

คุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร
สำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น

ULTRA WIDEBAND PATH LOSS CHARACTERIZATION IN INDOOR
ENVIRONMENTS FOR SHORT-RANGE WIRELESS CHANNELS



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-230-000

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

คุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร
สำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น

ULTRA WIDEBAND PATH LOSS CHARACTERIZATION IN INDOOR
ENVIRONMENTS FOR SHORT-RANGE WIRELESS CHANNELS



T117109



ภัทรমন จิ่งกิตติกุล

PHATTHARAMON JUENGKITTIKUL

เลขที่ 366
9557

ศขพญ.....
เลขทะเบียน **117109**
วัน,เดือน,ปี **23 ส.ย. 2554**

b. 1233387b
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2553

KMITL-2010-EN-M-230-009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ULTRA WIDEBAND PATH LOSS CHARACTERIZATION IN INDOOR
ENVIRONMENTS FOR SHORT-RANGE WIRELESS CHANNELS**



PHATTHARAMON JUENGKITTIKUL

**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-230-009**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ คุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร สำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น

Thesis Title Ultra Wideband Path Loss Characterization in Indoor Environments for Short-Range Wireless Channels

นักศึกษา นางสาวภัทรมน จิ่งกิตติกุล

รหัสประจำตัว 51061026

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-230-009

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.พิชัญ	สุพรรณกุล	
ผศ.มนต์ชัย	แจ่มช้อย	
รศ.ดร.ประยุทธ์	อัครเอกดาลิน	
ผศ.ดร.สุทธีชัย	นพนาศิพงษ์	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2553 เวลา 11.30-13.30 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.

วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์

วันที่ 14 เดือน มกราคม พ.ศ. 2553

ลงชื่อ.....

งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตนำใบเซอร์ไปใช้

ไม่ว่าจะโดยทั้งสิ้น ผู้รับทำมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร สำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น
นักศึกษา	นางสาวภัทรมน จีงกิตติกุล
รหัสประจำตัว	51061026
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สถาพร พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง คือ เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายระยะสั้นที่พัฒนาจากระบบเรดาร์ และได้นำมาประยุกต์ใช้ภายในอาคารสำนักงาน และเครือข่ายในบ้านพักอาศัย มีจุดเด่นที่สามารถส่งผ่านข้อมูลข่าวสารได้สูง ใช้กำลังงานส่งต่ำ และต้นทุนการผลิตต่ำด้วย เป็นไปตามมาตรฐานใหม่ของเครือข่ายส่วนบุคคลแบบไร้สาย IEEE802.15.3a การแพร่กระจายคลื่นภายในอาคารนั้น ยากสำหรับทำการประมาณและการทำงาน เนื่องจากเกิดการสะท้อนและเกิดการจางหายของสัญญาณเป็นจำนวนมาก ดังนั้น การสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่างของแถบแคบจะพิจารณาใช้สูตรการส่งผ่านของฟรีส ถ้าหากพิจารณาการสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่างของแถบกว้างยิ่ง จะไม่สามารถใช้สูตรการส่งผ่านของฟรีสได้โดยตรง เนื่องจากวิทยุอิมพัลส์มีแถบความถี่กว้าง ส่งสัญญาณเป็นแบบพัลส์ และการสูญเสียจากสายอากาศที่เปลี่ยนไปตามความถี่ด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารสำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น บนพื้นฐานหลักการส่งผ่านของฟรีส และเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สัญญาณที่รับได้และแบบสหสัมพันธ์ไอโซทรอปิก ผลที่ได้จากการทดลองวัดจะนำไปประเมินผลของคุณสมบัติของสายอากาศที่มุมต่าง ๆ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้และระยะไกล ความผิดเพี้ยนจากสายอากาศ การสูญเสียเชิงวิถีสูงสุดสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อัตราขยายในการส่งผ่านและประสิทธิภาพของระบบ ได้ทำการทดลองวิจัย ทั้งในห้องไร้การสะท้อนและภายในอาคาร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ในการวัดและบันทึกผล สายอากาศที่ใช้ทดสอบเป็นสายอากาศแบบกรวยคู่ และแบบแผนการทดลองวิจัยวิทยุฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์มากในการออกแบบ การประเมินผลของสายอากาศและช่องสัญญาณ สำหรับวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แสดงทฤษฎีการวิเคราะห์ แบบแผนการทดลองวิจัย ผลการทดลองวิจัย และสรุปผลการทำวิจัยไว้อย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ ให้องค์อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Ultra Wideband Path Loss Characterization in Indoor Environments for Short-Range Wireless Channels
Student	Ms. Phattharamon Juengkittikul
Student ID.	51061026
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Dr. Sathaporn Promwong

ABSTRACT

Ultra-wideband impulse radio is the short range wireless communication technology which is developed from radar system and applied for using in office and typical home area network. This technology has several advantages that include of sending data in high bit rate, using low power and low cost. According to the new standard of wireless local area network (IEEE 802.15.3a), the indoor propagation is difficult to estimate and predict because the reflection and fading of signals have more occurred. So as to find the path loss in free space of narrow band, it can be considered to use Friis' transmission formula. In contrast, the path loss in free space of ultra-wideband system cannot be directly applied from Friis' transmission formula since ultra-wideband impulse radio propagates in a pulse form and loses from antenna varied with frequency.

This thesis investigate the ultra wideband path loss characterization in indoor environments for short-range wireless channels. It is established on Friis' transmission principle by using correlation receiver and isotropic-correlation receiver. The result from measurement is evaluated about characteristic of antenna in different angles on electromagnetic field in both near field and far field. Furthermore, it is studied about distortion from antenna, maximum path loss, auto-correlation, magnitude of transmission, and efficiency of system. This experiment is conducted in anechoic chamber within the building. For measurement, the vector network analyzer (VNA) machine has been used to record the result from measurement and the biconical antenna is used for evaluation. This method conducted in this thesis is very useful to design and evaluate antenna and channel for ultra-wideband impulse radio. Moreover, this thesis shows the theory of analysis, schemes and results of experiment, and conclusions of research.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำสอน, คำแนะนำ, การอบรมสั่งสอน, การชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาของงานวิจัย คอยดูแลเอาใจใส่, มีความเป็นห่วงเป็นใย คอยป้อนความรู้ คอยปลุกฝังซึ่งนำทางความคิดให้ผู้วิจัยได้รู้ถูกรู้ผิด ให้รู้ทุกซ์ รู้ยากให้รู้ถึงความพากเพียร ให้รู้ความรับผิดชอบในการงาน อาจติเตียนบ้างเพื่อก่อให้เกิดความพอใจตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย รวมทั้งตรวจทานวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร. สถาพร พรหมวงศ์ อย่างสุดซึ่งผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยตระหนักด้วยสำนึกในคำแห่งพระคุณในความกรุณาของท่านอาจารย์เป็นอย่างยิ่งที่ตลอดเวลาได้ให้ความเมตตาและความปรารถนาดี สอนให้จำสิ่งที่ผิดพลาดเป็นบทเรียน พระคุณของอาจารย์ยิ่งใหญ่เกินกำหนด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. ประยุทธ์ อัครเอกดาลิน, ผศ.ดร. สุธรัชชัย นพนาทิงษ์, ผศ. มนต์ชัย เข้มช้อย และ ผศ. พิชญ์ สุพรรณกุล ซึ่งเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์แก่ข้าพเจ้า และได้ให้ข้อเสนอแนะแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตลอดจนคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มีพระคุณแก่ข้าพเจ้าและงานวิจัยอย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณ คุณณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิชัย, คุณสนธิ เตียวฉิม, นาวาตรี พานิช ศิริสัมปทา, คุณพิชญ์ มะลิซ้อน, คุณศรัญญา ดวงสุวรรณ, คุณธวัชชัย เสรีวิฒนพงษ์ ในห้องปฏิบัติการวิจัย UWBR5 สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยเหลือในการทดลองวิจัยและให้คำแนะนำมาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณจึงเปงกวาง จึงกิตติกุล และ คุณกุหลาบ จึงกิตติกุล ที่คอยดูแลให้การสนับสนุนและให้กำลังใจ ขอขอบพระคุณ คุณกิตติ จึงกิตติกุล และ คุณยอดชาย จึงกิตติกุล ที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน โดยเฉพาะทางด้านการเงินในการเรียนมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยมาถึงจุดนี้ได้

ท้ายที่สุดนี้ คุณความดีและประโยชน์ที่พึงบังเกิดมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นผลมาจากความกรุณาของบิดา-มารดา พี่ชาย ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านผู้ประสิทธิ์ประสารทวิชาความรู้และผู้ที่สนับสนุน ข้าพเจ้าจึงขอยกคุณความดีทั้งหลายขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่อื่นใด การค้า
แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	5
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.6 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	6
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	7
บทที่ 2 ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	10
2.1 กล่าวนำ.....	10
2.2 ประวัติและความเป็นมาของระบบแถบกว้างยิ่ง.....	10
2.3 ข้อกำหนดการทำงานของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	11
2.3.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา.....	12
2.3.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป.....	13
2.4 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง.....	15
2.4.1 การประยุกต์ใช้งานภายในอาคารสำนักงาน.....	15
2.4.2 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายภายในบ้านพักอาศัย.....	16
2.5 บทสรุป.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีวิเคราะห์สัญญาณการส่งผ่านระบบแถบกว้างยิ่ง.....	18
3.1 กล่าวนำ.....	18
3.2 ช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบกว้างยิ่ง.....	18
3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถี.....	20
3.4 แบบจำลองช่องสัญญาณมาตรฐาน IEEE 802.15.3a.....	21
3.5 ระบบการวัดช่องสัญญาณ	23
3.5.1 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่.....	23
3.5.2 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนเวลา.....	25
3.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	25
3.6.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านช่องสัญญาณ.....	26
3.6.2 ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ.....	28
3.6.3 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ.....	29
3.6.4 แบบจำลองของสัญญาณที่ใช้ส่ง.....	30
3.6.4.1 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม.....	30
3.6.5 หลักการส่งผ่านของฟรีส.....	32
3.6.6 เครื่องรับสัญญาณในระบบแบบแถบกว้างยิ่ง.....	36
3.6.6.1 สัญญาณแม่แบบในระบบแบบแถบกว้างยิ่ง.....	37
3.6.7 การสูญเสียเชิงวิถี.....	38
3.6.8 อัตราการขยายเชิงวิถี.....	39
3.6.9 หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง.....	40
3.6.9.1 ค่าการกระจายทางเวลา.....	40
3.6.10 แบบจำลองเชิงสถิติ.....	42
3.6.10.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น	42
3.6.10.2 ฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม	42
3.6.10.3 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม ชนิดต่อเนื่อง.....	43
3.6.11 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	43
3.6.12 อัตราผิดพลาดบิต.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 สรุป.....	45
บทที่ 4 การทดลองวิจัยและการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น แบบกว้างยิ่ง.....	46
4.1 กล่าวนำ.....	46
4.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบ.....	47
4.2.1 เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์.....	47
4.2.2 สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ.....	48
4.2.2.1 สายอากาศแบบกรวยคู่.....	48
4.2.2.2 สายอากาศแบบรายนับ.....	50
4.3 การทดสอบช่องสัญญาณ.....	51
4.3.1 รูปแบบการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้อง ไร้การสะท้อน.....	51
ขั้นตอนและวิธีการทดสอบช่องสัญญาณ.....	52
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด.....	54
4.3.2 รูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล ในห้องไร้การสะท้อน.....	55
ขั้นตอนและวิธีการทดสอบช่องสัญญาณ.....	55
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด.....	57
4.3.3 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร.....	58
ขั้นตอนและวิธีการทดสอบช่องสัญญาณ.....	58
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด.....	63
4.3.4 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร.....	66
ขั้นตอนและวิธีการทดสอบช่องสัญญาณ.....	66
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด.....	68
4.4 สรุป.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการวิจัยและวิเคราะห์สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง.....	70
5.1 กล่าวนำ.....	70
5.2 การวิเคราะห์ของการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง.....	70
5.3 คุณลักษณะของฟังก์ชันการถ่ายโอนในอวกาศว่าง ของสายอากาศแบบแถบกว้างยิ่ง.....	72
5.3.1 ผลการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ ในห้องไร้การสะท้อน.....	72
5.3.1.1 อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณระหว่างสายอากาศส่งแบบ กรวยคู่และสายอากาศรับแบบกรวยคู่.....	72
5.3.1.2 การประวิงกลุ่ม	73
5.3.1.3 อัตราขยายสัมพัทธ์	74
5.3.1.4 อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณระหว่างสายอากาศส่งแบบ กรวยคู่และสายอากาศรับแบบรายคาบล็อก.....	75
5.3.1.5 การประวิงกลุ่ม	76
5.3.1.6 อัตราขยายสัมพัทธ์.....	77
5.3.2 ผลการวัดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน.....	78
5.3.2.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณที่ได้จากผลการ วัดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน.....	78
5.3.2.2 การสูญเสียเชิงวิถี.....	81
5.3.2.3 รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่รับได้จากผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน ระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน.....	81
5.3.2.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	83
5.3.3 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร.....	83
5.3.3.1 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร Room 1.....	83
5.3.3.1.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณที่ได้ จากรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร ใน Room 1	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.3.1.2 การสูญเสียเชิงวิถี.....	86
5.3.3.1.3 อัตราขยายเชิงวิถี.....	88
5.3.3.1.4 หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง.....	89
5.3.3.1.5 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น.....	92
5.3.3.1.6 ฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม.....	92
5.3.3.1.7 รูปคลื่นจากเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ ในกรณี รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร.....	93
5.3.3.2 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร Room 2	94
5.3.3.2.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณที่ได้ จากรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร ใน Room 2 ..	94
5.3.3.2.2 การสูญเสียเชิงวิถี.....	96
5.3.3.2.3 อัตราขยายเชิงวิถี	98
5.3.3.2.4 หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง	99
5.3.3.2.5 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น.....	102
5.3.3.2.6 ฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม.....	102
5.3.3.2.7 รูปคลื่นจากเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ ในกรณี รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร.....	103
5.3.4 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร.....	104
5.3.4.1 รูปคลื่นจากเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้.....	104
5.3.4.2 อัตราผิดพลาดบิต.....	105
5.3.4.3 การสูญเสียในการส่งผ่าน กรณีรูปแบบการวัดช่องสัญญาณจาก ภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร	107
5.4 บทสรุป	108
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	109
6.1 กล่าวนำ.....	109
6.2 สรุปผลการวิเคราะห์.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.1	วิเคราะห์รูปแบบการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ ในห้องไร้การสะท้อน.....	109
6.2.2	วิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะ ไกลในห้องไร้การสะท้อน.....	110
6.2.3	วิเคราะห์รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร.....	111
6.2.4	วิเคราะห์รูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร	112
6.3	ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	113
เอกสารอ้างอิง	114
ภาคผนวก ก.	บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์	116
ประวัติผู้เขียน	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....13
2.2	ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....13
4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน.....54
4.2	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน.....57
4.3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร.....63
4.4	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของรูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร.....68
5.1	ค่าการสูญเสียเชิงวิถีแต่ละตำแหน่งของรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารใน Room1.....87
5.2	เวลาประวิงและความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณใน Room1.....91
5.3	ค่าการสูญเสียเชิงวิถีแต่ละตำแหน่งของรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารใน Room2.....97
5.4	เวลาประวิงและความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณใน Room2.....101

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ลักษณะการประยุกต์ใช้ UWB ในอาคารสำนักงาน2
1.2	ลักษณะการประยุกต์ใช้ UWB เครื่องข่ายภายในบ้านพักอาศัย2
1.3	บล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์สัญญาณการส่งผ่านของวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง.....4
1.4	ขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย.....8
2.1	ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของระบบแถบกว้างยิ่ง ภายในอาคาร.....14
2.2	ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของระบบแถบกว้างยิ่ง ภายนอกอาคาร.....14
2.3	ลักษณะการนำเทคโนโลยี UWB มาใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ในอาคารสำนักงาน....15
2.4	ลักษณะการนำเทคโนโลยี UWB มาใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เครือข่ายภายใน บ้านพักอาศัย.....16
2.5	ลักษณะการนำเทคโนโลยี UWB มาใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เครือข่ายภายใน อาคาร ไปยังภายนอกอาคาร16
3.1	แบบจำลองเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณแบบหลายวิถีภายในอาคาร.....19
3.2	ผลตอบสนองช่องสัญญาณในรูปแบบของกลุ่มคลื่นและคลื่น.....23
3.3	ระบบการวัดช่องสัญญาณใน โดเมนความถี่โดยเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์และการ แปลงสู่โดเมนเวลา โดยใช้ฟูรีเยร์ผกผันแบบเร็ว.....24
3.4	การทดสอบช่องสัญญาณใน โดเมนเวลาโดยใช้อิมพัลส์.....25
3.5	ไดอะแกรมโครงข่ายแบบ 2 พอร์ต.....26
3.6	บล็อกไดอะแกรมของระบบ.....28
3.7	ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบใน โดเมนความถี่.....29
3.8	ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบใน โดเมนเวลา.....30
3.9	รูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการส่งของแถบกว้างยิ่ง (แบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม).....31
3.10	ความหนาแน่นแถบกำลังงานของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม.....32
3.11	การสื่อสารแบบไร้สายในอากาศว่าง.....32
3.12	การประยุกต์ใช้สมการของฟรีสที่ได้มีการขยายจากสมการการส่งผ่านของฟรีส และเพิ่ม เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ทางด้านรับเพื่อนำมาใช้กับระบบเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....33
3.13	บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบไอโซทรอปิก.....37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14	บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้.....37
3.15	ตัวอย่างหน้าตัดข้างการประวิงกำลัง.....40
4.1	ชุดเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์.....47
4.2	โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบกรวยคู่.....48
4.3	$ S_{11} $ คุณสมบัติของสายอากาศแบบกรวยคู่.....49
4.4	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศแบบกรวยคู่.....50
4.5	โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบรายคาบลีอก.....50
4.6	$ S_{11} $ คุณสมบัติของสายอากาศแบบรายคาบลีอก.....51
4.7	แบบจำลองการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน.....53
4.8	การปรับสายอากาศที่มุม 0 องศา, 30 องศา และ 60 องศา.....53
4.9	แบบจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน.....56
4.10	ขนาดของห้องและแบบจำลองรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร.....59
4.11	ขนาดของห้องและรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารใน Room 1.....60
4.12	ขนาดของห้องและรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารใน Room 261
4.13	การจัดวางสายอากาศทางด้านรับสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ แบบแถวลำดับ 9 แถว 9 หลัก...62
4.14	การจัดวางตำแหน่งของสายอากาศด้านส่งและด้านรับจากภายในอาคาร.....64
4.15	การจัดวางสายอากาศทางด้านรับสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ.....65
4.16	ตำแหน่งสายอากาศด้านรับที่อยู่ภายใน Room 1 และ Room 266
4.17	แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร..... 67
5.1	บล็อกไดอะแกรมของการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง.....71
5.2	อัตราการขยายของฟังก์ชันการโอนของสายอากาศที่มุม 0, 30 และ 60 องศากรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบกรวยคู่73
5.3	การประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่มุม 0, 30 และ 60 องศากรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบกรวยคู่.....74
5.4	ผลการเปรียบเทียบอัตราขยายสัมพัทธ์ ของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งกรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบกรวยคู่.....75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 อัตราการขยายของฟังก์ชันการ โอนของสายอากาศที่มุม 0, 30 และ 60 องศา กรณีสายอากาศ ส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบรายคาบสี่อวก76	76
5.6 การประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนสายอากาศที่มุม 0, 30 และ 60 องศา กรณีสายอากาศ ส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบรายคาบสี่อวก77	77
5.7 ผลการเปรียบเทียบอัตราขยายสัมพัทธ์ของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง กรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบรายคาบสี่อวก78	78
5.8 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทางที่ 0.5 เมตร79	79
5.9 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 0.5 เมตร79	79
5.10 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 2 เมตร80	80
5.11 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 2 เมตร80	80
5.12 การสูญเสียกำลังงานของสัญญาณในระยะทาง 0.21-2.0 เมตร81	81
5.13 รูปแบบสัญญาณที่รับ ได้ในการวัดเปรียบเทียบกับการทำงานที่ระยะทาง 0.5 เมตร 82	82
5.14 รูปแบบสัญญาณที่รับ ได้ในการวัดเปรียบเทียบกับการทำงานที่ระยะทาง 2 เมตร82	82
5.15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง83	83
5.16 แบบจำลองการวัดและการจัดตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับแบบแถวลำดับ ขนาด 9 แถว 9 หลัก84	84
5.17 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 5885	85
5.18 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 5885	85
5.19 การสูญเสียเชิงวิถีแสดง ในรูปของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า86	86
5.20 อัตราการขยายเชิงวิถีแสดงในรูปของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า88	88
5.21 หน้าตัดข้างการประวิงกำลังของ Room 1 จาก 1-81 ตำแหน่ง89	89
5.22 ระดับความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณในรูปของการแพร่กระจายคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า90	90
5.23 PDF ของเวลาประวิง (Delay Time) ใน Room 192	92
5.24 CDF ของเวลาประวิง (Delay Time) ใน Room 192	92
5.25 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาที่พูดของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้93	93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 แบบจำลองการวัดและการจัดตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับแบบแถวลำดับ ขนาด 9 แถว 9 หลัก.....	94
5.27 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 78.....	95
5.28 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 78	95
5.29 การสูญเสียเชิงวิถีแสดงในรูปของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	96
5.30 อัตราการขยายเชิงวิถีแสดงในรูปของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	98
5.31 หน้าตัดข้างการแผ่ประวิงกำลังของ Room 2 จาก 1-81 ตำแหน่ง.....	99
5.32 ระดับความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณในรูปของการแพร่กระจายคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า.....	100
5.33 PDF ของเวลาประวิง (Delay Time) ใน Room 2	102
5.34 CDF ของเวลาประวิง (Delay Time) ใน Room 2	102
5.35 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาต์พุตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้.....	103
5.36 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาต์พุตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้.....	104
5.37 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาต์พุตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่ง.....	105
5.38 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่ง	106
5.39 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้.....	106
5.40 การสูญเสียในการส่งผ่านเมื่อใช้เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่งเปรียบเทียบกับ เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้.....	107

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

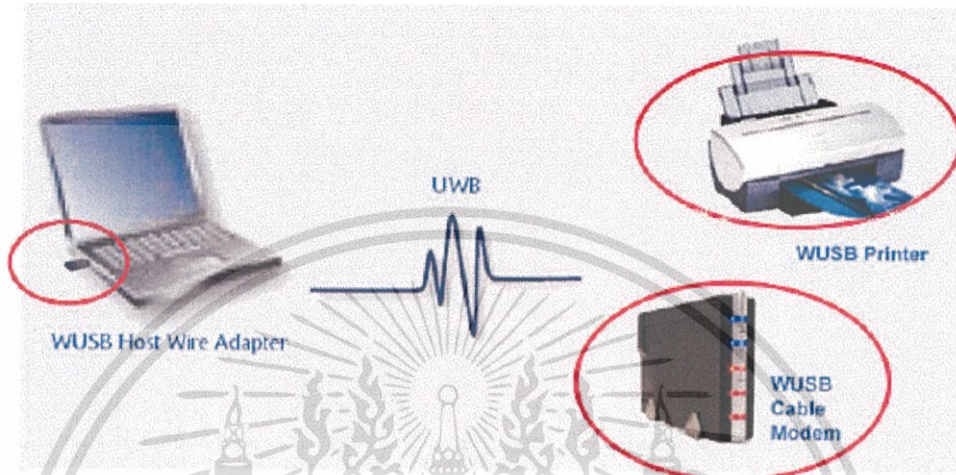
รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ความน่าจะเป็นของความผิดพลาด (Probability of Error)	Q
ค่าความผิดพลาด (Root mean square error)	e
อัตราการมาถึงของกลุ่ม Ray (Ray arrival rate)	λ
Ray decay factor (gamma)	γ
สเกลทางเวลา (Time scaling)	τ
ส่วนประกอบทางมุม	θ
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard dev)	σ
ค่าความซึมซาบ (Permeability)	μ
อัตราการมาถึงของกลุ่ม Cluster (Cluster arrival rate)	Λ
Cluster decay factor (Gamma)	Γ
ค่าความถี่บนของระบบการสื่อสาร	f_H
ค่าความถี่ล่างของระบบการสื่อสาร	f_L



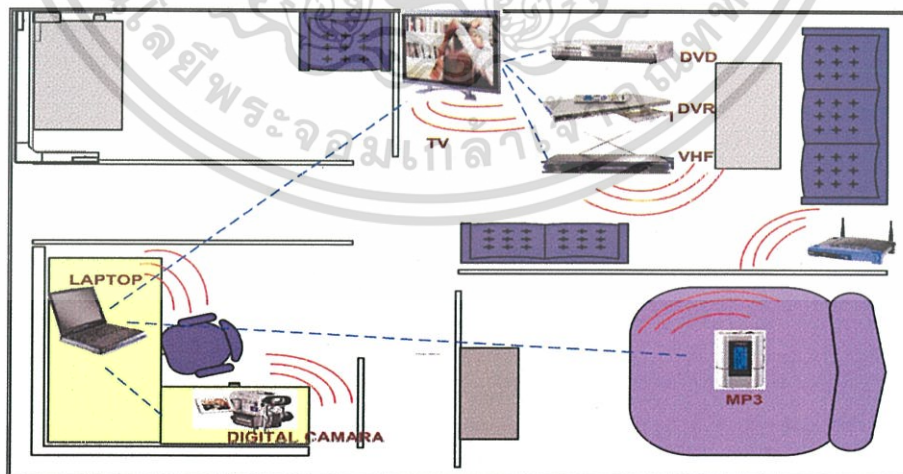
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 1.1 ลักษณะการประยุกต์ใช้ UWB ในอาคารสำนักงาน ซึ่งมักจะมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณและสัญญาณพัลส์ด้านรับในการสื่อสาร เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ผงัง หน้าต่าง ซึ่งเป็นระบบการสื่อสารระยะสั้นที่มีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูง เพื่อรองรับระบบมัลติมีเดียที่ใช้ในอาคารสำนักงาน



รูปที่ 1.1 ลักษณะการประยุกต์ใช้ UWB ในอาคารสำนักงาน [2]

ในรูปที่ 1.2 ลักษณะการประยุกต์ใช้ UWB เครื่องใช้ภายในบ้านพักอาศัย เช่น กล้องถ่ายรูป ดิจิตอล เครื่องเล่นดีวีดี เครื่องเล่นดีวีอาร์ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ฯลฯ ซึ่งจะเป็นการเชื่อมต่อที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงประมาณ 110 Mb/s ในระยะทาง 10 เมตร และมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นในระยะทางที่สั้นลง



รูปที่ 1.2 ลักษณะการประยุกต์ใช้ UWB เครื่องใช้ภายในบ้านพักอาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายระยะสั้น ได้มีแนวคิดที่จะนำมาประยุกต์ใช้ภายในอาคาร สำนักงานและเครือข่ายในบ้านพักอาศัย มีจุดเด่นที่สามารถส่งผ่านข้อมูลข่าวสารได้สูง ใช้กำลังงานส่งต่ำ และต้นทุนการผลิตต่ำด้วย การแพร่กระจายคลื่นภายในอาคารนั้น ยากสำหรับทำการประมาณ และการทำนาย เนื่องจากเกิดการสะท้อนและเกิดการจางหายของสัญญาณเป็นจำนวนมาก ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้ศึกษาคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารสำนักงานและเครือข่ายในบ้านพักอาศัย สำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้นซึ่งจะทำให้สามารถนำมาใช้พิจารณาเพื่อเลือกพารามิเตอร์ของสัญญาณส่งที่เหมาะสม อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ประมาณหาค่าระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบต่อไป

จากปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จึงได้เสนอวิธีการที่จะมาช่วยในการวิเคราะห์ศึกษาถึงผลกระทบ ในกรณีที่เกิดการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบกว้างยิ่ง โดยได้นำหลักการคำนวณตามสมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis' transmission formula) [4] และรวมถึงได้มีการประยุกต์สมการการส่งผ่านของฟรีส (Extension of Friis' transmission formula) [5] เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารสำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น รวมไปถึงคุณสมบัติของสายอากาศที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่ง บนพื้นฐานของการวัดแล้ว นำเอาผลที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ต้องการทราบ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ศึกษาคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารสำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น ซึ่งพิจารณาอยู่บนพื้นฐานของการทดลองในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร (Indoor environment) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector network analyzer : VNA) เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบร่วมกับสายอากาศ โดยใช้สัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม (Rectangular passband pulse) จากนั้นผลการทดลองวัดจะนำไปประเมินผลของคุณสมบัติของสายอากาศที่มุมต่างๆ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะเวลาใกล้และระยะไกล ความผิดเพี้ยนจากสายอากาศ, การสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด, สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, อัตราขยายในการส่งผ่านและประสิทธิภาพของระบบ ได้ทำการทดลองวิจัยทั้งในห้องไร้การสะท้อนและภายในอาคาร

โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ในการวัดและบันทึกผล สายอากาศที่ใช้ทดสอบเป็นสายอากาศแบบกรวยคู่

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

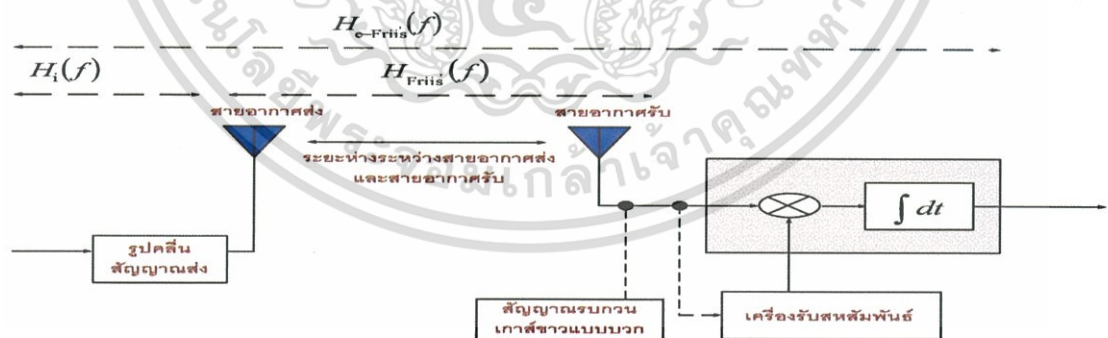
วัตถุประสงค์ของการศึกษา คุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารสำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น โดยได้พิจารณาจากการนำเอาทฤษฎีหลักการสูตรการส่งผ่านของฟรีส และการทดลองวิจัยวัดและทดสอบจริง

สายอากาศที่ได้สร้างขึ้นจากห้องปฏิบัติการวิจัย สามารถแผ่กระจายสัญญาณในแถบกว้างได้ดี และได้ใช้ในการทดลองวิจัยได้จริง และได้มีงานวิจัยอีกจำนวนมากที่พิจารณาถึงการส่งผ่านสัญญาณและสายอากาศ

การประยุกต์เอาสูตรการส่งผ่านของฟรีส ให้มีความเหมาะสมสำหรับวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งจะประกอบด้วยคุณสมบัติทางความถี่ของสายอากาศ, คุณสมบัติทางความถี่ของการแพร่กระจายในอวกาศว่าง, และสเปกตรัมของสัญญาณส่ง

แบบแผนสำหรับหาคุณลักษณะแบบกว้างของฟังก์ชันการถ่ายโอนสายอากาศ โดยวิธีการที่ซับซ้อน และการทำซ้ำเพื่อให้มีความแม่นยำในการวัดช่องสัญญาณ

ทำการวิเคราะห์ระบบการส่งผ่านสำหรับวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง ได้แสดงในรูปที่ 1.3, เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ได้ใช้รูปคลื่นต้นแบบจากสัญญาณที่รับได้ และสำหรับรูปคลื่นต้นแบบที่แตกต่างกัน เพื่อการพิจารณาคุณภาพในความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นที่ใช้ในการส่ง



รูปที่ 1.3 บล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์สัญญาณการส่งผ่านของวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง

แบบแผนการทดลองวิจัยทั้งหมดจะประกอบด้วยวิธีการที่มีความเป็นจริงได้ เพื่อหาค่าการสูญเสียสูงสุดระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ ของอัตราขยายในการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง

ส่วนสายอากาศทั้งสองแบบเป็นสายอากาศแบบแถบกว้างใช้ในการประเมินผลการทดลองวัด และการวิเคราะห์ผลสำหรับคุณลักษณะการส่งผ่านสัญญาณของสายอากาศที่ใช้ในห้องทดลอง

ท้ายสุดได้ทำการจำลองและทดลองวัดจริงภายในอาคารสำนักงาน พิจารณาถึงคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้าง โดยนิยามที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาคคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารสำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น หลักการในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ชี้ให้เห็นว่าช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งนั้นมีผลกระทบเป็นอย่างไรในกรณีนำมาใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป โดยทำการทดลองวิจัยวัดและทดสอบจริง ซึ่งในการศึกษาทดลองวิจัยได้พิจารณารูปแบบวัดอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น รูปแบบการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารและรูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร จากนั้นนำผลที่ได้จากการวัดไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญบนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส และทางด้านรับได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สัมพันธ์สองแบบมาเปรียบเทียบกันระหว่างเครื่องรับแบบสัญญาณที่รับได้และเครื่องรับแบบไอโซทรอปิกเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ ผลจากการทดลองวิจัยสามารถนำมาทำการปรับปรุงและหลีกเลี่ยงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นให้เหมาะสมกับการใช้งานและสามารถใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพมากที่สุด

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแบบแผนการทดลองวิจัยของคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมจริงภายในอาคาร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ในการวัดและบันทึกผล โดยใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ [3] ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว โดยทำการทดสอบตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 11 GHz ครอบคลุมช่วงความถี่ที่กำหนดให้ใช้งานในการสื่อสารคือตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งถูกกำหนดโดยคณะกรรมการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal communication commission : FCC) ผลตอบสนองเชิงความถี่ในช่องสัญญาณ สามารถหาได้จากการสัมพันธ์การส่งผ่านในระบบ ซึ่งในการศึกษาทดลองวิจัยได้พิจารณารูปแบบวัดอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น รูปแบบการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอน

ของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร และรูปแบบการวัด ช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร โดยลักษณะวิธีการทดสอบได้กำหนดขึ้นเพื่อเป็นการ ทดสอบผลกระทบที่สามารถเกิดขึ้นในกรณีที่น่าไปใช้งานจริงหลังจากทำการทดสอบ ผลที่ได้จะถูก นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบ เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ของสัญญาณทางด้านรับว่ามีผลกระทบทำให้สัญญาณเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ อย่างไร แล้วทำการประเมินผลที่ได้จากการวิเคราะห์

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ศึกษาคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อม ภายในอาคารสำหรับช่องสัญญาณแบบ ไร้สายระยะสั้น บนพื้นฐานหลักการส่งผ่านของฟรีส และ เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สัญญาณที่รับได้และแบบสหสัมพันธ์ไอโซทรอปิก ผลที่ได้จากการทดลองวัด จะนำไปประเมินผลของคุณสมบัติของสายอากาศที่มุมต่างๆ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้และ ระยะไกล ความผิดเพี้ยนจากสายอากาศ, การสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด, สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, อัตราขยาย ในการส่งผ่านและประสิทธิภาพของระบบ, หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง, ความน่าจะเป็นและฟังก์ชัน การกระจายแบบสะสมได้ทำการทดลองวิจัยทั้งในห้อง ไร้การสะท้อนและภายในอาคาร โดยใช้เครื่อง วิเคราะห์วงจรรายแบบเวกเตอร์ในการวัดและบันทึกผล สายอากาศที่ใช้ทดสอบเป็นสายอากาศ แบบกรวยคู่ สูดท้ายจะนำผลที่ได้จากการทดลองวัดไปทำการประเมินค่าในการแพร่กระจายคลื่นในย่าน แถบความถี่กว้างยิ่งที่มีผลกระทบมาจากสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร

1.6 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบ ไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่และส่งข้อมูลเป็น สัญญาณพัลส์ ซึ่งในการส่งสัญญาณนั้นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจะเป็นลักษณะของคลื่นความถี่ส่งออก จากสายอากาศด้านรับซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดการสูญเสีย เกิดการลดทอน เกิดการจางหาย เกิดการสะท้อน หรือการหักเหของสัญญาณได้ ทั้งหมดนี้ล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อระบบ โดยตรงต่อคุณภาพของสัญญาณ ที่รับได้ ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปัญหาเหล่านี้ คือ สภาวะแวดล้อมที่อยู่รอบข้างในระบบการ ส่งสัญญาณในงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างยิ่งที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอแบบจำลอง การสูญเสียในการส่งผ่านในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ซึ่งไม่ได้มีการพิจารณาเพื่อแก้ปัญหาในการ

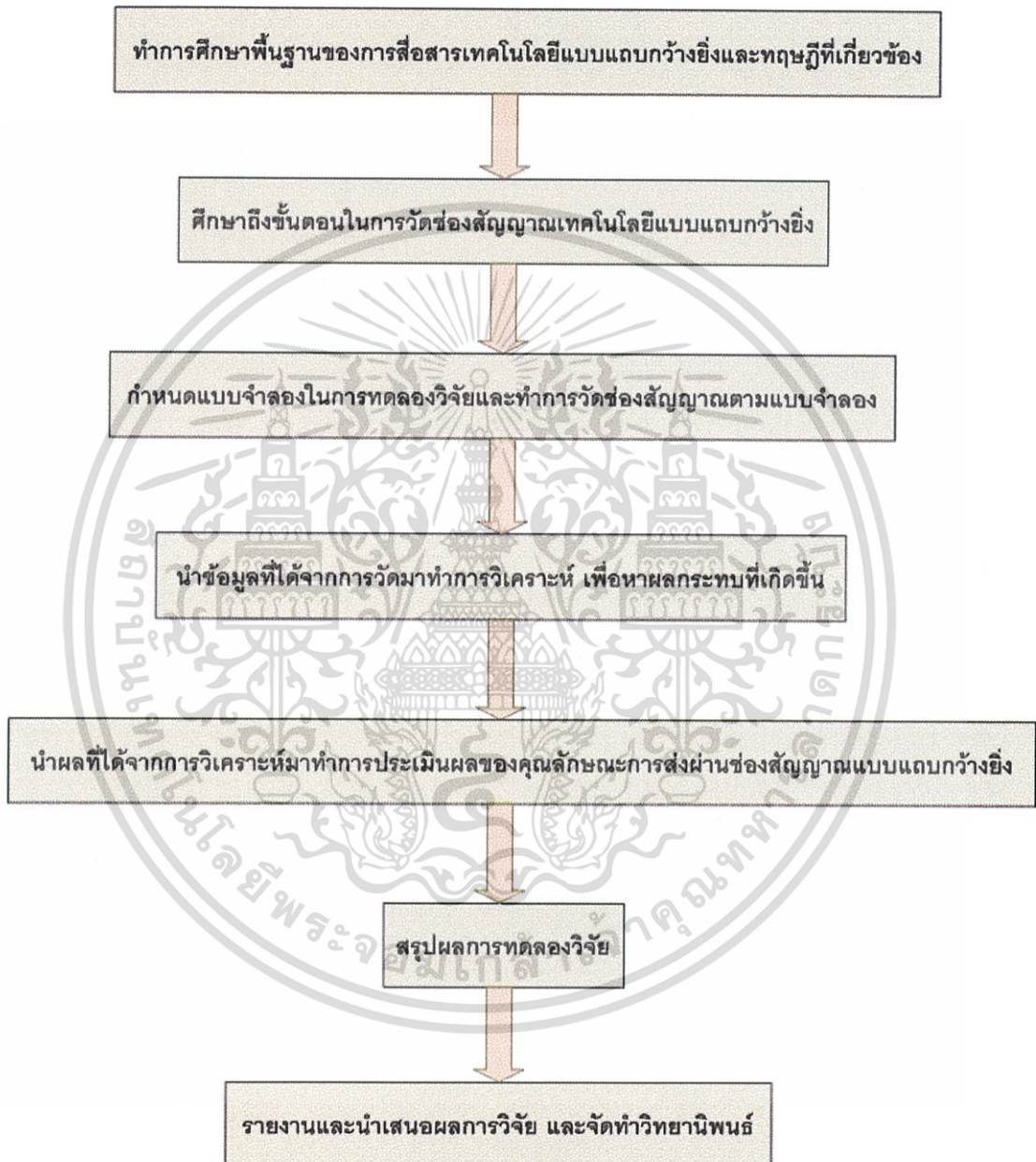
สูญเสียในการส่งผ่านสัญญาณน้อยที่สุดและให้มีคุณภาพดีขึ้น [6] ได้พิจารณารูปแบบวัดอยู่หลายรูปแบบด้วยกันของการส่งในสภาวะแวดล้อมจริงภายในอาคาร

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารสำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ในการวัดและบันทึกผลของฟังก์ชันการถ่ายโอนในอวกาศว่างของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบร่วมกับสายอากาศ โดยใช้สัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม (Rectangular passband pulse) จากนั้นผลการทดสอบที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ รูปแบบการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร และรูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร และนำผลที่ได้จากการวัดไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่สำคัญ บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส (โดยการประยุกต์สูตรของฟรีส) และทางด้านรับได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สองแบบมาเปรียบเทียบกันระหว่างเครื่องรับแบบสัญญาณที่รับได้ และเครื่องรับแบบไอโซทรอปิก ผลการทดลองวิจัยและผลการวิเคราะห์ของการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง การผิดเพี้ยนของสัญญาณ, หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง, ความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม

1.7 ขั้นตอนการศึกษา

จากแนวคิดและหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วในช่วงต้นนั้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการศึกษาสำหรับวิทยานิพนธ์ดังนี้ เริ่มจากศึกษาถึงที่มาและข้อดีของระบบแถบกว้างยิ่ง แล้วศึกษาขั้นตอนในการวัดช่องสัญญาณรวมถึงอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ และรูปแบบวิธีการวัดโดยยึดหลักตามลักษณะการนำไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมจริง จากนั้นจึงทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญ บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส (โดยการประยุกต์สูตรของฟรีส) และทางด้านรับได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สองแบบมาเปรียบเทียบกันระหว่างเครื่องรับแบบสัญญาณที่รับได้ และเครื่องรับแบบไอโซทรอปิก ผลการทดลองวิจัยและผลการวิเคราะห์ของการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง การผิดเพี้ยนของสัญญาณ, หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง, ความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ถือเป็นปัจจัยหลักในการวิเคราะห์ช่องสัญญาณ จากนั้นจะเป็นขั้นตอนในการศึกษาถึงวิธีการทดลองและวิเคราะห์ผล แล้วนำผลการทดลองวิจัยที่ได้ มาสรุปผลวิเคราะห์ผลการทดลองและเรียบเรียงเขียนเป็นวิทยานิพนธ์ โดยในการทำวิทยานิพนธ์มีแบบแผนงานและขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

แบบแผนการศึกษาของงานวิจัย



รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละส่วนของเนื้อหาวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็นบทต่างๆ ได้ดังนี้ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการทำวิจัยและแบบแผนในการศึกษาและดำเนินงานวิจัย โดยได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 1 ส่วนในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานความรู้ต่างๆ ที่เกี่ยวกับระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง โดยแบ่งออกเป็นความถี่เป็นมาของระบบแถบกว้างยิ่ง ข้อกำหนดต่างๆ ของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง รวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ส่วนในบทที่ 3 จะได้กล่าวถึงวิธีวิเคราะห์สัญญาณการส่งผ่านระบบแถบกว้างยิ่งที่ได้นำมาใช้งานวิจัยนี้ และทฤษฎีช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบกว้าง โดยการวัดช่องสัญญาณของการสื่อสารย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง เช่น บนพื้นฐานหลักการส่งผ่านของฟรีส และเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สัญญาณที่ได้รับได้และเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบไอโซทรอปิก ผลที่ได้จากการทดลองวัดจะนำไปประเมินผลของคุณสมบัติของสายอากาศที่มุมต่างๆ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้และระยะไกล ความผิดเพี้ยนจากสายอากาศ, การสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด, สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, อัตราขยายในการส่งผ่านและประสิทธิภาพของระบบในบทที่ 4 จะได้กล่าวถึงแบบแผนการทดลองวิจัยของการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งที่สภาวะแวดล้อมจริงภายในอาคาร โดยจะแบ่งได้ คือ การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสายอากาศที่ใช้ในการวัดและทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวัด สำหรับบทที่ 5 จะกล่าวถึงผลการทดลองวิจัยและการวิเคราะห์ของการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง ส่วนในบทสุดท้ายบทที่ 6 จะได้กล่าวสรุปผลจากการวิจัยและข้อเสนอแนะของการศึกษาวิจัยที่ได้ทำมานี้ โดยได้สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงกับช่องสัญญาณ และประเมินผลของการทำวิจัยรวมไปถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการที่จะนำวิทยานิพนธ์นี้ไปพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

2.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมาก ในการพัฒนาประเทศและชีวิตความเป็นอยู่ในปัจจุบัน เช่น การติดต่อสื่อสารทางไกลทั้งในประเทศและระหว่างประเทศ การประชุมผ่านทางไกล การเรียนการสอนผ่านทางไกล การติดต่อสื่อสารส่วนบุคคล ระบบการติดต่อสื่อสารระยะสั้นแบบไร้สายในเป็นสำนักงาน และการเครือข่ายภายในบ้านพักอาศัยเป็นต้น เพื่อเป็นไปตามความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกัน จึงได้มีการพัฒนางานวิจัยอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเครือข่ายส่วนบุคคลแบบไร้สาย ซึ่งเป็นมาตรฐานใหม่ ที่มีความต้องการให้ระบบสื่อสารแบบไร้สายที่มีความเร็วสูง อัตราการส่งข้อมูลข่าวสารได้สูง และต้นทุนการผลิตต่ำ เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ได้ยอดเยี่ยม ถึงแม้ว่าจะไม่ได้เป็นเทคโนโลยีใหม่ก็ตาม แต่ก็แก้ปัญหาของระบบเครือข่ายส่วนบุคคลแบบไร้สายได้ด้วยคุณสมบัติที่มีแถบความถี่กว้าง มีความจุช่องสัญญาณสูง ใช้กำลังงานการส่งข้อมูลข่าวสารต่ำและต้นทุนการผลิตต่ำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สังเกตเห็นว่าการทำให้ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคารให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้นเป็นเรื่องที่สำคัญมาก จึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยและทำการวิเคราะห์การสูญเสียในการส่งผ่านของวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งที่สภาวะแวดล้อมจริงภายในอาคารบนพื้นฐานการส่งผ่านของฟรีส และได้ใช้เครื่องรับเป็นแบบสหสัมพันธ์ สำหรับในบทนี้ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมา ข้อกำหนดการทำงานของอุปกรณ์ และการประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

2.2 ประวัติและความเป็นมาของระบบแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งแบบนั้น มีประวัติย้อนหลังมายาวนานตั้งแต่สมัยที่ มาร์โคนี (Marconi) ได้ทดลองสาธิตโดยใช้เครื่องรับ-ส่งเป็นแบบสปาร์กแก๊ป (Spark gap) ในการส่งสัญญาณวิทยุอิมพัลส์ข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกในปี 1901 ต่อมาในปี ค.ศ. 1962 ได้ประดิษฐ์เครื่องส่งวิทยุแถบกว้างยิ่งโดยใช้หลักการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนทางเวลา และได้ถูกนำไปใช้ในการส่งสัญญาณในเครือข่ายไมโครเวฟในปี ค.ศ. 1963-1966 ซึ่งมีการแนวทางในการพัฒนาว่าต้องมีรูปแบบที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยใช้คุณลักษณะของการตอบสนองความถี่ เช่น ขนาดของสัญญาณ และเฟส ซึ่งระบบจะทำงานวิเคราะห์ความแตกต่างของผลตอบสนองของสัญญาณจากฟังก์ชันในการส่งผ่านสัญญาณ $h(t)$ ในส่วนของสัญญาณเอาท์พุทจะถูกแทนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$y(t)$ และกำหนดให้สัญญาณ อินพุตที่ป้อนเข้าเป็น $x(t)$ ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์คุณลักษณะของช่องสัญญาณได้

อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์สัญญาณนั้นเราได้ใช้เครื่อง ออสซิลโลสโคปในการสุ่มค่าของสัญญาณ เพื่อมาทำการวิเคราะห์และพัฒนาเครือข่ายในระบบไมโครเวฟ และรูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการส่งผ่าน โดยการวิเคราะห์และการวัด

เทคนิคในการวัดค่าสัญญาณนั้นแรกเริ่มได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับแถบความถี่กว้างในปี ค.ศ. 1968 ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาสัญญาณที่มีขนาดแคบได้อย่างรวดเร็ว และได้ถูกนำไปใช้ในการส่งสัญญาณติดต่อดสื่อสารแบบ เรดาร์ ในปี ค.ศ. 1972 และในปีถัดมาเครื่องออสซิลโลสโคปที่ใช้การวิเคราะห์ ความถี่ที่สูงขึ้นก็ได้ถูกสร้างขึ้น จึงทำให้มีการกำหนดแถบความถี่กว้างยิ่งในปี ค.ศ.1973 ต่อมาในปี ค.ศ.1980 นั้นก็ได้มีการกำหนดให้ เทคโนโลยีแถบความถี่กว้างยิ่งนี้ไม่จำเป็นต้องใช้คลื่นพาหะ ในการส่งสัญญาณเหมือนอย่างแถบความถี่กว้างอีกต่อไป และเป็นจุดที่แตกต่างจากการส่งคลื่นวิทยุแบบอื่นที่มีมาก่อนหน้านั้น และต่อมาได้ถูกพัฒนาในประเทศสหรัฐอเมริกาต่อในปี ค.ศ. 1989

ในช่วงเวลาเกือบ 30 ปี ทฤษฎีของแถบความถี่กว้างยิ่งได้ถูกพัฒนาทั้งด้านเทคนิคและอุปกรณ์ตัวอย่าง เช่น ในปี ค.ศ.1989 สเปนอร์รี่ ได้จดสิทธิบัตรมากกว่า 50 ชิ้น เกี่ยวกับการสร้างสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งและวิธีในการรับส่งสัญญาณ และการนำแถบความถี่กว้างยิ่งได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานหลากหลายรูปแบบ เช่น ในการติดต่อดสื่อสารในระบบเรดาร์การป้องกันกชนกันของคลื่นมือถือ, ระบบบอกพิกัด และ ตรวจวัดระดับของเหลว โดยใช้คุณลักษณะของแถบความถี่กว้างยิ่ง

โดยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1994 เทคโนโลยี แถบความถี่กว้างยิ่งได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในระบบการติดต่อดสื่อสารอย่างรวดเร็วโดยรัฐบาลสหรัฐอเมริกา จนปี ค.ศ. 1998 ได้มีการเริ่มพิจารณามาตรฐานและข้อกำหนด และในปี ค.ศ. 2002 ได้มีการประกาศใช้ข้อกำหนดแถบความถี่กว้างยิ่ง และได้จัดการประชุมวิชาการระดับนานาชาติครั้งแรก [7]

2.3 ข้อกำหนดการทำงานของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง [8]

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ได้ถูกกำหนดขึ้นในการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั่นก็คือการจัดสรรความถี่ในการใช้งาน ซึ่งได้มีกลุ่มทำงานในสหรัฐอเมริกาได้พยายามทำการถอดถอนการจำกัดของข้อกำหนดในการใช้งานช่วงความถี่ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจากกฎข้อบังคับเดิมของคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา โดยกลุ่มทำงานนี้ได้ก่อตั้งขึ้นอย่างเป็นทางการโดยใช้ชื่อว่า Ultra-wideband working group (UWBWG) เพื่อทำการเจรจาหาข้อตกลงร่วมกับ FCC [6] เช่นเดียวกันกับในยุโรปก็ได้มีการหาข้อตกลงการจัดสรรคลื่นความถี่และการแทรกสอดของความถี่

วิทยุซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีกำหนดแถบความถี่สำหรับการใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่งในสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European telecommunications standards institute : ETSI) หรือ สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International telecommunication union : ITU)

2.3.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา

ในปี ค.ศ. 1998 FCC ได้ออกประกาศเกี่ยวกับการตรวจสอบหรือ Notice of inquiry (NOI) โดยถึงแม้ว่าจะได้คาดการณ์ถึงระดับกำลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณที่มีระดับต่ำมากๆ แล้วก็ตาม ยังมีกลุ่มผู้ที่สนับสนุนในระบบเดิมที่มีใช้งานกันอยู่ได้ทำการต่อต้านการนำระบบแถบกว้างยิ่งมาใช้งานสำหรับการสื่อสารของพลเรือนซึ่งขอเรียกร่องโดยมากจะเกี่ยวข้องกับการคาดการณ์ถึงการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดในแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด อาทิเช่น แถบความถี่ในการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ แถบความถี่ที่สำรองไว้สำหรับคลื่นวิทยุทางดาราศาสตร์และระบบ GPS โดยที่องค์กรบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกาหรือ FAA (Federal aviation administration) ได้แสดงความเป็นห่วงต่อการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบความปลอดภัยในกิจการการบินและทิศทางในการค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องส่งในระบบแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกัน

เมื่อเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้ถูกเสนอสำหรับการนำมาใช้ในกิจการการสื่อสารของพลเรือน ซึ่งยังไม่ได้มีการกำหนดใดๆ สำหรับลักษณะสัญญาณที่จะนำมาใช้ จึงได้มีหน่วยงานหนึ่งซึ่งชื่อว่า DARPA (Defense advanced research project agency) ได้ทำการออกข้อกำหนดฉบับที่หนึ่งสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งอยู่บนพื้นฐานอัตราส่วนแบนด์วิดท์ B_f ของสัญญาณโดยต้องมีค่ามากกว่า 0.25 โดยสามารถกำหนดได้ตามสมการที่ 2.1 [8]

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

โดยที่ f_L คือ ความถี่ต่ำสุดและ f_H คือความถี่สูงสุดของแถบความถี่ที่ใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่ง

ในวันที่ 14 กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 FCC ได้ออกกฎสำหรับระบบแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง และยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของคำประกาศและระเบียบการฉบับที่หนึ่งได้เผยแพร่ต่อสาธารณชนในวันที่ 22 เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งในเอกสารได้กล่าวถึงการอนุญาตใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่งทั้ง 4 ประเภทและการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายพลังงานสำหรับการใช้ในประเภทต่าง ๆ โดยจากนิยามข้างต้นได้ทำการลดค่าการจำกัด B_f เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 0.2 ตามสมการที่ 2.1 และข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงาน โดย FCC ได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1 สำหรับใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร

ตารางที่ 2.1 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร

ความถี่ [MHz]	ภายในอาคาร	ภายนอกอาคาร
	EIRP in dBm	EIRP in dBm
960 – 1610	-75.3	-75.3
1610 – 1990	-53.3	-63.3
1990 - 3100	-51.3	-61.3
3100 - 10600	-41.3	-41.3
สูงกว่า 10600	-51.3	-61.3

2.3.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป

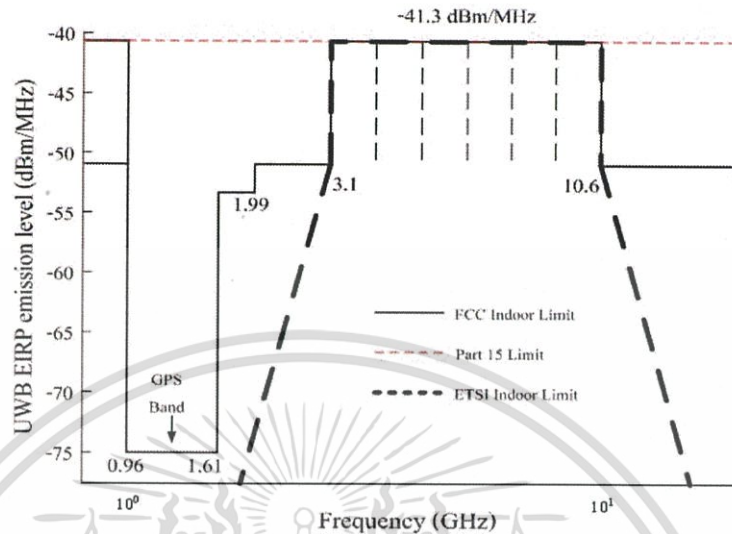
ปัจจุบัน โครงร่างของข้อกำหนดระบบแถบกว้างยิ่งในทวีปยุโรปอยู่ในช่วงรอข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวกับผลกระทบของระบบแถบกว้างยิ่งบนระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่โดยทางยุโรปนั้น บางส่วนของข้อกำหนดจะรัดกุมกว่าของทางสหรัฐอเมริกา เพราะทางค่านยุโรปนั้นในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ต้องแสดงให้เห็นว่าส่งผลกระทบน้อยหรือไม่ส่งผลเสียหายนต่อระบบเดิมที่มีอยู่โดยข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย ITU หรือ ETSI แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงาน โดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร

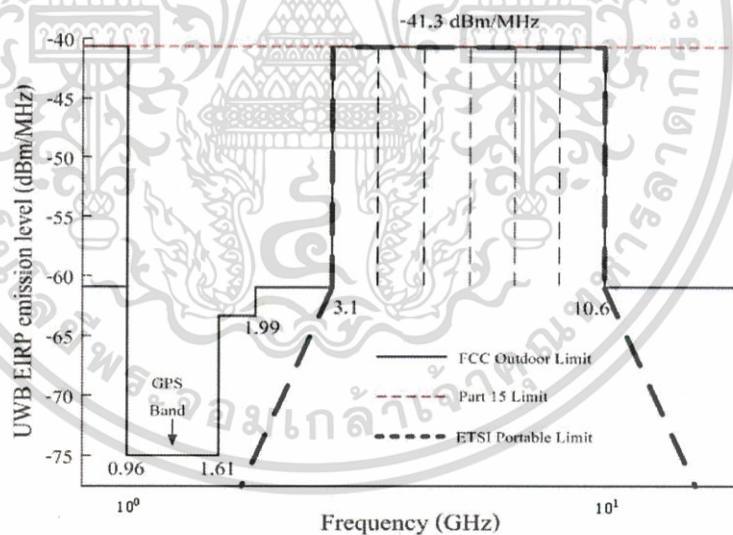
	ช่วงความถี่ [GHz]		
	$f < 3.1$	$3.1 < f < 10.6$	$f > 10.6$
ภายในอาคาร	$-51.3 + 87\log(f / 3.1)$	-41.3	$-51.3 + 87\log(10.6 / f)$
ภายนอกอาคาร	$-61.3 + 87\log(f / 3.1)$	-41.3	$-61.3 + 87\log(10.6 / f)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในรูปที่ 2.1 และ 2.2 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่าง FCC และ ETSI ภายในและภายนอกอาคารตามลำดับ



รูปที่ 2.1 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของระบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคาร



รูปที่ 2.2 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของระบบแถบกว้างยิ่งภายนอกอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

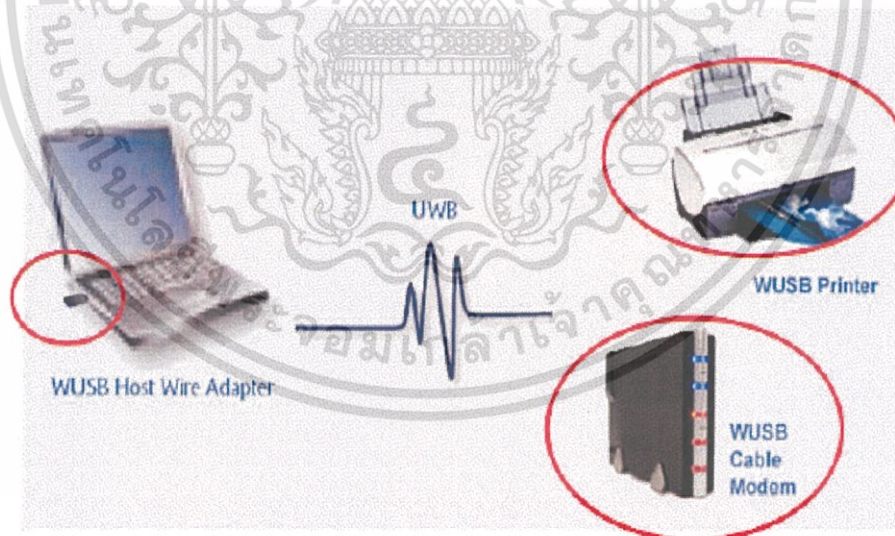
2.4 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง ถูกนำมาใช้ในระบบการสื่อสารระยะสั้นระหว่างคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ที่อยู่ภายในอาคารสำนักงานและเครือข่ายภายในบ้านพักอาศัย ที่มีความต้องการความเร็วสูง เพื่อรองรับระบบมัลติมีเดียและมีกำลังในการส่งที่ต่ำ โดยในการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งทั้งสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคาร เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญด้วย เพราะผลกระทบที่เกี่ยวกับทิศทางขอบเขตของเส้นทาง และปัจจัยอื่นๆ ล้วนแล้วแต่เป็นการประเมินค่าความสำเร็จของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งระบบแถบกว้างยิ่งนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่

- การประยุกต์ใช้งานภายในอาคารสำนักงาน
- การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายภายในบ้านพักอาศัย

2.4.1 การประยุกต์ใช้งานภายในอาคารสำนักงาน

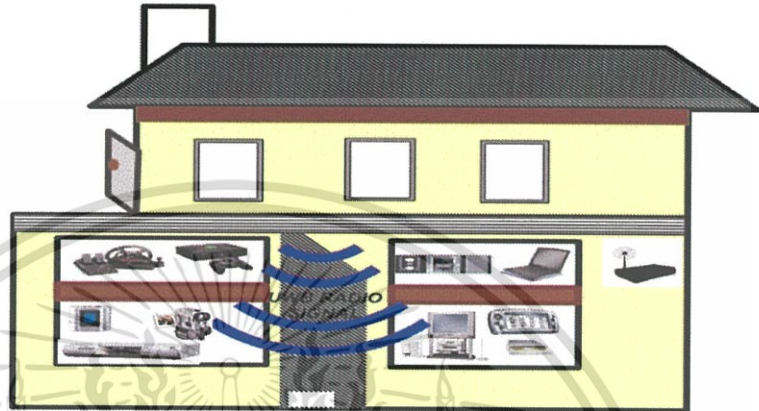
ในรูปที่ 2.3 เป็นลักษณะการนำเทคโนโลยี UWB มาใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ในอาคารสำนักงาน ซึ่งมักจะมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณและสัญญาณพัลส์ด้านรับในการสื่อสาร เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ผงัง หน้าต่าง ซึ่งเป็นระบบการสื่อสารระยะสั้นที่มีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูง เพื่อรองรับระบบมัลติมีเดียที่ใช้ในอาคารสำนักงาน



รูปที่ 2.3 ลักษณะการนำเทคโนโลยี UWB มาใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์
ในอาคารสำนักงาน [2]

2.4.2 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายภายในบ้านพักอาศัย

ในรูปที่ 2.4 ลักษณะการนำเทคโนโลยี UWB มาใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เครือข่ายภายในบ้านพักอาศัย เช่น กล้องถ่ายรูปดิจิทัล เครื่องเล่นดีวีดี เครื่องเล่นดีวีอาร์ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ฯลฯ ซึ่งจะเป็นการเชื่อมต่อที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงประมาณ 110 Mb/s ในระยะทาง 10 เมตร และมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นในระยะทางที่สั้นลง



รูปที่ 2.4 ลักษณะการนำเทคโนโลยี UWB มาใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เครือข่ายภายในบ้านพักอาศัย

รูปที่ 2.5 ลักษณะการนำเทคโนโลยี UWB มาใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เครือข่ายภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร ซึ่งในลักษณะการเชื่อมต่อภายในอาคารไปยังภายนอกอาคารนี้ จะมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อ การสื่อสารในสภาวะแวดล้อมนี้ เช่น ผนัง หน้าต่าง อุปกรณ์เครื่องใช้ สิ่งกีดขวางต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ลักษณะการนำเทคโนโลยี UWB มาใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เครือข่ายภายในอาคาร ไปยังภายนอกอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน สัญญาส่งในการสื่อสารวิทยุอิมพัลส์ ข้อกำหนดการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับระบบคอมพิวเตอร์ตามที่คณะกรรมการของแต่ละประเทศได้กำหนดใช้เป็นมาตรฐาน และการประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างในระยะสั้นๆ ในสำนักงาน และเครือข่ายบ้านพักอาศัย ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญมากสำหรับแนวทางในการศึกษาค้นคว้าวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ของการสูญเสียในการส่งผ่านสัญญาณของวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งนั้น ได้กล่าวในบทต่อไป



บทที่ 3

วิธีวิเคราะห์สัญญาณการส่งผ่านระบบแฉกกว้างยิ่ง

3.1 กล่าวนำ

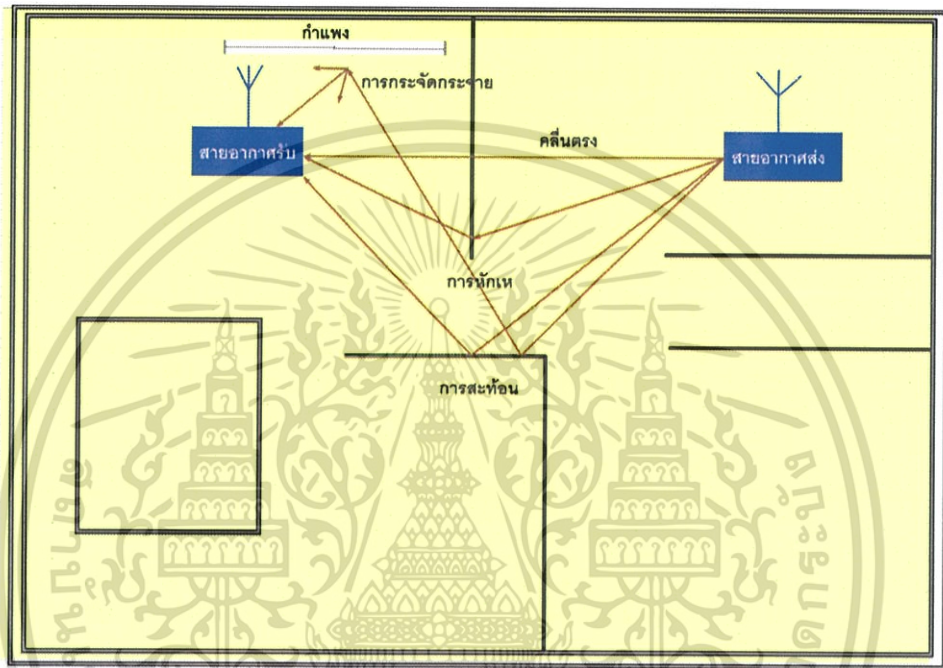
การแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมต่างๆ นั้น เมื่อสัญญาณส่งผ่านจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับจะเกี่ยวโยงไปถึงลักษณะของช่องสัญญาณ โดยในการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณแบบแฉกกว้างยิ่งทั้งสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคาร เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญด้วยเพราะผลกระทบที่เกี่ยวกับทิศทางขอบเขตของเส้นทาง และปัจจัยอื่นๆ ล้วนแล้วแต่เป็นการประเมินค่าความสำเร็จของเทคโนโลยีแฉกกว้างยิ่ง ถ้าช่องสัญญาณมีคุณลักษณะที่ดีแล้วผลของการรบกวนและการแทรกสอดของแหล่งกำเนิดสัญญาณอื่นๆ จะสามารถที่จะทำให้ลดลงได้โดยการออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับที่เหมาะสม โดยลักษณะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของการจำลองช่องสัญญาณวิทยุคือ การตรวจสอบถึงฟังก์ชันการกระจายตัวของพารามิเตอร์ช่องสัญญาณ โดยทั่วไปการกระจายตัวเหล่านี้มักจะ ได้มาจากผลการทดสอบหรือผลการจำลองบนพื้นฐานของความถูกต้องหรือมีลักษณะตามสภาวะแวดล้อมที่ชัดเจน

หลักการในการที่จะวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ชี้ให้เห็นว่าช่องสัญญาณวิทยุแฉกกว้างยิ่งนั้น มีผลกระทบเป็นอย่างไรในกรณีนำมาใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป และมีหลักเกณฑ์จำนวนมากที่ถูกนำมาพิจารณาผลกระทบของช่องสัญญาณ โดยความแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบแฉกกว้างยิ่ง และเทคนิคการจำลองช่องสัญญาณด้วยสภาพความเป็นจริงในการแพร่กระจายคลื่นแบบแฉกกว้างยิ่ง ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส (โดยการประยุกต์สูตรของฟรีส) และทางด้านรับได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สองแบบมาเปรียบเทียบกันระหว่างเครื่องรับแบบสัญญาณที่รับได้และเครื่องรับแบบไอโซทรอปิก ผลการทดลองวิจัยและผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีแบบแฉกกว้างยิ่ง การผิดเพี้ยนของสัญญาณ, หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง, ความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม ซึ่งในบทนี้ได้อธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการจำลองช่องสัญญาณในระบบแฉกกว้างยิ่ง และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในระบบแฉกกว้างยิ่งอีกด้วย

3.2 ช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแฉกกว้างยิ่ง

เทคนิคในการจำลองช่องสัญญาณแฉกกว้างยิ่งมีหลายแบบจำลองอาทิ เช่น แบบจำลองความไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete time) แบบจำลองหลายวิถี (Multipath) หรือ แบบจำลองผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse response model) แต่จะกล่าวถึงแบบจำลองหลายวิถีเพราะเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองที่มีความสะดวกและง่ายในการแสดงลักษณะเฉพาะ ของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง อันเนื่องมาจากสัญญาณที่แพร่กระจายออกมานั้น ได้เดินทางออกมาในลักษณะหลายทิศทาง ประกอบกับสภาวะแวดล้อมของช่องสัญญาณที่สัญญาณได้เดินทางผ่านมานั้น ได้มีสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ทำให้สัญญาณเดินทางได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่ระบบนั้นใช้งานอยู่ อันเนื่องมาจากปัจจัยหลายด้าน เช่น การหักเหของคลื่น การสะท้อนของคลื่น การเลี้ยวเบนของคลื่น ทำให้เกิดเป็นช่องสัญญาณหลายวิธีจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ [9] ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองเส้นทางการแพร่กระจายสัญญาณแบบหลายวิถีภายในอาคาร

เพราะฉะนั้นสัญญาณแต่ละสัญญาณที่เข้ามาถึงยังเครื่องรับนั้นจะมีขนาด เฟส และการประวิงเวลา (Time delay) ที่แตกต่างกัน โดยแบบจำลองนี้ในแกนของการประวิงเวลาจะถูกแบ่งออกเป็นช่วงเวลาเล็กๆ ที่เรียกว่า “bins” ซึ่งในแต่ละ bin นั้น ได้ถูกสมมุติให้ประกอบไปด้วยองค์ประกอบในแต่ละส่วนของสัญญาณแบบหลายวิถี โดยความเป็นไปได้ของเส้นทางของสัญญาณที่มากกว่าหนึ่งเส้นทางภายใน bin นั้นจะถูกแยกออกไปซึ่งความกว้างที่เหมาะสมของ bin นั้นจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของลักษณะจำเพาะในการทดสอบนั้นๆ โดยปรากฏการณ์ของการเกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบหลายวิธีนั้น สามารถแสดงให้เห็นในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นไปตามผลตอบสนองอิมพัลส์แบบไม่ต่อเนื่องของช่องสัญญาณดังสมการที่ (3.1) [9]

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \alpha_l \delta(t - lT_m) \quad (3.1)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α_l คือ ปัจจัยการลดทอนทางขนาดในเส้นทางที่ l และเป็นฟังก์ชันของเวลาและระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ

T_m คือ ความละเอียดทางเวลาที่น้อยที่สุดของพัลส์

l คือ จำนวนขององค์ประกอบหลายวิถี

$\delta(t)$ คือ ฟังก์ชัน Dirac delta

3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถี

ช่องสัญญาณในการแพร่กระจายคลื่น ไร้สายมีมานานกว่า 50 ปีแล้ว ซึ่งแบบจำลองช่องสัญญาณจำนวนมากได้นำถูกนำเสนอในวารสารต่างๆ [12]-[14] สัญญาณที่แพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณ ไร้สายประกอบด้วยคลื่นที่สะท้อนหรือหักเหจากสัญญาณเดิมที่ทำการส่ง ซึ่งปรากฏการณ์ธรรมชาติเหล่านี้จะเกิดขึ้นเป็นปกติจึงเรียกเหตุการณ์เหล่านี้ว่า การแพร่กระจายคลื่นแบบหลายวิถี ด้วยความแตกต่างกันของเส้นทางที่ใช้เดินทางของสัญญาณองค์ประกอบต่างๆ ของเส้นทางหลายวิถีจึงทำให้เกิดการประวิง (Delay) และการลดทอน (Attenuation) ซึ่งการประวิงและการลดทอนนี้มีค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ถูกต้อง ซึ่งสามารถอธิบายองค์ประกอบของสัญญาณที่เดินทางหลายวิถีได้และจัดเป็นศิลปะของการจำลองช่องสัญญาณ

ในยุคแรกของการใช้งานแบบจำลองช่องสัญญาณการสื่อสาร ไร้สายนั้น จะนิยมใช้แบบจำลองช่องสัญญาณการจางหายแบบราบเรียบของเรย์ลี (Rayleigh-fading channel) ซึ่งสมมุติให้ช่องสัญญาณมีการจางหายแบบราบเรียบ สามารถใช้งานได้เมื่อระบบมีแบนด์วิดท์แคบการประวิงขององค์ประกอบเส้นทางหลายวิถี ยังไม่มีผลกระทบกับเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น ที่ภาครับสัญญาณองค์ประกอบของเส้นทางหลายวิถีทั้งหมดสามารถรับรวมหรือเสริมกันได้ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลดีกับสัญญาณหลายวิถีหรือเกิดผลเสียกับสัญญาณหลายวิถีนี้ได้ และถ้ามีจำนวนของส่วนองค์ประกอบของเส้นทางหลายวิถีมากค่าแอมพลิจูดเชิงซ้อน จะมีการกระจายตัวแบบเกาส์ (Gaussian distribution) มีผลทำให้แอมพลิจูดเกิดการกระจายตัวแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution) หรือมีการกระจายตัวแบบไรเซียน (Rician distribution) ได้ ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงเหมาะสำหรับการสื่อสาร ไร้สายแบบแถบแคบ

ในยุคที่ 2 และ 3 เป็นยุคของการสื่อสาร ไร้สายแบบระบบรังผึ้ง (Cellular systems) ซึ่งเป็นระบบการสื่อสาร ไร้สายที่มีแบนด์วิดท์กว้างขึ้นกว่าเดิม ดังนั้น การประวิงที่แตกต่างกันขององค์ประกอบของเส้นทางหลายวิถีของคลื่นจึงมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของระบบมาก โดยมีรูปแบบของกำลังงาน ในแต่ละเส้นทางของการเดินทางของสัญญาณในช่องสัญญาณที่มาถึงจะมีค่าการประวิงที่แน่นอน สำหรับการวิเคราะห์ระบบแล้วการประวิงที่เกิดขึ้น โดยปกติจะแยกออกไปเป็น bin ซึ่งในแต่ละ bin นั้น ได้ถูกสมมุติให้ประกอบไปด้วยองค์ประกอบของสัญญาณหลายวิถี

ขนาดของสัญญาณหลายวิธีจะเทียบได้กับส่วนผกผันของแบนด์วิธของระบบ ถ้าองค์ประกอบของเส้นทางหลายวิถี อยู่ในช่วงประวิงพอดีการบวกันระหว่างองค์ประกอบของเส้นทางหลายวิถีในเวลาประวิงจะเกิดขึ้น ค่าสถิติของแอมพลิจูดที่อยู่ในแต่ละช่วงการประวิงจะมีการแจกแจงแบบเรย์ลีหรือ แบบไรท์ (Rice) ดังนั้นจึงสามารถที่จะคาดคะเนได้ว่าองค์ประกอบของเส้นทางหลายวิถีที่เดินทางมาถึงจะใช้ช่วงเวลาการประวิงมากน้อยเท่าใด เพื่อให้สามารถคาดคะเนผลกระทบของสัญญาณที่เดินทางผ่านช่องสัญญาณที่มีลักษณะหลายวิถี มายังภาครับจึงจำเป็นต้องทำการสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณขึ้นและนำไปใช้งานในการออกแบบระบบไร้สาย วิเคราะห์ระบบไร้สายให้มีประสิทธิภาพได้ องค์กรรมมาตรฐานหลายที่จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองช่องสัญญาณของตนเองขึ้นมาเพื่อนำมาใช้สำหรับจำลองช่องสัญญาณจริงของระบบการสื่อสารไร้สาย อาทิเช่น ระบบ GSM ระบบ W-CDMA ระบบการสื่อสารมาตรฐาน IEEE802.11 เพื่อใช้ในการออกแบบระบบการสื่อสาร ส่วนการสื่อสารแบบแถบกว้างยังมีแบบจำลองช่องสัญญาณอยู่มากมายหลายแบบด้วยกัน จึงขอยกตัวอย่างแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีที่เป็นรู้จักกันในหมู่นักวิจัย ที่ทำการวิเคราะห์และออกแบบระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างดังนี้

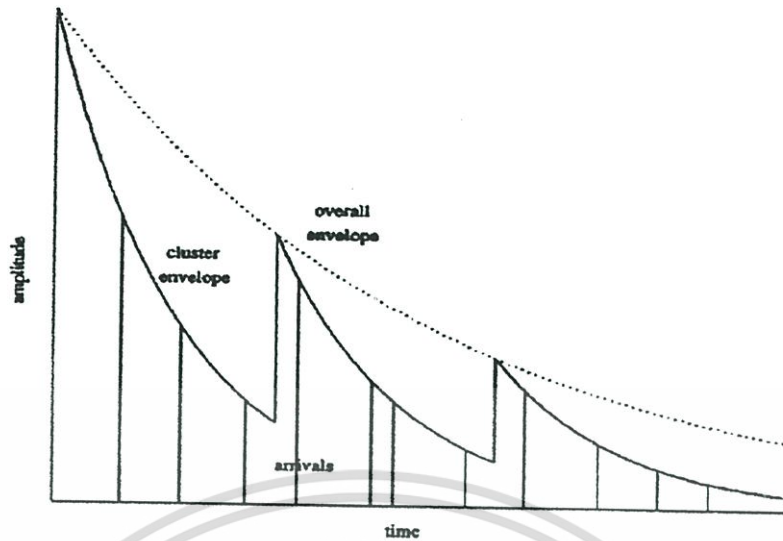
- แบบจำลองช่องสัญญาณแบบ Rayleigh tap delay line (Rayleigh tap delay line model) แบบจำลองนี้จะอาศัยการทำงานของตัวดีเลย์เพื่อจำลองเวลาการประวิงของสัญญาณในแต่ละเส้นทาง
- แบบจำลองช่องสัญญาณแบบ $\Delta - k(\Delta - k)$ model) แบบจำลองชนิดนี้จะอาศัยการคาดคะเนการกระจายตัวของกลุ่มคลื่นแบบเอกซ์โพเนนเชียลเช่นเดียวว่ามีการประวิงของแต่ละกลุ่มคลื่นว่าเป็นเช่นใด
- แบบจำลองช่องสัญญาณแบบ SV (S-V model) แบบจำลองชนิดนี้จะอาศัยการคาดคะเนการมาถึงของกลุ่มคลื่นและคลื่นย่อยที่เกิดในกลุ่มนั้นๆ ด้วย โดยอาศัยการคาดคะเนการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลสองชั้น

3.4 แบบจำลองช่องสัญญาณมาตรฐาน IEEE 802.15.3a [10]

การเดินทางของสัญญาณที่มีลักษณะการเดินทางแบบหลายวิถี ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งลักษณะการเดินทางของคลื่นที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถมองเห็นได้ จึงคาดการณ์ลักษณะการเดินทางของสัญญาณได้ยาก ซึ่งในการเดินทางของสัญญาณหลายวิถีเกิดจากหลายๆ ปัจจัยไม่ว่าจะเป็นปัจจัยจากสภาพแวดล้อม จากสัญญาณในระบบการสื่อสารอื่นทำให้การสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณยากลำบากมาก ซึ่งจากในอดีตจนถึงปัจจุบันมีนักวิจัยหลายๆ ท่าน ได้ทำการสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณขึ้นเพื่อที่จะใช้ในการวิเคราะห์ช่องสัญญาณ แทนการทดสอบช่องสัญญาณและเก็บค่าพารามิเตอร์หลักๆ ของช่องสัญญาณจริง ในการสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณ ไปใช้งานแล้วนั้น นักวิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณภายใต้เงื่อนไข ของการทดสอบช่องสัญญาณภายใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะแวดล้อมที่มีความแตกต่างกัน ทำให้เมื่อนำเอาแบบจำลองช่องสัญญาณไปทดสอบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร จึงเกิดการเปรียบเทียบกันขึ้นว่าแบบจำลองช่องสัญญาณของนักวิจัยท่านใดให้ความถูกต้องของคุณสมบัติช่องสัญญาณได้มากกว่ากัน และเมื่อนำเอาผลของการทดสอบ ประสิทธิภาพระบบจากการใช้แบบจำลองช่องสัญญาณ มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้ทดสอบประสิทธิภาพของระบบโดยการทดสอบช่องสัญญาณจริงแล้ว ยังมีความแตกต่างกันอยู่พอสมควร และใน บางกรณีแบบจำลองช่องสัญญาณ ยังไม่สามารถจำลองลักษณะของช่องสัญญาณได้ถูกต้อง เพียงพอเนื่องจากแบบจำลองนั้น ได้สร้างมาจากการทดสอบช่องสัญญาณที่แตกต่างกันมากในหลายปัจจัย ดังนั้นจึงได้มีกลุ่มนักวิจัยกลุ่มหนึ่ง ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ช่องสัญญาณภายในอาคารสำหรับระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง หรือมาตรฐานการสื่อสารของ IEEE 802.15.3a เพื่อสร้างออกมาเป็นแบบจำลองช่องสัญญาณมาตรฐาน ดังนั้นแบบจำลองช่องสัญญาณมาตรฐานนี้ จึงเป็นที่ยอมรับและใช้งานในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเกิดจากการทดสอบช่องสัญญาณจริง โดยแบบจำลองช่องสัญญาณอ้างอิงผลตอบสนองช่องสัญญาณหลายวิธีตามแบบจำลองช่องสัญญาณของ Saleh-Valenzuela Model (SV) เป็นหลัก โดยเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของผลตอบสนองช่องสัญญาณแบบ SV จากที่มีการกระจายตัวแบบ Rayleigh มาเป็นการกระจายแบบ Log-normal เพื่อให้เหมาะสมสำหรับช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง แต่ยังคงมีส่วนประกอบที่เป็นกลุ่มคลื่น (Cluster) และคลื่น (Ray) ไว้ดังเดิม โดยที่กลุ่มคลื่น จะเปรียบได้ว่าเป็นกลุ่มสัญญาณแรกที่รับได้ในแต่ละชุดของผลตอบสนองช่องสัญญาณและคลื่น คือ สมาชิกภายในกลุ่มคลื่น ซึ่งในแต่ละกลุ่มคลื่นจะมีขนาด (Magnitude) ของกลุ่มคลื่นและคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงที่มีแนวโน้ม ในรูปแบบของเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential function) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และเมื่อนำเอาผลที่ได้ จากแบบจำลองช่องสัญญาณมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างช่องสัญญาณที่ได้ จากแบบจำลองและผลที่ได้การทดสอบสัญญาณจริงจะเกิดความผิดพลาดในการประเมินประสิทธิภาพของระบบไม่มากนัก



รูปที่ 3.2 ผลตอบสนองช่องสัญญาณในรูปแบบของกลุ่มคลื่นและคลื่น [10]

3.5 ระบบการวัดช่องสัญญาณ

การทดสอบช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งนั้นเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบนั้นสามารถทำการทดสอบได้ 2 โดเมน คือ แบบแรกใช้เทคนิคการกวาดด้านความถี่ (Frequency sweeping technique) ซึ่งสามารถทำการทดสอบช่องสัญญาณใน โดเมนความถี่ (Frequency domain; FD) ซึ่งการใช้วิธีนี้ ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณนั้นสามารถทดสอบได้จากการทดสอบพารามิเตอร์ S_{21} หรือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) ซึ่งจะใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการกวาดความถี่และในแบบที่สองเป็นการทดสอบช่องสัญญาณใน โดเมนเวลา (Time domain; TD) โดยใช้เครื่องทดสอบช่องสัญญาณซึ่งอยู่บนพื้นฐานในการส่งสัญญาณแบบอิมพัลส์หรือสัญญาณแบบ (Direct sequence spread spectrum; DSSS) ซึ่งประสิทธิภาพของสัญญาณแบบ DSSS ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันสหสัมพันธ์ตัวเอง (Auto-correlation function; ACF) ด้วยวิธีการนี้พัลส์แคบๆ จะถูกส่งออกไปยังช่องสัญญาณและผลตอบสนองอิมพัลส์ช่องสัญญาณจะถูกทดสอบ โดยใช้เครื่อง (Digital sampling oscilloscope; DSO) [11] ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถผลิตสัญญาณพัลส์ที่มีขนาดแคบมากๆ ที่ช่วงเวลาของพัลส์เป็นนาโนวินาทีจึงเป็นไปได้ยากที่จะสามารถทดสอบช่องสัญญาณด้วยวิธีนี้

3.5.1 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่

อุปกรณ์หลักในการสร้างและรับสัญญาณเพื่อทำการทดสอบช่องสัญญาณใน โดเมนความถี่นั้นคือเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จัดการเกี่ยวกับการทดสอบทั้งหมด

โดยสัญญาณที่ใช้ตรวจสอบนั้นจะเป็นกลุ่มของสัญญาณแถบแคบรูปคลื่นไซน์ (Sinusoid) ซึ่งทำการกวาดตลอดแถบความถี่ที่ต้องการพิจารณาประกอบกับการใช้สายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้าง โดยในการจำลองช่องสัญญาณแถบกว้างขีงนั้นสามารถที่จะทำได้ในส่วนของ การประมวลผลข้อมูลและเมื่อใช้วิธีการทดสอบสัญญาณในโดเมนความถี่ช่วงเวลาของช่องสัญญาณที่ทำการทดสอบต้องถูกกำหนดให้คงที่เพื่อรักษาเงื่อนไขของช่องสัญญาณในช่วงการกวาดความถี่ โดยที่ค่าสูงสุดของเวลาการกวาดความถี่ถูกจำกัดโดยเวลาร่วมกัน (Coherence time) ของช่องสัญญาณ ถ้าเวลาการกวาดนานกว่าเวลาร่วมกันของช่องสัญญาณแล้วช่องสัญญาณอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาในการกวาดความถี่สำหรับการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว นั้นจำเป็นต้องใช้เทคนิควิธีการอื่นเข้ามาทำการตรวจสอบแทน ซึ่งประสิทธิภาพของการทดสอบในโดเมนความถี่นั้นจะถูกกำหนดโดยค่าสูงสุดของเวลาประวิงของช่องสัญญาณ ซึ่งขอบเขตด้านบนของเวลาประวิงที่ตรวจพบ τ_{\max} สามารถกำหนดโดยจำนวนจุดของความถี่ที่ใช้ในการกวาดแต่ละครั้งและแบนด์วิคท์ B ซึ่งนิยามตามสมการที่ 3.2 [9]

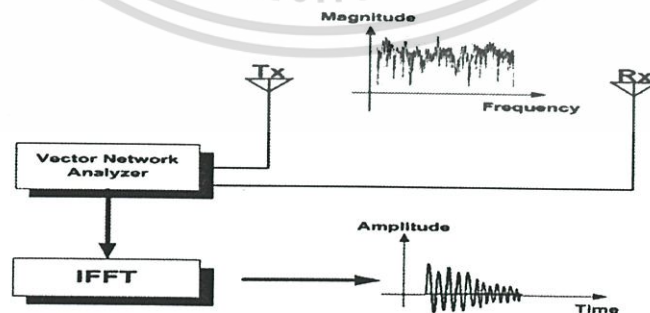
$$\tau_{\max} = (N_{\text{smpt}} - 1) / B$$

(3.2)

โดยที่

 N_{smpt} คือ จำนวนจุดความถี่ B คือ แบนด์วิคท์

ในการที่จะทำการทดสอบสัญญาณ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์นั้นผลที่ได้จากการทดสอบคือ ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการทดสอบจากนั้นจะใช้ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse fast Fourier transform; IFFT) การแปลงข้อมูลจากการทดสอบในโดเมนความถี่ให้อยู่ในรูปแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ของ โดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.3 [9]



รูปที่ 3.3 ระบบการวัดช่องสัญญาณใน โดเมนความถี่โดยเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์และ การแปลงสู่โดเมนเวลา โดยใช้ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านช่องสัญญาณ

ในขั้นตอนของการทดสอบนั้นจะเป็นลักษณะการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient; S_{21}) สัญญาณจากพอร์ตที่หนึ่งไปยังพอร์ตที่สองของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากหลักการของพารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (Scattering parameter) หรือเรียกว่า S-parameter ซึ่งมีนิยามตามเมตริกซ์การกระจัดกระจาย (Scattering matrix) ของโครงข่ายแบบ 2 พอร์ตดังสมการที่ 3.3 และแสดงในรูปที่ 3.5 [10]

$$\bar{b} = \bar{S}a \quad (3.3)$$

โดยที่

- \bar{a} คือ เวกเตอร์การส่งผ่าน
- \bar{b} คือ เวกเตอร์การสะท้อน
- \bar{S} คือ เวกเตอร์การกระจัดกระจาย



รูปที่ 3.5 โคอะแกรมโครงข่ายแบบ 2 พอร์ต [10]

ซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ดังสมการที่ 3.4 และสมการที่ 3.5

$$\bar{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\bar{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

โดยที่

- a_1 คือ สัญญาณที่ส่งผ่านเข้าไปยังพอร์ตหนึ่ง
- b_1 คือ สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังพอร์ตหนึ่ง

a_2 คือ สัญญาณที่ส่งผ่านเข้าไปยังพอร์ตสอง

b_2 คือ สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังพอร์ตสอง

ซึ่งสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนี้สามารถหาได้จาก

$$a_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_1}{\sqrt{Z_0}} + \sqrt{Z_0} I_1 \right) \quad (3.6a)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_1}{\sqrt{Z_0}} - \sqrt{Z_0} I_1 \right) \quad (3.6b)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_2}{\sqrt{Z_0}} + \sqrt{Z_0} I_2 \right) \quad (3.6c)$$

$$b_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_2}{\sqrt{Z_0}} - \sqrt{Z_0} I_2 \right) \quad (3.6d)$$

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ 3.3, 3.4, 3.5 และ 3.7 สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปสมการกระจาย
ดังสมการที่ 3.8 และ 3.9

$$b_1 = a_1 S_{11} + a_2 S_{12} \quad (3.8)$$

$$b_2 = a_1 S_{21} + a_2 S_{22} \quad (3.9)$$

โดยที่

S_{11} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตหนึ่ง

S_{22} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ตสอง

S_{21} คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Forward)

S_{12} คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านผกผัน (Reverse)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ของการกระจัดกระจายของโครงข่ายแบบสองพอร์ตนั้นยังสามารถที่จะกำหนดในเทอมของคลื่นส่งผ่านและคลื่นสะท้อนได้ดังนี้

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (3.10a)$$

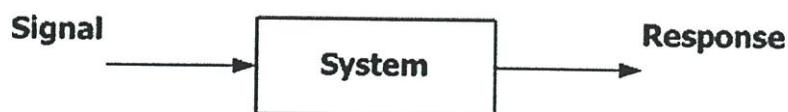
$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (3.10b)$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.10c)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.10d)$$

3.6.2 ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ

เมื่อพิจารณาการวัดช่องสัญญาณ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ นั้นสิ่งที่จะต้องทำความเข้าใจเป็นอันดับแรกคือ ระบบและสัญญาณ โดยระบบคือกลุ่มของวัตถุที่รวมกัน ซึ่งสามารถทำงานร่วมกันเพื่อให้สำเร็จตามจุดมุ่งหมายที่ต้องการและสัญญาณคือปริมาณทางกายภาพบางอย่างที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบเรียกว่า สัญญาณเข้าหรือสัญญาณอินพุต (Input signal) ของระบบ และจะมีปริมาณทางกายภาพบางอย่างออกมาจากระบบซึ่งเรียกว่า สัญญาณออกหรือสัญญาณเอาต์พุต (Output signal) หรือผลตอบสนอง (Response) ของระบบ โดยสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบดังรูปที่ 3.6 ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวนั้นจะเป็นสิ่งที่ใช้แสดงถึงคุณสมบัติของระบบ และจากการวัดผลที่ได้ก็คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณซึ่งแปรผันตรงกับฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency transfer function; $H(\omega)$) ของช่องสัญญาณ โดยฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวนี้จะแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการพิจารณาอยู่ ซึ่งประกอบด้วยขนาดสัญญาณที่ส่งผ่าน (Magnitude) และผลตอบสนองทางเฟส (Phase response) ของสัญญาณ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัญญาณกับฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณนั้นกำหนดตามสมการที่ 3.11 [2] และแสดงดังรูปที่ 3.7

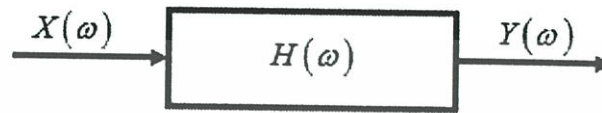


รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของระบบ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{21}(\omega) \propto H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (3.11)$$

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



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่ [13]

3.6.3 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ

การแสดงความสัมพันธ์ของช่องสัญญาณนั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ก็คือ การแสดงด้วยค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse response) ของระบบ โดยเริ่มต้นนั้นจะขอกล่าวถึงคำนิยามของฟังก์ชันอิมพัลส์ (Impulse function) ก่อนดังนี้

ฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่เหมือนกับฟังก์ชันทั่วไปโดยฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยมักนิยามแทนด้วยสัญลักษณ์ $\delta(t)$ และมีคุณสมบัติดังนี้คือ

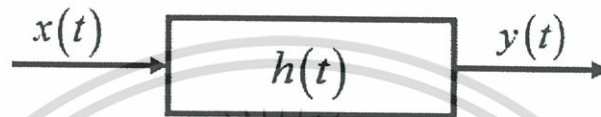
$$\int_a^b f(t) \delta(t-t_0) dt = \begin{cases} f(t_0), & a < t_0 < b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.12)$$

โดยในที่นี้ $f(t)$ จะต้องเป็นฟังก์ชันที่มีค่าต่อเนื่อง (Continuous) ที่ค่าเวลา $t = t_0$ จากสมการ 3.12 เมื่อกำหนดให้ $f(t) = 1$ จะได้

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0) dt = 1 \quad (3.13)$$

จะกล่าวได้ว่าพื้นที่ใต้เส้นโค้งของ $\delta(t-t_0)$ มีค่า 1 หน่วย โดยค่าที่ได้จากการทำปริพันธ์นี้ นิยมเรียกว่า น้ำหนัก (Weight) ของฟังก์ชันอิมพัลส์นั้น ดังนั้นจะพบว่า น้ำหนักของฟังก์ชัน $A\delta(t)$ มีค่าเท่ากับ A หน่วย ฟังก์ชันอิมพัลส์ที่มีน้ำหนัก 1 หน่วยนั้นเรียกว่า ฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วย (Unit impulse function) แม้ว่าฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่สามารถสร้างได้จริงในทางปฏิบัติแต่ใน

ทางทฤษฎีจะมีบทบาทในการวิเคราะห์สัญญาณและระบบ โดยเฉพาะการบอกคุณสมบัติของระบบ อีกทั้งสัญญาณอินพุตที่เป็นฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยนั้นยังถูกนิยามเรียกว่า ผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบใช้สัญลักษณ์ $h(t)$ แทนผลตอบสนองดังกล่าวซึ่งผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบสามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบเพราะสามารถบอกคุณสมบัติของระบบนั้นได้และโดยเฉพาะเมื่อระบบภายใต้การพิจารณาเป็นระบบเชิงเส้น ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Linear time invariance system) ค่าเอาต์พุต $y(t)$ ของระบบที่เกิดจากสัญญาณอินพุต $x(t)$ ใด ๆ นั้นจะสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้รูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบใน โดเมนเวลา[13]

3.6.4 แบบจำลองของสัญญาณที่ใช้ส่ง

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นรูปแบบสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่ใช้ในการส่งได้ถูกกำหนดไว้คือเราจะพิจารณาในส่วนของสัญญาณอิมพัลส์ซึ่งมีความถี่ครอบคลุมตลอดทั้งช่วงที่คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกากำหนด คือตั้งแต่ 3.1 GHz - 10.6 GHz ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาสัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมและสัญญาณเกาส์เซียนที่ผ่านการมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด

3.6.4.1 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

โดยกำหนดความถี่ต่ำสุด (f_{\min}) เท่ากับ 3.1 GHz ความถี่สูงสุด (f_{\max}) เท่ากับ 10.6 GHz และสเปกตรัมแบนด์วิดท์ (f_b) เท่ากับ 7.5 GHz โดยสมการของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมแสดงดังสมการที่ 3.14 และ 3.15 รูปคลื่นสัญญาณใน โดเมนเวลาและขนาดของฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมแสดงในรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

$$v_t(t) = \frac{1}{f_b} [f_{\max} \text{sinc}(2f_{\max}t) - f_{\min} \text{sinc}(2f_{\min}t)] \quad (3.14)$$

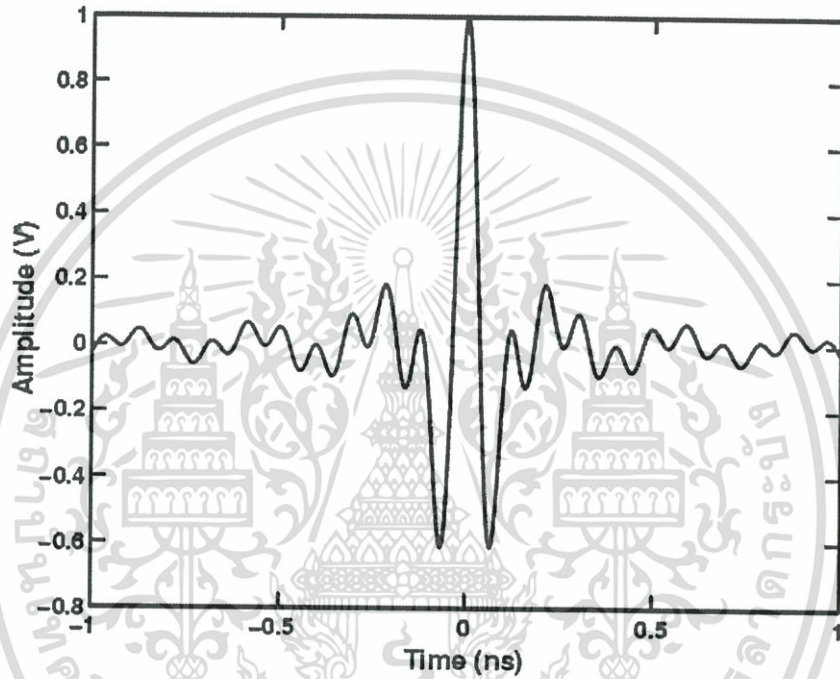
โดยที่ $f_{\min} = 3.1 \text{ GHz}$ คือความถี่ต่ำสุด

$f_{\max} = 10.6 \text{ GHz}$ คือความถี่สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

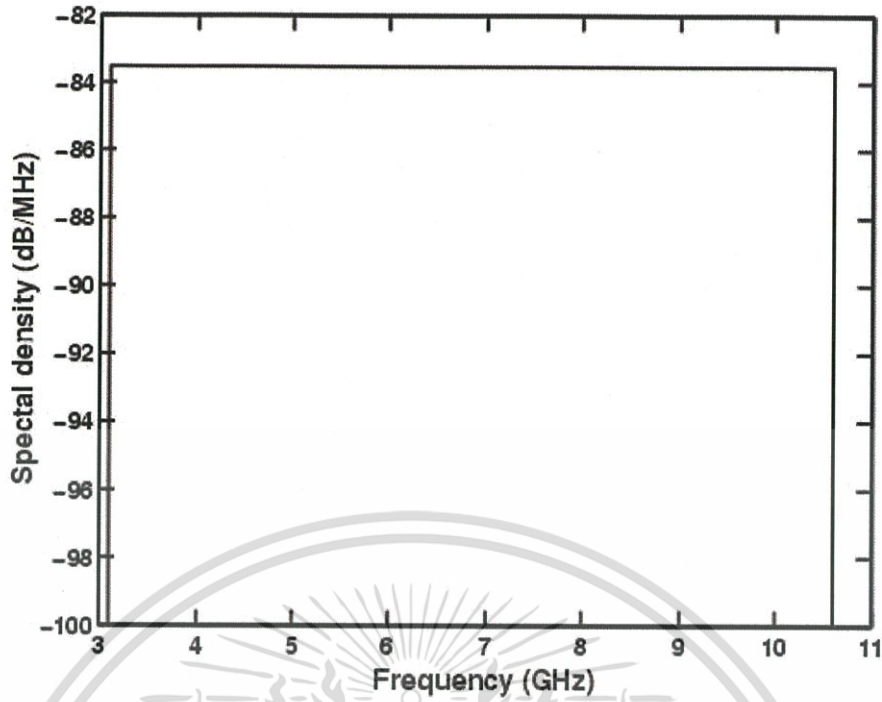
$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$$

$$V_t(f) = \begin{cases} \frac{A}{2f_b} & \|f - f_c\| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & \|f - f_c\| > \frac{f_b}{2} \end{cases} \quad (3.15)$$



