การสูญเสียในการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งระหว่างสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคาร สำหรับระบบการสื่อสารระยะสั้น

ULTRA WIDEBAND TRANSMISSION LOSS BETWEEN INDOOR AND OUTDOOR ENVIRONMENT FOR SHORT RANGE COMMUNICATION SYSTEMS

ยุทธนา ติยวรนันท์

YOOTTANA TIYAWORANAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสูญเสียในการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งระหว่างสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคาร สำหรับระบบการสื่อสารระยะสั้น

ULTRA WIDEBAND TRANSMISSION LOSS BETWEEN INDOOR AND OUTDOOR ENVIRONMENT FOR SHORT RANGE COMMUNICATION SYSTEMS

T074602

ยุทธนา ติยวรนันท์
YOOTTANA TIYAWORANAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

ULTRA WIDEBAND TRANSMISSION LOSS BETWEEN INDOOR AND OUTDOOR ENVIRONMENT FOR SHORT RANGE COMMUNICATION SYSTEMS

YOOTTANA TIYAWORANAN

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	การสูญเสียในการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งระหว่างสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคาร สำหรับระบบการสื่อสารระยะสั้น
นักศึกษา	นายยุทธนา ติยวรนันท์
รหัสประจำตัว	48061010
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาทดลองวิจัยหาค่าของการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคารสำหรับวิทยุอิมพัลส์แบบแถบกว้างยิ่ง โดยทำการศึกษาและวิเคราะห์บนพื้นฐานของข้อมูลที่ได้จากการวัด ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองรูปแบบของการทดลองวัดอยู่ 2 รูปแบบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวคเตอร์ทำการวัดและบันทึกผลทั้งหมด และได้ใช้สายอากาศแถบกว้างแบบกรวยคู่ซึ่งสายอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับมีคุณสมบัติเหมือนกัน ทำการวัดฟังก์ชันถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณวิทยุที่ช่วงความถี่จาก 3 กิกะเฮิร์ต ถึง 11 กิกะเฮิร์ต โดยทำการวัดระหว่างทางเดินยาวภายในอาคาร และบริเวณลานจอดรถภายนอกอาคาร ได้แสดงขนาดและเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณ และอธิบายอัตราขยายการส่งผ่าน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งจากข้อมูลการวัดเหล่านี้สามารถอธิบายประสิทธิภาพของระบบโดยแสดงในรูปของอัตราผิดพลาดบิต จากนั้นได้ใช้แมตช์ฟิลเตอร์ที่ด้านรับเพื่อทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงที่สุด และได้แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทั้งสองแบบจำลอง จากการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบระบบวิทยุอิมพัลส์แถบกว้างยิ่งในอนาคต

Thesis Title	Ultra Wideband Transmission Loss between Indoor and Outdoor Environment for Short Range Communication Systems
Student	Mr. Yoottana Tiyaworanan
Student ID.	48061010
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Mr. Sathaporn Promwong

ABSTRACT

This thesis, the indoor/outdoor propagation loss for ultra wideband (UWB) impulse radio system is studied based on the measurement data. There are two measurement models, the vector network analyzer (VNA) used to measure and save all data and biconical antennas are used for transmitter and receiver antennas. The frequency transfer functions of the radio channels are measured over the frequency band from 3 GHz to 11 GHz. The measurements are performed in the corridor (indoor) and parking area (outdoor) environments. The magnitudes and phases of channel transfer function are shown. The transmission gain and correlation coefficient are demonstrated, these measured data can describe the systems performance as shown in bit error rate (BER). After that, the matched filter at the receiver side for maximize the signal-to-noise ratio (SNR) is used and the comparison results between the first and the second model are shown. These results are benefit for design the ultra wideband impulse radio system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาและคอยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย ให้คำสั่งสอน ความรู้ รวมทั้งตรวจทานวิทยานิพนธ์นี้จากอาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศและหัวหน้ากลุ่มงานวิจัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชญู สุพรรณกูล และผู้ช่วยศาสตราจารย์มนต์ชัย แช่มช้อย ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำ แนวทางในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชญู สุพรรณกูล, รองศาสตราจารย์นิกร สุขุตมตันติ, รองศาสตราจารย์ดอกเตอร์ประยุทธ อัครเอกฒาลิน, ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนต์ชัย แช่มช้อย และอาจารย์สถาพร พรหมวงศ์

ขอขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่ให้ชีวิตและคอยดูแลให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ในการศึกษาวิจัยมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยมาถึงจุดนี้ได้

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือในการทดลองและให้คำแนะนำมาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ยุทธนา ติยวรนันท์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VIII

สารบัญรูป IX

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ XI

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 สมมติฐาน 3

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย 3

1.5 ขอบเขตการศึกษา 4

1.6 ขั้นตอนการศึกษา 4

บทที่ 2 ระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง 6

2.1 กล่าวนำ 6

2.2 ประวัติความเป็นมาของระบบแถบกว้างยิ่ง 7

2.3 ลักษณะโดยทั่วไปของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง 8

2.4 จุดเด่นของระบบแถบกว้างยิ่ง 9

2.4.1 มีความจุของช่องสัญญาณมาก 9

2.4.2 ใช้กำลังในการส่งต่ำ 10

2.4.3 มีโอกาสที่จะถูกดักฟังหรือตรวจสอบได้ยาก 10

2.4.4 มีความต้านทานจากการถูกรบกวนสัญญาณ (Jamming) 10

2.4.5 มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก 11

2.4.6 มีความต้านทานต่อช่องสัญญาณหลายวิถี 11

2.5 กฎข้อบังคับของระบบสื่อสารแถบกว้างยิ่ง 13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา 13
2.5.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป 14
2.6 การนำไปใช้งานของระบบแถบกว้างยิ่ง 16
2.6.1 การติดต่อสื่อสารและเซนเซอร์ 16
2.6.2 การหาตำแหน่งและระบุตำแหน่ง 18
2.6.3 เรดาร์ 19
2.7 สรุป 20

บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์สัญญาณแถบกว้างยิ่ง 21
3.1 กล่าวนำ 21
3.2 ระบบการวัดช่องสัญญาณ 21
3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ 23
3.3.1 ผลตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณ 23
3.3.2 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ 24
3.3.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 25
3.3.4 ค่าสูญเสียเชิงวิถี 26
3.3.5 แมตช์ฟิลเตอร์ 27
3.3.6 อัตราความผิดพลาดบิต 28
3.3.7 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด 29
3.4 สรุป 30

บทที่ 4 แบบจำลองและการวัดสัญญาณแถบกว้างยิ่ง 31
4.1 กล่าวนำ 31
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด 31
4.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวคเตอร์ 31
4.2.2 สายอากาศแบบกรวยคู่ 32
4.3 แบบแผนการวัด 34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณของแบบจำลองที่ 1 35

4.4.1 แบบจำลองการวัด 35

4.4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด 36

4.4.3 แบบจำลองสัญญาณที่ใช้ส่ง 37

4.5 การทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณของแบบจำลองที่ 2 38

4.5.1 แบบจำลองการวัด 38

4.5.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด 39

4.5.3 แบบจำลองสัญญาณที่ใช้ส่ง 40

4.6 สรุป 40

บทที่ 5 ผลการวิจัยและวิเคราะห์สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง 41

5.1 กล่าวนำ 41

5.2 ผลการวิเคราะห์ 41

5.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลองที่ 1 41

5.2.1.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง 43

5.2.1.2 อัตราขยายการส่งผ่าน 44

5.2.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 45

5.2.1.4 อัตราผิดพลาดบิต 46

5.2.1.5 แมตช์ฟิลเตอร์ 48

5.2.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลองที่ 2 49

5.2.2.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง 50

5.2.2.2 อัตราขยายการส่งผ่าน 52

5.2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 53

5.2.2.4 อัตราผิดพลาดบิต 53

5.2.2.5 แมตช์ฟิลเตอร์ 54

5.3 สรุป 57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 58

6.1 กล่าวนำ 58

6.2 การวิเคราะห์ช่องสัญญาณแบบจำลองที่ 1 เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ 2 58

6.3 ข้อเสนอแนะ 59

เอกสารอ้างอิง..61

ภาคผนวก ก. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์..63

ประวัติผู้เขียน 79

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 จุดเด่นและประโยชน์ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง 13

2.2 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร 14

2.3 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร 15

4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของแบบจำลองที่ 1 36

4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของแบบจำลองที่ 2 39

5.1 ระยะห่างจากสายอากาศส่งมายังตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองที่หนึ่ง 42

5.2 ค่าอัตราขยายการส่งผ่านของแต่ละตำแหน่งของแบบจำลองที่หนึ่ง 45

5.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละตำแหน่งของแบบจำลองที่หนึ่ง 47

5.4 ระยะห่างจากสายอากาศส่งมายังตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองที่สอง 50

5.5 ค่าอัตราขยายการส่งผ่านของแต่ละตำแหน่งของแบบจำลองที่สอง 53

5.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละตำแหน่งของแบบจำลองที่สอง 55

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 สภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร....................2

2.1 ความเป็นมาโดยย่อของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง....................7

2.2 การเปรียบเทียบระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่งกับระบบอื่นๆ....................8

2.3 จุดพิจารณาในการออกแบบสัญญาณแถบกว้างยิ่ง....................9

2.4 เปรียบเทียบโครงสร้างของระหว่างระบบแถบกว้างยิ่งกับระบบแถบแคบ....................11

2.5 ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง....................12

2.6 ข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานในสเปกตรัมความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่าง FCC และ ETSI ภายในอาคาร....................15

2.7 ข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานในสเปกตรัมความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่าง FCC และ ETSI ภายนอกอาคาร....................16

2.8 การนำไปใช้งานในลักษณะโครงข่ายไร้สายส่วยบุคคล....................17

2.9 ดาวโหลดไฟล์วีดีโอแบบไร้สายจากแหล่งบริการข้อมูล....................17

2.10 เปรียบเทียบเซ็นเซอร์มีสายกับไร้สายสำหรับผู้ป่วย....................18

2.11 การระบุตำแหน่งของนักผจญเพลิงในอาคารที่ถูกไฟไหม้....................19

2.12 การตรวจจับการชนของรถยนต์....................19

3.1 ระบบการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวคเตอร์ และการแปลงสู่โดเมนเวลาโดยใช้ IFFT....................22

3.2 บล็อคไดอะแกรมของระบบ....................23

3.3 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่....................24

3.4 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนเวลา....................25

3.5 บล็อคไดอะแกรมแมตช์ฟิลเตอร์....................27

3.6 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด....................29

4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวคเตอร์....................32

4.2 ขนาดและรูปทรงของสายอากาศแบบกรวยคู่....................33

4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแบบกรวยคู่....................33

4.4 ขนาดและเฟสของสายอากาศแบบกรวยคู่....................34

4.5 บล็อคไดอะแกรมสำหรับการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ....................35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.6 แบบจำลองที่หนึ่ง...... 36

4.7 แบบจำลองของสัญญาณที่ใช้ส่ง 37

4.8 ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่ใช้ส่งของแถบกว้างยิ่ง 38

4.9 แบบจำลองที่สอง 39

5.1 แบบจำลองที่หนึ่งและตำแหน่งที่นำเสนอผลการวิเคราะห์ 42

5.2 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่หนึ่ง 43

5.3 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่หนึ่ง 43

5.4 อัตราขยายการส่งผ่านของแบบจำลองที่หนึ่ง 44

5.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองที่หนึ่ง 46

5.6 อัตราผิดพลาดบิตของแบบจำลองที่หนึ่ง 47

5.7 แอมพลิจูดของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุตของแมตช์ฟิลเตอร์โดยใช้แมตช์ฟิลเตอร์ที่ดีที่สุด สำหรับแบบจำลองที่หนึ่ง 48

5.8 หอัตราขยายการส่งผ่านเมื่อใช้แมตช์ฟิลเตอร์เปรียบเทียบกับอัตราขยายการส่งผ่านของสัญญาณรับในแบบจำลองที่หนึ่ง 49

5.9 แบบจำลองที่สองและตำแหน่งที่นำเสนอผลการวิเคราะห์ 50

5.10 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่สอง 51

5.11 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่สอง 51

5.12 อัตราขยายการส่งผ่านของแบบจำลองที่สอง 52

5.13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองที่สอง 54

5.14 อัตราผิดพลาดบิตของแบบจำลองที่สอง 55

5.15 แอมพลิจูดของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุตของแมตช์ฟิลเตอร์โดยใช้แมตช์ฟิลเตอร์ที่ดีที่สุด สำหรับแบบจำลองที่หนึ่ง 56

5.16 อัตราขยายการส่งผ่านเมื่อใช้แมตช์ฟิลเตอร์เปรียบเทียบกับอัตราขยายการส่งผ่านของสัญญาณรับ ในแบบจำลองที่สอง 56

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

อัตราความผิดพลาดบิต	BER
(European Telecommunications Standards Institute)	ETSI
องค์กรบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Aviation Administration)	FAA
คณะกรรมาธิการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission)	FCC
โดเมนความถี่ (Frequency Domain)	FD
ช่องทางเพื่อการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ทั่วไป (General Purpose Interface Bus)	GPIB
ระบบดาวบอกพิกัด (Global Positioning Systems)	GPS
สถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	
(Institute of Electrical and Electronics Engineers)	IEEE
ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform)	IFFT
สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union)	ITU
ระดับแนวสายตา (Line of Sight)	LOS
แมตช์ฟิลเตอร์ (Matched Filter)	MF
นอกระดับแนวสายตา (Non-Line of Sight)	NLOS
คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)	PC
ความสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss)	PL
การมอดูเลตทางตำแหน่งของพัลส์ (Pulse Position Modulation)	PPM
โดเมนเวลา (Time Domain)	TD
ระบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wide Band)	UWB
เครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย (Vector Network Analyzer)	VNA
เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network)	WPAN

แอมแปร์ (Ampere)	*A*
เดซิเบล (Decibel)	*dB*
ฟารัด (Farad)	*F*
เฮิรตซ์ (Hertz)	*Hz*
กิกะเฮิรตซ์ (Gigahertz)	*GHz*
เมตร (meter)	*m*
วินาที (Second)	*s*

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

นาโนวินาที (Nanosecond)	ns
วัตต์ (Watt)	W
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
ระยะทาง (Distance), m	d
ความถี่ (Frequency), Hz	f
ค่าความถี่บนของระบบการสื่อสาร	f_H
ค่าความถี่ล่างของระบบการสื่อสาร	f_L
ค่าสูญเสียเชิงวิถี	PL
อัตราขยายการส่งผ่าน	TG
ฟังก์ชันถ่ายโอนของแมตช์ฟิลเตอร์	H_{MF}
ฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency Transfer Function)	$H(\omega)$
จำนวนจุดความถี่ (Sampling Number)	N_{smp}
กำลังงานที่รับได้ (Receive Power), W	P_R
กำลังงานที่ส่ง (Transmit Power), W	P_T
เครื่องรับ (Receiver)	Rx
สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission Coefficient)	s_{21}
เวลา (Time), s	t
เครื่องส่ง (Transmitter)	Tx
ฟังก์ชัน Dirac delta	$\delta(t)$
ความยาวคลื่น (Wavelength), m	λ
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)	$\rho(d)$

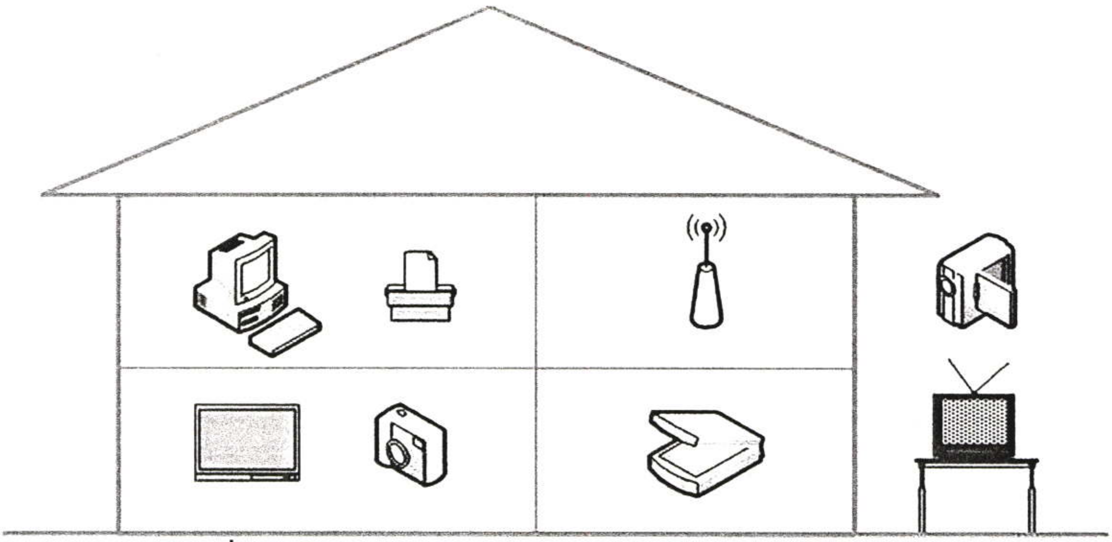
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวัน เพราะว่าเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายนี้ช่วยเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการติดต่อสื่อสารทั้งภายในอาคารสำนักงานและภายนอกสำนักงาน หรือที่อยู่อาศัย และในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างภายในและภายนอกอาคาร เช่นการรับส่งข้อมูลมัลติมีเดียต่างๆ (ข้อมูลตัวอักษร ข้อมูลภาพ ข้อมูลเสียง หรือแม้กระทั้งข้อมูลในรูปแบบที่เป็นทั้งภาพและเสียง) โดยในการรับส่งข้อมูลที่เป็นมัลติมีเดียนั้น มีความต้องการเทคโนโลยีที่รองรับการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูง มีความจุสูง รองรับผู้ใช้ได้จำนวนมาก มีกำลังงานในการส่งต่ำ และมีราคาถูก ซึ่งเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับความต้องการดังกล่าวและได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันก็คือเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่ง [1]-[3] หรืออัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-WideBand, UWB) ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งนี้ สามารถตอบสนองความต้องการในการรับส่งข้อมูลที่เป็นมัลติมีเดียต่างๆดังนี้

- เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งนี้มีช่วงความถี่ระหว่าง 3.1 ถึง 10.6 GHz และมีแบนด์วิดท์มากที่สุดเท่ากับ 7.5 GHz
- ใช้กำลังในการส่งต่ำที่ -41.3 dBm/MHz จึงทำให้เกิดการรบกวนและถูกตรวจจับได้ยาก
- มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง คือ 110 Mbps ที่ระยะทาง 10 เมตร
- การส่งสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะส่งสัญญาณในลักษณะเป็นอิมพัลส์ โดยไม่มีการไม่มีการนำเอาสัญญาณข้อมูลไปมอดูเลตกับสัญญาณพาห์ จึงทำให้อุปกรณ์ในระบบแถบกว้างยิ่งมีราคาถูก
- มีสัดส่วนของแบนด์วิดท์ (Fractional Bandwidth) ในการส่งมากกว่าหรือเท่ากับ 20 % ของแถบความถี่กลาง หรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าระบบการสื่สารไร้สายแบบแถบกว้างยิ่งจะพัฒนานำไปใช้ภายในอาคารเป็นหลัก ซึ่งในการใช้งานจริงนั้น อาจมีการใช้งานในรูปแบบอื่นที่ไม่ใช่เพียงแค่ภายในอาคาร แต่เป็นการใช้งานในสภาวะระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งมีความสำคัญมาก เช่นในกรณีเครื่องส่งอยู่ภายในอาคาร ส่วนเครื่องรับอยู่ภายนอกอาคาร หรือเครื่องส่งอยู่ภายนอกอาคาร ส่วนเครื่องรับอยู่ภายในอาคาร ซึ่งในสภาวะระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร นี้จะมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อการส่งผ่านในสภาวะแวดล้อมนี้ เช่น ผนัง หน้าต่าง อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 สภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร

เมื่อนำเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งมาใช้ในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร จะทำให้เป็นระบบที่ไม่อยู่ในระยะที่สายตามองเห็น (None Line of Sight, NLOS) โดยจะทำให้สัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศแล้วผ่านวัสดุที่เป็นตัวกลาง (ในวิทยานิพนธ์นี้คือกระจกหน้าต่าง) ไปยังสายอากาศด้านรับ มีการลดทอนกำลังงานลง ส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่รับได้ อาจทำให้สัญญาณที่รับได้เกิดความผิดเพี้ยน หรืออาจจะรับสัญญาณไม่ได้เลย ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาวิจัยถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคารนี้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องด้วยเมื่อนำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งไปใช้งานจริง ในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร สัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศนั้นอาจจะถูกลดทอนกำลังงานลงโดยปัจจัยต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถูกลดทอนโดยผนัง กำแพง หรือหน้าต่างของอาคาร ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อสัญญาณที่รับได้ หรืออาจจะทำให้รับสัญญาณไม่ได้เลยก็เป็นได้ วิทยานิพนธ์นี้ต้องการที่จะศึกษาผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคารที่มีผลต่อช่องสัญญาณของระบบการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่ง ซึ่งพิจารณาบนพื้นฐานของการวัดจริง ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร 2 แบบจำลอง โดยนำผลที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวคเตอร์ (Vector Network Analyzer, VNA) มาทำการวัดและวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่เกิดจากการ

ส่งผ่านในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร เช่น ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ (Channel Transfer Function) อัตราขยายการส่งผ่าน (Transmission Gain) ค่าความผิดเพี้ยนในรูปของสัมประสิทธิ์สหสัมพนธ์ (Correlation Coefficient) และได้ทำการหาอัตราผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) จากนั้นใช้แมตช์ฟิลเตอร์ (Matched Filter) ที่ภาครับเพื่อทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) มีค่ามากที่สุด

1.3 สมมติฐาน

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาคุณลักษณะของช่องสัญญาณการส่งผ่านในแถบกว้างยิ่งโดยได้พิจารณาผลกระทบที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคารที่มีต่อช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งบนพื้นฐานของการวัด เป็นไปได้ว่าสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับจะถูกลดทอนกำลังงานลงหรือเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่นการส่งผ่านหรือสะท้อนวัสดุที่กั้นระหว่างสายอากาศทั้งสองเช่น กำแพงกระจก เป็นต้น จึงทำให้มีผลโดยตรงต่อสัญญาณที่รับได้อาจทำให้สัญญาณที่รับได้มีกำลังงานที่ต่ำหรืออาจจะรับสัญญาณไม่ได้เลยก็เป็นได้ โดยในตำแหน่งต่างๆของการวัดน่าจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน จึงได้มีการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดสัญญาณของสายอากาศด้านรับเพื่อพิจารณาผลที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งคาดว่าน่าจะส่งผลอย่างมากต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณเช่นกัน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคาร (ทางเดินยาวในอาคาร) และภายนอกอาคาร (บริเวณที่จอดรถ) ของแบบจำลอง 2 แบบจำลอง [4]-[6] ซึ่งสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับจะถูกกั้นด้วยกระจกหน้าต่างในทั้ง 2 แบบจำลอง โดยแบบจำลองที่หนึ่ง สายอากาศด้านส่งจะอยู่ภายในอาคาร ส่วนสายอากาศด้านรับจะอยู่ภายนอกอาคาร มีระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับคือ 2-8 เมตร แบบจำลองที่สอง สายอากาศด้านส่งจะอยู่ภายนอกอาคาร ส่วนสายอากาศด้านรับจะอยู่ภายในอาคาร มีระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับคือ 2-4 เมตร โดยที่ทั้งสองแบบจำลองจะทำการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศด้านส่งคงที่ และทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศด้านรับออกไปครั้งละ 0.6 เมตร ซึ่งแบบจำลองที่ได้กล่าวมามีผลต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งพิจารณาบนพื้นฐานของการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ความถี่ 3-11 GHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่ง คือที่ 3.1-10.6 GHz ซึ่งกำหนดโดยคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัสอเมริกา (Federal Communication Commission, FCC) [7] และใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ [8] ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายเป็นแบบรอบตัว (Omni directional)

โดยกำหนดความสูงของสายอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับเป็น 2.65 เมตร ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงผลของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทั้งสอง เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างระหว่างผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ระหว่างสองแบบจำลองนี้

1.5 ขอบเขตการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคารที่มีต่อการส่งผ่านช่องสัญญาณของระบบการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่ง ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคารในการทำวิจัยนี้ได้กำหนดขึ้นมา 2 รูปแบบจำลอง ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ ประกอบด้วย ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ อัตราขยายการส่งผ่าน ค่าความผิดเพี้ยนในรูปของสัมประสิทธิ์สหสัมพนธ์ และอัตราผิดพลาดบิต จากนั้นใช้แมตช์ฟิลเตอร์ทางด้านรับเพื่อทำให้ได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่ามากที่สุด

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

จากแนวคิดและหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการศึกษาสำหรับวิทยานิพนธ์ดังนี้ เริ่มจากศึกษาถึงขั้นตอนในการวัดเก็บค่าช่องสัญญาณ อุปกรณ์ที่จะนำมาใช้และรูปแบบวิธีการวัดโดยยึดหลักตามลักษณะการนำไปใช้งานจริง จากนั้นจึงทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่จะสามารถแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ อันประกอบไปด้วย ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ อัตราขยายการส่งผ่าน ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณโดยพิจารณาในรูปของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และอัตราผิดพลาดบิต ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ถือเป็นปัจจัยหลักในการวิเคราะห์ช่องสัญญาณ จากนั้นได้ศึกษาถึงการปรับปรุงสัญญาณที่รับได้ให้มีค่าดีขึ้น โดยได้ใช้แมตช์ฟิลเตอร์ที่ภาครับเพื่อทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงที่สุด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ โดยในบทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา จากนั้นบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีโดยรวมของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง ซึ่งจะประกอบไปด้วยประวัติและความเป็นมา ลักษณะโดยทั่วไปของระบบแถบกว้างยิ่ง จุดเด่นของระบบแถบกว้างยิ่ง รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการส่ง ส่วนในบทที่ 3 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ระบบการวัดช่องสัญญาณ พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน อัตราขยายการส่งผ่าน สัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์ อัตราผิดพลาดบิต แมตช์ฟิลเตอร์ และแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองและการวัดสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ประกอบด้วย อุปกรณ์และสายอากาศที่ใช้ในการวัด แบบแผนการวัด และรูปแบบจำลองการวัดทั้งสองแบบจำลอง รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวัด และผลการวิเคราะห์ข้อมูลจะกล่าวในบทที่ 5 ส่วนบทที่ 6 จะเป็นสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2
ระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

