การศึกษาผลกระทบของการส่งสัญญาณพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งผ่านวัสดุ

STUDY ON THE EFFECTS OF UWB PULSE TRANSMISSION THROUGH BUILDING MATERIALS

พงศธร จตุรทัศนัย

PONGSATORN JATURATUSSANAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลกระทบของการส่งสัญญาณพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งผ่านวัสดุ

STUDY ON THE EFFECTS OF UWB PULSE TRANSMISSION THROUGH BUILDING MATERIALS

พงศธร จตุรทัศนัย

PONGSATORN JATURATUSSANAI

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 74429
วัน,เดือน,ปี 28 ก.ย. 2550

.b 11803903
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

STUDY ON THE EFFECTS OF UWB PULSE TRANSMISSION THROUGH BUILDING MATERIALS

PONGSATORN JATURATUSSANAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของการส่งสัญญาณพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งผ่านวัสดุ
นักศึกษา	นายพงศธร จตุรทัศนัย
รหัสประจำตัว	47061173
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.มนต์ชัย แช่มช้อย

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง มีแนวโน้มที่จะถูกใช้สำหรับเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลและเครือข่ายไร้สายภายในอาคาร ซึ่งปัญหาหลักของการใช้งานคือสิ่งกีดขวางภายในอาคาร ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอถึงการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งและผลกระทบที่เกิดจากสิ่งกีดขวางภายในอาคาร ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์บนพื้นฐานของการทดสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบ โดยผลที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าของการประวิงเฉลี่ย ค่าการแผ่ประวิง RMS และค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านที่จะแสดงให้เห็นถึงผลการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งอันเนื่องมาจากสิ่งกีดขวางภายในอาคาร ซึ่งผลจากการศึกษาการส่งสัญญาณพัลส์ผ่านวัสดุทั้งภายในห้องดูดซับการสะท้อนของคลื่นและภายในอาคารพบว่า แก้วมีผลจากการสูญเสียจากการส่งผ่านมากที่สุด ส่วนแผ่นกั้นมีผลจากการสูญเสียจากการส่งผ่านน้อยที่สุด นอกจากนั้นยังได้นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลาเพื่อตรวจสอบถึงผลการทดสอบในช่วงความถี่ 3 กิกะเฮิร์ต ถึง 11 กิกะเฮิร์ต ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองมีความสอดคล้องเป็นอย่างดี

Thesis Title	Study on the Effects of UWB Pulse Transmission Through Building Materials
Student	Mr. Pongsatorn Jaturatussanai
Student ID.	47061173
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst.Prof. Monchai Chamchoy

ABSTRACT

Ultra-wideband (UWB) technology is intended to be used in wireless personal area networks and home networking, which has any probably obstruct by building material. This thesis proposes the characterization of UWB pulse and influences of the obstructions on UWB pulse.Vector network analyzer (VNA) is the main equipment for the measurement. The results take to analyze the mean excess delay, rms delay spread and aggregate penetration loss that show the effect of UWB channel due to the materials. From the study on the effects of UWB pulse transmission signal through building material within fully anechoic chamber and indoor environment, glass has the highest aggregate penetration loss while partition broad has the lowest aggregate penetration loss. Furthermore, the result is compared to the finite difference time domain (FDTD) model in frequency range 3-11 GHz. Eventually, the experiment result is corresponds to the simulation well.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาและคอยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย รวมทั้งตรวจทานวิทยานิพนธ์นี้จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนต์ชัย แช่มช้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศและหัวหน้ากลุ่มงานวิจัยที่ให้คำแนะนำแนวทางในการทดสอบผล รวมทั้งคอยสั่งสอนให้มีความสามารถในการทำวิจัยได้ดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชญ สุพรรณกูล ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

ขอขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่ให้ชีวิตและคอยดูแลให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ในการทำงานมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยมาถึงอยู่ถึงจุดนี้ได้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ น้อง ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือในการทดลองและให้คำแนะนำมาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พงศธร จตุรทัศนัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VIII

สารบัญรูป.....IX

รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....XIV

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....3

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....3

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....4

1.5 ขอบเขตการศึกษา.....4

1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....4

บทที่ 2 ระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....6

2.1 กล่าวนำ.....6

2.2 ประวัติของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....7

2.3 ระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง.....8

2.3.1 ลักษณะเฉพาะของการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง.....9

2.3.2 ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง.....10

2.4 กฎข้อบังคับของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....12

2.4.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา.....12

2.4.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป.....14

2.5 การกำหนดสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....16

2.5.1 คำจำกัดความของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2 วิธีการสร้างสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....17

2.5.3 การออกแบบสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....18

2.6 รูปแบบของสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....20

2.4.1 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์.....21

2.4.2 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์โมโนไซเคิล.....22

2.4.3 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์ดับเลต.....23

2.7 วิธีการมอดูเลตในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....24

2.7.1 การมอดูเลตแอมพลิจูด.....24

2.7.2 การมอดูเลตทางตำแหน่งของพัลส์.....24

2.7.3 การมอดูเลตแบบสองเฟส.....25

2.8 การประยุกต์และการนำระบบแถบกว้างยิ่งไปใช้งาน.....26

2.8.1 การติดต่อสื่อสารและระบบเซนเซอร์.....26

2.8.2 ระบบเรดาร์.....26

2.9 สรุป.....27

บทที่ 3 ช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งและวิธีการทางคณิตศาสตร์.....28

3.1 กล่าวนำ.....28

3.2 ช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบกว้างยิ่ง.....28

3.3 ระบบในการทดสอบช่องสัญญาณ.....30

3.3.1 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่.....30

3.3.2 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนเวลา.....32

3.3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....32

3.3.3.1 ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ.....33

3.4.3.2 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ.....34

3.3.3.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน.....35

3.3.3.4 ค่าการกระจายทางเวลา.....36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3.5 ค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน.....37
3.4 การเปรียบเทียบทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา....37
3.4.1 แนวความคิดของยี.....38
3.4.2 สมการผลต่างสืบเนื่องจำกัด.....42
3.4.3 เงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข.....46
3.5 สรุป.....47

บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....48
4.1 กล่าวนำ.....48
4.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบ.....48
4.2.1 เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์.....48
4.2.2 ชนิดของสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ.....49
4.2.2.1 สายอากาศแบบกรวยคู่.....49
4.3 การทดสอบวัสดุสิ่งก่อสร้างในห้องดูดซับการสะท้อน.....52
4.3.1 รูปแบบในการทดสอบวัสดุสิ่งก่อสร้างในห้องดูดซับการสะท้อน.....52
4.3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบวัสดุสิ่งก่อสร้างในห้องดูดซับการสะท้อน....52
4.3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบวัสดุสิ่งก่อสร้างในห้องดูดซับการสะท้อน.54
4.3.4 แบบจำลองของสัญญาณที่ใช้ส่ง.....54
4.4 การทดสอบภายในอาคาร.....55
4.4.1 รูปแบบในการทดสอบภายในอาคาร.....55
4.3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบภายในอาคาร.....57
4.3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบภายในอาคาร.....57
4.5 ขั้นตอนการจำลองระบบโดยใช้หลักการผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา.....58
4.5.1 แบบแผน FDTD.....58
4.5.2 การกระตุ้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง.....59
4.5.3 ขอบเขตการดูดกลืนแบบชั้นแมตช์สมบูรณ์.....62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....60
4.6 สรุป.....61

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบ.....63
5.1 กล่าวนำ.....63
5.2 ผลการวิเคราะห์ในห้องดูดซับการสะท้อน.....63
5.3 ผลการวิเคราะห์ภายในอาคาร.....65
5.4 ผลการเปรียบเทียบจากผลการทดสอบภายในอาคารกับผลการจำลองโดยวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา.....68

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....73
6.1 สรุปผลการวิเคราะห์ช่องสัญญาณกรณีทดสอบภายในห้องดูดซับการสะท้อน.....73
6.2 สรุปผลการวิเคราะห์ช่องสัญญาณกรณีทดสอบภายในอาคาร.....73
6.3 สรุปผลการวิเคราห์ทางคณิตศาสตร์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา.....74
6.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....74

เอกสารอ้างอิง.....75

ภาคผนวก ก. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์.....77

ประวัติผู้เขียน.....88

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร 14

2.2 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร 14

4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบภายในห้องดูดซับการสะท้อนของคลื่น 54

4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบภายในอาคาร 57

4.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ผลต่างสืบเนื่องโดเมนเวลา 60

4.4 ค่าสภาพนำไฟฟ้าและสภาพยอมไฟฟ้า 61

5.1 ขนาดของวัสดุและการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุภายในห้องดูดซับการสะท้อน 64

5.2 ค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ย ค่าต่ำสุด และ ค่าสูงสุดภายในห้องดูดซับการสะท้อน 65

5.3 จำนวนครั้งในการทดสอบและค่าการแผ่ประวิง RMS ภายในห้องดูดซับการสะท้อน 65

5.4 ขนาดของวัสดุและการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุภายในอาคาร 67

5.5 ค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ย ค่าต่ำสุด และ ค่าสูงสุดภายในอาคาร 68

5.6 จำนวนในการทดสอบและค่าการแผ่ประวิง RMS ภายในอาคาร 68

5.7 ขนาดของวัสดุและค่าการสูญเสียจากากรส่งผ่าน ทั้งจากการทดสอบและวิธี FDTD 72

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบต่อสิ่งกีดขวางภายในอาคาร.....2

2.1 Heinrich Rudolf Hertz ผู้ค้นพบระบบสื่อสารวิทยุ.....7

2.2 เปรียบเทียบเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งกับเทคโนโลยีไร้สาย ตามมาตรฐาน IEEE802.11a และ IEEE802.11g.....10

2.3 ระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่งโดยเปรียบเทียบกับระบบอื่นๆ.....10

2.4 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของ ระบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคาร.....15

2.5 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดย FCC และ ETSI ของ ระบบแถบกว้างยิ่งภายนอกอาคาร.....15

2.6 จุดพิจารณาในการออกแบบสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....16

2.7 แนวคิดในการสร้างระบบแถบกว้างยิ่ง.....17

2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความชันขอบของสัญญาณกับการสร้างสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....18

2.9 เอาท์พุทจากวงจรลอจิกที่ใช้สร้างสัญญาณแถบกว้างยิ่ง.....19

2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของพัลส์ โดยการแปลงฟูริเยร์.....20

2.11 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่.....21

2.12 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์โมโนไซเคิลทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่.....22

2.13 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ดับเลตทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่.....23

2.14 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามขนาด 4 ระดับ.....24

2.15 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตทางตามตำแหน่งของพัลส์ (PPM) 25

2.16 สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแบบสองเฟส.....18

3.1 แบบจำลองของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งแบบหลายวิถีภายในอาคาร.....29

3.2 ระบบการทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่โดยเครื่อง VNA และการแปลงสู่โดเมนเวลา โดยใช้ IFFT.....31

3.3 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนเวลา โดยใช้อิมพัลส์ 32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.4 บล็อคไดอะแกรมของระบบ.....33

3.5 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่.....34

3.6 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนเวลา.....35

3.7 ตัวอย่างภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน.....35

3.8 ตำแหน่งของส่วนประกอบเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในหน่วยเซลล์ลูกบาศก์ตามแนวความคิดของยี.....41

3.9 แบบแผนขั้นเวลาลีพฟรอกตามแนวความคิดของยี สำหรับการแพร่กระจายของคลื่นในหนึ่งมิติ.....42

4.1 เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์.....49

4.2 ส่วนประกอบของสายอากาศแบบกรวยคู่.....50

4.3 สายอากาศแบบกรวยคู่.....50

4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแบบกรวยคู่.....51

4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชั่นการส่งผ่านของสายอากาศ.....51

4.6 ขั้นตอนในการทดสอบวัสดุในห้องคูดซับการสะท้อน.....53

4.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคุณลักษณะของการส่งพัลส์ผ่านวัสดุ.....53

4.8 รูปสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์.....55

4.9 ขั้นตอนในการทดสอบและการวิเคราะห์ของวัสดุภายในอาคาร.....56

4.10 ขนาดของห้องและแบบจำลองในการทดสอบ.....56

4.11 แบบจำลองของวิธี FDTD สำหรับแบบแผนคลื่น TM.....61

5.1 ผลตอบสนองอิมพัลส์ซึ่งถูกนอร์มอลล์ไรซ์.....64

5.2 กำลังงานและขนาด ซึ่งถูกนอร์มอลล์ไรซ์ด้วยค่าสูงสุดของการทดสอบในวัสดุต่างๆ 66

5.3 สนามไฟฟ้า ณ เวลาที่ n = 4000 เมื่อ *MUT* เป็นอิฐ.....69

5.4 สนามไฟฟ้า ณ เวลาที่ n = 4000 เมื่อ *MUT* เป็นแก้ว.....70

5.5 สนามไฟฟ้า ณ เวลาที่ n = 4000 เมื่อ *MUT* เป็นแผ่นไม้.....70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.6 ค่าขนาดของกำลังงานในการจำลองวิธี FDTD เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบของอิฐ.....71

5.7 ค่าขนาดของกำลังงานในการจำลองวิธี FDTD เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบของแก้ว.....71

5.8 ค่าขนาดของกำลังงานในการจำลองวิธี FDTD เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบของแผ่นไม้.....72

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

หน่วยงานวิจัยชั้นสูงของสหรัฐ (Defense Advanced Research Projects Agency)	DARPA
สถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standards Institute)	ETSI
องค์กรบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Aviation Administration)	FAA
โดเมนความถี่ (Frequency Domain)	FD
ผลต่างสืบเนื่องโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain)	FDTD
ระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global Positioning Systems)	GPS
สถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers)	IEEE
ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform)	IFFT
สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union)	ITU
การมอดูเลตทางขนาดของพัลส์ (Pulse Amplitude Modulation)	PAM
ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (Power Delay Profile)	PDP
การมอดูเลตทางตำแหน่งของพัลส์ (Pulse Position Modulation)	PPM
คลื่นพาหะ (Radio Frequency)	RF
โดเมนเวลา (Time Domain)	TD
ระบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wide Band)	UWB
กลุ่มทำงานเกี่ยวกับระบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wide Band Working Group)	UWBWG
เครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย (Vector Network Analyzer)	VNA
เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network)	WPAN
แอมแปร์ (Ampere)	*A*
เดซิเบล (Decibel)	*dB*
เฮิรตซ์ (Hertz)	*Hz*
กิกะเฮิรตซ์ (Gigahertz)	*GHz*
เมตร (meter)	*m*
วินาที (Second)	*s*
นาโนวินาที (Nanosecond)	*ns*
วัตต์ (Watt)	*W*

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

มิลลิวัตต์ (Milliwatt)	mW
สัดส่วนแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth)	B_f
ความเร็วแสง (Velocity of light), $c = f\lambda = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} \approx 3\times10^8, m/s$	c
ความถี่ (Frequency), Hz	f
ค่าความถี่บนของระบบการสื่อสาร	f_H
ค่าความถี่ล่างของระบบการสื่อสาร	f_L
ฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency transfer function)	$H(\omega)$
เครื่องรับ (Receiver)	Rx
สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient)	s_{21}
เวลา (Time), s	t
เครื่องส่ง (Transmitter)	Tx
การประวิงเข้าถึงเฉลี่ย (Mean excess delay), s	$\bar{\tau}$
การแผ่ประวิง RMS (RMS delay spread), s	σ_τ
ความซาบซึมของอากาศว่าง (permeability of vacuum), Hm^{-1} ,NA^{-2}	μ_0
สภาพยอมของอวกาศว่าง (Permittivity of free space), Fm^{-1}	ε_0
สภาพนำ (Conductivity), S/m	σ
ความสูญเสียทางแม่เหล็ก (Magnetic loss), $\Omega\,m^{-1}$	σ^*
ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า (Electric Flux Density), C/m^2	$\vec{D}$
ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density), Wb/m^2	$\vec{B}$
ความหนาแน่นกระแสเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Electric Conduction Current), A/m^2	$\vec{J}_e$
ความหนาแน่นแม่เหล็กสมบูรณ์ (Equivalent Magnetic Conduction Current), V/m^2	$\vec{J}_m$
ความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (Relative permeability)	μ_r
สภาพยอม (Permittivity), Fm^{-1}	ε
สภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูล (Equivalent magnetic resistivity), $\Omega\,m^{-1}$	ρ'

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

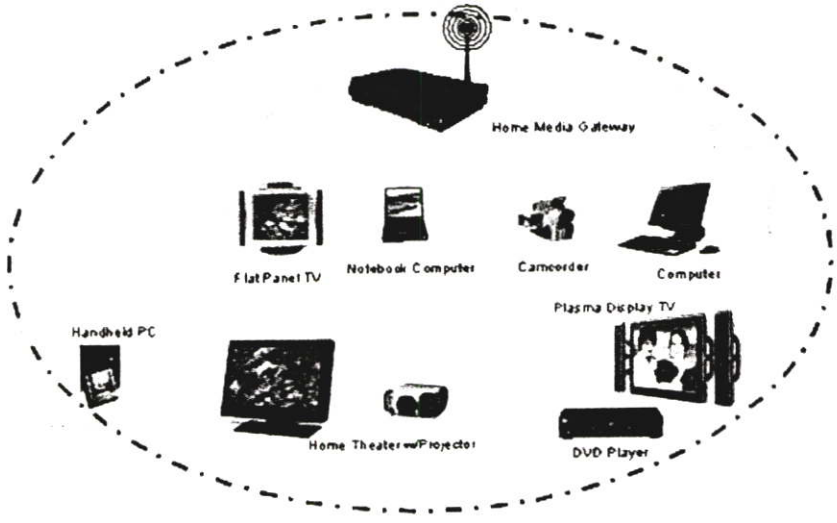
ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีแบบไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในระบบการสื่อสารมากขึ้นเพื่อเพิ่มความสะดวกและรวดเร็วในการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภายในอาคาร ภายในสำนักงานหรือภายในบ้าน ซึ่งเป็นระบบการสื่อสารไร้สายระยะสั้นที่มีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูงเพื่อรองรับระบบมัลติมีเดียและมีกำลังในการส่งที่ต่ำ โดยความต้องการเหล่านี้ได้ถูกนำไปพิจารณาเพื่อค้นหาเทคโนโลยีที่สามารถรองรับความต้องการเหล่านี้ เทคโนโลยีไร้สายที่เรียกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งหรืออุลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband) จะถูกนำเข้ามาใช้งาน โดยแนวโน้มที่ผลักดันให้มีการนำระบบสื่อสารไร้สายระยะสั้นแบบแถบกว้างยิ่งเข้ามาใช้งาน ก็คือ

1. ความต้องการที่เพิ่มขึ้นในการใช้อุปกรณ์ไร้สาย ที่มีความต้องการแบนด์วิดท์ที่สูงขึ้นและมีการใช้กำลังงานที่ต่ำ
2. เกิดความคับคั่งของการใช้งานสเปกตรัมความถี่ที่มีการจัดสรรให้ไป
3. การเติบโตของการใช้งานอินเตอร์เน็ตความเร็วสูงในหน่วยงานและองค์กรต่าง ๆ บ้านพักอาศัย และตามสถานที่สาธารณะต่าง ๆ

ระบบแถบกว้างยิ่งมีข้อดีที่เหนือกว่าระบบสื่อสารไร้สายระยะสั้นแบบอื่น ๆ ตรงที่สามารถสอดคล้องกับแนวโน้มที่เกิดขึ้นข้างต้นได้ดีกว่า โดยการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั้นนับได้ว่าเป็นวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารไร้สาย โดยมีการใช้แถบความถี่ในการส่งที่กว้างมากประกอบกับใช้กำลังส่งที่น้อย สัญญาณของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งนั้นมีความแตกต่างกับระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน 2 ประการคือ การส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง นั้นจะทำการส่งสัญญาณในลักษณะที่เป็นอิมพัลส์ โดยไม่มีการนำเอาสัญญาณข้อมูลไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาห์ อีกประการหนึ่งสัญญาณแถบกว้างยิ่งจะใช้แบนด์วิดท์ในการส่งมากกว่าหรือเท่ากับ 20 % ของแถบความถี่กลาง หรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz ซึ่งจะพบว่ามีค่ามากกว่าแถบความถี่ของระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเอาเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งนี้มาใช้กับระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network : WPAN) ตามมาตรฐานของ IEEE 802.15.3a [1] โดยจะเป็นลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ เช่น กล้องถ่ายรูปดิจิตอล กล้องถ่ายวิดีโอ วีดีโอโปรเจคเตอร์ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

ฯลฯ ซึ่งจะเป็นการเชื่อมต่อที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงประมาณ 110 Mb/s ในระยะทาง 10 เมตร และมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นในระยะทางที่สั้นลง

โดยรูปที่ 1.1 แสดงลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบต่อสิ่งกีดขวางภายในอาคาร ซึ่งการใช้งานจริงของระบบนี้จะมีลักษณะการนำไปใช้ติดต่อสื่อสารภายในอาคารซึ่งมักจะมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณในการสื่อสาร เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ ผนัง สิ่งกีดขวางต่าง ๆ ซึ่งสิ่งกีดขวางแต่ละชนิดมีองค์ประกอบที่ไม่เหมือนกัน คุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลกระทบอย่างสูงทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านมีลักษณะแตกต่างกัน



รูปที่ 1.1 ลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบต่อสิ่งกีดขวางภายในอาคาร [1]

เนื่องด้วยเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งนี้ถูกนำมาใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ที่อยู่ภายในอาคารซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศนั้นอาจจะถูกลดทอนกำลังงาน (power attenuation) โดยปัจจัยต่าง ๆ อาทิเช่น ถูกลดทอนโดยผนังหรือกำแพงของอาคาร จากวัสดุอุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงหรือแม้กระทั่งเกิดการจางหายแบบหลายวิถี (multipath fading หรือ small-scale fading) อันเนื่องมาจากการที่สิ่งกีดขวางต่าง ๆ รอบข้างส่งผลให้เกิดการสะท้อนและการหักเหของสัญญาณในหลายทิศทาง เป็นต้น ทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของการส่งสัญญาณพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงผลของการ

กระจายทางเวลา (time dispersion) และการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุ (Penetration Loss) ของสัญญาณเมื่อเกิดการส่งผ่านสิ่งกีดขวางแต่ละชนิด

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้ต้องการที่จะศึกษาถึงผลกระทบจากการส่งผ่านสิ่งกีดขวางแต่ละชนิดที่มีต่อคุณลักษณะต่อช่องสัญญาณคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งพิจารณาอยู่บนพื้นฐานของการทดสอบทั้งในสภาวะแวดล้อมในห้องที่มีการดูดซับการสะท้อนของคลื่น (anechoic chamber) และภายในอาคาร (indoor) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer : VNA) เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบร่วมกับสายอากาศ จากนั้นผลการทดสอบที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงให้เห็นถึงผลการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณอันเนื่องมาจากการส่งผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น การประวิงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay) และค่าการแผ่ประวิง RMS (RMS delay spread) ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะทางเวลาของสัญญาณที่เข้ามาถึงยังสายอากาศด้านรับโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าการแผ่ประวิงนั้นจะแสดงให้เห็นถึงปัญหาการทับซ้อนกันของสัญญาณระหว่างบิตหรือสัญลักษณ์ (intersymbol interference : ISI) จากนั้นทำการตรวจสอบการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุ อีกทั้งยังนำผลมาเปรียบเทียบกับการจำลองระบบโดยใช้ผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain :FDTD)

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาผลที่เกิดจากการส่งผ่านวัสดุที่มีผลต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดจากการส่งผ่านวัสดุในขั้นตอนการทดสอบภายในห้องดูดซับการสะท้อนของคลื่นนั้นเป็นการกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแวดล้อมรอบข้างให้คงที่ ซึ่งทำให้ช่วยลดผลจากการสะท้อนในทิศทางที่ไม่ต้องการพิจารณาได้ในระดับหนึ่ง เพื่อวิเคราะห์ถึงผลที่เกิดจากการส่งผ่านวัสดุเพียงอย่างเดียว ผลที่ได้จากการทดสอบประกอบไปด้วยผลจากการส่งผ่านวัสดุและผลจากสภาวะแวดล้อมรอบข้างซึ่งได้พิจารณาเป็นผลโดยรวมในกรณีเมื่อนำไปใช้งานจริง โดยขั้นตอนในการทดสอบดังกล่าวมาแล้วข้างต้น กำหนดการวางตัวของสายอากาศส่งและรับเป็นแบบแนวตั้ง (vertical) ซึ่งทำให้สายอากาศด้านส่งมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบตัว (omni-directional)

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากการส่งสัญญาณพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งผ่านวัสดุ ซึ่งพิจารณาบนพื้นฐานของการทดสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว โดยทำการทดสอบตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 11 GHz ครอบคลุมช่วงความถี่ที่กำหนดให้ใช้งานในการสื่อสารคือตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งถูกกำหนดโดยคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal communication commission : FCC) ผลตอบสนองเชิงความถี่สำหรับวัสดุในช่องสัญญาณ สามารถหาได้จากการสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน หรือ s_{21} ในระบบ ขั้นตอนวิธีการทดสอบนั้นได้ทำการทดสอบ 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกได้ทำการทดสอบภายในห้องที่มีการดูดซับการสะท้อนของคลื่น และส่วนที่สองได้ทำการทดสอบภายในอาคาร โดยในการทดสอบแต่ละส่วนได้กำหนดลักษณะวิธีการทดสอบ คือ กรณีที่ไม่มีวัสดุและกรณีที่มีวัสดุ โดยลักษณะวิธีการทดสอบที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้กำหนดขึ้นเพื่อเป็นการทดสอบผลกระทบที่สามารถเกิดขึ้นในกรณีที่นำไปใช้งานจริง หลังจากทำการทดสอบ ผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อหาผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น สุดท้ายนำผลที่ได้ทำการเปรียบเทียบกับการจำลองระบบโดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของการส่งสัญญาณพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งผ่านวัสดุ โดยวิเคราะห์จากผลการทดสอบภายในห้องดูดซับการสะท้อนของคลื่นและภายในอาคาร ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของพารามิเตอร์ต่าง ๆ อันประกอบไปด้วยค่าประวิงเข้าถึงเฉลี่ย ค่าการแผ่ประวิง RMS และค่าการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านวัสดุ สุดท้ายจะนำผลที่เกิดขึ้นไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงระบบสื่อสารแถบกว้างยิ่ง ลักษณะเฉพาะของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง กฎข้อบังคับของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง รูปแบบของสัญญาณและเทคนิคการมอดูเลชั่นในระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีในการวิเคราะห์ช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง และวิธีการทางคณิตศาสตร์ อุปกรณ์ที่เกี่ยวกับการทดสอบและพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ช่องสัญญาณ

บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล การทดสอบภายในห้องคูคชับการสะท้อนของคลื่น การทดสอบภายในอาคารและการจำลองระบบโดยใช้หลักการผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบ

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2
ระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารได้เกิดขึ้นมามากมายหลายระบบเพื่อรองรับความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกันไปทั้งในระบบแบบไร้สาย และแบบใช้สายส่ง ซึ่งในแต่ละระบบจะมีข้อกำหนดที่แตกต่างกันออกไปอาทิเช่น ช่วงความถี่ในการใช้งาน ระดับกำลังงาน ฯลฯ โดยข้อกำหนดดังกล่าวจะเป็นตัวที่บอกถึงข้อจำกัดของระบบนั้นๆ ว่าสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วและระยะทางในการให้บริการมากน้อยเพียงใด ซึ่งโดยทั่วไปอัตราการส่งข้อมูลจะอยู่ในระดับที่ไม่มากนัก แต่เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำเสนอเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายที่มีความสามารถในการส่งข้อมูลได้ในปริมาณที่มากขึ้น ที่เรียกว่าระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra-Wideband : UWB) ซึ่งได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลกเนื่องจากมีแนวโน้มว่าจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless personal area network : WPAN) โดยเทคโนโลยีนี้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตที่ถูกนำไปใช้เฉพาะทางด้านการทหารแต่ในปัจจุบันได้กลายมาเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในเชิงธุรกิจ เพื่อรองรับการเติบโตของระบบสารสนเทศที่ต้องการระบบที่มีความสามารถในการส่งข้อมูลได้มากขึ้นทั้ง ภาพ เสียงและข้อมูล โดยในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งและรายละเอียดของข้อกำหนดต่าง ๆ ของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

2.2 ประวัติของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ในปี ค.ศ. 1864 James Clerk Maxwell กล่าวไว้ว่า คลื่นวิทยุ คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 1886 Heinrich Rudolf Hertz ได้ทำการทดลองและพิสูจน์ให้เห็นว่าคลื่นวิทยุมีจริง หลังจากนั้นได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับคลื่นวิทยุและการกระจายคลื่นวิทยุให้ก้าวหน้าต่อไป

รูปที่ 2.1 Heinrich Rudolf Hertz ผู้ค้นพบระบบสื่อสารคลื่นวิทยุ

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ได้ถือกำเนิดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1901 โดยที่มาร์โคนี (Marconi) ได้ทดลองสาธิตเครื่องส่งสปาร์กแก็ป (spark gap) ในการส่งสัญญาณวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติก ต่อมาได้มีการพัฒนาการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งในปี ค.ศ. 1962 โดยใช้หลักการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนเวลา และได้ถูกนำไปใช้ในการส่งสัญญาณในเครือข่ายไมโครเวฟ ในปี ค.ศ. 1963-1966 ซึ่งมีแนวทางในการพัฒนาว่าต้องมีรูปแบบที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยใช้คุณลักษณะของการตอบสนองความถี่ เช่น ขนาดของสัญญาณและเฟส ซึ่งในการวิเคราะห์สัญญาณนั้นเราได้ใช้เครื่องออสซิโลสโคปในการสุ่มค่าของสัญญาณ เพื่อมาทำการวิเคราะห์และพัฒนาเครือข่ายในระบบไมโครเวฟ และรูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการส่งผ่าน โดยเทคนิคในการวัดค่าสัญญาณนั้นแรกเริ่มได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับแถบความถี่กว้างในปี ค.ศ. 1968 ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาสัญญาณที่มีขนาดแคบได้อย่างรวดเร็ว และได้ถูกนำไปใช้ในการส่งสัญญาณติดต่อสื่อสารแบบเรดาร์ ในปี ค.ศ. 1972 และในปี ค.ศ. 1973 เครื่องออสซิโลสโคปที่สามารถวิเคราะห์ความถี่ที่สูงขึ้นก็ได้ถูกสร้างขึ้นจึงทำให้มีการกำหนดแถบความถี่กว้างยิ่ง ต่อมาในปี ค.ศ. 1980 นั้นได้มีการกำหนดให้เทคโนโลยีแถบความถี่กว้างยิ่งนี้ไม่จำเป็นต้องใช้คลื่นพาหะ โดยส่วนใหญ่แล้วจะนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบเรดาร์ อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของสัญญาณที่มีช่วงความถี่ที่กว้างมากทำให้ได้รับข้อมูลที่เกี่ยวกับตำแหน่งที่มีความถูกต้องสูง และเป็นจุดที่แตกต่างจากการส่งคลื่นวิทยุแบบอื่นที่มีมาก่อนหน้านั้น แต่เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ได้ถูกนำมาใช้ในโครงการที่เป็นความลับของกองทัพสหรัฐอเมริกา ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960-1990 ซึ่งพบว่าเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งเหมาะที่จะนำมาใช้กับการสื่อสารของเรดาห์และการติดต่อสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยสูง [2]