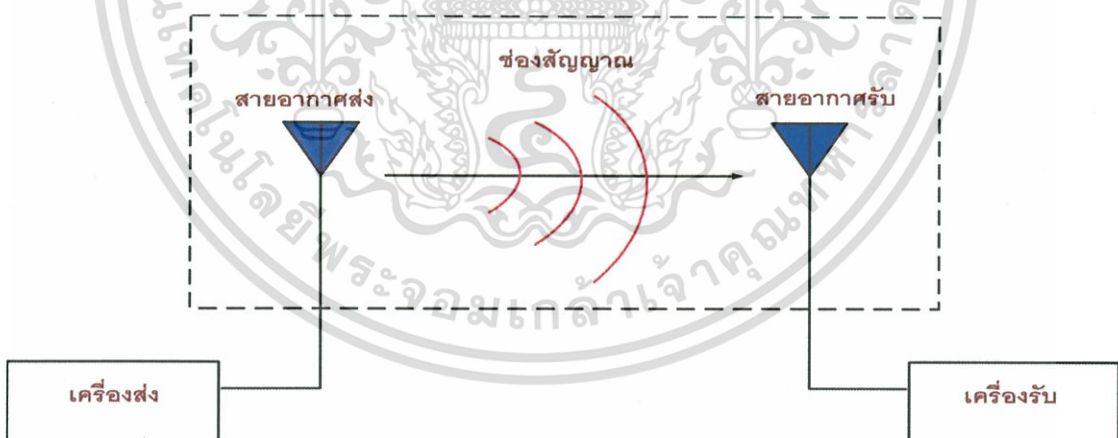
รูปที่ 3.9 รูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการส่งของแถบกว้างยิ่ง (แบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ความหนาแน่นแถบกำลังงานของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

3.6.5 หลักการส่งผ่านของฟรีส



รูปที่ 3.11 การสื่อสารแบบไร้สายในอากาศว่าง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาถึงการแพร่กระจายของสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่ง โดยในระบบแถบแคบโดยปกตินั้นจะถูกกำหนดโดยใช้หลักการส่งผ่านของฟรีส แต่ไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับการส่งสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่ง โดยในสูตรนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่อย่างไรก็ตามรูปร่างของสัญญาณอาจผิดเพี้ยนไปเนื่องจากคุณสมบัติในการตอบสนองความถี่ของสายอากาศจึงได้มีการปรับปรุงสมการของฟรีส เพื่อวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ โดยสมการของฟรีสสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

$$G_{\text{Friis}}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} = G_f(f)G_r(f)G_t(f) \tag{3.16}$$

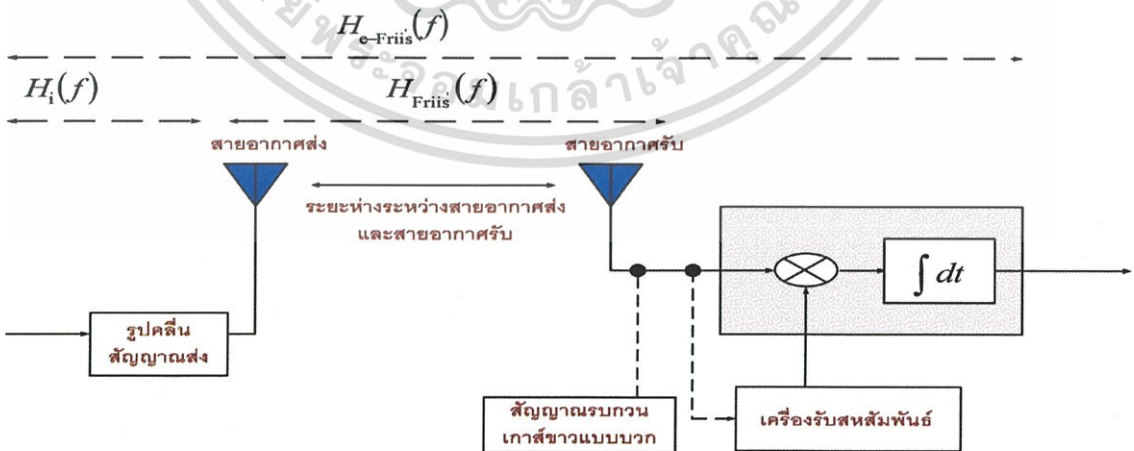
โดยที่

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

และสามารถคำนวณหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของอวกาศว่างได้จากสมการที่ 3.17

$$G_f(f) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi f d}\right)^2 \tag{3.17}$$

โดยที่ $G_f(f)$ คือ อัตราขยายของช่องสัญญาณ ในอวกาศว่าง (Free space) หรือเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันการถ่ายโอนดังสมการ 3.18



รูปที่ 3.12 การประยุกต์ใช้สมการของฟรีสที่ได้มีการขยายจากสมการการส่งผ่านของฟรีส และเพิ่ม

เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ทางด้านรับเพื่อนำมาใช้กับระบบเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{\text{Friis}}(f, d) = \frac{V_r(f)}{V_t(f, d)} = H_f(f, d)H_r(f, \Omega_r) \cdot H_t(f, \Omega_t) \quad (3.18)$$

โดยที่

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

สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนในอากาศว่าง สามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_f(f, d) = \frac{c}{4\pi ft} e^{-j2\pi f t} \quad (3.19)$$

แต่สูตรการส่งผ่านของฟรีสดังสมการที่ 3.19 เมื่อนำมาใช้ร่วมกับระบบสื่อสารที่เป็นแบบแถบกว้าง เช่น ระบบแบบแถบกว้างยิ่ง สมการของฟรีสไม่สามารถใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างด้านส่งกับด้านรับได้ทำให้ไม่สามารถพิจารณาการผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ เพราะว่าจากสมการที่ 3.19 นั้น ไม่มีสัญญาณด้านอินพุตมาเกี่ยวข้องจึงต้องมีการปรับแต่งประยุกต์ให้เหมาะสมกับความถี่ใหม่ โดยสมการที่ปรับแต่งแล้วมีรูปแบบเป็นตามสมการที่ 3.20 [9] ซึ่งเรียกว่า การประยุกต์สมการการส่งผ่านของฟรีส [5] ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการถ่ายโอน

$$H_{\text{e-Friis}}(f, d) = \frac{V_r(f)}{E_i} = H_f(f, d)H_i(f)H_r(f, \Omega_r) \cdot H_t(f, \Omega_t) \quad (3.20)$$

ซึ่ง $H_a(a=r \text{ หรือ } t)$ ฟังก์ชันของเวกเตอร์ที่ใช้ส่งผ่านเชิงซ้อนของสายอากาศที่สัมพันธ์กับสายอากาศแบบไอโซทรอปิกโดยทิศทาง $\Omega_a = (\theta_a, \varphi_a)$ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 H_a(f, \Omega_a) &= H_a(f, \theta_a, \varphi_a) \\
 &= \hat{\theta}_a H_{a\theta}(f, \theta_a, \varphi_a) + \hat{\varphi}_a H_{a\varphi}(f, \theta_a, \varphi_a),
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

เวกเตอร์หน่วยหนึ่ง $\hat{\theta}_a, \hat{\varphi}_a$ แสดงทิศทางและได้กำหนดให้สอดคล้องกับมุมกวาดของสายอากาศ โดยสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\hat{\theta}_r = \hat{\theta}_t \tag{3.22}$$

$$\hat{\varphi}_r = -\hat{\varphi}_t \tag{3.23}$$

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศระหว่างด้านส่งและด้านรับ หาได้จากสมการ

$$S_{21}(f) = H_{\text{AUT}}(\theta, \varphi, f) H_r(f, d) H_{\text{Std}}(f), \tag{3.24}$$

ซึ่งฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศด้านรับ หาได้จากสมการ

$$H_{\text{AUT}}(\theta, \varphi, f) = \frac{S_{21}(f)}{H_r(f, d) H_{\text{Std}}(f)} \tag{3.25}$$

ฟังก์ชันความหนาแน่นแถบกำลังงานของสัญญาณรับได้ หาได้จากสมการ

$$V_r(f) = H_c(f) \cdot V_t(f) \tag{3.26}$$

รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{-j2\pi f t} df \tag{3.27}$$

รูปแบบสัญญาณทางด้านรับ $v_r(t, d)$ หาได้จากสมการ

$$v_r(t, d) = v_t(t) * h_{\text{Friis}}(t, d) \tag{3.28}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

- $v_i(t)$ คือ รูปแบบสัญญาณทางค้ำส่ง
 * คือ คอนโวลูชัน
 $h_{\text{Friis}}(t, d)$ คือ ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของการขยายตัวของหลักการของฟรีส
 หาได้จาก

และผลตอบสนองทางอิมพัลส์ของอวกาศว่างสามารถคำนวณได้จากการแปลงฟูรีเยร์ผกผันแบบเร็ว ดังสมการที่ 3.29

$$h_{\text{Friis}}(t, d) = F^{-1}\{H_{\text{Friis}}(f, d)\} \quad (3.29)$$

3.6.6 เครื่องรับสัญญาณในระบบแบบแถบกว้างยิ่ง

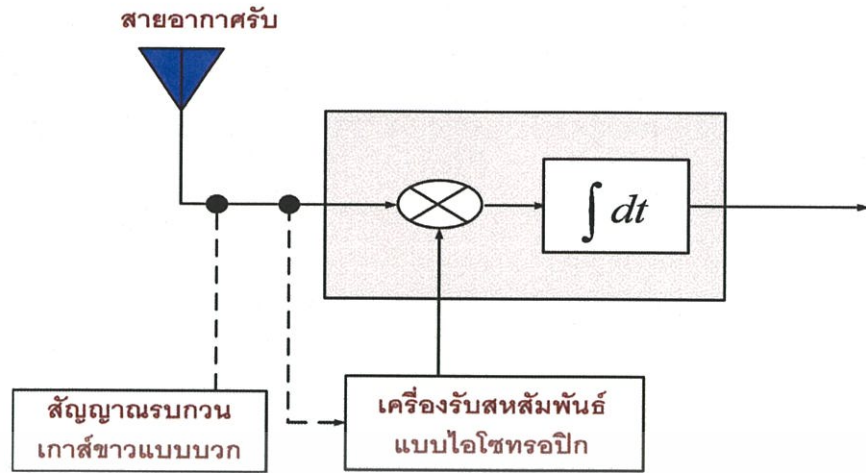
เครื่องรับสัญญาณในระบบแบบแถบกว้างยิ่งนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ ซึ่งหลักการของเครื่องรับประเภทนี้จะทำให้นำเอาเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบไอโซทรอปิก (Isotropic Template) โดยกำหนดให้ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของค่าสูงสุดสำหรับเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบไอโซทรอปิกและเอาต์พุตแบบสหสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการที่ 3.30 และ 3.31

$$h_{\text{wc}}(t) = \frac{\sqrt{2B} v_{\text{r-iso}}(\tau_o - t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |v_{\text{r-iso}}(t)|^2 dt}} \quad (3.30)$$

$$v_{\text{r-iso}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_r(f) H_i(f) \exp(j2\pi ft) df \quad (3.31)$$

โดยที่บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง จะแสดงในรูปแบบ

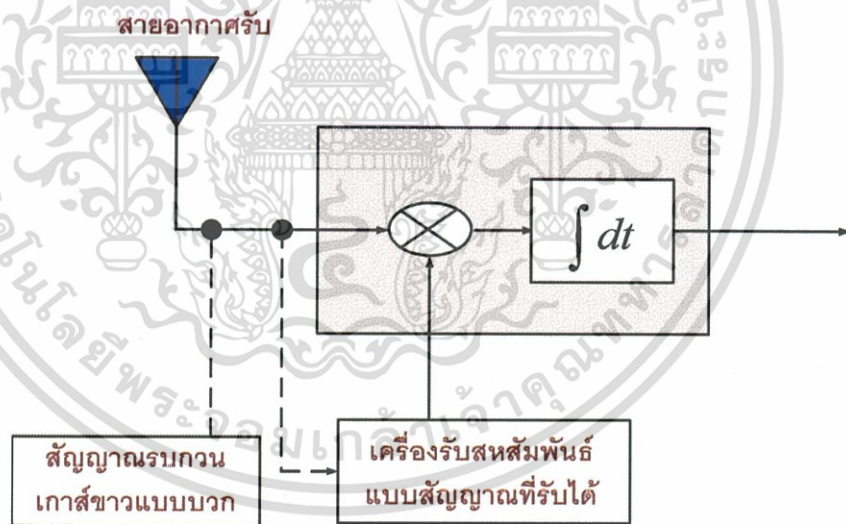
3.13



รูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบไอโซทรอปิก

3.6.6.1 เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้

เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ที่นำมาใช้พิจารณานั้นจะใช้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ (Received signal template)



รูปที่ 3.14 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณแม่แบบเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนของ V_r โดยมีอัตราการขยายเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนคงที่ ดังนั้น ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ $H_{RTP}(f)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$H_{\text{RTP}}(f) = \frac{\sqrt{2f_b} V_r^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} V_r(f)^2 df}} \quad (3.32)$$

โดย $V_r(f)$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้

ผลตอบสนองอิมพัลส์หรือสัญญาณแม่แบบของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ เป็นสัญญาณแม่แบบ h_{RTP} สามารถหาได้จากการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับของฟังก์ชันการถ่ายโอน ความถี่ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$h_{\text{RTP}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_{\text{RTP}}(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.33)$$

ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาต์พุตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบ $V_{\text{RTP}}(f)$ สามารถคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบคูณกับฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณรับ $V_r(f)$ ดังสมการ

$$V_{\text{RTP}}(f) = V_r(f) \cdot H_{\text{RTP}}(f) \quad (3.34)$$

หลังจากที่ได้ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาต์พุตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแม่แบบแล้ว สามารถหาค่ารูปคลื่นสัญญาณรับของแมตซ์ฟิลเตอร์ $v_{\text{RTP}}(t)$ โดยการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับ ดังสมการ

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

3.6.7 การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss)

ในระบบการสื่อสาร ไร้สายนั้นเป้าหมายหลักของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นคือ การคาดการณ์ถึงค่าสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ PL เนื่องจากการแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณ โดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างระดับกำลังงานที่ใช้ส่งและระดับกำลังงานที่รับได้ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบล (Decibel) ดังแสดงในสมการที่ 3.36

$$PL_{dB} = 20 \log \left(\frac{v_t(t)}{v_r(t)} \right) \quad (3.36)$$

โดยที่

v_t คือ ระดับสัญญาณที่ส่ง

v_r คือ ระดับสัญญาณที่รับได้

โดยในการวิเคราะห์ค่าสูญเสียเชิงวิถีในระบบแถบกว้างยิ่ง PL_{UWB} นั้นจะพิจารณาที่ กำลังงานสูงสุดของสัญญาณที่ส่งและกำลังสูงสุดของสัญญาณที่รับได้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทาง (d) โดยมีนิยามเป็นไปตามสมการที่ 3.37 และ 3.38 ตามลำดับ

$$PL[dB] = 20 \log \left[\frac{\max |v_t(t)|}{\max |v_r(t, d)|} \right] \quad (3.37)$$

โดยในสมการที่ 3.36 ได้กำหนดให้ขนาดของสัญญาณที่ส่งมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$PL_{UWB}(d)[dB] = -20 \log [\max |v_r(t, d)|] \quad (3.38)$$

3.6.8 อัตราขยายเชิงวิถี (Path gain)

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้อัตราขยายเชิงวิถีมาใช้ในการวิเคราะห์หาการลดทอนของสัญญาณด้านรับโดยอัตราขยายเชิงวิถีเป็นส่วนกลับของการสูญเสียเชิงวิถีและสามารถคำนวณหาการสูญเสียเชิงวิถีในแบบจำลองการสะท้อนจากพื้นเป็นอัตราส่วนของขนาดของคลื่นที่สูงสุดของสัญญาณด้านส่งกับขนาดของคลื่นที่สูงสุดของสัญญาณด้านรับ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเดซิเบลดังสมการที่ 3.39

$$PG(dB) = 20 \log \left(\frac{\max |v_t(t)|}{\max |v_r(t)|} \right) \quad (3.39)$$

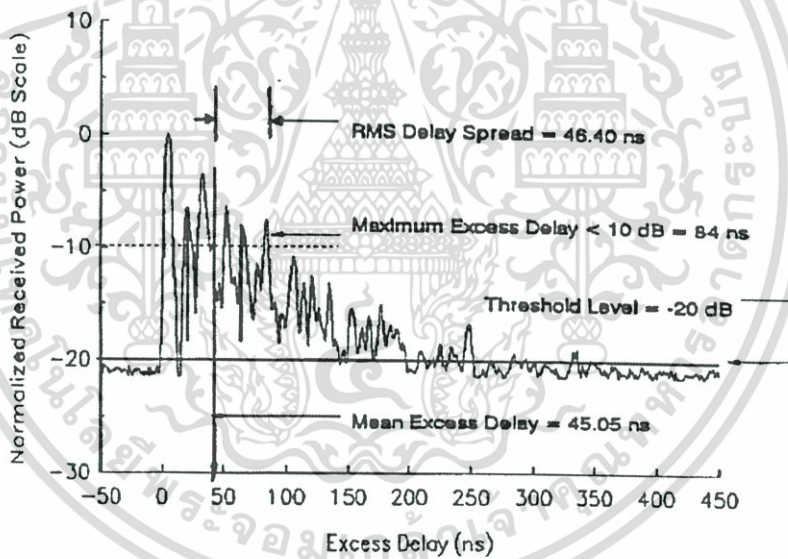
และอัตราขยายเชิงวิถีเป็นส่วนกลับของการสูญเสียเชิงวิถี ดังสมการที่ 3.40

$$PG = 20 \log(\max |v_r(t)|) \quad (3.40)$$

โดย t คือเวลาที่สัญญาณด้านรับมาถึงสายอากาศด้านรับ

3.6.9 หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง

พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่นิยมนำมาวิเคราะห์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับที่เวลาต่าง ๆ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสัญญาณ ที่มีการสะท้อนในหลายทิศทางหรือที่เรียกว่าสัญญาณหลายวิถี โดยจะเรียกว่า หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง (Power delay profile: PDP) ซึ่งตัวอย่างของ PDP ได้แสดงดังรูปที่ 3.15 [14] โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อเวลาที่เข้ามาถึง และนอกจากนั้นยังสามารถนำไปพิจารณาถึงผลการกระจายทางเวลา (Time dispersion) อันประกอบไปด้วย การประวิงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay) และ ค่าการแผ่ประวิง RMS (rms delay spread)



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างหน้าตัดข้างการประวิงกำลัง [14]

3.6.9.1 ค่าการกระจายทางเวลา

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับมีได้หลายทิศทาง และสัญญาณแต่ละส่วนมักจะส่งผ่านในเส้นทางที่มีระยะทางไม่เท่ากัน สัญญาณบางส่วนอาจจะเดินทางในระดับเส้นสายตาระหว่างภาคส่งและภาครับ สัญญาณส่วนนี้มักจะเดินทางถึงภาครับได้เร็ว ในขณะที่สัญญาณส่วนอื่นที่มีการตกกระทบพื้นผิวของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเกิดการสะท้อนหลายครั้งกว่าจะเดินทางถึงภาครับ สัญญาณมักจะใช้เวลาการแพร่กระจายที่ยาวนานกว่า ความล่าช้าในการเดินทางของสัญญาณแต่ละส่วนก่อให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า การแผ่ประวิง (Delay spread) ขึ้น นั่นคือสัญญาณแต่ละส่วนใช้เวลาเดินทางถึงจุดหมายไม่เท่ากัน ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาถึงเวลาที่ถูกระเบิดออกไปของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับ ซึ่งในส่วนของ การกระจายทางเวลา (Time dispersion) นั้นสามารถที่จะวิเคราะห์โดยใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ประวิงเกินออกไปจากค่าเวลาเดิมหรือการประวิงเข้าถึงเฉลี่ย (Mean excess delay; $\bar{\tau}$) และค่าการแผ่ประวิง RMS (RMS delay spread; σ_{τ}) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้ถูกนิยามไว้ดังสมการที่ 3.41 และสมการที่ 3.42 ตามลำดับ [15]

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2 \tau_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n P(\tau_i) \tau_i}{\sum_{i=1}^n P(\tau_i)} \quad (3.41)$$

โดยที่

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

สำหรับค่าการแผ่ประวิง RMS นั้นจะนิยามคือ

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (3.42)$$

โดยที่

$$\tau^2 = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2 \tau_i^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n P(\tau_i) \tau_i^2}{\sum_{i=1}^n P(\tau_i)} \quad (3.43)$$

3.6.10 แบบจำลองเชิงสถิติ

3.6.10.1 การแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มชนิดต่อเนื่อง

ฟังก์ชันที่มีค่าต่อเนื่องและพื้นที่ใต้เส้นโค้งของฟังก์ชันที่อยู่เหนือแกน X ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1 ฟังก์ชันที่สร้างขึ้นมานี้เรียกว่า ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function) อนุพันธ์ของความน่าจะเป็นที่ตัวแปรสุ่ม X มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด x ซึ่งสามารถเขียนเป็นนิพจน์ทางคณิตศาสตร์ได้

$$f_x(x) = \frac{d}{dx} P\{X \leq x\} \quad (3.44)$$

จากสมการข้างบนจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอินทิเกรตฟังก์ชัน PDF จะได้ความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ตัวแปรสุ่ม X มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด x ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์เสมอ ดังนั้น จึงทำให้ $f_x(x)$ จะต้องเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และมีพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดเท่ากับหนึ่ง

เนื่องจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นนี้สร้างขึ้นมา โดยที่พื้นที่ใต้เส้นโค้งของฟังก์ชันที่อยู่เหนือแกน X ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1

นิยาม 1 ถ้า X เป็นตัวแปรสุ่มชนิดต่อเนื่อง $f(x)$ จะเป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ X ถ้า $f(x)$ มีคุณสมบัติดังนี้

1. $f(x) \geq 0$ สำหรับทุกค่าของ x
2. $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$
3. $P(a < x < b) = \int_a^b f(x) dx$

3.6.10.2 ฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม

ความน่าจะเป็นที่ตัวแปรสุ่ม X มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด x ซึ่งมีค่าเท่ากับการอินทิเกรต

$$F_x(x) = P\{X \leq x\} = \int_{-\infty}^x f_x(\tau) d\tau \quad (3.45)$$

นิยาม 2 ฟังก์ชันต่อเนื่องที่มีคุณสมบัติเป็นฟังก์ชันเพิ่ม ซึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ x เป็น $-\infty$ และมีค่าเป็นหนึ่ง เมื่อ x เป็น ∞

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. $0 \leq F(x) \leq 1$
2. $F(-\infty) = P\{X \leq -\infty\} = P\{X = -\infty\} = 0$
3. $F(\infty) = P\{X \leq \infty\} = 1$, since $\{X \leq \infty\}$
4. $F(x_2) \geq F(x_1) \quad \forall x_1 < x_2$
5. $P\{x_1 < X \leq x_2\} = F(x_2) - F(x_1)$

3.6.10.3 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มชนิดต่อเนื่อง

นิยาม 3 ฟังก์ชันต่อเนื่องที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และมีพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดเท่ากับหนึ่ง ถ้า X เป็นตัวแปรสุ่มชนิดต่อเนื่อง และฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ X คือ $f(x)$ ค่าเฉลี่ยของ X คือ

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \quad (3.46)$$

นิยาม 4 ถ้า X เป็นตัวแปรสุ่มชนิดต่อเนื่อง และฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ X คือ $f(x)$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ x คือ

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f_x(x) dx} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - \mu)^2} \quad (3.47)$$

3.6.11 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

ในการตรวจสอบหาความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณที่รับได้นั้นสามารถวิเคราะห์และแสดงให้เห็นโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ดังแสดงนิยามตาม สมการที่ 3.48 ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ข้าม (Cross correlation) ที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณส่งและสัญญาณรับ ด้กับค่าสูงสุดของค่าสัมบูรณ์รากที่สองของผลคูณระหว่างค่าอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) ของสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้โดยสมการที่นิยามถึงค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นตามสมการที่ 3.49 ถึงสมการที่ 3.51 ตามลำดับ

$$C = \frac{\max |r_{i,r}(\tau)|}{\sqrt{\max |r_i(\tau)| \cdot \max |r_r(\tau)|}} \quad (3.48)$$

โดยสมการที่นิยามค่าสหสัมพันธ์ข้าม คือ

$$r_{t,r}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_t(\tau)v_r(t+\tau)dt \quad (3.49)$$

และสมการที่นิยามค่าอัตสหสัมพันธ์ คือ

$$r_t(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_t(\tau)v_t(t+\tau)dt \quad (3.50)$$

$$r_r(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_r(\tau)v_r(t+\tau)dt \quad (3.51)$$

โดยที่

$v_t(t)$ คือ สัญญาณส่ง

$v_r(t)$ คือ สัญญาณที่รับได้

3.6.12 อัตราผิดพลาดบิต (Bit error rate)

อัตราความผิดพลาดของบิตนี้ใช้เพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของสัญญาณแต่ละทิศทางว่าเกิดความผิดพลาดขึ้นมากน้อยเพียงใด โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (3.52) ดังนี้

$$BER = Q \left[\sqrt{\frac{(E_b/N_0)f_b C_c}{b_r}} \right] \quad (3.52)$$

โดย $Q(x)$ เป็นฟังก์ชันมาตรฐานซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.53) และ C_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (3.53)$$

โดยที่

Q คือ ความน่าจะเป็นของความผิดพลาด

C_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

b_r คือ อัตราการส่งข้อมูล

f_b คือ แบนด์วิดท์

E_b คือ พลังงานเฉลี่ยต่อบิต

N_0 คือ ความหนาแน่นกำลังของสัญญาณรบกวน

3.7 สรุป

ในบทนี้ ได้กล่าวถึงหลักการที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณในการสื่อสารซึ่งเป็นส่วนสำคัญในวิทยานิพนธ์นี้ อันประกอบด้วยรายละเอียดของคุณลักษณะของช่องสัญญาณ ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อหรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณลักษณะของช่องสัญญาณ รวมไปถึงระบบการวัดช่องสัญญาณซึ่งทำการวัดในโดเมนความถี่ จากนั้นจะนำผลการวัดมาใช้ในการตรวจสอบถึงผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวในบทต่อไป อีกทั้งบทยังกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณบนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส (โดยการประยุกต์สูตรของฟรีส) และทางด้านรับได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สองแบบมาเปรียบเทียบกับระหว่างเครื่องรับแบบสัญญาณที่รับได้ และเครื่องรับแบบไอโซทรอปิก ผลการทดลองวิจัยและผลการวิเคราะห์ของการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง การผิดเพี้ยนของสัญญาณ หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง และความน่าจะเป็น และฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ อันเนื่องมาจากผลกระทบจากปัจจัยดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น ซึ่งจะแสดงขั้นตอนในการจำลอง และผลของการจำลองในบทต่อไป



บทที่ 4

การทดลองวิจัยและการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณ การแพร่กระจายคลื่นแบบกว้างยิ่ง

4.1 กล่าวนำ

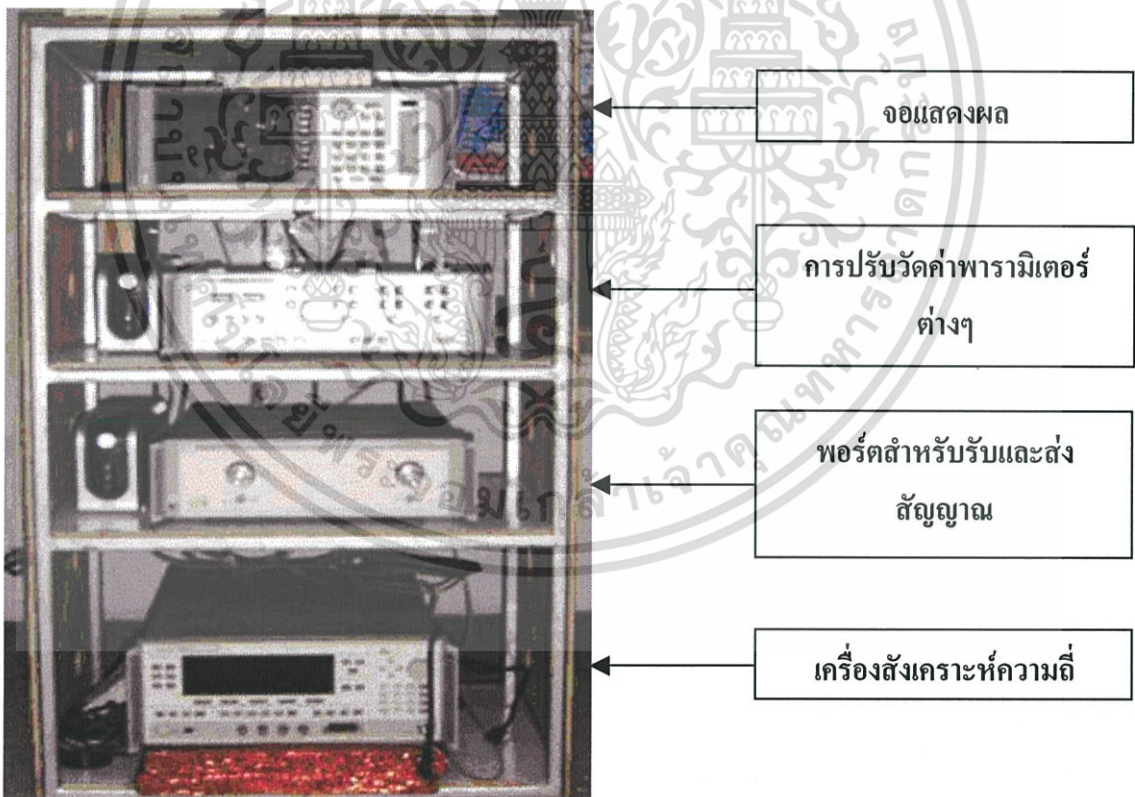
การติดต่อสื่อสารเครือข่ายส่วนบุคคลแบบไร้สายภายในอาคารสำนักงาน และเครือข่ายภายในบ้านพักอาศัย เป็นเทคโนโลยีที่ได้สร้างความสนใจมากในปัจจุบันเพราะช่วยเพิ่มความสะดวกรวดเร็วมากขึ้น เพื่อให้ได้ตามความต้องการระบบสื่อสารแบบไร้สายที่มีความเร็วสูง อัตราการส่งข้อมูลข่าวสารได้สูง มีความจุช่องสัญญาณสูง ใช้กำลังงานการส่งข้อมูลข่าวสารต่ำ และต้นทุนการผลิตต่ำนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาประสิทธิภาพในการสื่อสารข้อมูล และการวิเคราะห์พารามิเตอร์เพื่อแก้ปัญหาในการสูญเสียในการส่งผ่านสัญญาณ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า การแพร่กระจายคลื่นภายในอาคารนั้นยากมาก ๆ สำหรับในการประมาณและการทำงานของช่องสัญญาณ เนื่องจากมีการสะท้อน การหักเห และการกระจัดกระจายของคลื่นเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการจางหายของสัญญาณด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแบบแผนการทดลองวิจัยของคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสถานะแวดล้อมจริงภายในอาคาร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ในการวัดและบันทึกผล ของฟังก์ชันการถ่ายโอนในอวกาศว่างของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งในการศึกษาทดลองวิจัยได้พิจารณารูปแบบวัดอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น รูปแบบการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร และรูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร จากนั้นนำผลที่ได้จากการวัดไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่สำคัญ บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส และทางด้านรับได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ ผลการทดลองวิจัยและการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในบทถัดไป สำหรับในบทนี้ได้แสดงรูปแบบการทดลองวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ และพารามิเตอร์สำคัญที่กำหนดสำหรับการทดสอบ ซึ่งได้อธิบายไว้ดังต่อไปนี้

4.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.1 เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์

ระบบของการทดสอบนั้น องค์ประกอบสำคัญในการทดสอบช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยี่ง นั้นจะใช้เครื่องทดสอบเฉพาะซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์รุ่น HP-8510C ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (S-parameter test set) รุ่น HP-8514B และเครื่องสังเคราะห์ ความถี่ (Frequency synthesized sweeper) รุ่น HP-83620A เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบดังแสดง ให้เห็นในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะถูกรวบรวมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ที่เชื่อมต่อผ่านช่องสื่อสาร แบบ GPIB (General purpose interface bus) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่สามารถทดสอบ สัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ต ซึ่งในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบแบบสองพอร์ต โดยพอร์ตที่หนึ่ง คือ พอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ส่วนพอร์ตสองจะใช้ในการรับสัญญาณ โดยที่ปลาย ของพอร์ตทั้งสองจะถูกต่อด้วยสายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical antenna) และทำการทดสอบใน โดเมนความถี่ก่อนที่จะถูกนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป



รูปที่ 4.1 ชุดเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์

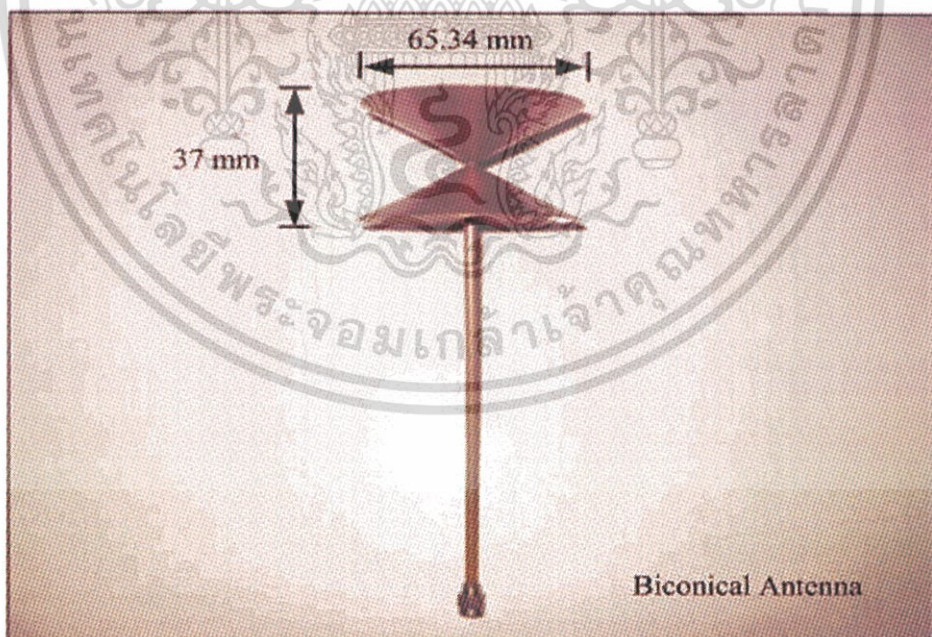
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ

ในการส่งสัญญาณแบบไร้สายนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ที่เรียกว่า สายอากาศ ซึ่งจะอยู่กับเครื่องส่ง และเครื่องรับเพื่อช่วยในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว แพร่กระจายสัญญาณผ่านอากาศออกไปยังสายอากาศทางด้านรับที่อยู่กับเครื่องรับแล้วเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับนี้กลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าตามเดิม โดยในการทดสอบนี้ได้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ทั้งสายอากาศทางด้านส่ง (Tx) และสายอากาศทางด้านรับ (Rx) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) แบบรอบตัว (Omnidirectional) และเป็นสายอากาศที่ตอบสนองความถี่ได้กว้าง (Wideband) ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในความถี่ย่านตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ตามข้อกำหนดย่านความถี่การใช้งานของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ของทาง FCC โดยสายอากาศที่นำมาใช้ในการทดสอบมีรายละเอียด ดังนี้

4.2.2.1 สายอากาศแบบกรวยคู่

สายอากาศแบบกรวยคู่เป็นสายอากาศแบบแถบกว้าง ในงานวิจัยได้พิจารณานำมาใช้ในการทดสอบ โดยมีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบรอบตัวในมุมกวาด (Azimuth) มีอัตราขยายของสายอากาศ (Gain) ต่ำ อยู่ในช่วง 0 ถึง 1.5 dBi รูปที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและขนาดของสายอากาศชนิดนี้ [6]

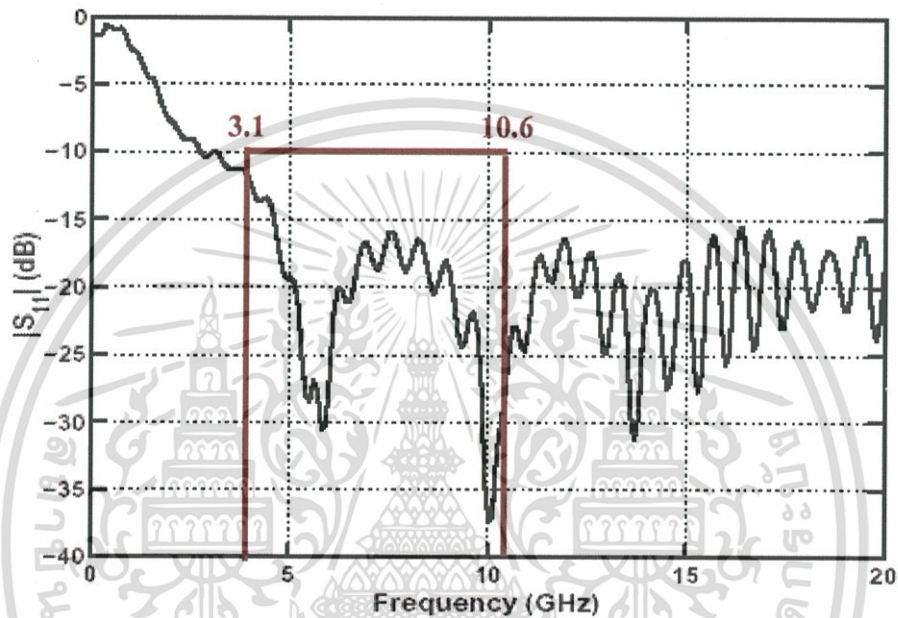


รูปที่ 4.2 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

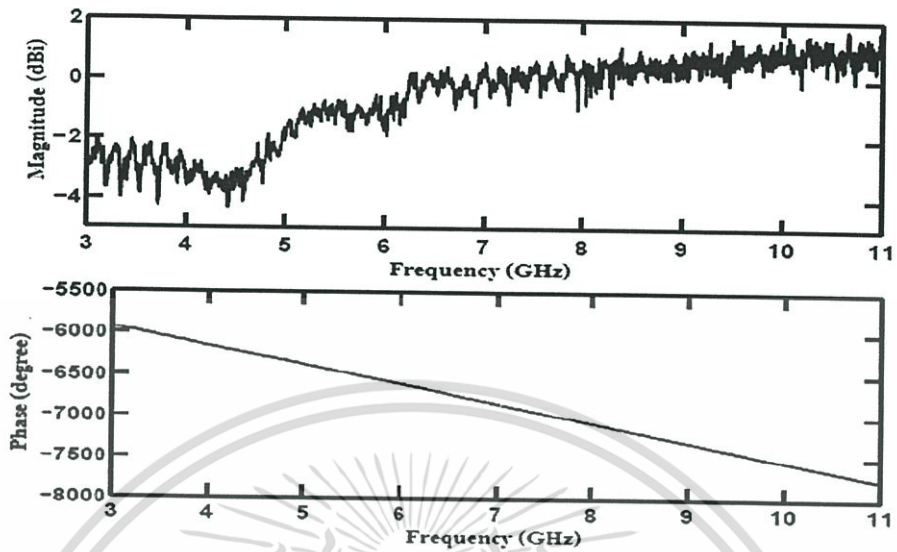
โดยในรูปที่ 4.3 แสดงค่าประสิทธิภาพการสะท้อนกลับ (Reflection coefficient : S_{11}) ของสายอากาศแบบกรวยคู่ เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับนั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.5 ถึง 20 dB แสดงให้เห็นว่าสายอากาศนี้เหมาะกับการนำมาใช้ในการทดสอบช่องสัญญาณนี้

ในส่วนของการแสดงถึง ขนาดของฟังก์ชันการส่งผ่านและเฟสที่ใช้ในการส่งผ่านของสายอากาศ ซึ่งเป็นคุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 $|S_{11}|$ คุณสมบัติของสายอากาศแบบกรวยคู่ [6]

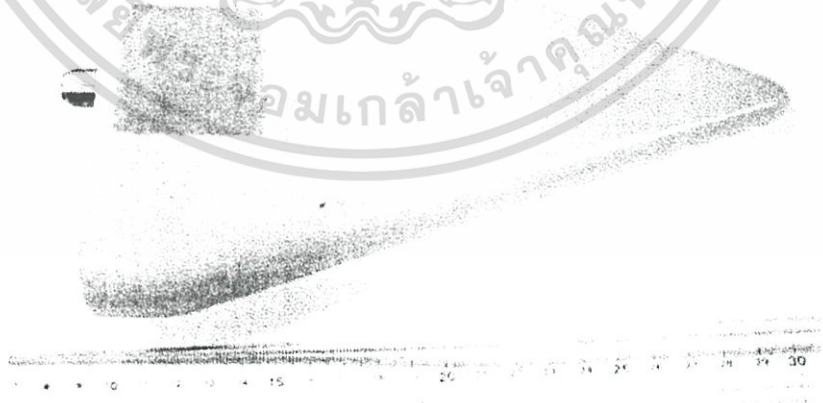
ในส่วนของการแสดงถึง ขนาดของฟังก์ชันการส่งผ่าน และเฟสที่ใช้ในการส่งผ่านของสายอากาศซึ่งเป็นคุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ โดยแสดงไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศแบบกรวยคู่ [6]

4.2.2.2 สายอากาศแบบรายคาบสี่ก (Log – periodic dipole Antenna)

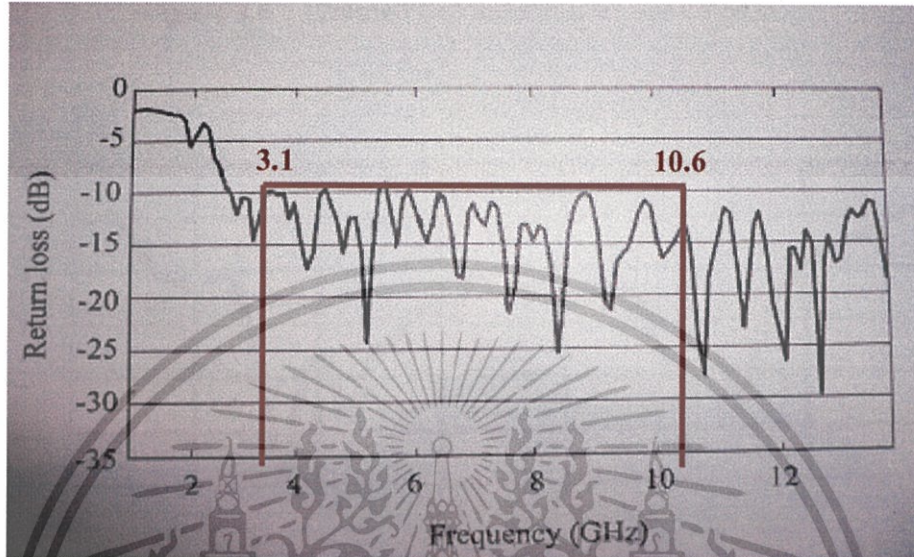
สายอากาศแบบรายคาบสี่ก ในงานวิจัยได้พิจารณานำมาใช้ในการทดสอบ โดยมีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางตรงใช้งานในช่วงความถี่ 1GHz ถึง 12.4 GHz รูปที่ 4.5 จะแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและขนาดของสายอากาศชนิดนี้ [6]



รูปที่ 4.5 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบรายคาบสี่ก [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในรูปที่ 4.6 แสดงค่าประสิทธิภาพการสะท้อนกลับ (Reflection coefficient : S_{11}) ของสายอากาศแบบระบายคาบถี่ใน ช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 12.4 GHz



รูปที่ 4.6 $|S_{11}|$ คุณสมบัติของสายอากาศแบบระบายคาบถี่ [6]

4.3 การทดสอบช่องสัญญาณ

ในการทดสอบช่องสัญญาณได้ทำการทดสอบในสถานะแวดล้อมภายในอาคาร โดยมีทั้งหมด 4 รูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 รูปแบบการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน

ในการทดสอบช่องสัญญาณเพื่อการหาค่าการสูญเสียนั้น เป็นการตรวจสอบหาค่าคุณสมบัติของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจริง แล้วนำเอาค่าที่ได้ของช่องสัญญาณนี้ คือ ค่าการสูญเสียไปวิเคราะห์และคำนวณในกระบวนการที่กล่าวไว้แล้วต่อไป

การจำลองลักษณะของช่องสัญญาณ เพื่อทำการตรวจสอบหาคุณสมบัติทางเวลานั้น ได้ทำการจำลองสถานะแวดล้อมดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งประกอบด้วยตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับและด้านส่งที่ใช้ในการทดสอบหาคุณลักษณะของช่องสัญญาณ ในการทดสอบช่องสัญญาณครั้งนี้เป็นการทดสอบช่องสัญญาณในห้องไร้การสะท้อนโดยสายอากาศทางด้านส่งและด้านรับมีความสูงเท่ากับ 1.75 เมตร ระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับเท่ากับ 1 เมตร [16] ขั้นตอนและวิธีการทดสอบจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

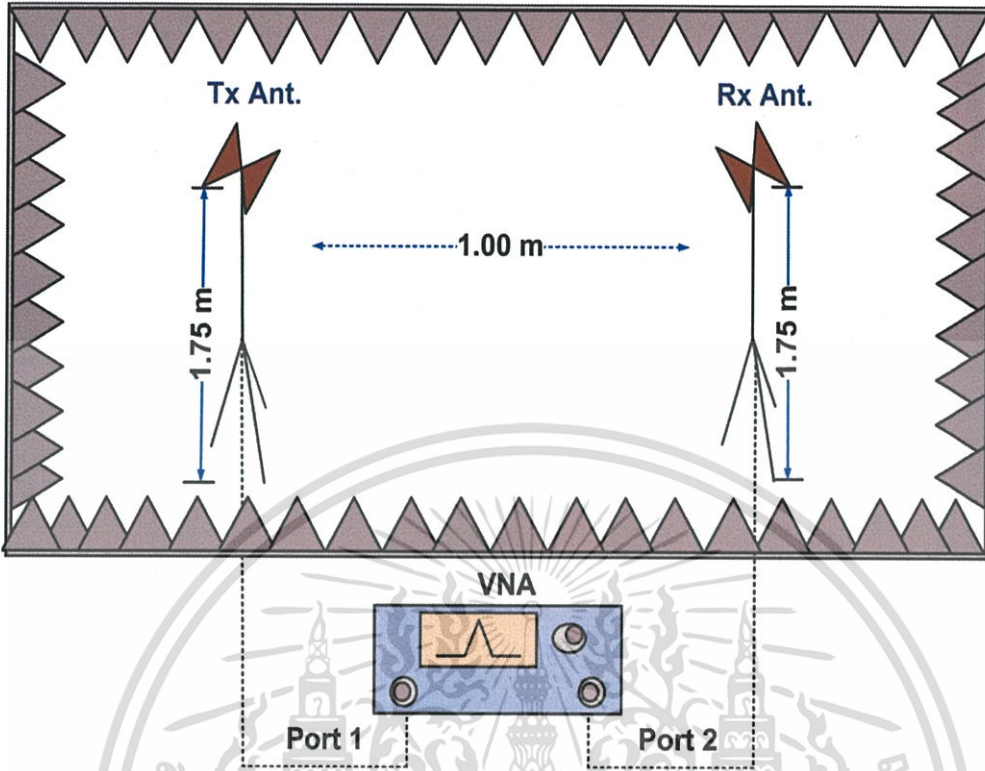
ขั้นตอนและวิธีการทดสอบช่องสัญญาณ

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ S_{21} แบบแถบกว้างยิ่งถูกวัดในลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในโดเมนของความถี่โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทดสอบและบันทึกผลที่ได้ จากนั้นนำข้อมูลการทดสอบช่องสัญญาณมาวิเคราะห์ต่อไป

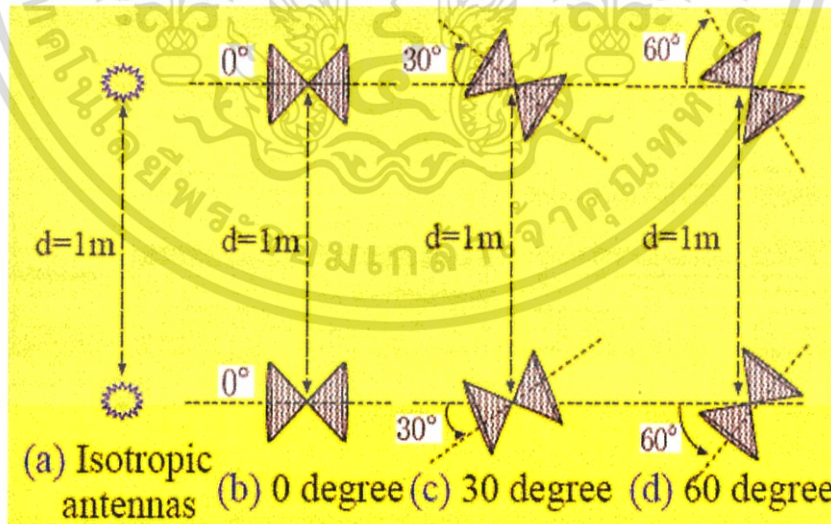
ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นจากการนำเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์มาปรับเทียบด้วยตัวปรับเทียบแบบทั้งสองพอร์ตเต็ม โดยได้ทำการแบ่งความถี่เป็นช่วง ได้แก่ ความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz ซึ่งได้ปรับความละเอียดตามมาตรฐานของเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายมากที่สุด ญี่ปุ่นได้กำหนดที่ 1601 จุดในช่วงความถี่ที่ได้ทดสอบ

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบช่องสัญญาณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ ในการทดลองนั้นได้ทำการวัดในห้องไร้การสะท้อน โดยกำหนดให้สายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นสายอากาศชนิดกรวยคู่สายอากาศทั้งคู่อยู่สูงจากพื้น 1.75 เมตรและวางห่างกัน 1 เมตร และได้ทำการเปลี่ยนสายอากาศในการทดสอบทางด้านรับเป็นสายอากาศแบบรายคาบด็อก โดยการวางตัวของสายอากาศเป็นแบบแนวนอน