2.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่ง เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารต่างๆ ซึ่งเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนี้เป็นเทคโนโลยีที่ถูกออกแบบมาให้มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูง ใช้ในระยะทางใกล้ๆ โดยที่ระยะทาง 10 เมตร จะมีความเร็ว 110 Mb/s และมีอัตรสการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้นในระยะทางที่สั้นลง โดยที่ระยะทาง 2 เมตร จะมีความเร็วสูงถึง 480 Mb/s มีช่วงแบนด์วิทด์ที่กว้างคือช่วงความถี่ระหว่าง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และมีขนาดแบนด์วิทด์คือ 7.5 GHz [9] จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนี้มีการรับส่งข้อมูลที่ความเร็วสูงมาก และระยะทางไม่เกิน 10 เมตร การส่งสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งก็จะทำการส่งสัญญาณในลักษณะของพัลส์ที่ช่วงเวลาแคบมากๆ ซึ่งพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบๆ จะมีสเปกตรัมที่กว้าง ใช้กำลังงานต่ำ และสามารถแยกคลื่นหลายวิถีที่ไม่ต้องการออกไปได้ ส่วนสาเหตุที่ทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนี้มีราคาถูกเนื่องไม่ต้องทำการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลที่จะส่งเข้ากับสัญญาณพาห์ (Carrierless) ทำให้ที่ภาครับและภาคส่งของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้นไม่ต้องการอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง เช่นตัวมอดูเลต ดีมอดูเลต และมิกเซอร์ เป็นต้น ที่กล่าวมานี้จึงทำให้อุปกรณ์ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีราคาถูก ขนาดเล็ก และใช้กำลังงานต่ำ เมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารแถบแคบที่ใช้กันอยู่ อีกประการหนึ่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งจะมีสัดส่วนของแบนวิดท์ในการส่งมากกว่าหรือเท่ากับ 20 % ของแถบความถี่กลาง หรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz [9] ซึ่งจะพบว่ามีค่ามากกว่าแถบความถี่ของระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาก

จากคุณสมบัติต่างๆ ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ได้กล่าว จะเห็นได้ว่าเหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะของโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network, WPANs) การติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ในการรับส่งข้อมูลที่เป็นมัลติมีเดีย (ข้อมูลภาพ เสียง วีดีโอ ฯลฯ) ที่มีขนาดของข้อมูลที่ใหญ่ ต้องการความเร็วและความถูกต้องในการรับส่ง เช่น การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ กล้องวีดีโอ กล้องถ่ายรูป เครื่องสแกนเนอร์ เป็นต้น เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งก็สามารถรองรับความต้องการดังกล่าวได้เช่นกัน

เมื่อถึงเวลาที่นำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไปใช้งานจริง การใช้งานจะไม่จำกัดอยู่แค่ในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร แต่จะมีการใช้งานที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่รับได้ วิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการวิเคราะห์ถึง

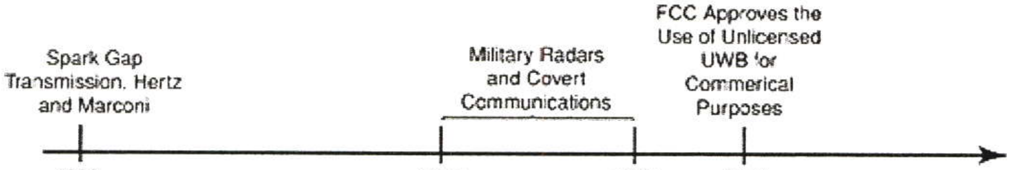
ผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมดังกล่าว ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะกล่าวถึงในบทต่อไป โดยที่ในบทนี้ จะกล่าวถึงประวัติและความเป็นมา หลักการพื้นฐานและข้อกำหนดต่างๆ ของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

2.2 ประวัติและความเป็นมาของระบบแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งโดยพื้นฐานแล้วแตกต่างจากระบบการสื่อสารอื่นๆ เนื่องจากเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้นใช้พัลส์ที่แคบมากในการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ จากพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากยี้เองทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากๆ ถูกรบกวนได้ยาก มีความเร็วสูงและสามารถใช้งานกับระบบเดิมที่มีอยู่แล้วได้

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งไม่ใช่เทคโนโลยีที่ใหม่ มันถูกค้นพบครั้งแรกโดยมาร์โคนี (Guglielmo Marconi) ในปี 1901 ใช้ส่งรหัสมอส (Morse code) ต่อเนื่องข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกโดยใช้เครื่องส่งสปาร์กแก็ป อย่างไรก็ตามประโยชน์ของการใช้แบนด์วิดท์ที่กว้างและความสามารถในการใช้งานแบบหลายผู้ใช้โดยการส่งพัลส์แม่เหล็กไฟฟ้าก็ยังไม่เกิดขึ้นในตอนนั้น จากนั้นประมาณ 15 ปีต่อมาการสื่อสารที่ใช้พัลส์ในการส่งสัญญาณได้รับการผลักดันให้ใช้ในทางการทหารในรูปของอิมพัลส์เรดาร์ (Impulse radars) จากนั้นในปี 1960 – 1990 เทคโนโลยีนี้ได้ถูกจำกัดการใช้งานในกองทัพทหารและแผนกการปกครองที่เป็นความลับทางราชกาล เช่นการสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยที่สูง อย่างไรก็ตามในตอนนี้ความก้าวหน้าของไมโครโปเซสเซอร์และสวิตช์ตัดต่อความเร็วสูงในเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ได้ทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งพร้อมสำหรับการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์

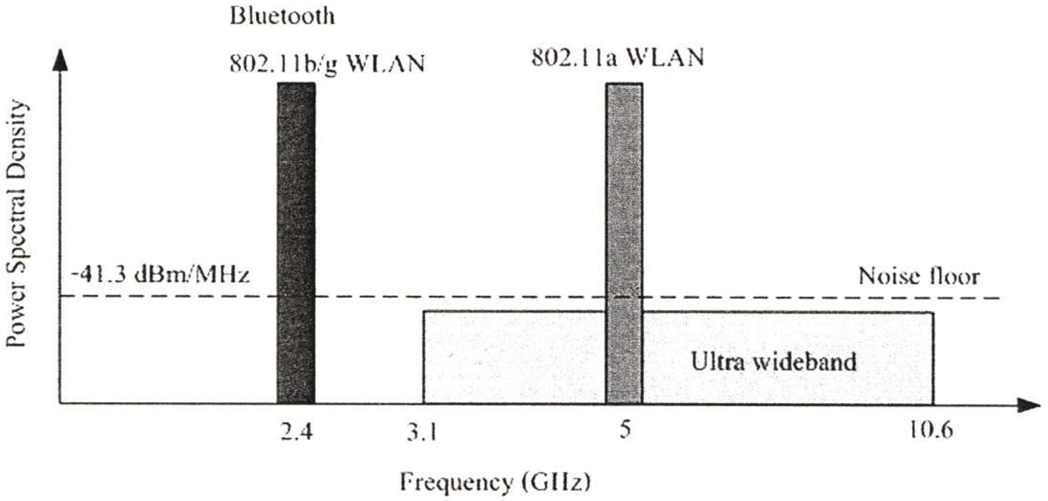
จากที่เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้รับความสนใจในด้านการพาณิชย์ผ่านมาเป็นเวลาหลายปี ผู้พัฒนาระบบแถบกว้างยิ่งต่างพากันกดดันให้ทางคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission, FCC) [7] อนุมัติให้ใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในเชิงพาณิชย์ จากนั้นในปี 2002 FCC ได้อนุมัติรายงานและข้อบังคับฉบับที่หนึ่ง (First Report and Order) สำหรับการใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งในเชิงพาณิชย์ภายใต้การจำกัดกำลังงานที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่นสำหรับอุปกรณ์ต่างๆอย่างเคร่งครัด ซึ่งความเป็นมาโดยย่อของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งได้แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความเป็นมาโดยย่อของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

2.3 ลักษณะโดยทั่วไปของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

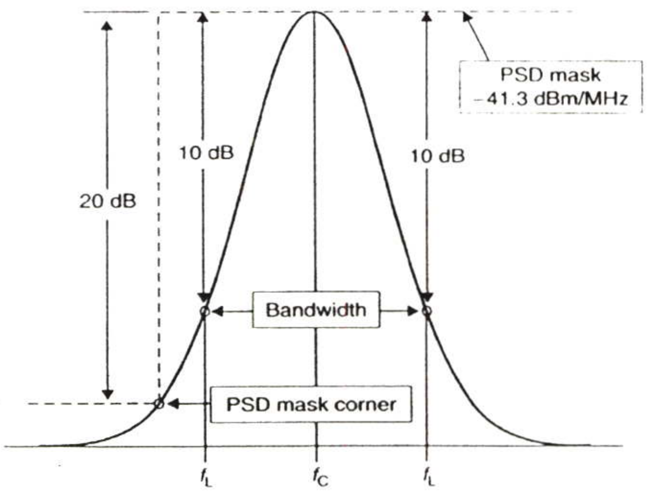
เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งนั้นถูกนำมาใช้ในระบบการสื่อสารแบบไร้สายโดยมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงมากและยังมีข้อแตกต่างจากระบบการสื่อสารทางคลื่นความถี่วิทยุแบบอื่นๆ คือ เป็นระบบที่ไม่ต้องใช้คลื่นพาห์ โดยจะทำการส่งสัญญาณที่มีลักษณะเป็นพัลส์ ซึ่งจะเป็นพัลส์ที่มีความกว้างในระดับนาโนวินาที (Nano second, ns) เมื่อพิจารณาในโดเมนเวลา ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระบบมีความหนาแน่นของแถบกำลังงาน (Power Spectral Density, PSD) ครอบคลุมในช่วงความถี่ที่กว้างมากอยู่ในระดับกิกะเฮิร์ต (GHz) ในโดเมนความถี่ และเนื่องด้วยระบบนี้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงทำให้สามารถที่จะรองรับอัตราการส่งข้อมูลได้สูงแต่ด้วยข้อจำกัดในระดับของกำลังงานที่ใช้ส่งจึงทำให้ระยะทางในการให้บริการถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 10 เมตร ซึ่งเป็นข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE802.15.3a หรือ WPAN โดยในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงระดับความหนาแน่นของแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่งโดยเปรียบเทียบกับระบบอื่น ๆ



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบระดับความหนาแน่นแถบกำลังงานในระบบแถบกว้างยิ่งกับระบบอื่นๆ

ลักษณะเฉพาะโดยทั่วไปของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง เช่น การสื่อสารความเร็วสูงภายในบ้านหรือแม้กระทั่งอุปกรณ์เครือข่ายทางธุรกิจ โดยอุปกรณ์นั้นต้องสามารถทำงานอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz ซึ่งจะถูกออกแบบเพื่อให้สามารถที่จะทำงานได้ภายในอาคารเท่านั้นหรือต้องเข้ากันได้กับอุปกรณ์ขนาดมือถือ ซึ่งอาจจะถูกนำมาใช้ในลักษณะการสื่อสารแบบจุดต่อจุด โดยตัวแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งนั้นต้องทำการออกแบบเพื่อรับรองว่าการแพร่กระจายคลื่นในช่วงแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 20 dB ต้องอยู่ภายในแถบความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่ง และค่าแบนด์วิดท์ที่น้อยที่สุดโดยวัดที่ระดับต่ำลงมา 10 dB จากระดับสูงสุดของการแพร่กระจายเท่ากับ 500 MHz โดยระดับสูงสุดที่อนุญาติให้การแพร่กระจายกำลังงานสำหรับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นถูกกำหนดไว้ที่

–41.3 dBm/MHz เพราะฉะนั้นในการออกแบบสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้นมีความต้องการแบนด์วิดท์ต่ำสุดที่ระดับ 10 dB ลงมาจากระดับสูงสุดของการแพร่กระจายคลื่น โดยรูปที่ 2.3 จะแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดดังกล่าว



รูปที่ 2.3 จุดพิจารณาในการออกแบบสัญญาณแถบกว้างยิ่ง [9]

2.4 จุดเด่นของระบบแถบกว้างยิ่ง

ลักษณะของพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบที่ใช้ในเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารแถบแคบ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงประโยชน์ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่จะนำมาใช้ในการสื่อสารไร้สาย [10]

2.4.1 มีความจุของช่องสัญญาณมาก

จุดเด่นที่สำคัญของการมีแบนด์วิดท์ที่กว้างสำหรับพัลส์แถบกว้างยิ่งคือการทำให้ความจุของช่องสัญญาณมากขึ้น โดยความจุของช่องสัญญาณหรืออัตราการส่งข้อมูลจะบอกถึงขนาดของข้อมูลทั้งหมดที่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณการสื่อสารต่อหนึ่งวินาที ซึ่งขนาดความจุที่มากของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่งสามารถพิจารณาได้จากสูตรของแชนนอน (Hartley-Shannon) ดังสมการที่ 2.1

$$C = B\log_2(1+SNR) \tag{2.1}$$

เมื่อ C คือค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุด
B คือแบนด์วิดท์
SNR คืออัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

จากสมการจะเห็นว่าค่าความจุของช่องสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแบนด์วิดท์มีมากขึ้น เพราะฉะนั้นสัญญาณแถบกว้างยิ่งที่มีแบนด์วิดท์มากถึง 7.5 GHz จึงทำให้มีอัตราการส่งข้อมูลในระดับหลายร้อยเมกะบิตต่อวินาที (Mbps) แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก FCC ได้จำกัดกำลังส่งของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไว้ จึงทำให้สามารถที่จะส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงในระยะสั้นๆ เท่านั้น ทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นตัวเลือกที่น่าจับตามองสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายระยะสั้นที่มีความเร็วสูง เช่น โครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPANs)

2.4.2 ใช้กำลังในการส่งต่ำ

จากข้อกำหนดโดยคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดให้กำลังงานในการส่งสัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้นมีค่าสูงสุดไม่เกิน -41.3 dBm/MHz ทำให้สัญญาณของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนั้นมีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับต่ำโดยอยู่ในระดับของสัญญาณระบบกวน (Noise floor) จึงทำให้ระบบอื่นมองว่าสัญญาณของแถบกว้างยิ่งนี้เป็นสัญญาณรบกวนเลยถูกกำจัดออกไป ทำให้สัญญาณของแถบกว้างยิ่งไม่มีผลกระทบกับระบบอื่นๆ

2.4.3 มีโอกาศที่จะถูกดักฟังหรือตรวจจับได้ยาก

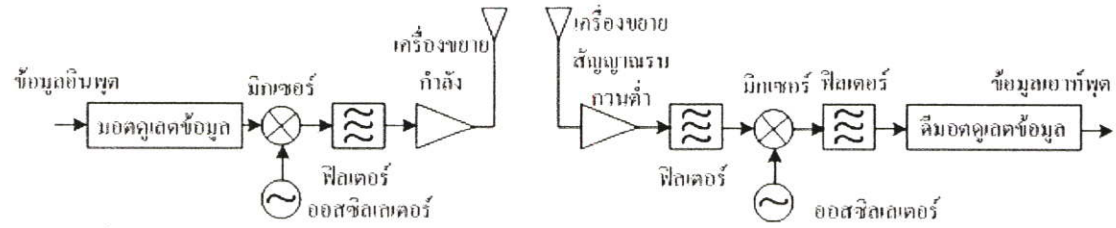
เนื่องจากมีกำลังเฉลี่ยในการส่งที่ต่ำ ทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างยิ่งมีความสามารถในการถูกดักฟังและตรวจจับได้ยาก การส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งที่ต่ำทำให้ผู้ดักฟังจะต้องอยู่ใกล้กับตัวส่งสัญญาณมาก (ประมาณ 1 เมตร) เพื่อที่จะสามารถตรวจจับข่าวสารที่ส่งได้ นอกจากนั้นพัลส์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งเป็นการมอตดูเลตทางเวลา (Time modulation) ด้วยรหัสเฉพาะสำหรับภาคส่งและภาครับนั้นๆ การมอตดูเลตทางเวลาของแถบกว้างยิ่งที่มีพัลส์ที่แคบมากๆ จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการส่งสัญญาณ เนื่องจากการที่จะตรวจจับพัลส์ในระดับพิโกวินาที (Pico second) โดยที่ไม่รู้ว่ามันจะมาถึงเมื่อไหร่นั้นเป็นสิ่งที่แทบจะเป็นไปไม่ได้เลย ฉะนั้นเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจึงเป็นเทคโนโลยีที่มีความปลอดภัยมาก ยากต่อการดักฟังและตรวจจับ การสื่อสารที่ต้องการจุดเด่นในข้อนี้คือการสื่อสารของกองทัพและแผนกการปกครอง

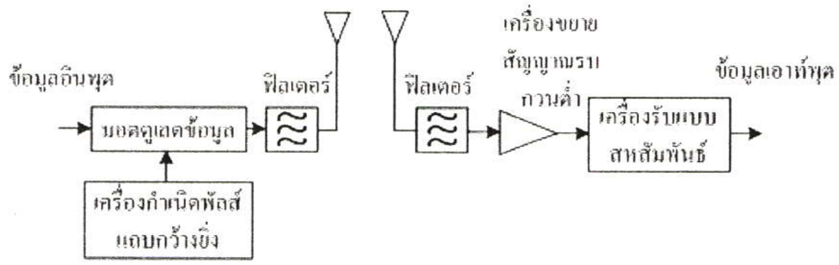
2.4.4 มีความต้านทานจากการถูกรบกวนสัญญาณ (Jamming)

หากเปรียบเทียบกับแถบความถี่ของการสื่อสารแถบแคบแล้ว แถบความถี่ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่งนั้นคลอบคลุมช่วงของความถราที่มากกว่าในระดับหลายกิกกะเฮิร์ต (GHz) การมีความถี่ที่หลากหลายของสัญญาณแถบกว้างยิ่งทำให้มีความต้านทานต่อการถูกรบกวนสัญญาณไม่ว่าจะเป็นการรบกวนโดยตั้งใจหรือไม่ได้ตั้งใจ เพราะว่าไม่มีผู้ที่ทำการรบกวนสัญญาณคนไหนที่สามารถรบกวนสัญญาณในทุกความถี่ของแถบความถี่กว้างยิ่งได้ในครั้งเดียว ฉะนั้นถ้าความถี่บางความถี่ถูกรบกวน แถบกว้างยิ่งก็ยังเหลือช่วงความถี่อีกมากมายที่ยังไม่ถูกใช้

2.4.5 มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ต้องการคลื่นพาห์ (Carrier less) นั่นหมายความว่าไม่ต้องมีการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเหมือนกับในเทคโนโลยีแถบแคบและเทคโนโลยีแถบกว้าง การสื่อสารที่ปราศจากคลื่นพาห์มีความต้องการส่วนประกอบต่างๆ น้อยกว่าการสื่อสารที่มีการมอดูเลตเข้ากับสัญญาณพาห์ ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้โครงสร้างของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าและมีราคาในการสร้างถูกกว่าเทคโนโลยีแถบแคบ รูปที่ 2.4 เป็นการเปรียบเทียบบล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบแคบ กับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง





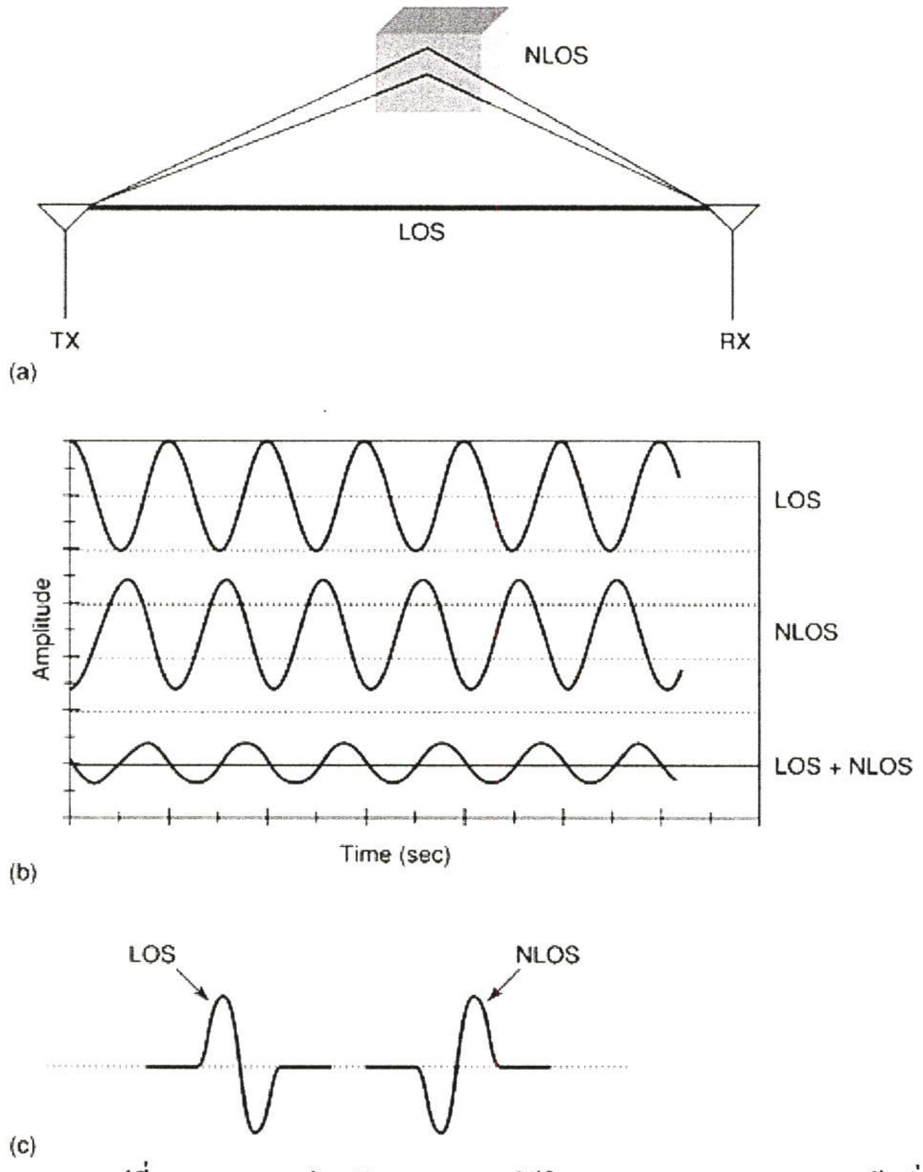
รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบโครงสร้างของระหว่างระบบแถบกว้างยิ่งกับระบบแถบแคบ
a) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบแคบ
b) บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

จากรูปที่ 2.4 ภาคส่ง-ภาครับของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีโครงสร้างที่ง่ายกว่าระบบแถบแคบ เนื่องจากการสื่อสารแถบกว้างยิ่งที่ใช้พัลส์ที่มีกำลังส่งต่ำจะไม่จำเป็นต้องมีตัวขยายกำลัง (Power Amplifier, PA) ในภาคส่ง และจากการที่การสื่อสารแถบกว้างยิ่งไม่มีการใช้สัญญาณพาห์ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้มิกเซอร์ (Mixer) และออสซิลเลเตอร์ (Oscillators) ในการแปลงความถี่พาห์ไปเป็นแถบความถี่ที่ต้องการทั้งในภาครับและภาคส่ง

2.4.6 มีความต้านทานต่อช่องสัญญาณหลายวิถี

เป็นที่รู้กันว่าการเกิดช่องสัญญาณหลายวิถีเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการสื่อสารไร้สาย ซึ่งเป็นผลมาจากการสะท้อนของสัญญาณการสื่อสารจากหลายๆ ทิศทางที่วัสดุต่างๆ เช่น อาคาร โต๊ะ

เพดาน หรืออุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น เส้นทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับโดยตรง เรียกว่า เส้นระดับสายตา (Line of Sight, LOS) ส่วนสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนจากพื้นผิววัสดุต่างๆจะไม่เป็นเส้นระดับสายตา (Non Line of Sight, NLOS) โดยรูปที่ 2.5 แสดงช่องการเกิดคลื่นหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง



รูปที่ 2.5 ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบและแถบกว้างยิ่ง
(a) การเกิดช่องสัญญาณหลายวิถีในการสื่อสารไร้สาย
(b) ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบแคบ
(c) ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีในระบบแถบกว้างยิ่ง

จากรูปที่ 2.5 ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีสำหรับสัญญาณแถบแคบจะเกิดขึ้นค่อนข้างมากกว่าสัญญาณแถบกว้างยิ่ง เนื่องจากการรวมกันแบบต่างเฟส (Out of phase) ของสัญญาณที่มาก

จาก LOS และ NLOS ทำให้ระดับของแอมพลิจูดลดลงมาก แต่ในเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งการส่งพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากๆ ทำให้เทคโนโลยีนี้ได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณหลายวิถีน้อยกว่า เนื่องจากช่วงเวลาการส่งผ่านของพัลส์ของแถบกว้างยิ่งช่วงเวลาสั้นกว่านาโนวินาที (nano second, ns) ทำให้พัลส์ที่เกิดจากการสะท้อนมีโอกาศน้อยมากที่จะไปถึงพร้อมกับพัลส์ที่เป็น LOS

ตารางที่ 2.1 จุดเด่นและประโยชน์ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง [10]

จุดเด่น	ประโยชน์
ช่องสัญญาณมีความจุดมาก	ช่องสัญญาณที่มีความจุดมากสามารถรองรับการแสดงไฟล์วีดีโอที่มีความละเอียดสูง
ใช้กำลังส่งต่ำ	ไม่ไปรบกวนกับระบบอื่นๆ
มีโอกาศที่จะถูกดักฟังหรือตรวจจับได้ยาก	เพิ่มความปลอดภัย เหมาะกับการใช้ในกองทัพและงานด้านความมั่นคง
มีความต้านทานจากการถูกรบกวนสัญญาณ	มีความน่าเชื่อถือได้เมื่อนำไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่มีกลุ่มที่ไม่หวังดี
มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน	ทำให้มีขนาดเล็ก สร้างได้ง่าย และมีราคาถูก
มีความต้านทานต่อช่องสัญญาณหลายวิถี	ให้สัญญาณที่มีกำลังสูงกว่า ในสภาวะแวดล้อมที่มีผลการสะท้อนมาก