เมื่อเดือนพฤษภาคมปี ค.ศ. 2000 ทางคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission : FCC) ได้ออกหนังสือ Notice of Proposed Rule Making ซึ่งเชิญชวนให้หน่วยงานต่าง ๆ นำเสนอข้อคิดเห็นที่จะนำมาพัฒนาและปรับปรุงแก้ไขกฎข้อบังคับของคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาเพื่อควบคุมและจำกัดกำลังส่งสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งกฎข้อบังคับใหม่นี้ได้ถูกประกาศออกมาใช้งานเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ปี ค.ศ. 2002 [3]

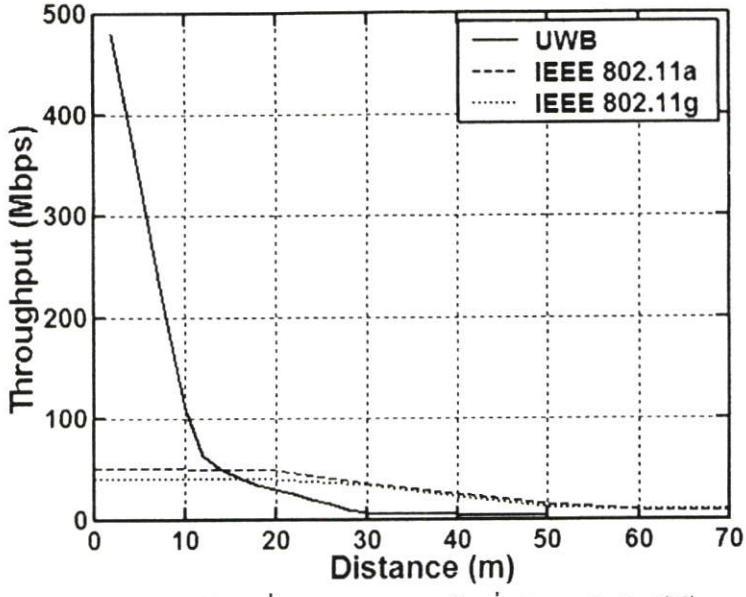
2.3 ระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

ปัจจุบันมีการพัฒนาระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งมาโดยตลอด ทำให้ได้รับความสนใจสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารประเภทต่างๆ มากขึ้น โดยการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั้นนับได้ว่าเป็นวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารไร้สาย โดยมีการใช้แถบความถี่ในการส่งที่กว้างมากประกอบกับใช้กำลังส่งที่น้อย ซึ่งสัญญาณของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั้นมีความแตกต่างกับระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน 2 ประการคือ การส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจะทำการส่งสัญญาณในลักษณะที่เป็นอิมพัลส์ โดยไม่มีการนำเอาสัญญาณข้อมูลไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาห์ อีกประการหนึ่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจะมีสัดส่วนของแบนวิดท์ในการส่งมากกว่าหรือเท่ากับ 20 % ของแถบความถี่กลาง หรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz ซึ่งจะพบว่ามีค่ามากกว่าแถบความถี่ของระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาก ทางคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดแถบความถี่ที่ใช้ในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง คือ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งมีแบนวิดท์เท่ากับ 7.5 GHz จากการที่ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งใช้แถบความถี่ที่กว้างมากโดยที่แถบความถี่ที่ใช้นั้นได้มีการทับซ้อนกับระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบที่มีอยู่ในปัจจุบัน จึงกำหนดระดับของความหนาแน่นของกำลังส่งต่อความถี่ ในการส่งสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งไว้ไม่เกิน -41.3 dBm/MHz ซึ่งเป็นข้อกำหนดของกำลังงานที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [1] การที่ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งมีความหนาแน่นของกำลังงานของสัญญาณที่ใช้ส่งต่ำนั้น ทำให้ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งได้รับผลกระทบของสัญญาณรบกวนมาก ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอผลการวิจัยต่างๆ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงผลดังกล่าวในการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดีขึ้น โดยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของการส่งสัญญาณพัลส์แบบแถบกว้างยิ่งผ่านวัสดุซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะกล่าวถึงในบทต่อไป โดยที่ในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการพื้นฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ ของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

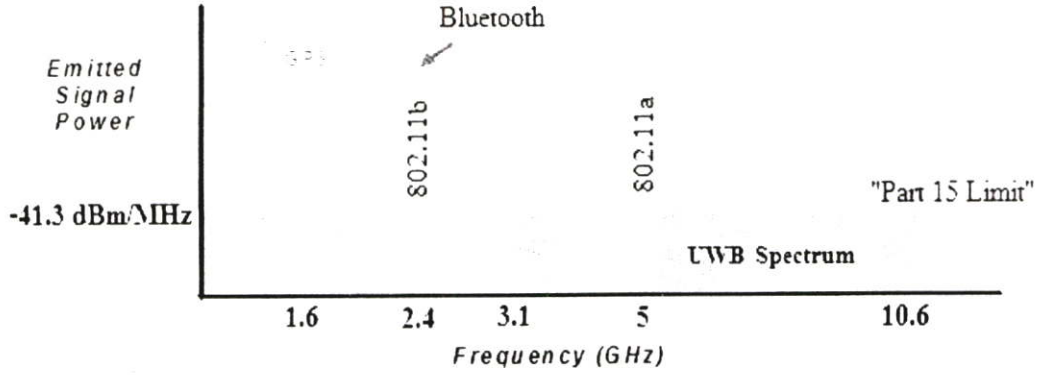
2.3.1 ลักษณะเฉพาะของการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

ระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่แตกต่างจากการสื่อสารทางคลื่นความถี่วิทยุแบบอื่น ๆ โดยข้อได้เปรียบของระบบแบบแถบกว้างยิ่งคือ เป็นระบบสื่อสารที่ไม่ต้องใช้คลื่นพาหะ (radio frequency : RF) เหมือนในระบบอื่น ๆ สัญญาณของระบบแบบแถบกว้างยิ่งจะเป็นสัญญาณพัลส์ (pulse) โดยจะเป็นพัลส์แคบๆ ขนาด 0.2 นาโนวินาที [2] จึงทำให้มีความหนาแน่นแถบความถี่ (spectral density) ที่กว้างมาก ดังนั้นจึงแผ่กระจายครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้าง และเนื่องด้วยระบบนี้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงทำให้สามารถที่จะรองรับอัตราการส่งข้อมูลได้สูงถึง 110 Mb/s ในระยะทางประมาณ 10 เมตร ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าสัญญาณพัลส์ที่ใช้มีขนาดที่แคบมาก จึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบนี้มีการใช้กำลังงานในการส่งต่ำลงไปด้วย จึงนำเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งมาใช้กับระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล

หากเปรียบเทียบระบบนี้กับเทคโนโลยีไร้สาย ตามมาตรฐาน IEEE802.11a แล้วจะพบว่าระบบแถบกว้างยิ่งจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีดังกล่าวทั้งด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูลและการใช้พลังงานที่ต่ำกว่ามาก โดยระบบแถบกว้างยิ่งจะมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงถึง 480 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 2 เมตรและความเร็ว 110 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 10 เมตรดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในขณะที่ Wi-Fi สามารถรับส่งข้อมูลสูงสุดที่ 54 Mbps และหากเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมสำหรับเครือข่ายไร้สายส่วนบุลคล ในปัจจุบันนี้ คือ Bluetooth แล้วระบบแถบกว้างยิ่งจะมีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงกว่า Bluetooth ถึง 100 เท่า รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งกับเทคโนโลยีไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11a และ IEEE802.11g [1] แกน x คือระยะทาง แกน y คือ อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่งโดยเปรียบเทียบกับระบบอื่น ๆ



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งกับเทคโนโลยีไร้สาย ตามมาตรฐาน IEEE 802.11a และ IEEE802.11g [1]



รูปที่ 2.3 ระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่งโดยเปรียบเทียบกับระบบอื่น ๆ

2.3.2 ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

ระบบแถบกว้างยิ่งเป็นระบบที่มีข้อได้เปรียบที่น่าสนใจสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารอาทิเช่น

- มีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน

เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานในการส่งต่ำทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนี้มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณรบกวน ซึ่งทำให้การตรวจหาสัญญาณทำได้ยากและในเอกสารทางการวิจัยกล่าวว่าการส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นไม่ก่อให้เกิดผลการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบคลื่นความถี่วิทยุอื่นๆ เนื่องจากสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งนั้นมีการแพร่กระจายกำลัง

งานในระดับต่ำประมาณระดับของสัญญาณรบกวน (noise floor) จึงทำให้ระบบอื่นมองว่าสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนี้คือ สัญญาณรบกวนจึงถูกกำจัดออกจากการพิจารณาของระบบ

- มีความต้านทานต่อคลื่นหลายวิถี

ในระบบการมอดูเลตทางเวลา (time modulation) แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะทำการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงในระดับหลักร้อยเมกกะบิตต่อวินาที อีกทั้งยังได้ถูกประเมินในส่วนของจำนวนของผู้ใช้งานในระบบการสื่อสารแบบคลื่นวิทยุแบบอิมพัลส์ได้จำนวนที่มากกว่าระบบทั่วไป โดยการสื่อสารไร้สายหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะเกิดคลื่นหลายวิธี ซึ่งเป็นผลมาจากการสะท้อนของสัญญาณหลายๆ ทิศทางที่วัสดุต่างๆ เช่น ผนัง หรืออุปกรณ์สำนักงาน เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งการส่งสัญญาณพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากๆ ทำให้เทคโนโลยีนี้ได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณหลายวิถีน้อยกว่า

- ระบบแถบกว้างยิ่งมีความซับซ้อนน้อยและมีต้นทุนต่ำ

ความซับซ้อนน้อยและต้นทุนที่ต่ำของระบบแถบกว้างยิ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยทางลักษณะเบสแบนด์ (baseband) ของการส่งสัญญาณซึ่งไม่เหมือนกับระบบการส่งสัญญาณวิทยุแบบอื่นๆ โดยที่เครื่องส่งจะทำการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากๆ ในโดเมนเวลาซึ่งสามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นออกไปโดยปราศจากการเพิ่มความถี่วิทยุหรือคลื่นพาห์รวมเข้าไป และในส่วนของการรวมสัญญาณวิทยุนั้นจะเป็นการนำเอาสัญญาณเบสแบนด์รวมเข้าไปกับคลื่นพาห์เพื่อย้ายสัญญาณไปยังแถบความถี่ที่มีคุณลักษณะในการแพร่กระจายคลื่นตามต้องการซึ่งสัญญาณจะถูกแพร่กระจายได้ดีโดยปราศจากความต้องการในการเพิ่มการแปลงความถี่ให้สูงขึ้น (up-conversion) การเพิ่มกำลังให้สูงขึ้น (amplification) การแปลงความถี่ลง (down-converion) และตัวผลิตความถี่ (local oscillator) จึงไม่จำเป็นในเครื่องรับแบบแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกันทำให้ลดความซับซ้อนของระบบและต้นทุนในการผลิตลงไปมาก

- มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลาสำหรับการระบุตำแหน่งและการประยุกต์ใช้ในระบบติดตาม (Tracking)

ด้วยพัลส์ที่มีลักษณะทางโดเมนเวลาที่แคบมากๆ หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากๆ นั่นหมายถึง ระบบคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมจังหวะและคำนวณเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่าระบบดาวเทียมบอกพิกัด (global positioning system : GPS) และระบบคลื่นวิทยุแบบอื่นๆ อีกทั้งด้วยคุณสมบัติในการแพร่กระจายผ่านวัสดุได้ดี จึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่มีการมอดูเลตถูกนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ระยะสั้น เช่น การช่วยเหลือชีวิตและปฏิบัติการป้องกันอาชญากรรม เป็นต้น

2.4 กฎข้อบังคับของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ข้อกำหนดที่สำคัญได้ถูกกำหนดขึ้นมาใช้ในการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งคือการจัดสรรความถี่ในการใช้งานเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันกับระบบเดิมที่มีใช้อยู่ ซึ่งในแต่ละประเทศได้มีการกำหนดกฎข้อบังคับในการใช้งานของระบบแถบกว้างยิ่งตามความเหมาะสมของกิจการโทรคมนาคมของประเทศนั้นๆ อาทิเช่น ประเทศญี่ปุ่น ประเทศสิงคโปร์ และอีกหลายๆ ประเทศที่กำลังพัฒนาระบบการสื่อสาร ซึ่งในสหรัฐอเมริกาก็เช่นกัน มีกลุ่มทำงานที่ใช้ชื่อว่า "Ultra-Wideband Working Group (UWBWG)" ได้พยายามทำการถอดถอนกข้อกำหนดในการใช้งานช่วงความถี่ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจากกฎข้อบังคับเดิมของคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา เพื่อทำการเจรจาหาข้อตกลงร่วมกัน เช่นเดียวกับในยุโรปได้มีการหาข้อตกลงการจัดสรรคลื่นความถี่และการแทรกสอดของความถี่วิทยุซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีการกำหนดแถบความถี่สำหรับการใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่งในสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standards Institute : ETSI) หรือ สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union : ITU)

2.4.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา

ในปี ค.ศ. 1998 คณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้ออกประกาศเกี่ยวกับการตรวจสอบหรือ Notice of Inquiry (NOI) โดยถึงแม้ว่าจะได้คาดการณ์ถึงระดับกำลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณที่มีระดับต่ำมาก ๆ แล้วก็ตาม แต่ยังมีกลุ่มผู้ที่สนับสนุนในระบบเดิมที่มีใช้งานกันอยู่ได้ทำการต่อต้านการนำระบบแถบกว้างยิ่งมาใช้งานสำหรับการสื่อสารของพลเรือนซึ่งข้อเรียกร้องโดยมากจะเกี่ยวข้องกับการคาดการณ์ถึงการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดในแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด อาทิเช่น แถบความถี่ในการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ แถบความถี่ที่สำรองไว้สำหรับคลื่นวิทยุทางดาราศาสตร์และระบบ GPS โดยที่องค์กรบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกาหรือ FAA (Federal Aviation Administration) ได้แสดงความเป็นห่วงต่อการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบความปลอดภัยในกิจการการบินและทิศทางในการค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องส่งในระบบแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกัน

เมื่อเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้ถูกเสนอสำหรับการนำมาใช้ในกิจการการสื่อสารของพลเรือน ซึ่งยังไม่ได้มีการกำหนดใดๆ สำหรับลักษณะสัญญาณที่จะนำมาใช้ จึงได้มีหน่วยงานหนึ่งที่ชื่อว่า DARPA (Defense Advanced Research Project Agency) ได้ทำการออกข้อกำหนดฉบับที่หนึ่งสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งซึ่งอยู่บนพื้นฐานอัตราส่วนแบนด์วิดท์ B_f ของสัญญาณโดยต้องมีค่ามากกว่า 0.25 โดยสามารถกำหนดได้ตามสมการที่ 2.1 [5]

$$B_f = 2\frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \tag{2.1}$$

โดยที่ f_L คือ ความถี่ต่ำสุดของแถบความถี่ที่ใช้งานในระบบ

f_H คือ ความถี่สูงสุดของแถบความถี่ที่ใช้งานในระบบ

ในวันที่ 14 กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 คณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา ได้ออกกฎสำหรับระบบแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง และยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของคำประกาศ และระเบียบการฉบับที่หนึ่ง ได้เผยแพร่ต่อสาธารณชนในวันที่ 22 เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งในเอกสารได้กล่าวถึงการอนุญาตใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่งทั้ง 4 ประเภทและการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายพลังงานสำหรับการใช้ในประเภทต่าง ๆ โดยจากนิยามข้างต้นได้ทำการลดค่าการจำกัด B_f ไม่ให้ต่ำกว่า 0.25 ตามสมการที่ 2.1 หรือต้องมีการใช้แถบความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz อีกทั้งยังกำหนดความถี่กลางของระบบแถบกว้างยิ่งดังสมการที่ 2.2 [2]

$$f_C = \frac{(f_H + f_L)}{2} \tag{2.2}$$

โดยที่ f_C คือความถี่กลางของแถบความถี่ที่ใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่ง

f_L คือ ความถี่ต่ำสุดของแถบความถี่ที่ใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่ง

f_H คือความถี่สูงสุดของแถบความถี่ที่ใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่ง

ข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานโดยคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1 สำหรับใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร

ตารางที่ 2.1 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดยคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาสำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร [2]

ความถี่ [MHz]	ภายในอาคาร	ภายนอกอาคาร
	EIRP in dBm	EIRP in dBm
960 – 1,610	-75.3	-75.3
1,610 – 1,990	-53.3	-63.3
1,990 – 3,100	-51.3	-61.3

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ความถี่ [MHz]	ภายในอาคาร	ภายนอกอาคาร
	EIRP in dBm	EIRP in dBm
3,100 – 10,600	-41.3	-41.3
สูงกว่า 10,600	-51.3	-61.3

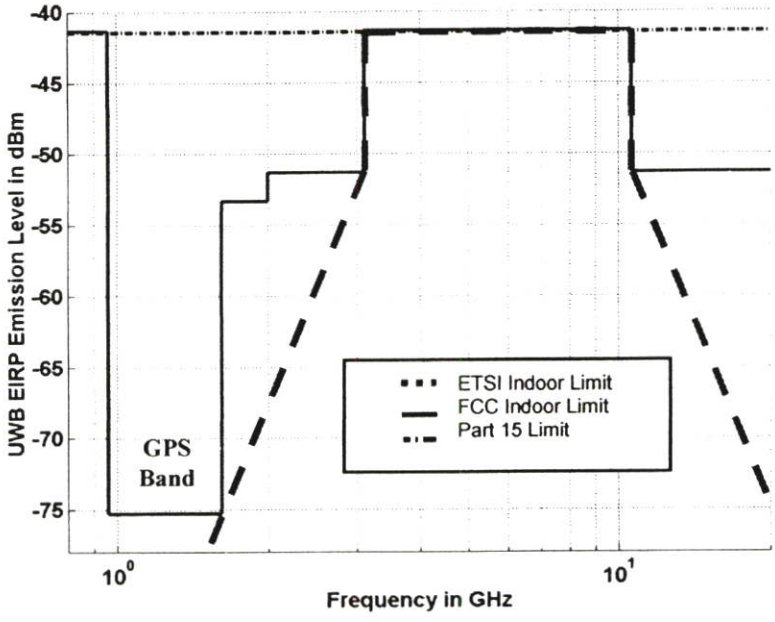
2.4.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป

ปัจจุบันโครงร่างของข้อกำหนดระบบแถบกว้างยิ่งในทวีปยุโรปอยู่ในช่วงรอข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวกับผลกระทบของระบบแถบกว้างยิ่งบนระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่ โดยทางยุโรปนั้นบางส่วนของข้อกำหนดจะรัดกุมกว่าของทางสหรัฐอเมริกา เพราะทางด้านยุโรปนั้นในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ต้องแสดงให้เห็นว่าส่งผลกระทบน้อยหรือไม่ส่งผลเสียหายต่อระบบเดิมที่มีอยู่โดยข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย ITU หรือ ETSI แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2

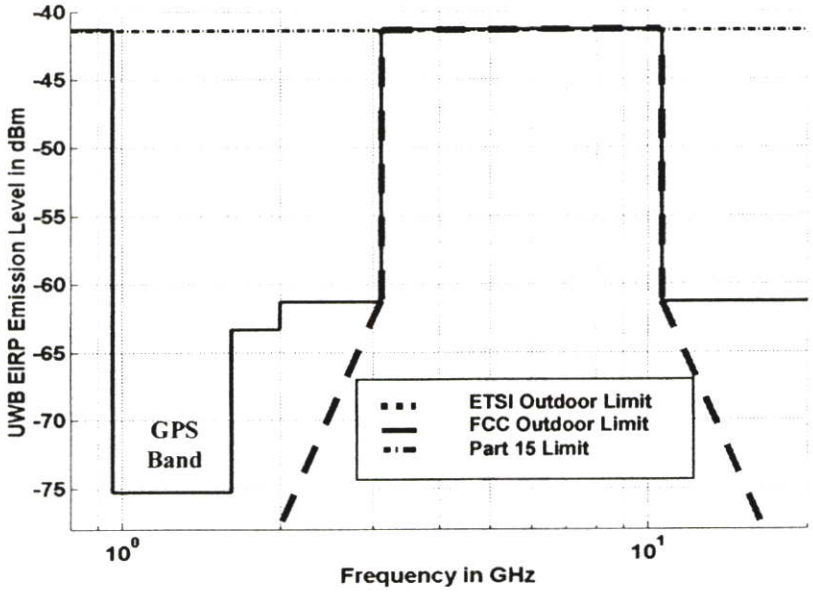
ตารางที่ 2.2 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร [2]

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

โดยในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่างคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาและ ETSI ภายในและภายนอกอาคารตามลำดับ



รูปที่ 2.4 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา และ ETSI ของระบบแถบกว้างยิ่งภายในอาคาร [2]

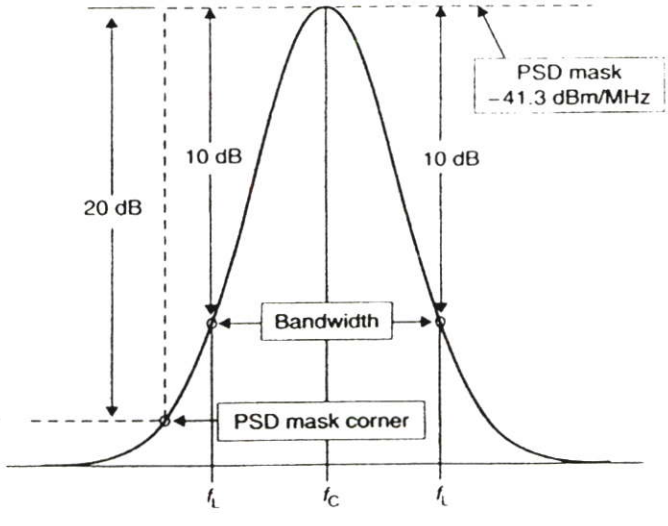


รูปที่ 2.5 ข้อกำหนดการจำกัดสเปกตรัมความถี่โดยคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา และ ETSI ของระบบแถบกว้างยิ่งภายนอกอาคาร [2]

2.5 การกำหนดสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

2.5.1 คำจำกัดความของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

คุณลักษณะโดยทั่วไปของสัญญาณแถบกว้างยิ่งและระบบของสัญญาณประกอบด้วยการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งและระบบการทดสอบ เช่น การสื่อสารความเร็วสูงภายในบ้านหรือแม้กระทั่งอุปกรณ์เครือข่ายทางธุรกิจ โดยแต่ละอุปกรณ์นั้นต้องสามารถทำงานอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งอุปกรณ์นั้นจะถูกออกแบบเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถที่จะทำงานได้ภายในอาคารหรือต้องเข้ากันได้กับอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งอาจจะถูกนำมาใช้ในลักษณะการสื่อสารแบบจุดต่อจุด โดยตัวแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งนั้นต้องทำการออกแบบและตรวจสอบเพื่อรับรองว่าการแพร่กระจายคลื่นในช่วงแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 20 dB ลงมาจากระดับสูงสุดของสเปกตรัมที่กำหนดไว้ต้องอยู่ภายในแถบความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่ง อีกทั้งช่วงแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดทดสอบ ณ ตำแหน่งที่ต่ำกว่าระดับสูงสุดของการแพร่กระจายลงมา 10 dB มีค่าเท่ากับ 500 MHz โดยระดับที่ยินยอมให้แพร่กระจายกำลังงานสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นถูกกำหนดไว้ที่ –41.3 dBm/MHz เพราะฉะนั้นในการออกแบบสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้นจะต้องพิจารณาร่วมกับระดับของแบนด์วิดท์ที่ 10 dB จากระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานสูงสุด (PSD mask) ซึ่งเป็นช่วงที่มีแบนด์วิดท์น้อยที่สุดและระดับแบนด์วิดท์ที่ 20 dB ซึ่งเป็นตำแหน่งจุดหักมุมในบริเวณช่วงความหนาแน่นแถบกำลังงานที่ใช้ในการสื่อสารแถบกว้างยิ่งโดยรูปที่ 2.6 จะแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดดังกล่าว [2]

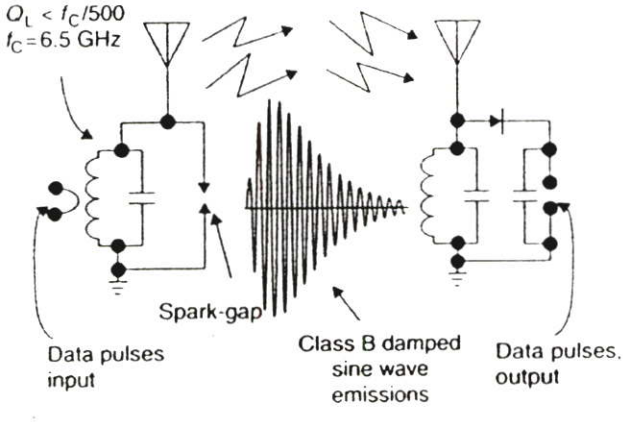


รูปที่ 2.6 จุดพิจารณาในการออกแบบสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.5.2 วิธีสร้างสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

การสร้างสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้นสามารถสร้างขึ้นโดยใช้วิธีการต่าง ๆ กันเช่นเลือกใช้แหล่งจ่ายสัญญาณอิมพัลส์ที่มีความแคบมากๆ ส่งผ่านตัวกรองความถี่แบบช่วงที่กำหนดผ่าน (band-pass filter) หรือสร้างจากการกำหนดรูปร่างของสัญญาณแถบกว้างยิ่งและกำหนดจุดต่างๆ ของสัญญาณให้เป็นไปตามข้อกำหนดของสเปกตรัม ซึ่งทางเลือกต่อมาก็คือ การใช้วิธีการมอดูเลตแบบทั่วไปของระบบคลื่นวิทยุ อาทิเช่นระบบการแผ่สเปกตรัมลำดับเส้นตรง (direct sequence spread spectrum :DSSS) หรือระบบมัลติเพล็กซ์แบบตั้งฉากในโดเมนความถี่ (OFDM) โดยรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงแนวคิดของระบบที่เรียกว่า "retro-UWB" ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของตัวกรองความถี่แบบกระตุ้นด้วยอิมพัลส์ซึ่งสามารถกำหนดให้เป็นไปตามกฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งได้ [2]



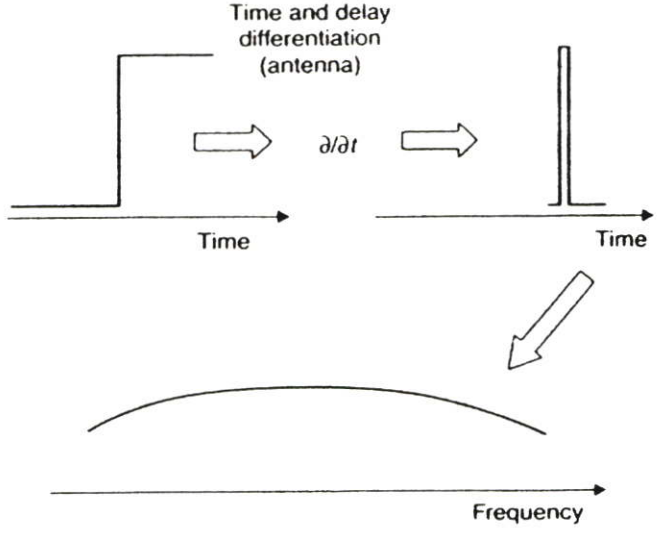
รูปที่ 2.7 แนวคิดในการสร้างระบบแถบกว้างยิ่ง [2]

ในแบบจำลองนี้มีลักษณะเฉพาะของระบบกระตุ้นแบบไร้สาย (wireless spark system) นั้น ในส่วนของเครื่องส่งจะเป็นแหล่งจ่ายข้อมูลแบบดิจิตอล ซึ่งแหล่งจ่ายพลังงานอิมพัลส์ที่ตำแหน่งอินพุทจะถูกส่งไปยังหม้อแปลงและอุปกรณ์ที่เรียกว่า "spark gap" โดยที่ค่า Q หรือ "sharpness" ของวงจรรีโซแนนซ์จะถูกกำหนดให้เป็นไปตามผลของค่าแบนด์วิดท์นั่นก็คือเท่ากับ 500 MHz ในส่วนของเครื่องรับนั้นจะเป็นตัวตรวจจับระดับของแอมปลิจูดที่เป็นไปตามตัวกรองข้อมูล ซึ่งวงจรนี้แสดงให้เห็นถึงหลักการอย่างง่ายของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งภายใต้ข้อกำหนดของคณะกรรมมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา

74429

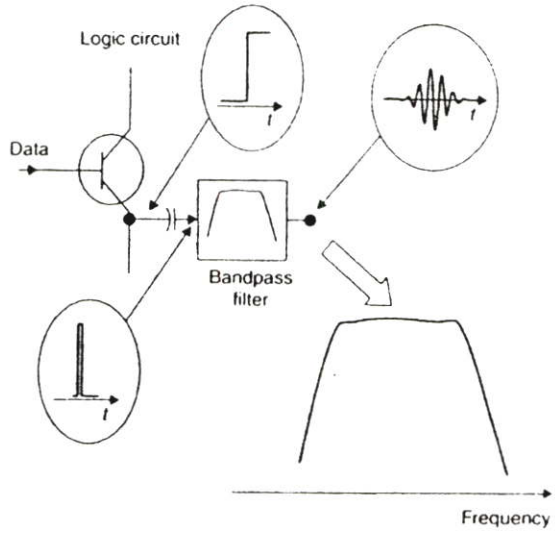
2.5.3 การออกแบบสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

ในการออกแบบสำหรับสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้นจะขึ้นอยู่กับกฎและข้อบังคับ โดยระดับการแพร่กระจายกำลังงานที่ได้รับอนุญาต (ตามข้อกำหนดของคณะกรรมมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา) สำหรับสัญญาณแถบกว้างยิ่งถูกกำหนดไว้ที่ –41.3 dBm/MHz ดังนั้นกำลังงานที่แพร่กระจายรวมทั้งหมดจะขึ้นกับจำนวนของการใช้งานสเปกตรัมนั่นก็หมายความว่าเราต้องการใช้แบนด์วิดท์มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อจะทำให้เกิดการแพร่กระจายของกำลังงานมากที่สุดและในการออกแบบโดยอาศัยรูปร่างของสัญญาณนั้นจะเป็นฟังก์ชันของเวลาซึ่งความสัมพันธ์นี้จะอยู่ในลักษณะทางคณิตศาสตร์แสดงโดยการแปลงฟูริเยร์ อีกวิธีการหนึ่งของการสร้างสัญญาณแถบกว้างยิ่งก็คือใช้สัญญาณที่มีรูปร่างของขอบมุมที่ชัดเจน เมื่อพิจารณาในโดเมนเวลาเหมือนกับฟังก์ชันขั้นบันได (step function) หรือพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความแคบมากๆ ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะเป็นไปตามตัวกรองความถี่ที่เรียกว่า (band-shaping filter) โดยรูปที่ 2.8 จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ [2]



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความชันขอบของสัญญาณกับการสร้างสัญญาณแถบกว้างยิ่ง [2]