ขั้นตอนที่ 3 ในการทดลองในครั้งนี้ต้องการที่จะทดลองให้เห็นว่าการหมุนของสายอากาศนั้นมีผลเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไรบ้าง จึงทำการวางตัวของสายอากาศในแนวนอนระหว่างด้านส่งและด้านรับแล้วทำการหมุน มุมที่ 0 องศา, 30 องศา และ 60 องศา ในการทดสอบช่องสัญญาณแต่ละครั้งจะได้ข้อมูลการทดสอบช่องสัญญาณเพื่อนำไปวิเคราะห์ของสายอากาศต่อไป



รูปที่ 4.7 แบบจำลองการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน



รูปที่ 4.8 การปรับสายอากาศที่มุม 0 องศา, 30 องศา และ 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการวัด แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	3 GHz - 11 GHz
ความถี่ต่ำสุด	3.0 GHz
ความถี่สูงสุด	11.0 GHz
ความถี่กลาง	7.0 GHz
แบนด์วิดท์สเปกตรัม	8.0 GHz
จำนวนจุดความถี่	1601 จุด
กำลังงานพลวัต	80 dB
ความสูงสายอากาศด้านส่งและด้านรับ	1.75 เมตร
ระยะห่างของสายอากาศด้านส่งและรับ	1.00 เมตร
มุมที่ทำการวัด	0 องศา, 30 องศา และ 60 องศา
การวางตัวของสายอากาศ	แนวนอน
สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ	สายอากาศกรวยคู่, สายอากาศแบบบราคาบลิ็อก

4.3.2 รูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน

การจำลองลักษณะของช่องสัญญาณ ได้ทำการจำลองสถานะแวดล้อมดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งประกอบด้วยตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับและด้านส่ง ที่ใช้ในการทดสอบหาคุณลักษณะของช่องสัญญาณ ในการทดสอบช่องสัญญาณครั้งนี้เป็นการทดสอบช่องสัญญาณในห้องไร้การสะท้อน โดยสายอากาศทางด้านส่งและด้านรับมีความสูงเท่ากับ 1.75 เมตร ระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับ 0.21 เมตร, 0.5 เมตร, 1.59 เมตร, 2 เมตร [17]

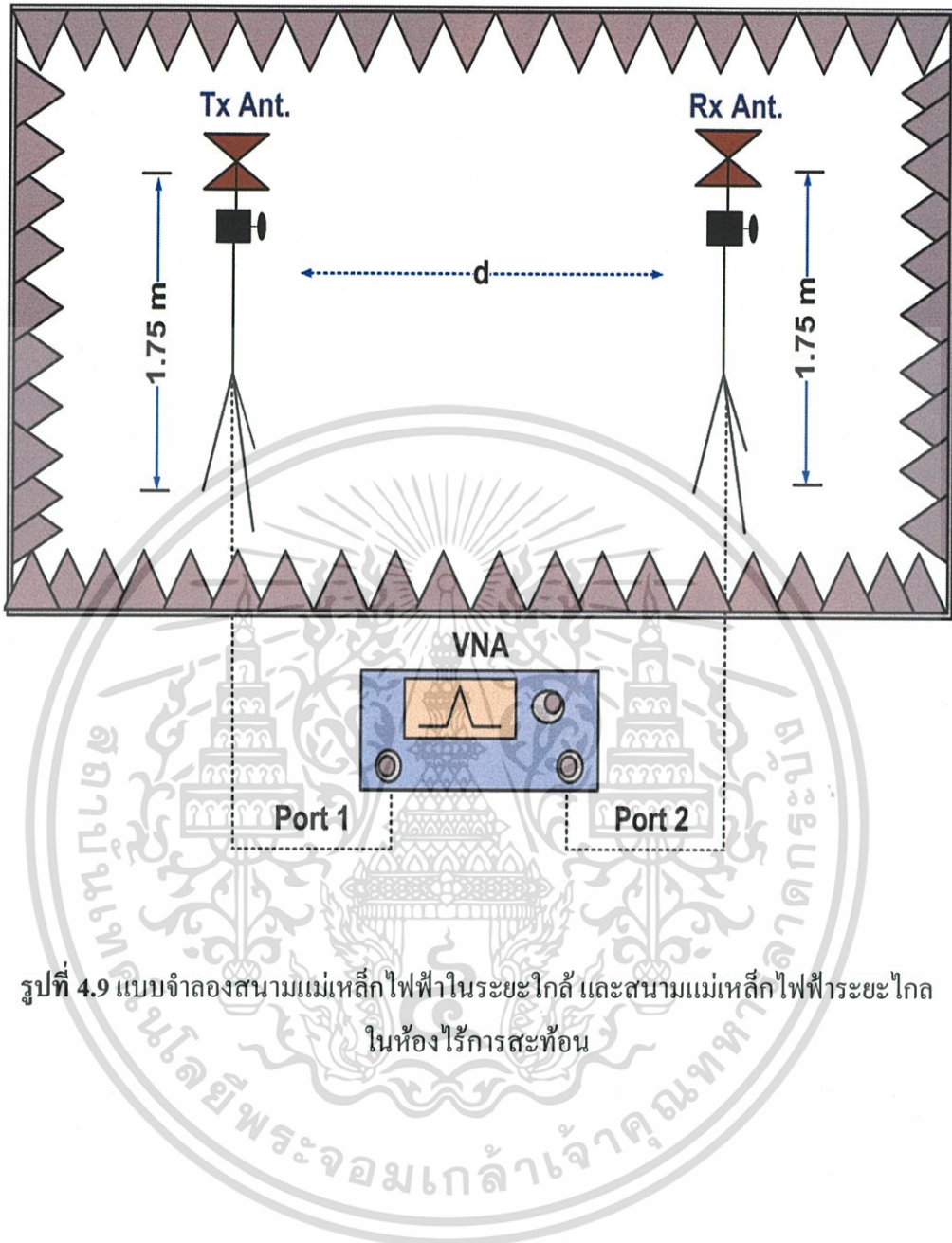
ขั้นตอนและวิธีการทดสอบช่องสัญญาณ

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ S_{21} แบบแถบกว้างยิ่งถูกวัดในลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในโดเมนของความถี่โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทดสอบและบันทึกผลที่ได้ จากนั้นนำข้อมูลการทดสอบช่องสัญญาณมาวิเคราะห์ต่อไป

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นจากการนำเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ มาปรับเทียบด้วยตัวปรับเทียบแบบทั้งสองพอร์ตเต็มโดยได้ทำการแบ่งความถี่เป็นช่วง ได้แก่ ความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz ซึ่งได้ปรับความละเอียดตามมาตรฐานของเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายมากที่สุด ญี่ปุ่นได้กำหนดที่ 1601 จุดในช่วงความถี่ที่ได้ทดสอบ

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบช่องสัญญาณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ โดยกำหนดให้สายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นสายอากาศชนิดกรวยคู่ สายอากาศทั้งคู่อยู่สูงจากพื้น 1.75 เมตรและวางห่างกัน 0.21 เมตร, 0.5 เมตร, 1.59 เมตร และ 2 เมตร โดยมีการวางตัวของสายอากาศแบบแนวตั้ง

ขั้นตอนที่ 3 ในการทดลองนั้นได้ทำการวัดในห้องไร้การสะท้อน โดยสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศแบบกรวยคู่ ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นรอบตัวจะใช้เป็นสายอากาศทางด้านส่งและด้านรับ ในการทดสอบช่องสัญญาณแต่ละครั้งจะได้ข้อมูลการทดสอบช่องสัญญาณเพื่อนำไปวิเคราะห์ของสายอากาศต่อไป



รูปที่ 4.9 แบบจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล
ในห้องไร้การสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการวัด แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	3 GHz - 11 GHz
ความถี่ต่ำสุด	3.0 GHz
ความถี่สูงสุด	11.0 GHz
ความถี่กลาง	7.0 GHz
แบนด์วิดท์สเปกตรัม	8.0 GHz
จำนวนจุดความถี่	1601 จุด
กำลังงานพลวัต	80 dB
ความสูงสายอากาศด้านส่งและด้านรับ	1.75 เมตร
ระยะห่างของสายอากาศด้านส่งและรับ	0.21 เมตร, 0.5 เมตร, 1.59 เมตร และ 2 เมตร
การวางตัวของสายอากาศ	แนวตั้ง
สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ	สายอากาศกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร

การจำลองลักษณะของช่องสัญญาณ เพื่อทำการตรวจสอบหาค่าคุณสมบัติทางเวลานั้นได้ทำการจำลองสภาวะแวดล้อมดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งประกอบตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับและด้านส่งที่ใช้ในการทดสอบหาค่าลักษณะของช่องสัญญาณ ในการทดสอบช่องสัญญาณครั้งนี้เป็นการทดสอบช่องสัญญาณภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงภายในอาคาร ใช้ห้องในการทดสอบช่องสัญญาณที่มีขนาดความกว้าง 6.70 เมตร ความยาว 4.13 เมตร สูง 2.5 เมตร ผนังของห้องเป็นผนังที่ทำด้วยอิฐ เพดานห้องจะเป็นแผ่นยิปซัม พื้นห้องทำด้วยกระเบื้อง ซึ่งเป็นลักษณะสภาวะของห้องต่างๆ ไป โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการจัดวางสำหรับการทดสอบของแบบจำลองทั้ง Room 1 และ Room 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ตามลำดับ โดยสายอากาศทางด้านส่งและด้านรับมีความสูงเท่ากับ 1.20 เมตรและ 1.68 เมตร ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่แถวลำดับแถวแรกจะห่างกันเท่ากับ 4.60 เมตร โดยทางด้านรับสัญญาณ กำหนดให้สายอากาศทางด้านส่งนั้นอยู่กับที่ส่วนสายอากาศทางด้านรับจะมีการเคลื่อนที่ไปเป็นแถวลำดับทั้งหมด 81 ตำแหน่ง ขนาด 9 แถว 9 หลัก ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับที่เคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งนี้จะมีระยะห่างเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.13

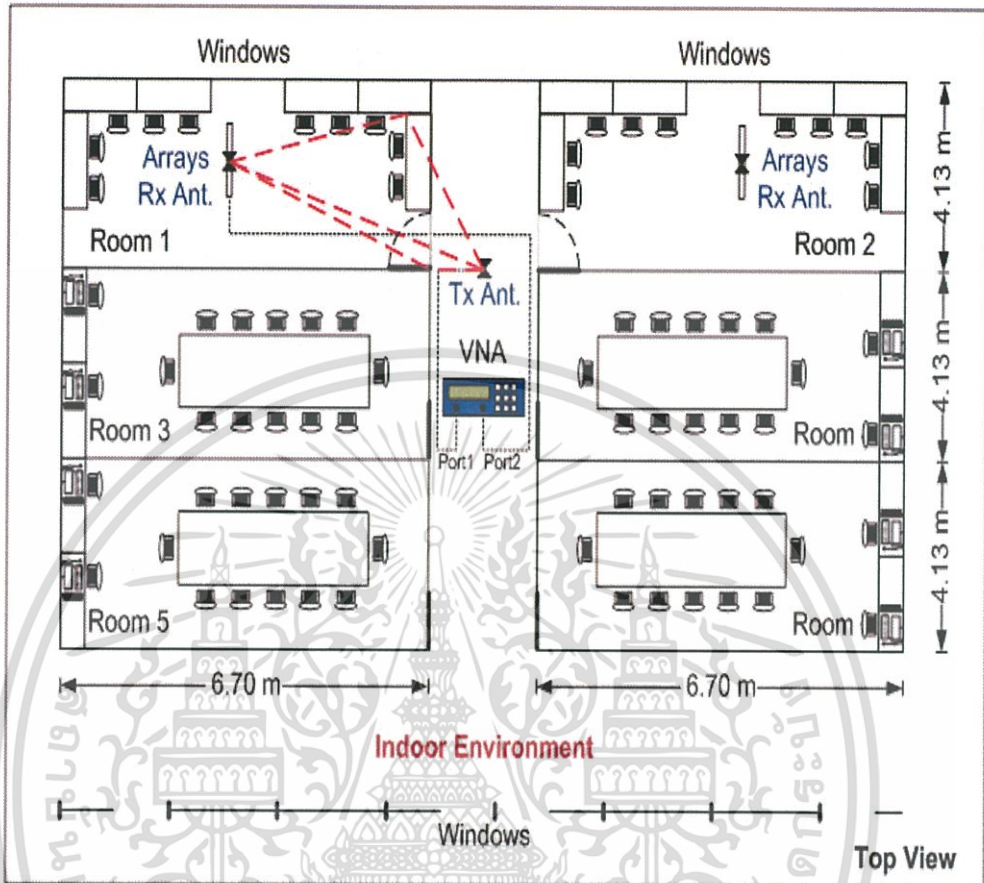
ขั้นตอนและวิธีการทดสอบช่องสัญญาณ

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ S_{21} แบบแถบกว้างยิ่งถูกวัดในลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในโดเมนของความถี่โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทดสอบและบันทึกผลที่ได้ จากนั้นนำข้อมูลการทดสอบช่องสัญญาณมาวิเคราะห์ต่อไป

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นจากการนำเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์มาปรับเทียบด้วยตัวปรับเทียบแบบทั้งสองพอร์ตเต็ม โดยได้ทำการแบ่งความถี่เป็นช่วง ได้แก่ ความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz ซึ่งได้ปรับความละเอียดตามมาตรฐานของเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายมากที่สุด ไทยได้กำหนดที่ 801 จุด ในช่วงความถี่ที่ได้ทดสอบ

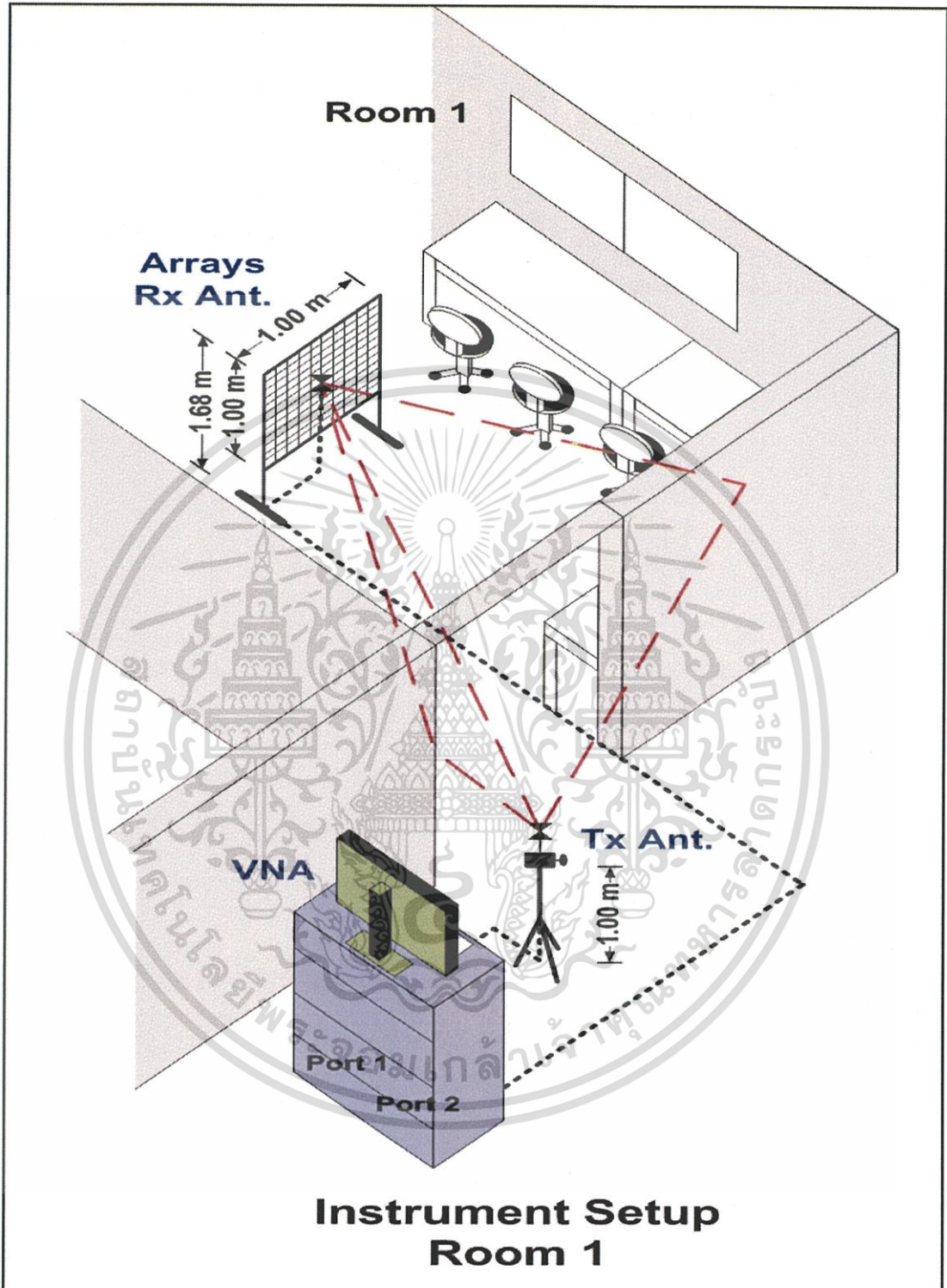
ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบช่องสัญญาณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ ทำการทดลองวัดภายในอาคาร สายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นสายอากาศชนิดกรวยคู่โดยการวางตัวของสายอากาศแบบแนวตั้ง

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดให้สายอากาศส่งอยู่กับที่ โดยทำการเคลื่อนย้ายสายอากาศด้านรับไปยังตำแหน่งต่างๆ เป็นแบบแถวลำดับ ขนาด 9 แถว 9 หลัก จนครบ 81 ตำแหน่ง ในการทดสอบช่องสัญญาณแต่ละครั้งจะได้ข้อมูลการทดสอบช่องสัญญาณเพื่อนำไปวิเคราะห์สายอากาศต่อไป



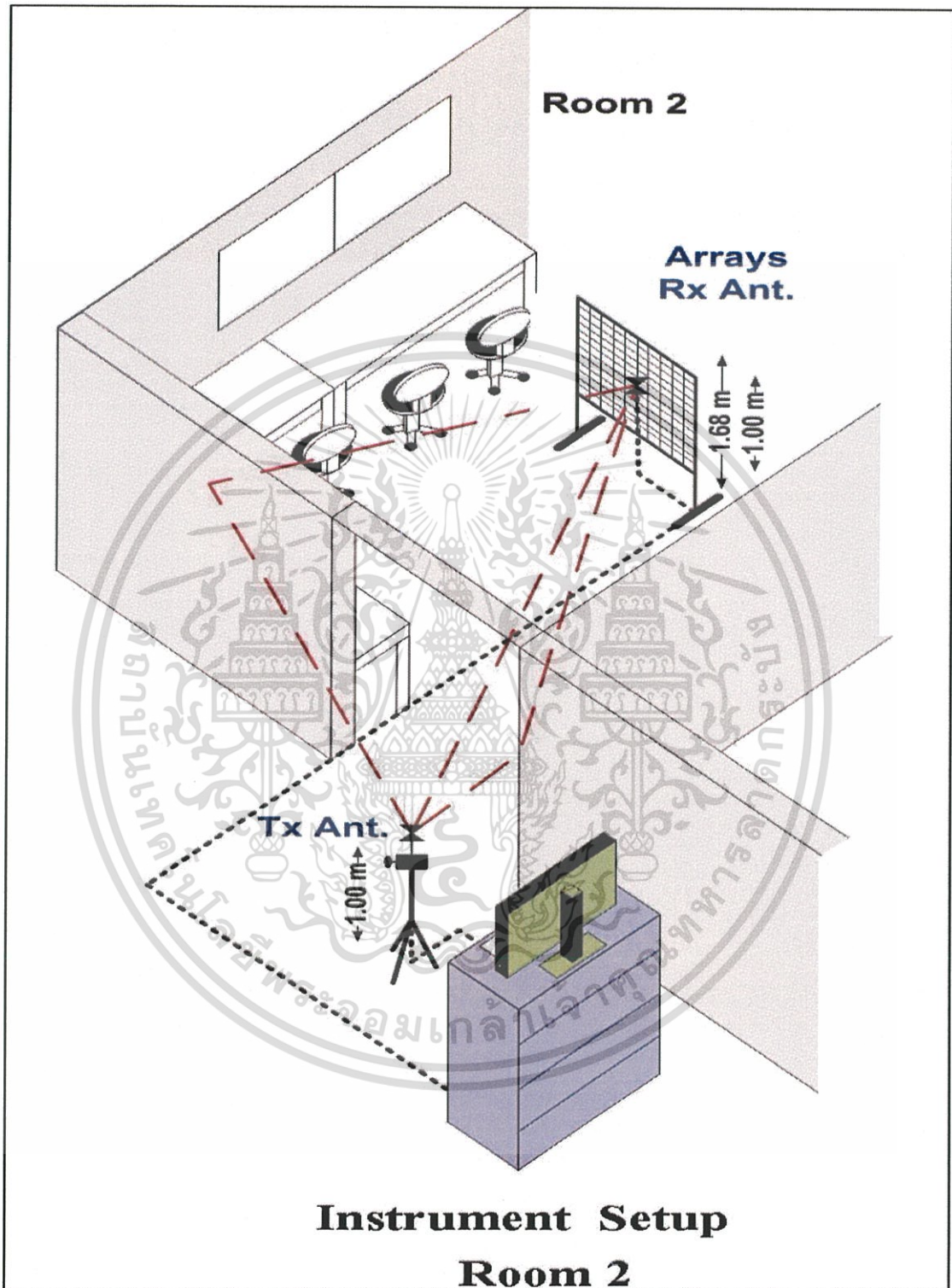
รูปที่ 4.10 ขนาดของห้องและแบบจำลองรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



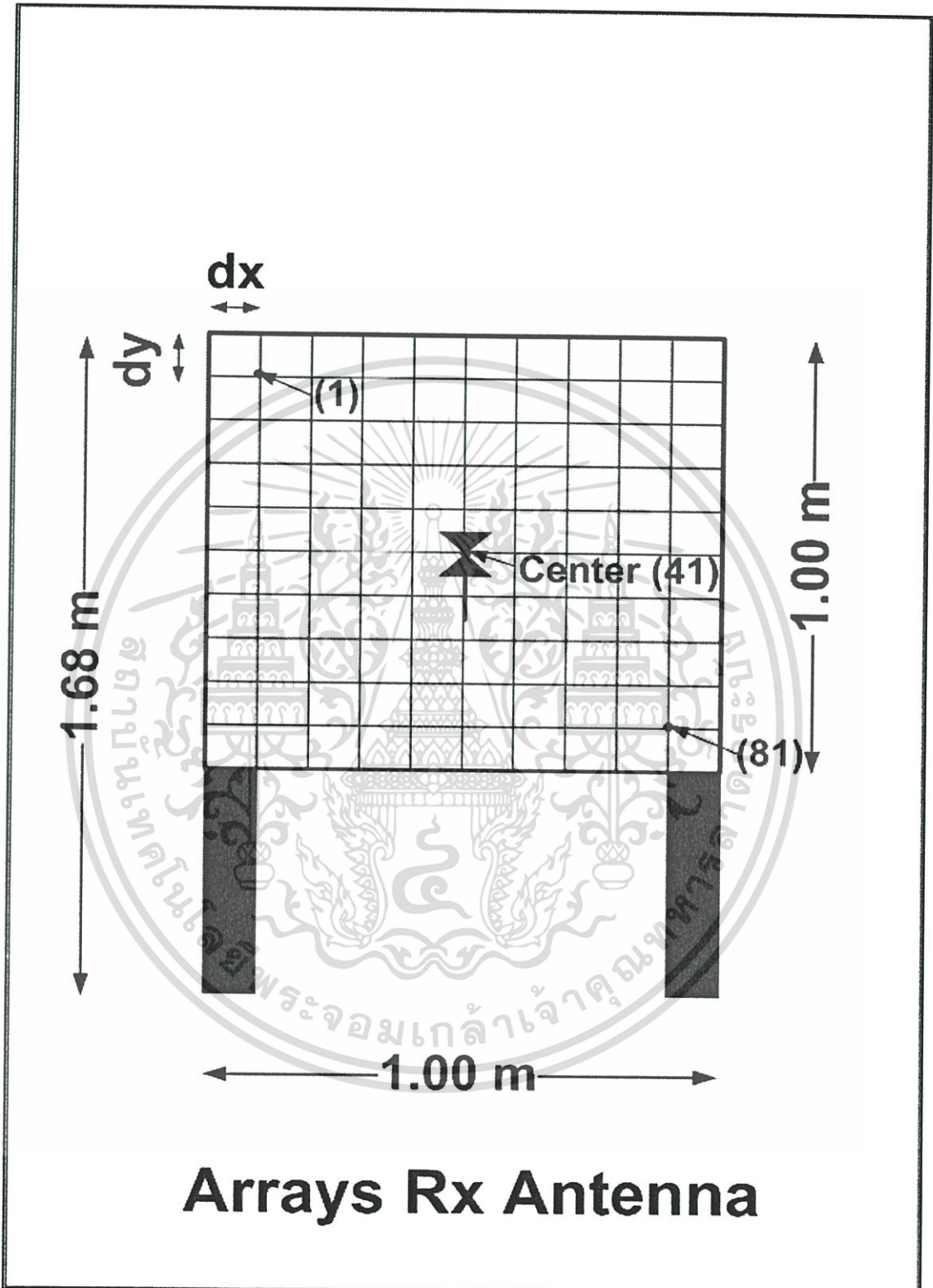
รูปที่ 4.11 ขนาดของห้องและรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร Room 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ขนาดของห้องและรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร Room 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การจัดวางสายอากาศทางด้านรับสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ แบบแถวลำดับ 9 แถว 9 หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการวัด แสดงในตารางที่ 4.3

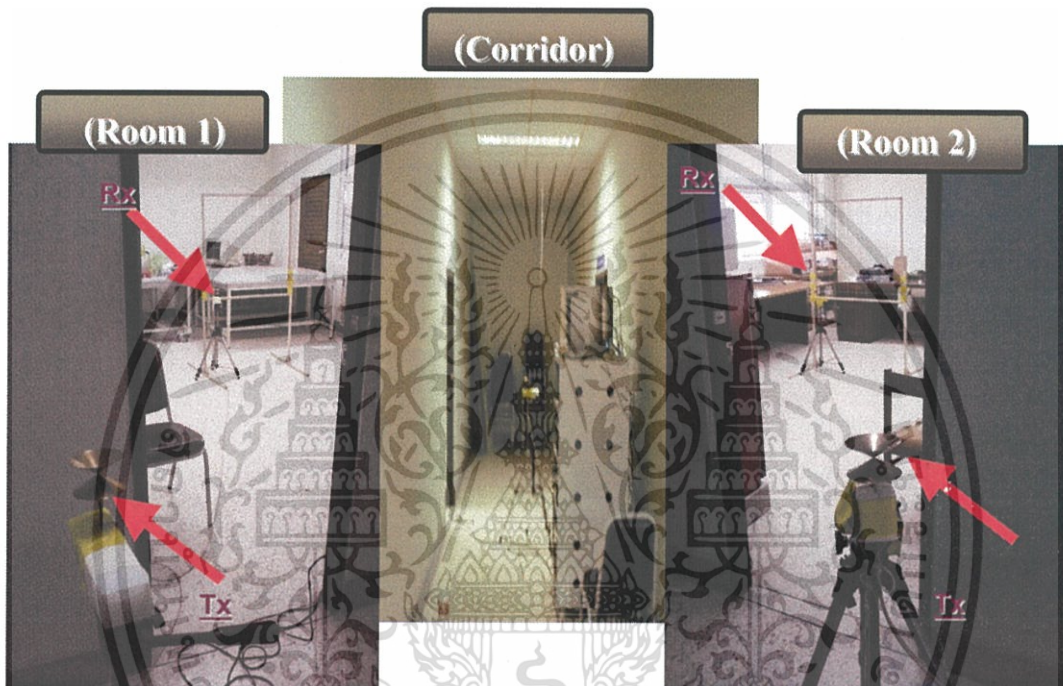
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	3 GHz - 11 GHz
ความถี่ต่ำสุด	3.0 GHz
ความถี่สูงสุด	11.0 GHz
ความถี่กลาง	7.0 GHz
แบนด์วิดท์สเปกตรัม	8.0 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
กำลังงานพลวัต	80 dB
ความสูงสายอากาศด้านส่ง	1.20 เมตร
ความสูงสายอากาศด้านรับ	1.68 เมตร
ระยะห่างของสายอากาศด้านส่งและรับ	4.60 เมตร
ระยะห่างแต่ละจุดของสายอากาศด้านรับ	10 เซนติเมตร
จำนวนตำแหน่งทางด้านรับ	81 ตำแหน่ง/ห้อง
การวางตัวของสายอากาศ	แนวตั้ง
สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ	สายอากาศกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

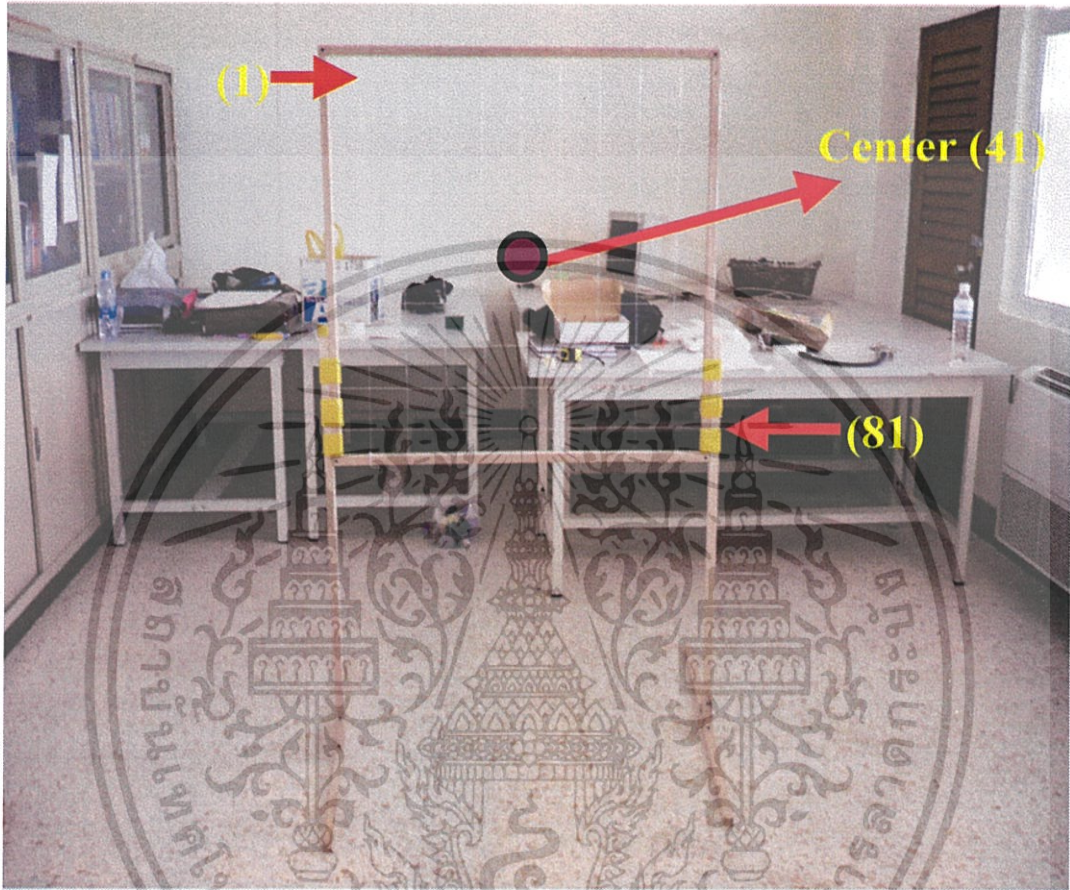
ภาพถ่ายของการวัดสัญญาณ

หัวข้อนี้แสดงภาพการทำการวัดสัญญาณจริง โดยที่สายอากาศด้านส่งอยู่ภายในอาคาร (ทางเดินยาวในอาคาร) และสายอากาศด้านรับอยู่ภายในห้องเรียน (ชั้น12) ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



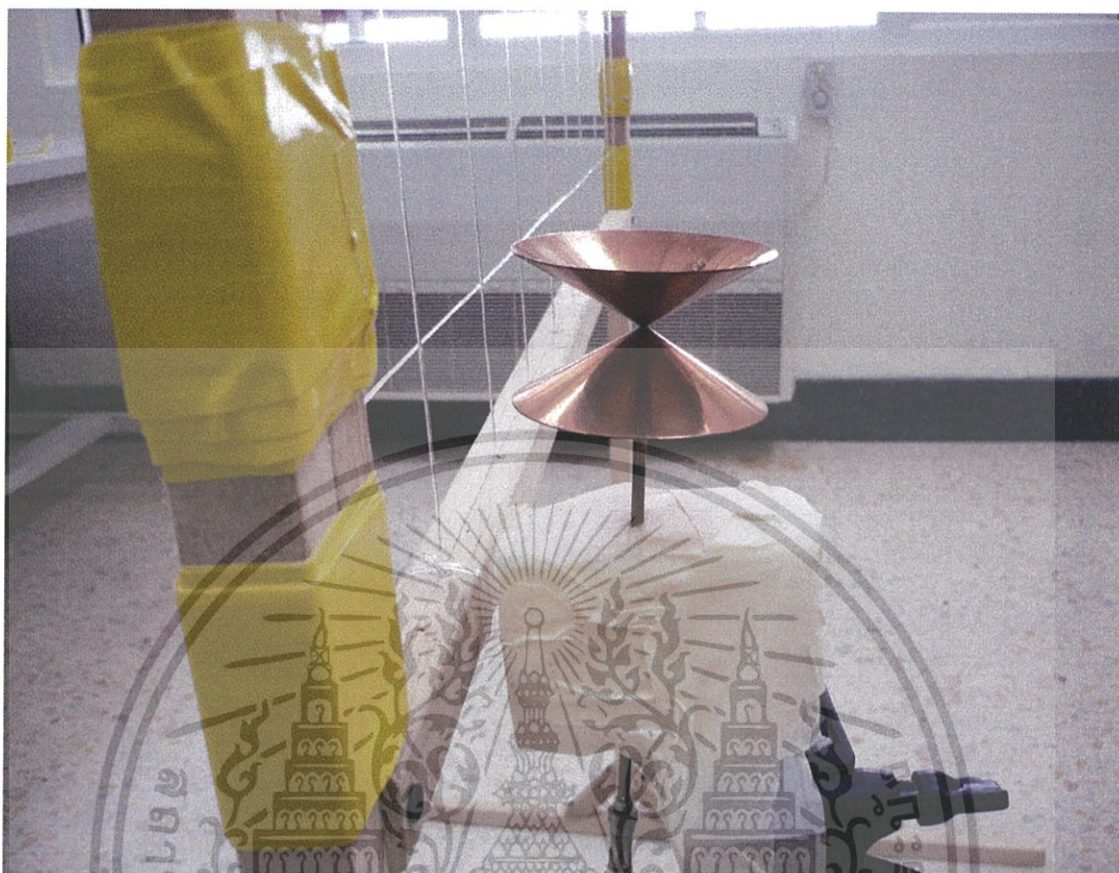
รูปที่ 4.14 การจัดวางตำแหน่งของสายอากาศด้านส่งและด้านรับจากภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การจัดวางสายอากาศทางด้านรับสัญญาณที่ตำแหน่งต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ตำแหน่งสายอากาศด้านรับที่อยู่ภายใน Room 1 และ Room 2

4.3.4 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร

ในรูปที่ 4.17 จะเป็นแบบจำลองที่มีการวางสายอากาศด้านส่งอยู่ภายในอาคารและสายอากาศด้านรับอยู่ภายนอกอาคาร ในระยะห่าง 2 เมตร และสายอากาศทั้งสองมีความสูง 2.65 เมตร และส่งสัญญาณผ่านตัวกลางที่เป็นกำแพง ในการวัดนั้นจะทำการวัดโดยการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศด้านรับไปตำแหน่งละ 0.6 เมตร เพื่อต้องการเก็บข้อมูลการวัดในตำแหน่งต่างๆ เพื่อดูความแตกต่างของช่องสัญญาณที่ระยะทางต่างๆ [18]

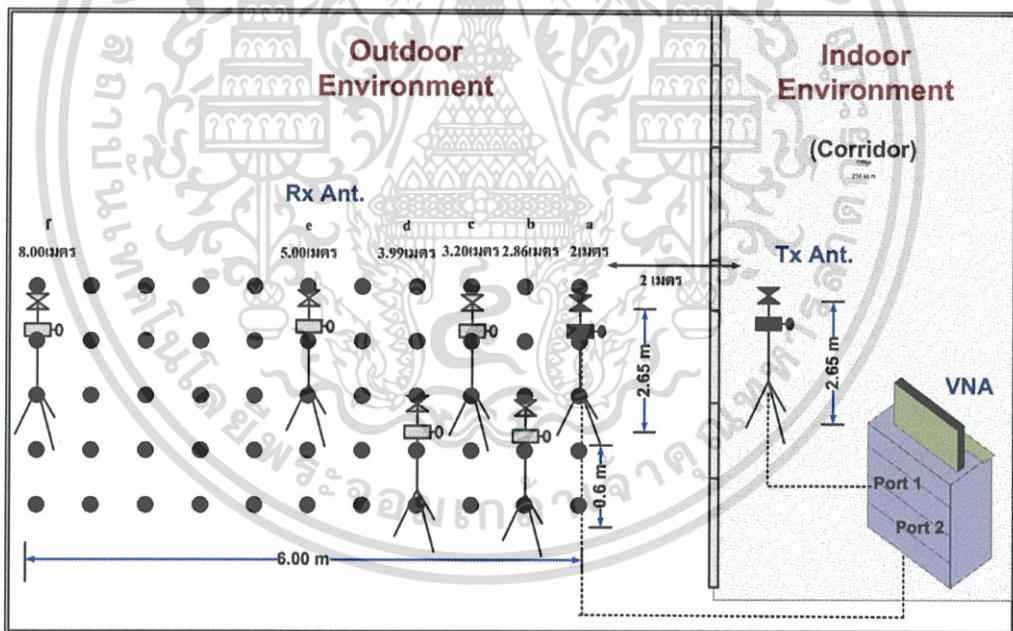
ขั้นตอนและวิธีการทดสอบช่องสัญญาณ

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ S_{21} แบบแถบกว้างยิ่งถูกวัดในลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในโดเมนของความถี่โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทดสอบและบันทึกผลที่ได้ จากนั้นนำข้อมูลการทดสอบช่องสัญญาณมาวิเคราะห์ต่อไป

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นจากการนำเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ มาปรับเทียบด้วยตัวปรับเทียบแบบทั้งสองพอร์ตเต็ม โดยได้ทำการแบ่งความถี่เป็นช่วง ได้แก่ ความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz ซึ่งได้ปรับความละเอียดตามมาตรฐานของเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายมากที่สุด ไทยได้กำหนดที่ 801 จุด ในช่วงความถี่ที่ได้ทดสอบ

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบช่องสัญญาณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ โดยกำหนดให้สายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นสายอากาศชนิดกรวยคู่ สายอากาศทั้งคู่อยู่สูงจากพื้น 2.65 เมตรและระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ 2 เมตร โดยการวางตัวของสายอากาศเป็นแบบแนวตั้ง

ขั้นตอนที่ 3 ในการทดลองนั้นได้ทำการวัดที่ชั้น 1 ของอาคารชั้น 12 คณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศแบบกรวยคู่ ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางจะใช้เป็นสายอากาศทางด้านส่งและด้านรับ โดยในการทดลองนี้ต้องการที่จะตรวจสอบถึงผลกระทบจากสถานะแวดล้อมภายในอาคาร ไปยังสถานะแวดล้อมภายนอกอาคาร โดยมีกำแพงเป็นตัวกลางเพื่อให้ทราบถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.17 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการวัด แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของรูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคาร
สู่ภายนอกอาคาร

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	3 GHz - 11 GHz
ความถี่ต่ำสุด	3.0 GHz
ความถี่สูงสุด	11.0 GHz
ความถี่กลาง	7.0 GHz
แบนด์วิดท์ที่สเปกตรัม	8.0 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
กำลังงานพลวัต	80 dB
ความสูงสายอากาศด้านส่งและด้านรับ	2.65 เมตร
ระยะห่างของสายอากาศด้านส่งและด้านรับ	2-8 เมตร
ระยะห่างแต่ละจุดของสายอากาศด้านรับ	0.6 เมตร
การวางตัวของสายอากาศ	แนวตั้ง
สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ	สายอากาศกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สรุป

สำหรับในบทนี้ได้แสดงรูปแบบการทดลองวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ และพารามิเตอร์สำคัญที่กำหนดสำหรับในการทดสอบซึ่งในการศึกษาทดลองวิจัยได้พิจารณารูปแบบวัดอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน มาทำการวิเคราะห์แล้วทำการประมาณค่าที่ได้จากการวัดเพื่อสรุปผลที่เกิดขึ้น โดยในแบบจำลองมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการวัดของสายอากาศด้านรับ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากตำแหน่งต่าง ๆ ในการวางสายอากาศด้านรับ ด้วย โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ในการวัด และบันทึกผล ของฟังก์ชันการถ่ายโอนในอวกาศว่างของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง โดยใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ที่สามารถตอบสนองที่ความถี่ในช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของแถบกว้างยิ่ง เป็นทั้งสายอากาศด้านส่งและด้านรับ และใช้แบบจำลองสัญญาณที่ใช้ส่งเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเพื่อวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณ และได้นำเสนอคุณลักษณะการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นย่านแถบความถี่กว้างยิ่งผลที่ได้จากการทดลองวัดจะนำไปประเมินผลของคุณสมบัติของสายอากาศที่มุมต่างๆ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้และระยะไกล ความผิดเพี้ยนจากสายอากาศ, การสูญเสียเชิงวิถีสูงสุด, สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, อัตราขยายในการส่งผ่านและประสิทธิภาพของระบบ, หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง, ความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการกระจายแบบสะสมได้ทำการทดลองวิจัยทั้งในห้องไร้การสะท้อนและภายในอาคาร โดยข้อมูลที่ได้จากการวัดทั้งหมดจะนำไปวิเคราะห์และแสดงผลในพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังจะแสดงในบทต่อไป

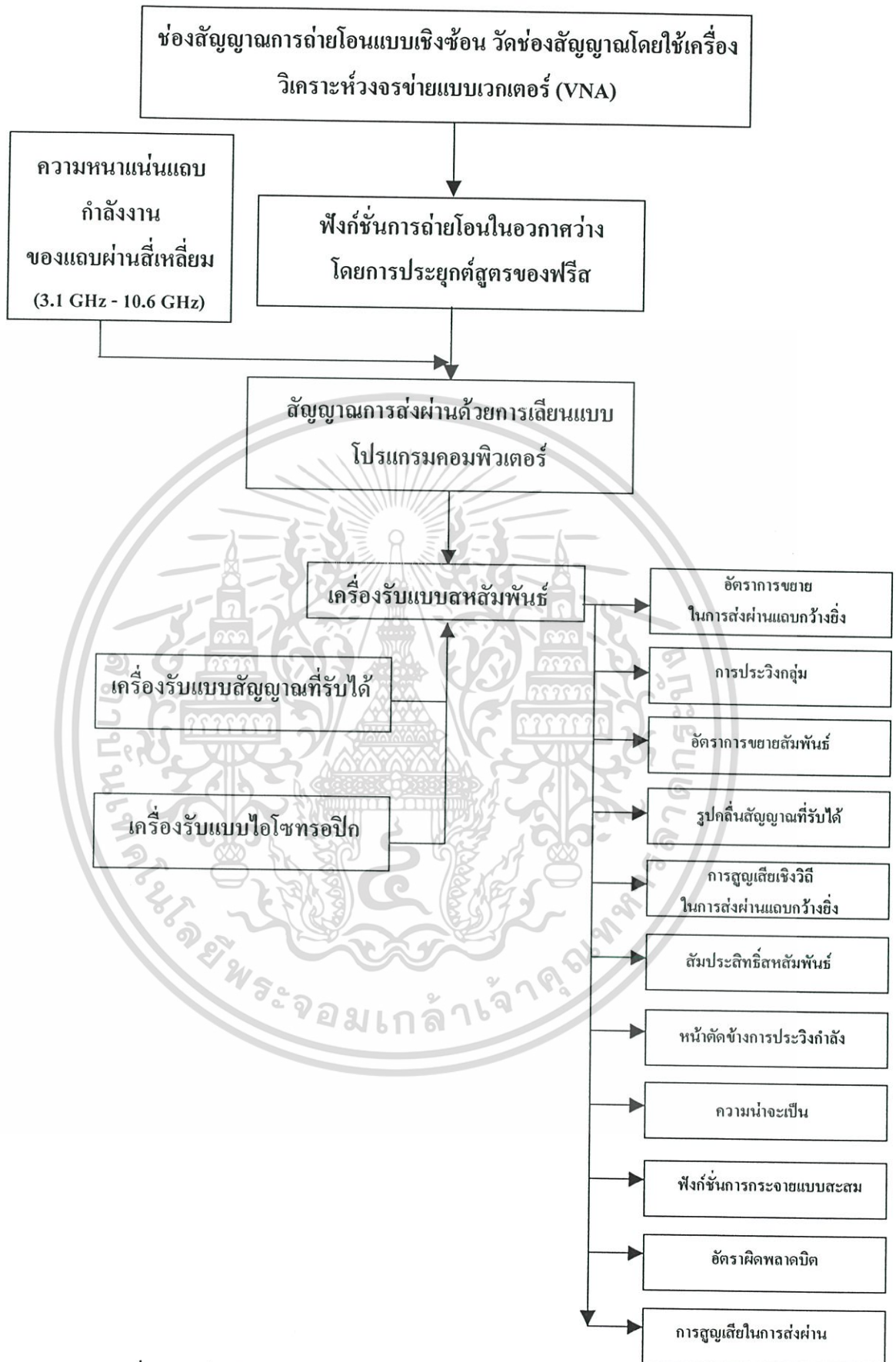
ผลการวิจัยและวิเคราะห์สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง

5.1 กล่าวนำ

ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับการสื่อสารระยะสั้นภายในอาคารสำนักงาน และเครือข่ายบ้านพักอาศัย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของช่องสัญญาณในการส่งผ่านข้อมูลข่าวสาร ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์เพื่อแก้ปัญหาในการสูญเสียในการส่งผ่านสัญญาณน้อยที่สุดและให้มีคุณภาพดีขึ้น ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาวิจัยและเสนอแบบแผนวิเคราะห์ของคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง ในสภาวะแวดล้อมจริงภายในอาคาร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรขยายแบบเวกเตอร์ในการทดลองวัด และบันทึกผลของฟังก์ชันการถ่ายโอนในอวกาศว่างของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งผลการศึกษาทดลองวิจัยได้พิจารณา รูปแบบวัด เช่น รูปแบบการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร และรูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร ได้แสดงไว้ในบทที่ผ่านมาแล้ว และนำผลที่ได้จากการวัดไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่สำคัญ โดยการประยุกต์สูตรของฟรีส และทางด้านรับได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สองแบบมาเปรียบเทียบกับระหว่างเครื่องรับแบบสัญญาณที่รับได้ และเครื่องรับแบบไอโซทรอปิก ผลการทดลองวิจัยและผลการวิเคราะห์ของการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง การผิดเพี้ยนของสัญญาณ หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง และความน่าจะเป็น และฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม ได้แสดงไว้พร้อมทั้งอธิบายโดยละเอียดในบทนี้แล้ว

5.2 การวิเคราะห์ของการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง

ในขั้นตอนนี้ ได้นำข้อมูลฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ S_{21} ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์วงจรขยายและนำมาวิเคราะห์ผลโดยใช้การเลียนแบบ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วจะได้เป็นฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณและมารวมกับสัญญาณที่ใช้ส่ง และมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของการวิเคราะห์การสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

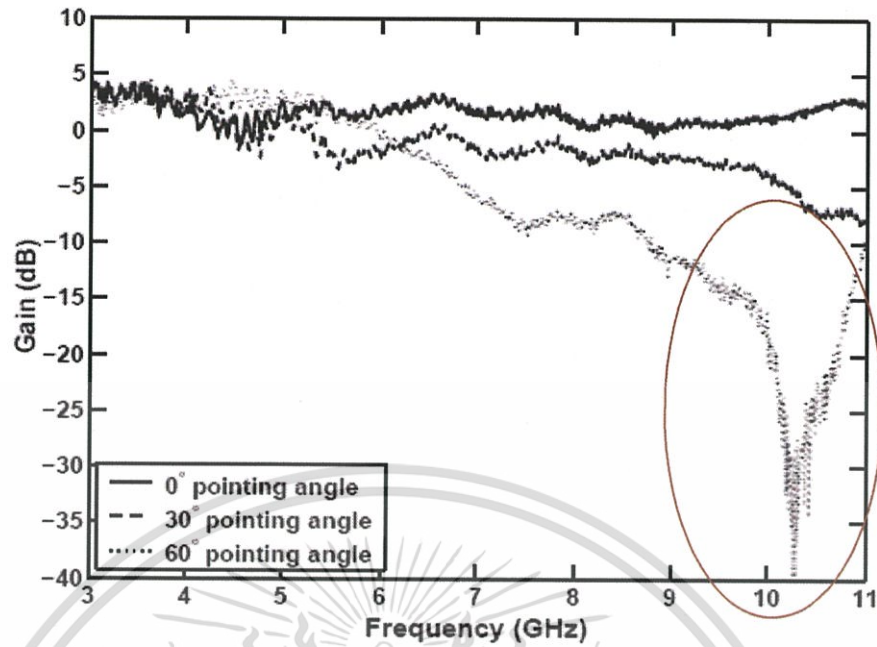
5.3 คุณลักษณะของฟังก์ชันการถ่ายโอนในอวกาศว่างของสายอากาศแบบแถบกว้างยิ่ง

5.3.1 ผลการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน การทดลองวัดได้ทำการวัดภายในห้องไร้การสะท้อน โดยวางสายอากาศในแนวนอนและเริ่มทำการวัดตั้งแต่การส่งผ่านแบบทิศทางตรง คือ ทิศทางที่มุม 0 องศา แล้วทำการหมุนสายอากาศทางด้านรับตามแบบจำลองโดยการปรับที่มุม 30 องศา จนสายอากาศทางด้านรับหมุนที่มุม 60 องศา โดยได้ใช้สายอากาศด้านส่งและสายอากาศทางด้านรับเป็นแบบกรวยคู่ และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง-สายอากาศรับเท่ากับ 1 เมตร เมื่อทำการวัดเสร็จแล้วก็นำผลที่ได้จากการวัดไปทำวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณตามแบบจำลองที่ได้กำหนดไว้ จึงจะสามารถแสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ

สิ่งที่ได้จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง คือ ผลการตอบสนองอิมพัลส์ ซึ่งได้จากการแปลงฟูริเยร์ผกผันของผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณที่ได้จากการวัด ซึ่งเราได้นำผลนี้ไปทำการวิเคราะห์โดยประยุกต์ร่วมกับรูปสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง โดยแสดงผลจากการจำลองให้เห็นในรูปแบบของสัญญาณเพื่อหาอัตราการขยายของการส่งผ่าน การประวิงกลุ่มและอัตราขยายสัมพัทธ์

5.3.1.1 อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณระหว่างสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบกรวยคู่

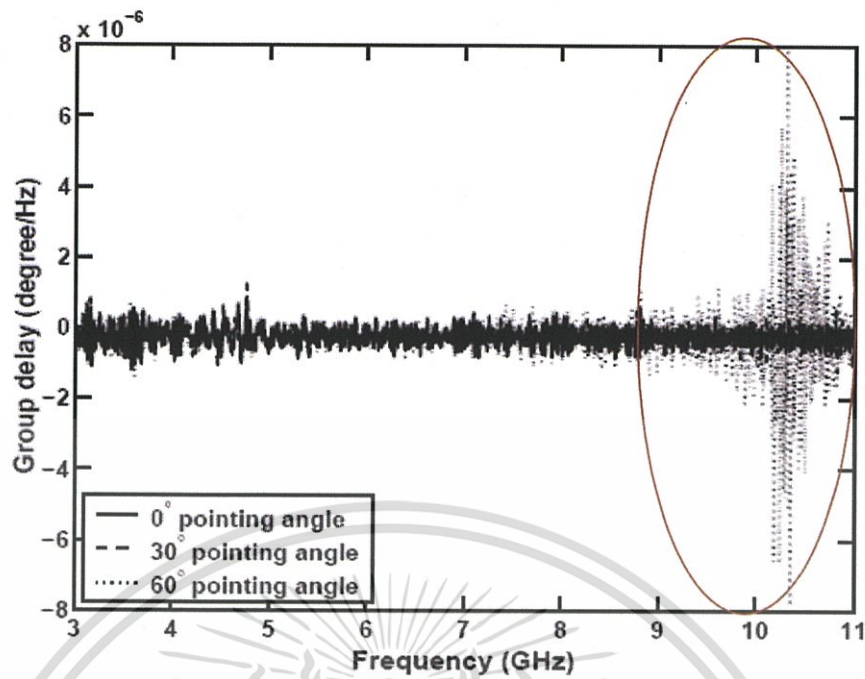
ผลจากการวัดและสภาพแวดล้อมของการวัดภายในห้องไร้การสะท้อน คุณสมบัติของสายอากาศ ณ ที่มุม 0 องศา, มุม 30 องศา และมุม 60 องศา ของสายอากาศแบบแถบกว้างยิ่งในกรณีใช้สายอากาศส่งแบบกรวยคู่ สายอากาศรับแบบกรวยคู่ ซึ่งผลจะพบว่าค่าอัตราขยายเชิงวิถีจะแปรเปลี่ยนไปตามมุมการส่งผ่าน โดยจะมีค่าลดลงจากมุมการส่งผ่านแบบมุมตรงหรือที่มุม 0 องศา จนถึงมุมที่ 30 องศา และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนถึงมุม 60 องศาซึ่งมีสัญญาณรบกวนมาก ในช่วงความถี่ 10.2 GHz



รูปที่ 5.2 อัตราการขยายของฟังก์ชันการ โอนของสายอากาศที่มุม 0, 30 และ 60 องศา
กรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบกรวยคู่

5.3.1.2 การประวิงกลุ่ม (Group delay)

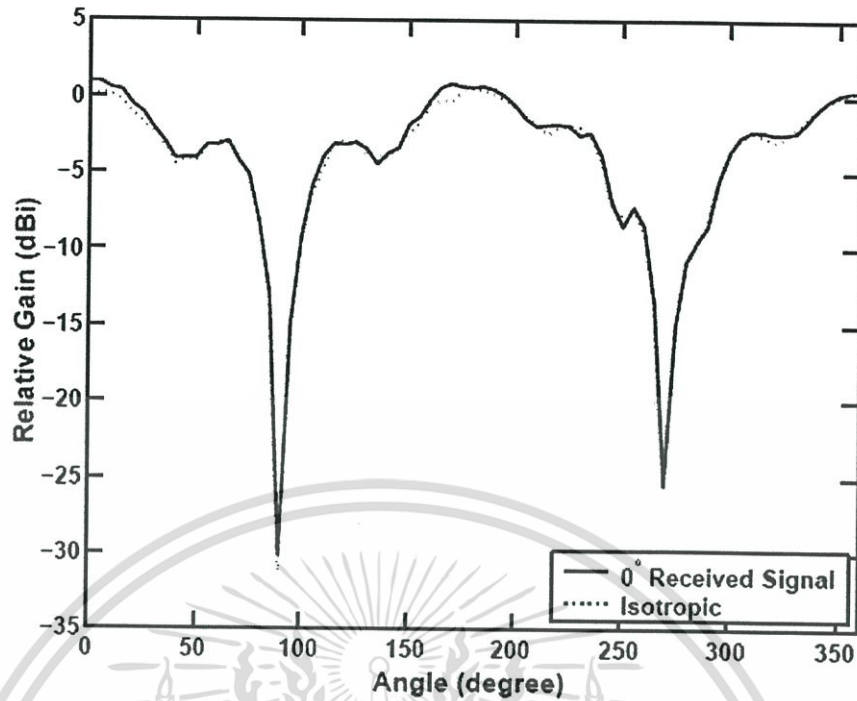
จากรูปที่ 5.3 แสดงถึงการประวิงกลุ่ม ณ มุมที่ 0 องศา, มุม 30 องศา และมุม 60 องศา ของสายอากาศส่งแบบกรวยคู่-สายอากาศรับแบบกรวยคู่ โดยมุม 0 องศา เกิดการประวิงกลุ่มน้อย เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนน้อย ในขณะที่เดียวกันมุมที่ 30 องศา สังเกตได้ว่าสัญญาณรบกวนเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การประวิงกลุ่มมีการแตกกระจายมากขึ้น และมุมที่ 60 องศา ณ ที่ความถี่ 9.5 GHz ถึง 10.8 GHz มีการสวิงขึ้นสูงแสดงว่ามีสัญญาณรบกวนมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การประวิงกลุ่มมีการกระจัดกระจายมาก



รูปที่ 5.3 การประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่มุม 0, 30 และ 60 องศา
กรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบกรวยคู่

5.3.1.3 อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative gain)

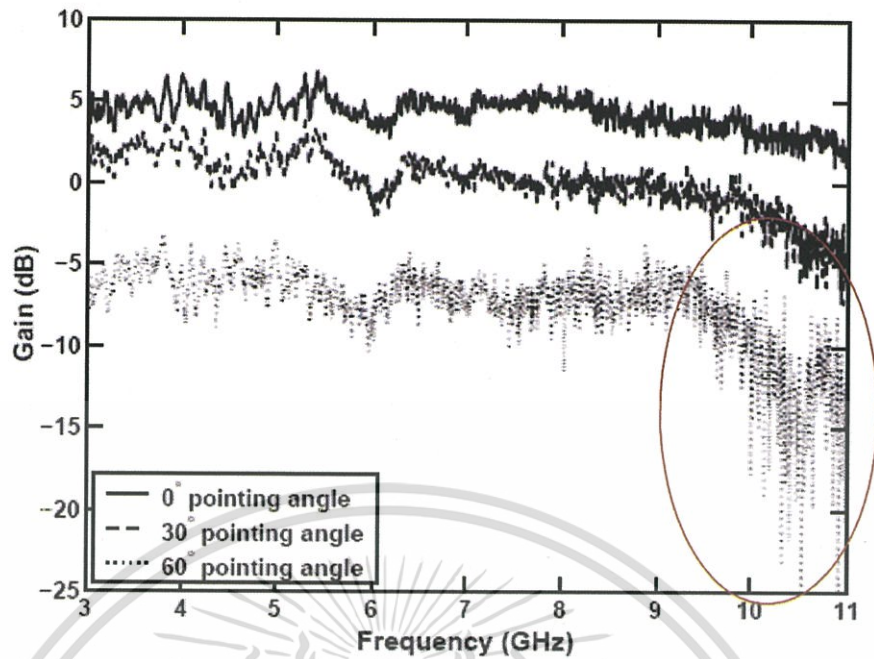
โดยผลจากการวิเคราะห์นั้นจะนำเสนอในสองกรณี คือ กรณีเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้และเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบไอโซทรอปิก ซึ่งกรณีแบบไอโซทรอปิกนั้นแสดงถึงกรณีคิดค่าอัตราการขยายของสายอากาศให้มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนในกรณีใช้สัญญาณที่รับได้นั้นรวมเอาผลอัตราการขยายที่ได้จากการวัดทั้งหมดมาคิดรวม จากรูปที่ 5.4 อัตราขยายสัมพัทธ์ที่สูงสุดกรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบกรวยคู่ ณ ที่มุม 0 องศา, มุม 180 องศา และมุม 360 องศา สำหรับมุมที่ 90 องศา และมุม 200 องศาไม่แตกต่างกันมาก จะสังเกตเห็นว่ากรณีเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้และเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบไอโซทรอปิกแตกต่างกันน้อยมาก ที่แตกต่างกันน้อย เพราะส่วนป้อนเข้าตรงกลางของสายอากาศกรวยคู่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อย



รูปที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบอัตราขยายสัมพัทธ์ ของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง
กรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบกรวยคู่

5.3.1.4 อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณระหว่างสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสาย อากาศรับแบบระยคาบสี่เหลี่ยม

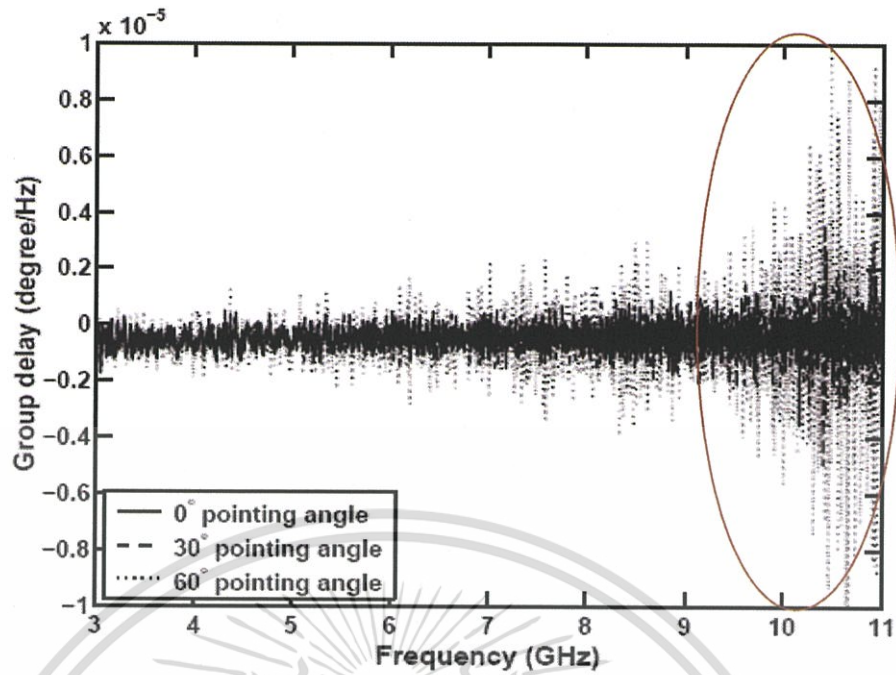
ผลจากการวัดและสภาพแวดล้อมของการวัดภายในห้องไร้การสะท้อน คุณสมบัติของสาย
อากาศ ณ ที่มุม 0 องศา, มุม 30 องศา และมุม 60 องศา ของสายอากาศแบบแถบกว้างยิ่งในกรณีใช้
สายอากาศส่งแบบกรวยคู่-สายอากาศรับแบบระยคาบสี่เหลี่ยม ซึ่งผลจะพบว่าค่าอัตราขยายเชิงวิถีจะ
แปรเปลี่ยนไปตามมุมการส่งผ่าน โดยจะมีค่าลดลงจากมุมการส่งผ่านแบบมุมตรงหรือที่มุม 0 องศา
จนถึงมุมที่ 30 องศา และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนถึงมุม 60 องศา ซึ่งมีสัญญาณรบกวน
มาก ในช่วงความถี่ 10.5 GHz



รูปที่ 5.5 อัตราการขยายของฟังก์ชันการ โอนของสายอากาศที่มุม 0, 30 และ 60 องศา กรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบรายคาบล็อก

5.3.1.5 การประวิงกลุ่ม (Group delay)

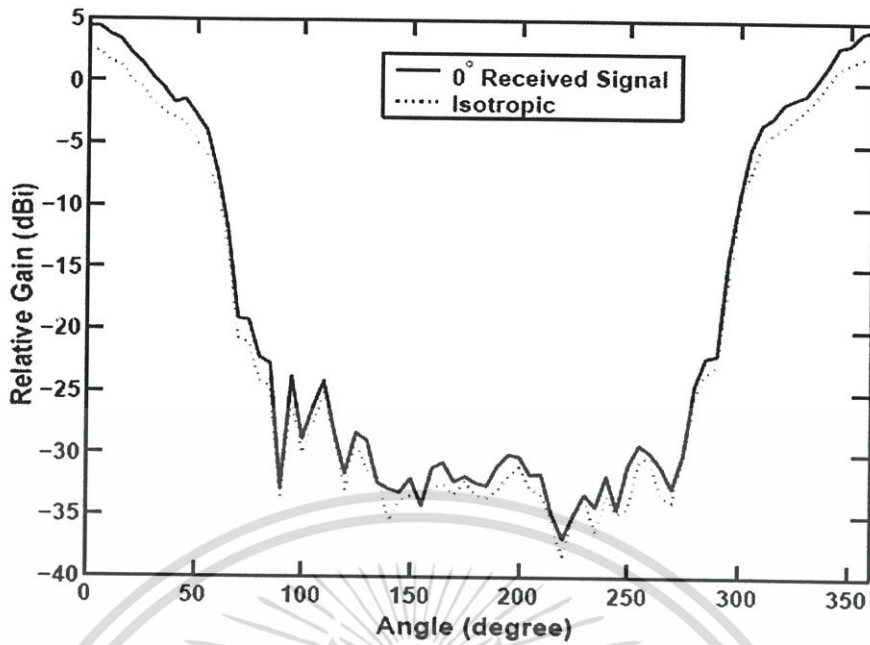
จากรูปที่ 5.6 แสดงถึงการประวิงกลุ่ม ณ มุมที่ 0 องศา, มุม 30 องศา และมุม 60 องศา ของสายอากาศส่งแบบกรวยคู่-สายอากาศรับแบบรายคาบล็อก โดยมุม 0 องศา เกิดการประวิงกลุ่มน้อย เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนน้อย ในขณะที่มุมที่ 30 องศา สังเกตได้ว่าสัญญาณรบกวนเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การประวิงกลุ่มมีการแตกกระจายมากขึ้น และมุมที่ 60 องศา ณ ที่ความถี่ 9.1GHz ถึง 11 GHz มีการสวิงขึ้นสูงแสดงว่ามีสัญญาณรบกวนมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การประวิงกลุ่มมีการกระจายตัวมาก



รูปที่ 5.6 การประวิงกลุ่มของฟังก์ชันการถ่ายโอนสายอากาศที่มุม 0, 30 และ 60 องศา
กรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบรายคาบสี่ก

5.3.1.6 อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative gain)

โดยผลจากการวิเคราะห์นั้นจะนำเสนอในสองกรณี คือ กรณีเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้และเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบไอโซทรอปิก ซึ่งกรณีแบบไอโซทรอปิกนั้นแสดงถึงกรณีคิดค่าอัตราการขยายของสายอากาศให้มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนในกรณีใช้สัญญาณที่รับได้นั้นรวมเอาผลอัตราการขยายที่ได้จากการวัดทั้งหมดมาคิดรวม จากรูปที่ 5.7 อัตราขยายสัมพัทธ์ที่สูงสุดกรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบรายคาบสี่ก ณ ที่มุม 0 องศา และ 360 องศา สำหรับมุมที่ 90 องศา และมุม 200 องศาไม่แตกต่างกันมาก จะสังเกตเห็นว่ากรณีเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้และเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบไอโซทรอปิก โดยมีบางช่วงที่ใกล้เคียงกันและมีบางช่วงที่ไกลกัน



รูปที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบอัตราขยายสัมพัทธ์ของการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งกรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่และสายอากาศรับแบบรายคาบล็อก

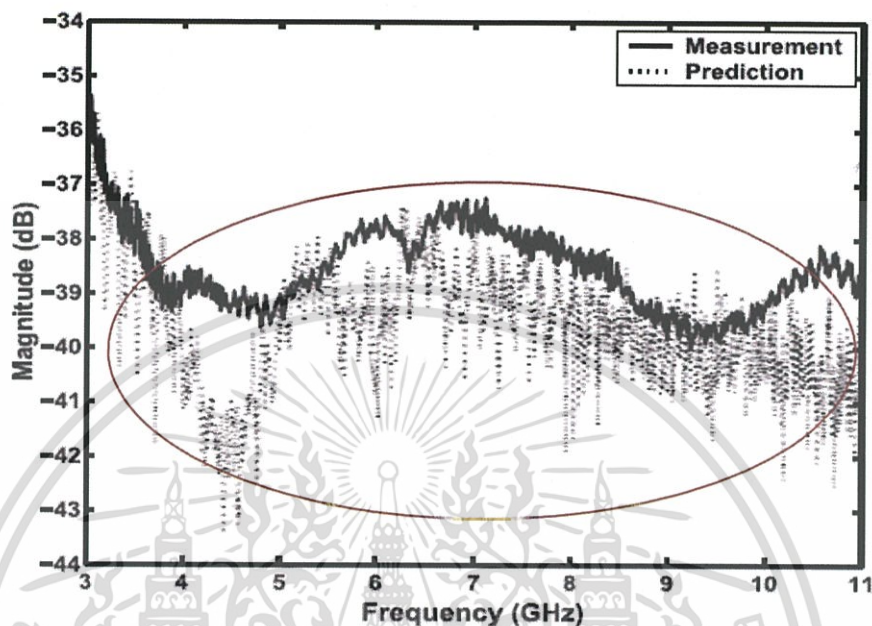
5.3.2 ผลการวัดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน

สำหรับการวัดในแบบจำลองนี้ จะคล้ายกับการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ แต่จะกำหนดการวางตัวของสายอากาศด้านส่งและด้านรับเป็นแบบแนวตั้ง โดยกำหนดให้สายอากาศทางด้านรับและสายอากาศทางด้านส่งเป็นแบบกรวยคู่ โดยมีระยะห่างคือ 0.21 เมตร, 0.5 เมตร, 1.59 เมตร และ 2 เมตร ความสูงของสายอากาศด้านส่งกับด้านรับจะอยู่ที่ 1.75 เมตร ซึ่งเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์หับบน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะสามารถแสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ ดังต่อไปนี้

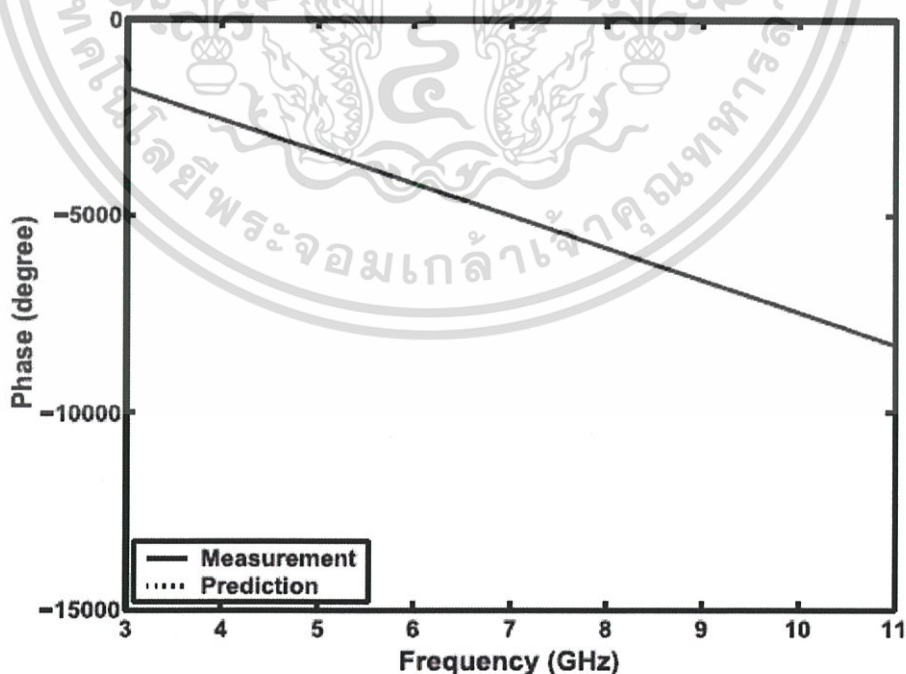
5.3.2.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณที่ได้จากการวัดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณ โดยทำการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านในแต่ละระยะทางของสายอากาศทางด้านรับ โดยยกตัวอย่างที่ระยะทางที่ 0.5 เมตร และระยะทางที่ 2 เมตร โดยในรูปที่ 5.8 แสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ระยะทางที่ 0.5 เมตร รูปที่ 5.9 แสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ระยะทาง 0.5 เมตร และจะสังเกตเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าที่ได้จากการทำนายเกิดความผิดพลาดของสัญญาณมาก เพราะเกิดความผิดพลาดของสายอากาศ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของเฟสจะเรียบ โดยในรูปที่ 5.10 แสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ระยะทางที่ 2 เมตร รูปที่ 5.11 แสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 2 เมตร จะสังเกตได้ว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าที่ได้จากการทำนายจะไม่มี ความแตกต่างกัน เนื่องจาก Power ต่ำ โดยลักษณะของเฟสจะเรียบ

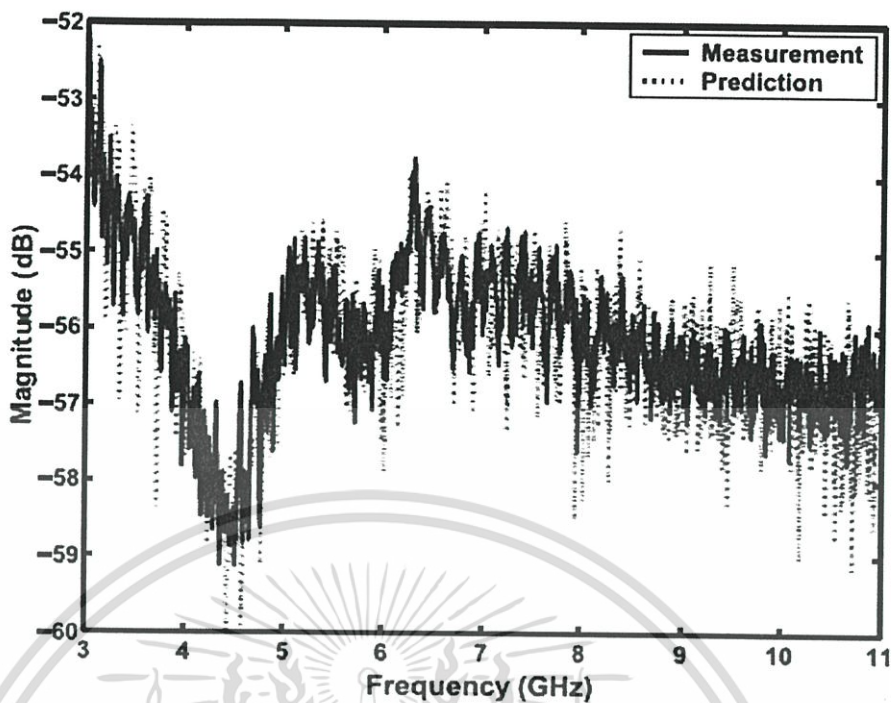


รูปที่ 5.8 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทางที่ 0.5 เมตร

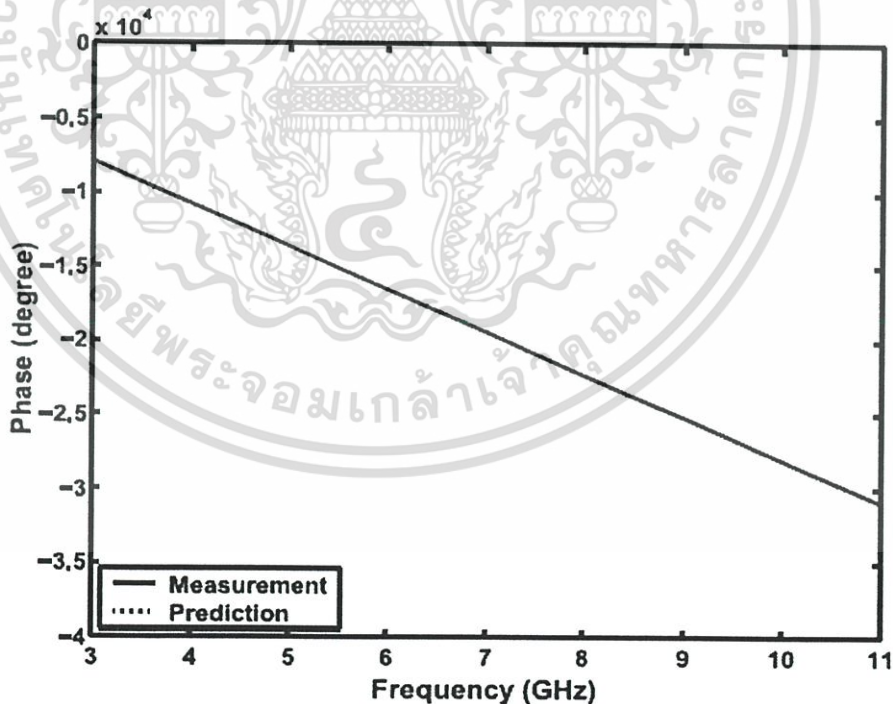


รูปที่ 5.9 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 0.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 2 เมตร

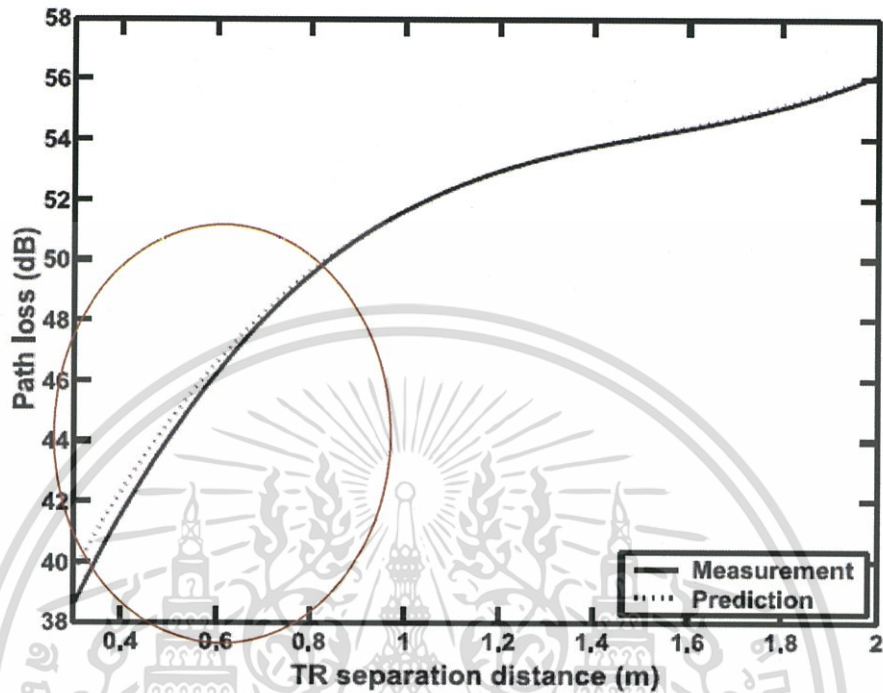


รูปที่ 5.11 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ระยะทาง 2 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2.2 การสูญเสียเชิงวิถี

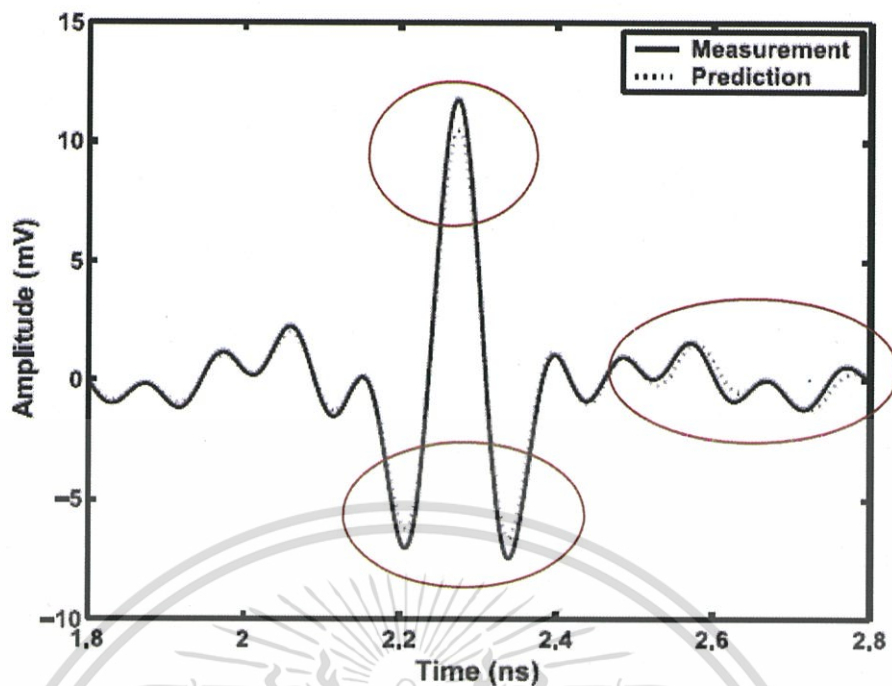
อัตราการสูญเสียเชิงวิถี จากรูปที่ 5.12 แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้จะเกิดการสูญเสียเชิงวิถีมาก และมีกำลังงานในการส่งต่ำ



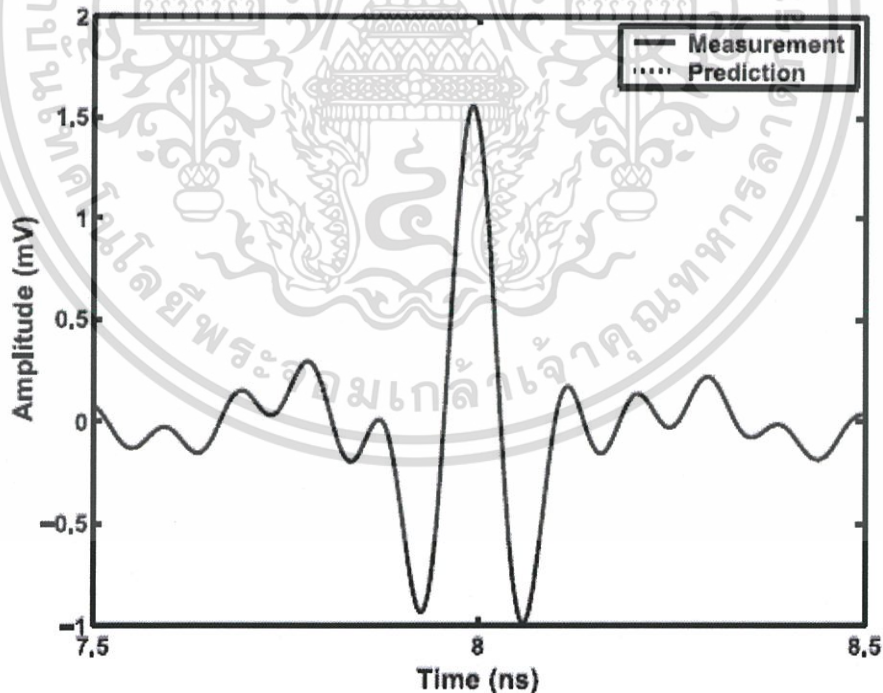
รูปที่ 5.12 การสูญเสียกำลังงานของสัญญาณในระยะทาง 0.21 เมตร ถึง 2.0 เมตร

5.3.2.3 รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้จากผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน

จากรูปที่ 5.13 แสดงถึงรูปคลื่นสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณของสายอากาศด้านส่งและด้านรับที่มีความสูงเท่ากับ 1.75 เมตร ที่ระยะ 0.5 เมตร ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งจะสังเกตว่าในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ กำลังงานและเฟสมีความผิดเพี้ยนต่างกันแต่ก็ไม่มากเพราะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมาก ส่วนในรูปที่ 5.14 แสดงถึงรูปคลื่นสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณของสายอากาศด้านส่งและด้านรับที่มีความสูงเท่ากับ 1.75 เมตร ที่ระยะ 2 เมตร ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าที่ได้จากการทำนายในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล กำลังงานและเฟสจะไม่มี ความแตกต่างกันเพราะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อย



รูปที่ 5.13 รูปแบบสัญญาณที่รับได้ในการวัดเปรียบเทียบกับการทำนาย
ที่ระยะทาง 0.5 เมตร

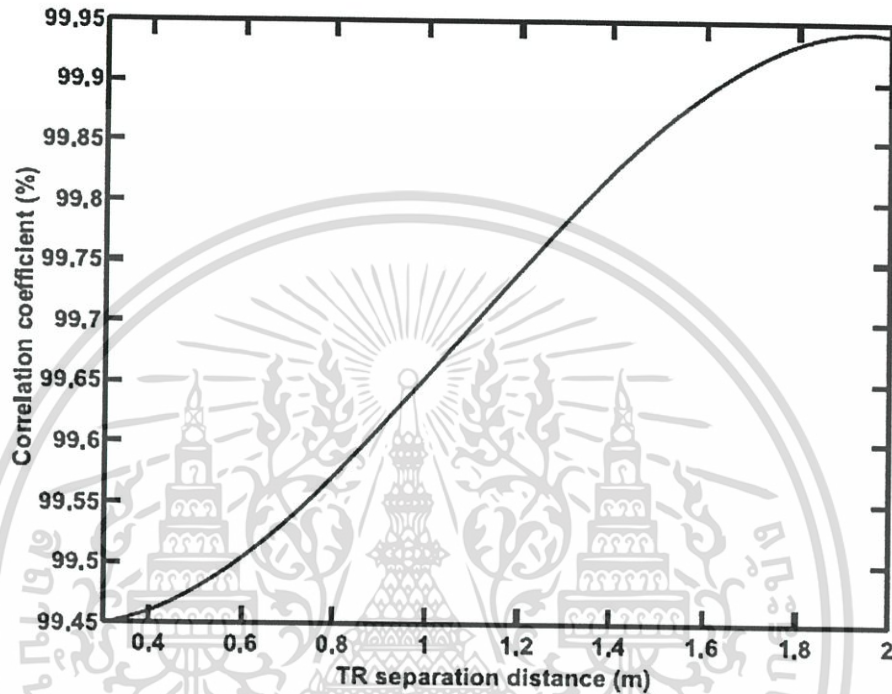


รูปที่ 5.14 รูปแบบสัญญาณที่รับได้ในการวัดเปรียบเทียบกับการทำนาย
ที่ระยะทาง 2 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแถบกว้างยิ่ง จะพิจารณาโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งรูปที่ 5.15 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากรูปจะเห็นว่าที่ระยะ 2 เมตร ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุดอยู่ที่ 99.94% เพราะไม่เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ



รูปที่ 5.15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการส่งผ่านแบบแถบกว้างยิ่ง

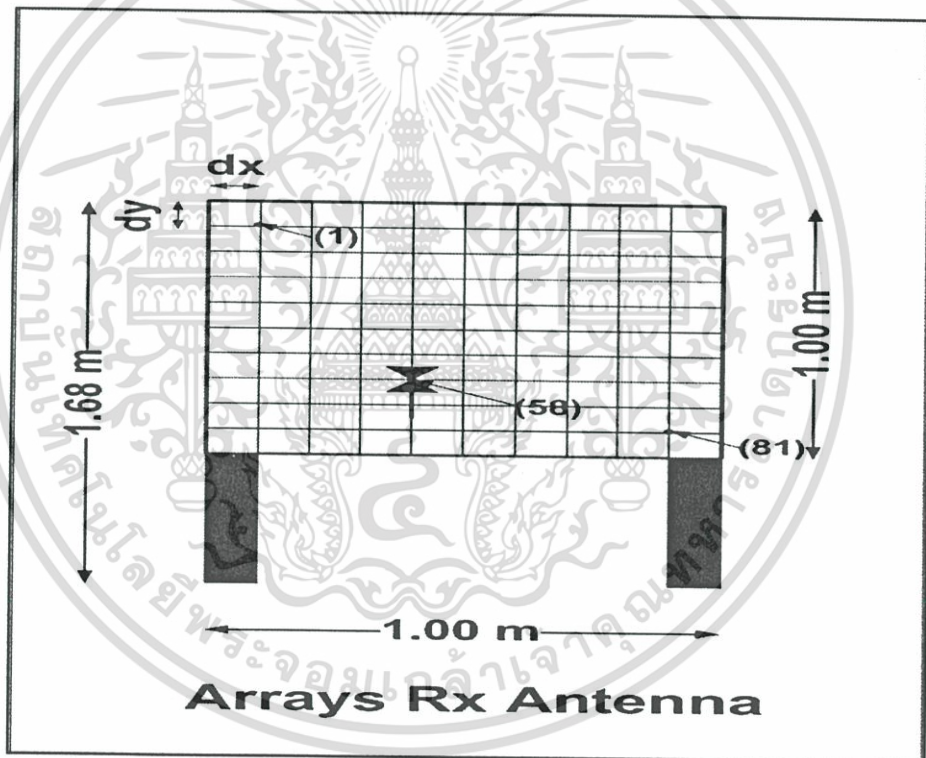
5.3.3 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร

5.3.3.1 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร Room 1

ได้ทำการวัดภายในอาคารทั้งหมด ที่อาคารของตึกชั้น 12 ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ได้กำหนดสายอากาศด้านส่งจะอยู่ทางเดินภายในอาคาร (ชั้น 12) ส่วนสายอากาศด้านรับจะอยู่ในห้องเรียนทั้งสองฝั่งของทางเดิน (Room 1 และ Room 2) มีระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับจาก 4.60 เมตร โดยกำหนดความสูงของสายอากาศทั้งด้านส่งเป็น 1.20 เมตร และสายอากาศด้านรับเป็น 1.68 เมตร โดยจะทำการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศด้านส่งคงที่ และทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศด้านรับออกไปครั้งละ 0.1 เมตร โดยกำหนดให้สายอากาศทางด้านรับและสายอากาศทางด้านส่งเป็นแบบกรวยคู่ ซึ่งมีลักษณะและขั้นตอนการวัดดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ในตำแหน่งต่างๆ ตั้งแต่

ตำแหน่งที่ 1 ถึง ตำแหน่ง 81 ซึ่งเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะสามารถแสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดขึ้นในลักษณะต่าง ๆ

สิ่งที่ได้จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากทดลอง คือ ผลตอบสนองอิมพัลส์ ซึ่งได้จากการแปลงฟูริเยร์ผกผันของผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ได้จากการวัด ซึ่งได้นำผลนี้ไปทำการวิเคราะห์โดยประยุกต์ร่วมกับรูปสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง โดยแสดงผลจากการจำลองให้เห็นในรูปแบบของฟังก์ชันการส่งผ่านที่ได้จากการวัดของช่องสัญญาณ เพื่อหาค่าการสูญเสียเชิงวิถี, อัตราการขยายเชิงวิถีและหน้าตัดข้างการประวิงกำลัง ที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของห้องเรียนและสายอากาศที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในตำแหน่งต่างๆ โดยที่รูปที่ 5.16 จะแสดงตำแหน่งการวัดที่จะใช้ในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะใช้ในการอ้างอิงตัวเลขตำแหน่งของผลการวิเคราะห์ข้อมูลใน Room1 ผลจากการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.16 แบบจำลองการวัดและการจัดตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับ

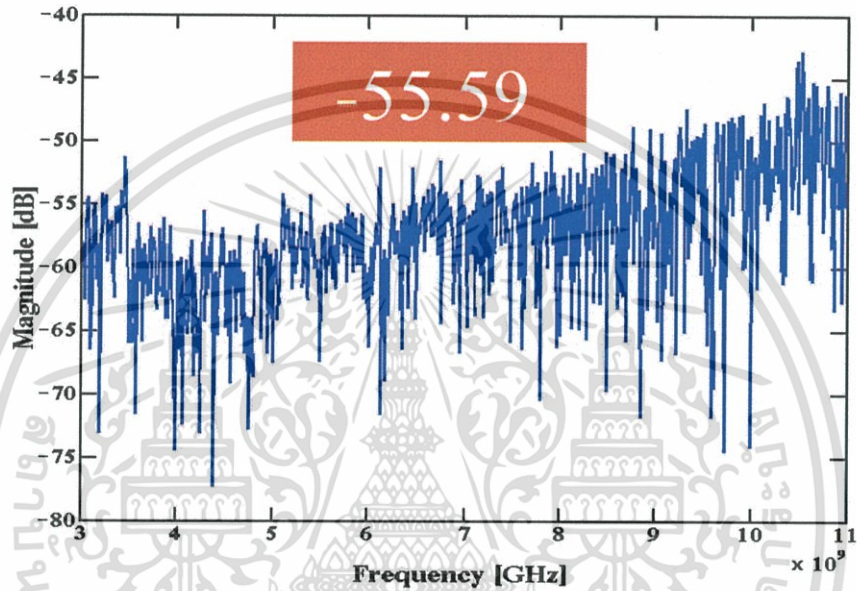
แบบแถวลำดับ ขนาด 9 แถว 9 หลัก

5.3.3.1.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร ใน Room 1

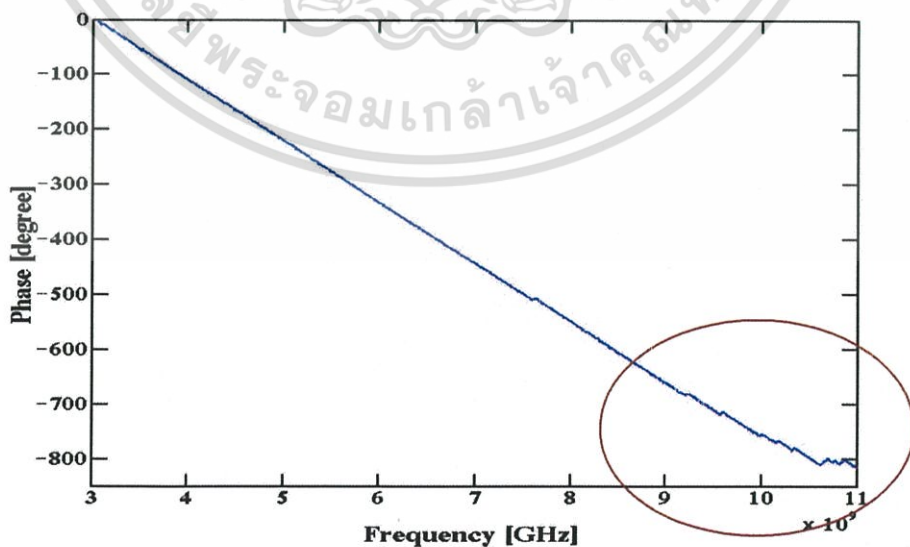
ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองนี้โดยทำการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านในแต่ละตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถวลำดับ ขนาด 9 แถว 9 หลัก จากแบบจำลองที่ Room 1 ตั้งแต่ตำแหน่งที่ 1 ถึง ตำแหน่งที่ 81 โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.16 คือ ตำแหน่งที่ 58 เป็นตำแหน่งที่รับสัญญาณได้ดีที่สุด โดยในรูปที่ 5.17 แสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 58 ซึ่งมีระยะห่าง 4.60 เมตรซึ่งมีค่าขนาดเฉลี่ยเท่ากับ -55.59 dB รูปที่ 5.18 แสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 58 ซึ่งมีระยะห่าง 4.60 เมตร และจะสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะของเฟสจะเรียบและจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงความถี่ตั้งแต่ 9.1 GHz ถึง 11 GHz อาจเกิดจากสายนำสัญญาณไม่รองรับในช่วงความถี่ที่สูงมาก ๆ



รูปที่ 5.17 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 58

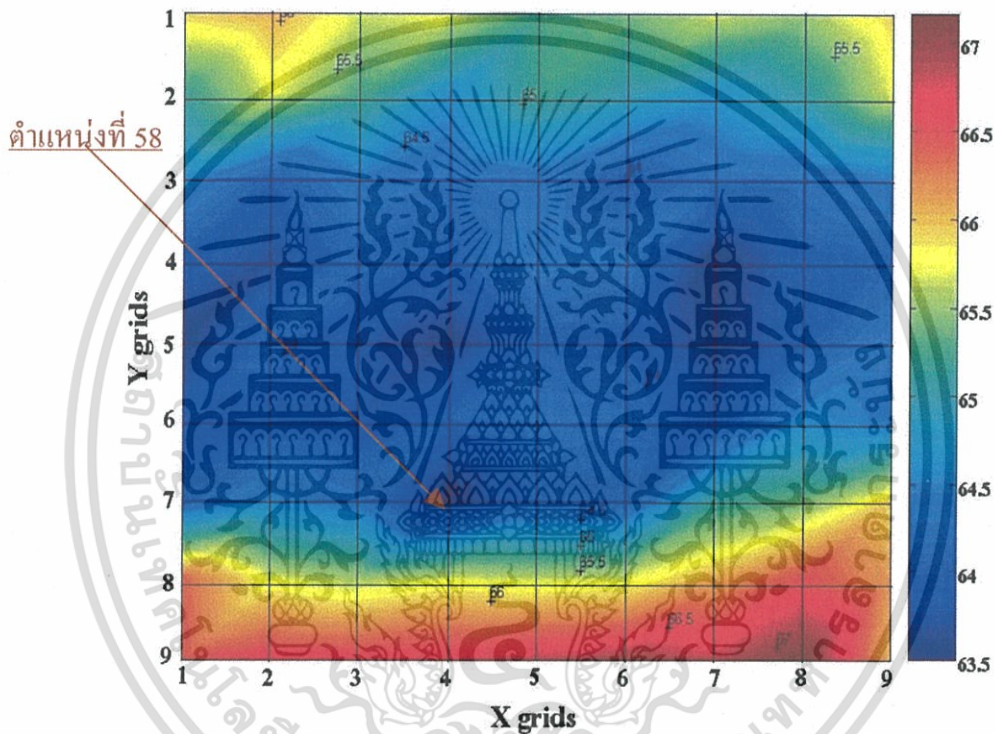


รูปที่ 5.18 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3.1.2 การสูญเสียเชิงวิถี

อัตราการสูญเสียเชิงวิถีสำหรับการแพร่กระจายภายในอาคาร จากรูปที่ 5.19 แสดงในรูปของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่ 1 ถึง 81 ซึ่งจะเห็นว่า การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอัตราการสูญเสียเชิงวิถีในช่วงตำแหน่งที่ 19 ถึงตำแหน่งที่ 63 แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสีน้ำเงินเป็นช่วงที่รับสัญญาณได้ดีที่สุด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจุดที่มีอัตราการสูญเสียเชิงวิถีน้อยที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง 58 จะมีค่าอัตราการสูญเสียเชิงวิถีที่ 63.4674 dB เพราะเป็นจุดที่เป็นในระดัปลายตามองเห็นมากที่สุดการสูญเสียเชิงวิถีที่เกิดขึ้น เนื่องจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อมบริเวณที่ทำการวัด



รูปที่ 5.19 การสูญเสียเชิงวิถีแสดงในรูปของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การสูญเสียเชิงวิถีแต่ละตำแหน่งจากสายอากาศทางด้านส่งมายังสายอากาศทางด้านรับ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ จะแสดงในตารางที่ 5.1

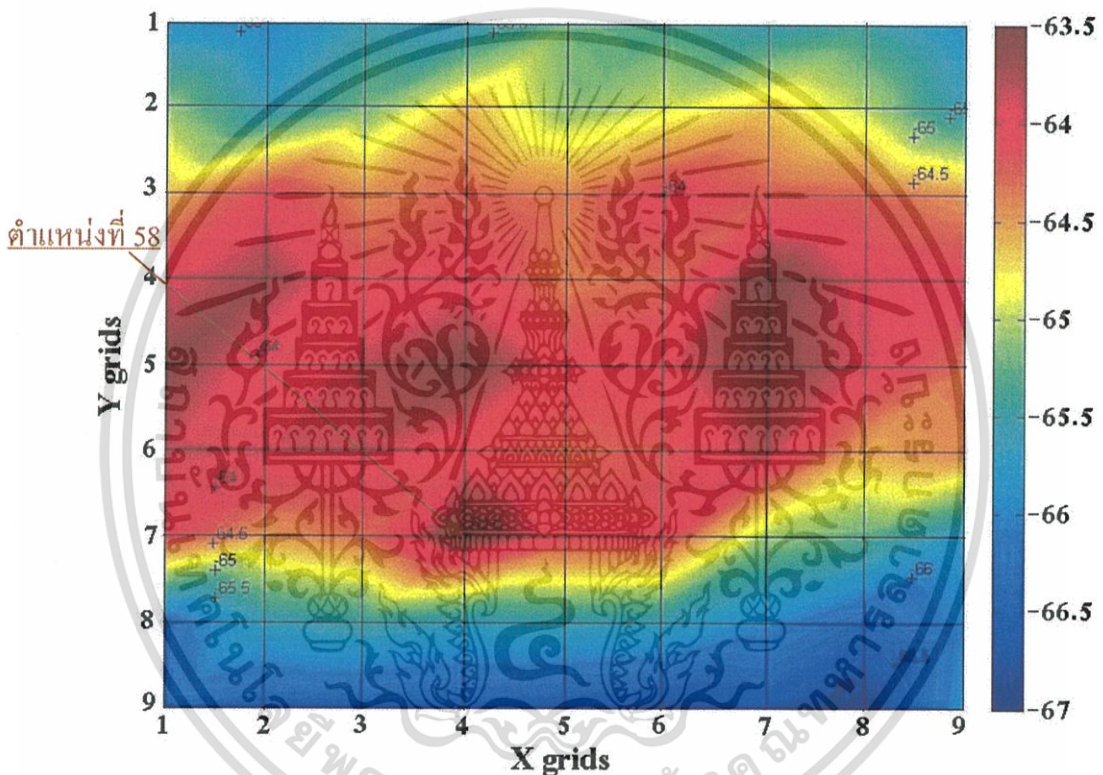
ตารางที่ 5.1 ค่าการสูญเสียเชิงวิถีแต่ละตำแหน่งของรูปแบบการวัดห้องสัญญาณภายในอาคาร