2.5 กฎข้อบังคับของระบบสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

2.5.1 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในสหรัฐอเมริกา

ในวันที่ 14 กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 [11] FCC ได้ออกกฎสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง และยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของคำประกาศและระเบียบการฉบับที่หนึ่งได้เผยแพร่ต่อสาธารณชนในวันที่ 22 เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งในเอกสารได้กล่าวถึงการอนุญาตใช้งานในระบบแถบกว้างยิ่งทั้ง 3 ประเภทคือ ระบบตรวจจับภาพ ระบบเรดาร์ในยานพาหนะ ระบบการวัดและการสื่อสาร โดยการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายพลังงานสำหรับการใช้งานในประเภทระบบการสื่อสารนั้นจะถูกกำหนดค่าสัดส่วนของแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth) ไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 0.2 หรือแบนด์วิดท์รวมทั้งหมด ต้องไม่ต่ำกว่า 500 MHz ดังนิยามตามสมการที่ 2.2 [12] และ 2.3 และกำหนดช่วงความถี่ใช้งานไว้ที่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดยข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานของระบบแถบกว้างยิ่งที่กำหนดโดย FCC แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1 สำหรับใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร

$$\text{Fractional bandwidth} \geq 2\frac{f_H - f_L}{f_H + f_L}\text{ ,or} \tag{2.2}$$

$$\text{UWB bandwidth} \quad \geq f_H - f_L \tag{2.3}$$

โดยที่ f_L คือ ความถี่ต่ำสุด

f_H คือ ความถี่สูงสุด

ตารางที่ 2.2 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร [9]

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

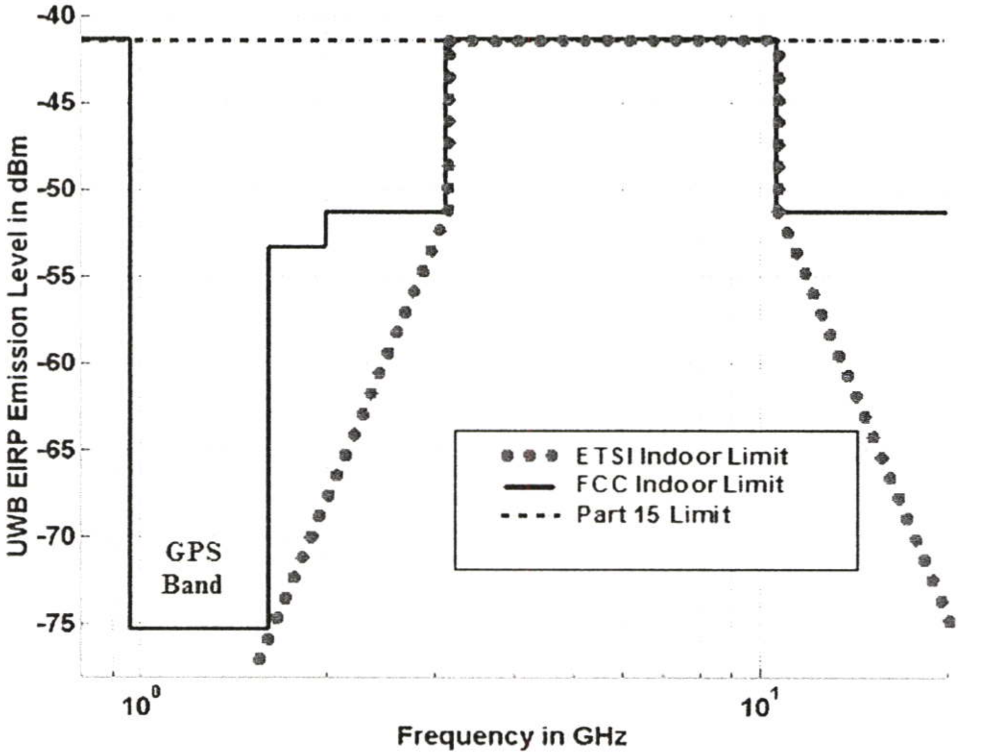
2.5.2 กฎข้อบังคับของระบบแถบกว้างยิ่งในยุโรป

ปัจจุบันโครงร่างของข้อกำหนดระบบแถบกว้างยิ่งในทวีปยุโรปอยู่ในช่วงรอข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวกับผลกระทบของระบบแถบกว้างยิ่งบนระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่โดยทางยุโรปนั้นบางส่วนของข้อกำหนดจะรัดกุมกว่าของทางสหรัฐอเมริกา เพราะทางด้านยุโรปนั้นในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ต้องแสดงให้เห็นว่าส่งผลกระทบน้อยหรือไม่ส่งผลเสียหายต่อระบบเดิมที่มีอยู่โดยข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานสำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย ITU หรือ ETSI แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2

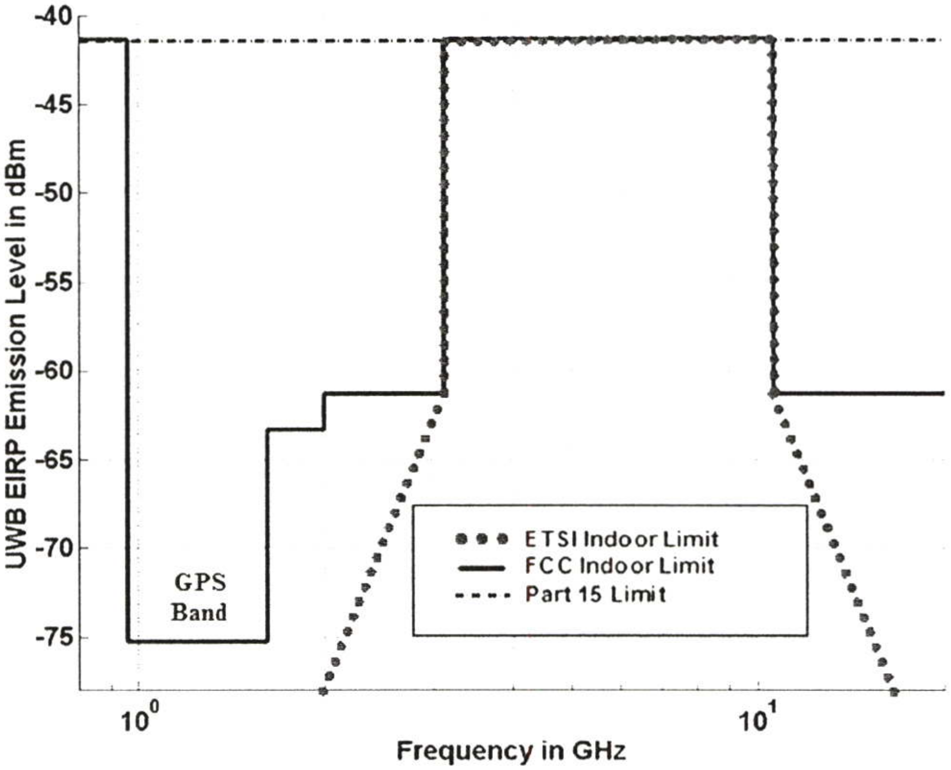
โดยในรูปที่ 2.6 และ 2.7 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบข้อกำหนดการแพร่กระจายกำลังงานในสเปกตรัมความถี่ของระบบแถบกว้างยิ่งระหว่าง FCC และ ETSI ภายในและภายนอกอาคารตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ข้อจำกัดในการแพร่กระจายกำลังงานโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร [9]

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



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของระบบแถบกว้างยิ่งตามข้อกำหนดระหว่าง FCC และ ETSI สภาวะภายในอาคาร [9]



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมของระบบแถบกว้างยิ่งตามข้อกำหนดระหว่าง FCC และ ETSI สภาวะภายนอกอาคาร [9]

2.6 การนำไปใช้งานของระบบแถบกว้างยิ่ง

จากข้อดีของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ทำให้เทคโนโลยีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย โดยจะแบ่งประเภทการใช้งานเป็น 3 ประเภท คือ

1. การติดต่อสื่อสารและเซนเซอร์
2. การหาตำแหน่งและการติดตาม
3. เรดาร์

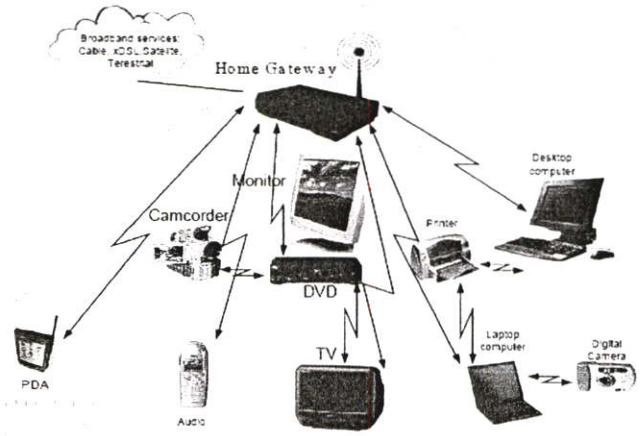
ในตอนแรกนั้นกลุ่มที่นำระบบแถบกว้างยิ่งไปใช้งานจะเป็นกลุ่มทางการทหารและแผนกรักษาความปลอดภัย แต่ต่อมาได้ระบบแถบกว้างยิ่งได้รับความสนใจมากขึ้น จึงทำให้มีแนวโน้มที่จะนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ด้วย

2.6.1 การติดต่อสื่อสารและเซนเซอร์ [9]

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมีแบนด์วิดท์ที่กว้าง จึงทำให้มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงในระดับหลายร้อยเมกะบิตต่อวินาที ซึ่งทำใหรองรับกับระบบมัลติมีเดียที่ต้องการความเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงอยู่แล้ว ซึงแนวคิดในการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไปใช้ในด้านการติดต่อสื่อสารหรือ

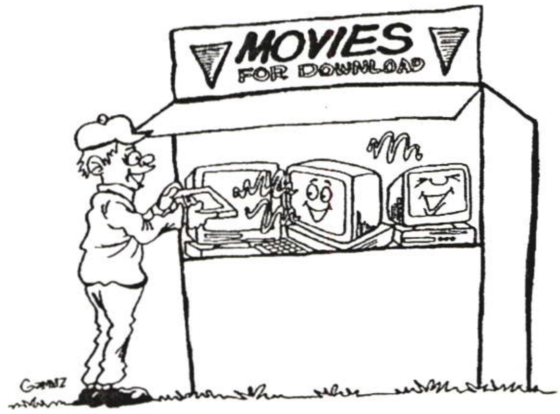
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การรับส่งข้อมูลก็คือระบบโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคลหรือ WPANs นั่นเอง โดยจะเป็นการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ภายในบ้าน หรืออาคารสำนักงาน ซึ่งต่อไปในอนาคตเราสามารถดูภาพวีดีโอที่อัดจากกล้องวีดีโอพกพาผ่านทางหน้าจอโทรทัศน์ได้ทันทีโดยไม่ต้องทำการต่อสายสัญญาณให้ยุ่งยาก หรือสามารถสั่งพิมพ์ภาพจากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่คนละห้องกันกับเครื่องพิมพ์ได้โดยไม่ต้องเดินสายเป็นต้น ซึ่งรูปที่ 2.8 แสดงการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งไปใช้งานในลักษณะโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล



รูปที่ 2.8 การนำไปใช้งานในลักษณะโครงข่ายไร้สายส่วยบุคคล

การใช้งานในการรับส่งข้อมูลมัลติมีเดียที่มีความละเอียดของภาพและเสียงก็สามารถรับส่งได้โดยปราศจากการเดินสาย ยกตัวอย่างการดาวโหลดข้อมูลที่เป็นไฟล์วีดีโอจากแหล่งที่ให้บริการดาวโหลดหรือจากแหล่งที่ขายไฟล์วีดีโอต่าง โดยสามารถดาวโหลดได้สะดวกและรวดเร็วซึ่งม่ต้องทำการต่อสายก่อนการดาวโหลดเลย ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ดาวโหลดไฟล์วีดีโอแบบไร้สายจากแหล่งบริการข้อมูล [9]

74602

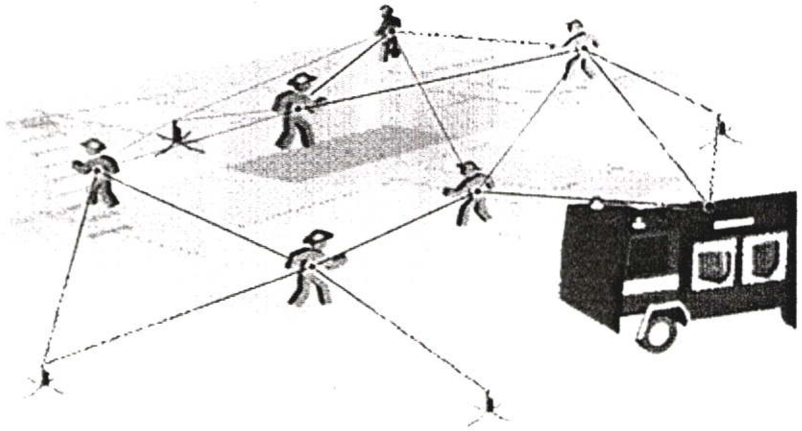
ในการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมาใช้ในระบบเซ็นเซอร์นั้น ที่เห็นกันทั่วๆ ไปก็จะเป็นการใช้งานในระบบรักษาความปลอดภัยตามสถานที่ต่างๆ หรือเป็นการตรวจจับสิ่งผิดปกติต่างๆ ในที่นี้จะยกตัวอย่างการใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่นำไปใช้งานในทางการแพทย์ โดยเช่นการตรวจวัดอุณหภูมิ การวัดอัตราการเต้นของหัวใจ หรืออื่นๆ ที่เป็นสัญญาณอันตรายต่อผู้ป่วย ซึ่งก่อนหน้านี้การตรวจวัดค่าต่างๆ ตัวเซ็นเซอร์นั้นจะมีสายไฟหรือสายเคเบิลไปติดที่ตัวผู้ป่วยทำให้ไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายหรือการตรวจของแพทย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (a) ซึ่งการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้แทน ดังรูปที่ 2.10 (b) จะทำให้เกิดความสะดวกสบายต่อคนไข้ที่ต้องมีการตรวจผลอยู่ตลอดเวลา

(a) (b)

รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบเซ็นเซอร์มีสายกับไร้สายสำหรับผู้ป่วย [9]
(a) เซ็นเซอร์ที่มีสายไฟทำให้เกิดความไม่สะดวกต่อผู้ป่วย
(b) เซ็นเซอร์ไร้สายของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

2.6.2 การหาตำแหน่งและระบุตำแหน่ง

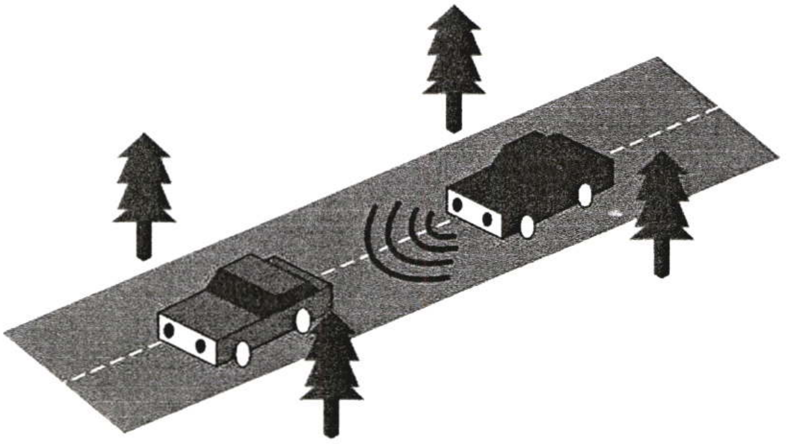
ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่เราสามารถใช้ค้นหาตำแหน่งหรือพิกัดต่างๆ บนโลกได้ โดยใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System, GPS) แต่ในการนำเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมาใช้งาน ซึ่งใช้ภายในอาคารเป็นหลักมีความเหมาะสมมากสำหรับปัญหาในระบบระยะสั้น ซึ่งมันสามารถที่จะระบุตำแหน่งได้แม่นยำในระดับเซนติเมตรเลยทีเดียว อาจนำไปใช้ค้นหาคน หรือสิ่งของต่างๆ ได้ เช่น การหาลูกกุญแจรถยนต์ที่กายอยู่ในห้องหรือในบ้าน การตรวจสอบสินค้าในคลังสินค้า หรือการระบุตำแหน่งของนักผจญเพลิงที่เข้าไปค้นหาผู้ประสบภัยที่ติดอยู่ในอาคารที่ถูกไฟไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การระบุตำแหน่งของนักผจญเพลิงในอาคารที่ถูกไฟไหม้

2.6.3 เรดาร์

สัญญาณแถบกว้างยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีราคาไม่แพงและถูนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเรดาร์ที่มีความสามารถเพิ่มขึ้น ระบบเรดาร์จะมีการเจริญเติบโตทางการตลาดอย่างมาก การประยุกต์ใช้งานเรดาร์ในรูปแบบใหม่โดยเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะถูกนำไปใช้ในระบบเซ็นเซอร์รถยนต์ เซ็นเซอร์ตรวจจับเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกัน เซ็นเซอร์ระบบความปลอดภัยส่วนบุคคลในการตรวจสอบในพื้นที่ที่ต้องการความปลอดภัยสูงเช่น ที่เก็บทรัพย์สินมีค่าหรือพื้นที่ที่ต้องการความเข้มงวดในการตรวจที่เข้มงวดหรืออาจนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบทะลุผ่านวัสดุที่ใช้ทำอาคารเช่น ไม้ อิฐ อิฐบล็อก ไฟเบอร์ พลาสติกและคอนกรีต ซึ่งในอดีตระบบเรดาร์ได้ถูกพัฒนาและใช้เพื่อการทหารแต่ในอนาคตอันใกล้นี้ระบบเรดาร์จะถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ มากขึ้นเรื่อยๆ โดยในรูปที่ 2.12 แสดงการประยุกใช้งานในระบบตรวจจับเพื่อหลีกเลี่ยงการชนของรถยนต์



รูปที่ 2.12 การตรวจจับการชนของรถยนต์

2.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันรวมถึงข้อกำหนดต่างๆของเทคโนโลยีนี้ซึ่งออกโดยคณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาหรือ FCC ซึ่งว่าด้วยเรื่องของช่วงความถี่ที่ใช้ กำลังงานในการส่งทั้งในสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคาร นอกจากนั้นยังได้กล่าวถึงจุดเด่นและประโยชน์ของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง จากการที่เทคโนโลยีนี้มีจุดเด่นในเรื่องความเร็วในการส่งที่สูง แบนด์วิดท์กว้าง ใช้กำลังงานในการส่งที่ต่ำทำให้มีการใช้งานได้หลากหลายโดยไม่ไปรบกวนหรือถูกรบกวนจากระบบอื่นๆ ซึ่งการนำไปใช้งานหลักๆ จะแบ่งเป็น 3 ประเภทการใช้งานคือ การติดต่อสื่อสารและเซนเซอร์ การหาตำแหน่งและการติดตาม และสุดท้ายคือระบบเรดาร์

บทที่ 3
ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์สัญญาณแถบกว้างยิ่ง

3.1 กล่าวนำ

สภาวะแวดล้อมในการแพร่กระจายคลื่นนั้นการส่งผ่านสัญญาณจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับจะเกี่ยวโยงไปถึงลักษณะของช่องสัญญาณ โดยในการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งทั้งสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคารเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญ ถ้าช่องสัญญาณมีคุณลักษณะที่ดีแล้วผลของการรบกวนและการแทรกสอดของแหล่งกำเนิดสัญญาณอื่นๆ จะสามารถที่จะทำให้ลดลงได้โดยการออกแบบเครื่องส่งและเครื่องรับที่เหมาะสม โดยลักษณะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของการจำลองช่องสัญญาณวิทยุคือการตรวจสอบถึงฟังก์ชันการกระจายตัวของพารามิเตอร์ช่องสัญญาณ โดยทั่วไปการกระจายตัวเหล่านี้มักจะได้มาจากผลการวัดหรือผลการจำลองบนพื้นฐานของความถูกต้องหรือมีลักษณะตามสภาวะแวดล้อมที่ชัดเจน

ในการจำลองช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งนั้นมีหลักเกณฑ์จำนวนมากที่ถูกนำมาพิจารณาเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะของช่องสัญญาณ ซึ่งในบทนี้ได้อธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการจำลองช่องสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่ง ละค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการพิจาราณาการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งอีกด้วย

3.2 ระบบการวัดช่องสัญญาณ

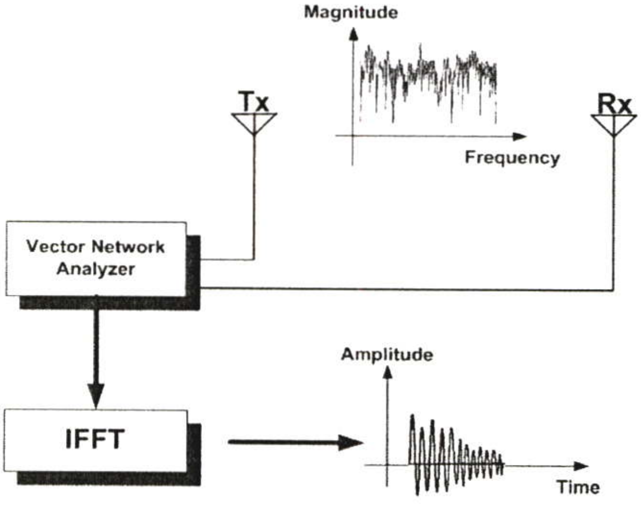
ในการวัดช่องสัญญาณวิทยุแถบกว้างยิ่งนั้นจะใช้การวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่ (Frequency domain, FD) โดยใช้เทคนิคการกวาดความถี่ (Frequency sweeping) ซึ่งวิธีการนี้ผลตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณนั้นจะถูกบันทึกโดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวคเตอร์ (VNA) โดยจะเหมือนกับการวัดพารามิเตอร์ S_{21} หรือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coeffecient) ซึ่งในการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่นั้นสัญญาณวิทยุจะถูกสร้างขึ้นและรับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวคเตอร์ที่ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่จัดการเกี่ยวกับการวัดทั้งหมดโดยสัญญาณที่ใช้ตรวจสอบนั้นจะเป็นกลุ่มของสัญญาณแถบแคบรูปไซด์ (Sinusoid) ซึ่งทำการกวาดตลอดแถบความถี่ที่ต้องการพิจารณาประกอบกับการใช้สายอากาศแถบกว้างซึ่งในประเด็นนี้จะขอกล่าวในบทต่อไป โดยในการจำลองช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้นสามารถที่จะทำได้ในส่วนของการประมวลผลข้อมูลและเมื่อใช้วิธีการวัดสัญญาณในโดเมนความถี่ช่วงเวลาของช่องสัญญาณที่ทำการวัดต้องถูกกำหนดให้คงที่เพื่อรักษาเงื่อนไขของช่องสัญญาณในช่วงการกวาดความถี่โดยที่ค่าสูงสุดของเวลาการกวาดความถี่ถูกจำกัด

โดยเวลาร่วมนัย (coherence time) ของช่องสัญญาณถ้าเวลาการกวาดนานกว่าเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณแล้วช่องสัญญาณอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาในการกวาดความถี่สำหรับการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนั้นจำต้องใช้เทคนิควิธีการอื่นเข้ามาทำการตรวจสอบแทน ซึ่งประสิทธิภาพของการวัดในโดเมนความถี่นั้นจะถูกกำหนดโดยค่าสูงสุดของเวลาประวิงของช่องสัญญาณ ซึ่งขอบเขตด้านบนของเวลาประวิงที่ตรวจพบ สามารถกำหนดโดยจำนวนจุดของความถี่ที่ใช้ในการกวาดแต่ละครั้งและแบนด์วิดท์ ซึ่งนิยามตามสมการที่ 3.1 [12]

$$\tau_{\max} = \left(N_{smp} - 1\right) / B \tag{3.1}$$

โดยที่ N_{smp} คือ จำนวนจุดความถี่

การวัดสัญญาณโดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวคเตอร์นั้นผลที่ได้คือผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณจากนั้นจะใช้ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (inverse fast Fourier transform, IFFT) ในการแปลงข้อมูลการวัดในโดเมนความถี่ให้อยู่ในรูปแบบของโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.1



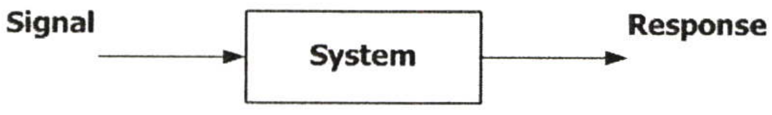
รูปที่ 3.1 ระบบการวัดช่องสัญญาณในโดเมนความถี่โดยเครื่อง VNA และการแปลงสู่โดเมนเวลา โดยใช้ IFFT [13]

3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการสื่อสารไร้สายนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณไม่ว่าจะเป็นระดับของกำลังงาน เวลาประวิงที่เกิดขึ้นหรือความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณที่รับได้เมื่อทำการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ โดยผลที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะต้องทำการตรวจสอบเบื้องต้นด้วยวิธีการวัดจากนั้นผลที่ได้จากการวัดหรือที่เรียกว่าข้อมูลดิบ นั้นจำเป็นต้องนำมาวิเคราะห์ตามขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบหรือการเปลี่ยนแปลงดังที่ได้กล่าวไปแล้วโดยในขั้นตอนนี้มีความสำคัญพอ ๆ กับขั้นตอนการวัดซึ่งมีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและเชื่อถือได้โดยในหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ ดังนี้