แหล่งจ่ายสัญญาณอิมพัลส์ที่เป็นอินพุทป้อนให้กับตัวกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านนั้น เป็นวิธีที่ง่ายและได้ผลในการสร้างสัญญาณแถบกว้างยิ่งดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9 [2]



รูปที่ 2.9 เอาท์พุทจากวงจรลอจิกที่ใช้สร้างสัญญาณแถบกว้างยิ่ง [2]

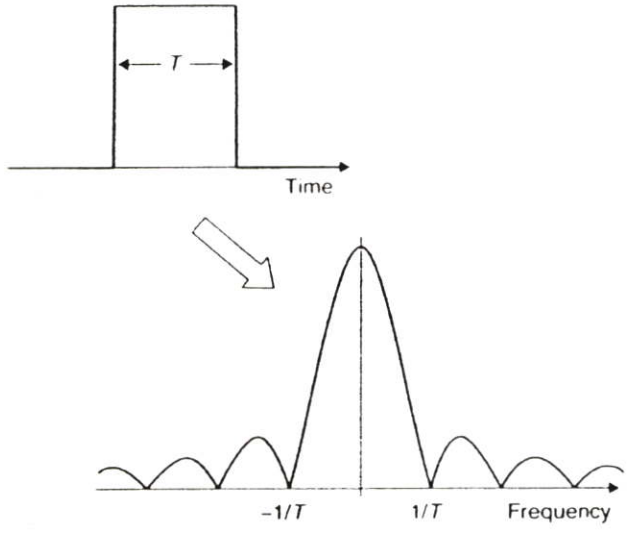
ในวิธีการอีกแบบหนึ่งนั้นยังสามารถสังเคราะห์สัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มีความถูกต้องทั้งในรูปร่างสัญญาณและตำแหน่งของสัญญาณในสเปกตรัมความถี่ด้วยการเลือกรูปร่างของสัญญาณอีกทั้งการกำหนดแบนวิดท์ที่เหมาะสม เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจะทำการพิจารณาตัวอย่างของสัญญาณพัลส์มูลฐาน (base band pulse) ที่เรียกว่าสัญญาณที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม (rectangular shaped signal) แทนด้วยฟังก์ชัน $r(t)$ โดยมีจุดศูนย์กลางที่ $t=0$ และมีความกว้างเท่ากับ T พิโกวินาที (picoseconds) โดยมีนิยามเป็นไปตามสมการที่ 2.3 [2]

$$r(t)=1,\ \left\{-\frac{T}{2}<t<\frac{T}{2}\right\};\quad 0\ \textit{elsewhere} \tag{2.3}$$

โดยการแปลงฟูริเยร์ของ $r(t)$ นั้นจะได้สัญญาณที่อยู่ในโดเมนความถี่ $R(f)$ ซึ่งมีนิยามเป็นไปตามสมการที่ 2.4

$$R(f)=\frac{T\sin(\pi Tf)}{\pi Tf} \tag{2.4}$$

ในรูปที่ 2.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ $r(t)$ และ $R(f)$ โดยการแปลงฟูริเยร์ ซึ่งจะเห็นว่ายิ่งทำให้สัญญาณมีความแคบมากเท่าไหร่ก็จะทำให้สเปกตรัมความถี่กว้างมากเท่านั้นนั่นก็หมายความว่าการกำหนดความกว้างของสเปกตรัมความถี่นั้นสามารถทำในเทอมของความกว้างของพัลส์ในโดเมนเวลาได้



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของพัลส์โดยการแปลงฟูริเยร์ [2]

2.6 รูปแบบของสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

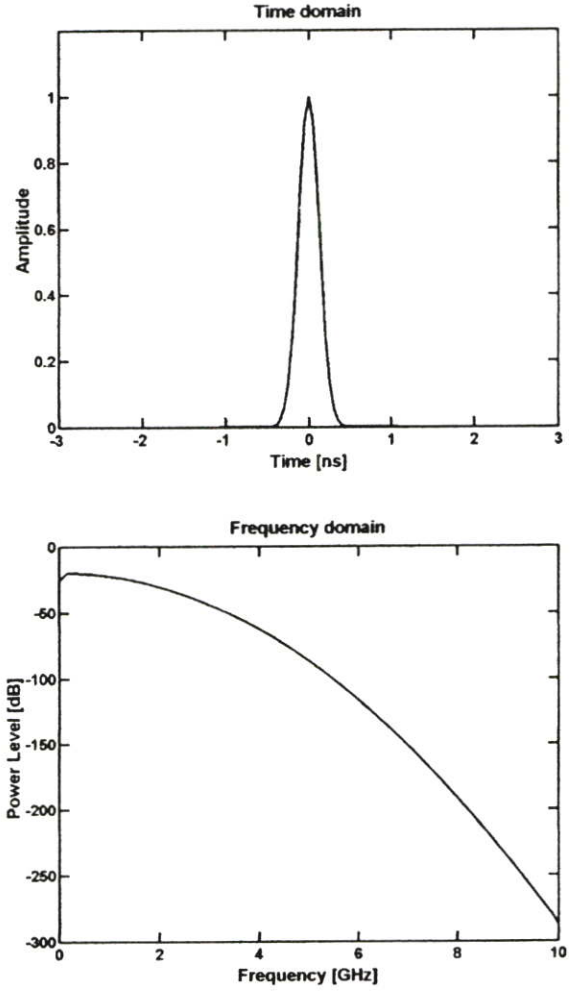
ในปัจจุบันนี้ยังไม่มีมาตรฐานในการกำหนดรูปแบบการใช้ของสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่ง แต่โดยทั่วไปมักจะนิยมใช้สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งพัลส์ที่นำมาวิเคราะห์ต้องอยู่ภายในแถบความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งและแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดวัด ณ ตำแหน่งที่ต่ำกว่าระดับสูงสุดของการแพร่กระจายลงมา 10 dB หรือเท่ากับ 500 MHz โดยระดับที่ยินยอมให้แพร่กระจายกำลังงานสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นถูกกำหนดไว้ที่ –41.3 dBm/MHz สามารถที่จะแยกเป็นประเภทต่าง ๆ ของสัญญาณได้ดังนี้

2.6.1 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์

ประเภทของรูปคลื่นที่เรียกว่า รูปคลื่นแบบเกาส์ (Gaussian waveform) นั้นได้มาจากการที่มีนิยามทางคณิตศาสตร์เหมือนกับฟังก์ชันเกาส์ ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำโดยส่วนสำคัญของรูปคลื่นแบบเกาส์นั้นคือพัลส์แบบเกาส์ซึ่งมีนิยามเป็นไปตามสมการ 2.5 [5] และสามารถแสดงรูปคลื่นของสัญญาณดังรูปที่ 2.11

$$y_{g_1}(t) = K_1 e^{-(t/\tau)^2} \tag{2.5}$$

โดยที่ $-\infty < t < \infty$, t คือ สเกลทางเวลา (time-scaling) และ K_1 เป็นค่าคงที่



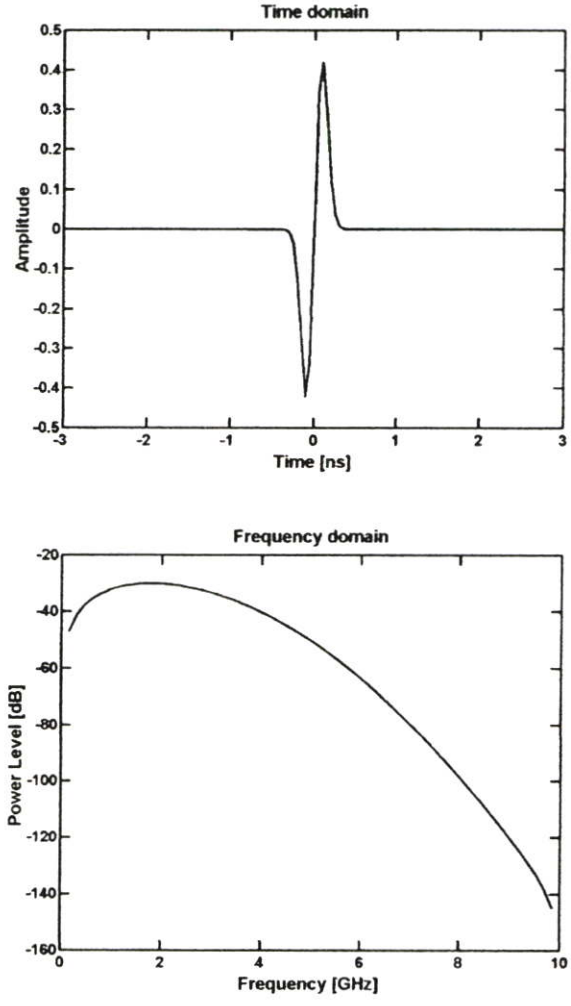
รูปที่ 2.11 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ [5]

2.6.2 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์โมโนไซเคิล

สัญญาณพัลส์แบบเกาส์โมโนไซเคิล (Gaussian monocycle) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของพัลส์แบบเกาส์โดยมีรูปแบบตามสมการที่ 2.6 [5] และแสดงรูปสัญญาณดังรูปที่ 2.12

$$y_{g_2}(t) = K_2 \frac{-2t}{\tau^2} e^{-(t/\tau)^2} \tag{2.6}$$

โดยที่ $-\infty < t < \infty$, t คือ สเกลทางเวลา และ K_2 เป็นค่าคงที่



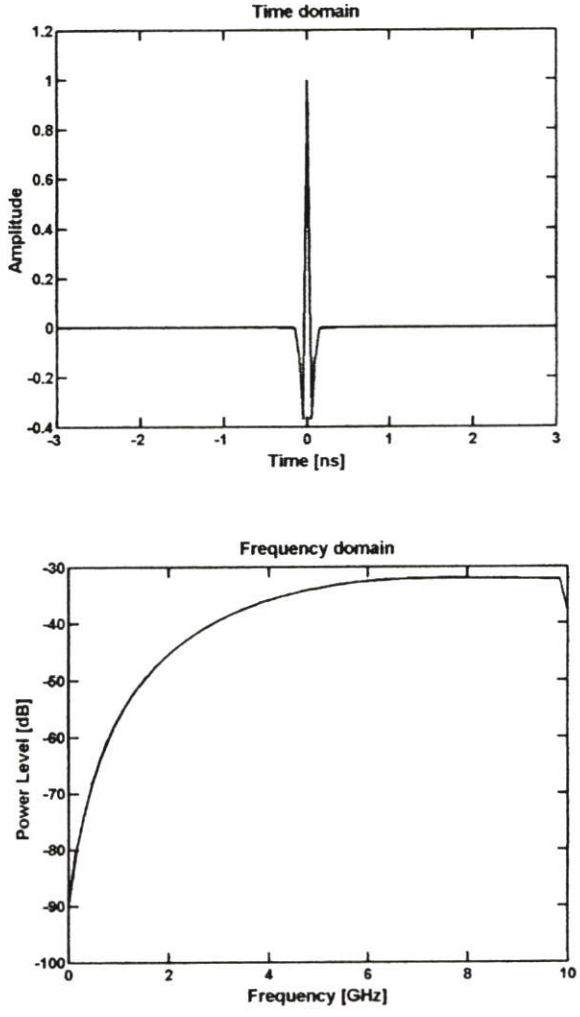
รูปที่ 2.12 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์โมโนไซเคิลทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ [5]

2.6.3 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์ดับเลต

สัญญาณพัลส์แบบเกาส์ดับเลต (Gaussian doublet) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอนุพันธ์อันดับสองของพัลส์แบบเกาส์โดยมีรูปแบบตามสมการที่ 2.7 [5] และแสดงรูปสัญญาณดังรูปที่ 2.13

$$y_{g_3}(t) = K_3 \frac{-2}{\tau^2}\left(1 - \frac{2t^2}{\tau^2}\right)e^{-(t/\tau)^2} \tag{2.7}$$

โดยที่ $-\infty < t < \infty$, t คือตัวสเกลทางเวลา และ K_3 เป็นค่าคงที่



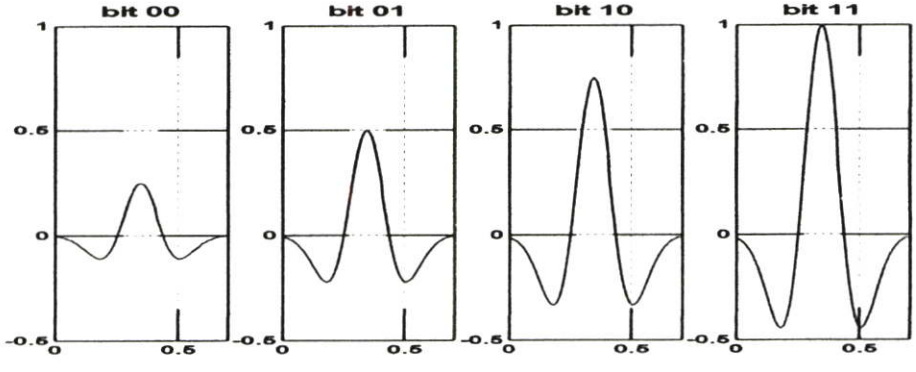
รูปที่ 2.13 รูปสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ดับเลตทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ [5]

2.7 วิธีการมอดูเลตสัญญาณที่ใช้ในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ในการส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นสามารถทำการมอดูเลตได้หลายวิธีแต่ที่นิยมนำมาใช้มีอยู่ด้วยกัน 3 วิธีคือ การมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามแอมพลิจูดของสัญญาณ (Pulse Amplitude Modulation) การมอดูเลตพัลส์แบบตำแหน่ง (Pulse Position Modulation) และการมอดูเลตแบบสองเฟส (Bi - Phase Modulation) [2],[4]

2.7.1 การมอดูเลตแอมพลิจูด

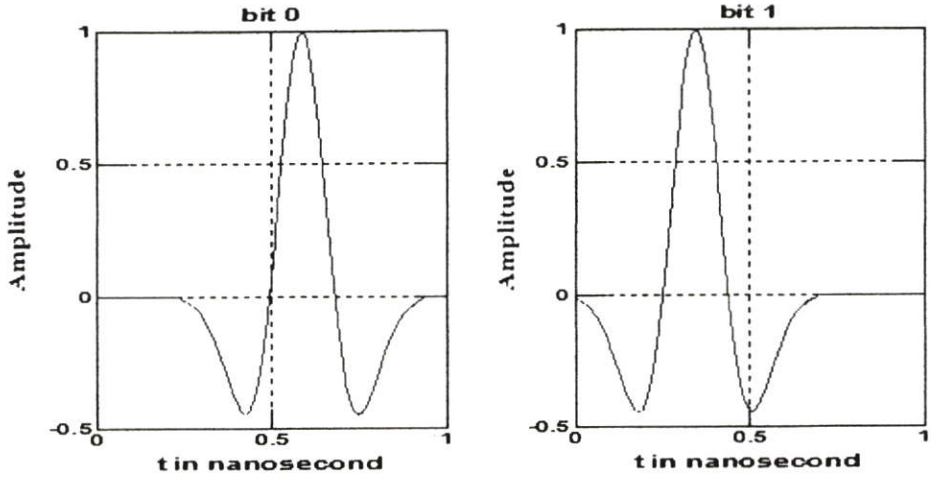
การมอดูเลตสัญญาณพัลส์แอมพลิจูด (PAM) นั้นจะอยู่บนพื้นฐานการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลกับขนาดของสัญญาณพัลส์ โดยที่ในรูปที่ 2.14 แสดงสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่ทำการมอดูเลตแอมพลิจูดของพัลส์โดยมีทั้งหมด 4 ระดับ



รูปที่ 2.14 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามขนาด 4 ระดับ

2.7.2 การมอดูเลตตามตำแหน่งพัลส์

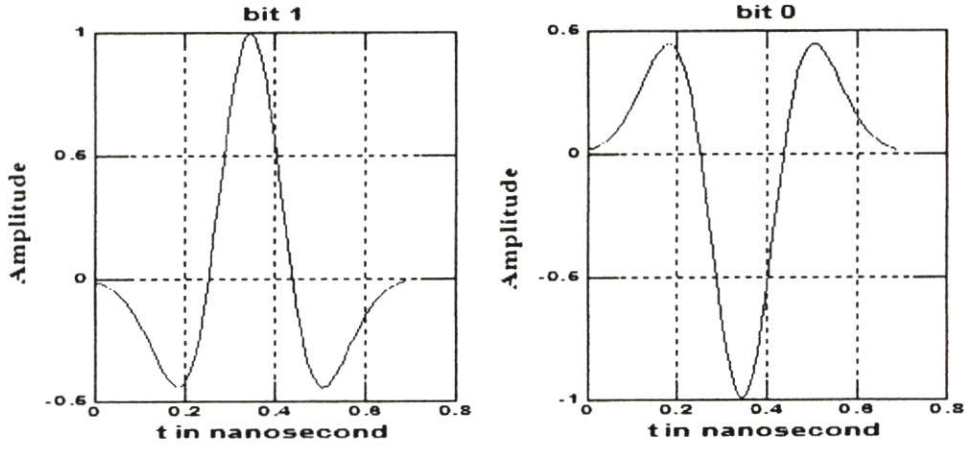
การมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามตำแหน่ง (PPM) นั้นจะทำการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลตามตำแหน่งของสัญญาณพัลส์โดยที่ตำแหน่งของสัญญาณพัลส์ที่ใช้แทนสัญญาณข้อมูลสามารถมีได้สองตำแหน่งหรือมากกว่านั้น โดยที่ในรูปที่ 2.15 แสดงการมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามตำแหน่งแบบ 2 ตำแหน่ง บิต "0" นั้นจะแทนตำแหน่งของสัญญาณพัลส์ที่อยู่หลังตำแหน่งปกติ (Nominal-Position) และบิต "1" จะแทนตำแหน่งพัลส์ที่อยู่ก่อนตำแหน่งปกติ โดยช่วงเวลาประวิงเวลาระหว่างตำแหน่งของสัญญาณทั้งสองต้องมีค่าที่มากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการแทรกสอดกันระหว่างสัญญาณอิมพัลส์



รูปที่ 2.15 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามตำแหน่ง (PPM)

2.7.3 การมอดูเลตแบบสองเฟส

การมอดูเลตสัญญาณแบบสองเฟสนั้นจะอยู่บนพื้นฐานของการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลตามเฟสของสัญญาณพัลส์โดยที่ในกรณีนี้จะแทนสัญญาณข้อมูลหนึ่งบิตด้วยสัญญาณพัลส์หนึ่งลูกคลื่น ซึ่งการมอดูเลตสัญญาณพัลส์แบบสองเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแบบสองเฟส

2.8 การประยุกต์และการนำระบบแถบกว้างยิ่งไปใช้งาน

ระบบแถบกว้างยิ่งนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่

- การติดต่อสื่อสารและระบบเซนเซอร์
- ระบบเรดาร์

2.8.1 การติดต่อสื่อสารและระบบเซนเซอร์

ในการติดต่อสื่อสารในปัจจุบันนี้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ภายในบ้าน ไม่ว่าเป็นโทรศัพท์มือถือ พีดีเอ เครื่องเล่นเพลงแบบพกพา กล้องดิจิตอล เครื่องพิมพ์ ฯลฯ ล้วนมีการติดต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกันมากขึ้น ซึ่งหากอุปกรณ์ต่างๆ ล้วนสามารถนำการติดต่อสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งมาประยุกต์เพื่อการติดต่อสื่อสารได้ทั้งสิ้น เช่น การดาวโหลดตัวอย่างภาพยนตร์จากจุดให้บริการ นอกจากจะนำระบบแถบกว้างยิ่งไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ที่ใช้ภายในบ้านแล้วยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ได้ อาทิเช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ซึ่งแต่เดิมจะมีการใช้สายในการส่งผ่านข้อมูลที่วัดได้จากร่างกายผู้ป่วยไปยังเครื่องที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งหากมีการนำระบบแถบกว้างยิ่งนี้ไปประยุกต์ใช้งานก็จะทำให้ความยุ่งยากเกี่ยวกับสายต่างๆ หมดไป เนื่องจากข้อดีของแถบกว้างยิ่งที่ใช้กำลังส่งที่ต่ำจึงทำให้ไม่ส่งผลกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ

2.8.2 ระบบเรดาร์

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบเรดาร์ เพราะเป็นเทคโนโลยีที่มีราคาต้นทุนต่ำ เนื่องจากระบบเรดาร์เป็นระบบที่ยังมีความต้องการของตลาดในอนาคต สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัตถุ ตรวจสอบเพื่อหลีกเลี่ยงการชน การตรวจจับความเร็วบนถนน ใช้เป็นระบบรักษาความปลอดภัยส่วนบุคคลในการตรวจสอบการเคลื่อนที่ในพื้นที่ที่เราต้องการความปลอดภัยสูงหรือพื้นที่ที่ต้องการความเข้มงวดในการตรวจสอบสูง ประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบทะลุผ่านวัสดุที่ใช้ทำอาคารเช่น ไม้ อิฐ อิฐบล็อก ไฟเบอร์ พลาสติกและคอนกรีต

2.9 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งหรือ Ultra wideband ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันรวมถึงการกำหนดกฎเกณฑ์ในการใช้งาน ข้อบังคับต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นช่วงความถี่ที่ใช้งานซึ่งจะสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ของระบบ ระดับกำลังงานที่แพร่กระจายทั้งภายในและภายนอกอาคาร ที่กำหนดโดยองค์กรที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องอาทิเช่น คณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC), Ultra-Wideband Working Group (UWBWG) และสถาบันกำหนดมาตรฐาน

สหรัฐอเมริกา (FCC), Ultra-Wideband Working Group (UWBWG) และสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (ETSI) หรือ สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) เป็นต้น การกำหนดสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง รวมถึงรูปแบบของสัญญาณที่จะนำมาใช้ในระบบแถบกว้างยิ่งที่ได้แบ่งตามประเภทต่างๆ เช่น พัลส์แบบเกาส์ พัลส์แบบเกาส์โมโนไซเคิลและพัลส์แบบเกาส์คับเลต อีกทั้งเทคนิควิธีการมอดูเลตข้อมูลข่าวสารอันประกอบไปด้วย การมอดูเลตแอมพลิจูด การมอดูเลตตามตำแหน่งพัลส์ และการมอดูเลตแบบสองเฟส และสุดท้ายในบทนี้กล่าวถึงการประยุกต์และการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ของการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นองค์ความรู้เบื้องต้นของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

บทที่ 3
การวิเคราะห์ช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง และวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

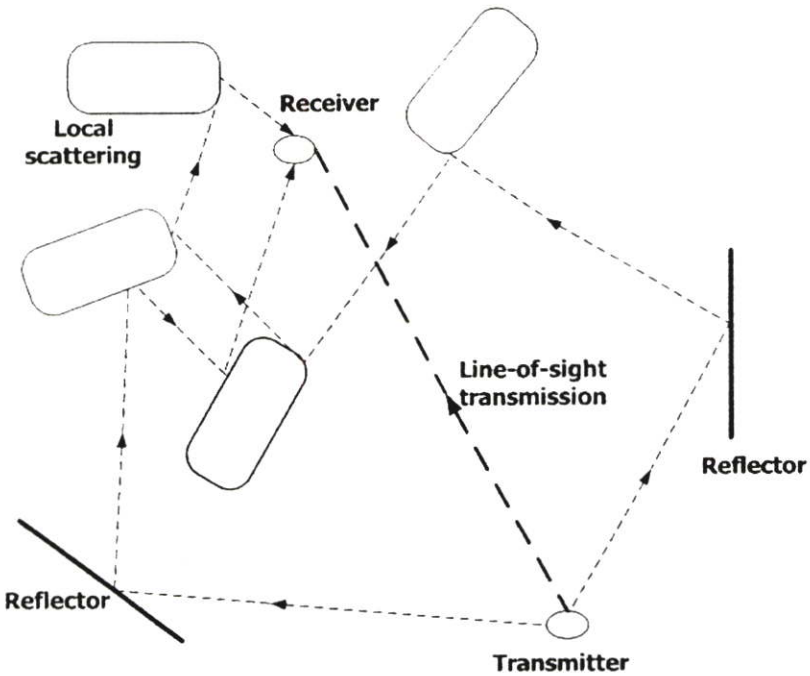
3.1 กล่าวนำ

การแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมต่างๆ นั้น เมื่อสัญญาณส่งผ่านจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับจะเกี่ยวโยงไปถึงลักษณะของช่องสัญญาณ โดยในทฤษฎีของการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์นั้นได้มีทฤษฎีและเทคนิคในการทดสอบสำหรับการจำลองแบบการแพร่กระจายของสัญญาณไว้แล้ว โดยในการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งทั้งสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคารเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญด้วยเพราะผลกระทบที่เกี่ยวกับทิศทางขอบเขตของเส้นทางและปัจจัยอื่น ๆ ล้วนแล้วแต่เป็นการประเมินค่าความสำเร็จของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ถ้าช่องสัญญาณมีคุณลักษณะที่ดีแล้วผลของการรบกวนและการแทรกสอดของแหล่งกำเนิดสัญญาณอื่นๆ ที่จะทำให้ลดลงได้โดยการออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับที่เหมาะสม โดยลักษณะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของการจำลองช่องสัญญาณวิทยุคือการตรวจสอบถึงฟังก์ชันการกระจายตัวของพารามิเตอร์ช่องสัญญาณ โดยทั่วไปการกระจายตัวเหล่านี้มักจะได้มาจากผลการทดสอบหรือผลการจำลองบนพื้นฐานของความถูกต้องหรือมีลักษณะตามสภาวะแวดล้อมที่ชัดเจน

ในการจำลองแบบช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งนั้นมีหลักเกณฑ์จำนวนมากที่ถูกนำมาพิจารณาเพื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนของลักษณะการเกิดของช่องสัญญาณ โดยความแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบแถบกว้างยิ่งและเทคนิคการจำลองช่องสัญญาณ เนื่องด้วยสภาพความเป็นจริงในการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งหรือผลที่ขึ้นอยู่กับความถี่ที่เปลี่ยนไปนั้นไม่สามารถที่จะละเลยได้ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ การส่งผ่านของสัญญาณ การสะท้อนของสัญญาณและผลอื่นๆ ควรที่จะนำมาพิจารณาตามความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป

3.2 ช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบกว้างยิ่ง

เทคนิคในการจำลองช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งมีหลายแบบจำลองอาทิเช่น แบบจำลองความไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time) แบบจำลองหลายวิถี หรือแบบจำลองผลตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response model) จะกล่าวถึงแบบจำลองหลายวิธีเพราะเป็นแบบจำลองที่มีความสะดวกและง่ายในการแสดงลักษณะเฉพาะของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง เหตุเพราะว่า ตำแหน่งของเพดาน กำแพง ประตู เฟอร์นิเจอร์ที่อยู่ภายในอาคารจะส่งผลถึงการส่งผ่านสัญญาณที่เกิดขึ้นหลายเส้นทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับดังรูปที่ 3.1 [4]



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งแบบหลายวิถีภายในอาคาร [4]

เพราะฉะนั้นสัญญาณแต่ละสัญญาณที่เข้ามาถึงยังเครื่องรับนั้นจะมีขนาด เฟส และเวลาประวิง (time delay) ที่แตกต่างกัน โดยแบบจำลองนี้ในแกนของเวลาประวิงจะถูกแบ่งออกเป็นช่วงเวลาเล็กๆ ที่เรียกว่า " bins" ซึ่งในแต่ละ bin นั้นได้ถูกสมมุติให้ประกอบไปด้วยองค์ประกอบในแต่ละส่วนของสัญญาณแบบหลายวิถี โดยความเป็นไปได้ของเส้นทางของสัญญาณที่มากกว่าหนึ่งเส้นทางภายใน bin นั้นจะถูกแยกออกไปซึ่งความกว้างที่เหมาะสมของ bin นั้นจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของลักษณะจำเพาะในการทดสอบนั้น ๆ โดยปรากฏการณ์ของการเกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบหลายวิถีนั้นสามารถแสดงให้เห็นในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นไปตามผลตอบสนองอิมพัลส์แบบไม่ต่อเนื่องของช่องสัญญาณดังสมการที่ (3.1) [4]

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

โดยที่ α_l คือ ปัจจัยการลดทอนทางขนาดในเส้นทางที่ l ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาและระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ

T_m คือ ความละเอียดทางเวลาที่น้อยที่สุดของพัลส์

l คือ จำนวนขององค์ประกอบหลายวิถี

$\delta(t)$ คือ ฟังก์ชัน Dirac delta

3.3 ระบบในการทดสอบช่องสัญญาณ

การทดสอบช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งนั้นมีเทคนิคในการทดสอบอยู่ 2 โดเมน คือ แบบแรกใช้เทคนิคการกวาดด้านความถี่ (frequency sweeping technique) ซึ่งสามารถทำการทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่ (frequency domain : FD) ซึ่งการใช้วิธีนี้ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณนั้นสามารถทดสอบได้จากการทดสอบพารามิเตอร์ S_{21} หรือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coeffecient) ซึ่งจะถูกบันทึกโดยเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer : VNA) และในแบบที่สองสามารถทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนเวลา (time domain : TD) โดยใช้เครื่องทดสอบช่องสัญญาณซึ่งอยู่บนพื้นฐานในการส่งสัญญาณแบบอิมพัลส์หรือสัญญาณแบบ DSSS (direct sequence spread spectrum : DSSS) ด้วยวิธีการนี้พัลส์แคบจะถูกส่งออกไปยังช่องสัญญาณและผลตอบสนองอิมพัลส์ช่องสัญญาณจะถูกทดสอบโดยใช้เครื่อง DSO (digital sampling oscilloscope) [5]

3.3.1 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่

อุปกรณ์หลักในการสร้างและรับสัญญาณวิทยุเพื่อทำการทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่นั้นคือเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จัดการเกี่ยวกับการทดสอบทั้งหมดโดยสัญญาณที่ใช้ตรวจสอบนั้นจะเป็นกลุ่มของสัญญาณแถบแคบรูปไซด์ (sinusoid) ซึ่งทำการกวาดตลอดแถบความถี่ที่ต้องการพิจารณาประกอบกับการใช้สายอากาศแถบกว้าง โดยในการจำลองช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้นสามารถที่จะทำได้ในส่วนของการประมวลผลข้อมูลและเมื่อใช้วิธีการทดสอบสัญญาณในโดเมนความถี่ ช่วงเวลาของช่องสัญญาณที่ทำการทดสอบต้องถูกกำหนดให้คงที่เพื่อรักษาเงื่อนไขของช่องสัญญาณในช่วงการกวาดความถี่โดยที่ค่าสูงสุดของเวลาการกวาดความถี่ถูกจำกัดโดยเวลาร่วมนัย (coherence time) ของช่องสัญญาณ ถ้าเวลาการกวาดนานกว่าเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณแล้วช่องสัญญาณอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาในการกวาดความถี่สำหรับการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนั้น จำต้องใช้เทคนิควิธีการอื่นเข้ามาทำการตรวจสอบแทน ซึ่งประสิทธิภาพของการทดสอบในโดเมนความถี่นั้นจะถูกกำหนดโดยค่าสูงสุดของเวลาประวิงของช่องสัญญาณ ซึ่งขอบเขตด้านบนของเวลาประวิงที่ตรวจพบ τ_{max}