ตำแหน่งสาย อากาศ	ค่า Pathloss		ตำแหน่งสาย อากาศ	ค่า Pathloss		ตำแหน่ง สายอากาศ	ค่า Pathloss	
	Room1	Room2		Room1	Room2		Room1	Room2
1	65.9358	66.2241	28	63.9539	65.5012	55	65.0776	66.8708
2	66.0781	66.0430	29	63.6853	65.2084	56	64.5144	66.6782
3	65.6628	66.0159	30	64.1212	65.5179	57	65.3107	66.6753
4	65.7458	66.2631	31	63.9725	65.2031	58	63.4674	65.9142
5	65.2787	66.7446	32	64.4059	64.9426	59	64.9561	65.7236
6	65.4049	66.8156	33	64.2979	64.8222	60	64.7844	65.8583
7	65.6700	66.6570	34	63.5084	65.2057	61	65.1230	65.8455
8	65.5234	66.0871	35	63.9275	64.8394	62	65.3764	65.3259
9	65.9463	66.1375	36	64.0135	64.6236	63	65.9114	65.3018
10	65.1537	66.8593	37	64.9449	65.4119	64	66.3827	66.7984
11	65.7212	66.1844	38	64.0883	65.1072	65	65.7198	67.0161
12	65.2442	66.1221	39	63.8028	65.2774	66	65.5636	66.6312
13	64.6298	65.6209	40	63.5717	65.1452	67	65.7192	66.6652
14	65.1782	66.0198	41	63.9985	65.1336	68	65.6619	67.0699
15	64.9508	65.5510	42	63.9595	64.8030	69	65.6975	67.1026
16	64.6894	66.1262	43	63.5634	65.0840	70	66.0814	66.6084
17	65.0247	65.8329	44	63.9142	66.7835	71	66.5295	66.2520
18	65.7033	65.7033	45	64.3389	64.7880	72	66.1425	66.0139
19	64.6528	65.7868	46	63.8423	65.8808	73	66.4517	66.3348
20	64.0314	65.6537	47	63.8841	66.2796	74	66.6851	67.2666
21	64.4674	65.3843	48	63.8548	66.0056	75	66.6565	67.9580
22	64.2667	65.3154	49	64.0388	66.1259	76	66.7439	67.3294
23	64.4044	65.3051	50	64.2650	65.6038	77	66.8424	66.9129
24	63.9924	65.2408	51	64.1929	65.8015	78	66.9665	64.5914
25	64.2257	65.3116	52	63.7811	65.1142	79	66.8391	66.6876
26	64.2769	65.0470	53	64.5571	65.1144	80	67.1854	66.7038
27	64.4840	64.8152	54	64.4236	65.6445	81	66.0262	67.5181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3.1.3 อัตราขยายเชิงวิถี

อัตราขยายเชิงวิถีสำหรับการแพร่กระจายภายในอาคาร จากรูปที่ 5.20 แสดงในรูปของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่ 1 ถึง 81 ซึ่งจะเห็นว่า การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอัตราขยายเชิงวิถีในช่วงตำแหน่งที่ 19 ถึงตำแหน่งที่ 63 แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสีแดงเป็นช่วงที่มีอัตราขยายมากที่สุด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจุดที่มีอัตราขยายมากที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง 58 จะมีค่าอัตราขยายเชิงวิถีที่ -63.4674 dB เพราะเป็นจุดที่เป็นในแบบที่ระดับสายตามองเห็นมากที่สุด



รูปที่ 5.20 อัตราการขยายเชิงวิถีแสดงในรูปของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

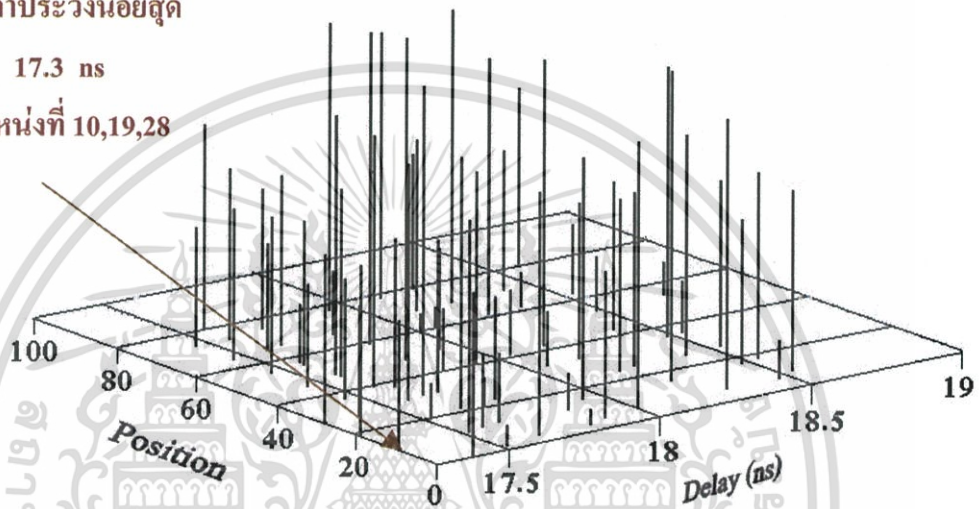
5.3.3.1.4 หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับที่เวลาต่างๆ โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อเวลาที่เข้ามาถึง จะสังเกตได้ว่า เวลาประวิงของสัญญาณที่ใช้เวลาการมาถึงของสัญญาณน้อยที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 17.3 ns ตำแหน่งที่ 10, ตำแหน่งที่ 19 และตำแหน่งที่ 28 จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.21

ค่าเวลาประวิงน้อยสุด

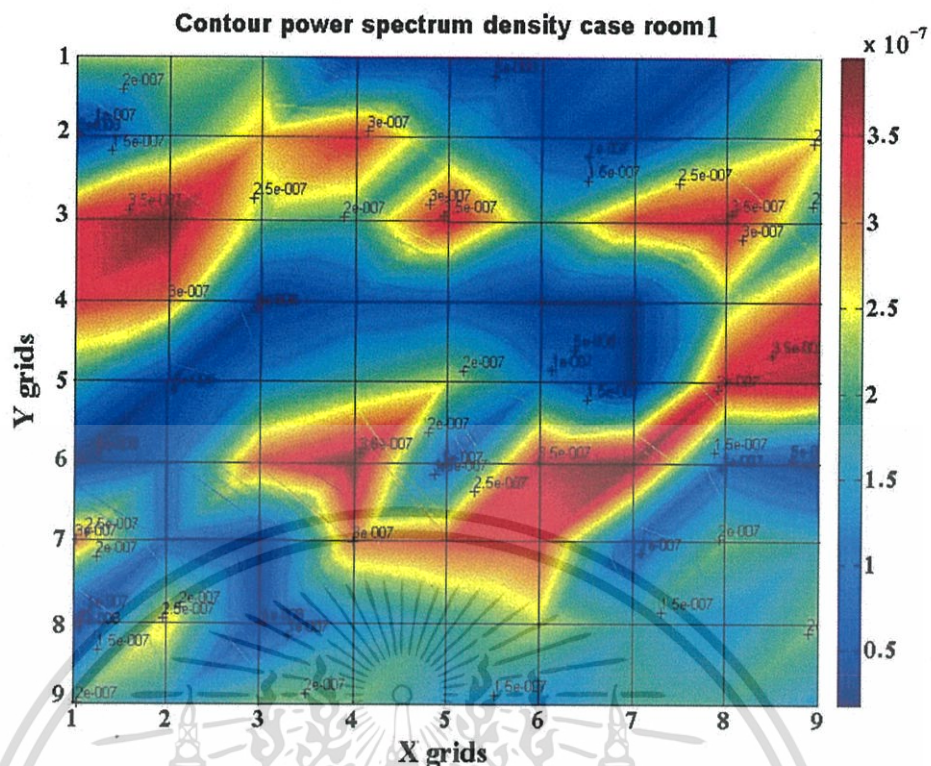
17.3 ns

ตำแหน่งที่ 10,19,28



รูปที่ 5.21 หน้าตัดข้างการประวิงกำลังของ Room 1 จาก 1-81 ตำแหน่ง

ในส่วนที่สองนี้จะแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่เข้ามายังภาครับที่เวลาต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่า การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสีแดง เป็นช่วงที่มีค่าระดับความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณสูงสุด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจุดที่มีระดับกำลังงานของสัญญาณสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง 58 จะมีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณที่ 3.978×10^{-7} W ที่เวลา 17.82 n จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 ระดับความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณในรูปของ
การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เวลาประวิงและความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแต่ละตำแหน่งจากสาย
อากาศทางด้านส่งมายังสายอากาศทางด้านรับ ณ แต่ละตำแหน่งจะแสดงในตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 เวลาประวิงและความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ

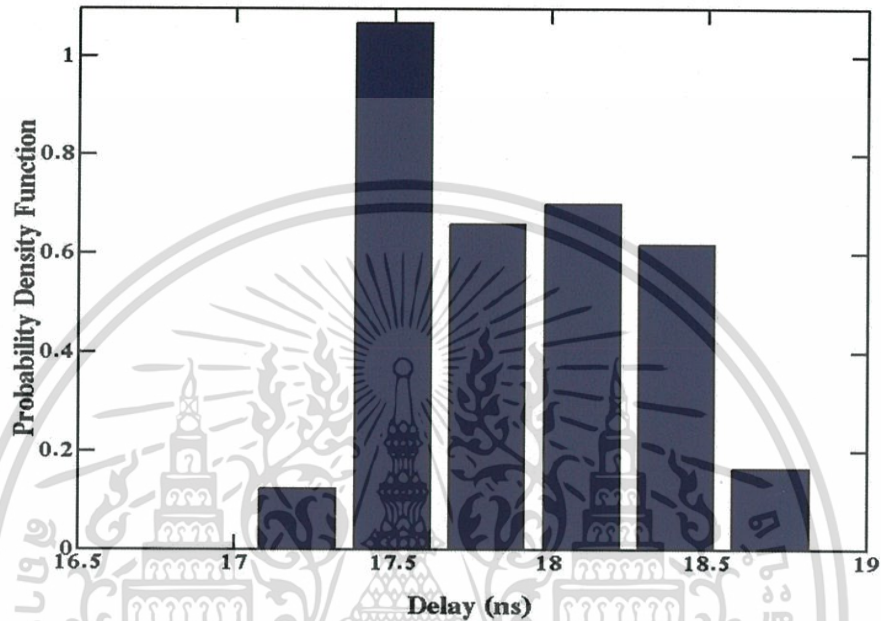
ตำแหน่ง สาย อากาศ	Room 1		ตำแหน่ง สาย อากาศ	Room 1		ตำแหน่ง สาย อากาศ	Room 1	
	ความหนาแน่น สเปกตรัมกำลัง	เวลาประวิง (Delay Time)		ความหนาแน่น สเปกตรัมกำลัง	เวลาประวิง (Delay Time)		ความหนาแน่น สเปกตรัมกำลัง	เวลาประวิง (Delay Time)
1	2.037 e-007 W	17.4 ns	28	2.116 e-007 W	17.3 ns	55	1.971 e-007 W	17.46 ns
2	2.107 e-008 W	17.52 ns	29	1.366 e-007 W	17.4 ns	56	1.805 e-007 W	17.58 ns
3	3.106 e-007 W	17.64 ns	30	3 e-007 W	17.58 ns	57	6.985 e-008 W	17.58 ns
4	1.521 e-008 W	17.82 ns	31	3.946 e-007 W	17.64 ns	58	3.978 e-007 W	17.82 ns
5	1.855 e-007 W	17.88 ns	32	1.902 e-007 W	17.7 ns	59	2.187 e-008 W	18 ns
6	3.396 e-007 W	18 ns	33	6.846 e-008 W	18.06 ns	60	2.324 e-008 W	18.06 ns
7	3.425 e-007 W	18.3 ns	34	1.94 e-007 W	18.18 ns	61	3.271 e-007 W	18.24 ns
8	4.163 e-008 W	18.48 ns	35	3.444 e-007 W	18.48 ns	62	4.09 e-008 W	18.36 ns
9	2.297 e-007 W	18.54 ns	36	4.176 e-008 W	18.54 ns	63	8.494 e-008 W	18.54 ns
10	1.575 e-007 W	17.3 ns	37	1.514 e-007 W	17.46 ns	64	1.912 e-007 W	17.46 ns
11	2.679 e-007 W	17.52 ns	38	1.843 e-007 W	17.64 ns	65	1.338 e-007 W	17.58 ns
12	9.047 e-008 W	17.58 ns	39	3.194 e-007 W	17.58 ns	66	2.143 e-007 W	17.64 ns
13	8.605 e-008 W	17.64 ns	40	7.645 e-008 W	17.82 ns	67	7.674 e-008 W	17.82 ns
14	3.906 e-008 W	17.88 ns	41	2.415 e-007 W	17.94 ns	68	3.535 e-007 W	18.07 ns
15	3.07 e-007 W	17.94 ns	42	8.117 e-008 W	18.06 ns	69	2.187 e-007 W	18.12 ns
16	3.952 e-007 W	18.24 ns	43	3.627 e-007 W	18.18 ns	70	3.735 e-007 W	18.24 ns
17	1.825 e-007 W	18.48 ns	44	1.837 e-007 W	18.42 ns	71	1.781 e-007 W	18.42 ns
18	2.354 e-007 W	18.54 ns	45	3.619 e-008 W	18.66 ns	72	4.092 e-008 W	18.66 ns
19	2.159 e-007 W	17.3 ns	46	1.278 e-007 W	17.46 ns	73	1.504 e-007 W	17.46 ns
20	4.212 e-008 W	17.52 ns	47	2.386 e-007 W	17.58 ns	74	2.163 e-007 W	17.58 ns
21	3.372 e-008 W	17.7 ns	48	3.323 e-007 W	17.58 ns	75	1.75 e-007 W	17.7 ns
22	3.211 e-007 W	17.64 ns	49	3.604 e-007 W	17.82 ns	76	1.674 e-008 W	17.94 ns
23	1.283 e-007 W	17.76 ns	50	1.266 e-007 W	17.94 ns	77	3.682 e-007 W	17.94 ns
24	2.558 e-008 W	18.18 ns	51	2.873 e-008 W	18.06 ns	78	3.383 e-007 W	18.12 ns
25	2.21 e-007 W	18.24 ns	52	1.91 e-007 W	18.3 ns	79	1.695 e-007 W	18.24 ns
26	2.793 e-007 W	18.42 ns	53	6.78 e-008 W	18.48 ns	80	2.608 e-007 W	17.58 ns
27	2.081 e-007 W	18.54 ns	54	3.806 e-008 W	18.72 ns	81	2.238 e-007 W	18.6 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

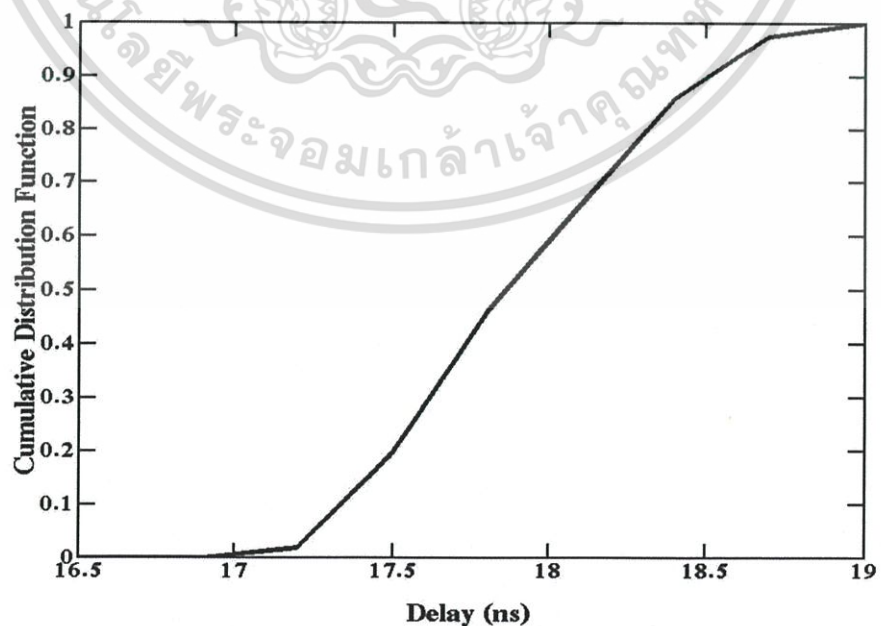
5.3.3.1.5 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติใน Room1 โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะสังเกตได้ว่าจะมีค่าเฉลี่ย 17.94 ns และมีระยะห่างของการเกิดเวลาประวิง 1.39 ns จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.23 และ 5.24



รูปที่ 5.23 PDF ของเวลาประวิง (Delay Time) ใน Room 1

5.3.3.1.6 ฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม

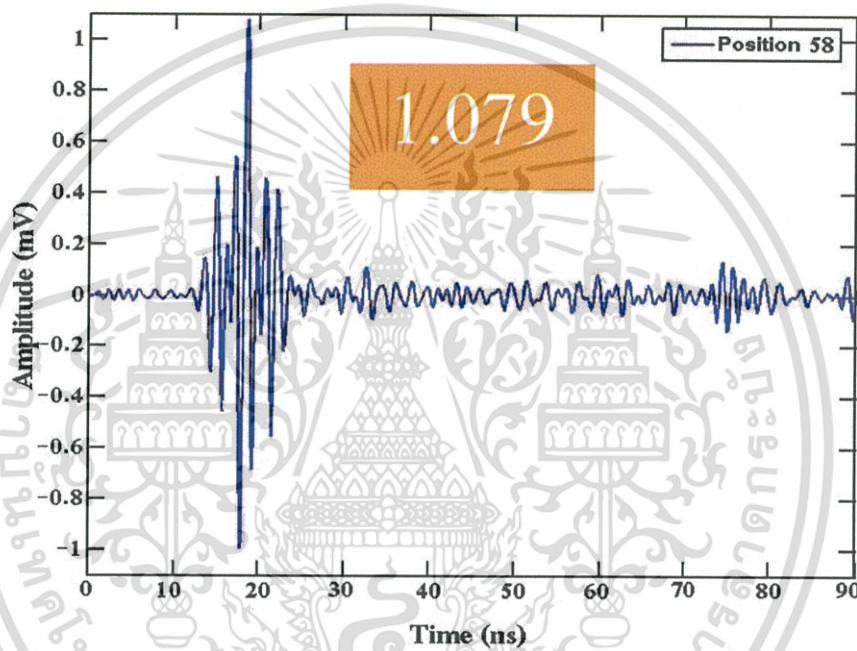


รูปที่ 5.24 CDF ของเวลาประวิง (Delay Time) ใน Room 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3.1.7 รูปคลื่นจากเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ในกรณีรูปแบบการวัด ช่องสัญญาณภายในอาคาร

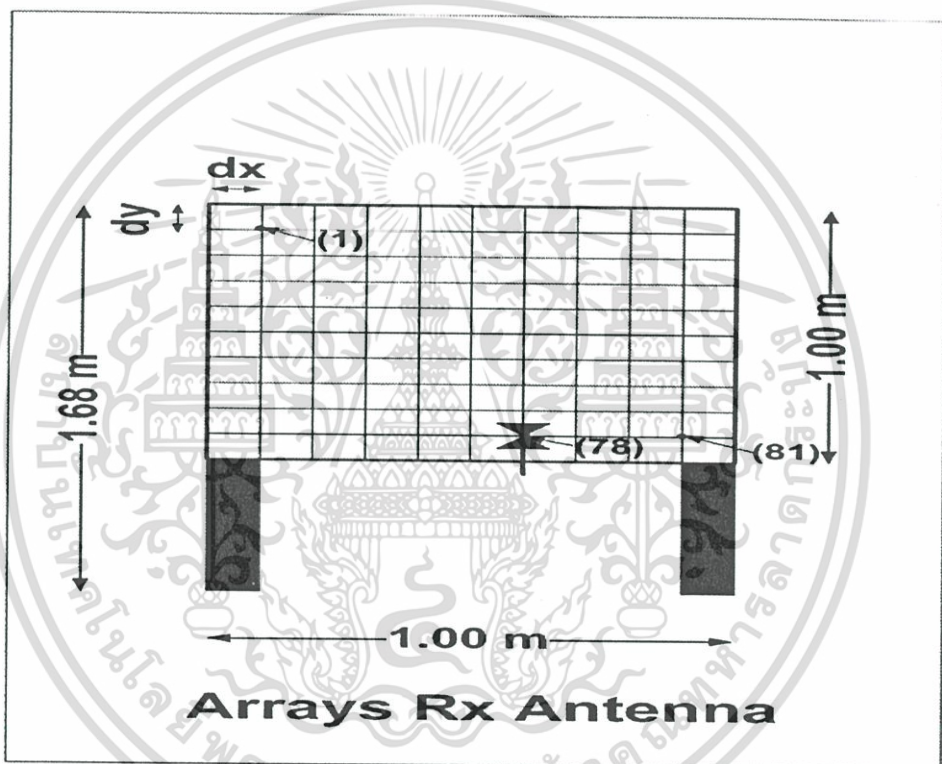
ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาใช้เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ เพื่อที่จะ
สัญญาณที่รับได้มีค่าดีที่สุด สัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้
แสดงดังรูปที่ 5.25 โดยในรูปนี้ได้แสดงผลของแอมพลิจูดของสัญญาณในตำแหน่งการวัดตำแหน่ง
ที่ 58 โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.16 มีค่าแอมพลิจูดในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม
เท่ากับ 1.079 mV



รูปที่ 5.25 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาที่พูดของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้

5.3.3.2 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร Room 2

การวัดภายในอาคาร Room 2 ลักษณะขั้นตอนนี้จะเหมือนกับการวัดภายในอาคาร Room 1 โดยจะกำหนดให้สายอากาศด้านรับจะอยู่ภายในห้องเรียนทั้งสองฝั่งของทางเดินมีระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับจาก 4.60 เมตร โดยกำหนดความสูงของสายอากาศทั้งด้านส่งเป็น 1.20 เมตร และสายอากาศด้านรับเป็น 1.68 เมตร โดยจะทำการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศด้านส่งคงที่ และทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศด้านรับออกไปครั้งละ 0.1 เมตร โดยที่รูปที่ 5.26 จะแสดงตำแหน่งการวัดที่จะใช้ในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะใช้ในการอ้างอิงตัวเลขตำแหน่งของผลการวิเคราะห์ข้อมูลใน Room2 ผลจากการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังต่อไปนี้



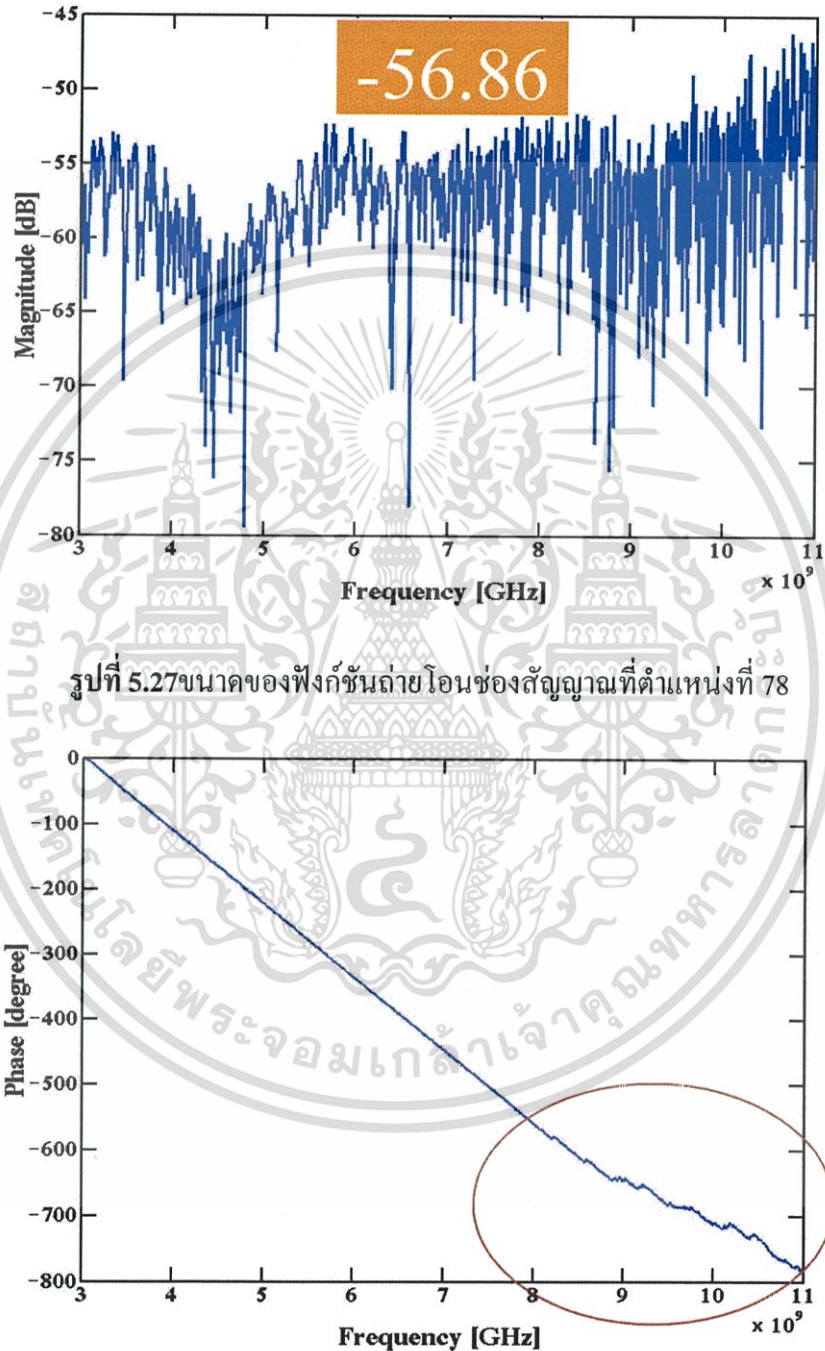
รูปที่ 5.26 แบบจำลองการวัดและการจัดตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับ

แบบแถวลำดับ ขนาด 9 แถว 9 หลัก

5.3.3.2.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศที่ได้จากรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร Room 2

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองนี้โดยทำการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านในแต่ละตำแหน่งของสายอากาศทางด้านรับแบบแถวลำดับ ขนาด 9 แถว 9 หลัก จากแบบจำลองที่ Room 2 ตั้งแต่ตำแหน่งที่ 1 ถึง ตำแหน่งที่ 81 โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.26 เป็นตำแหน่งที่รับสัญญาณได้ดีที่สุด โดยในรูปที่ 5.27 แสดงขนาดของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 78 ซึ่งมีระยะห่าง 4.60 เมตร ซึ่งมีค่าขนาดเฉลี่ยเท่ากับ -56.86 dB รูปที่ 5.28 แสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 78 ซึ่งมีระยะห่าง 4.60 เมตร และจะสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะของเฟสจะเรียบและจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงความถี่ตั้งแต่ 8.5 GHz ถึง 11 GHz อาจเกิดจากสายนำสัญญาณ ไม่รองรับในช่วงความถี่ที่สูงมากๆ



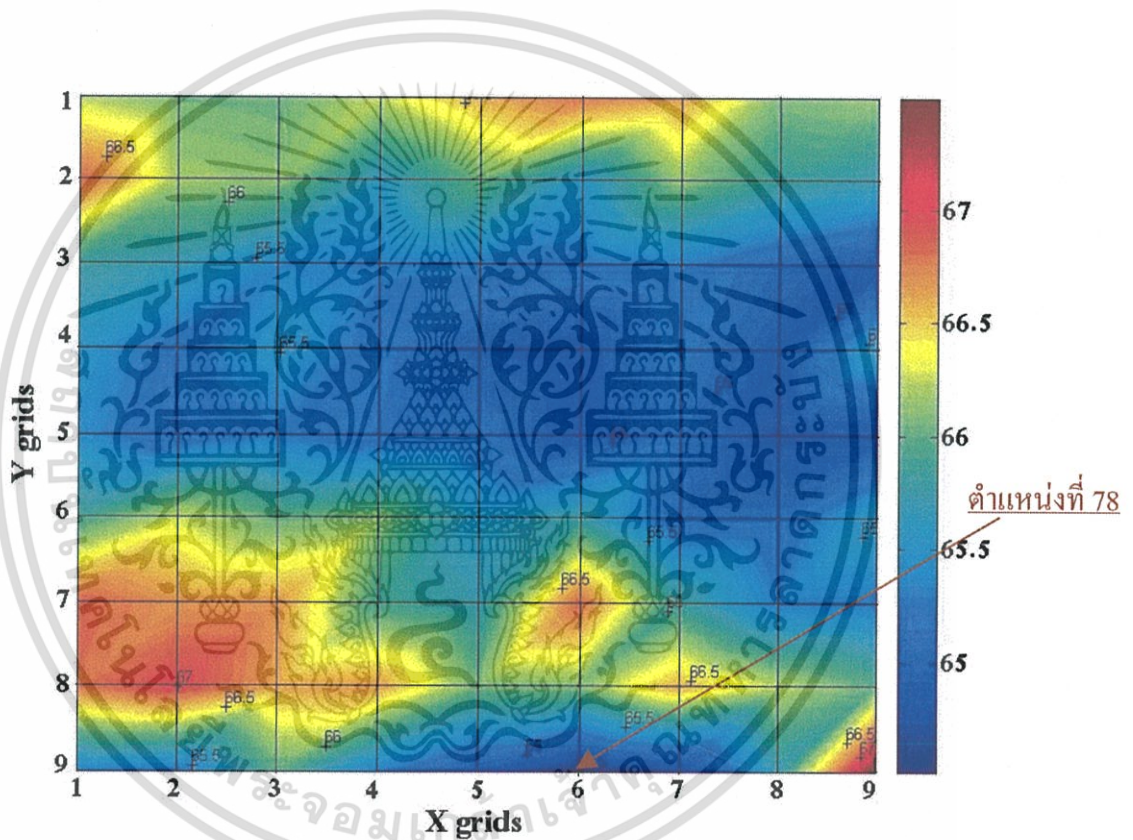
รูปที่ 5.27 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 78

รูปที่ 5.28 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณที่ตำแหน่งที่ 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3.2.2 การสูญเสียเชิงวิถี

อัตราการสูญเสียเชิงวิถีสำหรับการแพร่กระจายภายในอาคาร จากรูปที่ 5.29 แสดงในรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่ 1 ถึง 81 ซึ่งจะเห็นว่า การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอัตราการสูญเสียเชิงวิถีในช่วงตำแหน่งที่ 19 ถึงตำแหน่งที่ 79 แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสีน้ำเงินเป็นช่วงที่รับสัญญาณได้ดีที่สุด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจุดที่มีอัตราการสูญเสียเชิงวิถีน้อยที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง 78 จะมีค่าอัตราการสูญเสียเชิงวิถีที่ 64.5914 dB เพราะเป็นจุดที่เป็นแบบที่ระดับสายตามองเห็นมากที่สุด และการสูญเสียเชิงวิถีที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อมบริเวณที่ทำการวัด



รูปที่ 5.29 การสูญเสียเชิงวิถีแสดงในรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การสูญเสียเชิงวิถีแต่ละตำแหน่งจากสายอากาศทางด้านส่งมายังสายอากาศทางด้านรับ ณ ตำแหน่งต่างๆ จะแสดงในตารางที่ 5.3

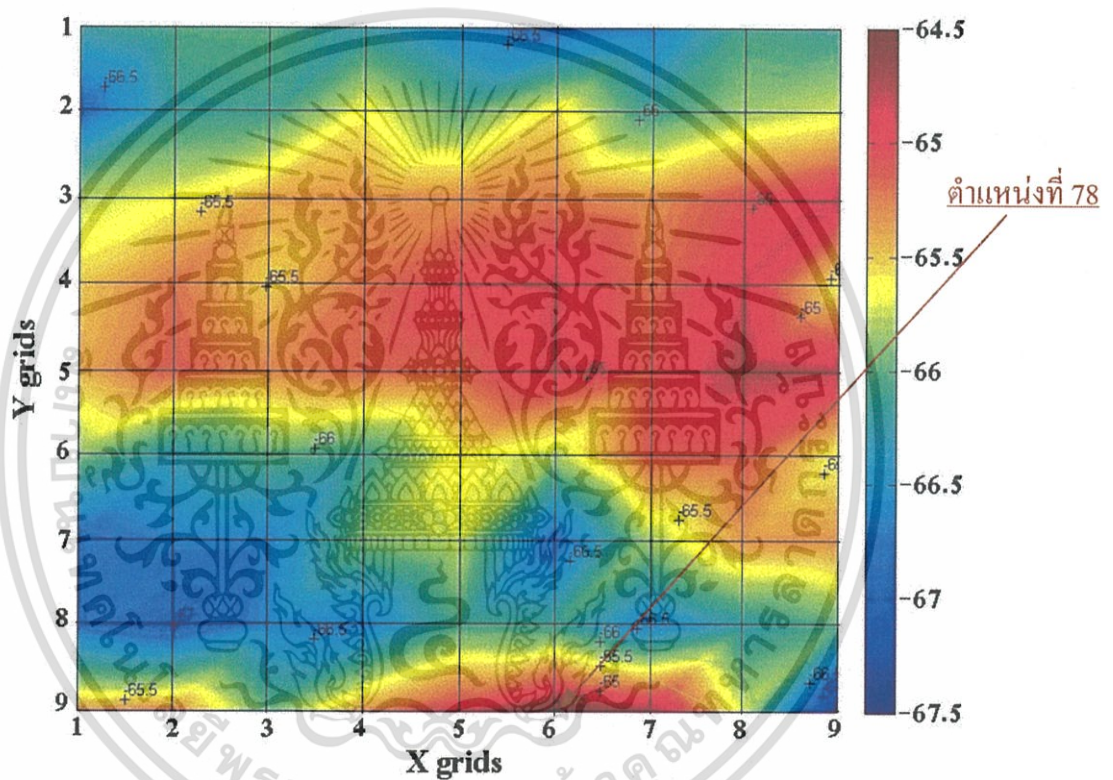
ตารางที่ 5.3 ค่าการสูญเสียเชิงวิธีแต่ละตำแหน่งของรูปแบบการวัดห้องสัญญาณภายในอาคาร

ตำแหน่งสาย อากาศ	ค่า Pathloss		ตำแหน่งสาย อากาศ	ค่า Pathloss		ตำแหน่ง สายอากาศ	ค่า Pathloss	
	Room1	Room2		Room1	Room2		Room1	Room2
1	65.9358	66.2241	28	63.9539	65.5012	55	65.0776	66.8708
2	66.0781	66.0430	29	63.6853	65.2084	56	64.5144	66.6782
3	65.6628	66.0159	30	64.1212	65.5179	57	65.3107	66.6753
4	65.7458	66.2631	31	63.9725	65.2031	58	63.4674	65.9142
5	65.2787	66.7446	32	64.4059	64.9426	59	64.9561	65.7236
6	65.4049	66.8156	33	64.2979	64.8222	60	64.7844	65.8583
7	65.6700	66.6570	34	63.5084	65.2057	61	65.1230	65.8455
8	65.5234	66.0871	35	63.9275	64.8394	62	65.3764	65.3259
9	65.9463	66.1375	36	64.0135	64.6236	63	65.9114	65.3018
10	65.1537	66.8593	37	64.9449	65.4119	64	66.3827	66.7984
11	65.7212	66.1844	38	64.0883	65.1072	65	65.7198	67.0161
12	65.2442	66.1221	39	63.8028	65.2774	66	65.5636	66.6312
13	64.6298	65.6209	40	63.5717	65.1452	67	65.7192	66.6652
14	65.1782	66.0198	41	63.9985	65.1336	68	65.6619	67.0699
15	64.9508	65.5510	42	63.9595	64.8030	69	65.6975	67.1026
16	64.6894	66.1262	43	63.5634	65.0840	70	66.0814	66.6084
17	65.0247	65.8329	44	63.9142	66.7835	71	66.5295	66.2520
18	65.7033	65.7033	45	64.3389	64.7880	72	66.1425	66.0139
19	64.6528	65.7868	46	63.8423	65.8808	73	66.4517	66.3348
20	64.0314	65.6537	47	63.8841	66.2796	74	66.6851	67.2666
21	64.4674	65.3843	48	63.8548	66.0056	75	66.6565	67.9580
22	64.2667	65.3154	49	64.0388	66.1259	76	66.7439	67.3294
23	64.4044	65.3051	50	64.2650	65.6038	77	66.8424	66.9129
24	63.9924	65.2408	51	64.1929	65.8015	78	66.9665	64.5914
25	64.2257	65.3116	52	63.7811	65.1142	79	66.8391	66.6876
26	64.2769	65.0470	53	64.5571	65.1144	80	67.1854	66.7038
27	64.4840	64.8152	54	64.4236	65.6445	81	66.0262	67.5181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3.2.3 อัตราขยายเชิงวิถี

อัตราขยายเชิงวิถีสำหรับการแพร่กระจายภายในอาคาร จากรูปที่ 5.30 แสดงในรูปของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่ 1 ถึง 81 ซึ่งจะเห็นว่า การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอัตราขยายเชิงวิถีในช่วงตำแหน่งที่ 19 ถึงตำแหน่งที่ 54 แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสีแดง เป็นช่วงที่มีอัตราขยายมากที่สุด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจุดที่มีอัตราขยายมากที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง 78 จะมีค่าอัตราขยายเชิงวิถีที่ -64.5914 dB เพราะเป็นจุดที่เป็นในแบบที่ระดับสายตามองเห็นมากที่สุด



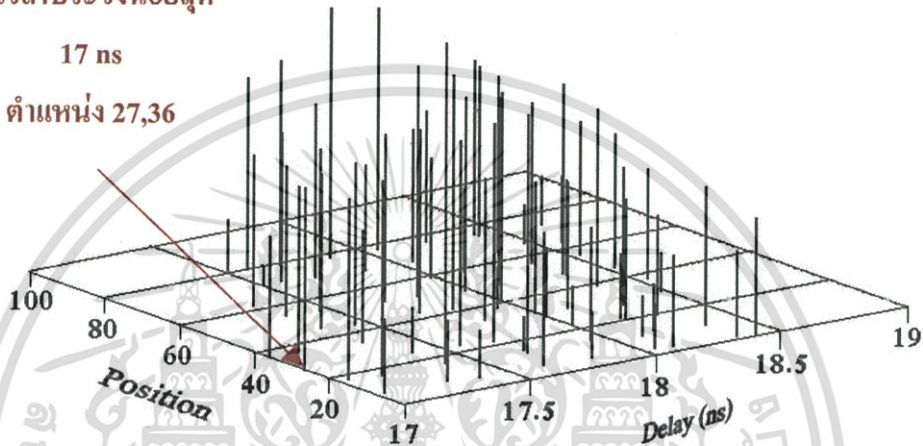
รูปที่ 5.30 อัตราการขยายเชิงวิถีแสดงในรูปของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

5.3.3.2.4 หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับที่เวลาต่างๆ โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อเวลาที่เข้ามาถึง จะสังเกตเห็นได้ว่า เวลาประวิงของสัญญาณที่ใช้เวลาการมาถึงของสัญญาณน้อยที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 17 ns ตำแหน่งที่ 27 และตำแหน่งที่ 36 จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.31

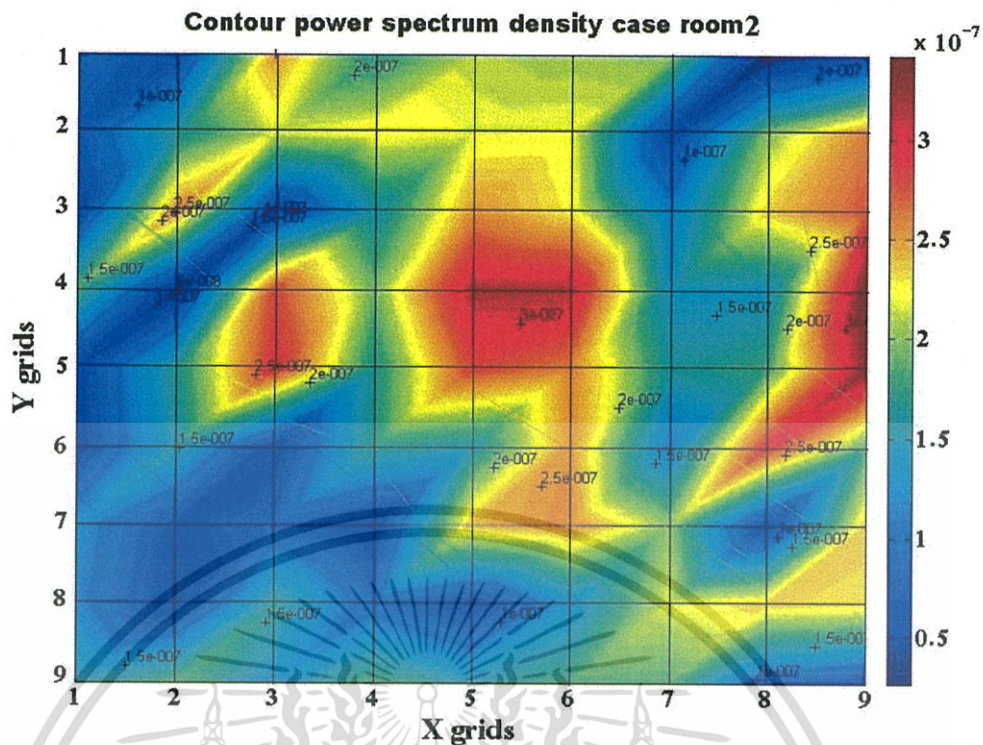
ค่าเวลาประวิงน้อยสุด

17 ns
ตำแหน่ง 27,36



รูปที่ 5.31 หน้าตัดข้างการแผ่ประวิงกำลังของ Room 2 จาก 1-81 ตำแหน่ง

ในส่วนที่สองนี้ จะแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่เข้ามายังภาครับที่เวลาต่าง ซึ่งจะเห็นว่าการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสีแดง เป็นช่วงที่มีค่าระดับความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณสูงสุด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจุดที่มีระดับกำลังงานของสัญญาณสูงสุด จะอยู่ที่ตำแหน่ง 78 จะมีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณที่ 3.449×10^{-7} ที่เวลา 17.88 ns จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.32 ระดับความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณในรูปของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เวลาประวิงและความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแต่ละตำแหน่งจากสายอากาศทางด้านส่งมายังสายอากาศทางด้านรับ ณ ตำแหน่งต่างๆ จะแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เวลาประวิงและความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ

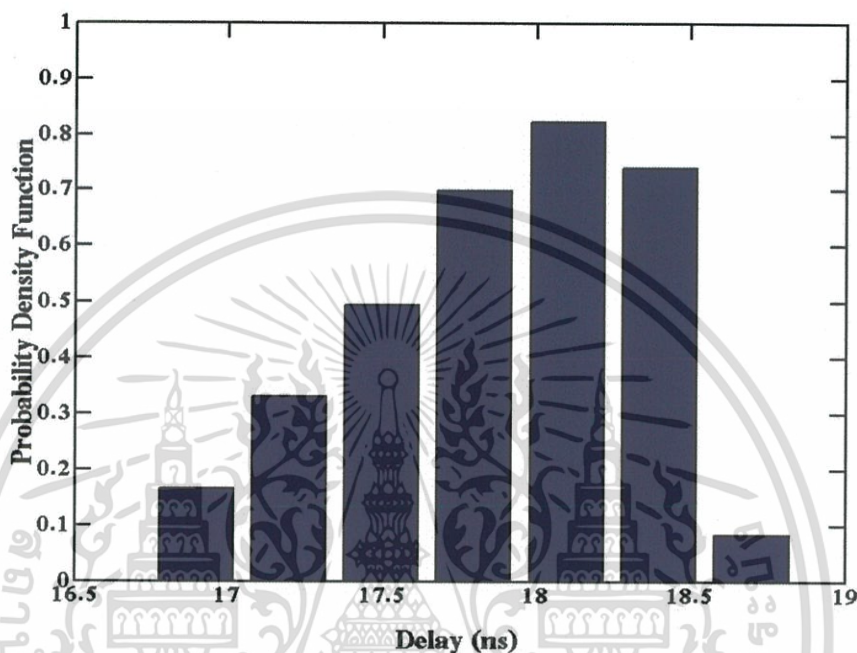
ตำแหน่ง สาย อากาศ	Room 2		ตำแหน่ง สาย อากาศ	Room 2		ตำแหน่ง สาย อากาศ	Room 2	
	ความหนาแน่น สเปกตรัมกำลัง	เวลาประวิง (Delay Time)		ความหนาแน่น สเปกตรัมกำลัง	เวลาประวิง (Delay Time)		ความหนาแน่น สเปกตรัมกำลัง	เวลาประวิง (Delay Time)
1	1.554 e-007 W	18.42 ns	28	1.85 e-007 W	18.3 ns	55	1.835 e-007 W	18.54 ns
2	1.156 e-007 W	18.36 ns	29	9.341 e-008 W	18 ns	56	2.184 e-007 W	18.36 ns
3	1.241 e-007 W	18.12 ns	30	5.051 e-008 W	18.48 ns	57	2.015 e-007 W	18.36 ns
4	5.795 e-008 W	18.06 ns	31	1.698 e-007 W	18.12 ns	58	1.136 e-007 W	18.12 ns
5	6.222 e-008 W	17.82 ns	32	1.656 e-007 W	18 ns	59	1.603 e-007 W	18 ns
6	1.814 e-007 W	17.64 ns	33	1.942 e-007 W	17.82 ns	60	1.426 e-007 W	17.82 ns
7	5.96 e-008 W	17.4 ns	34	1.522 e-007 W	17.37 ns	61	1.211 e-007 W	17.7 ns
8	8.276 e-008 W	17.28 ns	35	2.278 e-007 W	17.1 ns	62	5.684 e-008 W	17.46 ns
9	9.965 e-008 W	17.04 ns	36	1.658 e-007 W	17 ns	63	2.019 e-007 W	17.34 ns
10	1.876 e-007 W	18.36 ns	37	1.511 e-007 W	18.54 ns	64	8.419 e-008 W	18.6 ns
11	5.237 e-008 W	18.12 ns	38	5.407 e-008 W	17.94 ns	65	2.37 e-007 W	18.36 ns
12	6.25 e-008 W	18.18 ns	39	2.413 e-007 W	18.36 ns	66	5.036 e-008 W	18.48 ns
13	1.553 e-007 W	17.94 ns	40	1.532 e-007 W	18.12 ns	67	2.946 e-007 W	18.18 ns
14	1.669 e-007 W	17.7 ns	41	2.845 e-007 W	18 ns	68	1.789 e-007 W	18.06 ns
15	4.401 e-008 W	17.7 ns	42	3.204 e-007 W	17.82 ns	69	1.412 e-007 W	17.88 ns
16	2.608 e-007 W	17.4 ns	43	2.526 e-007 W	17.7 ns	70	2.353 e-007 W	17.7 ns
17	1.612 e-007 W	17.16 ns	44	2.189 e-007 W	17.46 ns	71	2.016 e-007 W	17.58 ns
18	6.843 e-008 W	17.04 ns	45	2.116 e-007 W	17.34 ns	72	2.457 e-008 W	17.52 ns
19	1.348 e-007 W	18.3 ns	46	1.808 e-007 W	18.54 ns	73	6.63 e-008 W	18.66 ns
20	1.648 e-007 W	18.18 ns	47	1.277 e-007 W	18.36 ns	74	2.303 e-007 W	18.42 ns
21	8.745 e-008 W	18.18 ns	48	2.595 e-007 W	18.36 ns	75	2.391 e-007 W	18.42 ns
22	5.486 e-008 W	18 ns	49	2.545 e-007 W	18.12 ns	76	1.802 e-007 W	18.24 ns
23	2.967 e-007 W	17.7 ns	50	2.615 e-007 W	18 ns	77	3.32 e-007 W	18.06 ns
24	2.807 e-007 W	17.58 ns	51	3.171 e-007 W	17.82 ns	78	3.449 e-007 W	17.88 ns
25	5.943 e-008 W	17.4 ns	52	2.275 e-007 W	17.7 ns	79	2.772 e-007 W	17.7 ns
26	2.175 e-007 W	17.16 ns	53	2.207 e-007 W	17.46 ns	80	2.608 e-007 W	17.58 ns
27	2.503 e-007 W	17 ns	54	2.058 e-007 W	17.34 ns	81	6.843 e-008 W	17.52 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

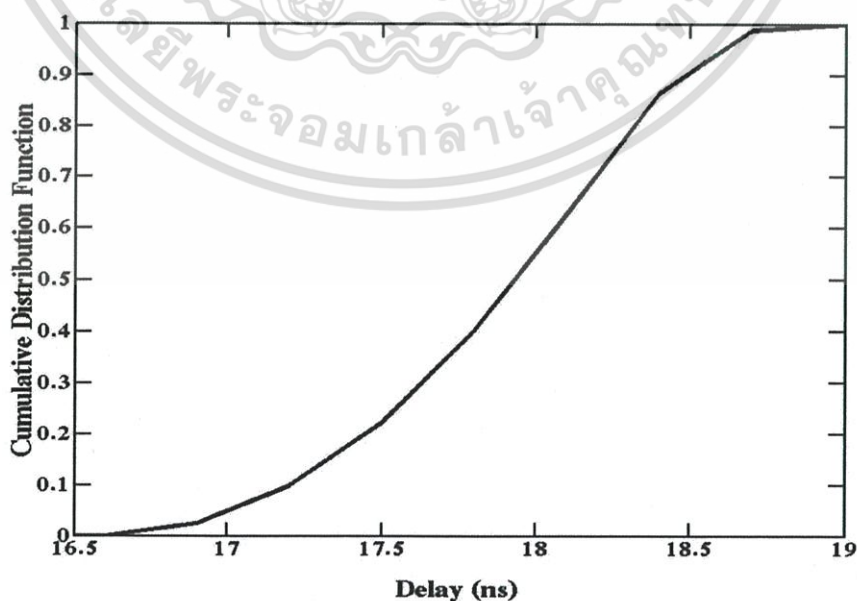
5.3.3.2.5 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติใน Room2 โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะสังเกตได้ว่าจะมีค่าเฉลี่ย 17.88 ns และมีระยะห่างของการเกิดเวลาประวิง 1.54 ns จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.33 และ 5.34