3.3.1 ผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ

เมื่อพิจารณาการวัดช่องสัญญาณโดยใช้เครื่อง VNA นั้นสิ่งที่ต้องทำความเข้าใจเป็นอันดับแรกคือ ระบบและสัญญาณ โดยระบบคือกลุ่มของวัตถุที่รวมกัน ซึ่งสามารถทำงานร่วมกันเพื่อให้สำเร็จตามจุดมุ่งหมายที่ต้องการและสัญญาณคือปริมาณทางกายภาพบางอย่างที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบเรียกว่าสัญญาณเข้าหรือสัญญาณอินพุต (input signal) ของระบบ และจะมีปริมาณทางกายภาพบางอย่างออกมาจากระบบซึ่งเรียกว่า สัญญาณออกหรือสัญญาณเอาต์พุต (output signal) หรือผลตอบสนอง (response) ของระบบ โดยสามารถแสดงบล็อคไดอะแกรมของระบบดังรูปที่ 3.3 ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวนั้นจะเป็นสิ่งที่ใช้แสดงถึงคุณสมบัติของระบบ และจากการวัดผลที่ได้ก็คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณซึ่งแปรผันตรงกับฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (frequency transfer function, $H(\omega)$) ของช่องสัญญาณ โดยฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวนั้นจะแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณที่ทำการพิจารณาอยู่ซึ่งประกอบด้วยขนาดสัญญาณที่ส่งผ่าน (magnitude) และผลตอบสนองทางเฟส (phase response) ของสัญญาณ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัญญาณกับฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณนั้นกำหนดตามสมการที่ 3.10 [9] และแสดงดังรูปที่ 3.4

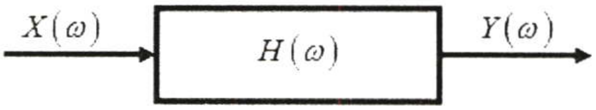


รูปที่ 3.2 บล็อคไดอะแกรมของระบบ [15]

$$S_{21}(\omega) \propto H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \tag{3.2}$$

โดยที่ $Y(\omega)$ คือ เอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่

$X(\omega)$ คือ อินพุตของระบบในโดเมนความถี่



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนความถี่ [15]

3.3.2 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ

การแสดงคุณสมบัติของช่องสัญญาณนั้นสามารถทำได้หลายวิธีโดยหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ก็คือการแสดงด้วยค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response) ของระบบ โดยเริ่มต้นนั้นจะขอกล่าวถึงคำนิยามของฟังก์ชันอิมพัลส์ (impulse function) ก่อนดังนี้

ฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่เหมือนกับฟังก์ชันทั่วไปโดยฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยมักนิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ $\delta(t)$ และมีคุณสมบัติดังนี้คือ

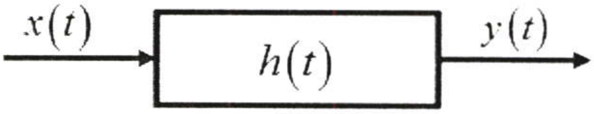
$$\int_a^b f(t)\delta(t-t_0)dt = \begin{cases} f(t_0), & a < t_0 < b \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{3.3}$$

โดยในที่นี้ $f(t)$ จะต้องเป็นฟังก์ชันที่มีค่าต่อเนื่อง (continuous) ที่ค่าเวลา $t = t_0$ จาก (3.11) เมื่อกำหนดให้ $f(t) = 1$ จะได้

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0)dt = 1 \tag{3.4}$$

จากผลของการทำปริพันธ์ฟังก์ชันใดๆ นั้น มีผลเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งที่แสดงค่าฟังก์ชันนั้นมาช่วยอธิบายใน (3.12) จะกล่าวได้ว่าพื้นที่ใต้เส้นโค้งของ $\delta(t-t_0)$ มีค่า 1 หน่วย โดยค่าที่ได้จากการทำปริพันธ์นี้นิยมเรียกว่า น้ำหนัก (weight) ของฟังก์ชันอิมพัลส์นั้นดังนั้นจะพบว่าน้ำหนักของฟังก์ชัน $A\delta(t)$ มีค่าเท่ากับ A หน่วย ฟังก์ชันอิมพัลส์ที่มีน้ำหนัก 1 หน่วยนั้นเรียกว่า ฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่ง

หน่วย (unit impulse function) แม้ว่าฟังก์ชันอิมพัลส์จะไม่สามารถสร้างได้จริงในทางปฏิบัติแต่ในทางทฤษฎีจะมีบทบาทในการวิเคราะห์สัญญาณและระบบ โดยเฉพาะการบอกคุณสมบัติของระบบอีกทั้งสัญญาณอินพุตที่เป็นฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วยนั้นยังถูกนิยามเรียกว่า ผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบใช้สัญลักษณ์ $h(t)$ แทนผลตอบสนองดังกล่าวซึ่งผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบสามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบเพราะสามารถบอกคุณสมบัติของระบบนั้นได้และโดยเฉพาะเมื่อระบบภายใต้การพิจารณาเป็นระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนตามเวลา (Linear time invariance system) ค่าเอาต์พุต $y(t)$ ของระบบที่เกิดจากสัญญาณอินพุต $x(t)$ ใด ๆ นั้นจะสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้รูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบในโดเมนเวลา

3.3.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ในการตรวจสอบหาความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณที่รับได้นั้นสามารถวิเคราะห์และแสดงให้เห็นโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ดังแสดงนิยามตามสมการที่ 3.13 ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ข้าม (cross correlation) ที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้กับค่าสูงสุดของค่าสัมบูรณ์รากที่สองของผลคูณระหว่างค่าอัตสหสัมพันธ์ (auto correlation) ของสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้โดยสมการที่นิยามถึงค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นตามสมการที่ 3.14 ถึงสมการที่ 3.16 ตามลำดับ

$$\rho(d) = \frac{\max\left|r_{ab}(\tau)\right|}{\max\left|\sqrt{r_a(\tau) r_b(\tau)}\right|} \tag{3.5}$$

โดยสมการที่นิยามค่าสหสัมพันธ์ข้าม คือ

$$r_{ab}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v_t(\tau) v_r(t+\tau)\, dt \tag{3.6}$$

และสมการที่นิยามค่าอัตสหสัมพันธ์ คือ

$$r_a(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty} v_t(\tau)v_t(t+\tau)dt \tag{3.7}$$

$$r_b(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty} v_r(\tau)v_r(t+\tau)dt \tag{3.8}$$

โดยที่

$v_t(t)$ คือ สัญญาณส่ง

$v_r(t)$ คือ สัญญาณที่รับได้

3.3.4 ค่าสูญเสียเชิงวิถี

ในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นเป้าหมายหลักของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นคือ การคาดการณ์ถึงค่าสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ PL เนื่องจากการแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณโดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างระดับกำลังงานที่ใช้ส่งและระดับกำลังงานที่รับได้ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบล (Decibel) ดังแสดงในสมการที่ 3.17

$$PL_{dB}=-20\log\left(\frac{v_r(t)}{v_t(t)}\right) \tag{3.9}$$

โดยที่

v_t คือ ระดับสัญญาณที่ใช้ส่ง

v_r คือ ระดับสัญญาณที่รับได้

โดยในการวิเคราะห์ค่าสูญเสียเชิงวิถีในระบบแถบกว้างยิ่ง PL_{UWB} นั้นจะพิจารณาที่กำลังงานสูงสุดของสัญญาณที่ใช้ส่งและกำลังสูงสุดของสัญญาณที่รับได้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทาง (d) โดยมีนิยามเป็นไปตามสมการที่ 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ

$$PL_{UWB}(d)[dB]=-20\log\left[\frac{\max|v_r(t)|}{\max|v_t(t,d)|}\right] \tag{3.10}$$

โดยในสมการที่ 3.18 ได้กำหนดให้ขนาดของสัญญาณที่ใช้ส่งมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

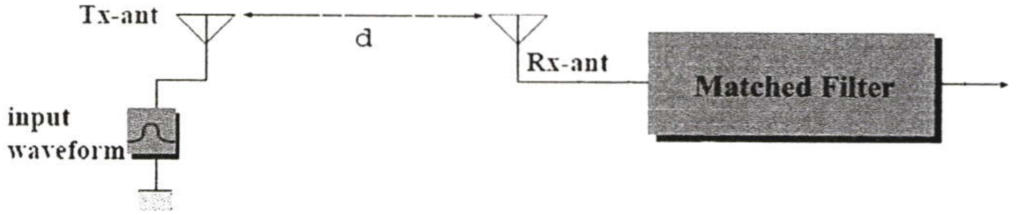
$$PL_{UWB}(d)[dB] = -20\log\left[\max\left|v_r(t,d)\right|\right] \tag{3.11}$$

ซึ่งค่าอัตราขยายการส่งผ่าน TG จะเป็นส่วนกลับของค่าสูญเสียเชิงวิถี โดยค่าอัตราขยายการส่งผ่านกำหนดโดยอัตราส่วนระหว่างค่าแอมพลิจูดสัมบูรณ์สูงสุดของรูปคลื่นด้านส่งและรูปคลื่นด้านรับดังนี้

$$TG(d)[dB] = 20\log\frac{\max|v_r(t,d)|}{\max|v_t(t)|} \tag{3.12}$$

3.3.5 แมตช์ฟิลเตอร์ (Matched filter)

ในส่วนของภาครับได้ใช้วงจรแมตช์ฟิลเตอร์เพื่อช่วยให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, SNR) มีค่าสูงที่สุดโดยบล็อคไดอะแกรมและฟังก์ชันถ่ายโอนของแมตช์ฟิลเตอร์ $H_{MF}(f)$ แสดงในรูปที่ 3.6 และสมการที่ 3.21 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 บล็อคไดอะแกรมแมตช์ฟิลเตอร์

$$H_{MF}(f) = \frac{\sqrt{2f_b}V_r^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty}|V_r(f)|^2\,df}} \tag{3.13}$$

โดย $V_r(f)$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้

ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุตของแมตช์ฟิลเตอร์ $V_{MF}(f)$ สามารถคำนวนโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของแมตช์ฟิลเตอร์คูณกับฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณรับ $V_r(f)$ ดังสมการ

$$V_{MF}(f) = V_r(f) \cdot H_{MF}(f) \tag{3.14}$$

หลังจากที่ได้ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุตของแมตช์ฟิลเตอร์แล้ว เราสามารถหาค่ารูปคลื่นสัญญาณรับของแมตช์ฟิลเตอร์ $v_{MF}(f)$ โดยการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับ ดังสมการ

$$v_{MF}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{MF}(f) e^{j2\pi ft} df \tag{3.23}$$

3.3.6 อัตราความผิดพลาดบิต

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่นิยมนำมาวิเคราะห์เพื่อแสดงให้เห็นถึงระดับอัตราความผิดพลาดบิตที่เข้ามายังภาครับ ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพในการส่งผ่านข้อมูลในแต่ละจุดที่ได้ทำการวิเคราะห์ โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านระหว่างสัญญาณที่รับได้กับค่าสัญญาณที่ใช้ในการส่ง [11] ดังแสดงในสมการที่ 3.24 และค่าอัตราผิดพลาดบิตแสดงในสมการที่ 3.25

$$C_c = \frac{\int_0^{\infty} |V_c(f,d)| df}{\sqrt{\int_0^{\infty} |V_r(f,d)|^2 df \cdot \int_0^{\infty} |H_c(f,d)|^2 df}} \tag{3.15}$$

$$BER = Q\left[\sqrt{2(E_b/N_o)C_c}\right] \tag{3.16}$$

โดยที่

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt, x \geq 0 \tag{3.17}$$

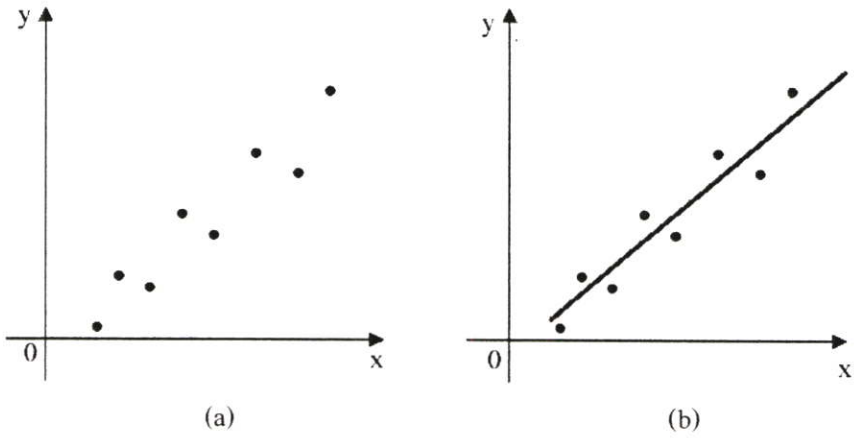
โดยที่

E_b/N_0 = energy = อัตราบิตข้อมูลต่อสัญญาณรบกวน

C_c = ฟังก์ชันสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

3.3.7 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares)

ในกรณีที่มีความผิดพลาดในชุดข้อมูลที่ได้ เทคนิคในการประมาณค่าฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลนั้นจะใช้การแทนค่าแนวโน้มกว้าง ๆ ของข้อมูลโดยฟังก์ชันที่ใช้ประมาณนั้นไม่จำเป็นต้องทับกับข้อมูลทุกจุดดังในรูปที่ 3.7 โดยการได้มาซึ่งฟังก์ชันที่ใช้แทนชุดข้อมูลนั้นอาจทำโดยการวาดเส้นที่คิดว่าดีที่สุดในการใช้แทนจุดข้อมูลนั้น แต่วิธีการนี้ไม่มีข้อพิสูจน์ว่าเส้นที่วาดขึ้นมานั้นเป็นฟังก์ชันที่ดีที่สุดสำหรับแทนชุดข้อมูลนั้นด้วยเหตุนี้จึงมีอีกวิธีหนึ่งที่เรียกว่า Least-squares regression โดยแนวคิดของวิธีนี้คือ การลดค่าความแตกต่างระหว่างข้อมูลแต่ละจุดกับค่าฟังก์ชัน ถ้าข้อมูลจำนวน n ชุดมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตรง สมการเส้นตรงที่หาได้จากวิธีนี้เรียกว่าการถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression) โดยมีสมการดังสมการที่ 3.27 [16]



รูปที่ 3.6 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด
a) ชุดข้อมูล b) ฟังก์ชันที่ใช้แทนค่าชุดข้อมูลโดยคำนึงถึงแนวโน้มรวม

$$y = a + bx \pm e \tag{3.18}$$

เมื่อ a และ b เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงจุดตัดแกนและความชัน

e เป็นค่าความผิดพลาด (Root mean square error)

โดยที่ a และ b สามารถหาได้จากสมการ

$$
\begin{aligned}
an + b\sum_{j=1}^{n} x_j &= \sum_{j=1}^{n} y_j \\
a\sum_{j=1}^{n} x_j + b\sum_{j=1}^{n} x_j^2 &= \sum_{j=1}^{n} x_j y_j
\end{aligned}
\tag{3.19}
$$

และ e หาได้จากสมการ

$$
e = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(y_j - a - bx_j)^2} \tag{3.20}
$$

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณในการสื่อสารซึ่งเป็นส่วนสำคัญในวิทยานิพนธ์นี้อันประกอบด้วยรายละเอียดของคุณลักษณะของช่องสัญญาณ ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบหรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณลักษณะของช่องสัญญาณรวมไปถึงระบบการวัดช่องสัญญาณซึ่งทำการวัดในโดเมนความถี่ จากนั้นจะนำผลการวัดมาใช้ในการตรวจสอบถึงผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวในบทต่อไป ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ถึงผลที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็น ผลการลดทอนของกำลังงาน การผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ อันเนื่องมาจากผลกระทบจากปัจจัยดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น

บทที่ 4
แบบจำลองและการวัดสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

4.1 กล่าวนำ

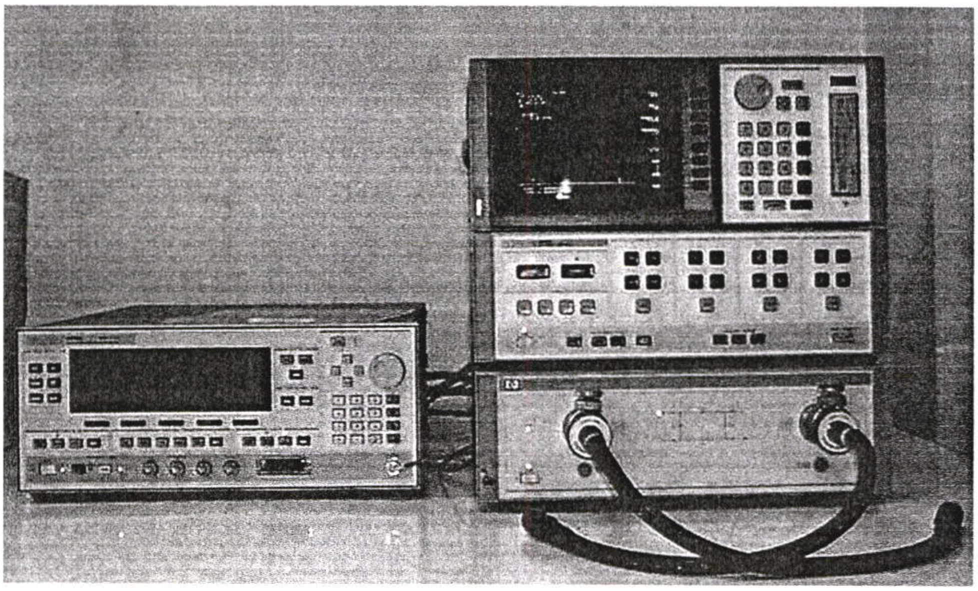
ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนและแบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นการตรวจสอบผลการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สาย โดยทั่วไปจะมีการพิจารณาอยู่ 2 วิธีด้วยกันคือ ตรวจสอบจากการใช้แบบจำลองช่องสัญญาณ (Channel model) บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์และตรวจสอบจากการวัด (Measurement) โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า เครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย ซึ่งเป็นการตรวจสอบบนโดเมนความถี่ โดยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการตรวจสอบบนพื้นฐานของการวัดเป็นหลัก สำหรับขั้นตอนในการวัดนั้นจำเป็นต้องมีการจัดเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และสิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการกำหนดรูปแบบหรือลักษณะสภาวะแวดล้อมที่ทำการวัด (Measurement model) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดปัจจัยของการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบ โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิเคราะห์ในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร ซึ่งจะมีแบบจำลองการวัดอยู่สองแบบจำลอง แบบจำลองที่หนึ่งกำหนดให้สายอากาศส่งอยู่ภายในอาคารและสายอากาศรับอยู่ภายนอกอาคาร ส่วนแบบจำลองที่สองกำหนดให้สายอากาศส่งอยู่ภายนอกอาคารและสายอากาศรับอยู่ภายในอาคาร ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด แบบจำลองทั้งสองแบบจำลอง รวมถึงแบบแผนในการวัด จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

4.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวคเตอร์

ในระบบการวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นจะใช้เครื่องวัดเฉพาะทางอันประกอบไปด้วย เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวคเตอร์รุ่น HP-8510C ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (S-parameter test set) รุ่น HP-8514B และตัวสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesized sweeper) รุ่น HP-83620A เป็นอุปกรณ์หลักในการทดลองดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1ซึ่งจะถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ที่เชื่อมต่อผ่านช่องสื่อสารแบบ GPIB (General purpose interface bus) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่สามารถตรวจวัดสัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ต ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการตรวจวัดแบบสองพอร์ตโดยพอร์ตที่หนึ่งคือพอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ส่วนพอร์ตสองจะใช้ในการรับสัญญาณ โดยที่ปลายของพอร์ตทั้งสองจะถูกต่อ

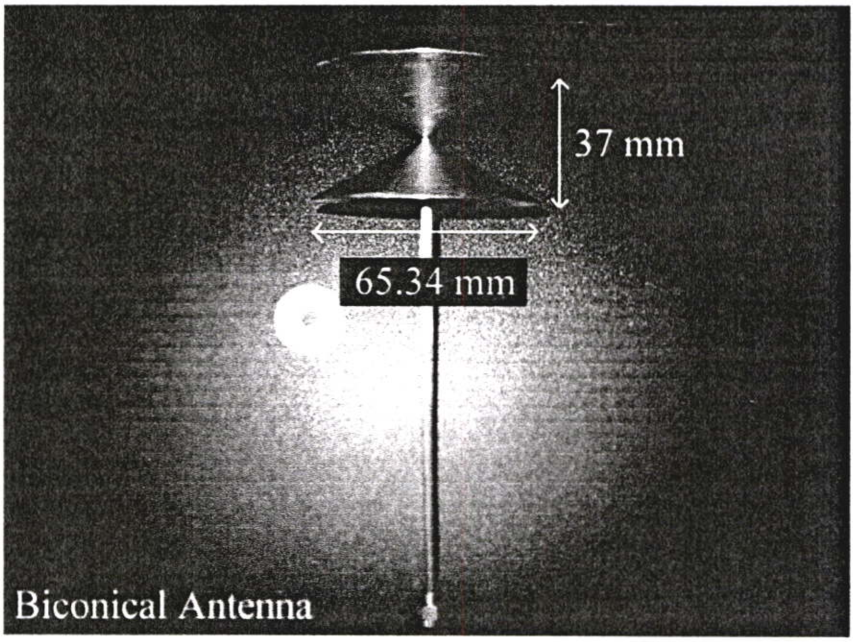
ด้วยสายอากาศ และทำการวัดในโดเมนความถี่ก่อนที่จะถูกนำผลการวัดไปวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป



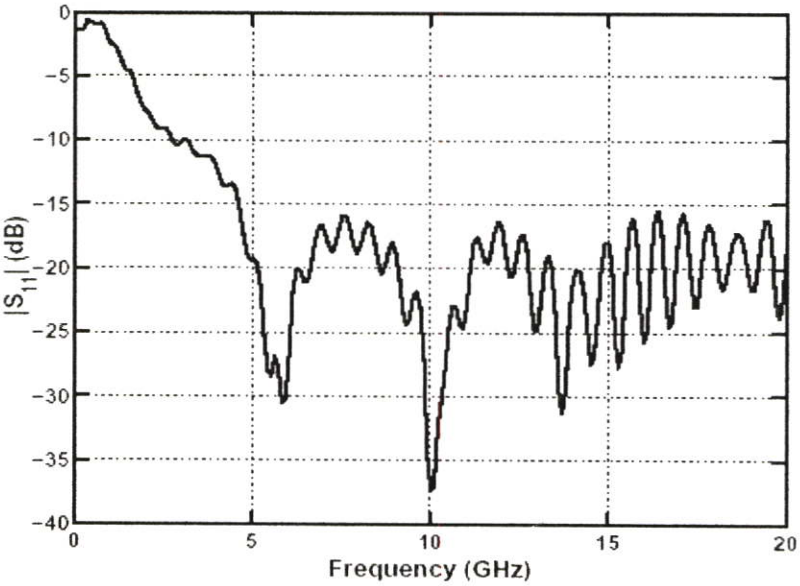
รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวคเตอร์

4.2.2 สายอากาศแบบกรวยคู่

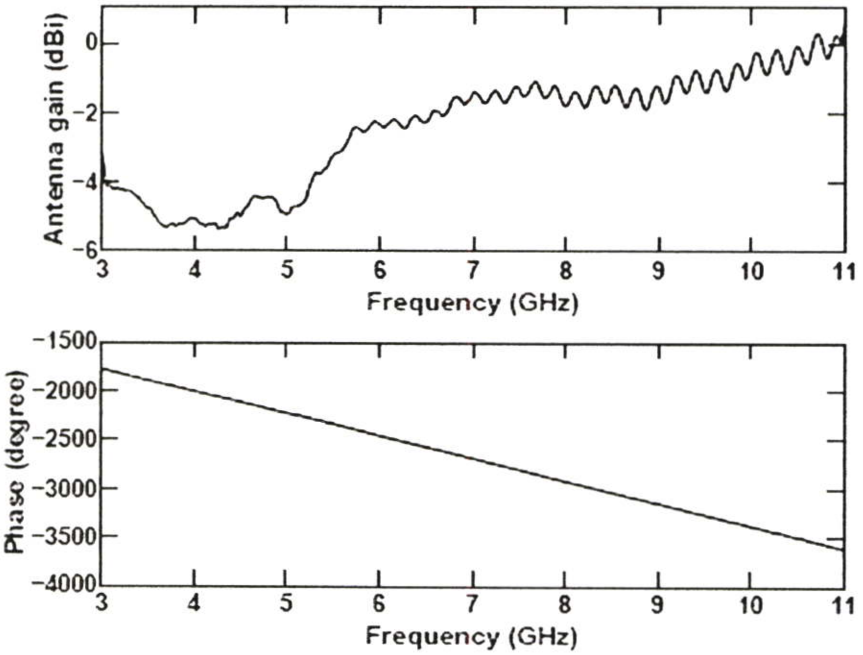
ในการตรวจวัดช่องสัญญาณแบบไร้สายนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่คือ สายอากาศ (Antennas) ซึ่งช่วยในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายผ่านอากาศทางด้านส่งไปยังสายอากาศทางด้านรับจากนั้นสายอากาศทางด้านรับก็จะเปลี่ยนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าตามเดิมโดยในการทดลองนี้ได้ใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ (Biconical antenna) [8] ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (radiation pattern) แบบรอบตัว (omni-directional) และเป็นสายอากาศที่ตอบสนองความถี่ได้สูง ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของแถบกว้างยิ่ง ตามข้อกำหนดย่านความถี่การใช้งานของระบบแถบกว้างยิ่งของ FCC โดยสายอากาศแบบกรวยคู่นี้มีความสูงของตัวสายอากาศ 37 มิลิเมตร และยาว 65.34 มิลิเมตรดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงรูปทรงและขนาดของสายอากาศแบบกรวยคู่, รูปที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแบบกรวยคู่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ในย่านของแถบกว้างยิ่ง และรูปที่ 4.4 แสดงขนาดและเฟสของสายอากาศแบบกรวยคู่



รูปที่ 4.2 ขนาดและรูปทรงของสายอากาศแบบกรวยคู่ [8]



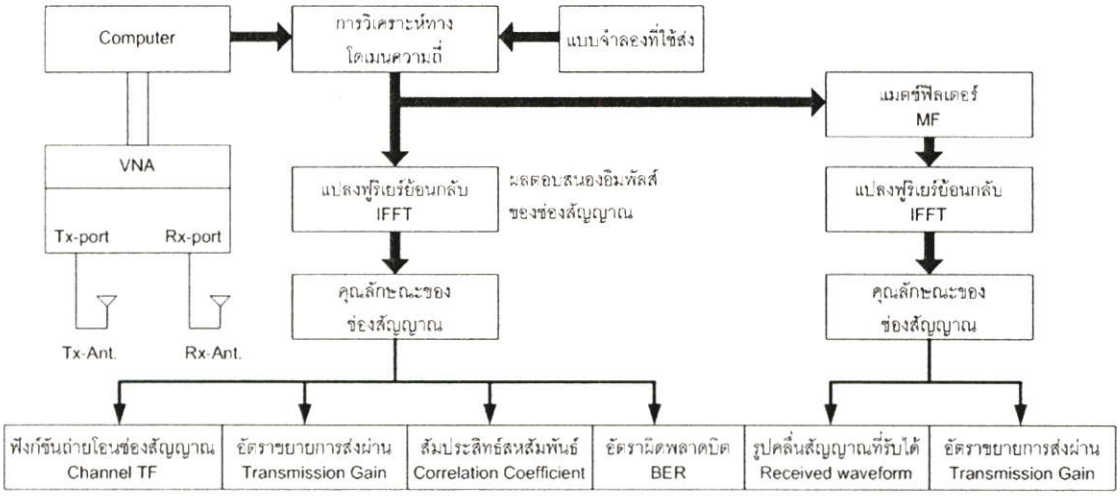
รูปที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแบบกรวยคู่ [8]