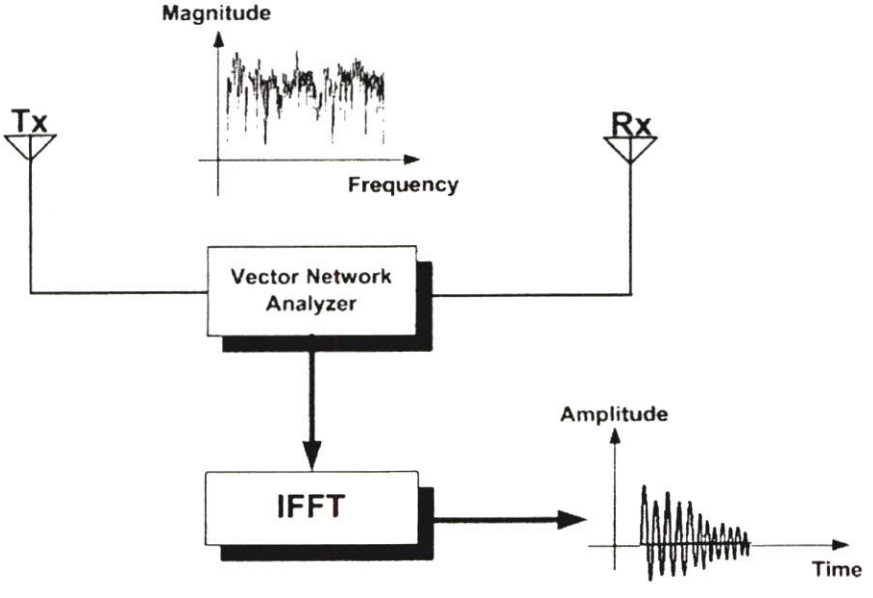
สามารถกำหนดโดยจำนวนจุดของความถี่ที่ใช้ในการกวาดแต่ละครั้งและแบนด์วิดท์ B ซึ่งนิยามตามสมการที่ (3.2) [4]

$$\tau_{\max} = \left(N_{smp} - 1\right) / B \tag{3.2}$$

โดยที่ N_{smp} คือ จำนวนจุดความถี่

B คือ แบนด์วิดท์

ในการที่จะทำการทดสอบสัญญาณโดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์นั้นผลที่ได้จากการทดสอบคือ ผลตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการทดสอบจากนั้นจะใช้ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (inverse fast Fourier transform : IFFT) การแปลงข้อมูลจากการทดสอบในโดเมนความถี่ให้อยู่ในรูปแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ของโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.2 [4]

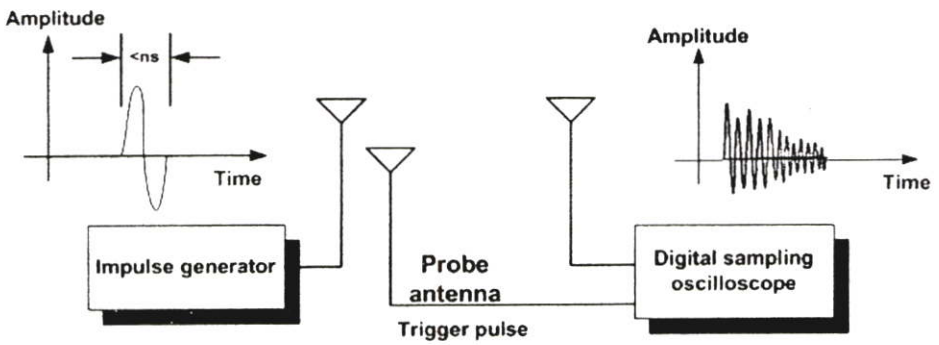


รูปที่ 3.2 ระบบการทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่โดยเครื่อง VNA และการแปลงสู่โดเมนเวลา โดยใช้ IFFT [4]

3.3.2 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนเวลา

ในการทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนความถี่นั้นไม่สามารถที่จะทำการทดสอบช่องสัญญาณในลักษณะที่ไม่คงที่ได้ (non-stationary) จึงมีอีกวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เรียกว่าการทดสอบในโดเมนเวลาที่สามารถใช้ประโยชน์สำหรับระบบแถบกว้างยิ่งได้

การทดสอบช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลานั้นจะเป็นลักษณะการส่งสัญญาณในทิศทางเดียวโดยใช้พัลส์ที่มีขนาดแคบมากๆ ซึ่งเครื่องรับนั้นจะใช้ออสซิลโลสโคปที่มีการสุ่มแบบดิจิตอล (DSO) โดยแบนด์วิดท์ของการทดสอบนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและความกว้างของพัลส์ที่ใช้ ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์นี้ยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมด้วย อย่างไรก็ตามการที่จะทราบถึงผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณนั้นจำต้องทำการแยกรูปสัญญาณพัลส์ที่ใช้ส่งออกจากผลการทดสอบโดยผลการจำลองช่องสัญญาณที่ถูกต้องนั้นสามารถทำได้ถ้ารูปสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการตรวจสอบมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปสัญญาณที่ถูกนำมาใช้งานจริง ซึ่งโครงสร้างสำหรับการทดสอบในโดเมนเวลานั้นแสดงในรูปที่ 3.3 [4]



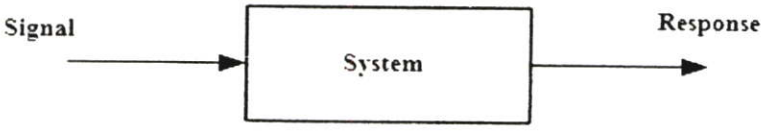
รูปที่ 3.3 การทดสอบช่องสัญญาณในโดเมนเวลาโดยใช้อิมพัลส์ [4]

3.3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการสื่อสารแบบไร้สายนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณไม่ว่าจะเป็นระดับของกำลังงาน เวลาประวิงที่เกิดขึ้นปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อสัญญาณที่รับได้ทั้งสิ้นเมื่อทำการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับโดยผลที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะต้องทำการตรวจสอบเบื้องต้นด้วยวิธีการทดสอบจากนั้นผลที่ได้จากการทดสอบ นั้นจำเป็นต้องนำมาวิเคราะห์ตามขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบหรือการเปลี่ยนแปลงดังที่ได้กล่าวไปแล้วโดยในขั้นตอนนี้มีความสำคัญพอ ๆ กับขั้นตอนการทดสอบซึ่งมีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยในหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ ดังนี้

3.3.3.1 ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ

เมื่อทดสอบช่องสัญญาณโดยใช้เครื่อง VNA นั้นสิ่งที่ต้องทำความเข้าใจคือ ระบบและสัญญาณ โดยระบบคือกลุ่มที่อยู่รวมกัน ซึ่งสามารถทำงานร่วมกันเพื่อให้สำเร็จตามจุดมุ่งหมายที่ต้องการและสัญญาณคือปริมาณทางกายภาพบางอย่างที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบเรียกว่า สัญญาณเข้าหรือสัญญาณอินพุต (input signal) ของระบบ และจะมีสัญญาณออกหรือสัญญาณเอาต์พุต (output signal) ซึ่งเป็นปริมาณทางกายภาพที่ออกมาจากระบบ หรือเรียกว่าผลตอบสนอง (response) ของระบบ โดยสามารถแสดงบล็อคไดอะแกรมของระบบดังรูปที่ 3.5 ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวนั้นจะเป็นสิ่งที่ใช้แสดงถึงคุณสมบัติของระบบ และจากการทดสอบผลที่ได้ก็คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณซึ่งแปรผันตรงกับฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (frequency transfer function : $H(\omega)$) ของช่องสัญญาณโดยฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ดังกล่าวนั้นจะแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการพิจารณาอยู่ซึ่งประกอบด้วยขนาดสัญญาณที่ส่งผ่าน (magnitude) และผลตอบสนองทางเฟส (phase response) ของสัญญาณโดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัญญาณกับฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณนั้นกำหนดตามสมการที่ (3.3) [6] และแสดงดังรูปที่ 3.6



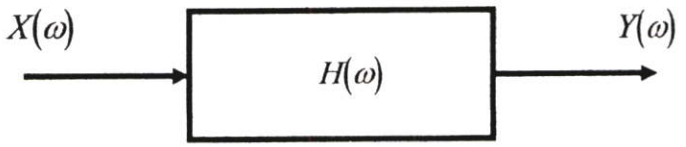
รูปที่ 3.4 บล็อคไดอะแกรมของระบบ

$$S_{21}(\omega) \propto H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \tag{3.3}$$

โดยที่

$Y(\omega)$ คือ เอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่

$X(\omega)$ คือ อินพุตของระบบในโดเมนความถี่



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่

3.3.3.2 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ

การแสดงคุณสมบัติของช่องสัญญาณนั้นสามารถทำได้หลายวิธีโดยหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ก็คือ การแสดงด้วยค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response) ของระบบโดยเริ่มต้นนั้นจะขอกล่าวถึงคำนิยามของฟังก์ชันอิมพัลส์ (impulse function) ก่อนดังนี้

ฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่เหมือนกับฟังก์ชันทั่วไปโดยฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยมักนิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ $\delta(t)$ และมีคุณสมบัติดังนี้คือ

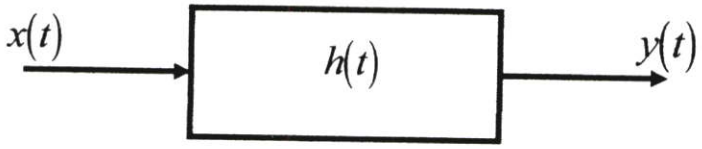
$$\int_a^b f(t)\delta(t-t_0)dt = \begin{cases} f(t_0), & a < t_0 < b \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{3.4}$$

โดยในที่นี้ $f(t)$ จะต้องเป็นฟังก์ชันที่มีค่าต่อเนื่อง (continuous) ที่ค่าเวลา $t = t_0$ จากสมการที่ (3.4) และเมื่อกำหนดให้ $f(t) = 1$ จะได้

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0)dt = 1 \tag{3.5}$$

จากผลของการทำปริพันธ์ฟังก์ชันใดๆ นั้น มีผลเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งที่แสดงค่าฟังก์ชันนั้นมาช่วยอธิบายใน (3.5) จะกล่าวได้ว่าพื้นที่ใต้เส้นโค้งของ $\delta(t-t_0)$ มีค่า 1 หน่วย โดยค่าที่ได้จากการทำปริพันธ์นี้นิยมเรียกว่า น้ำหนัก (weight) ของฟังก์ชันอิมพัลส์นั้นดังนั้นจะพบว่าน้ำหนักของฟังก์ชัน $A\delta(t)$ มีค่าเท่ากับ A หน่วย ฟังก์ชันอิมพัลส์ที่มีน้ำหนัก 1 หน่วยนั้นเรียกว่าฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วย (unit impulse function) แม้ว่าฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่สามารถสร้างได้จริงในทางปฏิบัติแต่ในทางทฤษฎีจะมีบทบาทในการวิเคราะห์สัญญาณและระบบโดยเฉพาะการบอกคุณสมบัติของระบบอีกทั้งสัญญาณอินพุตที่เป็นฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยนั้นยังถูกนิยามเรียกว่าผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบใช้สัญลักษณ์ $h(t)$ แทนผลตอบสนองดังกล่าวซึ่งผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบสามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบเพราะสามารถบอกคุณสมบัติของระบบนั้นได้และโดยเฉพาะเมื่อระบบภายใต้การพิจารณาเป็นระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนตามเวลา (Linear time

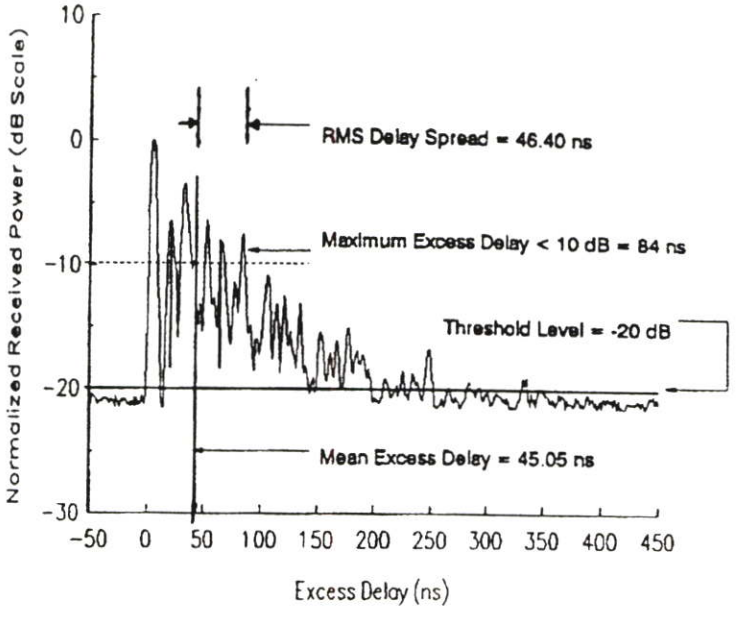
invariance system) ค่าเอาต์พุต $g(t)$ ของระบบที่เกิดจากสัญญาณอินพุต $f(t)$ ใด ๆ นั้นจะสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้รูปที่ 3.6 [6]



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนเวลา [6]

3.3.3.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน

พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่นิยมนำมาวิเคราะห์เพื่อแสดงให้เห็นถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับที่เวลาต่าง ๆ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสัญญาณที่มีการสะท้อนในหลายทิศทางหรือที่เรียกว่าสัญญาณหลายวิถีโดยจะเรียกว่า ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (power delay profile: PDP) ซึ่งตัวอย่างของ PDP ได้แสดงดังรูปที่ 3.8 [6] โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ต่อเวลาที่เข้ามาถึงและนอกจากนั้นยังสามารถนำไปพิจารณาถึงผลการกระจายทางเวลา (time dispersion) อันประกอบไปด้วย การประวิงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay) และ ค่าการแผ่ประวิง RMS (rms dealy spread) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน [6]

3.3.3.4 ค่าการกระจายทางเวลา

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับมีได้หลายทิศทาง และสัญญาณแต่ละส่วนมักจะส่งผ่านในเส้นทางที่มีระยะทางไม่เท่ากัน สัญญาณบางส่วนอาจจะเดินทางเป็นเส้นตรงระหว่างภาคส่งและภาครับ (line of sight : LOS) สัญญาณส่วนนี้มักจะเดินทางถึงภาครับได้เร็ว ในขณะที่สัญญาณส่วนอื่นที่มีการตกกระทบพื้นผิวของวัสดุและเกิดการสะท้อนหลายครั้งกว่าจะเดินทางถึงภาครับ สัญญาณมักจะใช้เวลาการแพร่กระจายที่ยาวนานกว่า ความล่าช้าในการเดินทางของสัญญาณแต่ละส่วนก่อให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า การแผ่ประวิง (delay spread) ขึ้น นั่นคือสัญญาณแต่ละส่วนใช้เวลาเดินทางถึงจุดหมายไม่เท่ากัน ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาถึงเวลาที่ถูกประวิงออกไปของสัญญาณที่เข้ามายังภาครับ ซึ่งในส่วนของการกระจายทางเวลานั้นสามารถที่จะวิเคราะห์โดยใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ประวิงเกินออกไปจากค่าเวลาเดิมหรือค่าเฉลี่ยของเวลาประวิง (mean excess delay: $\bar{\tau}$) และค่าการแผ่ประวิง RMS (rms delay spread: σ_τ) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้ถูกนิยามไว้ดังสมการที่ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ [6]

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

โดยที่

$\bar{\tau}$ คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาประวิง

a_i คือ ระดับของสัญญาณเส้นทางที่ i

τ_i คือ เวลาประวิงที่เกิดขึ้นของสัญญาณเส้นทางที่ i

$P(\tau_i)$ คือ ระดับกำลังงานของสัญญาณเส้นทางที่ i

สำหรับค่าการแผ่ประวิง RMS นั้นจะมีนิยามคือ

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - \left(\bar{\tau}\right)^2} \tag{3.7}$$

โดยที่

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} a_i^2 \tau_i^2}{\sum_{i=1}^{n} a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P(\tau_i)\tau_i^2}{\sum_{i=1}^{n} P(\tau_i)} \tag{3.8}$$

3.3.3.5 ค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน

ค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน (Aggregate Penetration Loss) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ซึ่งการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุ คือ กำลังงานของสัญญาณเมื่อถูกส่งผ่านตัวกลางที่เป็นวัสดุใดๆ โดยจะเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังงานเฉลี่ยในการทดสอบโดยปราศจากวัสดุและกำลังงานเฉลี่ยที่มีวัสดุมาขวางกั้นอยู่ ซึ่งเป็นระดับกำลังงานที่สูญเสียไปเมื่อผ่านตัวกลางที่เป็นวัสดุ สามารถคังสมการที่ (3.9) ดังนี้ [7]

$$\text{APL}[dB] = 10\log_{10}\left[\frac{\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} P(f_i, x_j)\,(\text{without material})}{\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} P(f_i, x_j)\quad (\text{with material})}\right] \tag{3.9}$$

โดยที่

M คือ จำนวนครั้งที่ทำการทดสอบ

N คือ จำนวนจุดของความถี่

$P(f_i, x_j)$ คือ กำลังงานที่รับได้

3.4 การเปรียบเทียบทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา (FDTD) เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้หาผลเฉลยทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วิธี FDTD ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดยยี (Yee) ในปี ค.ศ.1966 [8] ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ง่ายและสะดวกในการแก้ปัญหาอนุพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์ โดยทำให้อยู่ในรูปแบบดิสครีต (Discrete) โดยยีได้ใช้กริดสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) และกริดสนามแม่เหล็ก ($\vec{H}$) เพื่อทำการปรับปรุงสมการสนามที่อยู่ในโดเมนการคำนวณให้อยู่ในเทอมของสนามในโดเมนเวลาที่ผ่านมา

3.4.1 แนวความคิดของยี

ยีได้กำหนดสมการผลต่างสืบเนื่องจำกัดมาจากระบบสมการเดิร์ลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของแมกซ์เวลล์ สมการเดิร์ลของแมกซ์เวลล์สามารถเขียนได้ดังนี้ [9]

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} - \vec{J}_m \tag{3.10a}$$

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} - \vec{J}_e \tag{3.10b}$$

โดยที่ $\vec{B}$ กับ $\vec{J}_m$ มีความสัมพันธ์กับ $\vec{H}$ และ $\vec{D}$ กับ $\vec{J}_e$ มีความสัมพันธ์กับ $\vec{E}$ ดังสมการ (3.11)

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{3.11a}$$

$$\vec{J}_m = \rho' \vec{H} \tag{3.11b}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \tag{3.11c}$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \tag{3.11d}$$

โดยที่ $\vec{D}$ คือ ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า (Electric Flux Density), C/m^2

$\vec{B}$ คือ ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density), Wb/m^2

$\vec{J}_e$ คือ ความหนาแน่นกระแสเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Electric Conduction Current), A/m^2

$\vec{J}_m$ คือ ความหนาแน่นแม่เหล็กสมบูรณ์ (Equivalent Magnetic Conduction Current), V/m^2

μ คือ ความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (Relative permeability),

ε คือ สภาพยอม (Permittivity), Fm^{-1}

ρ' คือ สภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูล (Equivalent magnetic resistivity), $\Omega\, m^{-1}$

σ คือ สภาพนำ (Conductivity), m

จากสมการ (3.10) และ (3.11) สามารถเขียนสมการเคิร์ลที่เปลี่ยนไปตามเวลาของแมกซ์เวลล์ใหม่ (3.12) ตามแนวคิดของยีใหม่ [8]

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu}\nabla \times \vec{E} - \frac{\rho'}{\mu}\vec{H} \tag{3.12a}$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon}\nabla \times \vec{H} - \frac{\sigma}{\mu}\vec{H} \tag{3.12b}$$

จาก เวกเตอร์ 3 แกน ถ้า $\vec{A} = A_x\vec{a}_x + A_y\vec{a}_y + A_z\vec{a}_z$ จะได้

$$\nabla \times \vec{A} = \begin{vmatrix} \vec{a}_x & \vec{a}_y & \vec{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} \tag{3.13}$$

โดยที่

$$\det \nabla \times \vec{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}\right)\vec{a}_x + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}\right)\vec{a}_y + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}\right)\vec{a}_z \tag{3.14}$$

จากเวกเตอร์ 3 แกน สมการ (3.14) สามารถกระจายสมการ (3.12) ให้อยู่ในรูประบบสมการ 3 มิติ ในแกน x, y และ z ได้ในสมการที่ (3.15) และ (3.16)

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\cdot\left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho' H_x\right) \tag{3.15a}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\cdot\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \rho' H_y\right) \tag{3.15b}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho' H_z \right) \tag{3.15c}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \tag{3.16a}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \tag{3.16b}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \tag{3.16c}$$

แนวคิดของยีซึ่งเป็นแนวความคิดพื้นฐานของวิธี FDTD มีดังต่อไปนี้

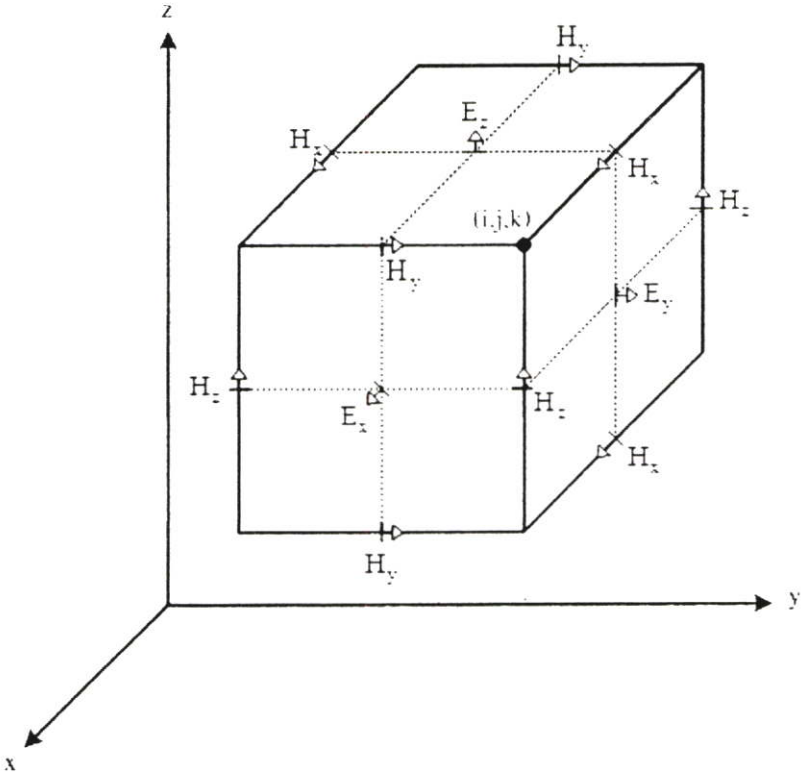
1. ทำการแก้ปัญหาทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในโดเมนเวลาและสเปซโดยใช้สมการ เคิร์ลของแมกซ์เวลล์แทนที่จะแก้ปัญหาสนามไฟฟ้าอย่างเดียวหรือสนามแม่เหล็กอย่างเดียวโดยใช้สมการคลื่น

- ซึ่งจะเหมือนกับสูตรสมการอินทิกรัลสนามรวมในวิธีโมเมนต์ เมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของทั้ง $\overline{E}$ และ $\overline{H}$ บนพื้นผิวของโครงสร้างวัสดุ
- การใช้ข้อมูลของทั้ง $\overline{E}$ และ $\overline{H}$ จะได้ผลเฉลยที่ดีกว่าการใช้สนามชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียว เช่น จะมีความเที่ยงตรงสำหรับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่
- คุณสมบัติวัสดุทางไฟฟ้าและแม่เหล็กสามารถกำหนดได้โดยทำเป็นแบบจำลอง
- สามารถทำแบบจำลองที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละสนามได้ ถ้ามีทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น เช่น สนาม $\overline{H}$ ที่สัมผัสบริเวณขอบและมุม, สนาม $\overline{H}$ ที่ล้อมรอบเส้นลวด, สนาม $\overline{E}$ ในแนวรัศมีที่อยู่บริเวณจุด, ขอบ และเส้นลวด

2. ส่วนประกอบของ $\overline{E}$ และ $\overline{H}$ ในสเปซสามมิติ ทุกส่วนประกอบของสนาม $\overline{E}$ จะถูกล้อมรอบด้วยสี่ส่วนประกอบของสนาม $\overline{H}$ และทุกส่วนประกอบของสนาม $\overline{H}$ จะถูกล้อมรอบด้วยสี่ส่วนประกอบของสนาม $\overline{E}$ ดังแสดงในรูป 3.9

- จะได้รูปอย่างง่ายของสเปซสามมิติ ซึ่งประกอบไปด้วยแถวลำดับที่เชื่อมต่อกันตามกฎคอนทัวร์ของฟาราเดย์ และกฎคอนทัวร์ของแอมแปร์
- ผลของนิพจน์ผลต่างสืบเนื่องจำกัดสำหรับอนุพันธ์สเปซที่ใช้ในตัวดำเนินการเคิร์ลจะเป็นผลต่างสืบเนื่องจำกัดแบบตรงกลาง

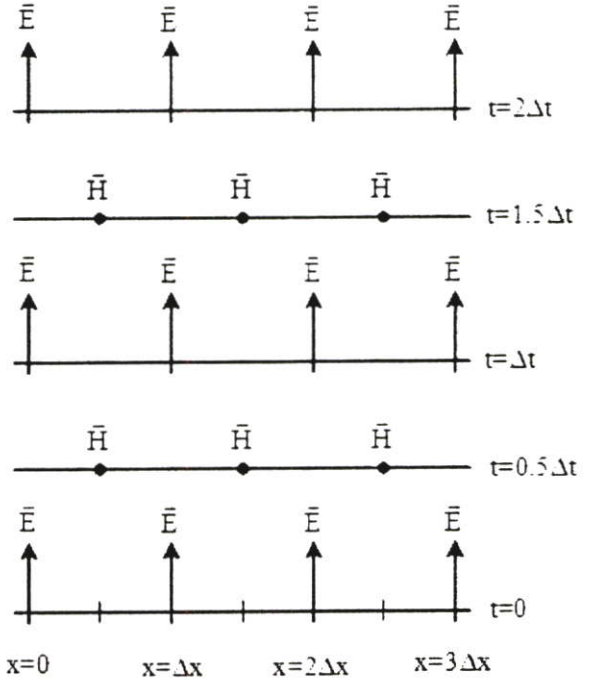
- ในกรณีที่มีความต่อเนื่องของสนามสัมผัส $\overline{E}$ และ $\overline{H}$ ข้ามรอยต่อของวัสดุที่มีชนิดต่างกัน และรอยต่อขนานกับแกนพิกัดของกริด จะได้ผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่ไม่ต้องทำการแมตช์เงื่อนไขขอบเขตสนามที่รอยต่อ โดยเพียงทำการกำหนดสภาพยอมและความซาบซึมได้ของวัสดุที่แต่ละตำแหน่งส่วนประกอบสนาม ถ้าเป็นเม็ช (Mesh) ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากของยี จะมีลักษณะการประมาณพื้นผิวและรูปทรงภายในของโครงสร้างที่สนใจเป็นแบบขั้นบันได โดยกำหนดความละเอียดของสเปซจากขนาดของหน่วยเซลล์แลตทิซ (Lattice)
- ตำแหน่งส่วนประกอบสนาม $\overline{E}$ และ $\overline{H}$ ในกริดของยีและการดำเนินการผลต่างสืบเนื่องจำกัดแบบตรงกลางบนส่วนประกอบเหล่านี้จะเป็นไปตามกฎของเกาส์



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งของส่วนประกอบเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในหน่วยเซลล์ลูกบาศก์ตามแนวความคิดของยี [8]

3. ส่วนประกอบของสนาม $\overline{E}$ และ $\overline{H}$ ในเวลาจะอยู่ในเทอมของลีพฟรอก การคำนวณสนาม $\overline{E}$ ทั้งหมดในสเปซเสร็จสมบูรณ์และถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำที่จุดเวลาเฉพาะโดยใช้ข้อมูลของสนาม $\overline{H}$ ที่เก็บไว้แล้วในหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ ต่อมา การคำนวณสนาม $\overline{H}$ ทั้งหมดในแบบจำลองสเปซเสร็จสมบูรณ์และถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำโดยใช้ข้อมูลของสนาม $\overline{E}$ ที่พึ่งคำนวณมาได้ การกระทำแบบนี้จะเกิดขึ้นอีกครั้ง โดยคำนวณส่วนประกอบของสนาม $\overline{E}$ จากสนาม $\overline{H}$ ที่พึ่งได้มา ซึ่งกระบวนการนี้จะกระทำต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะถึงขั้นเวลาตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.9

- กระบวนการทำขั้นเวลาลีพฟรอกนี้จะมีกระบวนการที่แน่นอน จึงสามารถหลีกเลี่ยงการแก้สมการสองสมการพร้อมกันและการหาเมตริกผกผันได้อย่างสมบูรณ์
- ผลของนิพจน์ผลต่างสืบเนื่องจำกัดสำหรับอนุพันธ์เวลาที่ใช้ในสมการเคิร์ลจะเป็นผลต่างสืบเนื่องจำกัดแบบตรงกลาง
- ผลของแนวความคิดขั้นเวลาจะไม่เป็นการสิ้นเปลือง เนื่องจากแบบแผนคลื่นเชิงตัวเลขจะแพร่กระจายในเม็ชที่สร้างขึ้นโดยมีลักษณะที่เหมือนจริง



รูปที่ 3.9 แบบแผนขั้นเวลาลีพฟรอกตามแนวความคิดของยี สำหรับการแพร่กระจายของคลื่นในหนึ่งมิติ [8]

3.4.2 สมการผลต่างสืบเนื่อง

เพื่อความสะดวก จะกำหนดสัญลักษณ์สำหรับจุดสเปซและฟังก์ชันของสเปซและเวลา โดยที่กำหนดให้สเปซในระบบพิกัดมุมฉากสามมิติมีรูปแบบเป็น [8]

$$(i,j,k)=(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \tag{3.17}$$

โดยที่ Δx, Δy และ Δz คือ ค่าที่เพิ่มขึ้นในเลตทิชสเปซ (Lattice space) ในทิศทางพิกัด x, y และ z ตามลำดับ และ i, j และ k คือ จำนวนเต็ม

ต่อมากำหนดให้ μ เป็นฟังก์ชันใด ๆ ของสเปซและเวลาที่จุดดิสครีตในกริดและจุดดิสครีตในเวลามีรูปแบบเป็น

$$\mu(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)=\mu^{n}_{i,j,k} \tag{3.18}$$

โดยที่ Δt คือ เวลาที่เพิ่มขึ้นในแต่ละขั้นเวลา โดยกำหนดให้เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

n คือ จำนวนเต็ม

ต่อมาทำการประมาณอนุพันธ์สเปซและเวลาด้วยนิพจน์ของผลต่างสืบเนื่องจำกัดแบบตรงกลาง โดยมีความเที่ยงตรงอันดับที่สองในสเปซและเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะได้นิพจน์ของอนุพันธ์สเปซโดยกำหนดให้เวลาคงที่ที่ $t_n=n\Delta t$ และนิพจน์ของอนุพันธ์เวลาโดยกำหนดให้สเปซคงที่ที่จุด (x,y,z) เป็น

$$\frac{\partial\mu}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)=\frac{\mu^{n}_{i+1/2,j,k}-\mu^{n}_{i-1/2,j,k}}{\Delta x} \tag{3.19a}$$

$$\frac{\partial\mu}{\partial y}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)=\frac{\mu^{n}_{i,j+1/2,k}-\mu^{n}_{i,j-1/2,k}}{\Delta y} \tag{3.19b}$$

$$\frac{\partial\mu}{\partial z}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)=\frac{\mu^{n}_{i,j,k+1/2}-\mu^{n}_{i,j,k-1/2}}{\Delta z} \tag{3.19c}$$

$$\frac{\partial\mu}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)=\frac{\mu^{n+1/2}_{i,j,k}-\mu^{n-1/2}_{i,j,k}}{\Delta t} \tag{3.19d}$$