รูปที่ 5.33 PDF ของเวลาประวิง (Delay Time) ใน Room 2

5.3.3.2.6 ฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม



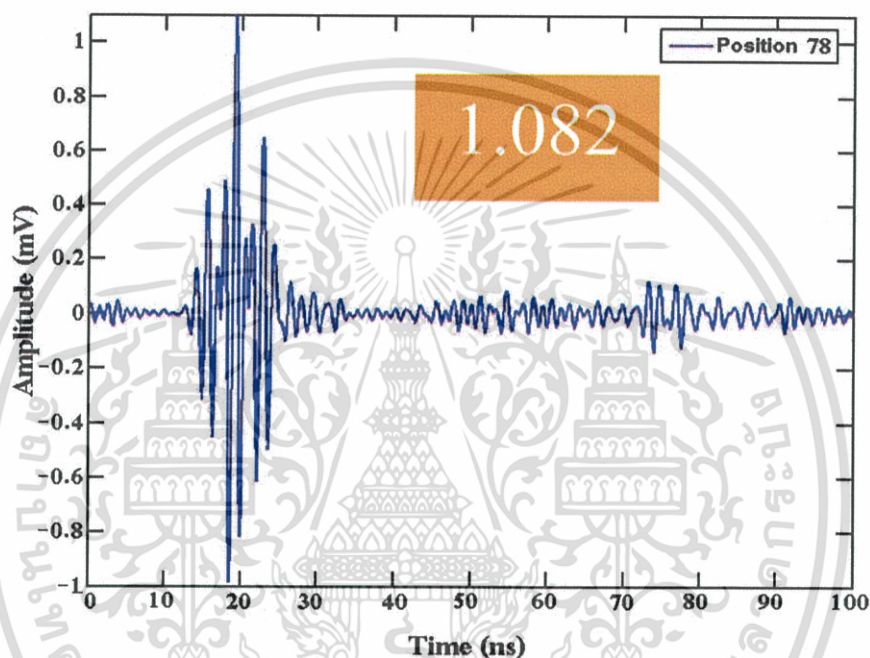
รูปที่ 5.34 CDF ของเวลาประวิง (Delay Time) ใน Room 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3.2.7 รูปคลื่นจากเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ในกรณีรูปแบบการวัด

ช่องสัญญาณภายในอาคาร

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาใช้เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ เพื่อที่จะหาสัญญาณที่รับได้มีค่าดีที่สุด สัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ แสดงดังรูปที่ 5.35 โดยในรูปนี้ได้แสดงผลของแอมพลิจูดของสัญญาณในตำแหน่งการวัดตำแหน่งที่ 78 โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.26 มีค่าแอมพลิจูดในกรณีใช้สัญญาณส่งแบบรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม เท่ากับ 1.082 mV



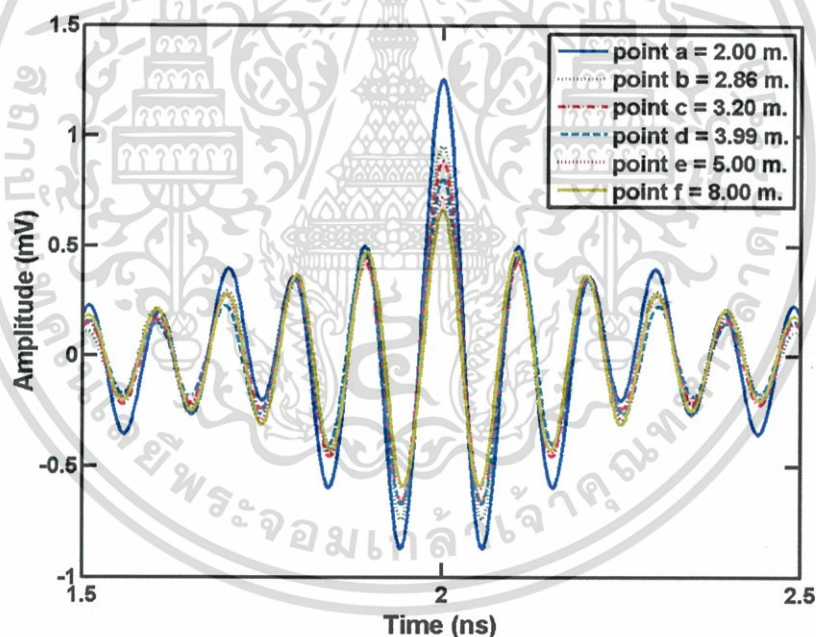
รูปที่ 5.35 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาที่พูดของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้

5.3.4 รูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร

ลักษณะการวัดในแบบจำลองนี้ได้ทำการวัดในสภาวะแวดล้อมจากภายในอาคารไปยังภายนอกอาคาร โดยทำการวางตำแหน่งของสายอากาศจะกำหนดให้สายอากาศส่งอยู่ภายในอาคาร และสายอากาศรับอยู่ภายนอกอาคาร โดยระหว่างสายอากาศส่งและรับจะมีกำแพงกั้นไว้ สายอากาศด้านรับและด้านส่งสูง 2.65 เมตร และสายอากาศทั้งสองเป็นสายอากาศแบบกรวยคู่ ซึ่งเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะสามารถแสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดขึ้นในลักษณะต่าง ๆ

5.3.4.1 รูปคลื่นจากเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้

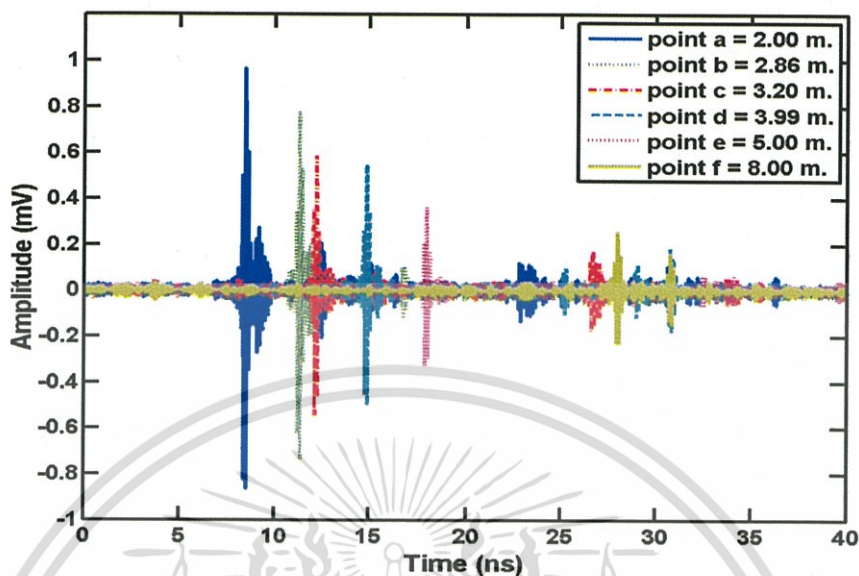
เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ดังรูปที่ 5.36 ซึ่งจะแสดงผลของแอมพลิจูดของสัญญาณในตำแหน่งการวัด คือ ตำแหน่ง a ระยะทาง 2 เมตร, ตำแหน่ง b ระยะทาง 2.86 เมตร, ตำแหน่ง c ระยะทาง 3.20 เมตร, ตำแหน่ง d ระยะทาง 3.99 เมตร, ตำแหน่ง e ระยะทาง 5 เมตร และตำแหน่ง f ระยะทาง 8 เมตร จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง a ระยะทาง 2 เมตร มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 1.255 mV ซึ่งมีแอมพลิจูดสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ



รูปที่ 5.36 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาที่พูดของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้

ได้พิจารณาใช้เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้เพื่อที่จะหาสัญญาณที่รับได้มีค่าดีที่สุด โดยรูปที่ 5.37 แสดงผลของแอมพลิจูดของสัญญาณเมื่อผ่านเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่ง ในตำแหน่งการวัด คือ ตำแหน่ง a ระยะทาง 2 เมตร, ตำแหน่ง b ระยะทาง 2.86 เมตร, ตำแหน่ง c ระยะทาง 3.20 เมตร, ตำแหน่ง d ระยะทาง 3.99 เมตร, ตำแหน่ง e ระยะทาง 5 เมตร และ

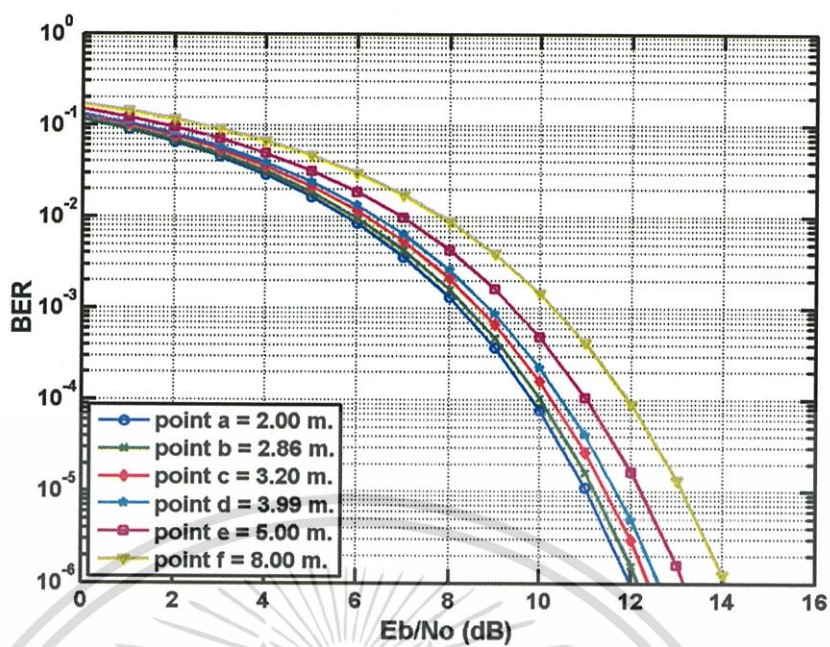
ตำแหน่ง f ระยะทาง 8 เมตร โดย จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง a ระยะทาง 2 เมตร มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 0.966 mV ซึ่งมีแอมพลิจูดสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามระยะทาง



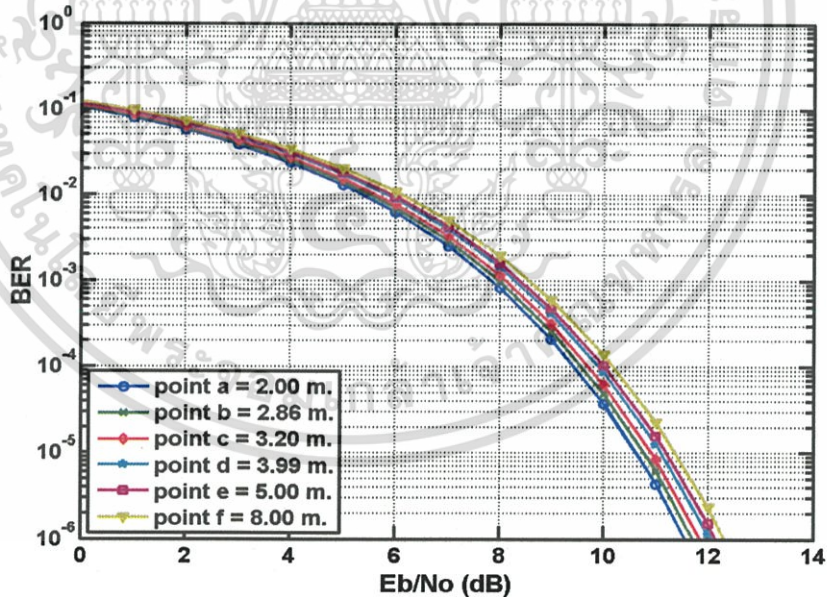
รูปที่ 5.37 รูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุทของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่ง

5.3.4.2 อัตราผิดพลาดบิต

ในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงผลการตรวจสอบค่าอัตราความผิดพลาดบิต โดยการนำเอาเครื่องรับสหสัมพันธ์มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณด้านรับ โดยในการวิเคราะห์หาผลของอัตราผิดพลาดบิตในแบบจำลองนี้เพื่อที่จะดูประสิทธิภาพของระบบระหว่างเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่งกับในกรณีใช้เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ โดยในแบบจำลองนี้จะแสดงผลของตำแหน่ง a ระยะทาง 2 เมตร, ตำแหน่ง b ระยะทาง 2.86 เมตร, ตำแหน่ง c ระยะทาง 3.20 เมตร, ตำแหน่ง d ระยะทาง 3.99 เมตร, ตำแหน่ง e ระยะทาง 5 เมตร และ ตำแหน่ง f ระยะทาง 8 เมตร โดยผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่งเป็นสัญญาณแม่แบบแสดงดังรูปที่ 5.38 ส่วนผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีใช้เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ แสดงดังรูปที่ 5.39 จะสังเกตเห็นได้ว่าผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ จะมีอัตราผิดพลาดบิตต่ำกว่าผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่งและจะเห็นได้ว่าผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับทั้งสองสัญญาณแม่แบบ ในระยะทางที่ใกล้จะมีอัตราผิดพลาดบิตที่ต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.38 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่ง

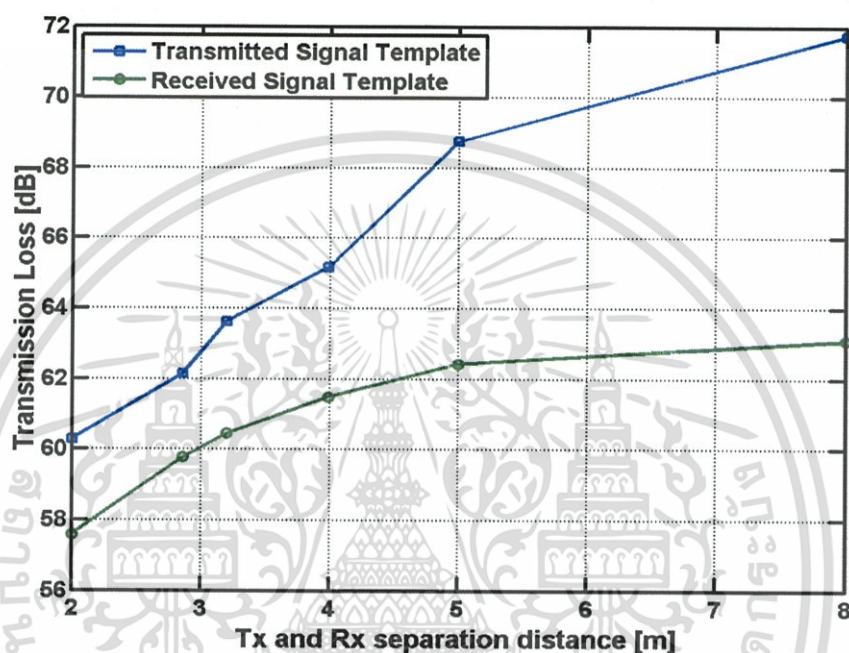


รูปที่ 5.39 อัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4.3 การสูญเสียในการส่งผ่าน กรณีรูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคาร สู่ภายนอกอาคาร

รูปที่ 5.40 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียในการส่งผ่านหลังจากผ่านเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่ง กับการสูญเสียในการส่งผ่านหลังจากผ่านเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ จะเห็นได้ว่าการสูญเสียในการส่งผ่านของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ จะมีค่าการสูญเสียในการส่งผ่านน้อยกว่าเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่ง



รูปที่ 5.40 การสูญเสียในการส่งผ่านเมื่อใช้เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่งเปรียบเทียบกับเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้

5.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้แสดงผลการวัดและการวิเคราะห์ผลของสัญญาณ โดยการวัดสัญญาณนั้นได้ทำภายในห้องไร้การสะท้อนและภายในอาคารสำนักงาน ซึ่งได้ใช้แบบจำลองในการวัดตามที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 ซึ่งได้ใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ ทำการวัดและบันทึกผลฟังก์ชันการถ่ายโอนและนำผลที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์ บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส (โดยการประยุกต์สูตรของฟรีสสำหรับแถบกว้างยิ่ง) และทางด้านรับได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สองแบบมาเปรียบเทียบกันระหว่างเครื่องรับแบบสัญญาณที่รับได้ และเครื่องรับแบบไอโซทรอปิก ส่วนผลการทดลองวิจัยและผลการวิเคราะห์ของการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ, หน้าตัดข้างการประวิงกำลัง, ความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม ซึ่งผลทั้งหมดนี้ทำให้ทราบว่า มีหลายๆ ส่วนที่มีผลกระทบต่อระบบการแพร่กระจายคลื่น ตัวอย่างเช่น ตำแหน่งในการรับส่งสัญญาณ ลักษณะการติดตั้งสายอากาศ ระยะทางในการรับส่งสัญญาณ โครงสร้างของแบบจำลองทางด้านรับแบบแกลวลาคับ ขนาด 9 แฉก 9 หลัก และที่สำคัญคือสภาพแวดล้อมที่ทำการรับส่งสัญญาณ ได้พิจารณาแบบจำลองหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น รูปแบบการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร และรูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร เป็นต้น จากผลการวิเคราะห์นี้ ได้ศึกษาหาคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารสำหรับช่องสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น ซึ่งมีข้อดีในการนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งให้มีขีดความสามารถที่สูงขึ้น

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแบบแผนการทดลองวิจัยของคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง ในสถานะแวดล้อมจริงภายในอาคาร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ในการวัด และบันทึกผล ของฟังก์ชันการถ่ายโอนในอวกาศว่างของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งในการศึกษาทดลองวิจัยได้พิจารณารูปแบบวัดอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น รูปแบบการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะไกล และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะไกลในห้องไร้การสะท้อน รูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร และรูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร จากนั้นนำผลที่ได้จากการวัดไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่สำคัญ บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส และทางด้านรับได้ใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ ผลการทดลองวิจัยและการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ผ่านมา สำหรับในบทนี้ ได้ทำการสรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

6.2 สรุปผลการวิเคราะห์

6.2.1 สรุปผลรูปแบบการวัดของคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในห้องไร้การสะท้อน

อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณจากผลของการทดลองนี้ จะเป็นไปตามมุมที่สามารถรับสัญญาณได้ของสายอากาศ และมุมของสายอากาศในการรับสัญญาณก็มีผลในการหาค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณสายอากาศแบบกรวยคู่-สายอากาศแบบกรวยคู่ที่มุม 60 องศา กำลังงานต่ำและมีสัญญาณรบกวนมาก และได้เปลี่ยนสายอากาศเป็นสายอากาศกรวยคู่-สายอากาศแบบรายคาบสี่เหลี่ยมที่มุม 60 องศา กำลังงานต่ำและมีสัญญาณรบกวนมากกว่าสายอากาศแบบกรวยคู่-สายอากาศแบบกรวยคู่

การประวิงกลุ่มของสายอากาศแบบกรวยคู่-สายอากาศแบบกรวยคู่ โดยมุม 0 องศา เกิดการประวิงกลุ่มน้อยมาก เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนน้อยในขณะเดียวกันมุมที่ 30 องศา ของสายอากาศทางด้านรับ ที่ทำการหมุนสายอากาศสังเกตได้ว่า สังเกตได้ว่าสัญญาณรบกวนเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การประวิงกลุ่มมีการแตกกระจายมากขึ้น และมุมที่ 60 มีการสวิง

ขึ้นสูงแสดงว่ามีสัญญาณรบกวนมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การประวิงกลุ่มมีการกระจายมาก ณ ที่ความถี่ 9.5 GHz ถึง 10.8 GHz และได้เปลี่ยนสายอากาศเป็นสายอากาศกรวยคู่-สายอากาศแบบรายคาบล็อก ณ ที่ความถี่ 9.1 GHz ถึง 11 GHz มีการสวิงขึ้นสูงแสดงว่ามีสัญญาณรบกวนมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การประวิงกลุ่มมีการกระจายมาก จะสังเกตเห็นว่า สายอากาศแบบรายคาบล็อกมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณ, มีสัญญาณรบกวนมากกว่าและมีอัตราขยายที่สูงกว่าสายอากาศกรวยคู่

อัตราขยายสัมพัทธ์จากผลของการทดลองนี้ โดยผลจากการวิเคราะห์นั้นจะนำเสนอในสองกรณี คือ กรณีเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้และเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบไอโซทรอปิกจะสังเกตเห็นว่าสายอากาศส่งแบบกรวยคู่-สายอากาศรับแบบกรวยคู่เครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ และเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบไอโซทรอปิกแตกต่างกันน้อยมาก ส่วนในกรณีสายอากาศส่งแบบกรวยคู่-สายอากาศรับแบบรายคาบล็อกมีบางช่วงที่ใกล้กันและบางช่วงที่ไกลกัน จะสังเกตเห็นว่าสายอากาศรับแบบรายคาบล็อกมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากกว่าสายอากาศแบบกรวยคู่

6.2.2 สรุปผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะใกล้ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลในห้องปฏิบัติการสะท้อน

ฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองนี้ โดยทำการวัดขนาดและเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านในแต่ละระยะทางของสายอากาศทางด้านรับ โดยยกตัวอย่างที่ระยะทางที่ 0.5 เมตร และระยะทางที่ 2 เมตร จะสังเกตได้ว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าที่ได้จากการทำนายเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมาก เพราะเกิดความผิดเพี้ยนของสายอากาศ โดยลักษณะของเฟสจะเรียบ และในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าที่ได้จากการทำนายจะไม่มี ความแตกต่างกัน เนื่องจากกำลังงานในการส่งค่า โดยลักษณะของเฟสจะเรียบ จะสังเกตเห็นว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้จะมีขนาดที่สูงกว่า และมีความผิดเพี้ยนมากกว่าในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล

อัตราการสูญเสียเชิงวิถี แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้จะเกิดการสูญเสียเชิงวิถีมากและมีกำลังงานในการส่งค่า

รูปคลื่นสัญญาณที่รับได้ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าที่ได้จากการทำนายจะสังเกตว่าในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ กำลังงานในการส่งค่าและเฟสมีความผิดเพี้ยนต่างกันแต่ก็ไม่มาก เพราะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมาก ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล กำลังงานในการส่งค่าและเฟสจะไม่มี ความแตกต่างกัน เพราะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อย จะสังเกตเห็นว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้มีค่าแอมพลิจูดสูงกว่าในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ระยะ 2 เมตร ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงอยู่ที่ 99.94% เพราะไม่เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

6.2.3 สรุปผลรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร

ในการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ในรูปแบบการวัดช่องสัญญาณภายในอาคารของห้องเรียนทั้ง 2 แบบ ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดในส่วนต่างๆ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อแสดงถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง รวมไปถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสายอากาศในการรับสัญญาณของสายอากาศและสภาพแวดล้อมภายในห้องที่ทำการวัด ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดในลักษณะของห้องทั้ง 2 แบบสามารถสรุปได้ว่า

ในงานทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลอง โดยได้ทำการวัดขนาดและเฟสของการส่งผ่านในแต่ละทิศทางการส่งผ่านของสายอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแบบจำลองทั้ง Room1 และ Room 2 จากตำแหน่งที่ 1 ถึง 81 ได้เลือกตำแหน่งที่ 58 สำหรับ Room1 และตำแหน่งที่ 78 สำหรับ Room2 เนื่องจากเป็นจุดที่รับสัญญาณได้ดีที่สุด จะสังเกตเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณมีค่าขนาดเฉลี่ยเท่ากับ -55.59 dB ใน Room 1 ส่วนใน Room 2 จะมีค่าขนาดเฉลี่ยของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองเท่ากับ -56.86 dB จะเห็นได้ว่าใน Room 2 มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากกว่าใน Room 1 ส่วนเฟสของฟังก์ชันการส่งผ่านที่ตำแหน่งที่ 1 ถึง 81 ได้เลือกตำแหน่งที่ 58 สำหรับ Room1 และตำแหน่งที่ 78 สำหรับ Room2 จะเป็นเส้นตรงทุกช่วงความถี่จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงความถี่ตั้งแต่ 9.1 GHz ถึง 11 GHz ใน Room 1 และในช่วงความถี่ตั้งแต่ 8.5 GHz ถึง 11 GHz ใน Room 2 จะสังเกตเห็นว่าใน Room 1 มีค่าที่ดีกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการส่งผ่านในแต่ละตำแหน่งของช่วงความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ในระบบคลื่นสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมของทั้ง 2 แบบจำลอง

หน้าตัดข้างการประวิงกำลังจะแปรไปตามระยะห่างของสายอากาศ อีกทั้งลักษณะของสภาพแวดล้อมภายในอาคารก็ส่งผลด้วยคือ ถ้าภายในห้องมีพื้นที่มากและมีสิ่งกีดขวางก็จะเอื้อให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณ ก็จะทำให้เกิดสัญญาณที่มาจากหลายทิศทางส่งผลให้เวลาประวิงเพิ่มขึ้น ไปด้วย ค่าเวลาประวิงของ Room1 มีค่าประวิงน้อยสุด 17.3 ns และ Room 2 มีเวลาประวิงน้อยสุด 17 ns จะสังเกตเห็นว่า Room 2 มีเวลาประวิงน้อยกว่า Room 1 สรุปได้ว่าเวลาประวิงของสัญญาณจะสูงขึ้น ในกรณีตำแหน่งของสายอากาศด้านรับปรับไปในทิศทางที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรง

แบบจำลองเชิงสถิติฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม สำหรับสภาวะแวดล้อมภายในอาคารใน Room1 จะมีค่าเฉลี่ย 17.94 ns และมี ระยะห่างของการเกิดเวลาประวิง 1.39 ns ส่วนใน Room2 จะมีค่าเฉลี่ย 17.88 ns และมีระยะห่างของการเกิดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวิง 1.54 ns จะเห็นว่าใน Room 1 จะมีค่าเฉลี่ยมากกว่า แต่จะมีระยะห่างของการเกิดเวลาประวิงน้อยกว่าใน Room 2

การสูญเสียเชิงวิถีนั้นจะมีค่าการสูญเสียกำลังงานน้อยที่สุดใน Room 1 จะอยู่ที่ตำแหน่ง 58 จะมีค่าอัตราสูญเสียเชิงวิถึที่ 63.4674 dB ในช่วงตำแหน่งที่สายอากาศทางด้านรับสามารถรับสัญญาณได้และจะมีการสูญเสียเพิ่มมากขึ้นตามสภาวะแวดล้อมที่สัญญาณไม่สามารถรับได้ และค่าการสูญเสียกำลังงานน้อยที่สุดใน Room 2 จะอยู่ที่ตำแหน่ง 78 จะมีค่าอัตราสูญเสียเชิงวิถึที่ 64.5914 dB จะสังเกตเห็นว่าใน Room 1 นั้นมีค่าการสูญเสียเชิงวิถึน้อยกว่า Room 2

อัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณจากผลของการทดลองนี้ จะเป็นไปตามตำแหน่งที่สามารถรับสัญญาณได้ของสายอากาศ และตำแหน่งของสายอากาศในการรับสัญญาณก็มีผลในการหาค่าอัตราการขยายของการส่งผ่านสัญญาณ ใน Room 1 อัตราขยายมากที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง 58 จะมีค่าอัตราขยายเชิงวิถึที่ -63.4674 dB และใน Room 2 อัตราขยายมากที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง 78 จะมีค่าอัตราขยายเชิงวิถึที่ -64.5914 dB

สรุปโดยรวมแล้วผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้ จะเกิดจากหลายๆส่วนประกอบกันซึ่งได้แก่คุณสมบัติของสายอากาศและลักษณะในการติดตั้งสายอากาศในการรับสัญญาณตำแหน่งต่างๆ ทางด้านรับสัญญาณแบบแถวลำดับขนาด 9 แถว 9 หลักด้วย ระยะทางระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับและลักษณะสภาพแวดล้อมภายในห้องเรียนที่ทำการทดลองวัดช่องสัญญาณ ที่กล่าวมานี้เป็นส่วนสำคัญที่มีผลทำให้เกิดผลกระทบต่อช่องสัญญาณในย่านแถบกว้างยิ่ง

รูปคลื่นจากเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ใน Room 1 มีค่าแอมพลิจูด 1.079 mV และใน Room 2 มีค่าแอมพลิจูด 1.082 mV จะสังเกตได้ว่าใน Room 2 จะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงกว่าใน Room 1

6.2.4 สรุปผลรูปแบบการวัดช่องสัญญาณจากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร

รูปคลื่นจากเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้จะได้อัตราแอมพลิจูดที่สูงกว่าเมื่อผ่านเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่ง โดยที่ระยะ 2 เมตรจะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงที่สุด และจะมีค่าแอมพลิจูดลดลงไปตามระยะห่างของสายอากาศที่เพิ่มมากขึ้น

อัตราผิดพลาดบิต จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่ามากขึ้น กล่าวคือเมื่อระยะทางมากขึ้นทำให้เกิดบิตข้อมูลที่ผิดพลาดมากขึ้น จะเห็นได้ว่าผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้จะมีอัตราผิดพลาดบิตต่ำกว่าผลของอัตราผิดพลาดบิตของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่ง

การสูญเสียในการส่งผ่าน หลังจากผ่านเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่งกับการสูญเสียในการส่งผ่านหลังจากผ่านเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้ จะเห็นได้ว่าการสูญเสีย

ในการส่งผ่านของเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณที่รับได้จะมีค่าการสูญเสียในการส่งผ่านน้อยกว่าเครื่องรับสหสัมพันธ์แบบสัญญาณส่ง

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

การศึกษาวิจัยคุณลักษณะการสูญเสียเชิงวิถีแบบแถบกว้างยิ่ง ในสถานะแวดล้อมจริงภายในอาคารสำนักงานและห้องไร่การสะท้อน ซึ่งได้พิจารณาแบบจำลองไว้เป็นตัวอย่างมีทั้งหมด 4 แบบจำลองด้วยกัน ในหลักการวิเคราะห์ช่องสัญญาณการส่งผ่านได้พิจารณาใช้สูตรการส่งผ่านของฟรีส โดยการประยุกต์ใช้สูตรของฟรีสสำหรับแถบกว้างยิ่ง ส่วนทางด้านเครื่องรับพิจารณาใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ ได้วิเคราะห์บนพื้นฐานข้อมูลจากการวัดจริง และผลจากการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับแนวทางในการพัฒนางานวิจัยแบบแถบกว้างยิ่งมีดังนี้

- การประเมินช่องสัญญาณของเครือข่ายบนร่างกายมนุษย์แบบไร้สาย (Wireless body area networks: WBAN)
- ประสิทธิภาพในการหาตำแหน่งด้วยวิทยุอิมพัลส์แถบกว้างยิ่ง เช่น หุ่นยนต์, ค้นหาวัตถุ
- การประเมินของประสิทธิภาพสายอากาศแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับเครือข่ายบริเวณส่วนบุคคล
- การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอัตราขยายในการส่งผ่านสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับทางการแพทย์ เช่น อุลตราซาว, ระบบหัวใจ
- การประเมินประสิทธิภาพของการสูญเสียในการส่งผ่านการขนถ่ายสินค้าระยะสั้น
- การประยุกต์เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งระบบการส่งข้อมูลความเร็วสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Cravotta, "Ultrawideband: the next wireless panacea?." Electronic Design News, October 2002, www.end.com.
- [2] Kazimierz S, and Debra M, **Ultra-Wideband Radio Technology**, England : John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [3] K. Siwiak, "**Ultra-Wide Radio : Introducing a New Technology**," *2001 Spring IEEE Veh. Tech.Conf. (VTC)*, Plenary session, pp. 1088-1093, May 2001.
- [4] H.T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," *Proc. IRE*, vol. 34, no. 5, pp.254-256, May 1946.
- [5] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' Transmission Formula for Ultra-Wideband Systems," *IEICE Tech. Rep.*, WBS2003- 8/MW2003-20, May 2003.
- [6] S. Promwong and W. Hachitani, and J. Takada, "**Free Space Link Budget Evaluation of UWBIR Systems**," 2004 International Workshop on Ultra Wideband Systems Joint with Conference on Ultra Wideband Systems and Technology (UWBST&IWUWBS), pp. 312-316, May 2004.
- [7] James D. Taylor, **Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems**, USA : CRC Press. 1995.
- [8] FCC, "**Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems**," FCC 02-48, Apr. 2002.
- [9] M.Ghavami, L.B.Michael and R.Kohno, **Ultra wideband signals and systems in communication engineering**, England : John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [10] J. Foerster et al., "UWB Channel Modeling Contribution from Intel," **IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks, P802.15-02/490r1-SG3a**, Feb. 1993
- [11] Q. H. Spencer, B. D. Jeffs, M. A. Jense, A. L. Swindlehurst, "Modeling the Statistical Time and Angle of Arrival Characteristics of an Indoor Multipath Channel," **IEEE JSAC**, Vol. 18, No. 3, March 2000
- [12] Ian O., Matti H. and Jari I, **UWB Theory and Applications**, England : John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [13] Theodore S. Rappaport, "**Wireless Communications Principles And Practice**," United States of America : Prentice-Hall PTR, inc. 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] T. Rappaport, **“Wireless Communications,”** Upper saddle River: Prentice- Hall, seconded, 2002.
- [15] Apichit Pradabphon, Monchai Chamchoy, Pichaya Supanakoon, Sathaporn Promwong and Jun-ichi Takada. **“The Impacts of Body Shadowing on UWB Propagation in an Indoor Environment,”** Electrical Engineering Conference. 27th, vol.2, Sep. 2004. pp. 461-464.
- [16] Phattharamon Juengkittikul and Sathaporn Promwong, **“The Link Budget Evaluation of Ultra Wideband Impulse Radio Transmission Systems,”** 9th International Symposium on Communication and Information Technology 2009 (ISCIT2009), vol. 1, pp. 474-478, Sep. 2009.
- [17] Phattharamon Juengkittikul and Sathaporn Promwong, **“Evaluation of the Complex Form in Fresnel Region for UWB Free Space Transmission Model,”** 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference On Communication (MICC2009), vol. 1, pp. Tu 12-6, Dec. 2009.
- [18] Phattharamon Juengkittigul, Payungsak Panthap, Sathaporn Promwong and Nikorn Sukutamantanti, **“Evaluation of Transmission Loss with Indoor to Outdoor Environment in UWB Impulse Radio,”** 2008 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2008), vol. 1, pp. 208-211, Dec.2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

งานประชุมในระดับนานาชาติ

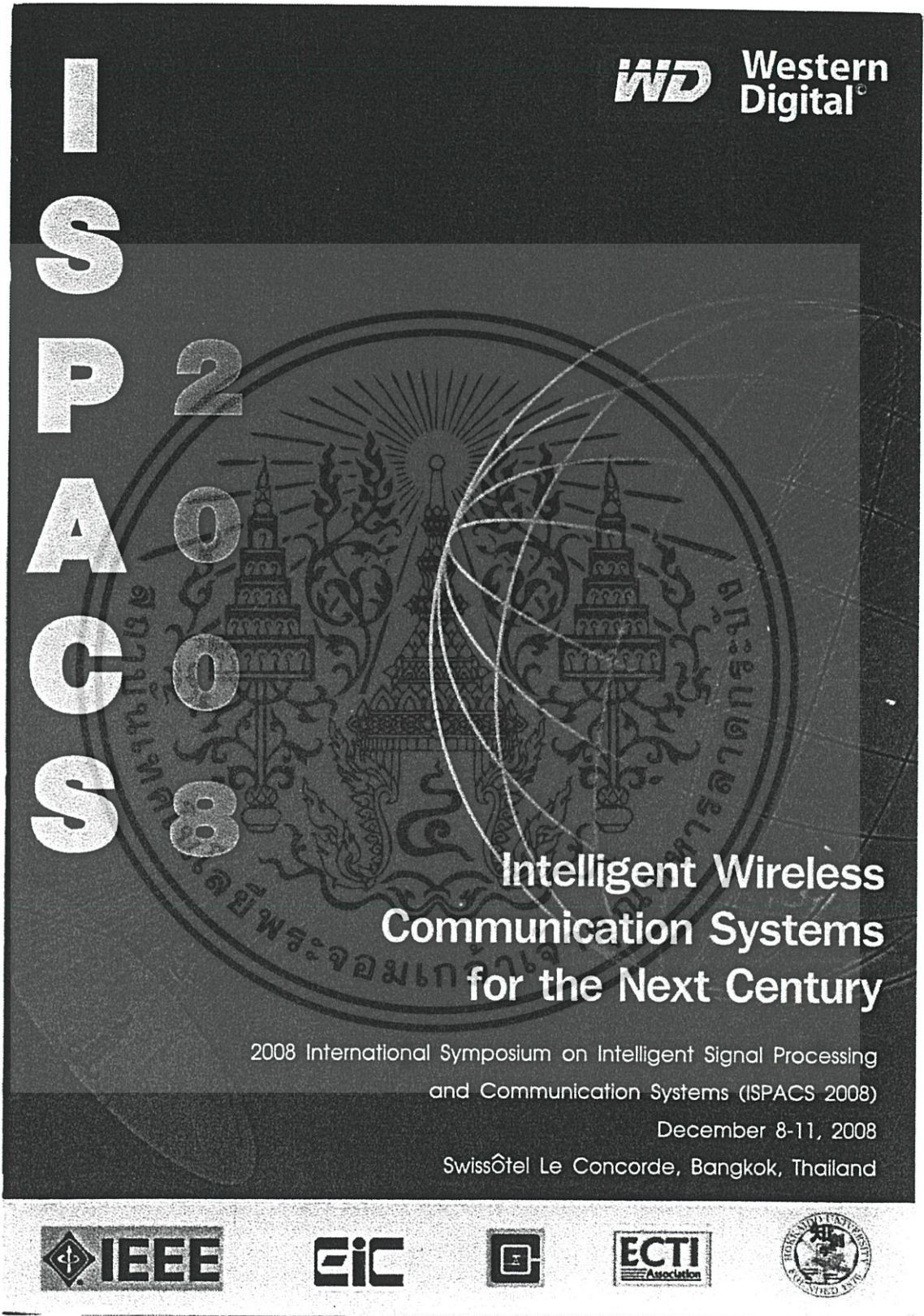
1. **Phattharamon Juengkittigul**, Payungsak Panthap, Sathaporn Promwong and Nikorn Sukutamantanti, "Evaluation of Transmission Loss with Indoor to Outdoor Environment in UWB Impulse Radio," 2008 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2008), vol. 1, pp. 208-211, Dec. 2008.

งานประชุมในระดับนานาชาติ

2. **Phattharamon Juengkittikul** and Sathaporn Promwong, "The Link Budget Evaluation of Ultra Wideband Impulse Radio Transmission Systems," 9th International Symposium on Communication and Information Technology 2009 (ISCIT2009), vol. 1, pp. 474-478, Sep. 2009.

งานประชุมในระดับนานาชาติ

3. **Phattharamon Juengkittikul** and Sathaporn Promwong, "Evaluation of the Complex Form in Fresnel Region for UWB Free Space Transmission Model," 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference On Communication (MICC2009), vol. 1, pp. Tu12-6, Dec. 2009.



ISPACS 2008

Western Digital

Intelligent Wireless Communication Systems for the Next Century

2008 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2008)
December 8-11, 2008
Swissôtel Le Concorde, Bangkok, Thailand

IEEE **EIC** **ECTI Association**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Evaluation of Transmission Loss with Indoor to Outdoor Environment in UWB Impulse Radio

Phattharamon Juengkittigul, Payungsak Panthap, Sathaporn Promwong and Nikorn Sukutamantanti

Department of Information Engineering/Electronics Research Center, Faculty of engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
E-mail: {s1061026, s9061011, kpsathap, ksnikorn}@kmitl.ac.th

Abstract—The wireless propagation channel in an indoor and outdoor is very complicated and difficult to predict. In this paper, we consider the experiment of transmission loss with indoor to outdoor environment in ultra wideband impulse radio (UWB-IR) system based on Friis transmission formula. This formula is not directly applicable and the waveform distortion may degrade the transmission performance as well. The transmission waveform and the matched filter reception are proposed in the extension of the Friis transmission formula to UWB-IR system. The matched filter is used to maximize the signal-to-noise ratio (SNR). The matched filter and the transmitted signal template are considered. The technique gives very accurate result and very useful for design UWB-IR transmission signal waveform.

I. INTRODUCTION

Ultra wideband impulse radio (UWB-IR) technology have attracted a great deal of attention because of UWB-IR systems are wide bandwidth, low cost, high data rates, precise positioning capability, extremely low interference and low power consumption potentials [2]-[6]. The UWB-IR systems transmit pulses with power spectral density (PSD) in the range of the ultra wide frequency. The UWB-IR have been allowed to operate across a range 3.1~10.6 GHz of frequency bands defined by Federal Communications Commission (FCC) [7] with negligible interference to existing systems in that band.

The measurements of the indoor to outdoor propagations are very important. Their data are useful to predict the maximum allowable data rates in order to the intersymbol interference and used to improve the propagation performance. Although, the experimental study of indoor and outdoor propagations for UWB-IR systems are already reported [1], there is no consideration about the improvement of transmission performance.

In this paper, the characterization of transmission loss with indoor and outdoor in UWB-IR system is improvement by using the matched filter and transmitted signal template at the receiver side. The measurement is performed between the corridor (indoor) to parking area (outdoor) environments [1]. The matched filter is used to maximized the SNR. The matched filter and the transmitted signal template are considered. The transmission loss obtained from the matched filter and transmitted signal template are compared with that of received signal. The results and conclusion are discussed in the paper.

II. MEASUREMENT DESCRIPTION

A. Measurement scheme

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

B. Measurement setup

The VNA was operated in the response measurement mode from 3 to 11 GHz, where port-1 was used as the Tx port and port-2 was used as the Rx port, respectively. Both Tx and Rx antennas were fixed at the height of 2.65 m. We have chosen the biconical antenna [8] for Tx and Rx antennas. The geometric and the dimension of the biconical antenna are shown in Fig. 1 and the magnitude and phase of the transfer function of each antenna are shown in Fig. 2.

In this experiment, the transfer function of indoor to outdoor environments is measured. For the Tx antenna is in an indoor environment, while the Rx antenna is in the outdoor environment and it is varied its positions as shown in Fig. 3.

C. Parameters of experiments

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

III. UWB SIGNAL PROCESSING

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

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

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

where $f_{\min} = 3.1$ GHz is the minimum frequency, $f_{\max} = 10.6$ GHz is the maximum frequency, f_b is spectral bandwidth,

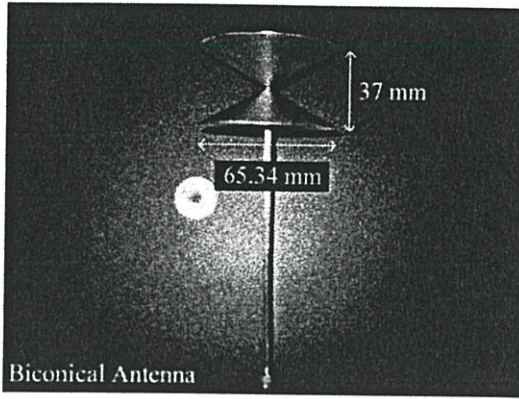


Fig. 1. Geometric and dimension of biconical antenna.

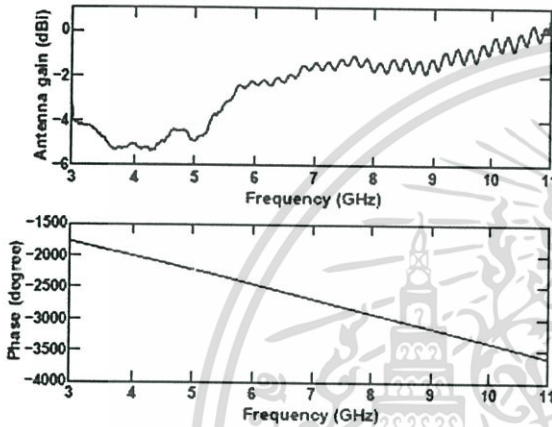


Fig. 2. Magnitude and phase of antenna transfer function.

f_c is the center frequency and $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$. This signal waveform is shown in Fig. 4 and Fig. 5 shows the magnitude of its spectral density function.

The spectral density of the received waveform $V_r(f)$ is the multiplication between the spectral density of the transmitted waveform and the channel frequency transfer function $H_c(f)$ [1], which obtained from the measurement. Therefore, the spectral density of the received waveform can be written as

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

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

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

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

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

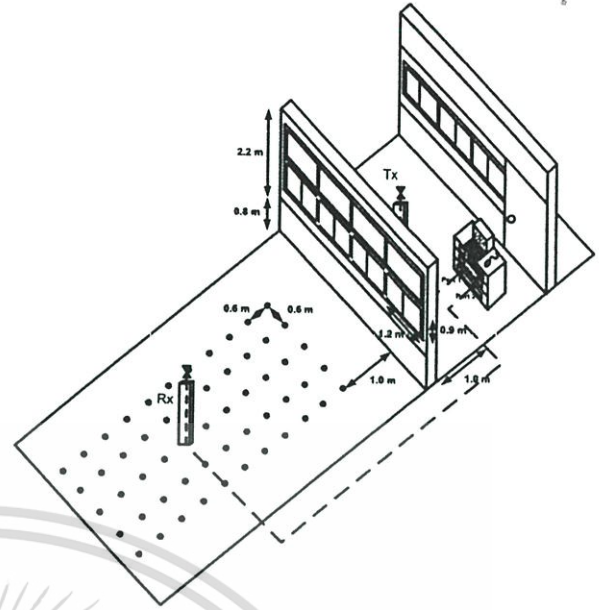


Fig. 3. The measurement system model.

TABLE I
THE PARAMETERS OF EXPERIMENT

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

where $V_{tp}(f)$ is the spectral density of template signal.

From above equation, we used two template signals to compare the improvement of the transmission loss. The first case, we used the received waveform as a template signal. This case is the optimum matched filter. Another one, we used the transmitted waveform as a template signal. This case is the transmitted signal template.

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

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

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

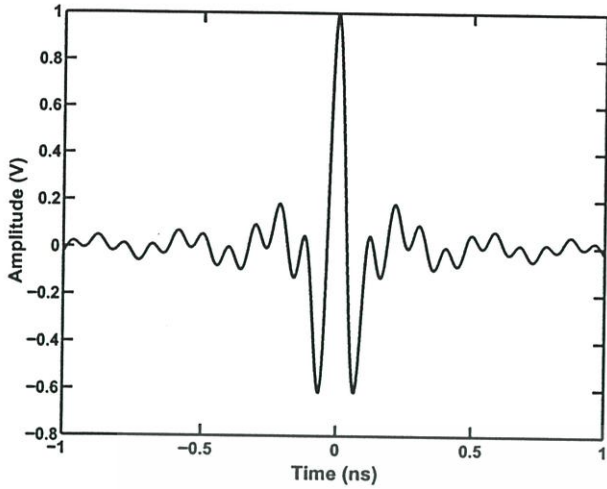


Fig. 4. Transmitted signal waveform.

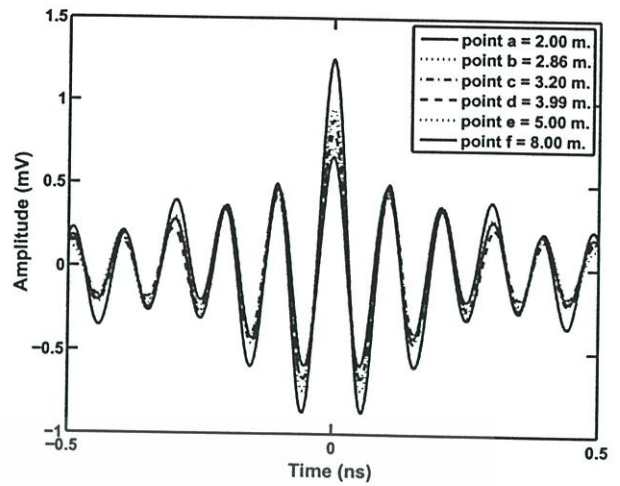


Fig. 6. Amplitudes of the received signal waveform at the output of the matched filter.

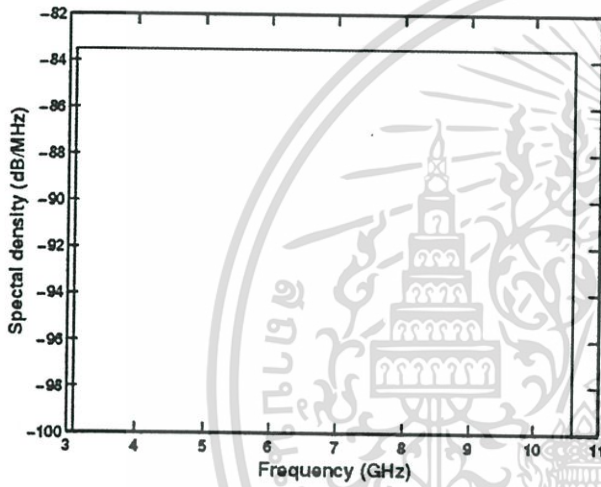


Fig. 5. The transmitted spectral density of UWB.

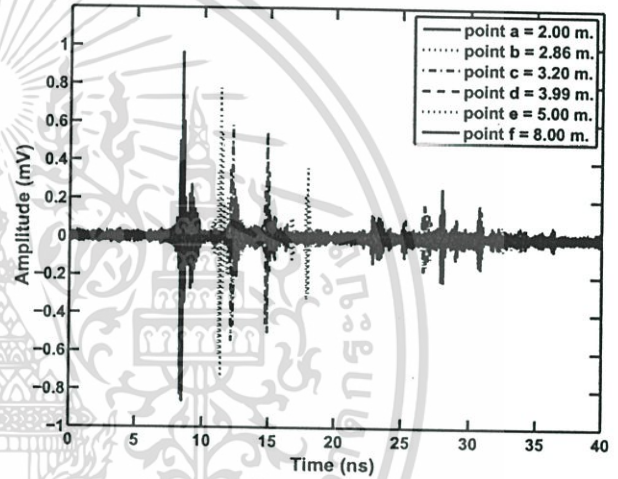


Fig. 7. Amplitudes of the received signal waveform at the output of the transmitted signal template.

that is

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

is rate of transfer (*bps*) and C_c is correlation coefficient

The transmission loss is defined as the ratio between the maximum absolute amplitude of the signal at the output of the matched filter and that of the transmitted waveform, which can be written as

$$TL = -20 \log \frac{\max|v_{MF}(t)|}{\max|v_t(t)|}. \quad (8)$$

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

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

E_b is the energy in one bit and N_o is the noise power spectral density, so $\frac{E_b}{N_o}$ is a form of signal to noise ratio. b_r

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

IV. RESULTS

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

Fig. 6, shows the amplitudes of the received signal waveform at the output of the matched filter. The amplitudes of the received signal waveform at the output of the transmitted signal template are shown in Fig. 7. The amplitudes of the signal waveforms at the output of the matched filter when

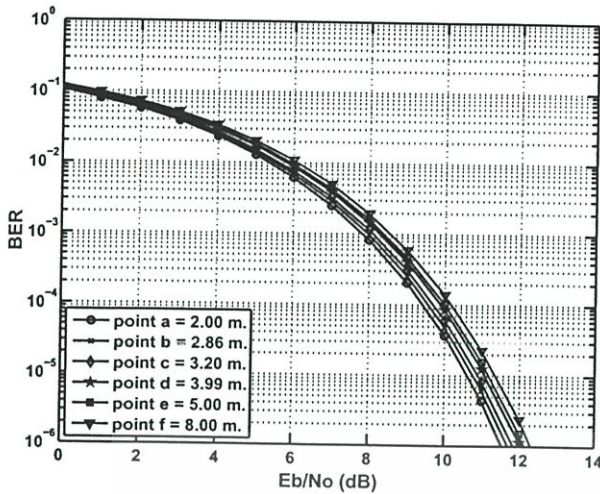


Fig. 8. BER performance at the output of the matched filter.