รูปที่ 4.4 ขนาดและเฟสของสายอากาศแบบกรวยคู่ [8]

4.3 แบบแผนการวัด

รูปแบบการจำลองการวัดทั้งสองแบบที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นการตรวจสอบถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดขึ้น โดยในการทดลองนี้ต้องการที่จะตรวจสอบถึงผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมภายในอาคารไปยังสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคาร และจากสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคารไปยังสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร โดยมีกระจกหน้าต่างเป็นตัวกลาง ซึ่งสิ่งที่ได้จากการทดลองนั้นคือฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณที่รวมผลของสายอากาศเข้าไปด้วย จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ทราบถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยแสดงในพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณ อัตราขยายการส่งผ่าน ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อัตราผิดพลาดบิต และจากนั้นใช้แมตช์ฟิลเตอร์ที่ภาครับเพื่อทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงที่สุด โดยรูปที่ 4.5 แสดงบล็อคไดอะแกรมการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด

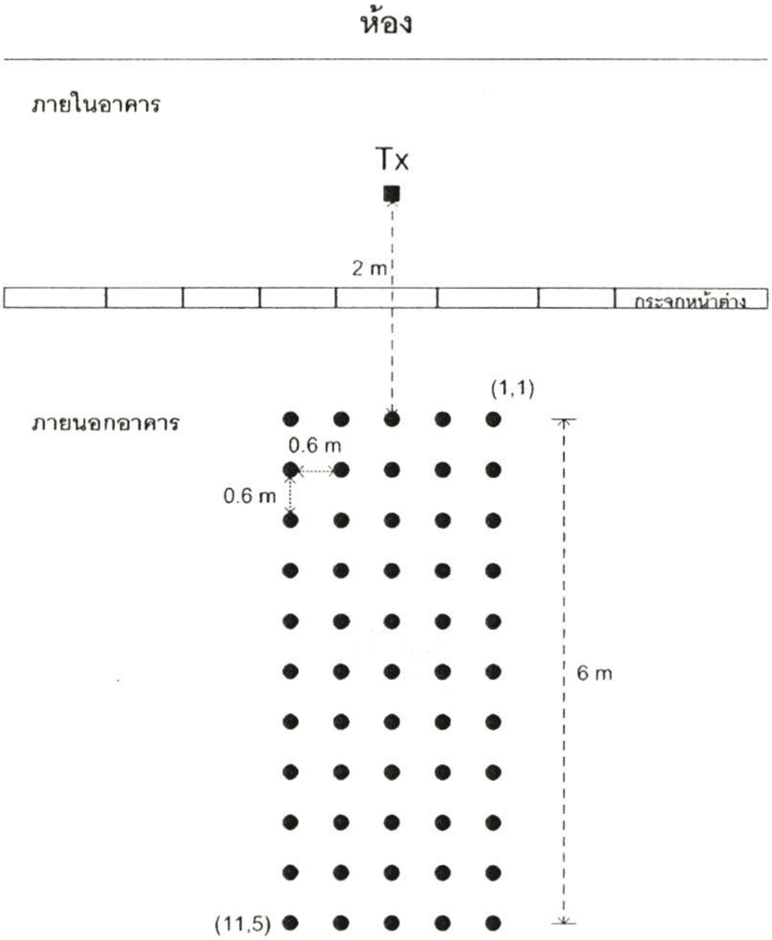


รูปที่ 4.5 บล็อคไดอะแกรมสำหรับการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

4.4 การทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณของแบบจำลองที่ 1

4.4.1 แบบจำลองการวัด

ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ (Channel transfer function) แบบแถบกว้างยิ่งถูกวัดในลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} ในโดเมนของความถี่โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวคเตอร์ ซึ่งต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการวัดและบันทึกผลที่ได้ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป โดยสภาวะแวดล้อมที่ทำการวัดคือสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งในแบบจำลองที่หนึ่งจะเป็นแบบจำลองที่มีการวางสายอากาศด้านส่งอยู่ภายในอาคารและสายอากาศด้านรับอยู่ภายนอกอาคาร ในระยะห่าง 2 เมตร และสายอากาศทั้งสองมีความสูง 2.65 เมตร และส่งสัญญาณผ่านตัวกลางที่เป็นกระจกหน้าต่าง ในการวัดนั้นจะทำการวัดโดยการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศด้านรับไปตำแหน่งละ 0.6 เมตร เพื่อต้องการเก็บข้อมูลการวัดในตำแหน่งต่างๆ เพื่อดูความแตกต่างของช่องสัญญาณที่ระยะทางต่างๆ ซึ่งแบบจำลองที่หนึ่งนี้แสดงดังรูปที่ 4.7 [4]



รูปที่ 4.6 แบบจำลองที่หนึ่ง

4.4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการวัด [4] แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของแบบจำลองที่ 1

พารามิเตอร์	ค่า
ช่วงความถี่	3 GHz ถึง 11 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
ความสูงสายอากาศด้านส่ง	2.65 เมตร
ความสูงสายอากาศด้านรับ	2.65 เมตร
ระยะห่างของสายอากาศด้านส่งและรับ	2 ~ 8 เมตร
ระยะห่างแต่ละจุดของสายอากาศด้านรับ	0.6 เมตร
การวางตัวของสายอากาศ	แนวตั้ง

4.4.3 แบบจำลองของสัญญาณที่ใช้ส่ง

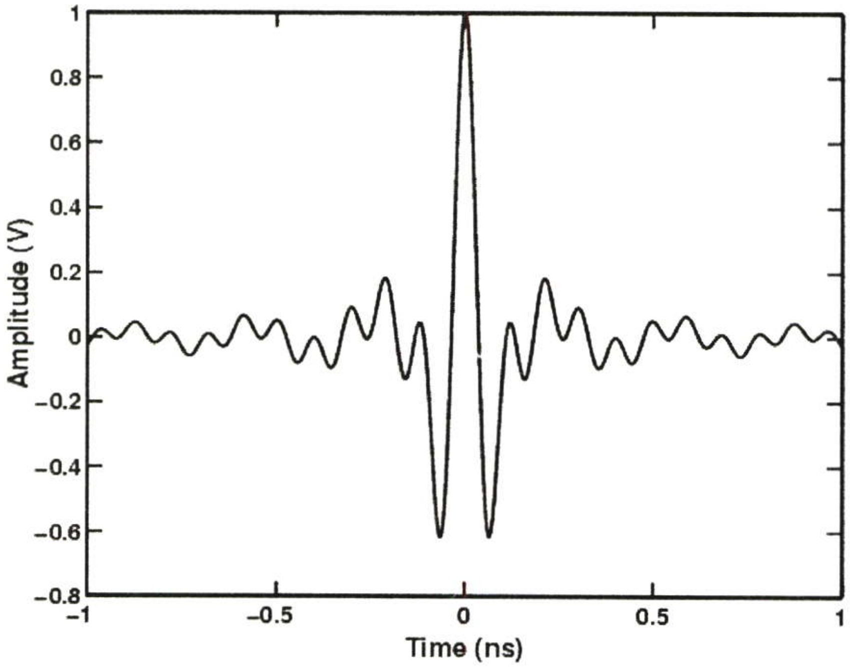
ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นรูปแบบสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่ใช้ในการส่งได้ถูกกำหนดไว้ คือเราจะพิจารณาในส่วนของสัญญาณอิมพัลส์ซึ่งมีความถี่ครอบคลุมตลอดทั้งช่วงที่ FCC กำหนด คือตั้งแต่ 3.1 GHz ~ 10.6 GHz โดยได้ใช้รูปคลื่นแถบบผ่านสี่เหลี่ยม (Rectangular passband pulse) ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของช่องสัญญาณ โดยกำหนดความถี่ต่ำสุด (f_{min}) เท่ากับ 3.1 GHz ความถี่สูงสุด (f_{max}) เท่ากับ 10.6 GHz และสเปกตรัมแบนด์วิดท์ (f_b) เท่ากับ 7.5 GHz โดยสมการของรูปคื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมแสดงดังสมการที่ 4.1 และรูปคลื่นสัญญาณในโดเมนเวลาและขนาดของฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

$$v_t(t) = \frac{1}{f_b}[f_{\max} \sin c(2f_{\max}t) - f_{\min} \sin c(2f_{\min}t)] \qquad (4.1)$$

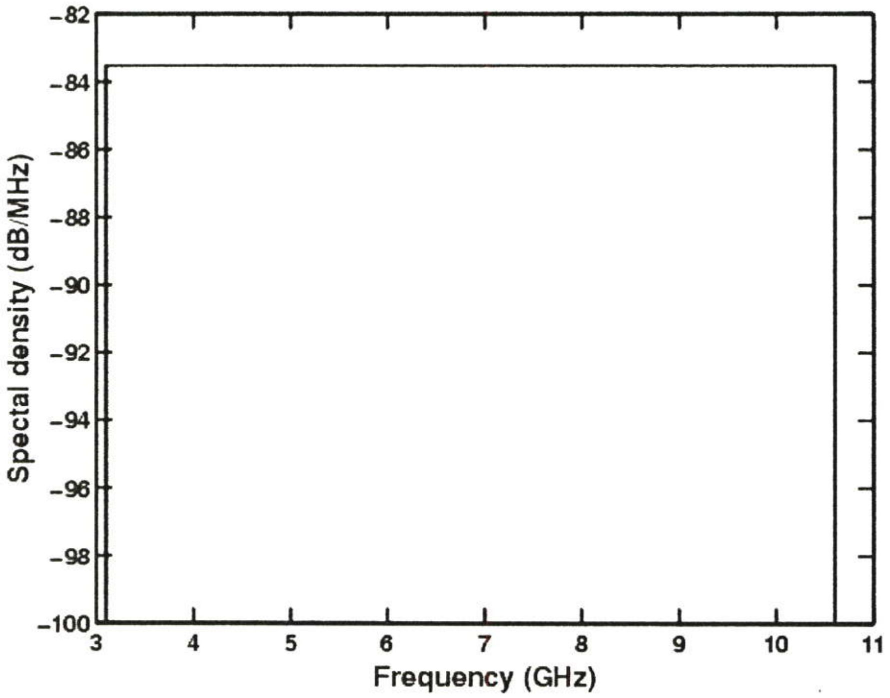
โดยที่ f_{min} = 3.1 GHz คือความถี่ต่ำสุด

f_{max} = 10.6 GHz คือความถี่สูงสุด

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



รูปที่ 4.7 รูปแบบจำลองสัญญาณที่ใช้ส่ง

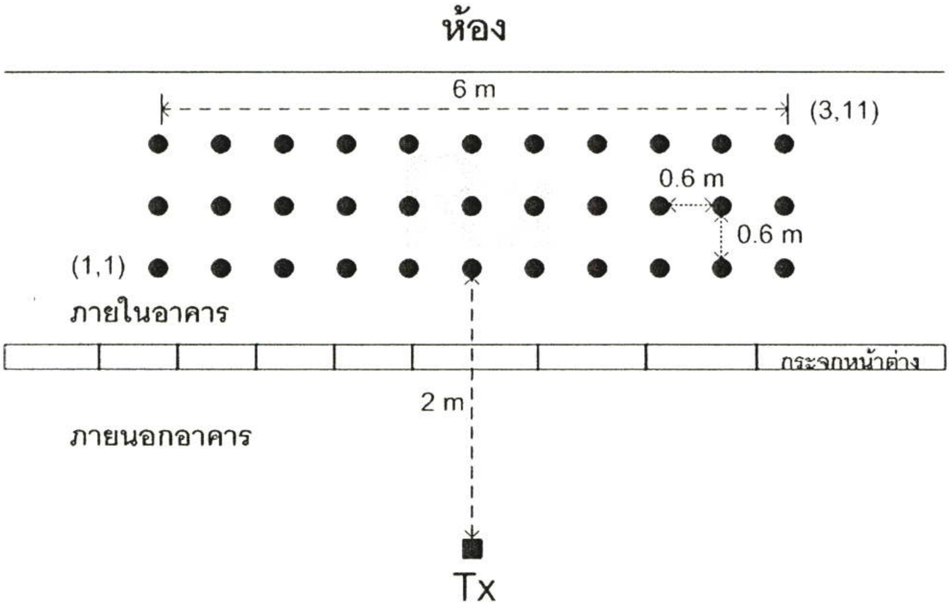


รูปที่ 4.8 ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่ใช้ส่งของแถบกว้างยิ่ง

4.5 การทดสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณของแบบจำลองที่ 2

4.5.1 แบบจำลองการวัด

ในการวัดคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในแบบจำลองที่ 2 นี้ยังคงใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายแบบเวคเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการวัดและใช้สถานที่และแบบจำลองเดียวกับแบบจำลองที่หนึ่ง แต่ทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศ โดยเปลี่ยนให้สายอากาศส่งอยู่ภายนอกอาคารและสายอากาศรับอยู่ภายในอาคารแทน โดยที่ความสูงของสายอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับยังคงเป็น 2.65 เมตร และการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดของสายอากาศด้านรับตำแหน่งละ 0.6 เมตร เหมือนกับแบบจำลองที่หนึ่ง โดยรูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งการวางอุปกรณ์ต่างๆ ของแบบจำลองที่สอง [4]



รูปที่ 4.9 แบบจำลองที่สอง

4.5.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัด

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดของแบบจำลองที่สองนี้จะเหมือนกับแบบจำลองที่หนึ่งทุกประการ ยกเว้นระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับ ซึ่งในแบบจำลองที่สองนี้สายอากาศด้านรับจะอยู่ภายในอาคาร ซึ่งเป็นระเบียงทางเดิน มีความกว้างประมาณ 3 เมตร และการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดจึงมีข้อจำกัดทางสภาวะแวดล้อม จึงทำให้ระยะห่างของทั้งสองแบบจำลองไม่เท่ากัน โดยตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดของแบบจำลองที่สอง

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดของแบบจำลองที่ 2

พารามิเตอร์	**ค่า**
ช่วงความถี่	3 GHz ถึง 11 GHz
จำนวนจุดความถี่	801 จุด
ความสูงสายอากาศด้านส่ง	2.65 เมตร
ความสูงสายอากาศด้านรับ	2.65 เมตร
ระยะห่างของสายอากาศด้านส่งและรับ	**2 ~ 4 เมตร**
ระยะห่างแต่ละจุดของสายอากาศด้านรับ	0.6 เมตร
การวางตัวของสายอากาศ	แนวตั้ง

4.5.3 แบบจำลองสัญญาณที่ใช้ส่ง

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นรูปแบบสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่ใช้ในการส่งจะใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมซึ่งเหมือนกับในแบบจำลองที่หนึ่ง ในหัวข้อที่ 4.4.3 และสมการของรูปแบบสัญญาณส่งนี้แสดงในสมการที่ 4.1

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนในการทดลองวัดช่องสัญญาณในระบบแถบกว้างยิ่งภายในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคารของแบบจำลองสองแบบจำลอง โดยในแบบจำลองทั้งสองมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการวัดของสายอากาศด้านรับเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากตำแหน่งต่างๆในการวางสายอากาศด้านรับด้วย ในการวัดนั้นใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวคเตอร์เป็นอุปหรณ์หลักในการวัดในโดเมนความถี่เพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบต่างๆที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมดังกล่าว โดยใช้สายอากาศแบบกรวยคู่ที่สามารถตอบสนองที่ความถี่ในช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของแถบกว้างยิ่ง เป็นทั้งสายอากาศด้านส่งและด้านรับ และใช้แบบจำลองสัญญาณที่ใช้ส่งเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเพื่อวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณ โดยข้อมูลการวัดที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์และแสดงผลในพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังจะแสดงในบทต่อไป

บทที่ 5
ผลการวิจัยและวิเคราะห์สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง

5.1 กล่าวนำ

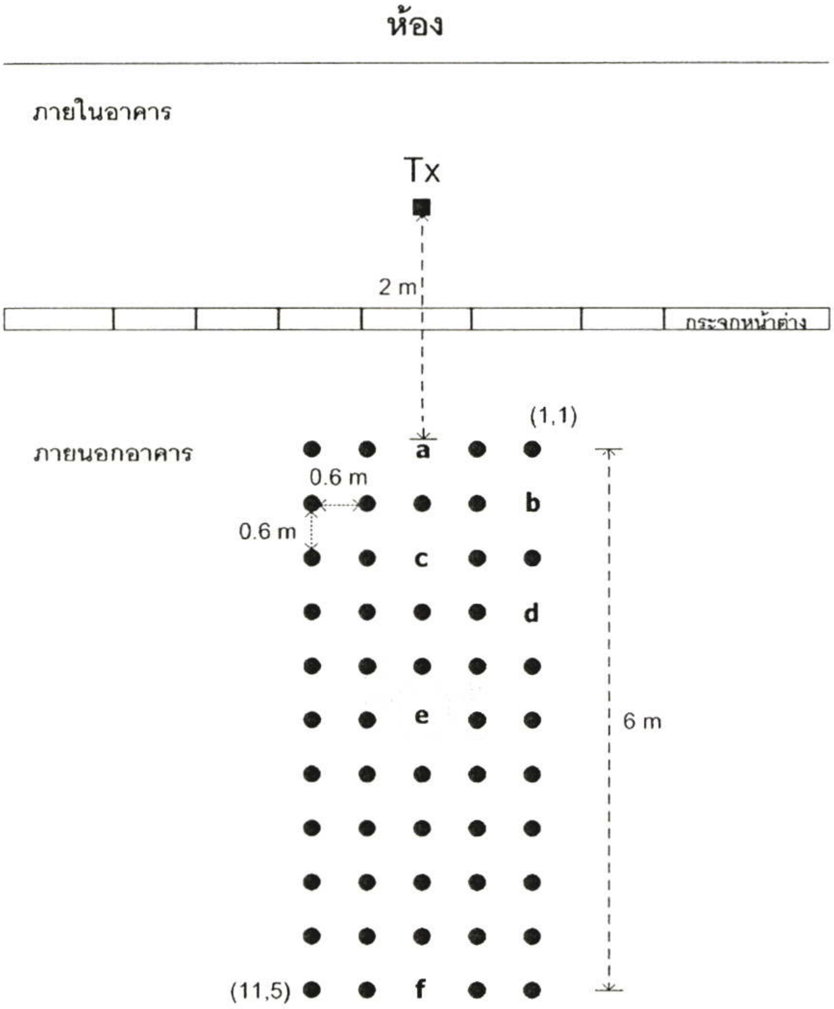
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัดช่องสัญญาณในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในคารและภายนอกอาคารของแบบจำลอง 2 แบบจำลอง ซึ่งทั้งสองแบบจำลองได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 4 จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณ อัตราขยายการส่งผ่าน ค่าความผิดเพี้ยนในรูปของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และอัตราผิดพลาดบิต และจะนำผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลองทั้งสองแบบจำลองมาทำการเปรียบเทียบและปรับปรุงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยการใช้แมตช์ฟิลเตอร์ ซึ่งรายละเอียดของผลการวิเคราะห์จะได้กล่าวในหัวข้อต่อๆ ไป

5.2 ผลการวิเคราะห์

5.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลองที่ 1

ในแบบจำลองที่หนึ่งนี้ได้ทำการวัดในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร โดยทำการวางตำแหน่งของสายอากาศจะกำหนดให้สายอากาศส่งอยู่ภายในอาคารและสายอากาศรับอยู่ภายนอกอาคาร และจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดของสายอากาศด้านรับไปตำแหน่งละ 0.6 เมตร โดยระหว่างสายอากาศส่งและรับจะมีกระจกหน้าต่างกั้นไว้ สายอากาศด้านรับและด้านส่งสูง 2.65 เมตร และสายอากาศทั้งสองเป็นสายอากาศแบบกรวยคู่

โดยค่าพารามิเตอร์บางค่าจะนำเสนอผลการวิเคราะห์ในรูปของกราฟในบางจุดการวัดเท่านั้นและจะแสดงเป็นตารางในทุกๆจุดการวัด เนื่องจากถ้านำมาแสดงเป็นกราฟทุกจุดการวัด จะทำให้ยากต่อการพิจารณา เพราะว่าในแบบจำลองที่หนึ่งนี้ได้ทำการวัดทั้งหมด 55 จุดการวัด [4] โดยที่รูปที่ 5.1 จะแสดงตำแหน่งจุดการวัดที่จะใช้ในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะใช้ในการอ้างอิงตัวเลขตำแหน่งของผลการวิเคระห์ข้อมูล



รูปที่ 5.1 แบบจำลองที่หนึ่งและตำแหน่งที่นำเสนอผลการวิเคราะห์

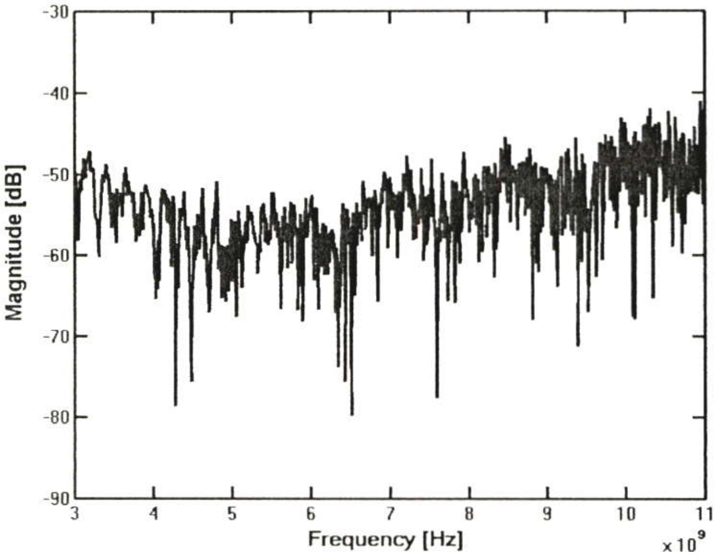
ระยะห่างตำแหน่งแต่ละตำแหน่งจากสายอากาศส่งมายังตำแหน่งต่าง ๆ จะแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ระยะห่างจากสายอากาศส่งมายังตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองที่หนึ่ง

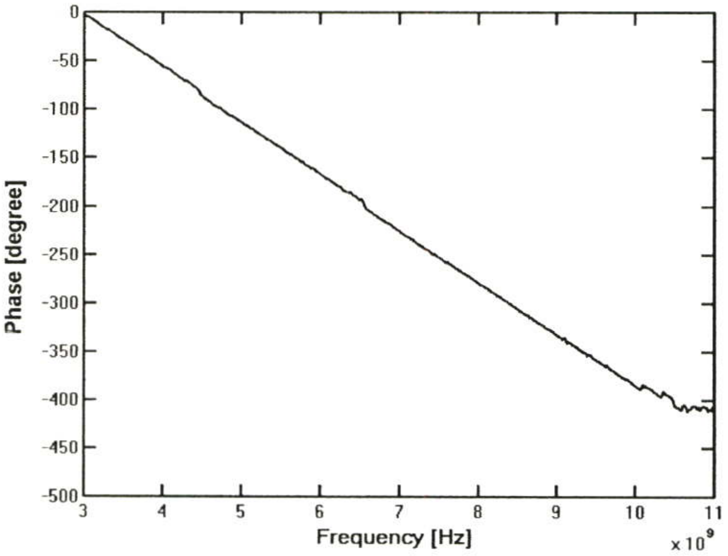
ตำแหน่งที่	ระยะทาง (เมตร)
a	2.00
b	2.86
c	3.20
d	3.99
e	5.00
f	8.00

5.2.1.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่หนึ่งนี้ได้แสดงผลของตำแหน่งที่ a ซึ่งอ้างอิงจากรูปที่ 5.1 คือที่ระยะทาง 2 เมตร โดยในรูปที่ 5.2 แสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณ ซึ่งมีค่าขนาดเฉลี่ยเท่ากับ -51.59 dB และรูปที่ 5.3 แสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ และจะสังเกตุได้ว่าเฟสที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 GHz เริ่มจะไม่เป็นเชิงเส้นอาจเกิดจากสายนำสัญญาณไม่รองรับในช่วงความถี่ที่สูงมากๆ



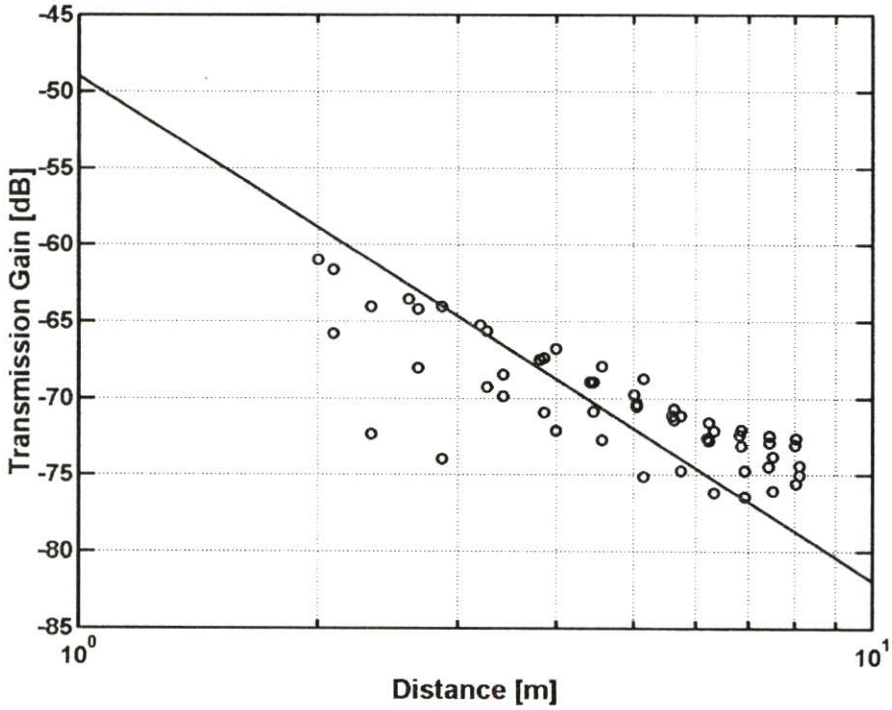
รูปที่ 5.2 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่หนึ่ง