นำนิพจน์อนุพันธ์สเปซและเวลาที่ขั้นเวลา n และจุดสเปซแลตทิซ (i,j,k) ของสมการ (3.19) แทนลงในระบบสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ (3.15) และ (3.16) จะได้ [8]

$$\frac{H_x\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} - H_x\Big|_{i,j,k}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j,k}} \cdot \left(\begin{array}{l} \dfrac{E_y\Big|_{i,j,k+1/2}^{n} - E_y\Big|_{i,j,k-1/2}^{n}}{\Delta z} \\ -\dfrac{E_z\Big|_{i,j+1/2,k}^{n} - E_z\Big|_{i,j-1/2,k}^{n}}{\Delta y} - \rho'_{i,j,k} \cdot H_x\Big|_{i,j,k}^{n} \end{array} \right) \tag{3.20a}$$

$$\frac{H_y\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} - H_y\Big|_{i,j,k}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j,k}} \cdot \left(\begin{array}{l} \dfrac{E_z\Big|_{i+1/2,j,k}^{n} - E_z\Big|_{i-1/2,j,k}^{n}}{\Delta x} \\ -\dfrac{E_x\Big|_{i,j,k+1/2}^{n} - E_x\Big|_{i,j,k-1/2}^{n}}{\Delta z} - \rho'_{i,j,k} \cdot H_y\Big|_{i,j,k}^{n} \end{array} \right) \tag{3.20b}$$

$$\frac{H_z\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} - H_z\Big|_{i,j,k}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j,k}} \cdot \left(\begin{array}{l} \dfrac{E_x\Big|_{i,j+1/2,k}^{n} - E_x\Big|_{i,j-1/2,k}^{n}}{\Delta y} \\ -\dfrac{E_y\Big|_{i+1/2,j,k}^{n} - E_y\Big|_{i-1/2,j,k}^{n}}{\Delta x} - \rho'_{i,j,k} \cdot H_z\Big|_{i,j,k}^{n} \end{array} \right) \tag{3.20c}$$

$$\frac{E_x\Big|_{i,j,k}^{n+1} - E_x\Big|_{i,j,k}^{n}}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_{i,j,k}} \cdot \left(\begin{array}{l} \dfrac{H_z\Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z\Big|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ -\dfrac{H_y\Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y\Big|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} - \sigma_{i,j,k} \cdot E_x\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} \end{array} \right) \tag{3.21a}$$

$$\frac{E_y\Big|_{i,j,k}^{n+1} - E_y\Big|_{i,j,k}^{n}}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_{i,j,k}} \cdot \left(\begin{array}{l} \dfrac{H_x\Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_x\Big|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \\ -\dfrac{H_z\Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_z\Big|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} - \sigma_{i,j,k} \cdot E_y\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} \end{array} \right) \tag{3.21b}$$

$$\frac{E_z\Big|_{i,j,k}^{n+1} - E_z\Big|_{i,j,k}^{n}}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_{i,j,k}} \cdot \left(\begin{array}{l} \dfrac{H_y\Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_y\Big|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} \\ -\dfrac{H_x\Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_x\Big|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} - \sigma_{i,j,k} \cdot E_z\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} \end{array} \right) \tag{3.21c}$$

ทำการประมาณค่าสนามแม่เหล็กในทิศทางใด ๆ ที่ขั้นเวลา n และค่าสนามไฟฟ้าในทิศทางใด ๆ ที่ขั้นเวลา $n+1/2$ คือ

$$H_x\Big|_{i,j,k}^{n} = \frac{H_x\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} + H_x\Big|_{i,j,k}^{n-1/2}}{2} \tag{3.22a}$$

$$H_y\Big|_{i,j,k}^{n} = \frac{H_y\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} + H_y\Big|_{i,j,k}^{n-1/2}}{2} \tag{3.22b}$$

$$H_z\Big|_{i,j,k}^{n} = \frac{H_z\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} + H_z\Big|_{i,j,k}^{n-1/2}}{2} \tag{3.22c}$$

$$E_x\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} = \frac{E_x\Big|_{i,j,k}^{n+1} + E_x\Big|_{i,j,k}^{n}}{2} \tag{3.23a}$$

$$E_y\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} = \frac{E_y\Big|_{i,j,k}^{n+1} + E_y\Big|_{i,j,k}^{n}}{2} \tag{3.23b}$$

$$E_z\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} = \frac{E_z\Big|_{i,j,k}^{n+1} + E_z\Big|_{i,j,k}^{n}}{2} \tag{3.23c}$$

นำสมการที่ (3.22) และ (3.23) แทนลงในสมการ (3.20) และ (3.21) ตามลำดับ จะได้สมการผลต่างสืบเนื่องจำกัดสำหรับแต่ละส่วนประกอบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ใช้คำนวณในวิธี FDTD สามมิติ เป็น

$$H_x\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} = D_a\Big|_{i,j,k} H_x\Big|_{i,j,k}^{n-1/2} + D_b\Big|_{i,j,k} \cdot \left(\frac{\dfrac{E_y\Big|_{i,j,k+1/2}^{n} - E_y\Big|_{i,j,k-1/2}^{n}}{\Delta z}}{-\dfrac{E_z\Big|_{i,j+1/2,k}^{n} - E_z\Big|_{i,j-1/2,k}^{n}}{\Delta y}} \right) \tag{3.24a}$$

$$H_y\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} = D_a\Big|_{i,j,k} H_y\Big|_{i,j,k}^{n-1/2} + D_b\Big|_{i,j,k} \cdot \left(\frac{\dfrac{E_z\Big|_{i+1/2,j,k}^{n} - E_z\Big|_{i-1/2,j,k}^{n}}{\Delta x}}{-\dfrac{E_x\Big|_{i,j,k+1/2}^{n} - E_x\Big|_{i,j,k-1/2}^{n}}{\Delta z}} \right) \tag{3.24b}$$

$$H_z\Big|_{i,j,k}^{n+1/2} = D_a\Big|_{i,j,k} H_z\Big|_{i,j,k}^{n-1/2} + D_b\Big|_{i,j,k} \cdot \left(\frac{E_x\Big|_{i,j+1/2,k}^{n} - E_x\Big|_{i,j-1/2,k}^{n}}{\Delta y} - \frac{E_y\Big|_{i+1/2,j,k}^{n} - E_y\Big|_{i-1/2,j,k}^{n}}{\Delta x} \right) \tag{3.24c}$$

$$E_x\Big|_{i,j,k}^{n+1} = C_a\Big|_{i,j,k} E_x\Big|_{i,j,k}^{n} + C_b\Big|_{i,j,k} \cdot \left(\frac{H_z\Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z\Big|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{H_y\Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y\Big|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right) \tag{3.25a}$$

$$E_y\Big|_{i,j,k}^{n+1} = C_a\Big|_{i,j,k} E_y\Big|_{i,j,k}^{n} + C_b\Big|_{i,j,k} \cdot \left(\frac{H_x\Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_x\Big|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} - \frac{H_z\Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_z\Big|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} \right) \tag{3.25b}$$

$$E_z\Big|_{i,j,k}^{n+1} = C_a\Big|_{i,j,k} E_z\Big|_{i,j,k}^{n} + C_b\Big|_{i,j,k} \cdot \left(\frac{H_y\Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_y\Big|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} - \frac{H_x\Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_x\Big|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \right) \tag{3.25c}$$

โดยที่

$$C_a\Big|_{i,j,k} = \left(1 - \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}\right) \Big/ \left(1 + \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}\right) \tag{3.26a}$$

$$C_b\Big|_{i,j,k} = \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}}\right) \Big/ \left(1 + \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}\right) \tag{3.26b}$$

$$D_a\Big|_{i,j,k} = \left(1 - \frac{\rho'_{i,j,k}\Delta t}{2\mu_{i,j,k}}\right) \Big/ \left(1 + \frac{\rho'_{i,j,k}\Delta t}{2\mu_{i,j,k}}\right) \tag{3.27a}$$

$$D_b\Big|_{i,j,k} = \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}\right) \Big/ \left(1 + \frac{\rho'_{i,j,k}\Delta t}{2\mu_{i,j,k}}\right) \tag{3.27b}$$

3.4.3 เงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข

ขั้นเวลามากสุดจะถูกจำกัดโดยข้อกำหนดความเสถียรของสมการผลต่างสืบเนื่องจำกัด ซึ่งเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลขสำหรับสมการผลต่างสืบเนื่องในสามมิติเป็น [10]

$$\Delta t \le \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2}+\frac{1}{(\Delta y)^2}+\frac{1}{(\Delta z)^2}}} \tag{3.28}$$

โดยที่ c คือ ความเร็วแสงในอวกาศว่าง (free space)

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณในการสื่อสารซึ่งเป็นส่วนสำคัญในวิทยานิพนธ์นี้อันประกอบด้วยรายละเอียดของคุณลักษณะของช่องสัญญาณ ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบหรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณลักษณะของช่องสัญญาณรวมไปถึงระบบการทดสอบที่มีอยู่ 2 แบบหลักๆ คือ แบบที่หนึ่งทดสอบในโดเมนความถี่โดยใช้เครื่อง VNA เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบและแบบที่สองทดสอบในโดเมนเวลาโดยเครื่องออสซิลโลสโคป ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบในโดเมนความถี่ อีกทั้งบทนี้ยังกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณ คือ การกระจายทางเวลา การสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านวัสดุ ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ อันเนื่องด้วยผลกระทบจากปัจจัยดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น ท้ายสุดผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain : FDTD) ซึ่งกล่าวถึงทฤษฎีในการจำลองผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลาโดยจะทำการจำลองเป็นแบบสองมิติ ซึ่งจะแสดงขั้นตอนในการจำลองและผลในการจำลองในบทต่อไป

บทที่ 4
การทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนในการทดสอบ ซึ่งเป็นการตรวจสอบผลการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สาย โดยทั่วไปแล้วจะมีการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ 2 แบบคือแบบแรกบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้การจำลองช่องสัญญาณ แบบที่สองอยู่บนพื้นฐานจากการทดสอบโดยใช้เครื่องมือในการทดสอบที่เรียกว่าเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งเป็นการตรวจสอบบนโดเมนความถี่ โดยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการตรวจสอบบนพื้นฐานของการทดสอบเป็นหลัก สำหรับขั้นตอนในการทดสอบนั้นจำเป็นต้องจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป โดยทั่วไปแล้วตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่สำคัญอย่างหนึ่งคือลักษณะสภาพแวดล้อมต่าง ๆ รวมทั้งการถูกบดบังด้วยวัสดุสิ่งก่อสร้างที่ส่งผลกระทบต่อระดับของสัญญาณบนช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมภายในห้องดูดซับการสะท้อนของคลื่น (anechoic chamber) และภายในอาคาร ลักษณะในการทดสอบในสภาวะทั้งสองแบบที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

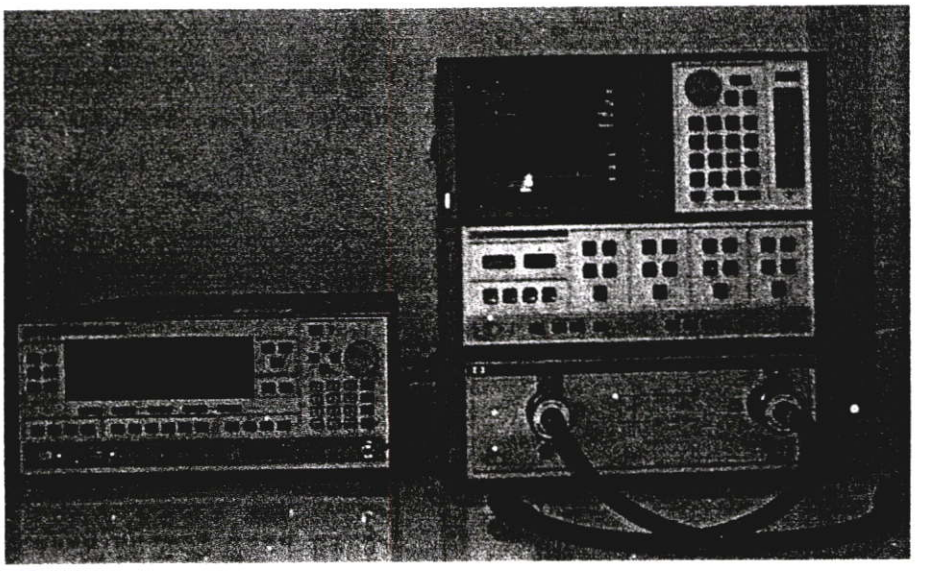
จากการวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จสิ้นลงจะนำข้อมูลส่วนหนึ่งของสภาวะแวดล้อมภายในอาคารนำไปเปรียบเทียบกับหลักการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่าวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา ซึ่งมีวิธีการจำลองแบบที่มีขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยรายละเอียดของขั้นตอนการจำลองนั้นจะแสดงในหัวข้อต่อไป

4.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.1 เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์

ระบบของการทดสอบนั้น องค์ประกอบสำคัญในการทดสอบช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นจะใช้เครื่องทดสอบเฉพาะซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์รุ่น HP-8510C ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (S-parameter test set) รุ่น HP-8514B และเครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesized sweeper) รุ่น HP-83620A เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ที่เชื่อมต่อผ่านช่องสื่อสารแบบ GPIB (General purpose interface bus) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่สามารถทดสอบสัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ต ซึ่งในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบแบบสองพอร์ตโดยพอร์ตที่หนึ่งคือพอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ส่วนพอร์ตสองจะใช้ใน

การรับสัญญาณ โดยที่ปลายของพอร์ตทั้งสองจะถูกต่อด้วยสายอากาศแบบกรวยคู่ (biconical antenna) และทำการทดสอบในโดเมนความถี่ก่อนที่จะถูกนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป



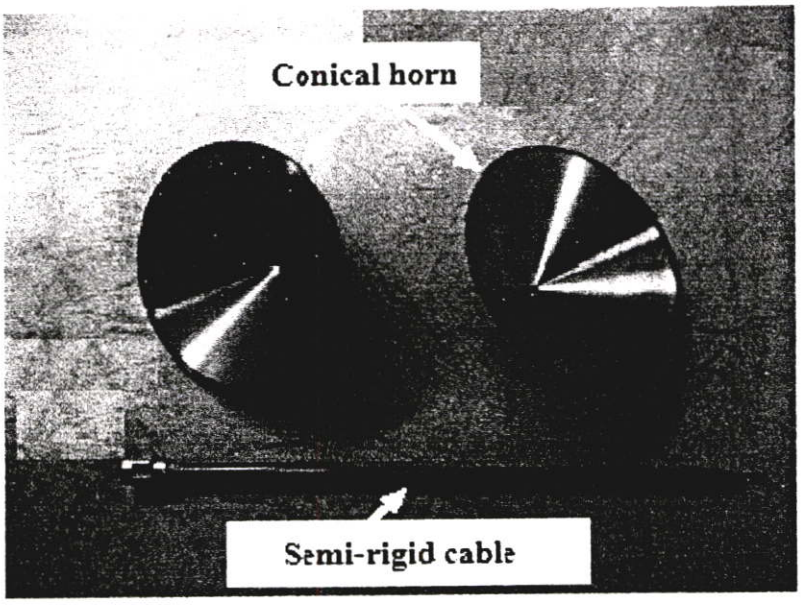
รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์

4.2.2 สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบ

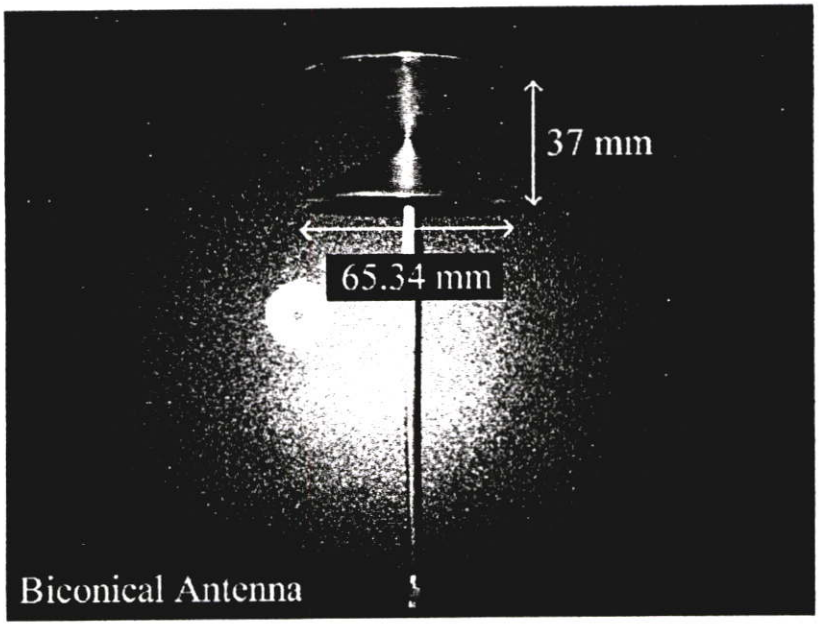
ในการส่งสัญญาณแบบไร้สายนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่เรียกว่าสายอากาศ ซึ่งช่วยในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายผ่านอากาศไปยังสายอากาศทางด้านรับแล้วเปลี่ยนกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าตามเดิมโดยในการทดสอบนี้ได้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ทั้งสายอากาศทางด้านส่ง (Tx) และสายอากาศทางด้านรับ (Rx) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น แบบรอบตัว ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในความถี่ย่านตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ตามข้อกำหนดย่านความถี่การใช้งานของระบบแถบกว้างยิ่งของ FCC โดยสายอากาศที่ถูกนำมาใช้ในการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

4.2.2.1 สายอากาศแบบกรวยคู่

สายอากาศแบบกรวยคู่ เป็นสายอากาศที่ถูกนำมาใช้ในการทดสอบโดยมีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวในมุมกวาด (azimuth) มีอัตราการขยาย (gain) อยู่ในช่วง 1.5 ถึง 15.0 dBi รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของสายอากาศชนิดนี้ [11]



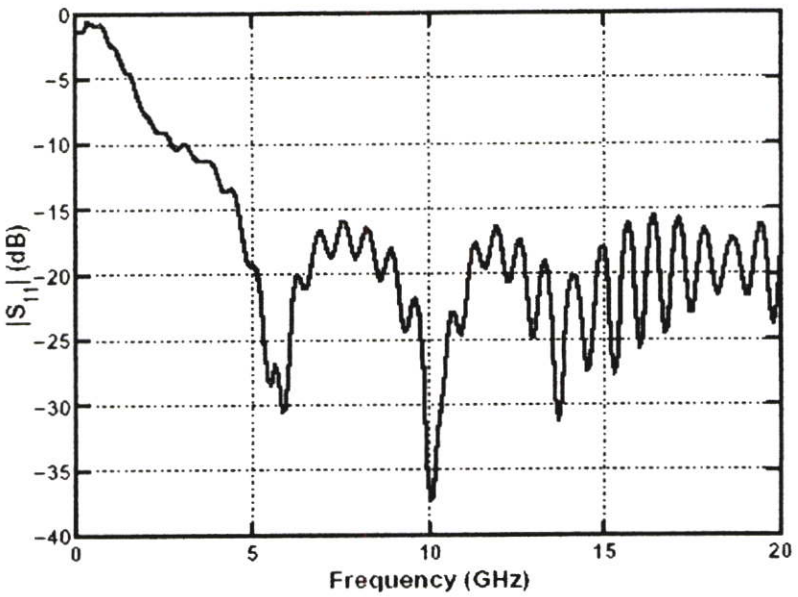
รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบของสายอากาศแบบกรวยคู่



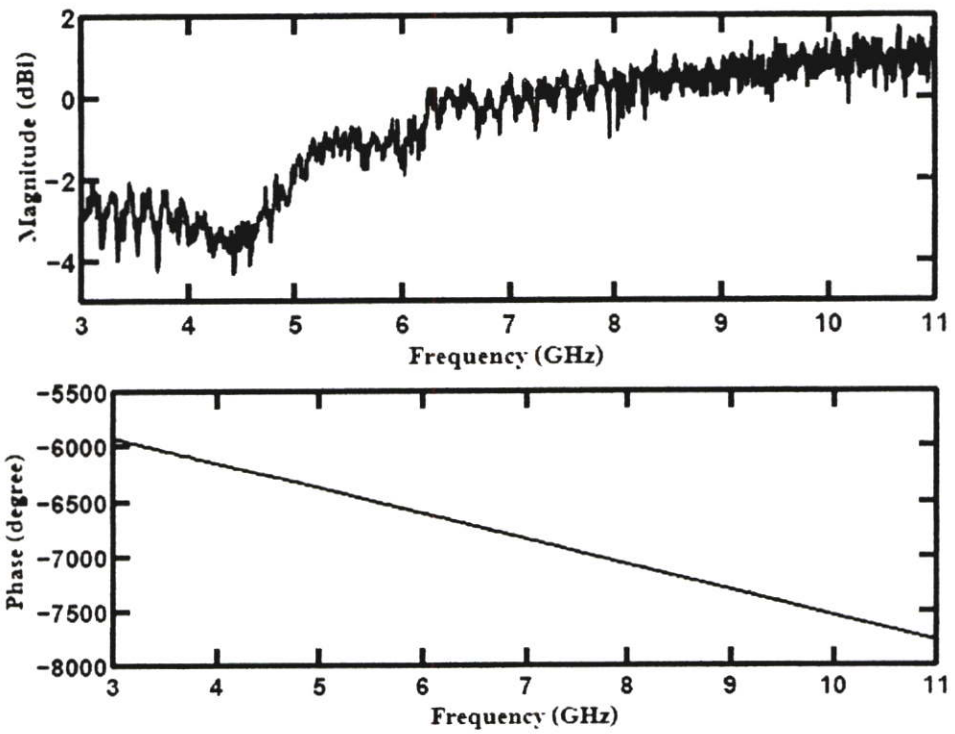
รูปที่ 4.3 สายอากาศแบบกรวยคู่

โดยในรูปที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficient : S_{11}) ของสายอากาศแบบกรวยคู่

ในส่วนของการแสดงถึงขนาดของฟังก์ชั่นการส่งผ่านและเฟสที่ใช้ในการส่งผ่านของสายอากาศซึ่งเป็นคุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ของสายอากาศแบบกรวยคู่



รูปที่ 4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชั่นการส่งผ่านของสายอากาศ

4.3 การทดสอบวัสดุสิ่งก่อสร้างในห้องดูดซับการสะท้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้ [12]

4.3.1 รูปแบบในการทดสอบวัสดุสิ่งก่อสร้างในห้องดูดซับการสะท้อน

รูปที่ 4.6 แสดงขั้นตอนในการทดสอบวัสดุในห้องดูดซับการสะท้อน โดยในการทดสอบนั้นทำการทดสอบวัสดุทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่

1) แก้ว

2) แผ่นจิมซัม

3) แผ่นไม้

4) แผ่นกั้น

โดยลักษณะของวัสดุทั้ง 4 ชนิดที่นำไปทดสอบมีลักษณะเป็น 4 เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งจะถูกนำไปวางอยู่ตรงกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ และระยะห่างระหว่างสายอากาศคือ 1 เมตร ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ จะแสดงในตารางที่ 4.1 การทดสอบครั้งนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์โดยมีพิสัยพลวัตของเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์อยู่ที่ประมาณ 80 dB โดยในรูปที่ 4.7 แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคุณลักษณะของการส่งพัลส์ผ่านวัสดุ โดยขั้นตอนและวิธีการทดสอบจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

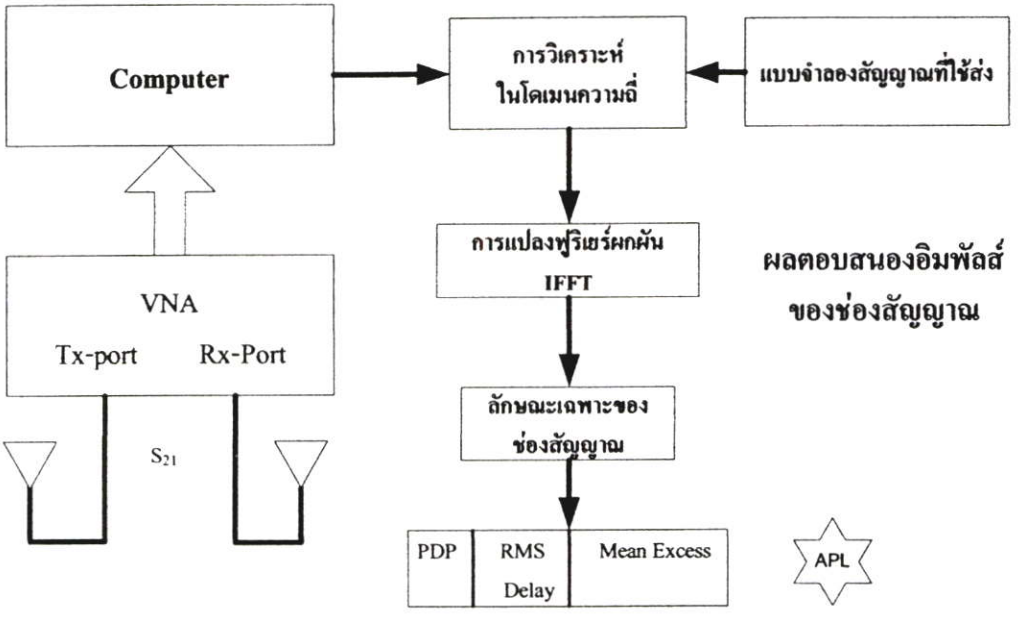
4.3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบวัสดุสิ่งก่อสร้างในห้องดูดซับการสะท้อน

ผลตอบสนองเชิงความถี่สำหรับช่องสัญญาณ สามารถหาได้จากการทดสอบสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน หรือ S_{21} ในระบบ โดยใช้การเปรียบเทียบการทดสอบในขณะที่มีวัสดุกับไม่มีวัสดุ รูปที่ 4.7 แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคุณลักษณะของการส่งพัลส์ผ่านวัสดุ

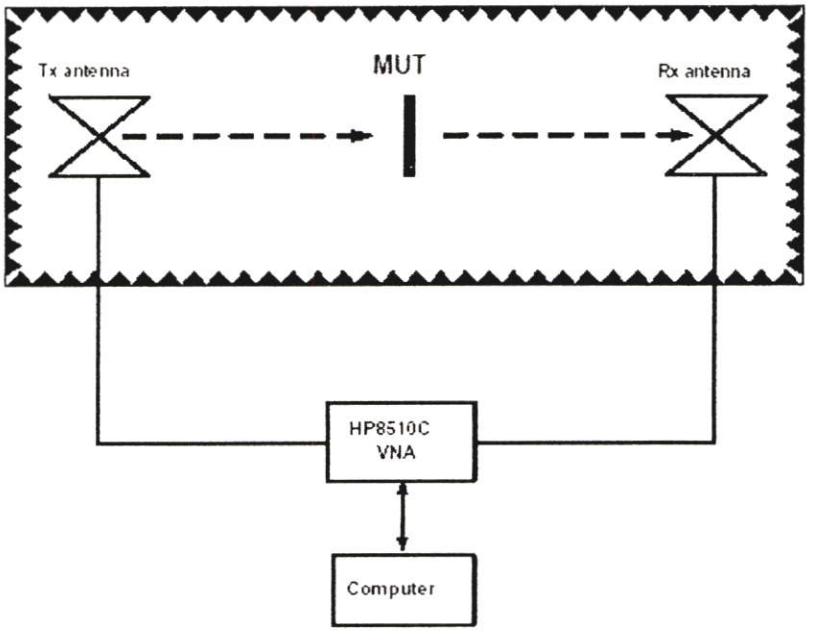
ขั้นตอนวิธีการทดสอบ เริ่มต้นจากการนำเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์มาปรับเทียบด้วยตัวปรับเทียบแบบ full two port (Full two port-Type Calibration Kits) โดยได้ทำการแบ่งความถี่เป็น 2 ช่วงได้แก่ความถี่ 3 GHz ถึง 7 GHz และ 7 GHz ถึง 11 GHz ซึ่งแต่ละช่วงความถี่มีจำนวนจุดของความถี่คือ 801 จุด

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน โดยที่ไม่มีวัสดุวางตรงกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ โดยสายอากาศเป็นชนิดแบบกรวยคู่ โดยสายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบจะถูกทำซ้ำ โดยนำวัสดุที่นำมาทดสอบชนิดต่างๆ ไปวางตรงกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ



รูปที่ 4.6 ขั้นตอนในการทดสอบวัสดุในห้องคุดซับการสะท้อน



รูปที่ 4.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคุณลักษณะของการส่งพัลส์ผ่านวัสดุ

4.3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบในห้องดูดซับการสะท้อนของคลื่น

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการทดสอบในห้องดูดซับการสะท้อนของคลื่น

พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่กลาง	7.0 GHz
แบนด์วิดท์สเปกตรัม	8.0 GHz
ความถี่ต่ำสุด	3.0 GHz
ความถี่สูงสุด	11.0 GHz
จำนวนจุดของความถี่ในแต่ละช่วง	801 point
พิสัยพลวัต	80 dB
ความสูงของสายอากาศส่ง	1.5 m
ความสูงของสายอากาศรับ	1.5 m
ระยะทางระหว่างสายอากาศ	1 m
การโพลาไรซ์	แนวตั้ง

4.3.4 แบบจำลองของสัญญาณที่ใช้ส่งภายในห้องดูดซับการสะท้อนของคลื่น

รูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมได้ถูกพิจารณาในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งในรูปที่ 4.8 แสดงรูปแบบของพัลส์ที่ใช้วิเคราะห์ โดยมีฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมกำหนดโดย

$$v(t) = \frac{A}{f_b}\left[f_H \operatorname{sinc}(2f_H t) - f_L \operatorname{sinc}(2f_L t) \right] \tag{4.1}$$