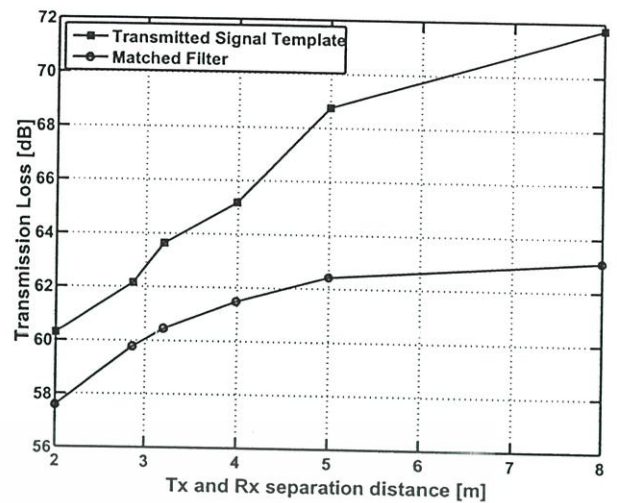


Fig. 10. Transmission loss using the matched filter are compared with the transmission loss using transmitted signal template.

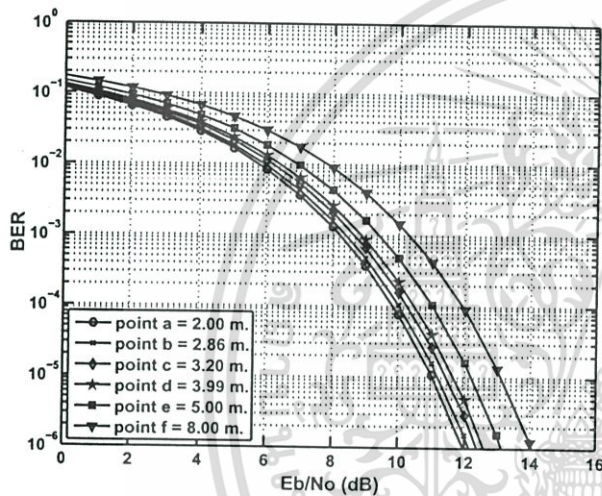


Fig. 9. BER performance at the output of the transmitted signal template.

they are compared with the transmitted signal waveform. The peak amplitudes of the matched filter is higher than that of the transmitted signal template.

In Figs. 8 and 9 are shows the BER performance of output matched filter and the transmitted signal template, respectively. we can see that the BER performance at the output of the matched filter are lower than of the transmitted signal template.

For Fig. 10, shows the transmission loss using the matched filter are compared with the transmission loss using transmitted signal template. From analytical result, we can see that the matched filter can be improved the the transmission loss in UWB systems.

V. CONCLUSION

In this paper, we discuss the characterization of transmission loss with indoor and outdoor in ultra wideband impulse radio (UWB-IR) system. The transmission loss can be improvement

by using the matched filter at the receiver side, This approach is more useful to design and evaluate the UWB-IR wireless systems.

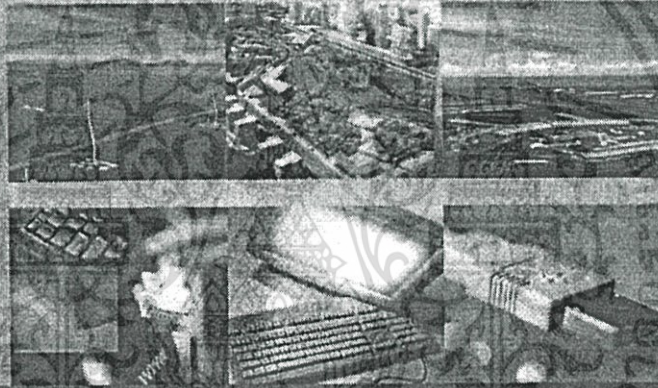
REFERENCES

- [1] P. Panthap and S. Promwong, "Performance Analysis of UWB Propagation Channel with Indoor to Outdoor Channel Model," 2007 Joint International Conference on Information Communication Technology (JICT), vol. 1, pp. 238-241, Dec. 2007.
- [2] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New Technology," 2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.
- [3] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: The emergence of an Importance RF Technology," 2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 2, pp. 1169-1172, May 2001.
- [4] K. Siwiak, "Impact of ultra wide band transmissions on a generic receiver," 2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 2, pp. 1181-1183, May 2001.
- [5] J.D. Taylor, "Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems," CRC press, London, UK, pp. 670, 1994.
- [6] OSD/DARAPA, "Ultra Wideband Radar Review Panel," Assessment of Ultra-Wideband (UWB) Technology. Arlington, VA.: DARPA, 1990.
- [7] Federal Communication Commissio, "Revision of part 15 of the commission's rules regrading UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [8] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, and P. Tangtisanon "Path Loss and Matched Filter Gain for UWB System," Proc. The 2004 international symposium on antennas and propagation (ISAP'04), pp. 97-100, Aug. 2004.



The 9th International Symposium on Communication and Information Technology 2009 (ISCIT 2009)

September 28-30, 2009
Songdo-iFEZ Convensia, Incheon, Korea



Conference Program

| Hosted by |



| Organized by |



| Co-Sponsored by |



| Supported by |



<http://www.iscit2009.org>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Link Budget Evaluation of Ultra Wideband Impulse Radio Transmission Systems

Phattharamon Juengkittikul and Sathaporn Promwong
 Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.
 E-mail: {s1061026, kpsathap}@kmitl.ac.th

Abstract—The link budget of the transmission gain is usually evaluated by using the Friis' transmission formula. However, it is not directly applicable to ultra wideband impulse radio (UWB-IR) transmission systems. This paper presents the link budget evaluation formula in the term of transmission gain for the UWB-IR systems that takes into account the transmitted waveform, its distortion due to the antennas, the channel and the correlation receiver. Since the antennas are significant pulse-shaping filters in UWB-IR, the various kinds of the antennas are experimentally examined, especially focused on the effect of the received signal and the isotropic template waveforms.

I. INTRODUCTION

The ultra wideband (UWB) technology have attracted a great deal of attention because of its potentiality for application to short-range high-speed mobile communications, ultra low-power communications, and so on. In order to minimize the interference with existent systems, the UWB is expected to be mainly used in indoor environments such as wireless personal area networks (WPAN) [1]

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

In this paper, we discuss the free space link budget evaluation scheme in the term of transmission gain for the UWB-IR systems that takes into account the transmitted waveform, its distortion due to the antennas, the channel and the correlation receiver. This scheme is based on the Friis' transmission formula, adapted to the UWB-IR, in the sense that we derive the equivalent transmission gain of the UWB-IR systems. The transmission and the receiver template waveforms are the keys for the extension of the Friis' transmission formula for the UWB-IR systems [2]. Experimental investigations are done for different types of the antennas.

II. LINK BUDGET EVALUATION SCHEME

A. Transmission System Analysis for UWB-IR

The Friis' transmission formula [3] has been widely used to evaluate the link budget for the narrowband LOS channels. The Friis' transmission gain $G_{\text{Friis}}(f)$ is defined as

$$G_{\text{Friis}}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)}, \quad (1)$$

$$= G_f(f, d)G_r(f, \Omega_r)G_t(f, \Omega_t)\eta_p(f),$$

where $P_t(f)$ and $P_r(f)$ respectively are the input power to the transmitter (Tx) antenna and the output power from the receiver (Rx) antenna, $G_t(f, \Omega_t)$ and $G_r(f, \Omega_r)$ respectively are effective gain of Tx and Rx antennas apply $H_a(f, \Omega_a)$ ($a = r$ or t) is a complex transfer function vector of the antenna relative to the isotropic antenna towards the $\Omega_a = (\theta_a, \varphi_a)$ direction, i.e.

$$H_a(f, \Omega_a) = H_a(f, \theta_a, \varphi_a) - \hat{\theta}_a H_{a\theta}(f, \theta_a, \varphi_a) + \hat{\varphi}_a H_{a\varphi}(f, \theta_a, \varphi_a), \quad (2)$$

$G_{f,d}(f)$ is the free space propagation gain and $\eta_p(f)$ is the polarization matching efficiency. The free space propagation gain can be written as

$$G_f(f, d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2, \quad (3)$$

where $\lambda = c/f$ is the wavelength, c is the velocity of light, f is the operating frequency and d is the separation between Tx and Rx antennas.

Figure 1(a) shows the block diagram of Eq. (1). In Fig. 1(a), $P_t^{\text{e.i.r.p}}(f, \Omega_t)$ is the effective isotropic radiation power from Tx antenna toward Ω_t direction and $P_r^{\text{e.i.r.p}}(f)$ is the effective isotropic received power at Rx antenna.

It is noted, however, that Eq. (1) is satisfied only at some frequency, and is not directly applicable to UWB-IR systems. The formula shall be extended to take into account the transmitted waveform, its distortion due to

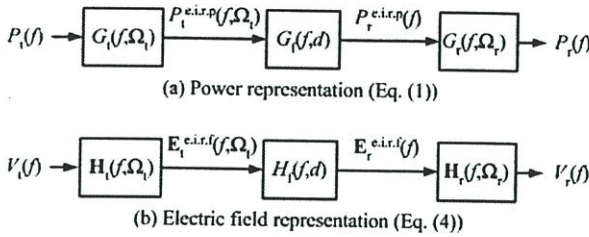


Fig. 1. Block diagram of Friis' transmission formula.

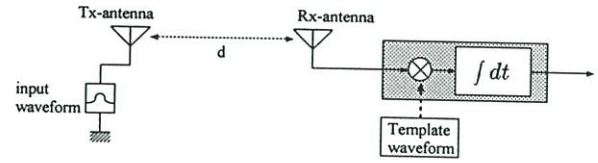


Fig. 2. Block diagram of transmission system analysis for UWB-IR signal.

expressed as

$$v_o(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_r(t)h_w(t - \tau)dt, \quad (10)$$

the antennas, the channel and the correlation receiver [2], [4].

Free space channel response including the antennas is obtained by using the extension of Friis' transmission formula as

$$H_c(f) = H_r(f, d)H_r(f, \Omega_r) \cdot H_t(f, \Omega_t), \quad (4)$$

where the free space transfer function $H_r(f, d)$ can be written as

$$H_r(f, d) = \frac{\lambda}{4\pi d} \exp(-jkd), \quad (5)$$

$k = 2\pi/\lambda$ is the propagation constant and which has the relation as

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

where η_a is the antenna efficiency, so that the value is normalized by that for isotropic antenna. Unit vectors $\hat{\theta}_a$, $\hat{\varphi}_a$ express the polarization and are defined with respect to the local polar coordinates of the antennas. The following relations can be easily derived as

$$\hat{\theta}_r = \hat{\theta}_t, \quad (7)$$

$$\hat{\varphi}_r = -\hat{\varphi}_t. \quad (8)$$

Figure 1(b) shows the block diagram of Eq. (4). In Fig. 1(b), $E_t^{e.i.r.f.}(f, \Omega_t)$ is the effective isotropic radiated field vector from Tx antenna toward Ω_t direction and $E_r^{e.i.r.f.}(f)$ is the effective isotropic received field vector of Rx antenna.

The spectral density of the receiver input $V_r(f)$ is given by

$$V_r(f) = H_c(f)V_t(f), \quad (9)$$

where $V_t(f)$ is the spectral density of the transmitted waveform.

B. Correlation Receiver

Let us consider a correlation receiver shown in Fig. 2. The output SNR is dependent on the choice of the template waveform. The correlator output $v_o(\tau)$ is therefore

where $v_r(t)$ is the receiver input waveform which is the inverse Fourier transform of Eq. (9), $h_w(t)$ is the template waveform and τ corresponds to the timing of the template waveform. The optimum timing τ_o is chosen as

$$\tau_o = \arg \max_{\tau} v_o(\tau). \quad (11)$$

Hereafter $h_w(t)$ is normalized as

$$\int_{-\infty}^{\infty} |h_w(t)|^2 dt = 2B, \quad (12)$$

where B is the signal bandwidth, so that the output noise power is a constant as $N_o B$, where $\frac{N_o}{2}$ is the power spectral density of AWGN.

Under the constraint of Eq. (12), $h_{wm}(t)$ maximizes $v_o(\tau_o)$ when $h_{wm}(t)$ is a time-reversed and scaled version of $v_r(t)$, i.e.

$$h_{wm}(t) = \frac{\sqrt{2B}v_r(\tau_o - t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |v_r(t)|^2 dt}}, \quad (13)$$

where τ_o is usually chosen so that $h_{wm}(t) = 0$ for $t < 0$ to satisfy the causality. $h_{wm}(t)$ is called the received signal template waveform hereafter. It is noted that the link budget evaluation is identical to that in [4] when $h_{wm}(t)$ is used as the receiver template.

C. Feasibility of the Optimum Correlation Receiver

It is obvious from Eq. (13) that the received signal template waveform is not the simple time-reversed version of the transmitted waveform, but including the frequency characteristics of the antennas and the free space propagation. Therefore, it is not always feasible to adapt the template waveform to the angular-dependent antenna characteristics, since the waveform shall be generated at the clock rate of tens of gigahertz. Therefore, we consider a canonical template waveform $h_{wc}(t)$. In this paper we

have chosen $h_{wc}(t)$ that is optimum for the isotropic and the constant gain antennas, i.e.

$$h_{wc}(t) = \frac{\sqrt{2B}v_{r-iso}(\tau_0 - t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |v_{r-iso}(t)|^2 dt}}, \quad (14)$$

where the receiver input voltage for the case of isotropic antennas used in both sides $v_{r-iso}(t)$ can be written as

$$v_{r-iso}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_f(f)V_t(f) \exp(j2\pi ft)dfred. \quad (15)$$

III. EXPERIMENTAL EVALUATION OF CHANNELS WITH VARIOUS UWB ANTENNAS

In this section, the LOS links with the different kinds of the UWB-IR antennas are evaluated based on the previous section.

A. Transmitted Waveform

The effect of the waveform distortion is more obvious when the bandwidth is wider. We considered the impulse radio signal that fully covers the FCC band [5], i.e., 3.1 – 10.6 GHz. The center frequency and the bandwidth were therefore set to be $f_0 = 6.85$ GHz and $f_b = 7.5$ GHz, respectively. The transmitted waveform assumed in the simulation was a single ASK pulse with the carrier frequency f_0 . To satisfy the bandwidth requirement of f_b , the pulse length was set to be $2/f_b$. Then the signal was band-limited by a Nyquist roll-off filter with roll-off factor $\alpha = 0$ (rectangular window) and passband $(f_0 - f_b/2, f_0 + f_b/2)$. Figure 3 shows this transmitted pulse waveform. The frequency spectrum is given as

$$V_t(f) = \begin{cases} \text{sinc} \left[\frac{2(f-f_0)}{f_b} \right] & ||f| - f_0| < \frac{f_b}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (16)$$

B. Experimental Setup and Measurement Model

The UWB-IR radio channel transfer function was measured as S_{21} in frequency domain by using a vector network analyzer (VNA) in an anechoic chamber. 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 1.75 m and separated by 1 m. We used a biconical antenna as the Tx antenna. We have chosen this antenna for ease of the fabrication, as well as its low distortion property. The geometry of the antenna is shown in Fig. 4. The upper cone is connected to the center conductor of a coaxial line while the lower cone is connected to the shield conductor. The maximum diameter is 65.3 mm and the length is 37 mm. We changed only the Rx antennas to compare the transmission gain properties. It is noted that the calibration of VNA is done

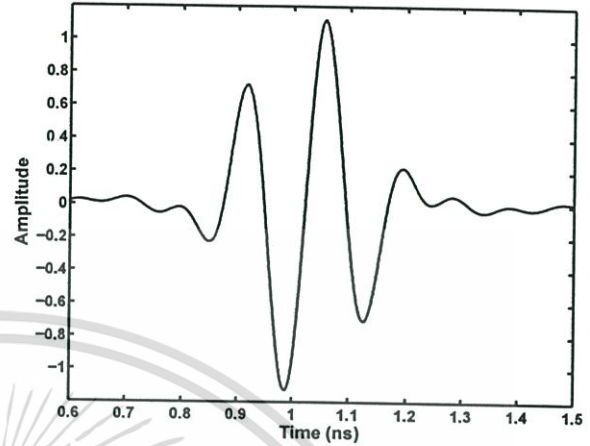


Fig. 3. Transmitted waveform of UWB-IR signal.

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.

C. Experimental Results

In this section, the two typical broadband antennas are used in the measurement for the link budget evaluation. One is the biconical antenna, which is with low dispersion. The other is the log periodic dipole antenna (LPDA), which is highly dispersive.

1) *Biconical Antenna*: First, the same biconical antennas were used both at Tx and Rx sides. The gain and group delay of antenna at 0° , 30° and 60° pointing angles are shown in Figs. 5 and 6, respectively. Figure 7 shows the normalized UWB-IR transmission gain as a function of the antenna pointing angle in the E-plane. Two template waveforms were used for comparison, and the difference was rather small. The phase center of the biconical antenna is the feed point and it has theoretically the frequency independent gain at the broadside direction, and that is why the waveform distortion effect is small compared with the isotropic template.

2) *Log-Periodic Dipole Antenna*: A log-periodic dipole antenna (LPDA) is also used at broadband. It also has a frequency-independent gain. Different from the biconical antennas, however, the dispersion characteristic of the LPDA is rather big, since the phase center changes with frequency due to the resonance of the dipole elements [6].

We used a commercial LPDA, Watkins-Johnson's AR7-15A, shown in Fig. 8. The antenna has been designed to operate in the range of 1 to 12.4 GHz. Figures 9 and 10 show the gain and group delay of antenna at 0° , 30° and 60° pointing angles, respectively.

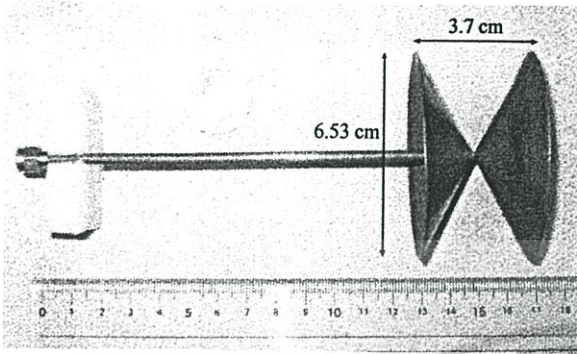


Fig. 4. Biconical antenna structure.

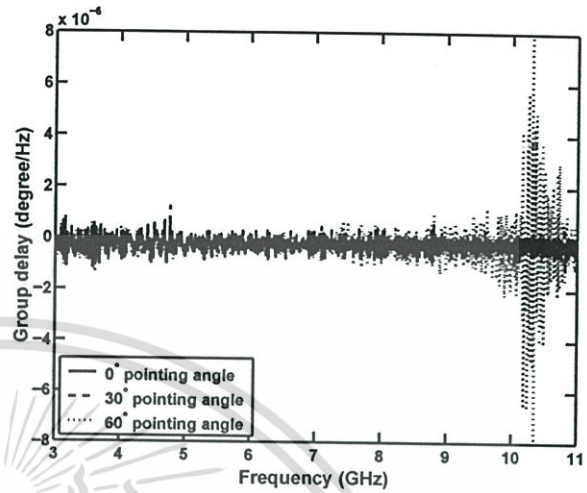


Fig. 6. Example the UWB-IR transmission gain for biconical-biconical link at 0, 30 and 60 degree.

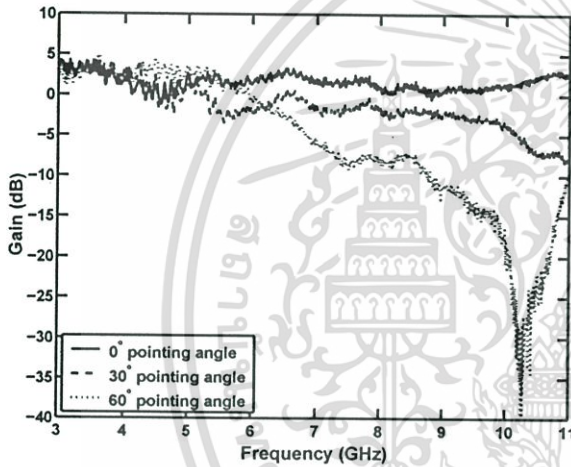


Fig. 5. Example the UWB-IR transmission gain for biconical-biconical link at 0, 30 and 60 degree.

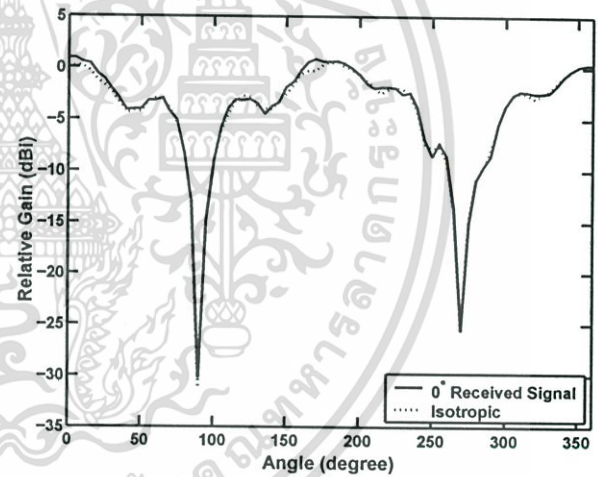


Fig. 7. UWB-IR transmission gain for biconical-biconical link from 0 to 360 degree.

Figure 11 shows the UWB-IR transmission gain pattern for biconical-LPDA link in E-plane. As is known, an LPDA is uni-directional and its gain is higher than that of a biconical antenna. The degradation of the transmission gain is observed when the canonical isotropic template is used, since the waveform dispersion is obvious [6].

IV. DISCUSSION

From these results, the UWB-IR transmission gain, using both the received signal and the isotropic template waveforms, gives us the quantitative measurement of the link budget. Since we have chosen the broadband antennas, the trend of the narrowband gain is reflected in the UWB-IR transmission gain. Another issue is the distortion of the waveform. The difference between the optimum and the isotropic templates is the measurement of the waveform distortion. It is obvious that the LPDA

is biggest distortion among the sample antennas, while its transmission gain characteristic is significantly large.

V. CONCLUSION

This paper has presented how to evaluate the link budget of UWB-IR transmission gain, which includes the transmit waveform, the antennas, the free space propagation, and the correlation receiver. By using the definition, we have evaluated two types of the broadband antennas. This scheme may be effective especially to evaluate the deployable antenna with non-ideal frequency characteristics of return loss and directivity, as the overall

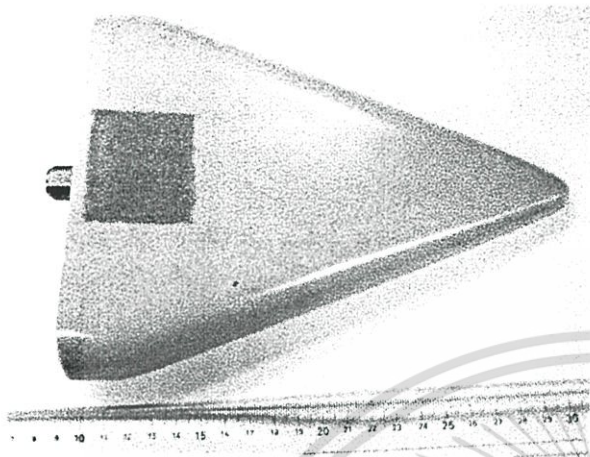


Fig. 8. Log-periodic dipole antenna (Watkins-Johnson AR7-15A).

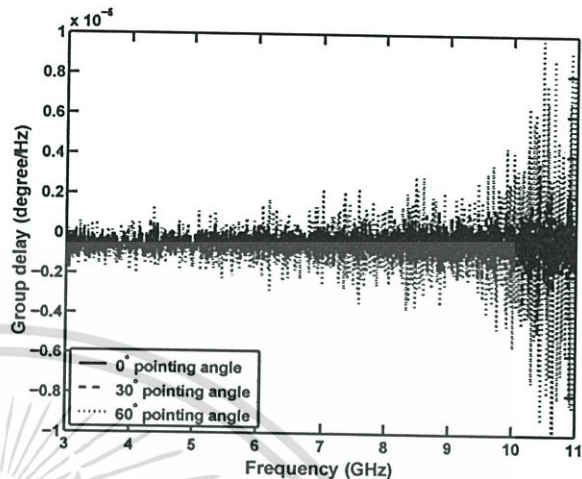


Fig. 10. Example the UWB-IR transmission gain for biconical-LPDA link at 0, 30 and 60 degree.

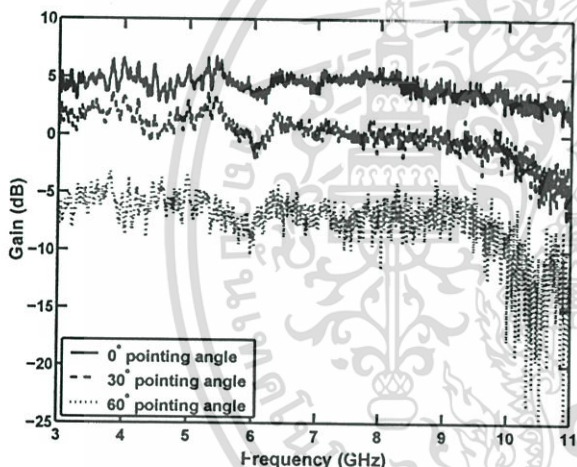


Fig. 9. Example the UWB-IR transmission gain for biconical-LPDA link at 0, 30 and 60 degree.

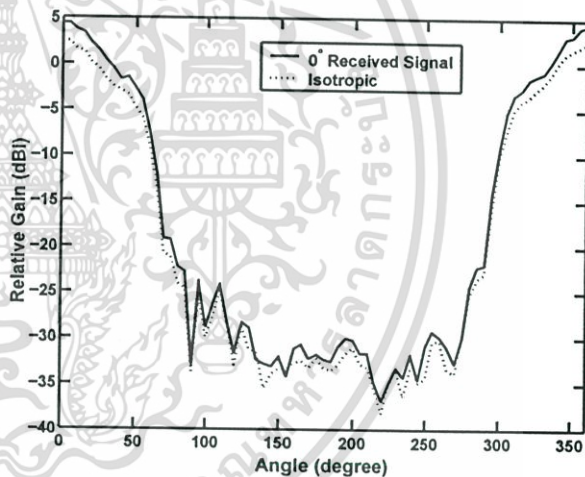



Fig. 11. UWB-IR transmission gain for biconical-LPDA link from 0 to 360 degree.

performance can be evaluated only by the term of the UWB-IR transmission gain.

Note that the formulation presented in [4] is a special case for the optimum template waveform in this paper. Therefore, the IEEE 802.15.3a path loss model presented in [7] is also a special case of the formulation presented in this paper, by considering the rectangular frequency spectrum, the frequency independent isotropic antenna and the received signal template.

REFERENCES

- [1] K. Siwiak, "Impact of ultra wide band transmissions on a generic receiver," Proc. 2001 Spring IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC), Rhodes, Greece, vol. 2, pp. 1181-1183, May 2001.
- [2] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' transmission formula for ultra-wideband systems," IEICE Tech. Rep., WBS2003-8/MW2003-20, May 2003.
- [3] H.T. Friis, "A note on a simple transmission formula," Proc. IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.
- [4] S. Promwong, and J. Takada, "Free space link budget estimation scheme for ultra wideband impulse radio with imperfect antennas," IEICE Electronics Express, vol. 1, no. 7, pp. 188-192, July 2004.
- [5] "Radio Frequency Devices," Part 15, Federal Communications Commission Rules, Dec. 2003.
- [6] H.G. Schantz, "Dispersion and UWB antennas," Proc. 2004 Int. Workshop Ultra Wideband Syst. / Conf. Ultra Wideband Syst. Tech. (Joint UWBST & IWUWBS 2004), May 2004.
- [7] J. Foerster, "Channel modeling sub-committee report final," IEEE P802.15-02/368r5-SG3a, Nov. 2002.





MICC 2009 

2009 IEEE 9TH Malaysia International Conference on Communications


with a Special Workshop on Digital TV Contents

15th - 17th December 2009, Kuala Lumpur, Malaysia

PROGRAM BOOK

 **IEEE**  **IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY Malaysia Chapter**  **VTS**  **IWD/DTV**

Gold Sponsor

 **TMI**

<http://www.micc.org.my>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Evaluation of the Complex Form in Fresnel Region for UWB Free Space Transmission Model

Phattharamon Juengkittikul¹ and Sathaporn Promwong²

Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

¹s1061026@kmitl.ac.th

²kpsathap@kmitl.ac.th

Abstract—Friis' transmission formula in complex form to treat the UWB signals to take into account the waveform distortion due to the frequency characteristics of the antennas [1], [2]. It is noted that Friis' transmission formula is applicable only in the far field region. In personal area network (PAN) environments, however, the distance may not satisfy the far field condition. In this paper, we discuss the experimental evaluation of the transmission properties in Fresnel region.

Index Terms—UWB-IR, UWB antennas, UWB measurements, Friis' transmission formula, Three-antenna method

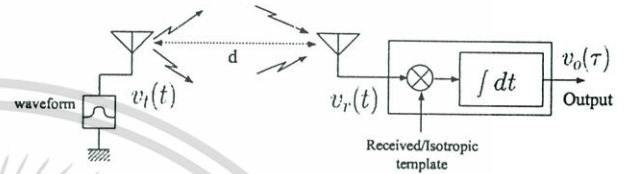


Fig. 1. Block diagram of transmission system model for UWB-IR signal.

I. INTRODUCTION

The ultra wideband impulse radio (UWB-IR) transmission systems have attracted a great deal of attention because of its potentiality for application to short-range, high-speed mobile communications, low-power transmission, and so on. In order to minimize the interference with existent systems, the UWB is expected to be used mainly in wireless personal area networks (WPANs) and home networks [3], [4].

In UWB communication systems, the antennas are significantly pulse-shaping filters. Any distortion of the signal in the frequency domain causes the distortion of the transmitting pulse shape. Consequently this will increase the complexity of the detection mechanism at the receiver. Moreover, low cost, geometrically small and still efficient structures are required for typical wireless applications. Therefore the antenna design for UWB signal radiation is one of the main challenges [5], [6].

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

In this paper, the experimental results of the transmission properties in Fresnel region of UWB propagation channel. This scheme is based on the Friis' transmission formula, adapted for UWB, in the sense that we would like to derive the equivalent antenna gain for UWB systems. The transmission waveform and the matched filter reception are keys for the extension of the Friis' formula to UWB. An experiment is carried out using the biconical antenna for UWB operation in the anechoic chamber.

II. FREE SPACE TRANSMISSION ANALYSIS FOR UWB-IR

The Friis' transmission formula [7] has been widely used to evaluate the link budget for the narrowband LOS channels. The

Friis' transmission gain $G_{\text{Friis}}(f)$ is defined as

$$G_{\text{Friis}}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} \quad (1)$$

$$= G_f(f, d) G_r(f, \Omega_r) G_t(f, \Omega_t) \eta_p(f),$$

where $P_t(f)$ and $P_r(f)$ respectively are the input power to the transmitter (Tx) antenna and the output power from the receiver (Rx) antenna, $G_t(f, \Omega_t)$ and $G_r(f, \Omega_r)$, respectively and $G_{f,d}(f)$ is the free space propagation gain and $\eta_p(f)$ is the polarization matching efficiency. The free space propagation gain can be written as

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

where $\lambda = c/f$ is the wavelength, c is the velocity of light, f is the operating frequency and d is the separation between Tx and Rx antennas.

It is noted, however, that Eq. (1) is satisfied only at some frequency, and is not directly applicable to UWB-IR systems. The formula shall be extended to take into account the transmitted waveform, its distortion due to the antennas, the channel and the correlation receiver [1], [8].

Free space channel response including the antennas is obtained by using the extension of Friis' transmission formula as

$$H_c(f) = H_f(f, d) H_r(f, \Omega_r) \cdot H_t(f, \Omega_t), \quad (3)$$

where the free space transfer function $H_f(f, d)$ can be written as

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

$k = 2\pi/\lambda$ is the propagation constant and effective gain of Tx and Rx antennas apply $H_a(f, \Omega_a)$ ($a = r$ or t) is a complex

transfer function vector of the antenna relative to the isotropic antenna towards the $\Omega_a = (\theta_a, \varphi_a)$ direction, i.e.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_a(f, \Omega_a) &= \mathbf{H}_a(f, \theta_a, \varphi_a) \\ &= \hat{\theta}_a H_{a\theta}(f, \theta_a, \varphi_a) + \hat{\varphi}_a H_{a\varphi}(f, \theta_a, \varphi_a), \end{aligned} \quad (5)$$

$G_{f,d}(f)$ is the free space propagation gain and which has the relation as

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

where η_a is the antenna efficiency, so that the value is normalized by that for isotropic antenna. Unit vectors $\hat{\theta}_a, \hat{\varphi}_a$ express the polarization and are defined with respect to the local polar coordinates of the antennas. The following relations can be easily derived as

$$\hat{\theta}_r = \hat{\theta}_t, \quad (7)$$

$$\hat{\varphi}_r = -\hat{\varphi}_t. \quad (8)$$

The spectral density of the receiver input $V_r(f)$ is given by

$$V_r(f) = H_c(f)V_t(f), \quad (9)$$

where $V_t(f)$ is the spectral density of the transmitted waveform.

A. Received Signal Correlation Receiver

Let us consider a correlation receiver shown in Fig. 1. The output SNR is dependent on the choice of the template waveform. The correlator output $v_o(\tau)$ is therefore expressed as

$$v_o(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_r(t)h_w(t-\tau)dt, \quad (10)$$

where $v_r(t)$ is the receiver input waveform which is the inverse Fourier transform of Eq. (9), $h_w(t)$ is the template waveform and τ corresponds to the timing of the template waveform. The optimum timing τ_o is chosen as

$$\tau_o = \arg \max_{\tau} v_o(\tau). \quad (11)$$

Hereafter $h_w(t)$ is normalized as

$$\int_{-\infty}^{\infty} |h_w(t)|^2 dt = 2B, \quad (12)$$

where B is the signal bandwidth, so that the output noise power is a constant as $N_o B$, where $\frac{N_o}{2}$ is the power spectral density of AWGN.

Under the constraint of Eq. (12), $h_{wm}(t)$ maximizes $v_o(\tau_o)$ when $h_{wm}(t)$ is a time-reversed and scaled version of $v_r(t)$, i.e.

$$h_{wm}(t) = \frac{\sqrt{2B}v_r(\tau_o - t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |v_r(t)|^2 dt}}, \quad (13)$$

where τ_o is usually chosen so that $h_{wm}(t) = 0$ for $t < 0$ to satisfy the causality. $h_{wm}(t)$ is called the received signal template waveform hereafter. It is noted that the link budget evaluation is identical to that in [1] when $h_{wm}(t)$ is used as the receiver template.

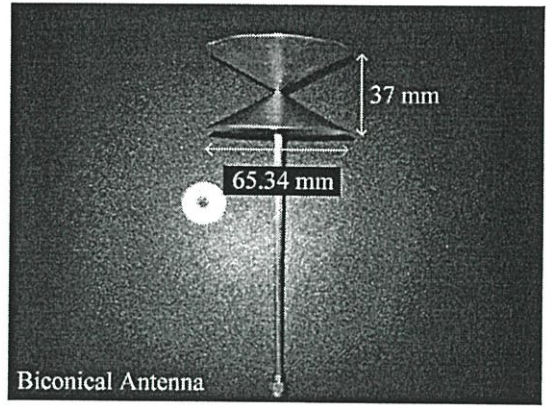


Fig. 2. Geometry and dimensions of the biconical antenna.

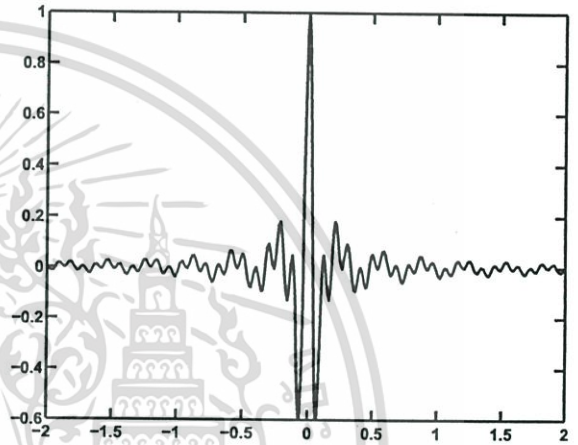


Fig. 3. The UWB transmitted signal waveform.

III. EXPERIMENT SYSTEM

The VNA was operated in the response measurement mode, where Port-1 was the transmitter port (Tx) and Port-2 was the receiver port (Rx), respectively. Biconical antennas with the maximum diameter of 65.3 mm and the length of 37 mm are used both as the standard antennas and as AUT [2]. The measurement was done in the anechoic chamber. Both Tx and Rx antennas were fixed at the height of 1.75 m and separated at a distance of 4 m.

A. UWB Antennas

The geometry and dimensions of the antenna and its characteristics are in Ref. [2]. From Fig. 2 the largest dimension of each Tx and Rx antennas are the inclined height $D_t = D_r = 75$ mm. The largest dimension of the antenna considering the field regions are $D = D_t + D_r = 150$ mm. For the whole UWB frequency spectrum, the inner boundary distance of the Fresnel region is 0.21 m while the outer boundary distance is 0.47 m. The inner boundary distance of the far field region for the whole UWB frequency spectrum is 1.59 m. Then, 0.5 m TR separation distances are chosen for the Fresnel region, while 2.0 m TR separation distances are chosen for the far field region. The practical maximum measured distance, 4 m, is

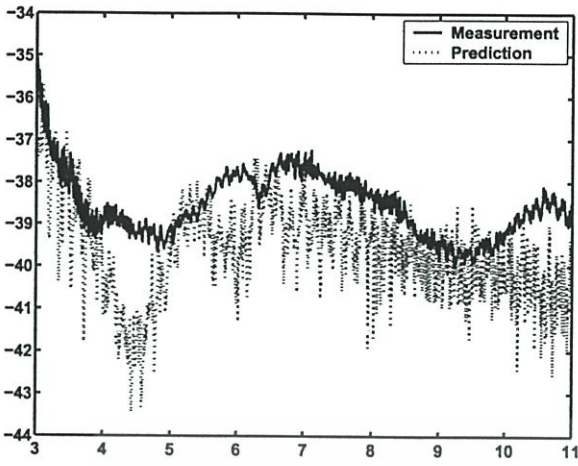


Fig. 4. The measured transfer function at 0.5 m distances: magnitude.

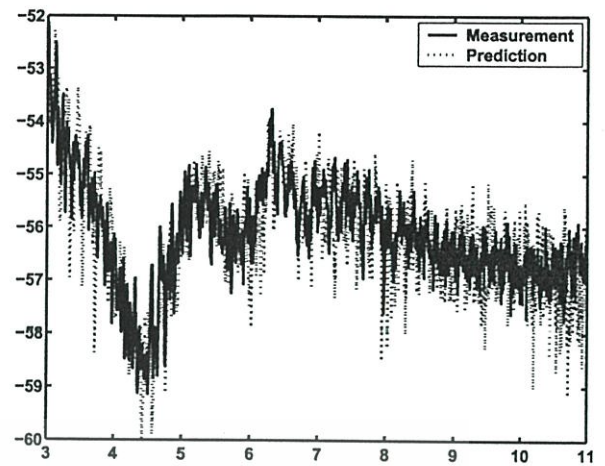


Fig. 6. The measured transfer function at 2 m distances : magnitude.

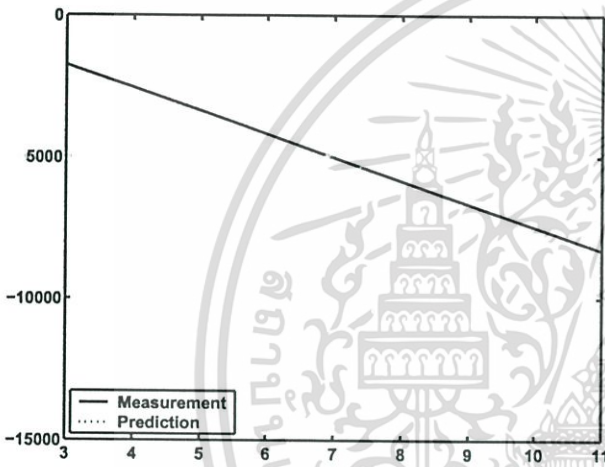


Fig. 5. The measured transfer function at 0.5 m distances: phase.

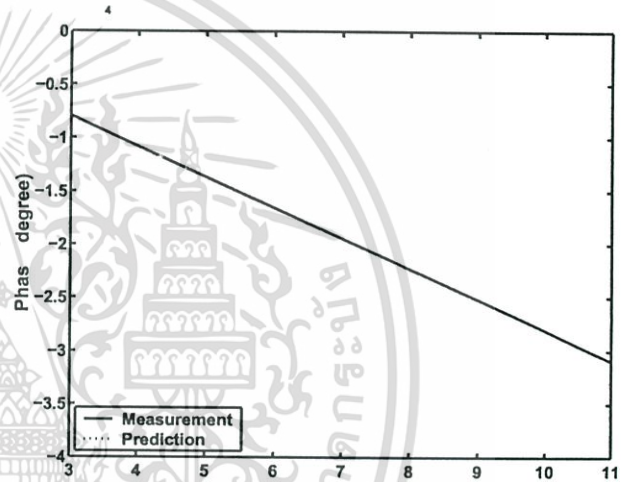


Fig. 7. The measured transfer function at 2 m distances: phase.

chosen as reference distance to estimate the accuracy of the antenna transfer function. The Tx and Rx antennas are assumed to be identical.

B. UWB Transmitted Signal Waveform

The effect of the waveform distortion is more obvious when the bandwidth is wider. We considered the impulse radio signal that fully covers the FCC band, i.e., 3.1 ~ 10.6 GHz is used to test the distortion of the received UWB waveform. This waveform is expressed by

$$v_t(t) = \frac{1}{f_b} [f_{\max} \text{sinc}(2f_{\max}t) - f_{\min} \text{sinc}(2f_{\min}t)], \quad (14)$$

where $f_{\min} = 3.1$ GHz is the minimum frequency, $f_{\max} = 10.6$ GHz is the maximum frequency, $f_b = f_{\max} - f_{\min}$ and $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$. This signal waveform in time domain shown in Fig. 3.

IV. EXPERIMENT RESULTS

The transfer function of Tx and Rx antennas are estimated by using the channel transfer function at 4 m, assuming that these antennas are with identical transfer function. Figures 4, 5 and 6, 7 show the magnitude and the phase of the transfer functions measured at 0.5 and 2.0 m distances. In Figs. 4 and 5, the measured values are compared with the predicted and complex form Friis' transmission formula. Both results are almost identical in the far field region, but the differences of magnitude are observed in the Fresnel region. We can clearly see that in the Fresnel region, the measured magnitude results are greater than the predicted magnitude results. This is due to the radial field in the Fresnel region. In the far field region, the radial field can be negligible.

Figures 8 and 9 compares the transmission of the received UWB waveform presented in Fig. 3, by using the measured transfer functions and those predicted by using the complex form Friis' transmission formula and the antenna transfer function. We can see a little difference between the measured

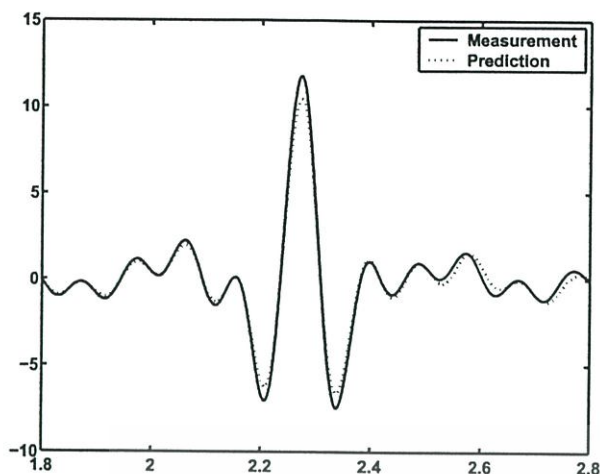


Fig. 8. The received signal waveforms at 0.5 m distances.

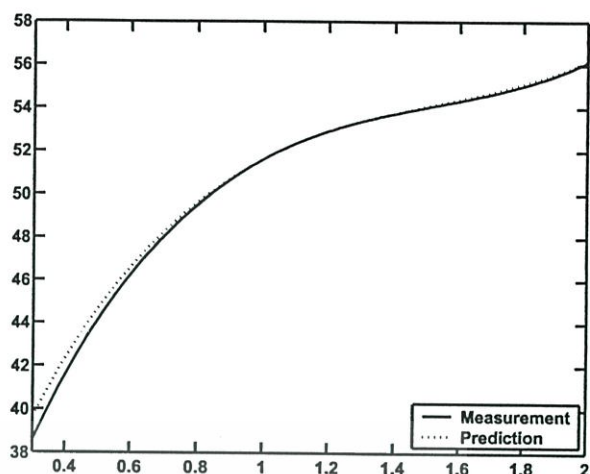


Fig. 10. Path loss of the received UWB-IR.

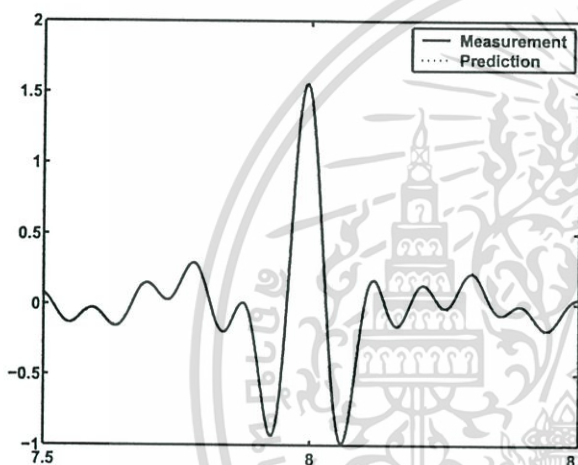


Fig. 9. The received signal waveforms at 2.0 m distances.

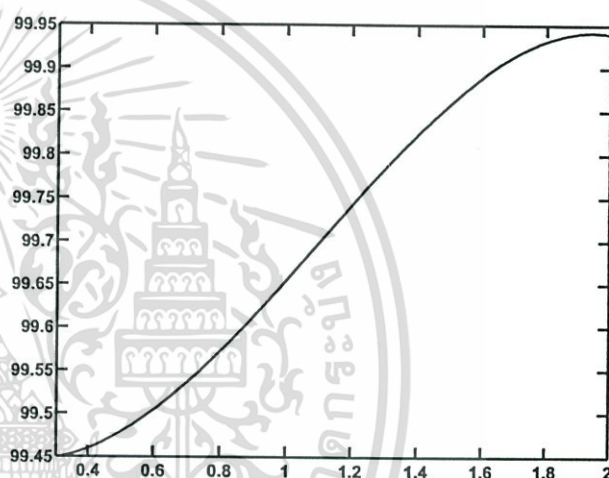


Fig. 11. The correlation coefficient of the received UWB-IR.

and the predicted waveforms in the Fresnel region. In the far field region on the other hand, the received waveforms are almost the same. Figure 10 shows the path loss between two received UWB waveforms corresponding to the measured and the predicted transfer function at a distance of 0.5 m and 2 m. The path gain is more obvious in the Fresnel region. Figure 11 shows the correlation between two waveforms corresponding to the measured and the predicted transfer functions. It has higher distortion in the Fresnel region. While in the far field region, the distortion is very small.

V. CONCLUSION

In this paper we discuss the complex form Friis' transmission formula in Fresnel region has been experimentally studied to consider the UWB-IR free space channel model. The error of the path loss is observed in the Fresnel region caused by the radial field. More comprehensive studies are necessary to consider the type of antennas and to find how to compensate the error. This approach is more useful for design and evaluation

of UWB-IR systems.

REFERENCES

- [1] S. Promwong, and J. Takada, "Free space link budget estimation scheme for ultra wideband impulse radio with imperfect antennas," *IEICE Electronics Express*, vol. 1, no. 7, pp. 188–192, July 2004.
- [2] S. Promwong and W. Hachitani, and J. Takada, "Free Space Link Budget Evaluation of UWB-IR Systems," 2004 International Conference on Ultra Wideband Systems and Technology (UWBST2004), pp. 312–316, May 2004.
- [3] K. Siwiak, "Ultra-Wide Radio: Introducing a New Technology," *Proc. 2001 Spring IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC)*, May 2001.
- [4] K. Siwiak, "Ultra-Wide Radio: The emergence of an Important RF Technology," *Proc. 2001 Spring IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC)*, May 2001.
- [5] H. F. Harmuth and S. Ding-Rong, "Antennas for Nonsinusoidal Wave — Part I: Radiators," *IEEE Trans. on Elec. Mag. Compat.*, vol. EMC-25, no. 1, pp. 13–24, Feb. 1983.
- [6] H. F. Harmuth and S. Ding-Rong, "Antennas for Nonsinusoidal Wave — Part II: Sensors," *IEEE Trans. on Elec. Mag. Compat.*, vol. EMC-25, no. 2, pp. 107–115, May 1983.
- [7] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," *Proc. IRE*, Vol 34, no 5, pp. 254–256, May 1946.
- [8] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' Transmission Formula for UWB Systems," *IEICE Tech. Rep.*, May 2003.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวภัทรมน จิ่งกิตติกุล
 วัน เดือน ปีเกิด 1 เมษายน 2528
 ที่อยู่ 95/48 หมู่ 4 หมู่บ้านทำนายนันทวิลเลจ ถ.ทำนายนนท์ ต.บางศรีเมือง
 อ. เมืองนนทบุรี จ.นนทบุรี 11000
 ประวัติการศึกษา 2549 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต
 สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต
 2552 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีศิลปศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชาสารสนเทศศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

ผลงานวิจัย

- พ.ศ.2551 Phattharamon Juengkittigul, Payungsak Panthap, Sathaporn Promwong and Nikorn Sukutamantanti, **“Evaluation of Transmission Loss with Indoor to Outdoor Environment in UWB Impulse Radio,”** 2008 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2008), vol. 1, pp. 208-211, Dec. 2008.
- พ.ศ.2552 Phattharamon Juengkittikul and Sathaporn Promwong, **“The Link Budget Evaluation of Ultra Wideband Impulse Radio Transmission Systems,”** 9th International Symposium on Communication and Information Technology 2009 (ISCIT2009), vol. 1, pp. 474-478, Sep. 2009.
- พ.ศ.2552 Phattharamon Juengkittikul and Sathaporn Promwong, **“Evaluation of the Complex Form in Fresnel Region for UWB Free Space Transmission Model,”** 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference On Communication (MICC2009), vol. 1, pp.Tu12-6, Dec. 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้