รูปที่ 5.3 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่หนึ่ง

5.2.1.2 อัตราขยายการส่งผ่าน

อัตราขยายการส่งผ่านจำลองโดยใช้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression model) รูปที่ 5.4 แสดงอัตราขยายการส่งผ่านของแบบจำลองที่หนึ่ง และตารางที่ 5.2 แสดงค่าอัตราขยายการส่งผ่านของแต่ละตำแหน่ง จากรูปจะเห็นว่าที่ระยะ 1 เมตร มีค่าอัตราขยายการส่งผ่านอยู่ที่ -48.953 dB และมีค่าเลขยกกำลังการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss exponent) เท่ากับ 3.295 ซึ่งค่าเลขยกกำลังการสูญเสียเชิงวิถีนี้ในอวกาศว่าง (Free space) มีค่าเท่ากับ 2 [15] และเมื่อระยะทางไกลขึ้นค่าอัตราขยายการส่งผ่านจะมีค่าลดลง แต่จะมีบางจุดที่มีอัตราขยายการส่งผ่านน้อยกว่าจุดที่ระยะทางมากกว่า ซึ่งอาจเกิดจากในระยะทางนั้นการส่งผ่านอาจจะผ่านทั้งกระจกและเหล็กบริเวณขอบกระจกด้วย เป็นผลให้อัตราขยายการส่งผ่านในตำแหน่งนั้น ๆ มีค่าต่ำลงมาก



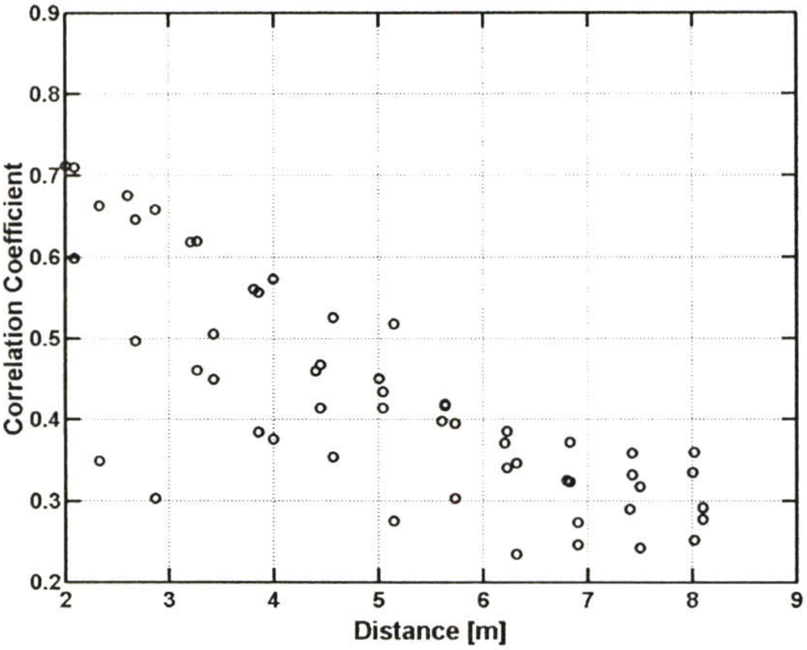
รูปที่ 5.4 อัตราขยายการส่งผ่านของแบบจำลองที่หนึ่ง

ตารางที่ 5.2 ค่าอัตราขยายการส่งผ่านของแต่ละตำแหน่งของแบบจำลองที่หนึ่ง

TG_M1	5	4	3	2	1
1	-64.006	-65.758	-60.966	-61.621	-72.325
2	-64.013	-68.025	-63.509	-64.178	-73.941
3	-68.426	-69.263	-65.218	-65.620	-69.849
4	-72.119	-70.895	-67.454	-67.338	-66.744
5	-72.709	-70.823	-68.938	-68.903	-67.896
6	-75.214	-70.346	-69.737	-70.499	-68.686
7	-74.692	-70.659	-71.124	-71.405	-71.109
8	-76.138	-71.571	-72.580	-72.730	-72.083
9	-74.732	-72.061	-72.393	-73.063	-76.480
10	-76.039	-72.431	-74.428	-72.848	-73.770
11	-75.014	-72.612	-73.026	-76.214	-74.380

5.2.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแถบกว้างยิ่ง จะพิจาณาโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งรูปที่ 5.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองที่หนึ่ง และตารางที่ 5.3 จากรูปจะเห็นว่าที่ระยะ 2 เมตรมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.71211 และจะมีค่าลดลงไปตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น โดยในระยะที่ 8.09 เมตร คือระยะที่ไกลที่สุดของแบบจำลองที่หนึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.29204 และจากกราฟสังเกตได้ว่าในบางตำแหน่งที่ระยะทางเท่ากัน แต่กลับมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ต่างกันมาก อาจเกิดจากแนวการวางสายอากาศด้านรับอยู่ในแนวการส่งผ่านที่มีทั้งกระจกหน้าต่างและโครงเหล็กที่เป็นขอบกระจก จึงทำให้เกิดความผิดพลาดมากกว่า



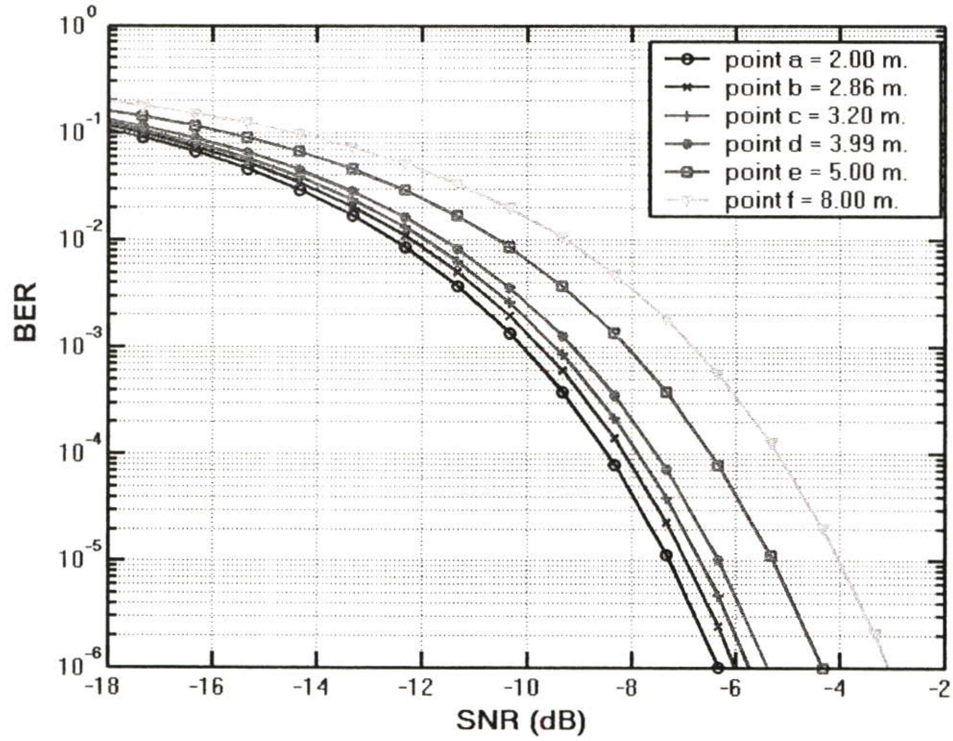
รูปที่ 5.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองที่หนึ่ง

5.2.1.4 อัตราผิดพลาดบิต

ในการวิเคราะห์หาผลของอัตราผิดพลาดบิตในแบบจำลองที่หนึ่งนี้จะนำเสนอผลในบางตำแหน่งที่มีระยะทางเท่ากับหรือใกล้เคียงกับระยะของแบบจำลองที่สองเพื่อจะได้ทำการเปรียบเทียบผลระหว่างสองแบบจำลองนี้ โดยในแบบจำลองที่หนึ่งนี้จะแสดงผลของตำแหน่งที่ a, b, c, d, e และ f โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1 โดยผลของอัตราผิดพลาดบิตของแบบจำลองที่หนึ่งนี้ได้แสดงดังรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าในระยะทางที่ใกล้จะมีอัตราผิดพลาดบิตที่ต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น แต่ก็มีบางตำแหน่งที่มีระยะทางในการวัดเท่ากันแต่กลับมีอัตราผิดพลาดบิตที่ต่างกันมาก อาจเป็นผลมาจากการส่งผ่านที่ผ่านกระจกหน้าต่างและเหล็กที่เป็นขอบกระจก หรืออาจเกิดจากการเกิดคลื่นหลายวิถีทำให้สัญญาณที่รับได้มีค่าต่างกัน ถึงแม้จะอยู่ในตำแหน่งที่มีระยะทางเท่ากันก็ตาม

ตารางที่ 5.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละตำแหน่งของแบบจำลองที่หนึ่ง

CC_M1	5	4	3	2	1
1	0.66408	0.59833	0.71211	0.71073	0.34961
2	0.65909	0.49735	0.67584	0.64603	0.30406
3	0.50650	0.46074	0.61915	0.61963	0.45007
4	0.37599	0.38434	0.56048	0.55659	0.57268
5	0.35457	0.41436	0.46071	0.46808	0.52589
6	0.27638	0.43469	0.45029	0.41480	0.51856
7	0.30359	0.41961	0.39831	0.41768	0.39562
8	0.23444	0.38611	0.37116	0.34122	0.34705
9	0.27383	0.37254	0.32580	0.32381	0.24592
10	0.24208	0.35898	0.29027	0.33255	0.31818
11	0.27814	0.36031	0.33476	0.25228	0.29204

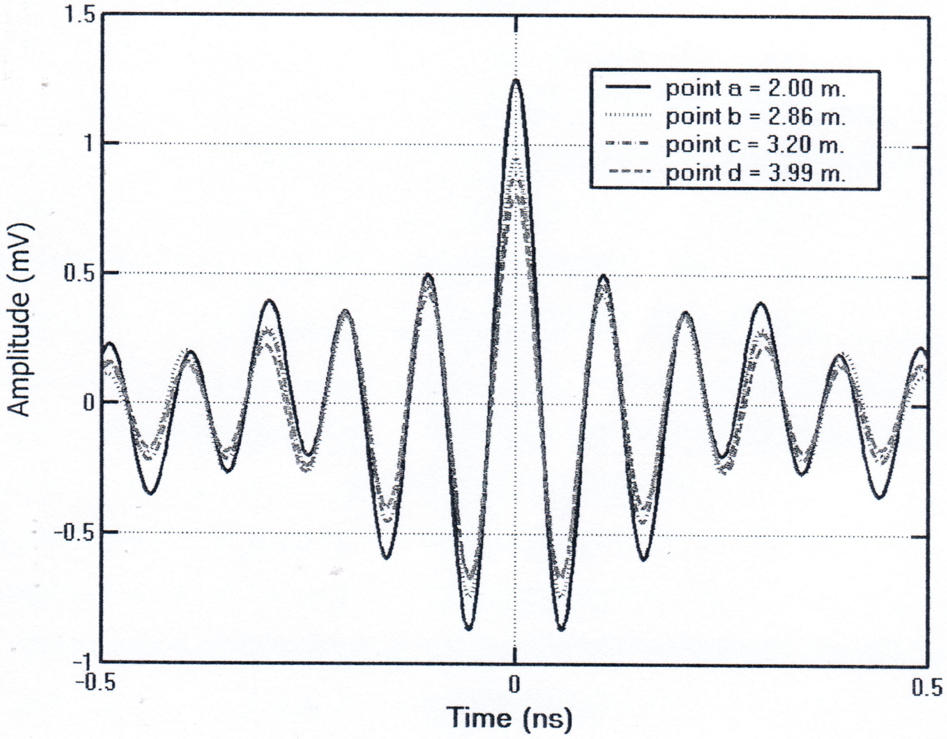


รูปที่ 5.6 อัตราผิดพลาดบิตของแบบจำลองที่หนึ่ง

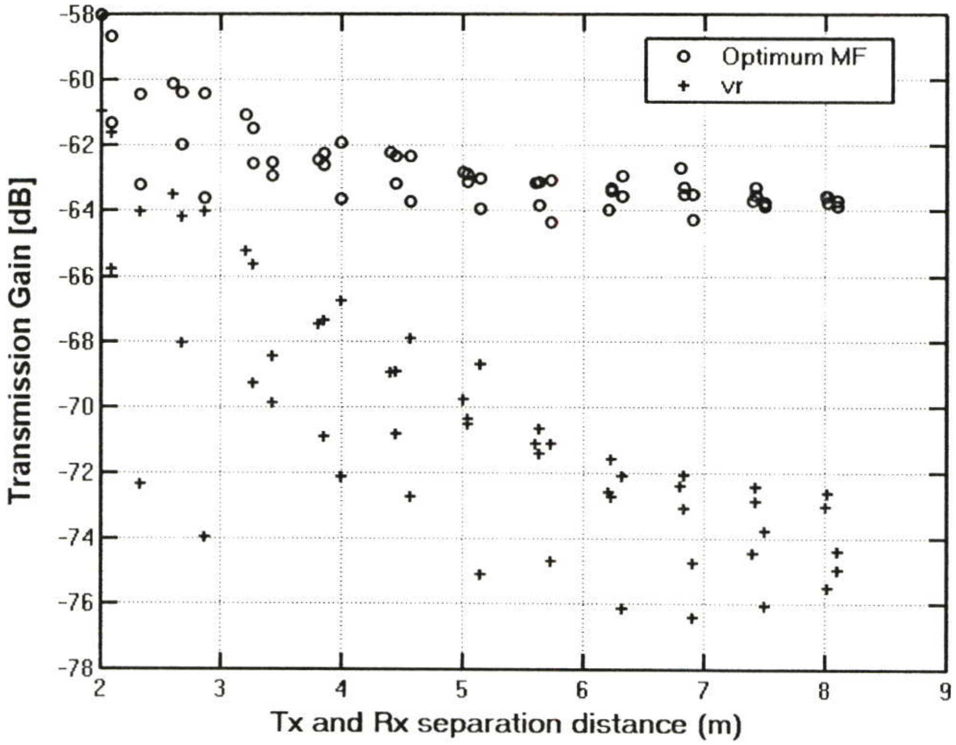
5.2.1.5 **แมตช์ฟิลเตอร์**

จากผลของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าน้อยมากที่ระยะทางมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่มากขึ้น จึงได้มีการทำการปรับปรุงสัญญาณด้านรับให้ดีขึ้น โดยวิธีการต่างๆเช่น การใช้สัญญาณแม่แบบ อีกวิธีก็คือการใช้แมตช์ฟิลเตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาใช้แมตช์ฟิลเตอร์ในการทำให้สัญญาณที่รับได้มีค่าดีที่สุด โดยของสัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านแมตช์ฟิลเตอร์แสดงดังรูปที่ 5.7 โดยในรูปนี้ได้แสดงผลของแอมพลิจูดของสัญญาณเมื่อผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ในตำแหน่งการวัดตำแหน่งที่ a, b, c และ d โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง a ระยะทาง 2 เมตร มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 1.26 mV และมีค่าลดลงเรื่อยๆตามระยะทาง แต่จะมีบางตำแหน่งที่มีระยะทางเท่ากันแต่ก็มีค่าแอมพลิจูดที่ต่างกันมาก

ส่วนรูปที่ 5.8 เป็นการเปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่รับได้ในตอนแรกกับอัตราขยายการส่งผ่านหลังจากใช้แมตช์ฟิลเตอร์



รูปที่ 5.7 แอมพลิจูดของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุตของแมตช์ฟิลเตอร์โดยใช้แมตช์ฟิลเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับแบบจำลองที่หนึ่ง [6]

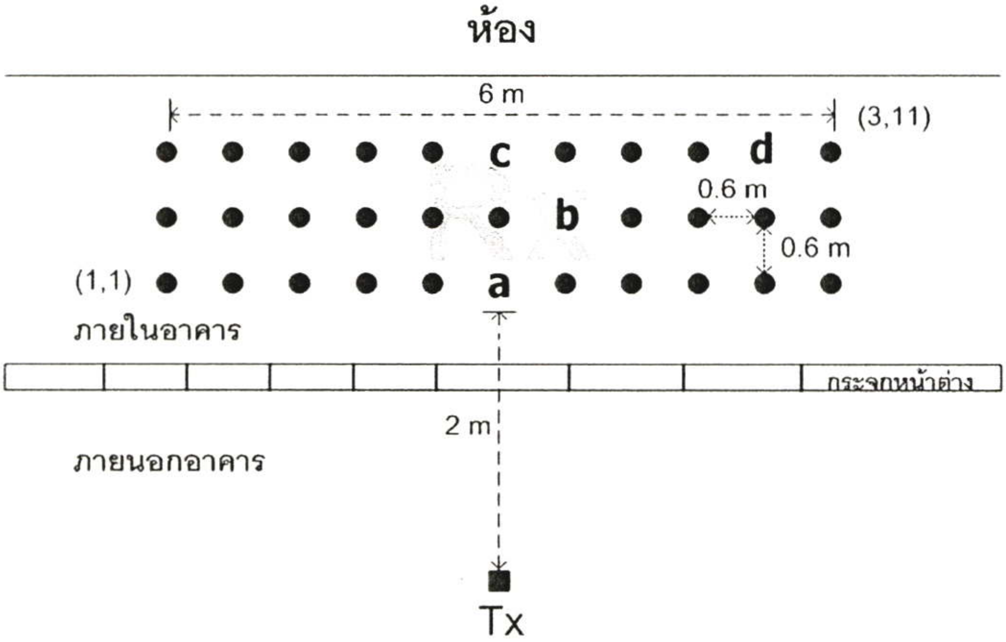


รูปที่ 5.8 อัตราขยายการส่งผ่านเมื่อใช้แมตช์ฟิลเตอร์เปรียบเทียบกับอัตราขยายการส่งผ่านของสัญญาณรับ ในแบบจำลองที่หนึ่ง [6]

5.2.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลองที่ 2

ในแบบจำลองที่สองนี้ยังทำการวัดในสถานที่เดียวกับแบบจำลองที่หนึ่ง และมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดรวมถึงสายอากาศที่ใช้ในการวัดจะเหมือนกับแบบจำลองที่หนึ่ง ที่ต่างจากแบบจำลองที่หนึ่งคือการสลับตำแหน่งของสายอากาศ โดยในแบบจำลองที่สองนี้จะวางสายอากาศด้านส่งอยู่ภายนอกอาคารและสายอากาศด้านรับอยู่ภายในอาคาร

ในการนำเสนอค่าพารามิเตอร์บางค่าก็จะทำการแสดงในบางค่าซึ่งเป็นค่าที่มีระยะทางเท่ากับหรือใกล้เคียงกับระยะทางในแบบจำลองที่หนึ่งเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ โดยตำแหน่งที่จะนำผลมาแสดงอ้างอิงได้จากรูปที่ 5.9 และตารางที่ 5.4



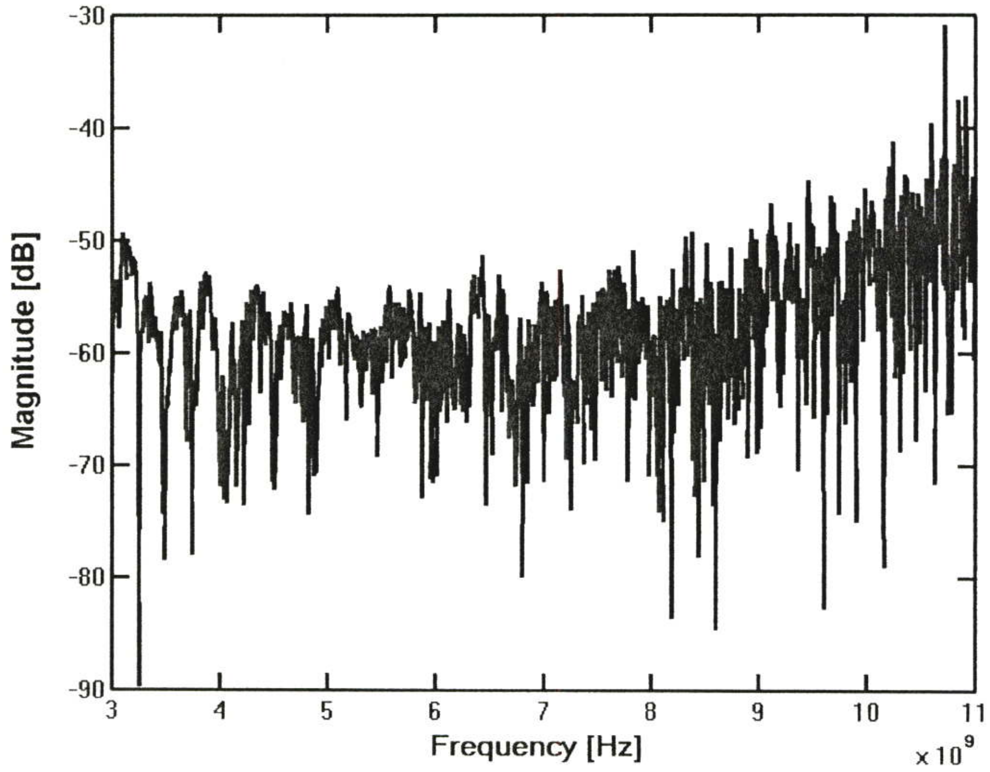
รูปที่ 5.9 แบบจำลองที่สองและตำแหน่งที่นำเสนอผลการวิเคราะห์

ตารางที่ 5.4 ระยะห่างจากสายอากาศส่งมายังตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองที่สอง

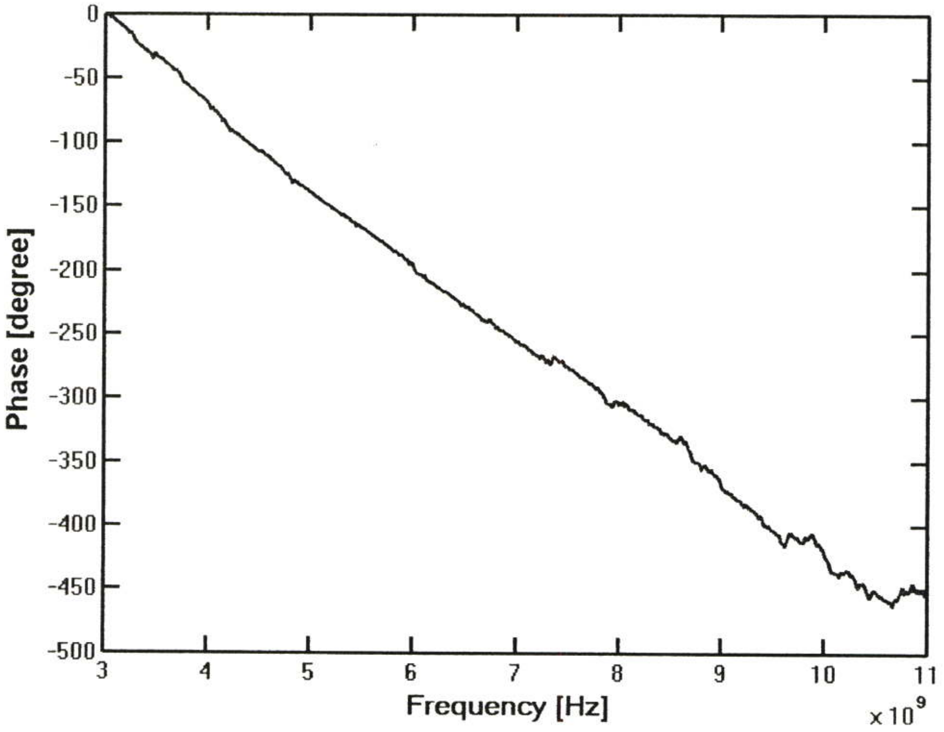
ตำแหน่งที่	ระยะทาง (เมตร)
a	2.00
b	2.86
c	3.20
d	4.00

5.2.2.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่สองนี้ได้แสดงผลของตำแหน่งที่ a ซึ่งอ้างอิงจากรูปที่ 5.9 คือที่ระยะทาง 2 เมตร โดยในรูปที่ 5.10 แสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณ ซึ่งมีค่าขนาดเฉลี่ยเท่ากับ -52.63 dB และรูปที่ 5.11 แสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ



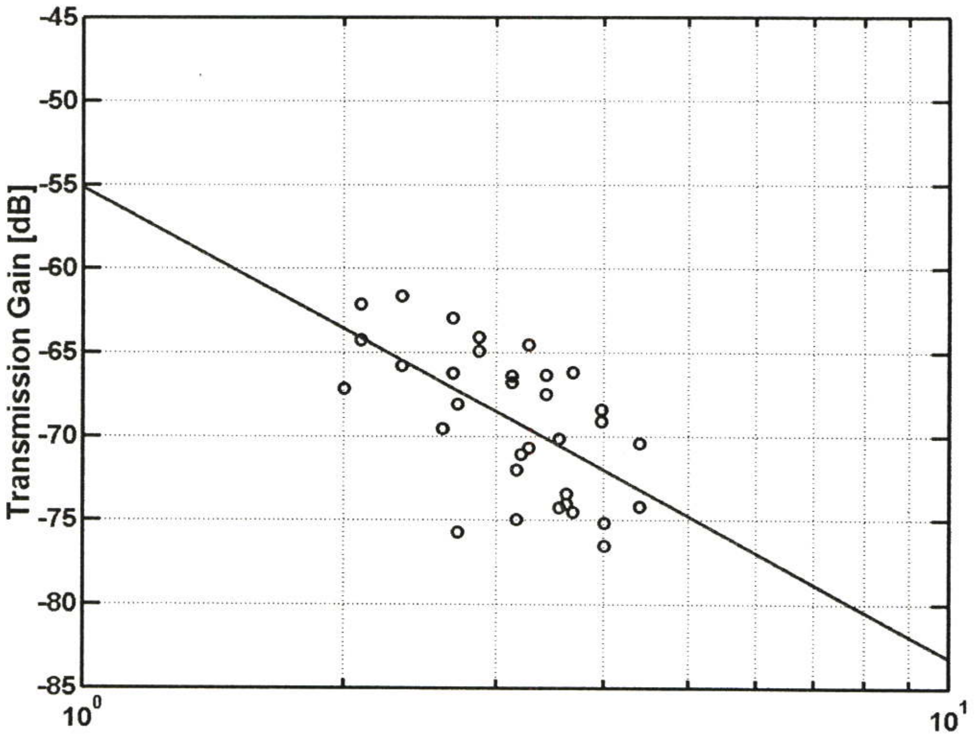
รูปที่ 5.10 ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่สอง