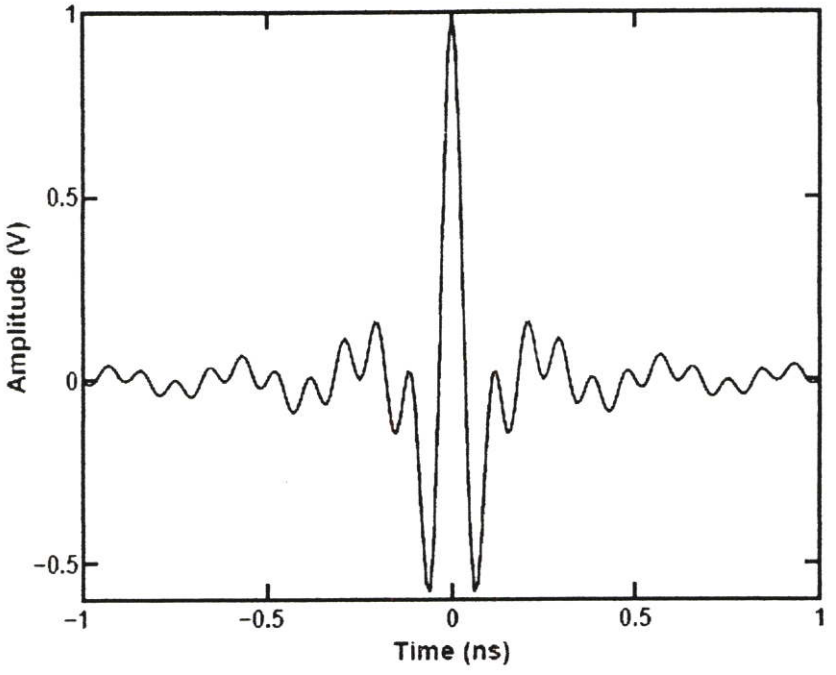
โดยที่ A คือ แอมพลิจูดสูงสุด เท่ากับ 1 V

f_b คือ แบนด์วิดท์ เท่ากับ 7.5 GHz

f_H คือ ความถี่สูงสุด เท่ากับ 10.6 GHz

f_L คือ ความถี่ต่ำสุด เท่ากับ 3.1 GHz

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



รูปที่ 4.8 รูปสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์

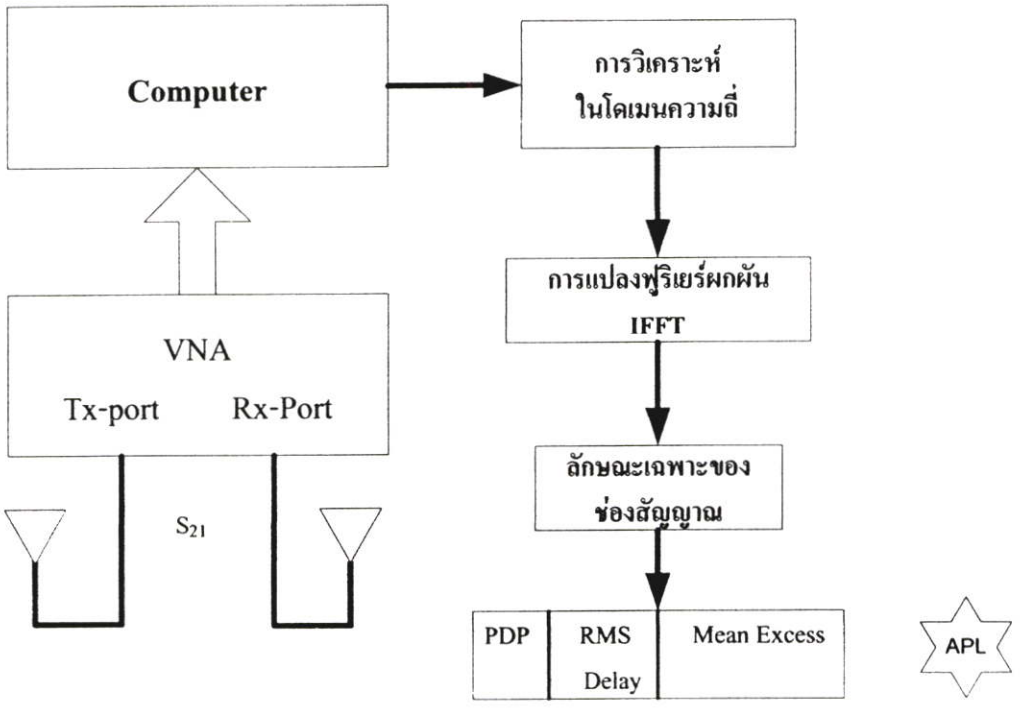
4.4 การทดสอบวัสดุภายในอาคาร [13]

4.4.1 รูปแบบการทดสอบภายในอาคาร

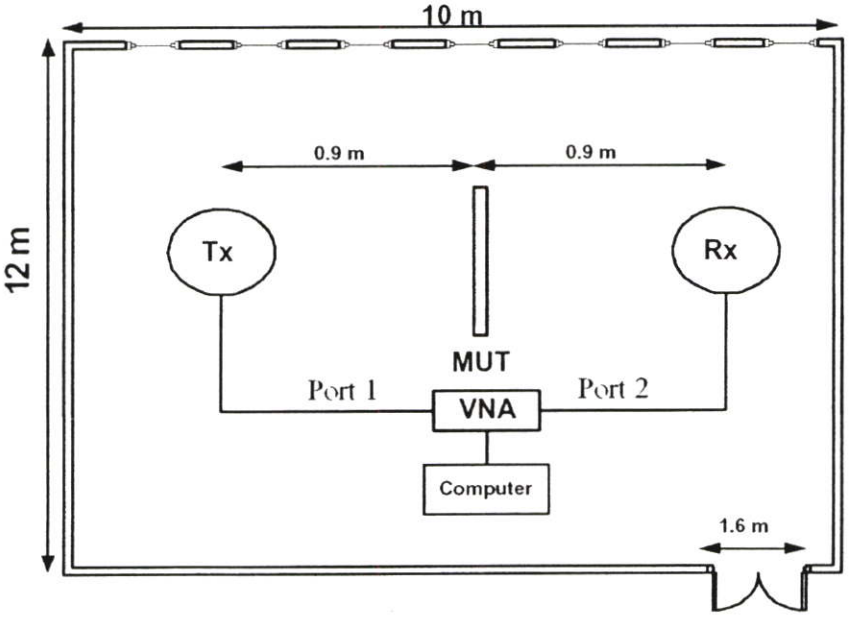
รูปที่ 4.9 แสดงขั้นตอนในการทดสอบและการวิเคราะห์ ลักษณะของวัสดุที่จะนำไปทดสอบมีลักษณะเป็น 4 เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งจะถูกนำไปวางอยู่ตรงกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ คือ 1.8 เมตร วัสดุมี 4 ชนิดคือ 1) อิฐ 2) แก้ว 3) แผ่นกั้น และ4) แผ่นไม้ ซึ่งในตารางที่ 4.2 จะแสดงถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดสอบครั้งนี้ การทดสอบครั้งนี้ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก โดยพิสัยพลวัตของเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์นี้อยู่ที่ประมาณ 80 dB

ในการทดสอบครั้งนี้ได้ทดสอบในห้องที่มีกำแพงทั้งหมด 3 ด้านแล้วด้านที่เหลือเป็นกระจก วัสดุที่ใช้ในการทดสอบอยู่ตรงกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ โดยเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ได้เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นตัวควบคุมในการทดสอบครั้งนี้ รูปที่ 4.10 แสดงขนาดของห้องและแบบจำลองในการทดสอบ การทดสอบครั้งนี้ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์รุ่น HP8510C โดยได้ทำการทดสอบช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 7 GHz และ 7 GHz ถึง 11 GHz โดยแต่ละช่วงความถี่จะมีจำนวนจุดของความถี่คือ 801 จุด ซึ่งทำให้ความละเอียดในช่วงการทดสอบตั้งแต่ 3 GHz ถึง 11 GHz คือ 1601 จุด โดยกำหนดให้พอร์ตที่ 1

ของเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ต่อกับสายอากาศทางด้านส่งและพอร์ตที่ 2 ของเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ต่อกับสายอากาศทางด้านรับ โดยสายอากาศเป็นชนิดกรวยคู่



รูปที่ 4.9 ขั้นตอนในการทดสอบและการวิเคราะห์ของวัสดุภายในอาคาร



รูปที่ 4.10 ขนาดของห้องและแบบจำลองในการทดสอบภายในอาคาร

4.4.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบภายในอาคาร

ผลตอบสนองเชิงความถี่สำหรับช่องสัญญาณ สามารถหาได้จากการทดสอบสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน หรือ S_{21} ในระบบ โดยใช้การเปรียบเทียบการทดสอบในขณะที่มีวัสดุกับไม่มีวัสดุ โดยวัสดุที่ทดสอบนั้น มี 4 ชนิด คือ อิฐ แก้ว แผ่นกั้น และ แผ่นไม้

ขั้นตอนวิธีการทดสอบ เริ่มต้นจากการนำเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์มาปรับเทียบด้วยตัวปรับเทียบแบบ full two port (Full two port-Type Calibration Kits) โดยได้ทำการแบ่งความถี่เป็น 2 ช่วงได้แก่ความถี่ 3 GHz ถึง 7 GHz และ 7 GHz ถึง 11 GHz ซึ่งแต่ละช่วงความถี่มีความมีจำนวนจุดของความถี่คือ 801 จุด

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน โดยที่ไม่มีวัสดุวางตรงกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ บันทึกผลที่เกิดขึ้นของสายอากาศส่งและสายอากาศรับโดยการโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบจะถูกทำซ้ำ โดยที่นำวัสดุที่นำมาทดสอบชนิดต่างๆ ไปวางตรงกลางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ซึ่งการทดสอบในครั้งนี้อาจจะมีสัญญาณหลายวิถีแทรกสอดอยู่ด้วยระหว่างสายอากาศกับช่องว่างของอากาศ รวมถึงผลกระทบของการกระจัดกระจายอันเนื่องมาจากการกระจัดกระจายในสภาวะแวดล้อม

4.4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบภายในอาคาร

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบทดสอบภายในอาคาร

พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่กลาง	7.0 GHz
แบนด์วิดท์สเปกตรัม	8.0 GHz
ความถี่ต่ำสุด	3.0 GHz
ความถี่สูงสุด	11.0 GHz
จำนวนจุดของความถี่ในแต่ละช่วงความถี่	801 point
ความสูงของสายอากาศส่ง	1.5 m
ความสูงของสายอากาศรับ	1.5 m
ระยะทางระหว่างสายอากาศ	1.8 m
การโพลาไรซ์	แนวตั้ง

4.5 ขั้นตอนการจำลองระบบโดยใช้หลักการผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

4.5.1 แบบแผน FDTD

จากข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์ ภายในอาคารเพื่อตรวจสอบผลจากการทดสอบ ได้จำลองระบบเพื่อหาค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุ และเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างการจำลองระบบทางคณิตศาสตร์โดยใช้คอมพิวเตอร์กับผลจากการทดสอบ จากบทที่ 3 นั้นหลักการของ FDTD ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่ง FDTD มีการวิเคราะห์ 2 โหมด คือ โหมดแรกเรียกว่า Transverse Magnetic (TM) Mode และโหมดสองเรียกว่า Transverse Electric (TE) Mode ซึ่งในการวิเคราะห์จะจำลองระบบในโหมดของ TM โหมด เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายมีลักษณะเป็นวงกลม เหมือนกับสายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีการโพราไรซ์ในแนวตั้ง จากบทที่ 3 จะได้สมการผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลาจากสมการเคิร์ลของแมกซ์ในการวิเคราะห์แบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ คือ

$$H_x\Big|_{i,j}^{n+1/2} = H_x\Big|_{i,j}^{n-1/2} + \left(\frac{\Delta t}{u_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z\Big|_{i,j+1/2}^{n} - E_z\Big|_{i,j-1/2}^{n}}{\Delta y}\right) \tag{4.2a}$$

$$H_y\Big|_{i,j}^{n+1/2} = H_y\Big|_{i,j}^{n-1/2} + \left(\frac{\Delta t}{u_{i,j}}\right)\left(\frac{E_z\Big|_{i+1/2,j}^{n} - E_z\Big|_{i-1/2,j}^{n}}{\Delta x}\right) \tag{4.2b}$$

$$E_z\Big|_{i,j}^{n+1} = C_a\Big|_{i,j} E_z\Big|_{i,j}^{n} + C_b\Big|_{i,j}\left(\frac{H_y\Big|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_y\Big|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} - \frac{H_x\Big|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - H_x\Big|_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y}\right) \tag{4.2c}$$

โดยที่ $C_a\big|_{i,j}$, $C_b\big|_{i,j}$ มีค่าคงที่ ดังสมการ

$$C_a\Big|_{i,j} = \left(1 - \frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right) \Big/ \left(1 + \frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right) \tag{4.3a}$$

$$C_b\Big|_{i,j} = \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j}}\right) \Big/ \left(1 + \frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j}}\right) \tag{4.3b}$$

4.5.2 การกระตุ้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบนี้ ได้ใช้พัลส์แบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตสำหรับการกระตุ้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง เนื่องจากพัลส์แบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตไม่มีลูกคลื่นข้างเคียงซึ่งทำให้มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ มีสมการดังนี้

$$v_s\Big|^n = Ae^{-\left[(n-n_0)\Delta t/d\right]^2}\sin\left[2\pi f_c\left(n-n_0\right)\Delta t\right] \tag{4.4}$$

โดยที่

A คือ แอมพลิจูด

f_c คือ ความถี่กลาง

d คือ เวลาที่มีค่าลดลงเป็น $1/e$

n_0 คือ ขั้นเวลาประวิง

4.5.3 ขอบเขตการดูดกลืนแบบชั้นแมตช์สมบูรณ์

ข้อจำกัดของการคำนวณด้วยวิธี FDTD โดยใช้คอมพิวเตอร์นั้น เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางไปถึงปลายโดเมนการคำนวณที่เราจำกัดไว้ในทิศทาง x, y และ z สมการผลต่างสืบเนื่องจำกัดจะไม่สามารถหาค่าส่วนประกอบสนามที่ขอบสัมผัสขอบนอกโดเมนการคำนวณได้ ซึ่งทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นในบริเวณที่พิจารณาอยู่ เพื่อที่จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับให้น้อยลง จะใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืน (ABC) วางไว้ที่ปลายโดเมนการคำนวณ เพื่อทำให้โดเมนการคำนวณเปรียบเสมือนมีขนาดเป็นระยะอนันต์ โดยในการจำลองแบบ FDTD นี้ ได้ใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนชั้นแมตช์สมบูรณ์ (PML ABC) [14] โดยที่ PML ABC ที่มี 16 ชั้น สามารถดูดกลืนคลื่นที่แพร่กระจายมาถึงได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยสร้างตัวกลางที่มีการสูญเสียไว้ที่ขอบโดเมนการคำนวณทั้งสี่ด้าน ส่วนประกอบสนามจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ๆ ด้วยกันคือ สภาพนำทางไฟฟ้า σ และการสูญเสียทางแม่เหล็ก σ^* ภายในตัวกลาง PML จะกำหนดให้เป็นไปตามเงื่อนไขการแมตช์อิมพิแดนซ์ PML เป็น

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma^*}{\mu_0} \tag{4.5}$$

โดยที่ μ_0 คือ ความซาบซึมของอากาศว่าง (permeability of vacuum), Hm^{-1} ,NA^{-2}

ε_0 คือ สภาพยอมของอวกาศว่าง (Permittivity of free space), Fm^{-1}

σ คือ สภาพนำ (Conductivity), S/m

σ^* คือ ความสูญเสียทางแม่เหล็ก (Magnetic loss), $\Omega\,m^{-1}$

รูปแบบการแบ่ง PML จะมีการเพิ่มขึ้นของสภาพนำทางไฟฟ้า และความสูญเสียทางแม่เหล็กอย่างราบเรียบ โดยมีความสัมพันธ์กับความกว้างของ PML ในแต่ละขั้น ซึ่งรูปแบบการแบ่ง PML โดยทั่วไปจะมีสภาพนำทางไฟฟ้าอยู่ในเทอมของฟังก์ชันเอกซ์โพแนนเชียลกำลังสอง คือ

$$\sigma(\rho) = \sigma_{\max}(\rho/\delta)^2 \tag{4.6}$$

โดยที่

ρ คือ ความกว้างของ PML ในแต่ละชั้น

δ คือ ความกว้างทั้งหมดของ PML

ซึ่งค่าของ $\sigma_{\max}$ หาได้จากการกำหนดค่าของตัวร่วมการสะท้อนที่มุมศูนย์องศา โดยมีความสัมพันธ์เป็น

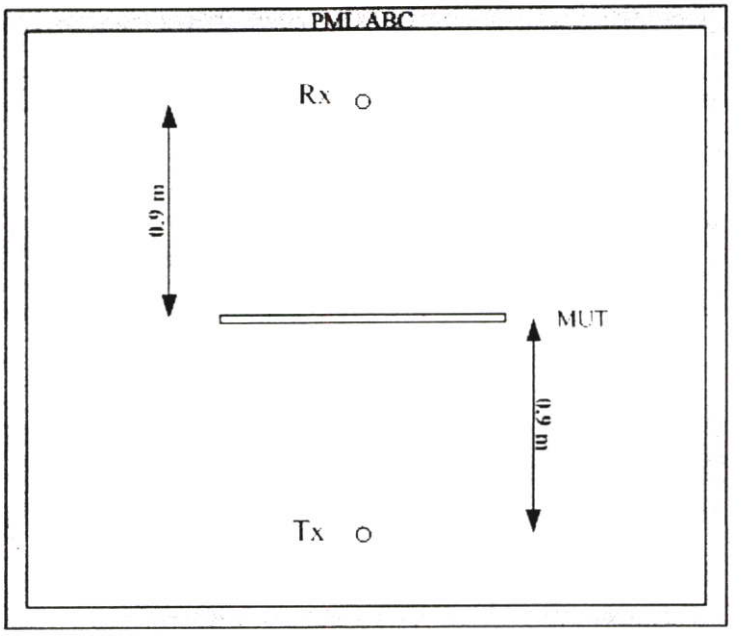
$$R(0) = e^{-2\sigma_{\max}\delta/(3\varepsilon c)} \tag{4.7}$$

4.5.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการจำลองแสดงในตารางที่ 4.3 โดยมีแหล่งกำเนิดสัญญาณคือ Tx และจุดรับสัญญาณคือ Rx รูปที่ 11 แสดงแบบจำลองของ FDTD แบบแผนคลื่น TM มีค่าสภาพนำไฟฟ้าและสภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ในตารางที่ 4.4 [15]

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่กลาง	7.0 GHz
ความถี่ต่ำสุด	3.0 GHz
ความถี่สูงสุด	11.0 GHz
แบนด์วิดท์สเปกตรัม	8.0 GHz
ระยะทางระหว่างสายอากาศ	1.8 m



รูปที่ 4.11 แบบจำลองของวิธี FDTD สำหรับแบบแผนคลื่น TM

ตารางที่ 4.4 ค่าสภาพนำไฟฟ้าและสภาพยอมไฟฟ้า [15]

ชนิดของวัสดุ	สภาพนำไฟฟ้า (σ)	สภาพยอมไฟฟ้า(ε)
อิฐ	0.113	3.30
แก้ว	0.062	2.86
แผ่นไม้	0.070	1.70

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนในการทดสอบช่องสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งของวัสดุทั้ง 4 ชนิด ภายในห้องดูดซับการสะท้อนกับภายในอาคาร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการทดสอบประกอบกับสายอากาศแบบกรวยคู่ โดยทำการทดสอบบนโดเมนความถี่เพื่อตรวจสอบถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง โดยเฉพาะการเกิดผลกระทบที่เกิดจากการส่งสัญญาณผ่านวัสดุ โดยข้อมูลการทดสอบที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์และแสดงผลในพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังจะแสดงในบทต่อไป ในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้เปรียบ

เทียบผลจากการทดสอบภายในอาคารกับวิธีการทางคณิตศาสตร์ของวัสดุทั้ง 3 ชนิด คือ อิฐ แก้ว และแผ่นไม้ โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา โดยผลที่ได้จะแสดงในบทต่อไป

บทที่ 5
ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบ

5.1 กล่าวนำ

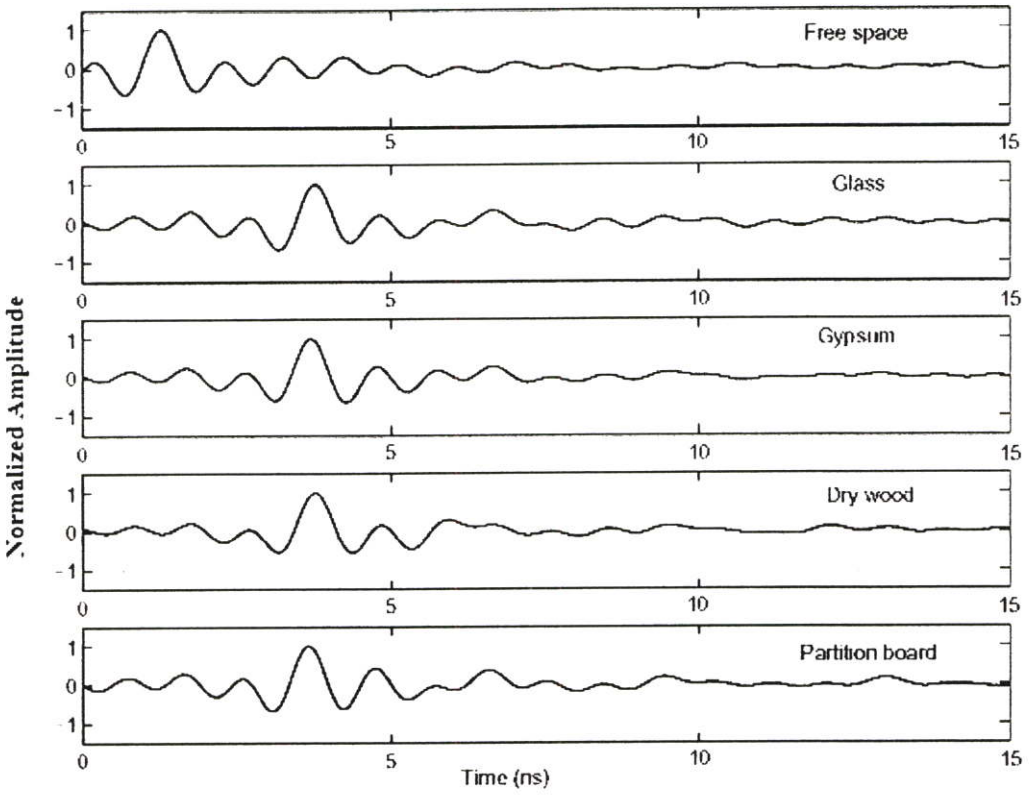
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลของช่องสัญญาณที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งได้ทำการทดสอบภายในห้องไร้การสะท้อนและภายในอาคาร โดยแสดงในพารามิเตอร์หลักทั้งหมด 3 ค่าคือ การสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่าน การประวิงเข้าถึงเฉลี่ย และการแผ่ประวิง RMS ซึ่งเป็นประเด็นหลักของการพิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้โดยแบ่งตามลักษณะของสภาวะแวดล้อมต่างๆ อีกทั้งยังเปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีการคณิตศาสตร์ โดยการจำลองระบบด้วยวิธี FDTD

5.2 ผลการวิเคราะห์ในห้องดูดซับการสะท้อน

ผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ แสดงออกมาในรูปสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านด้วยจำนวนจุดของความถี่ในแต่ละช่วงคือ 801 จุด ในห้องดูดซับการสะท้อน (anechoic chamber) ผลตอบสนองของช่องสัญญาณสามารถหาได้จากการแปลงฟูริเยร์ผกผัน รูปที่ 5.1 แสดงผลตอบสนองอิมพัลส์ที่ได้ถูกนอร์มอลล์ไรซ์แล้ว และค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านของวัสดุแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบของแผ่นกั้นที่มีความหนามากทำให้มีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุที่มาก และแก้วมีความหนาน้อยทำให้มีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุที่น้อยตามไปด้วย อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุจะขึ้นกับชนิดของวัสดุอีกด้วย

สำหรับค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ย และการแผ่ประวิง RMS สามารถหาได้โดยกำหนดระดับสัญญาณรบกวนอยู่ที่ -20 dB ตารางที่ 5.2 แสดงค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ยของแก้ว แผ่นจิบซัม แผ่นไม้และแผ่นกั้น แผ่นไม้มีค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ยแตกต่างจากวัสดุที่นำมาทดสอบ

ในตารางที่ 5.3 ได้แสดงจำนวนครั้งในการทดสอบและค่าการแผ่ประวิง RMS โดยค่าการแผ่ประวิง RMS ของแผ่นกั้นจะมีค่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการแผ่ประวิง RMS ในวัสดุที่เหลืออื่น ๆ



รูปที่ 5.1 ผลตอบสนองอิมพัลส์ซึ่งถูกนอร์มอลล์ไรซ์

ตารางที่ 5.1 ขนาดของวัสดุและการสูญเสียจากการส่งผ่านในห้องดูดซับการสะท้อน

วัสดุ	ความหนา (cm)	ขนาด (กว้างx ยาว) (cm x cm)	การสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุ (dB)	การสูญเสียจากการส่งผ่าน (dB/m)
แผ่นแก้ว	1.0	60 x 60	1.573	21.5730
แผ่นจิบซัม	1.5	60 x 60	1.667	19.9061
แผ่นไม้	3.5	60 x 60	1.872	16.4313
แผ่นกั้น	6.0	60 x 60	2.174	14.3925

ตารางที่ 5.2 ค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ย ค่าต่ำสุด และ ค่าสูงสุดในห้องดูดซับการสะท้อน

วัสดุ	Min (ns)	Max (ns)	Mean (ns)
แผ่นแก้ว	3.682	3.811	3.735
แผ่นจิมซัม	3.798	3.921	3.863
แผ่นไม้	4.211	4.356	4.299
แผ่นกั้น	3.656	3.797	3.732

ตารางที่ 5.3 จำนวนครั้งในการทดสอบและค่าการแผ่ประวิง RMS ในห้องดูดซับการสะท้อน

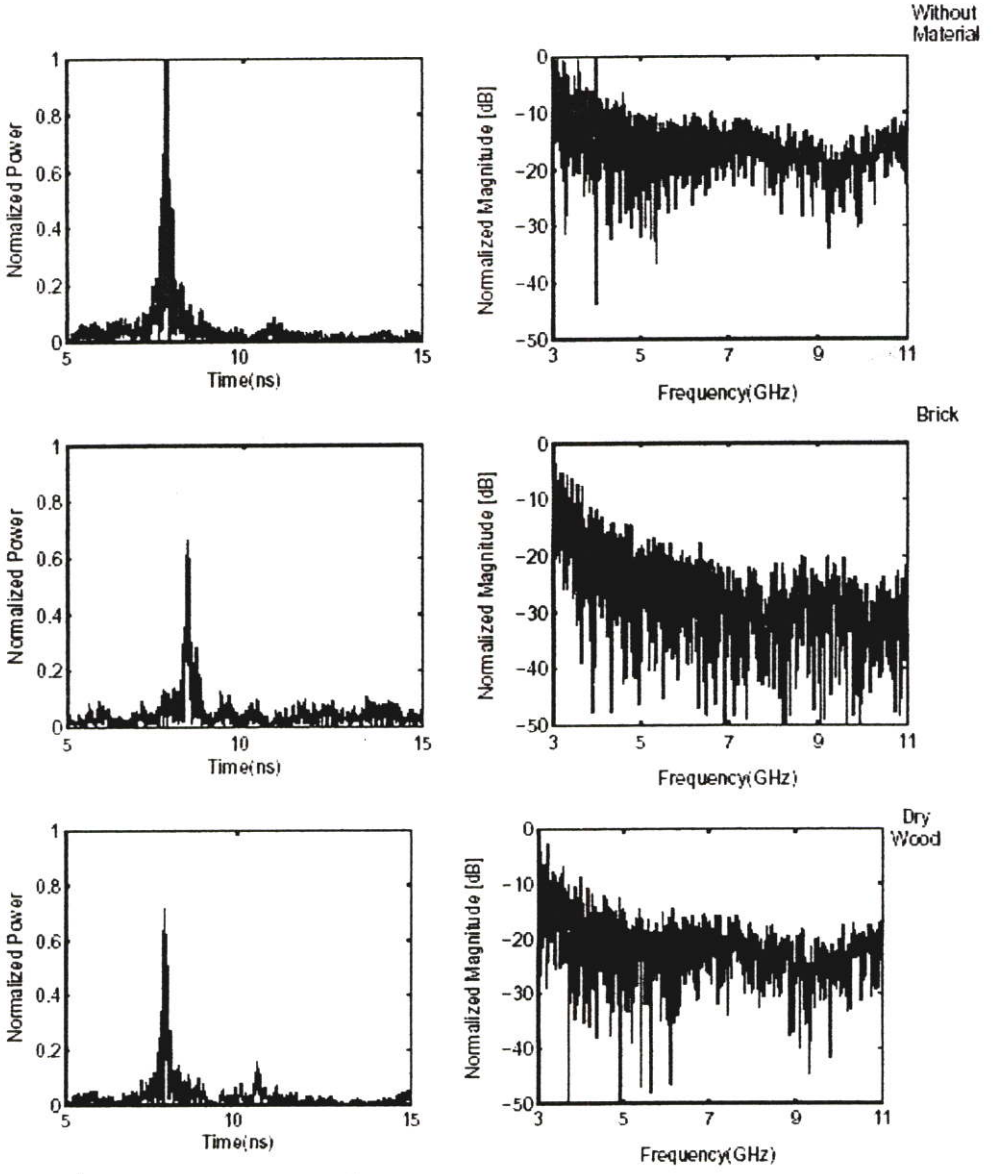
ค่าการแผ่ประวิง RMS						
วัสดุ	ครั้งที่ 1 (ns)	ครั้งที่ 2 (ns)	ครั้งที่ 3 (ns)	ครั้งที่ 3 (ns)	ครั้งที่ 5 (ns)	ค่าเฉลี่ย (ns)
แผ่นแก้ว	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.22
แผ่นจิมซัม	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.18
แผ่นไม้	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.48
แผ่นกั้น	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.30

5.3 ผลการวิเคราะห์ภายในอาคาร

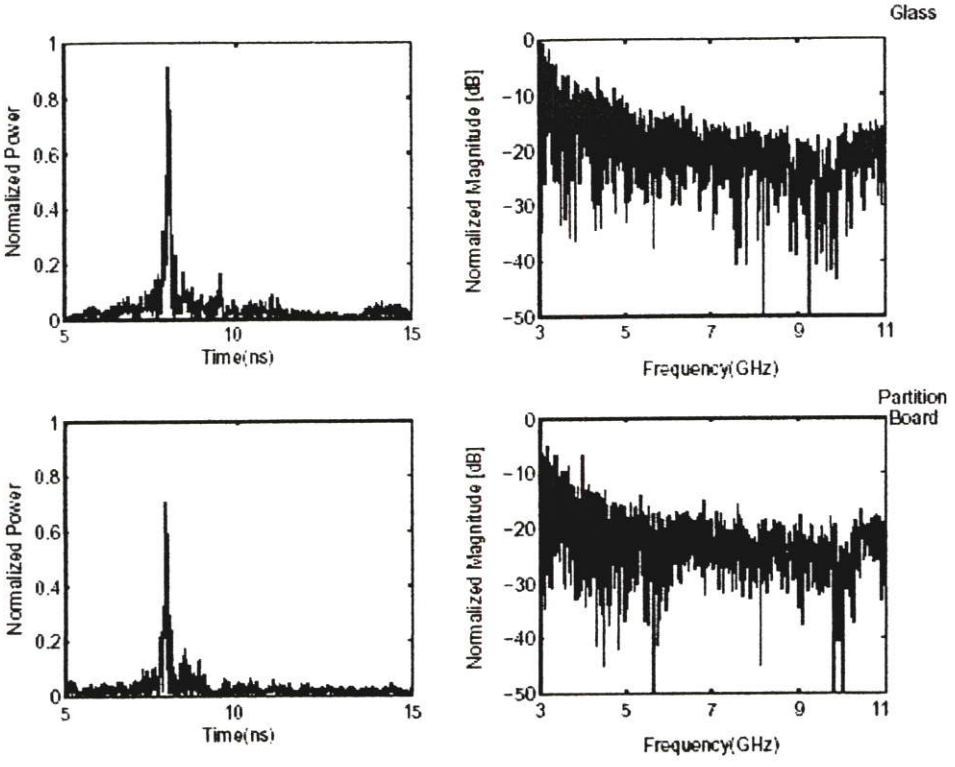
ผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ แสดงออกมาในรูปสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่าน รูปที่ 5.2 แสดงกำลังงานและขนาด ซึ่งถูกนอร์แมลไลซ์ด้วยค่าสูงสุดในการทดสอบ ซึ่งในวัสดุแต่ละชนิดจะมีการลดของกำลังงานและขนาดไม่เท่ากัน โดยอิฐมีการลดของกำลังงานและขนาดมากที่สุด และแก้วมีการลดของกำลังงานและขนาดน้อยที่สุด ตารางที่ 5.4 แสดงการสูญเสียจากการส่งผ่าน จากตารางที่ 5.4 เมื่อเปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน (dB/m) ของอิฐกับแผ่นกั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนแก้วกับแผ่นไม้มีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน (dB/m) ใกล้เคียงกัน โดยที่แก้วมีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน (dB/m) มากที่สุดและแผ่นกั้นมีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน (dB/m) น้อยที่สุด เพราะฉะนั้นค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุจะขึ้นกับชนิดของวัสดุด้วย

