pp. 393-395, Phuket, Thailand, December, 2008.
- พ.ศ. 2552 S. Duangsuwan, S. Promwong, N. Chentanomwong, "Measurement and Evaluation of RFID Transmission Characteristic for Long Range Systems," ICFN, pp. 187-190, Bangkok, Thailand, March, 2009.
- S. Duangsuwan and S. Promwong, "Indoor Measurement and Modeling of Diffraction at a Shadowing for RFID Systems," ISAP, pp. 560-563, Bangkok, Thailand, October, 2009,.
- S. Duangsuwan, T. Leukachorn, S. Chinsawatpan and S. Promwong, "Experimental Study for Polarimetric Measurement of RFID Transfer Function with in an Indoor Environment," MICC, pp. 891-895, Kuala Lumpur, Malaysia, December, 2009.