รูปที่ 5.11 เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่สอง

5.2.2.2 อัตราขยายการส่งผ่าน

อัตราขยายการส่งผ่านจำลองโดยใช้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression model) รูปที่ 5.12 แสดงอัตราขยายการส่งผ่านของแบบจำลองที่สอง และตารางที่ 5.5 แสดงค่าอัตราขยายการส่งผ่านของแต่ละตำแหน่ง จากรูปจะเห็นว่าที่ระยะ 1 เมตร มีค่าอัตราขยายการส่งผ่านอยู่ที่ -55.155 dB และมีค่าเลขยกกำลังการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss exponent) เท่ากับ 2.805 ซึ่งค่าเลขยกกำลังการสูญเสียเชิงวิถีนี้ในอวกาศว่าง (Free space) มีค่าเท่ากับ 2 [15] และเมื่อระยะทางไกลขึ้นค่าอัตราขยายการส่งผ่านจะมีค่าลดลง แต่จะมีบางจุดที่มีอัตราขยายการส่งผ่านน้อยกว่าจุดที่ระยะทางมากกว่า ซึ่งอาจเกิดจากในระยะทางนั้นการส่งผ่านอาจจะผ่านทั้งกระจกและเหล็กบริเวณขอบกระจกด้วย เป็นผลให้อัตราขยายการส่งผ่านในตำแหน่งนั้น ๆ มีค่าต่ำลงมาก



รูปที่ 5.12 อัตราขยายการส่งผ่านของแบบจำลองที่สอง

ตารางที่ 5.5 ค่าอัตราขยายการส่งผ่านของแต่ละตำแหน่งของแบบจำลองที่สอง

TG_M2	1	2	3
1	-73.404	-69.104	-74.156
2	-66.349	-74.197	-75.148
3	-75.722	-71.982	-66.146
4	-61.601	-64.894	-66.290
5	-64.252	-66.217	-70.687
6	-67.136	-69.520	-71.036
7	-62.125	-62.912	-64.485
8	-65.787	-64.050	-67.461
9	-68.053	-74.921	-74.493
10	-66.756	-70.108	-76.493
11	-74.047	-68.394	-70.408

5.2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแถบกว้างยิ่งในแบบจำลองที่สองนี้ก็จะพิจาณาโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เช่นกัน ซึ่งรูปที่ 5.13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองที่หนึ่ง และตารางที่ 5.6 จากรูปจะเห็นว่าที่ระยะ 2 เมตรมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.4767 ซึ่งที่ระยะ 2 เมตร ในแบบจำลองที่หนึ่งนั้นมีค่าสูงถึง 0.71211 และจากกราฟสังเกตได้ว่าในบางตำแหน่งที่ระยะทางเท่ากัน แต่กลับมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ต่างกันมาก อาจเกิดจากแนวการวางสายอากาศด้านรับอยู่ในแนวการส่งผ่านที่มีทั้งกระจกหน้าต่างและโครงเหล็กที่เป็นขอบกระจก จึงทำให้เกิดความผิดพลาดมากกว่า และในแบบจำลองที่สองนี้เนื่องจากสายอากาศด้านรับอยู่ภายในอาคารทำให้เกิดการสะท้อนของจากวัสดุต่างๆ หรือผนังได้มากกว่า

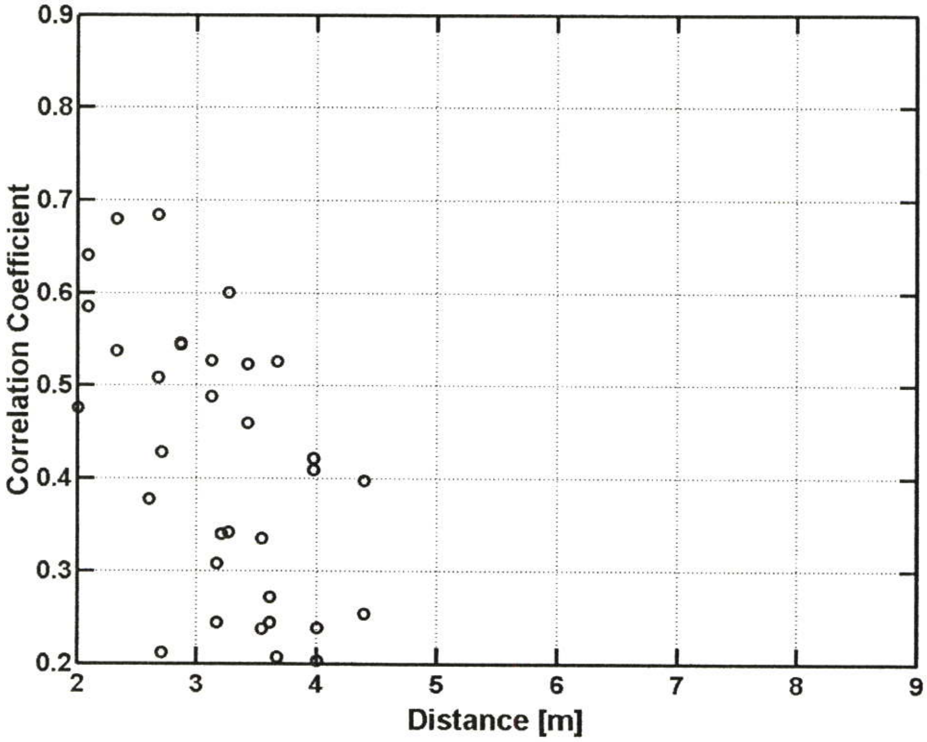
5.2.2.4 อัตราผิดพลาดบิต

ในการวิเคราะห์หาผลของอัตราผิดพลาดบิตในแบบจำลองที่สองนี้จะนำเสนอผลในตำแหน่งที่มีระยะทางเท่ากับหรือใกล้เคียงกับระยะของแบบจำลองที่หนึ่งเพื่อจะได้ทำการเปรียบเทียบผลระหว่างสองแบบจำลองนี้ โดยในแบบจำลองที่สองนี้จะแสดงผลของตำแหน่งที่ a, b , c และ d โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.8 และตารางที่ 5.4 โดยผลของอัตราผิดพลาดบิตของแบบจำลองที่สองนี้ได้แสดงดังรูปที่ 5.14 จะเห็นได้ว่าในระยะทางที่ใกล้จะมีอัตราผิดพลาดบิตที่ต่ำ และจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น แต่ก็มีบางตำแหน่งที่มีระยะทางในการวัดเท่ากันแต่กลับมีอัตรา

ผิดพลาดบิตที่ต่างกันมาก อาจเป็นผลมาจากการส่งผ่านที่ผ่านกระจกหน้าต่างและเหล็กที่เป็นขอบกระจก หรืออาจเกิดจากการเกิดคลื่นหลายวิถีทำให้สัญญาณที่รับได้มีค่าต่างกัน ถึงแม้จะอยู่ในตำแหน่งที่มีระยะทางเท่ากันก็ตาม

5.2.2.5 แมตช์ฟิลเตอร์

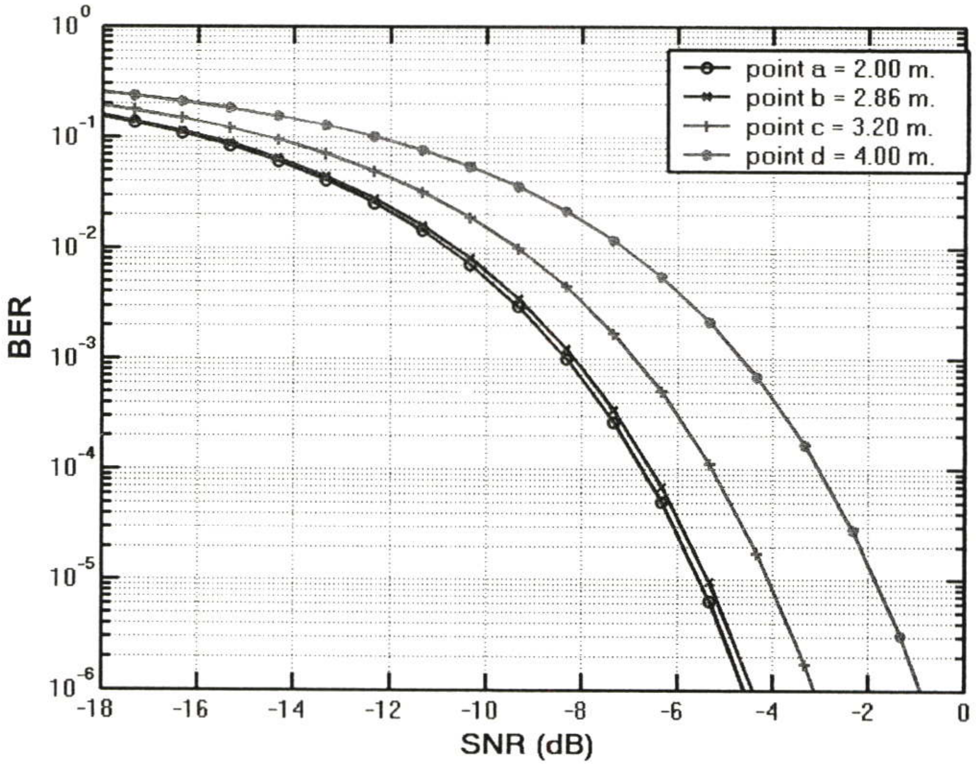
ในแบบจำลองที่สองนี้การปรับปรุงสัญญาณที่รับได้ก็จะใช้วิธีแมตช์ฟิลเตอร์เหมือนกับแบบจำลองที่หนึ่ง โดยผลที่นำมาแสดงจะเป็นผลของตำแหน่งการวัดตำแหน่งที่ a, b, c และ d อ้างอิงได้จากรูปที่ 5.9 และตารางที่ 5.4 ซึ่งผลของแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.15 จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง a ระยะทาง 2 เมตร มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 0.9218 mV และมีค่าลดลงเรื่อยๆตามระยะทาง แต่จะมีบางตำแหน่งที่มีระยะทางเท่ากันแต่ก็มีค่าแอมพลิจูดที่ต่างกันมาก ส่วนรูปที่ 5.16 เป็นการเปรียบเทียบอัตราขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่รับได้ในตอนแรกกับอัตราขยายการส่งผ่านหลังจากใช้แมตช์ฟิลเตอร์



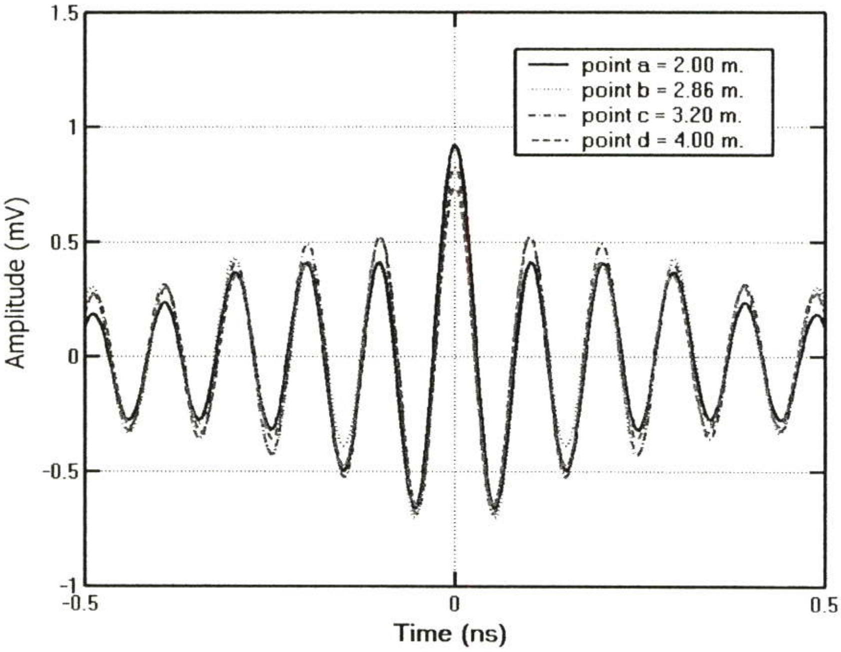
รูปที่ 5.13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองที่สอง

ตารางที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละตำแหน่งของแบบจำลองที่สอง

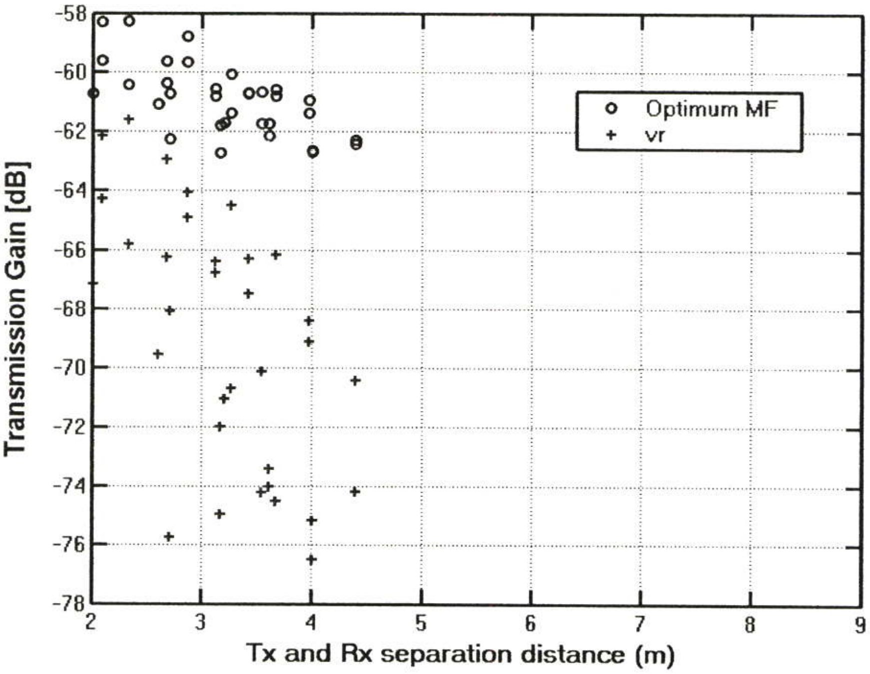
CC_M2	1	2	3
1	0.27201	0.40990	0.25350
2	0.52748	0.23780	0.23840
3	0.21197	0.30867	0.52586
4	0.67951	0.54660	0.52372
5	0.58492	0.50865	0.34234
6	0.47674	0.37839	0.34102
7	0.64106	0.68479	0.60059
8	0.53762	0.45770	0.46028
9	0.42889	0.24461	0.20730
10	0.48845	0.33652	0.20363
11	0.24394	0.42186	0.39816



รูปที่ 5.14 อัตราผิดพลาดบิตของแบบจำลองที่สอง



รูปที่ 5.15 แอมพลิจูดของรูปคลื่นสัญญาณที่เอาท์พุตของแมตช์ฟิลเตอร์โดยใช้แมตช์ฟิลเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับแบบจำลองที่หนึ่ง [6]



รูปที่ 5.16 อัตราขยายการส่งผ่านเมื่อใช้แมตช์ฟิลเตอร์เปรียบเทียบกับอัตราขยายการส่งผ่านของสัญญาณรับ ในแบบจำลองที่สอง [6]

5.3 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลองในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคารของทั้งสองแบบจำลอง โดยได้แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ อัตราขยายการส่งผ่าน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อัตราผิดพลาดบิต และผลของแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ ซึ่งบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งที่เกิดจากผลกระทบของสภาวะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคาร โดยอาศัยพื้นฐานของการวัดค่าจริง ในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคาร ซึ่งได้ทำการวัดและทดสอบที่อาคารเรียน 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยที่สภาวะแวดล้อมภายนอกอาคารจะเป็นบริเวณลานจอดรถที่ชั้นหนึ่งของอาคารเรียน 12 ชั้น และภายในอาคารจะเป็นระเบียงทางเดินยาวภายในตึก ซึ่งได้จำลองการวัดออกเป็นสองแบบจำลองคือ แบบจำลองที่หนึ่งจะวางสายอากาศด้านส่งอยู่ภายในอาคารและสายอากาศด้านรับอยูนอกอาคาร ส่วนแบบจำลองที่สองวางสายอากาศด้านส่งไว้นอกอาคารและสายอากาศด้านรับภายในอาคาร ซึ่งแบบจำลองทั้งสองได้แสดงให้เห็นในบทที่ 4 ส่วนผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในบทที่ผ่านมา และในบทนี้จะทำการสรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของทั้งสองแบบจำลอง

6.2 การวิเคราะห์ช่องสัญญาณของแบบจำลองที่ 1 เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ 2

ผลการวิเคราะห์ช่องสัญญาณของแบบจำลองที่หนึ่งและแบบจำลองที่สองได้ทำการตรวจสอบช่องสัญญาณ โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณ ค่าอัตราขยายการส่งผ่าน ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อัตราผิดพลาดบิต โดยผลการวิเคราะห์ของทั้งสองแบบจำลองสามารถสรุปผลและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

ฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่หนึ่งมีค่าขนาดเฉลี่ยเท่ากับ -51.59 dB ที่ระยะ 2 เมตร ส่วนฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่สองนั้นมีค่าขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ -52.63 dB ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่การจางหาย (Fading) ของสัญญาณในแบบจำลองที่สองจะมีมากกว่าแบบจำลองที่หนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ในแบบจำลองที่สองนั้นได้วางสายอากาศด้านรับอยู่ภายในอาคาร เป็นผลทำให้เกิดการสะท้อนจากผนังหรือวัสดุอื่นๆ ได้มากกว่าแบบจำลองที่หนึ่ง

อัตราขยายการส่งผ่านและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของทั้งสองแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างระหว่างสายอากาศ โดยจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะมีบางตำแหน่งการวัดที่ไม่เป็นไปตามที่กล่าวข้างต้น คือที่ระยะใกล้กว่าอาจจะมีค่าอัตราขยายการส่งผ่านและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่น้อยกว่าในระยะที่อยู่ไกลกว่า อาจเป็นผลมาจากการวางตำแหน่งของสายอากาศด้านรับในตำแหน่งนั้น เกิดการส่งผ่านทั้งกระจกหน้าต่างและโครงเหล็กที่เป็นขอบของกระจกหน้าต่าง จึงมีผลทำให้กำลังงานของสัญญาณมีค่าลดลงมากกว่า

ตำแหน่งอื่น และจะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่หนึ่งนั้น ทั้งค่าอัตราขยายการส่งผ่านและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่ามากกว่าในแบบจำลองที่สอง ซึ่งเป็นสืบเนื่องมากจากฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของแบบจำลองที่สองที่มีผลของการสะท้อนมากกว่าแบบจำลองที่หนึ่งทำให้กำลังงานของสัญญาณลดลง จึงมีผลทำให้อัตราขยายการส่งผ่านและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ลดลงไปด้วย

ค่าอัตราผิดพลาดบิตของทั้งสองแบบจำลองมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่ามากขึ้น กล่าวคือเมื่อระยะทางมากขึ้นทำให้เกิดบิตข้อมูลที่ผิดพลาดมากขึ้น แต่จะมีบางตำแหน่งการวัดที่มีค่าแตกต่างจากข้างต้น มีบางตำแหน่งการวัดที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศใกล้กว่าแต่ว่ามีบิตข้อมูลที่ผิดพลาดมากกว่า และในผลการวิเคราะห์ได้แสดงให้เห็นผลของอัตราผิดพลาดบิตที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศของทั้งสองแบบจำลองมีค่าเท่ากัน จะเห็นว่าอัตราผิดพลาดบิตในแบบจำลองที่สองจะมีค่ามากกว่าแบบจำลองที่หนึ่ง เป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่าน้อยกว่า ซึ่งในการคำนวณหาอัตราผิดพลาดบิตจะนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไปคำนวณด้วย เมื่อสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองที่สองมีค่าน้อยกว่าจึงทำให้อัตราผิดพลาดบิตน้อยไปด้วย ส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราขยายการส่งผ่านได้โดยการใช้แมตช์ฟิลเตอร์ที่ดีที่สุดที่ภาครับ โดยจะเห็นว่าทั้งสองแบบจำลองมีค่าอัตราขยายการส่งผ่านและค่าแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้น

จากผลการศึกษาวิจัยในการทดลองวัดการแพร่กระจายของสัญญาณแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคารนี้ ทำให้เราได้ทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และผลกระทบที่มีต่อระบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมดังกล่าว โดยหลักการและวิธีการวิเคราะห์ที่ได้เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบและหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบการสื่อสารไร้สายแถบกว้างยิ่งต่อไปในอนาคต

6.3 ข้อเสนอแนะ

จากแนวคิดที่ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งในสภาวะแวดล้อมระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคารนั้น พบว่าสภาพของห้องที่อยู่ภายในอาคารและวัสดุที่เป็นตัวกลางระหว่างสายอากาศทั้งสองซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เป็นกระจกหน้าต่างซึ่งมีขอบเป็นเหล็ก มีผลต่อคุณลักษณะของช่องสัญญาณจึงเห็นว่าควรจะลองทำการวัดในแบบจำลองที่มีสภาวะแวดล้อมภายในอาคารเป็นห้องที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และเปลี่ยนวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างและผลที่เกิดขึ้น ส่วนช่องสัญญาณที่ได้จากการวัดนั้นถูกรวมเข้ากับผลของคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งเมื่อทำการเปลี่ยนสายอากาศเป็นชนิดอื่นๆ ค่าของช่องสัญญาณก็จะเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติของสายอากาศนั้นๆ ผู้เขียนเห็นว่าควรจะทำการแยกผลของคุณสมบัติของ

สายอากาศออกจากผลของช่องสัญญาณด้วยเทคนิควิธีการใดวิธีการหนึ่ง ซึ่งจะทำให้สามารถนำผลของช่องสัญญาณนั้นไปใช้ในการวิเคราะห์หาผลในกรณีอื่นๆ ได้อีกในโอกาสต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] K. Siwiak, "**Ultra-Wide Radio : Introducing a New Technology**," *2001 Spring IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC),* Plenary session, pp. 1088-1093, May 2001.

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

[3] K. Siwiak, "**Impact of Ultra Wide Band Transmission on A Generic Receiver**," *2001 Spring IEEE Veh. Tech.Conf. (VTC),* pp. 1181-1183, May 2001.

[4] Y. Tiyawornan, S. Promwong, P. Supanakoon, N. Sukutamtanti, R. Muanghlua, "**Experimental Study of Indoor/Outdoor Propagation Loss for Ultra Wideband impulse Radio System**," *ECTI-CON 2006*, pp. 650-653, May 2006.

[5] Yoottana Tiyaworanan, Sathaporn Promwong, and Pichaya Supanakoon, "**Characterization of Transmission Loss with Indoor and Outdoor in UWB Impulse Radio Systems**," *ISCIT2006*, pp. F3F-1, October 2006.

[6] Y. Tiyawornan, S. Promwong, P. Supanakoon, R. Muanghlua, A. Ruangphanit, "**Outdoor Propagation Loss for Ultra Wideband Impulse Radio System**," ITC-CSCC2006, pp. 253-256, July 2006.

[7] FCC, "**Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems**," FCC 02–48, Apr. 2002.

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

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

[10] Faranak Nekoogar, **Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications**, United States of America: Prentice-Hall PTR, Aug. 2005

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

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

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

[14] Ralph S. Carson, **High-Frequency Amplifiers Second edition,** New york : John Wiley & Sons Ltd. 1982.

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

[16] Apichit Pradabphon, Monchai Chamchoy, Pichaya Supanakoon, Sathaporn Promwong and Jun-ichi Takada. "**The Impacts of Body Shadowing on UWB Propagation in an Indoor Environment**" Electrical Engineering Conference. 27^{th}, vol.2, Sep. 2004. pp. 461-464.

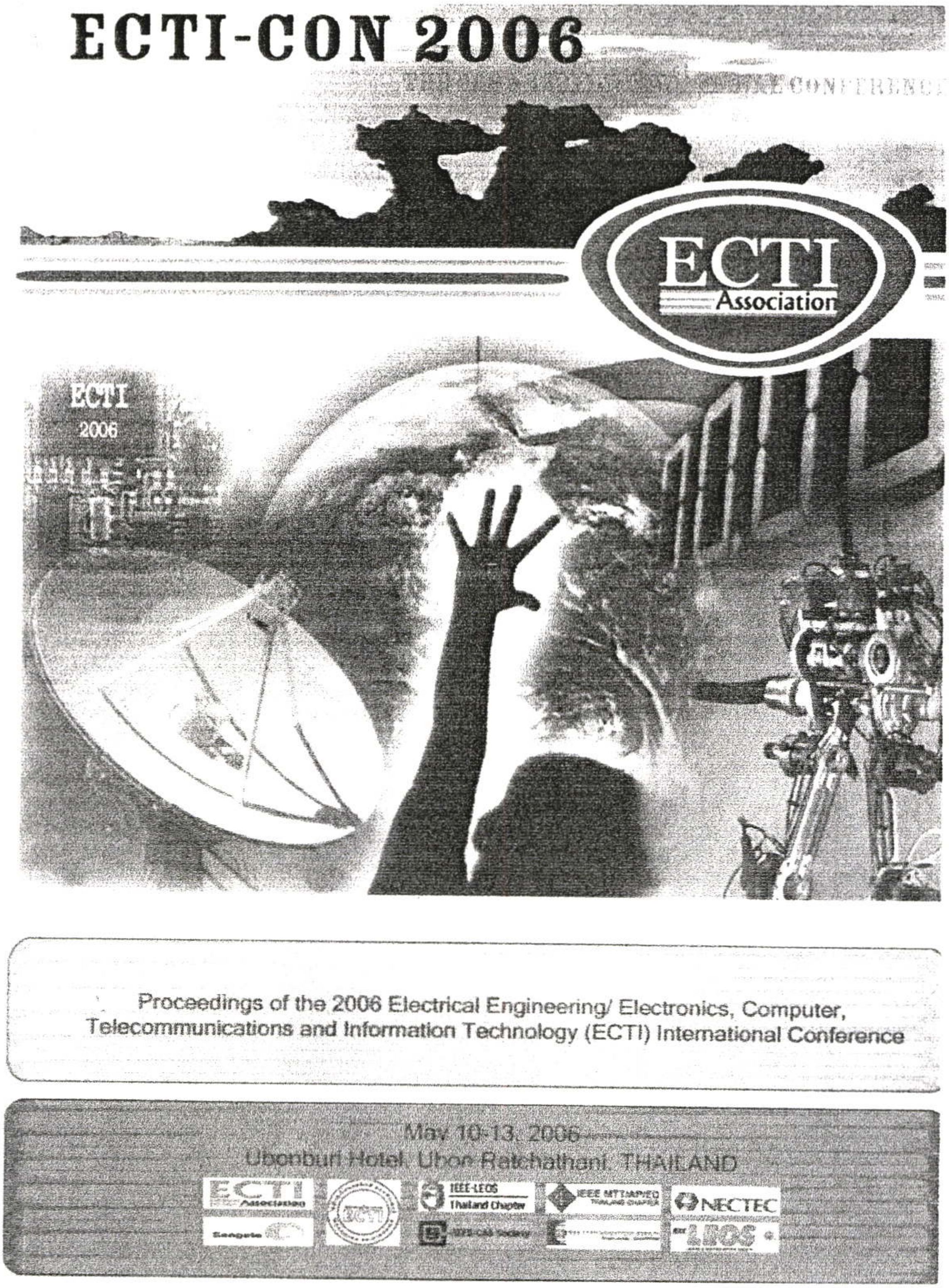
ภาคผนวก ก

บทความวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์

[1] Yoottana Tiyawornan, Sathaporn Promwong, Pichaya Supanakoon, Nikorn Sukutamtanti, Rangsan Muanghlua, "Experimental Study of Indoor/Outdoor Propagation Loss for Ultra Wideband impulse Radio System," ECTI-CON 2006, pp. 650-653, May 2006.