สำหรับค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ย และการแผ่ประวิง RMS สามารถหาได้โดยกำหนดระดับสัญญาณรบกวนอยู่ที่ -15 dB ตารางที่ 5.5 แสดงค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ย โดยค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ยของแผ่นไม้ แก้วและแผ่นกั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่อิฐมีค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ยที่แตกต่างกันและมีค่ามากที่สุด

ในตารางที่ 5.6 ได้แสดงจำนวนในการทดสอบและค่าการแผ่ประวิง RMS โดยค่าการแผ่ประวิง RMS ของอิฐจะมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการแผ่ประวิง RMSในวัสดุที่เหลืออื่น ๆ



รูปที่ 5.2 กำลังงานและขนาด ซึ่งถูกนอร์มอลล์ไลซ์ด้วยค่าสูงสุดของการทดสอบในวัสดุต่าง ๆ



รูปที่ 5.2 กำลังงานและขนาด ซึ่งถูกนอร์มอลล์ไลซ์ด้วยค่าสูงสุดของการทดสอบในวัสดุต่าง ๆ(ต่อ)

ตารางที่ 5.4 ขนาดของวัสดุและการสูญเสียจากการส่งผ่านภายในอาคาร

วัสดุ	ความหนา (cm)	ขนาด (กว้างxยาว) (cm x cm)	การสูญเสียจากการส่งผ่าน (dB)	การสูญเสียจากการส่งผ่าน (dB/m)
อิฐ	5.5	140 x 200	2.7173	15.3137
แก้ว	1.0	140 x 200	1.2142	21.2142
แผ่นกั้น	5.5	140 x 200	1.6364	14.2328
แผ่นไม้	1.5	140 x 200	1.5090	19.7481

ตาราง 5.5 ค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ย ค่าต่ำสุด และ ค่าสูงสุดภายในอาคาร

วัสดุ	Min (ns)	Max (ns)	Mean (ns)
อิฐ	9.1861	9.3721	9.2791
แก้ว	8.0310	8.0558	8.0434
แผ่นกั้น	7.9862	8.2034	8.0948
แผ่นไม้	7.8946	8.0342	7.9644

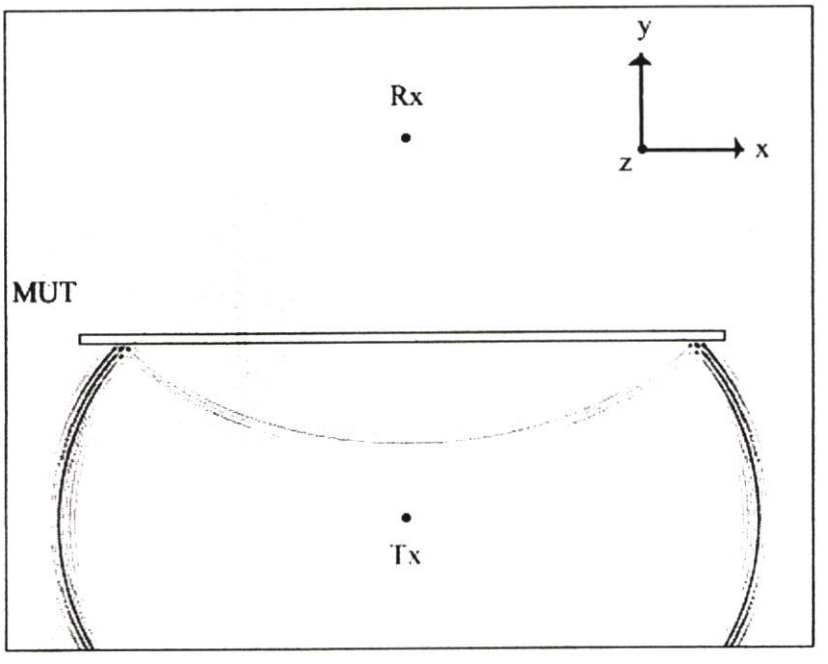
ตารางที่ 5.6 จำนวนครั้งในการทดสอบและค่าการแผ่ประวิง RMS ภายในอาคาร

ค่าการแผ่ประวิง RMS				
วัสดุ	ครั้งที่ 1 (ns)	ครั้งที่ 2 (ns)	ครั้งที่ 3 (ns)	ค่าเฉลี่ย (ns)
อิฐ	2.06	2.60	2.41	2.413
แก้ว	0.08	0.09	0.07	0.080
แผ่นกั้น	0.19	0.15	0.10	0.150
แผ่นไม้	0.35	0.37	0.36	0.360

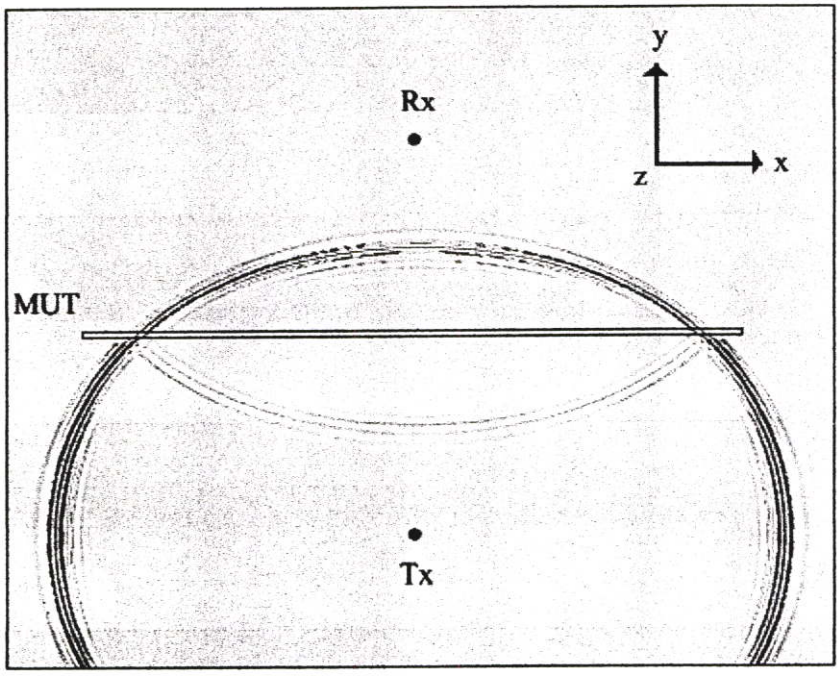
5.4 ผลการเปรียบเทียบจากผลการทดสอบภายในอาคารกับผลการจำลองโดยวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

หลังจากได้จำลองด้วยวิธี FDTD สำหรับแบบแผนคลื่น TM ในสองมิติ โดยกำหนดให้ขนาดเซลล์ในทิศทาง x และ y เป็น $\Delta x = \Delta y = 0.0001m$ โดยใช้ PML ABC 16 ชั้น เพื่อลดความผิดพลาดเนื่องจากการสะท้อนที่ขอบของโดเมนการจำลอง ช่วงเวลาในแต่ละขั้นเวลาเป็น 0.236 ps ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข ขั้นเวลาทั้งหมดในการจำลองแบบนี้เป็น n = 9000 สำหรับการกระตุ้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ UWB ให้เป็นพัลส์แบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลต โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $f_c = 7.34$ GHz, $d = 0.11ns$, $A = 0.279$ mV และ $n_0 = 200$ [16] หลังจากทำการกำหนดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ UWB ที่ใช้ในการจำลองแล้ว ทำการกระตุ้นแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้า โดยใช้แนวความคิดแบบแผนคลื่น TM สองมิติ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แพร่กระจายไปยังเป้าหมาย โดยผ่านวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ อิฐ แก้ว และ แผ่นไม้ ไปยังจุดรับคลื่นแม่เหล็กโดยตั้งไว้หลังวัสดุ โดยในการจำลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านวัสดุ โดยได้ใช้การส่งผ่านปราศจากวัสดุเป็นตัวเปรียบเทียบ เพื่อหาค่าการสูญเสียเนื่องจาก

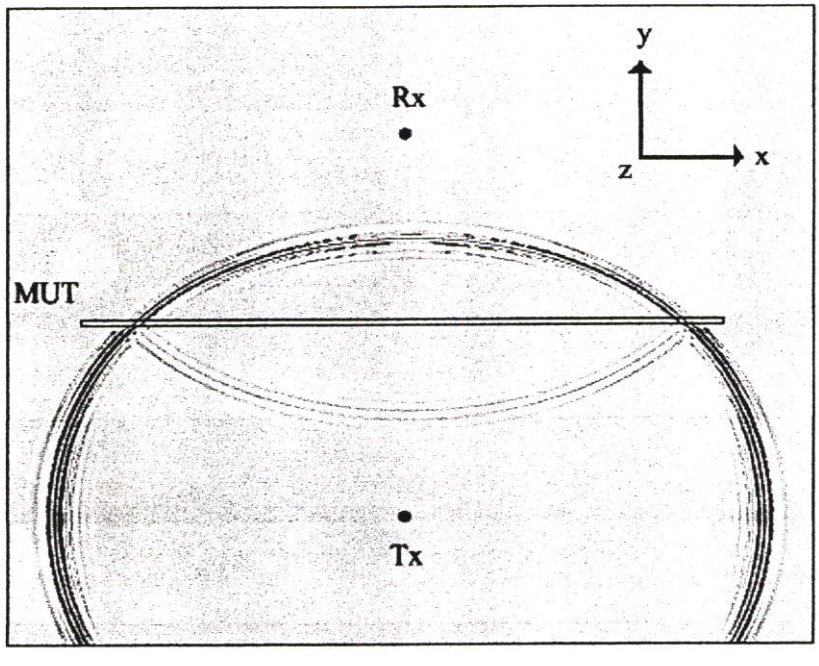
การส่งผ่านวัสดุ รูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.5 คือรูปที่แสดงถึงสนามไฟฟ้า ณ $n = 4000$ ของวัสดุต่าง ๆ กัน ซึ่งตารางที่ 5.7 แสดงขนาดของวัสดุ และเปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน โดยในรูปที่ 5.6 ถึงรูปที่ 5.8 แสดงขนาดของวัสดุแต่ละชนิดในการจำลอง FDTD เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ



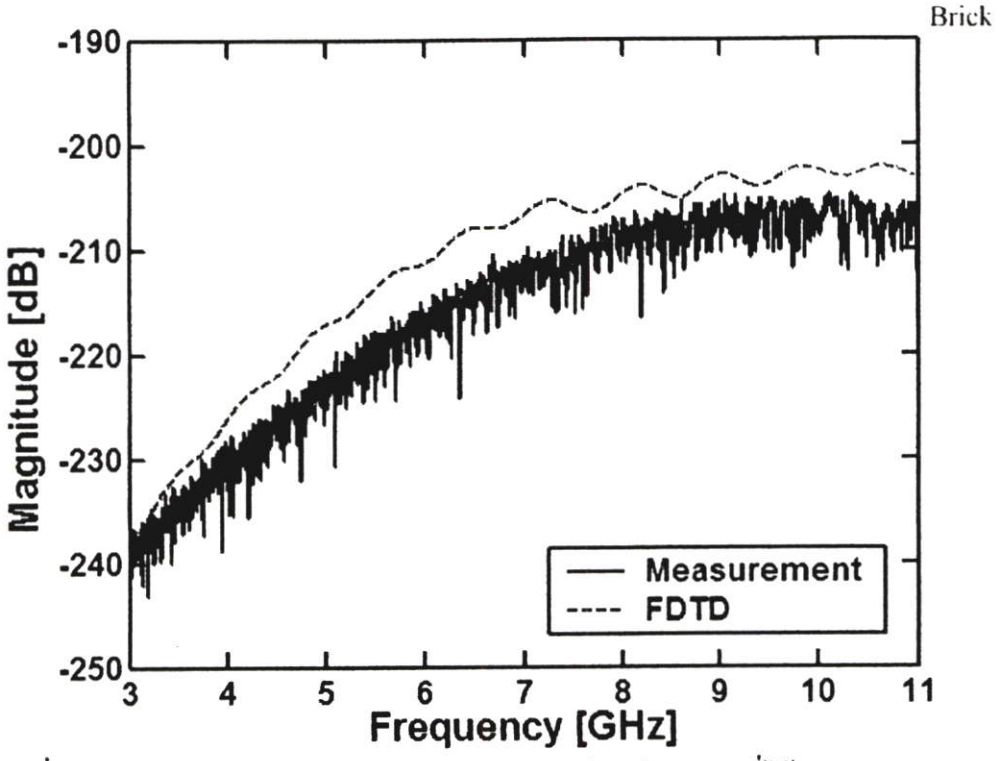
รูปที่ 5.3 สนามไฟฟ้า ณ เวลาที่ $n = 4000$ เมื่อ *MUT* เป็นอิฐ



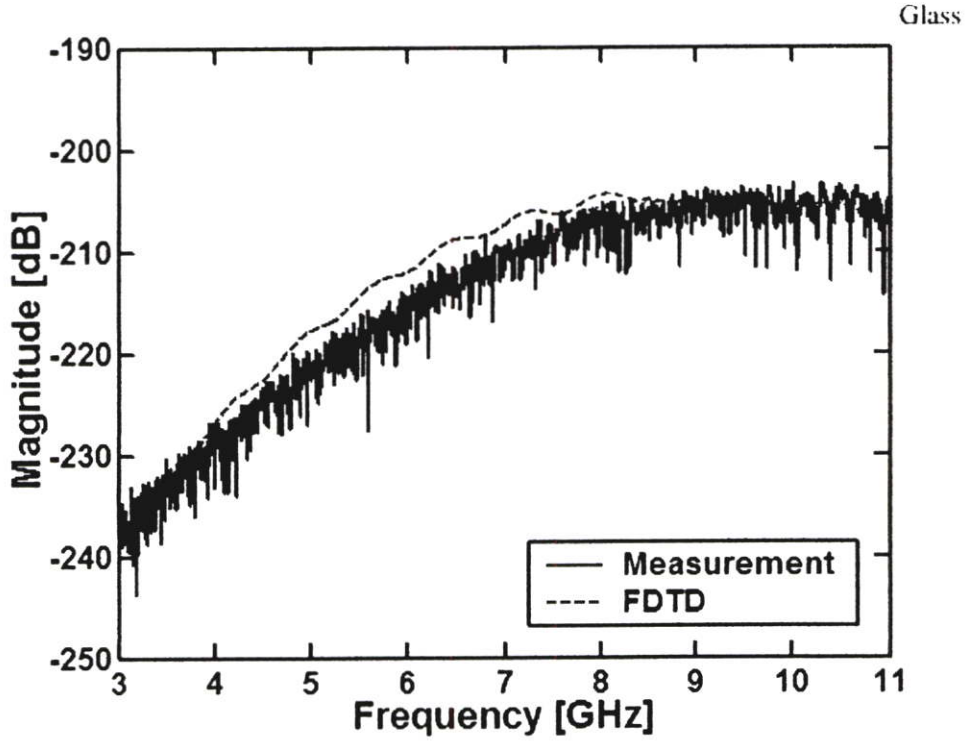
รูปที่ 5.4 สนามไฟฟ้า ณ เวลาที่ $n = 4000$ เมื่อ *MUT* เป็นแก้ว



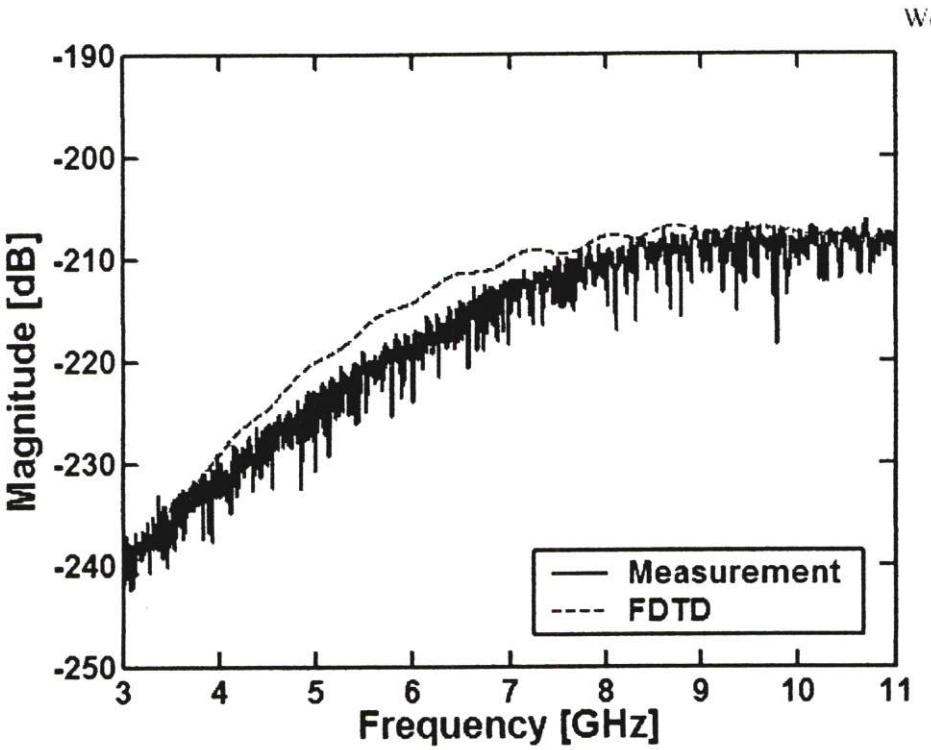
รูปที่ 5.5 สนามไฟฟ้า ณ เวลาที่ $n = 4000$ เมื่อ *MUT* เป็นไม้



รูปที่ 5.6 ค่าขนาดของกำลังงานในการจำลอง FDTD เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบของอิฐ



รูปที่ 5.7 ค่าขนาดของกำลังงานในการจำลอง FDTD เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบของแก้ว



รูปที่ 5.8 ค่าขนาดของกำลังงานในการจำลอง FDTD เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบของแผ่นไม้

ตารางที่ 5.7 ขนาดของวัสดุและค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน ทั้งจากการทดสอบและวิธี FDTD

วัสดุ	ขนาด (ความหนา x ยาว) (cm x cm)	การสูญเสียจากการส่งผ่านโดยผลจากการทดสอบ (dB)	การสูญเสียจากการส่งผ่านโดยวิธี FDTD (dB)
อิฐ	5.5 x 200	2.7173	5.7232
แก้ว	1.0 x 200	1.2142	1.4732
แผ่นไม้	1.5 x 200	1.5090	2.7684

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งร่วมกับผลกระทบที่ส่งสัญญาณพัลส์ผ่านวัสดุ โดยอาศัยการตรวจสอบบนพื้นฐานจากการทดสอบด้วยอุปกรณ์หลักในการทดสอบคือ เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งได้จำลองการทดสอบภายในห้องที่มีลักษณะต่างกัน 2 แบบ คือ ภายในห้องคูดซับการสะท้อนของคลื่น และภายในอาคาร โดยใช้สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบคือ สายอากาศแบบกรวยคู่ หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ การประวิงเข้าถึงเฉลี่ยของสัญญาณ การแผ่ประวิง RMS และค่าการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่าน นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบภายในห้องกับวิธีทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

6.1 สรุปผลการวิเคราะห์ช่องสัญญาณกรณีทดสอบภายในห้องดูดซับการสะท้อน

ในการตรวจสอบถึงคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในแบบจำลองการทดสอบภายในห้องไร้การสะท้อนโดยใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบในส่วนต่างๆ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อแสดงถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งเมื่อส่งสัญญาณพัลส์ผ่านวัสดุ

ค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ย การแผ่ประวิง RMS และการสูญเสียเนื่องจากการผ่านวัสดุความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 11 GHz ค่าการประวิงเข้าถึงเฉลี่ยและการแผ่ประวิง RMS ของไม้มีค่ามากที่สุดในวัสดุก่อสร้างที่ได้ทำการทดสอบ แผ่นกั้นมีค่าการแผ่ประวิงเข้าถึงเฉลี่ยน้อยที่สุด แต่กลับมีค่าการแผ่ประวิง RMS มากกว่าแผ่นจิมซัมและแผ่นแก้ว อย่างไรก็ตามค่าการแผ่ประวิง RMS ของสัญญาณจะแปรเปลี่ยนไปตามระยะห่างของสายอากาศอีกด้วย สำหรับแผ่นกั้นนั้นมีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านน้อยที่สุด คือ 14.39 dB/m และแผ่นแก้วมีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุมากที่สุดคือ 21.57 dB/m นั้นแสดงให้เห็นว่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านวัสดุนั้น ส่งผลต่อระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ โดยจำเป็นต้องทำการตรวจสอบ เพื่อประมาณระดับการสูญเสียของกำลังงานที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะสามารถออกแบบระบบทางด้านรับให้มีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณสูงสุด

6.2 สรุปผลการวิเคราะห์ช่องสัญญาณกรณีภายในอาคาร

จากการทดสอบสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของวัสดุก่อสร้างทั้ง 4 ชนิด คือ อิฐ แก้ว แผ่นกั้น และแผ่นไม้ โดยทำการทดสอบในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 11 GHz แสดงค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านของวัสดุ ค่าการแผ่ประวิง RMS และค่าการสูญเสียของการส่งผ่านของข้อมูลที่ทำการ

ทดสอบ จากผลของการทดสอบวัสดุที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีความหนาของอิฐกับแผ่นกั้นซึ่งมีความหนาเท่ากันและความหนาของแก้วกับแผ่นไม้มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าของการประวิงเฉลี่ยและค่าการแผ่ประวิง RMS ไม่เท่ากัน โดยอิฐมีค่าของการประวิงเฉลี่ยและค่าการแผ่ประวิง RMS มากที่สุด คือ 9.28 ns และ 2.41 ns ตามลำดับ แก้วมีค่าการประวิงเฉลี่ยและค่าการแผ่ประวิง RMS น้อยที่สุด ส่วนค่าการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่าน ความหนาและขนาดที่เท่ากันแต่วัสดุคนละชนิดกันทำให้วัสดุมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านไม่เท่ากันไปด้วย โดยในผลการทดสอบนี้แผ่นกั้นมีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน น้อยที่สุดคือ 14.23 dB/m ส่วนแก้วมีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านมากที่สุด คือ 21.21 dB/m ค่าเหล่านี้ส่งผลต่อระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ โดยจำเป็นต้องทำการตรวจสอบ เพื่อประมาณระดับการสูญเสียของกำลังงานที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะสามารถออกแบบระบบทางด้านรับให้มีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณสูงสุด

6.3 สรุปผลการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

จากการจำลองด้วยวิธี FDTD แบบแผนคลื่น TM สองมิติ โดยใช้สมการเคิร์ลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของแมกซ์เวลล์ ตามแนวความคิดของยี ซึ่งสนามไฟฟ้าได้แพร่กระจายไปยังเป้าหมาย โดยผ่านวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ อิฐ แก้วและแผ่นไม้ ที่มีขนาดของวัสดุเหมือนกับการทดสอบภายในอาคาร โดยได้เปรียบเทียบขนาดของกำลังงาน แก้วและแผ่นไม้มีขนาดของผลการจำลองด้วยวิธี FDTD กับผลที่มาจากการทดสอบภายในอาคารใกล้เคียงกัน ส่วนของอิฐมีขนาดของผลการจำลองด้วยวิธี FDTD กับผลจากการทดสอบภายในอาคารห่างกันมากที่สุด ในส่วนของการสูญเสียจากการส่งผ่านนั้น วัสดุทั้ง 3 ชนิด มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านวัสดุของการจำลองด้วยวิธี FDTDใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบภายในอาคาร โดยที่อิฐมีค่าความแตกต่างของการสูญเสียจากการส่งผ่านมากที่สุด แต่ค่าความแตกต่างนั้นมีค่าเพียง 3 dB และแก้วมีค่าความแตกต่างของการสูญเสียจากการส่งผ่านวัสดุน้อยที่สุด คือ 0.2 dB ซึ่งค่าความแตกต่างนี้สามารถยอมรับได้ นั้นคือผลที่ได้จากการทดสอบใกล้เคียงกับผลการจำลองมาก

6.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากแนวคิดที่ได้ทำการตรวจสอบถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งทั้งในกรณีที่ผลกระทบจากการส่งสัญญาณพัลส์ผ่านวัสดุทั้งที่ทำการทดสอบจริงและการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จากการวิเคราะห์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของวัสดุมีผลอย่างมากต่อช่องสัญญาณ แต่ในการใช้งานจริงของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนี้ ยอมมีพารามิเตอร์อื่นๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อลักษณะของช่องสัญญาณนอกจากวัสดุต่างๆ เช่น การถูกบดบังจากมนุษย์ ซึ่งควรจะนำมาพิจารณาควบคู่กับวัสดุ ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

[1] Bob Heile, 2001, **IEEE 802.15 Working Group for WPAN,** [Online]. Available : http://grouper.ieee.org/groups/802/15/

[2 Kazimierz S, and Debra M, **Ultra-Wideband Radio Technology,** England : John Wiley & Sons Ltd. 2004.

[3] James D. Taylor, **Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems,** USA : CRC Press. 1995.

[4] M.Ghavami, L.B.Michael and R.Kohno, **Ultra wideband signals and systems in communication engineering,** England : John Wiley & Sons Ltd. 2004.

[5] Ian O., Matti H. and Jari I, **UWB Theory and Applications,** England : John Wiley & Sons Ltd. 2004.

[6] Theodore S. Rappaport, **Wireless Communications Principles And Practice,** United States of America : Prentice-Hall PTR, inc. 2002.

[7] S. Aguirre, L. H. Loew and L. Yeh, **Radio propagation into buildings at 912, 1920 and 5990 MHz using microcells,** *in Proc. 3rd IEEE ICUPC,* pp. 129-134, Oct. 1994.

[8] A. Taflove, **Computational Electrodynamics:The Finite-Difference Time-Domain Method, Norwood,** MA:Artech House, 1995.

[9] Constantine A. Balanis, **Advanced Engnineering Electromagnetics,** New York : John Wiley & Sons Ltd. 1989.

[10] A.Taflove and M.E. Brodwin, **Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using The Time-Dependent Maxwell's Equation,** *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,* Vol 23, pp 623-630, 1975.

[11] S. Promwong and W. Hachitani, and J.Takada, **"Free Space Link Budget Evaluation of UWBIR System, "** 2004 International Workshop on Ultra Wideband System Joint with Conference on Ultra Wideband Systems and Technology (UWBST&IWUWBS), pp.312-316, May 2004.

[12] Pongsatorn Jaturatussanai, Monchai Chamchoy, Sathaporn Promwong, **"Characteristics of UWB Propagation Through Building Materials "** ISCIT 2005, pp. 955-958, 2005.

[13] Pongsatorn Jaturatussanai, Monchai Chamchoy, Sathaporn Promwong, "**Characteristics of UWB Radio Propagation With Building Materials** ", ISCIT 2006, pp. F4F-4, 2006.

[14] J. Berenger, "A Perfect Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Wave", *Journal on Compattional Plysics*, vol.14, pp. 185-200, 1994.

[15] Von Hippel, Editor, **Dielectric Materials and Applications**, Artech house Boston, London.

[16] Pichaya Supanakoon, Kritsana Wansiang, Sathaporn Promwong and Jun-ichi Takada, **"Simple Waveform for UWB Communication"**, ECTI-Con 2005, pp. 626-629, 2005.

ภาคผนวก ก
บทความวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

[1] **Pongsatorn Jaturatussanai**, Monchai Chamchoy, Sathaporn Promwong, "Characteristics of UWB Propagation Through Building Materials", ISCIT 2005, pp. 955-958, 2005.

[2] **Pongsatorn Jaturatussanai**, Monchai Chamchoy, Sathaporn Promwong, "Characteristics of UWB Radio Propagation With Building Materials ", ISCIT 2006, pp. F4F-4, 2006.

Volume 2 of 2
ISCIT 2005
PROCEEDINGS
International Symposium on Communications
and Information Technologies 2005
October 12-14, 2005
Fragrant Hill Hotel, Beijing, China
Sponsored by:
The National Natural Science Foundation of China
K.C. Wong Education Foundation, Hong Kong
IEEE Circuits and Systems Society
IEEE Communication Society Beijing Chapter
Beijing Association for Science and Technology
Beijing University of Posts and Telecommunications
Technical Co-Sponsored by:
IEICE Japan
ECTI Thailand
Official Web site: http://isci
ISCIT 2005
IEEE
NSFC
PUBLISHING HOUSE, BUPT
www.buptpress.com

Characteristics of UWB Propagation Through Building Materials

Pongsatorn Jaturatussanai, Monchai Chamchoy and Sathaporn Promwong
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
E-mail: s7061173@kmitl.ac.th

Abstract— **UWB system is the one type of several wireless communication that can be used in home networking, which have any probably obstruct by building material. Then the influences of the obstructions are considered. In this paper, the time dispersion and penetration loss are studied. The glass, gypsum, dry wood and partition board are considered the obstruction materials. The channels with these materials are measured in a fully anechoic chamber by using the vector network analyzer. The measurement frequency range is set to be 3~11 GHz, which covered the full band of UWB specified by FCC. The biconical antennas are used for both transmitter and receiver. The time dispersion and penetration loss for each material are evaluated based on the measurement channels. The data of theses results is useful for considering the UWB link budget.**

I INTRODUCTION

Despite its renewed interest during the past decade, ultra wideband (UWB) has a history as long as radio. In 1998 the resulting first report and order that permitted deployment of UWB devices was announced on 14 february and released in april 2002. Three types of UWB systems are defined in this report and order: imaging system, communication and measurement systems. The Federal Communication Commission (FCC) assigned bandwidth and spectral mask for indoor and outdoor communications. The UWB signal has the frequency spectrum range from 3.1~10.6 GHz [1]. The UWB characterizes transmission systems with instantaneous spectral occupancy in excess of 500 MHz or a fractional bandwidth of more than 0.2. The fractional and occupies bandwidth are defines as

$$\text{Fractional bandwidth} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L}, \quad (1)$$

$$\text{Occupies bandwidth} = f_H - f_L, \quad (2)$$

where f_L and f_H are the lower and upper frequencies at the -10 dB emission point.

The UWB technology is an ideal candidate that can be utilized for commercial, short-range, low power and low cost indoor communication systems such as wireless personal area networks (WPANs) [2], [3].

The growing demand for wireless in building networks (WINS) has prompted researches into propagation characteristics of radio signal totally within building. Because of the materials are formed as part of building. Therefore, the characteristics of building materials are studied. The characterization of indoor propagation channel needs to know the penetration loss through through walls, floors and other obstructions. The propagation within buildings is strongly influenced by building layout, the construction materials and the building type. Walls and obstacles made of different materials obstruct the signal differently. In general, the penetration loss depends on construction materials, frequency, incidence direction and polarization [4]. Moreover, some researches present an empirical model that predicts the building penetration loss at the 2GHz band for high elevation angles involved in mobile communications served by high altitude platform stations. The model takes into account the elevation angle of the specific building with respect to the position of the platform. The penetration loss is found to be an increasing function of the elevation angles for a building with concrete walls and normal window size [5]. For many researches, the penetration loss results are measured at the single band to develop wireless networks in each band and the influence is studied. This paper presented information on penetration loss and time dispersion that measured at 3-11 GHz to describe the characteristics of radio propagation.

In this paper, the time dispersion and penetration loss in materials are studied. The glass, gypsum, dry wood and partition board are considered. The channels with these materials are measured in a fully anechoic chamber by using the vector network analyzer (VNA). The measurement frequency range is set to be 3-11GHz, which covered the full band of UWB specified by FCC. The biconical antennas are used for both transmitter (Tx) and receiver (Rx). The transmitter-receiver (T-R) separation distance is 1.8m. The time dispersion and penetration loss for each material are evaluated based on the measurement

channels. The data of these results is useful for considering the UWB link budget in home networking.

II IDESCRIPTIONS OF MEASUREMENTS

A. *Measurement Equipment*

The UWB radio channel transfer function is measured as transmission coefficients in the frequency domain. The VNA is used in this experiment. The measurement is carried out in a fully anechoic chamber. Fig.1 shows the measurement setup. This system consists of an HP8510C VNA, was operated in the response measurement mode from 3 GHz to 7 GHz and 7 GHz to 11 GHz with each sub-band of 801 frequency tones. Consequently, 1601 is total frequency tones, port-1 was used as the transmitter port and port-2 was used as the receiver port, respectively. The biconical antenna are used for both transmitter and receive. Fig. 2 shows geometry and dimensions of the biconical antenna. The Tx and Rx antennas are assumed to be identical. This biconical antenna is used because its reflected coefficient below than -10 dB in 3 GHz to 11 GHz frequency band.

B. *Experiment Parameters*

The material under test (MUT) with rectangular shape was placed at the center between the transmitting and receiving antennas. The MUT are glass, gypsum, dry wood and partition board. The important parameters for the experiment are listed in Table.1. In measurement system, the VNA is used of the main equipment. Specified dynamic range for the network analyzer is 100 dB but the cable loss some 20 dB of the dynamic range. Therefore, total dynamic range is 80 dB, include separation distance between antennas and cable losses.

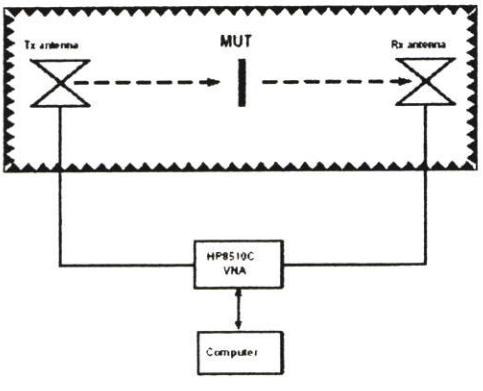


Fig 1. Schematic diagram of measurement setup in fully anechoic chamber

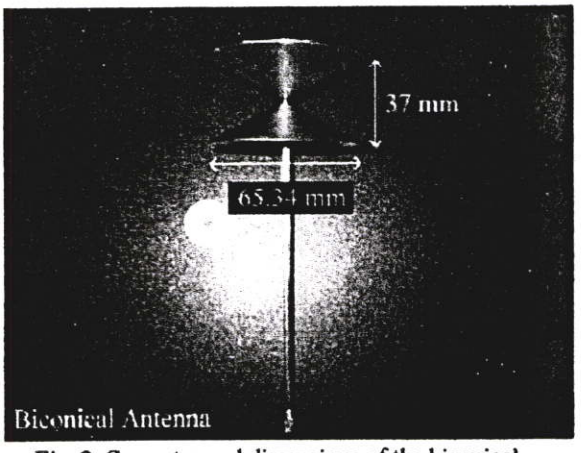


Fig. 2. Geometry and dimensions of the biconical antenna

C. *Experiment Procedure*

The complex frequency response of the transmission channel can be obtained by measuring the scattering parameter. (s_{21}) The following procedures were applied for the measurement. First, the HP8510C VNA system was calibrated for each band with full two port type calibration. Second, the s_{21} without a MUT is measured. After that, the measurement was repeated with the MUT placed vertically between the T-R antennas. The 5 experiments were performed for each materials.

III DESCRIPTION OF TIME DISPERSION AND PENETRATION LOSS

A. *Time Dispersion*

In order to investigate the effects of the material then considered the time delay of the arrived signal at the receiver. Reflections of the transmitted signal may arrive at the receiver at different times. The time dispersion can be analyzed by using the mean excess delay $(\bar{\tau})$and RMS delay spread (τ_{rms}) to illustrate the effects of materials. The mean excess delay is the first moment of the power delay profile and is defined to be [6].

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k)\tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \qquad (3)$$

RMS delay spread is the square root of the second central moment of the power delay profile and is may be express as

TABLE I
MEASUREMENT PARAMETERS.

Parameters	Values
Center frequency (f_C)	7.0 GHz
Spectral bandwidth (f_b)	8.0 GHz
Minimum frequency (f_L)	3.0 GHz
Maximum frequency (f_H)	11.0 GHz
Number of frequency point	1601 point
Dynamic range	80 dB
Transmitted antenna height (h_t)	1.5 m
Received antenna height (h_r)	1.5 m
T-R separation distance (d)	1 m
Polarization	Vertical

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \tag{4}$$

where

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k)\tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \tag{5}$$

B. Definition of Penetration Loss

Penetration loss due to the materials is defined as the ratio between the average power measured in free space and the average power measured with the material under test (MUT). The relationship of the penetration loss is given in [7].

$$\text{Penetration Loss[dB]} = 10\log_{10}\left[\frac{\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} P(f_i, x_j)(\text{Free space})}{\frac{1}{MN}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M} P(f_i, x_j)(\text{Material})}\right] \tag{6}$$

The summation of (6) is over the N number of measured frequency tones and M number of snapshots over time, each denoted as $P(f_i, x_j)$. All powers are in absolute power scale (not dB values).

IV MEASUREMENT RESULTS

By using the VNA, the measured transmission coefficients with the number of frequency point of 1601 are taken in the fully anechoic chamber. The impulse response of the channel is obtained by performing the inverse discrete Fourier transform (IDFT) on the frequency response. The normalized impulse responses without and with materials are show in Fig. 3. In this paper, The average penetration loss for each material is shown in Table 2. As results, the partition board is higher thickness, the penetration loss is highest. On the other hand, the penetration loss of the glass is lowest, which the thickness is lower. The results show that the thickness have the effect on the penetration loss. The higher material thickness causes more penetration loss. Moreover, the penetration loss is depend on the type of different materials.

The values of the mean excess delay and the RMS delay spread are considered for the noise threshold level is set to be -20 dB. Table 3 show minimum, maximum and mean excess delay. The values of glass, gypsum, dry wood and partition board are considered. The dry wood has more different value of mean excess delay than the other materials.

From Table 4, the number of measurement and average RMS delay spread (τ_{rms}) is shown. Noticeable that the RMS delay spread of glass, gypsum and partition board are similar together, but lower than the dry wood's RMS delay spread.

V. CONCLUSIONS

In this paper the RMS delay spread and the penetration Loss are evaluated based on the measurement channel. The considered frequency is ranging from 3 GHz to 11 GHz. From the result, we can see that the maximum RMS delay spread occurred when signal propagated through dry wood while gypsum provided lower RMS delay spread. On the other hand, when the signal was obstructed by partition board, the penetration loss is high as 2.174dB, while glass provides lowest penetration loss. Therefore, its should be taken into account for UWB receiver design to achieve the high accuracy of the performance on the receiver.

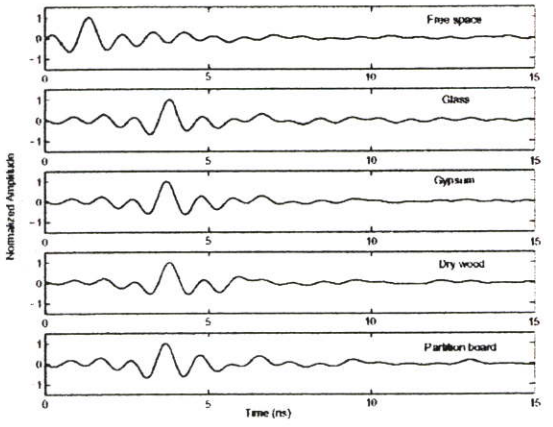


Fig.3 . Normalized impulse response.

TABLE II
MATERIAL DIMENSION AND PENETRATION LOSS.

Materials	Thickness (cm)	Dimension (cm × cm)	Penetration loss (dB)
Glass	1.0	60 × 60	1.573
Gypsum	1.5	60 × 60	1.667
Dry Wood	3.5	60 × 60	1.872
Partition	6.0	60 × 60	2.174

TABLE III
MINDMUM, MAXIMUM AND MEAN EXCESS DELAY.

Materials	Min (ns)	Max (ns)	Mean $(\bar{\tau})$ (ns)
Glass	3.682	3.811	3.735
Gypsum	3.798	3.921	3.863
Dry Wood	4.211	4.356	4.299
Partition	3.656	3.797	3.732

TABLE IV
NUMBER OF MEASUREMENT AND AVERAGE RMS DELAY SPREAD.

Materials	RMS DELAY SPREAD (τ_{rms})					
	No.1 (ns)	No.2 (ns)	No.3 (ns)	No.4 (ns)	No.5 (ns)	AVG. (ns)
Glass	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.22
Gypsum	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.18
Dry Wood	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.48
Partition	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.30

REFERENCES

[1] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commissions Rules Regarding UWB Transmission Systems," *First Report*, FCC 02-48, Apr. 2002 ..

[2] K. Siwiak, "Ultra Wide Radio: Introducing a New Technology,"*t Proc.2001 Spring IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC),*

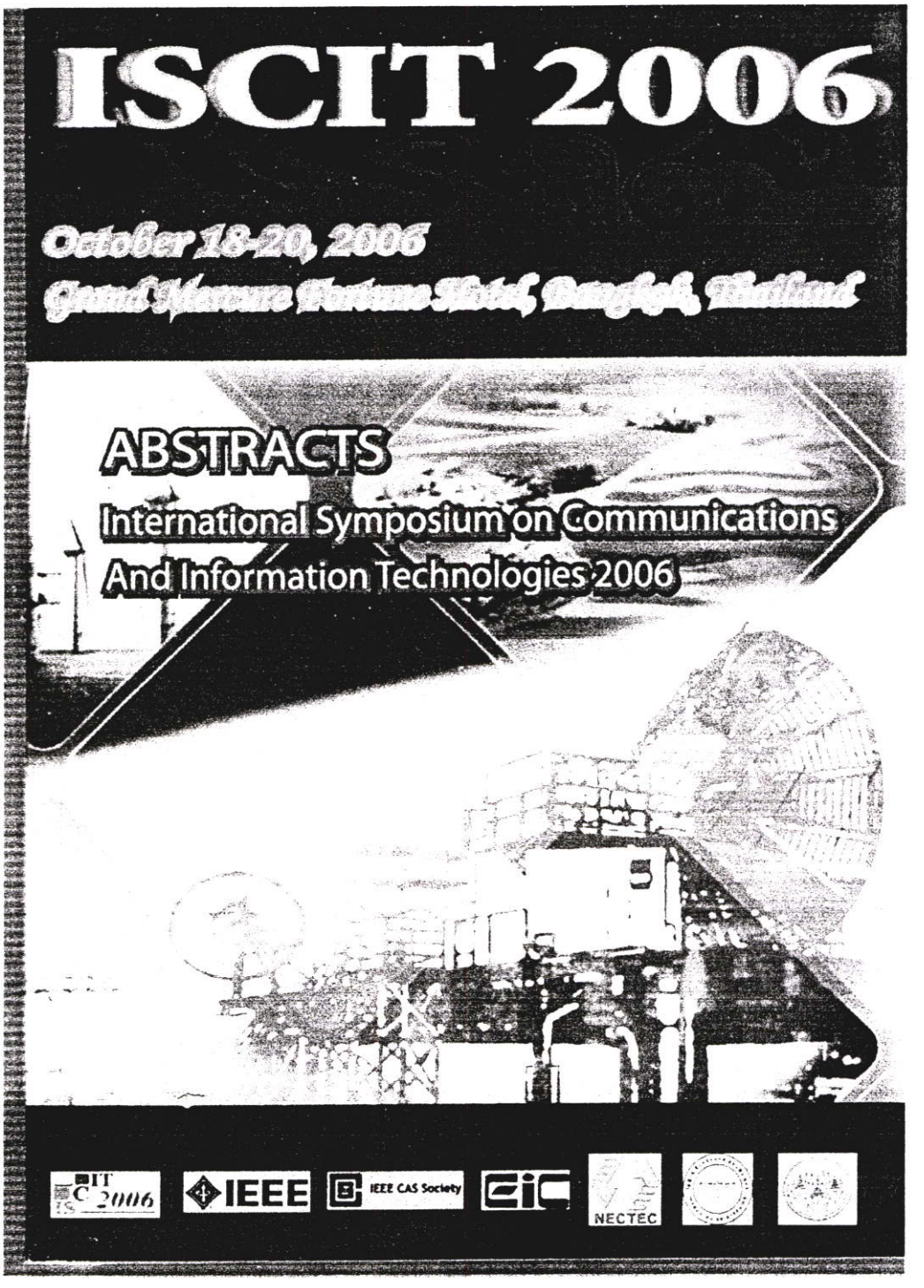
[3] K. Siwiak, "Ultra Wide Radio: The emergence of an Important RF Technology, " *Proc. 2001 Spring IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC)*, vol. 2, pp.1169-1172, May 2001.

[4] Y.E. Abdallah, A.S. Liu, "Characterization of indoor penetration loss at ISM band Mohammed, "*Environmental Electromagnetics. CEEM 2003. Proceedings Asia-Pacific Conference*, on 4-7, pp.25 - 28, Nov 2003

[5] Axiotis, D.I.; Theologou, M.E., "An empirical model for predicting building penetration loss at 2 GHz for high elevation angles, " *Antennas and Wireless Propagation Letters*, Volume 2, Issue 1, pp. 234 - 237, 2003

[6] Theodore S. Rappaport, Wireless communication principles and practice, Second Edition, pp.199

[7] S. Aguirre, L. H. Loew, and L. Yeh, "Radio propagation into buildings at 912, 1920, and 5990 MHz using microcells," *in Proc. 3rd IEEE ICUPC*, pp. 129-134, Oct. 1994.


ISCIT 2006
October 18-20, 2006
Grand Mercure Fortune Hotel, Bangkok, Thailand
ABSTRACTS
International Symposium on Communications
And Information Technologies 2006
IEEE
IEEE CAS Society
NECTEC

Characteristics of UWB Radio Propagation With Building Materials

Pongsatorn Jaturatussanai[1], Monchai Chamchoy[1,2], and Sathaporn Promwong[1,2]
[1]Faculty of Engineering
[2]Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Email: (s7061173)@kmitl.ac.th

Abstract— **UWB technology is intended to be used in wireless personal area networks and home networking, which has any probably obstruct by building material. Then, the influences of the obstructions on UWB pulse are considered. In this paper, the power delay profile, the time dispersion and penetration loss are considered. The channels with these materials are measured using the vector network analyzer. The measurement frequency range is set to 3~11 GHz, which covered the full band of UWB specified by FCC. The biconical antennas are used for both transmitter and receiver. The power delay profile, the time dispersion and penetration loss for each material are evaluated based on the measurement channels. The experiment results are needed for considering the UWB link budget.**

I. Introduction

Ultra wide-band (UWB) technology is already used in military applications and it may see increased use in the future for wireless communications. In 1998, the resulting first report and order that permitted deployment of UWB device was announced on 14 February and released in April 2002. Three types of UWB systems are defined in this report and order: imaging system, communication and measurement systems. The UWB signal has the frequency spectrum range from 3.1~10.6 GHz [1]. The UWB characterizes transmission systems with instantaneous spectral occupancy in excess of 500 MHz or a fractional bandwidth of more than 0.2.

The UWB technology is an ideal candidate that can be utilized for commercial, short-range, low power and low cost indoor communication systems such as wireless personal area networks (WPANs) [2], [3]. The growing demand for wireless in building networks (WINS) has prompted researches into propagation characteristics of radio signal totally within building. Because of the materials are formed as part of building. Therefore, the characteristics of building materials are studied. The characterization of indoor propagation channel needs to know the penetration loss through walls, floors and other obstructions. The propagation within buildings is strongly influenced by building layout, the construction materials and the building type. Walls and obstacles made of different materials obstruct the signal differently. In general, the penetration loss depends on construction materials, frequency, incidence direction and polarization [4]. Moreover, some researches have presented an empirical model that predicts the building penetration loss at the 2 GHz band for high elevation angles involved in mobile communications served by high altitude platform stations. The model takes into account the elevation angle of the specific building with respect to the position of the platform. The penetration loss is found to be an increasing function of the elevation angles for a building with concrete walls and normal window size [5]. This paper presented information on power delay profile, the time dispersion and penetration loss that measured at 3~11 GHz to describe the characteristics of radio propagation.

In this paper, power delay profile, the time dispersion and penetration loss in materials are studied. The brick, glass, partition board and dry wood are considered. In the experiment obtained by the channels with these materials are measured by using the vector network analyzer (VNA). The measurement frequency range is set to be 3~11 GHz, which covered the full band of UWB specified by FCC. The biconical antennas are used for both transmitter (Tx) and receiver (Rx). The transmitter-receiver (T-R) separation distance is 1.8 m. The time dispersion and penetration loss for each material are evaluated based on the measurement channels.

II. Descriptions Of Measurements

A. Measurement System

The material under test (MUT) with rectangular shape was placed at the center between the transmitting and receiving antennas. The MUT are brink, glass, partition board and dry wood. The important parameters for the experiment are listed in Table. 1. In the measurement system, the VNA is used as the main equipment. Specified dynamic range for the network analyzer is 100 dB but the cable loss some 20 dB of the dynamic range. Therefore, total dynamic range is 80 dB, include separation distance between antennas and cable losses.

The environments is space room but the wall have more windows and MUT is the center. The VNA is used in the experiment. The UWB radio channel transfer function is measured as transmission coefficients in the frequency domain. Fig.1 shows dimensions of a room and measurement setup. This system consists of an HP8510C VNA, was operated in the response measurement mode from 3 GHz to 7 GHz and 7 GHz to 11 GHz with each sub-band of 801 frequency tones. Consequently, 1601 is total frequency tones, port-1 was used as the transmitter port and port-2 was used as the

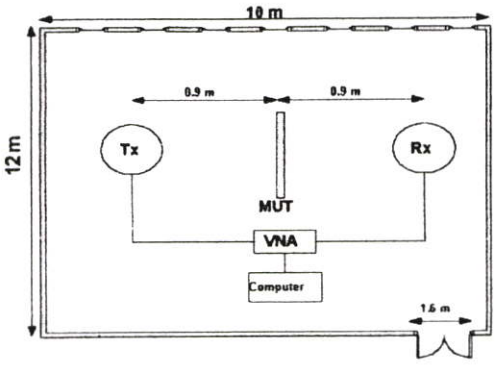


Fig. 1. Dimensions of a measurement room and system setup

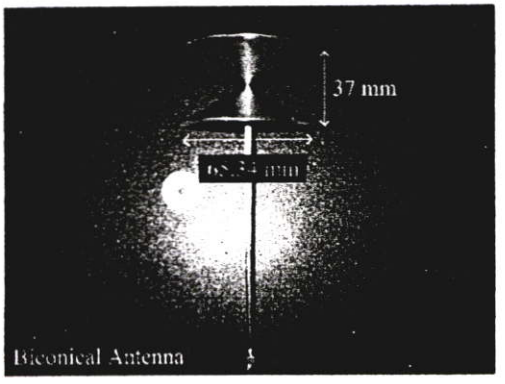


Fig. 2. Geometry and dimensions of the biconical antenna

receiver port, respectively. The biconical antenna are used for both transmitter and receiver. Fig. 2 shows geometry and dimensions of the biconical antenna. The Tx and Rx antennas are assumed to be identical. This biconical antenna is used because its reflected coefficient below than −10 dB in 3 GHz to 11 GHz frequency band.

B. Experiment Procedure

The complex frequency response of the transmission channel can be obtained by measuring the S_{21} scattering parameter. The following procedures were applied for the measurement.

TABLE I
MEASUREMENT PARAMETERS.

Parameters	Values
Center frequency (f_c)	7.0 GHz
Spectral bandwidth (f_b)	8.0 GHz
Minimum frequency (f_L)	3.0 GHz
Maximum frequency (f_H)	11.0 GHz
Number of frequency point	1601 point
Dynamic range	80 dB
Transmitted antenna height (h_t)	1.5 m
Received antenna height (h_r)	1.5 m
T-R separation distance (d)	1.8 m
Polarization	vertical

First, the HP8510C VNA system was calibrated for each band with full two port type calibration. Second, the scattering parameter S_{21} without a MUT is measured. After that, the measurement was repeated with the MUT placed vertically between the T-R antennas. The 5 experiments were performed for each materials.

III. Description of Measurement Parameters

A. Power Delay Profile

Many multipath channel parameters are derived from the power delay profile. The mean relative power of the taps are specified by the power delay profile (PDP) of the channel, defined as the variation of mean power in the channel, thus

$$P_\tau = |h(\tau)^2|, \tag{1}$$

where $h(\tau)$ is the channel impulse response.

B. Time Dispersion

In order to investigate the effects of the material then considered the time delay of the arrived signal at the receiver. Reflections of the transmitted signal may arrive at the receiver at different times. The time dispersion can be analyzed by using the mean excess delay ($\overline{\tau}$) and RMS delay spread (τ_{rms}) to illustrate the effects of materials. The mean excess delay is the first moment of the power delay profile and is defined to be [6]

$$\overline{\tau} = \frac{\Sigma_k a_k^2 \tau_k}{\Sigma_k a_k^2} = \frac{\Sigma_k P(\tau_k)\tau_k}{\Sigma_k P(\tau_k)}. \tag{2}$$

RMS delay spread is the square root of the second central moment of the power delay profile and is may be express as

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2}, \tag{3}$$

where

$$\overline{\tau^2} = \frac{\Sigma_k a_k^2 \tau_k^2}{\Sigma_k a_k^2} = \frac{\Sigma_k P(\tau_k)\tau_k^2}{\Sigma_k P(\tau_k)}. \tag{4}$$

C. Penetration Loss

Penetration loss due to the materials is defined as the ratio between the average power measured in free space and the average power measured with the MUT. The relationship of the penetration loss is given in [7].

TABLE II

MATERIAL DIMENSION AND PENETRATION LOSS.

Material	Thickness (cm)	Dimension (cm×cm)	Penetration loss (dB)
Brick	5.5	140×200	2.7173
Glass	1.0	140×200	1.2142
Partition	5.5	140×200	1.6364
Wood	1.5	140×200	1.5090

$$\text{Penetration Loss}\,[dB] = 10\log_{10}\left[\frac{\frac{1}{MN}\Sigma_{i=1}^{N}\Sigma_{j=1}^{M}P(f_i,x_j)^{(\text{without material})}}{\frac{1}{MN}\Sigma_{j=1}^{N}\Sigma_{i=1}^{M}P(f_i,x_j)^{(\text{with material})}}\right]. \quad (5)$$

The summation of (5) is over the N number of measured frequency tones and M number of snapshots over time, each denoted as $P(f_i, x_i)$. All powers are in absolute power scale (not dB values).

IV. MEASUREMENT RESULTS

The data from the VNA is show the measured transmission coefficients with the number of frequency point of 1601 are taken in space room. The impulse response of the channel is obtained by performing the inverse discrete Fourier transform (IDFT) on the frequency response. The magnitudes without and with materials are shown in Fig. 3. In this paper, The average penetration loss for each material is shown in Table 2. As results, the partition board and brick are the same thickness but brick are highest penetration loss than partition broad. On the other hand, the penetration loss of the glass is lowest, which the thickness is lower. The results show that the thickness have the effect on the penetration loss. The higher material thickness causes more penetration loss. Moreover, the penetration loss is depend on the type of different materials.

The values of the mean excess delay and the RMS delay spread are considered for the noise threshold level is set to be -15 dB. Table 3 show minimum, maximum and mean excess delay. The values of brick, glass, partition board and dry wood are considered. The brick has more different value of mean excess delay than the other materials.

From Table 4, the number of measurement and average RMS delay spread (τ_{rms}) is shown. Noticeable that the RMS delay spread of glass, partition board and dry wood are similar together, but lower than the Brick's RMS delay spread.

V. CONSLUSIONS

In this paper the RMS delay spread and the penetration loss are evaluated based on the measurement channel. The considered frequency is ranging from 3 $\sim$ 11 GHz. From the result, we can see that the maximum RMS delay spread occurred when signal propagated through brick while glass provided lower RMS delay delay spread. On the other hand,

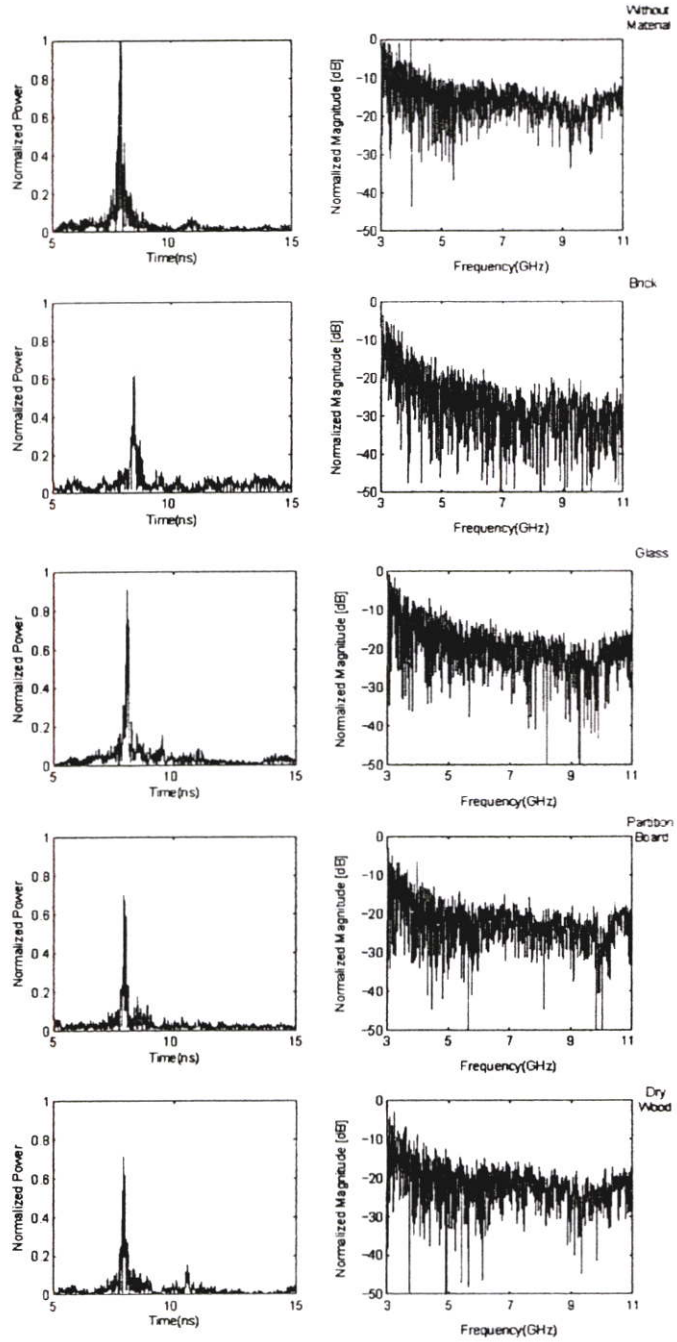


Fig. 3. Power delay profiles and their frequency responses for each material

TABLE III

MINIMUM, MAXIMUM AND MEAN EXCESS DELAY.

Materials	Min (ns)	Max (ns)	Mean($\bar{\tau}$) (ns)
Brick	9.1861	9.3721	9.2791
Glass	8.0310	8.0558	8.0434
Partition board	7.9862	8.2034	8.0948
Dry wood	7.8946	8.0342	7.9644

TABLE IV

NUMBER OF MEASUREMENT AND AVERAGE RMS DELAY SPREAD.

	RMS delay spread(τ_{rms})			
Materials	No.1 (ns)	No.2 (ns)	No.3 (ns)	Average (ns)
Brick	2.06	2.60	2.41	2.413
Glass	0.08	0.09	0.07	0.080
Partition board	0.19	0.15	0.10	0.150
Dry wood	0.35	0.37	0.36	0.360

when the signal was obstructed by brick, the penetration loss is high as 2.7173dB, while glass provides lowest penetration loss. Therefore, its should be taken into account for UWB receiver design to achieve the high accuracy of the performance on the receiver.

REFERENCES

[1] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commissions Rules Regarding UWB Transmission Systems," *First Report*, FCC 02-48, Apr. 2002 .

[2] K. Siwiak, "Ultra Wide Radio: Introducing a New Technology," *Proc.2001 Spring IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC)*, vol. 2, pp.1088-1172, May 2001.

[3] K. Siwiak, "Ultra Wide Radio: The emergence of an Important RF Technology, " *Proc. 2001 Spring IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC)*, vol. 2, pp.1169-1172. May 2001

[4] Y.E. Abdallah, A.S. Liu, "Characterization of indoor penetration loss at ISM band Mohammed, " *Environmental Electromagnetics. CEEM 2003. Proceedings Asia-Pacific Conference*, on 4-7, pp.25 - 28, Nov 2003

[5] Axiotis, D.I.; Theologou, M.E., "An empirical model for predicting building penetration loss at 2 GHz for high elevation angles, " *Antennas and Wireless Propagation Letters*, Volume 2, Issue 1, pp. 234 - 237, 2003

[6] Theodore S. Rappaport, Wireless communication principles and practice, Second Edition, pp.199

[7] S. Aguirre, L. H. Loew, and L. Yeh, Radio propagation into buildings at 912, 1920, and 5990 MHz using microcells, *in Proc. 3rd IEEE ICUPC*, pp. 129-134, Oct. 1994.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายพงศธร จตุรทัศนัย
วัน เดือน ปีเกิด	7 กันยายน 2524
ที่อยู่	330/331 ถ.เตมีย์ ต.เวียง อ.เมือง
	จ.เชียงราย 57000

ผลงานวิจัย

พ.ศ.2548 Pongsatorn Jaturatussanai, Monchai Chamchoy, Sathaporn Promwong, "Characteristics of UWB Propagation Through Building Materials", ISCIT 2005, pp. 955-958, 2005

พ.ศ.2549 Pongsatorn Jaturatussanai, Monchai Chamchoy, Sathaporn Promwong, "Characteristics of UWB Radio Propagation With Building Materials ", ISCIT 2006, pp. F4F-4, 2006.