[2] Yoottana Tiyawornan, Sathaporn Promwong, Pichaya Supanakoon, Rangsan Muanghlua, Anake Ruangphanit, "Outdoor Propagation Loss for Ultra Wideband Impulse Radio System," ITC-CSCC2006, pp. 253-256, July 2006.

[3] Yoottana Tiyaworanan, Sathaporn Promwong, and Pichaya Supanakoon, "Characterization of Transmission Loss with Indoor and Outdoor in UWB Impulse Radio Systems," ISCIT2006, pp. F3F-1, October 2006.


ECTI-CON 2006
ECTI Association
ECTI
2006
Proceedings of the 2006 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference
May 10-13, 2006
Ubonburi Hotel, Ubon Ratchathani, THAILAND
ECTI Association
IEEE-LEOS Thailand Chapter
IEEE MTT/AP/ED
NECTEC
LEOS

Experimental Study of Indoor/Outdoor Propagation Loss for Ultra Wideband impulse Radio System

Y. Tiyaworanan, S. Promwong, P. Supanakoon, N. Sukutamtanti, R. Muanghlua

Department of Information Engineering, Faculty of engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
E-mail:{s8061010, kpsathap, kspichay}@kmitl.ac.th

ABSTRACT

In this paper, the indoor/outdoor propagation loss for ultra wideband (UWB) impulse radio system is study based on experiment results. Biconical antennas are used for transmitter and receiver antennas. The frequency transfer functions of the radio channels are measured by using a vector network analyzer (VNA) over the frequency from 3~11 GHz. The measurement perform between the corridor (indoor) and parking area (outdoor) environments. The magnitudes and phases of channel transfer function are shown. The transmission gain and correlation coefficient are demonstrated. The results are discussed in the paper.

1. INTRODUCTION

Ultra Wideband (UWB) technology have attracted a great deal of attention because of UWB systems are wide bandwidth, low power, low cost, high data rates, precise positioning capability and extremely low interference. The UWB systems have been allowed to operate across a range 3.1~10.6 GHz of frequency bands defined by Federal Communications Commission (FCC) [1] with negligible interference to existing systems in that band.

The UWB is expect to be used mainly in wireless personal area network and home network. In any application for UWB radio systems may be apply to use in an indoor/outdoor environments. In case of transmitter antenna in an indoor environment and receiver antenna outdoor environment, or change roles of transmitter antenna and receiver antenna.

This paper, we discuss the transmission gain and the channel transfer function of 2 models measurement in an indoor/outdoor environments pass through the pane of glass, which the biconical antennas are used for transmitter and receiver antennas. The frequency transfer functions of the radio channels are measured by using a vector network analyzer (VNA) over the frequency from 3.1~10.6 GHz. The measurement perform between the corridor (indoor) and parking area (outdoor) environments. The first model a transmitter antenna is place on an indoor environment and receiver antenna is place on outdoor environment. Second model a transmitter antenna place on an outdoor environment and receiver antenna place on an outdoor environment.

2. MEASUREMENT SYSTEM

2.1 Measurement scheme

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

2.2 Measurement setup

The vector network analyzer was operated in the response measurement mode from 3 to 11 GHz, where port-1 was used as the transmitter port and port-2 was used as the receiver port, respectively. Both Tx and Rx antennas were fixed at the height of 2.65 m. We have chosen the biconical antenna for Tx and Rx antennas.

In this experiment we measured 2 models indoor/outdoor environment. First model a transmitter antenna place in an indoor environment and receiver antenna place in an outdoor environment and vary the positions of receiver antenna as shown in Fig. 1, on the other hand the second model we change roles between a transmitter antenna and a receiver antenna as a transmitter antenna place in an outdoor environment and a receiver antenna place in an indoor environment and vary the positions of receiver antenna as shown in Fig. 2.

2.3 Parameters of experiments

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

2.4 Antenna under test

The geometric and dimension of biconical antenna are shown in Fig. 3, and the magnitude and phase of the transfer function of each antenna are shown in Fig. 4.

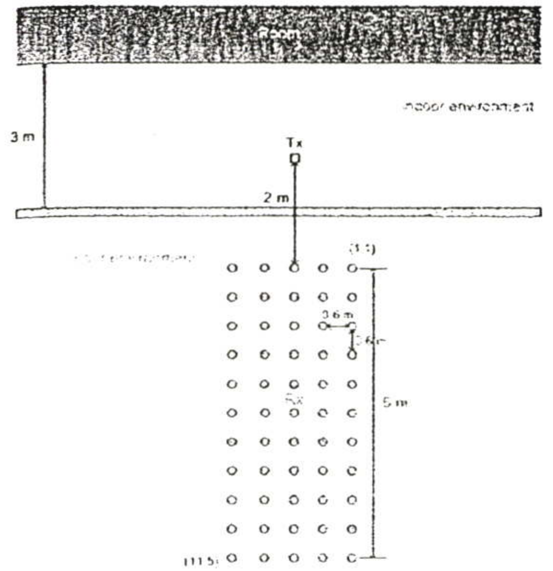


Fig.1: First model: Tx-indoor and Rx-outdoor vary Rx position each 0.6 m.

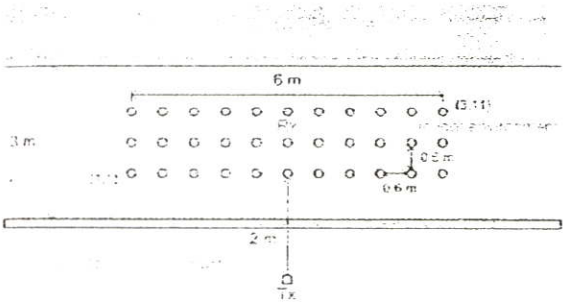


Fig.2: Second model: Tx-outdoor and Rx-indoor vary Rx position each 0.6 m.

3. DATA PROCESSING

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

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

where $f_{min} = 3.1$ GHz is the minimum frequency, $f_{max} = 10.6$ GHz is the maxminum frequency and $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$. This signal waveform in time domain and magnitude of its spectral density function are shown in Fig. 5 and Fig. 6, respectively.

We obtained the spectral density function of transmitted waveform by using the Fourier transform [2], that is

$$V_t(f) = \int_{-\infty}^{\infty} v_t(t)e^{-j2\pi ft}df. \qquad (2)$$

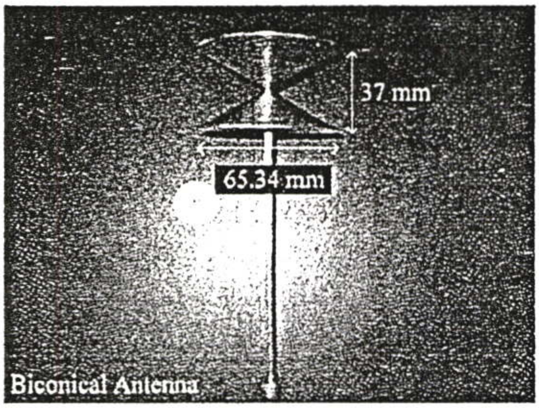


Fig.3: Geometric and dimension of biconical antenna.

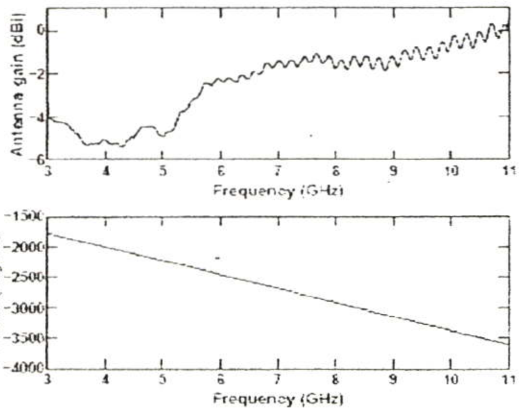


Fig.4: Magnitude and phase of the transfer function of each antenna.

The received spectral density can be obtain by using the transmitted spectral density function pass through the channel we measured, it is defined as

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

The received waveform can be calculated by using inverse Fourier transform, that is

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

Table 1: Measurement setup parameters

Parameter	Value
Frequency range	3 GHz ~ 11 GHz
Number of frequency point	801
Tx antenna height	2.65 m
Rx antenna height	2.65 m
Tx and Rx separate (Model 1)	2-8 m(each 0.6m)
Tx and Rx separate (Model 2)	2-3.2 m(each 0.6m)

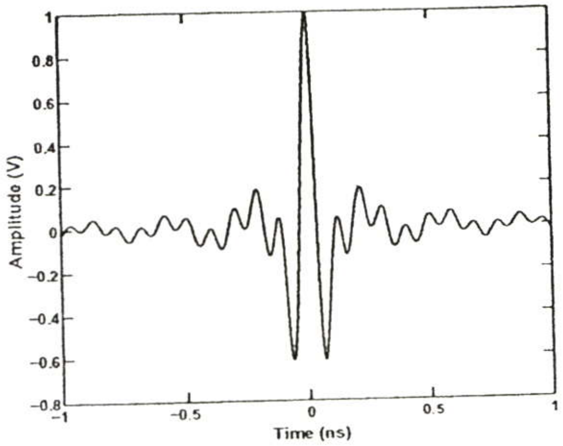


Fig.5: Transmission signal waveform.

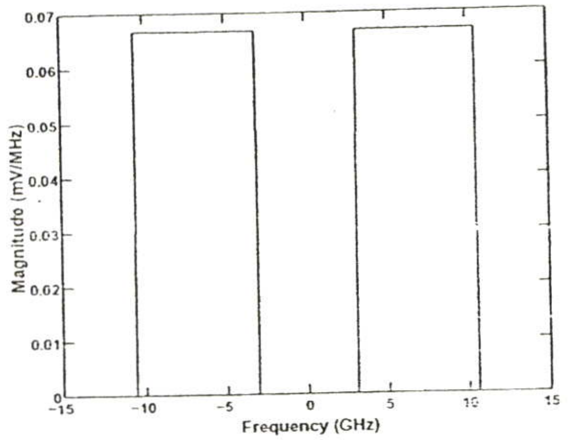


Fig.6: Spectral density function.

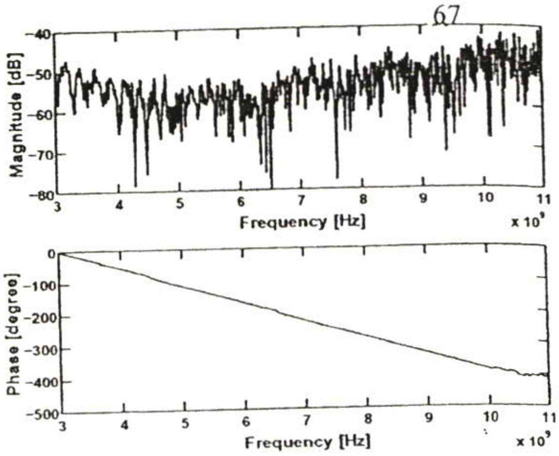


Fig.7: Channel transfer function: First model at point 1,3.

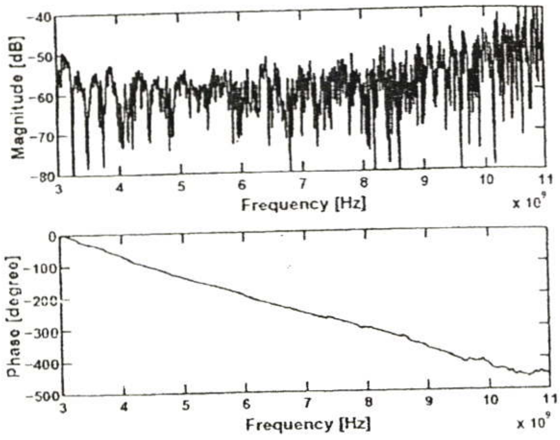


Fig.8: Channel transfer function: Second model at point 1,6.

After we obtained transmitted waveform and received waveform we can calculate the transmission gain, it defined as the ratio between the maximum absolute amplitude of the received and the transmitted waveform, written as

$$TG(d)[dB] = 20 \log \frac{max|v_r(t,d)|}{max|v_t(t)|}. \quad (5)$$

where $v_t(t)$ is amplitude of the transmitted signal waveform and $v_r(t,d)$ is amplitude of the received signal waveform.

The distortion of UWB waveforms is considered as the correlation coefficient. It is defined as

$$C = \frac{max|\int_{-\infty}^{\infty} v_t(t) \cdot v_r(t+\tau)dt|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |v_t(t)|^2 dt \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |v_r(t)|^2 dt}}. \quad (6)$$

4. RESULTS

From results of the experiments Fig. 7. is shown the channel transfer function of the first model as receiver antenna place on point 1,3. The mean value of magnitude is −51.59 dB. And Fig. 8. is shown the channel transfer function of the second model as receiver antenna place on point 1,6. The mean value of magnitude is −52.63 dB. From these results the magnitude are almost the same because of the Tx and Rx separation distances are identical. Moreover, the multipath fading in Fig. 8 is more than that in Fig. 7, because of in Fig 8 the Rx antenna is in indoor environment, while the Rx antenna in Fig. 7 is in outdoor environment. The slopes of phases are almost the same because of the Tx and Rx separation distance are identical.

The transmission gain is modeled by using the linear regression model [3]. Fig. 9. and Fig. 10. are shown the transmission gain of the first and second models. Therefore, the first model has path loss exponent is 3.295 and gain is −48.953 dB at 1 m. distance. And the second model has path loss exponent is 2.805 and gain is −55.155 dB at 1 m. distance.

The distortion of UWB wave form is analyzed as

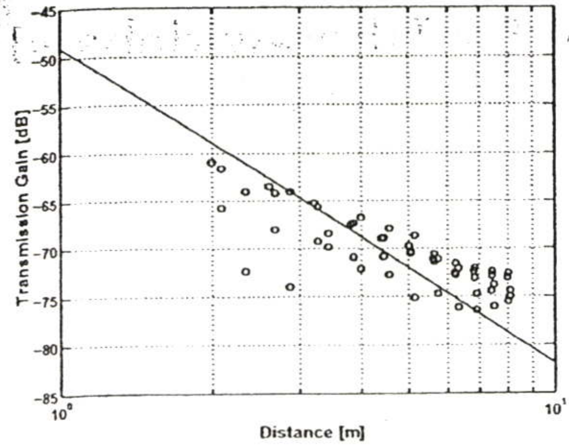


Fig.9: Transmission Gain: First model

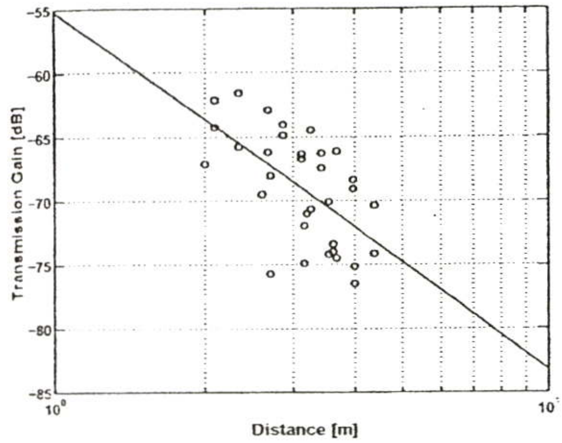


Fig.10: Transmission Gain: Second model

the correlation coefficient. The correlation coefficient of first model is shown in Fig. 11. and the second model is shown in Fig. 12.

5. CONCLUSION

In this paper we discusses the transmission gain and distortion of UWB system in an indoor/outdoor environment and used linear regression model to compare the path loss exponent of 2 measurement models. From the results, we can see that the multipath fading and first model is less than that of the first model, while the path loss exponent of first model is more than that of the second model. The distribution of correlation coefficient at each distance of second model is more than that of first model. Future work we will consider to compare the results between indoor/outdoor environment and indoor (or outdoor) environment. This approach is more useful for design and evaluation of UWB wireless systems.

References

[1] Federal Communication Commissio, *"Revision of part 15 of the commission's rules regrading UWB*

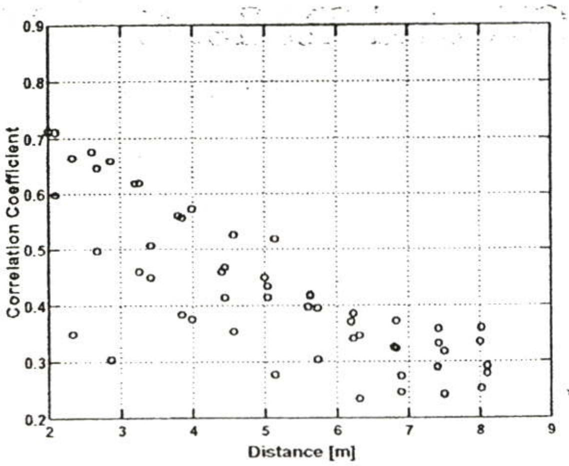


Fig.11: Correlation Coefficient: First model

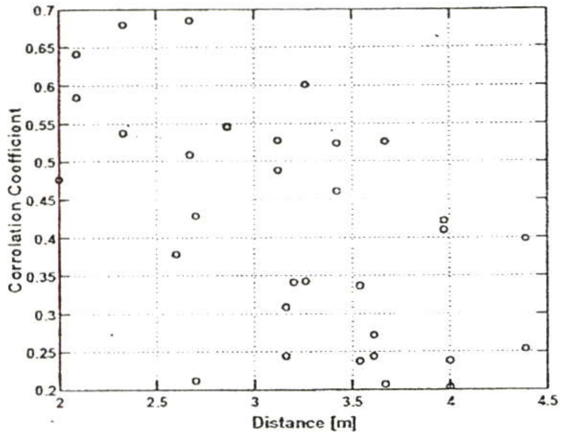


Fig.12: Correlation Coefficient: Second model

Transmission Systems," First Report, FCC 02-48,Apr.2002

[2] M. Ghavami, L.B.Michael,R.Kohno ," *Ultra wide-band signals and systems in communcation engineering,"* John Wiley-Sons,Ltd, 2004.

[3] Rappaport, *T. S. Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Ed).* Prentice Hall, NJ. 2002.

ITC-CSCC 2006

The International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications

PROCEEDINGS

VOLUME II

Sponsored By

THE ELECTRICAL ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER, TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION ASSOCIATION (ECTI), THAILAND
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS ENGINEERS OF KOREA (IEEK), KOREA
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS (IEICE), JAPAN
NATIONAL ELECTRONICS AND COMPUTER TECHNOLOGY CENTER, THAILAND
In association with IEEE THAILAND SECTION

OUTDOOR PROPAGATION LOSS FOR ULTRA WIDEBAND IMPULSE RADIO SYSTEM

Y. Tiyaworanan†, *S. Promwong*†,††, *P. Supanakoon*†, *R. Muanghlua*†, *A. Ruangphanit*†††

†Department of Information Engineering/Electronics Research Center, Faculty of engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
E-mail:{s8061010, kpsathap, kspichay}@kmitl.ac.th

††Research Center for Communications and Information Technlogy (ReCCIT)

†††Thai MicroElectronics Center (TMEC), National Electronics and Computer Technology Center
51/4 Moo 1, Wang takien District, Amphur Muang Chachoengsao, Chachoengsao 24000, Thailand

ABSTRACT

In this paper, the outdoor propagation loss for ultra wideband (UWB) impulse radio system based on experiment results is studied. Biconical antennas are used for transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. The frequency transfer functions of the radio channels are measured by using a vector network analyzer (VNA) over the frequency from 3∼11 GHz. The magnitudes and phases of channel transfer functions are shown. The propagation loss and correlation coefficient are demonstrated. The results are discussed in the paper.

1. INTRODUCTION

An ultra wideband (UWB) technology attracts a great deal of attention because of UWB systems are wide bandwidth, low power, low cost, high data rates, precise positioning capability and extremely low interference. The UWB systems have been allowed to operate across a range 3.1∼10.6 GHz of frequency bands defined by Federal Communications Commission (FCC) [1] with negligible interference to existing systems in that band. The FCC defined the UWB signal as those which have a fractional bandwidth greater than 0.20 or occupied bandwidth greater than 500 MHz. The fractional and occupied bandwidth are define as

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

$$\textit{Occupied bandwidth} = f_H - f_L. \quad (2)$$

The UWB expects to mainly used in wireless personal area network (WPAN) and home network [2]. In any applications, the UWB radio systems apply to use in an outdoor environments. The propagation loss between a pair of antennas is the ratio of the transmitted power to the received power, it is usually the first step in the analysis of a wireless communication systems [3].

In this paper, we discuss the channel transfer function, propagation loss and correlation coefficient of a measurement channel in an outdoor environments, which the biconical antennas are used for Tx and Rx. The frequency transfer functions of the radio channels are measured by using VNA over the frequency from 3∼11 GHz.

2. MEASUREMENT SYSTEM

2.1. Measurement scheme

The complex transfer functions can be measured by using the VNA. However, this transfer function is a product of transfer functions of Tx and Rx antennas as well as the free space channel. Therefore, the effects of Tx and Rx antennas are included.

2.2. Measurement setup

The VNA was operated in the response measurement mode from 3∼11 GHz, where port-1 was used as the Tx port and port-2 was used as the Rx port, respectively. Both Tx and Rx antennas were fixed at the height of 1.65 m. We have chosen the biconical antenna for Tx and Rx antennas.

In this experiment, we measured in outdoor environment, by fixing the Tx antenna and varying the position of Rx antenna at each 0.6 m x 0.6 m grid dimension. This measurement model is shown in Fig. 1.

2.3. Parameters of experiments

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

2.4. Antenna under test

The geometric and dimension of biconical antenna [4] are shown in Fig. 2, and the magnitude and phase of the

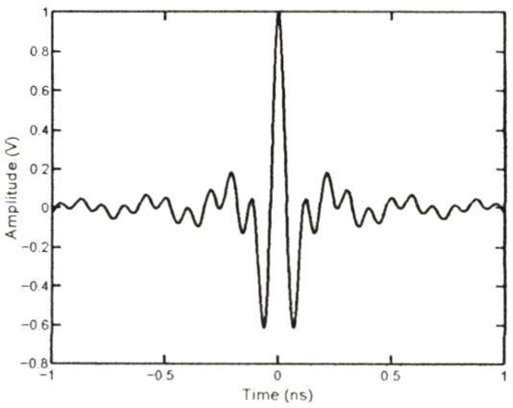


Fig.4: UWB transmitted signal waveform.

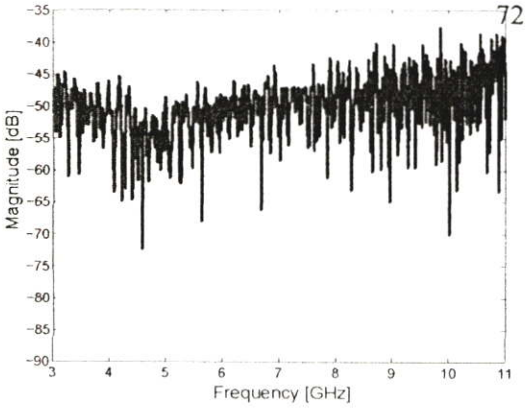


Fig.6: Magnitude of channel transfer function at 2m.

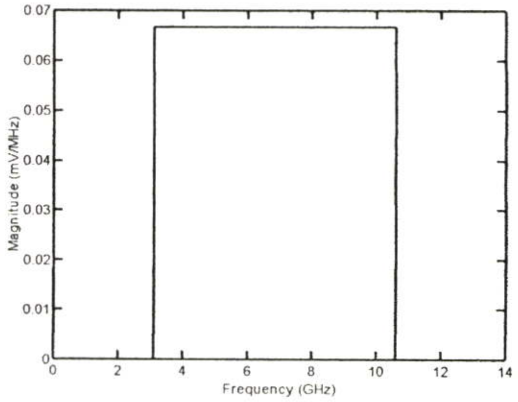


Fig.5: Spectral density function of UWB transmitted signal waveform.

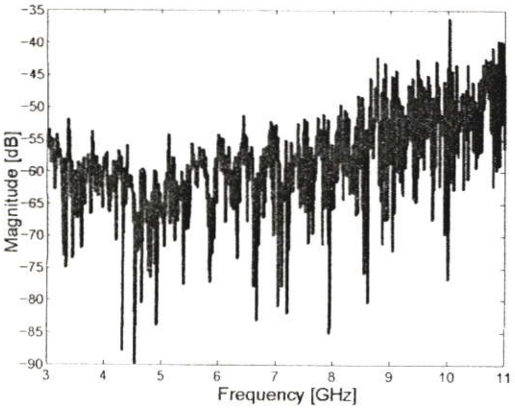


Fig.7: Magnitude of channel transfer function at 8m.

After we obtained transmitted and received waveforms, the propagation loss is calculated. It is defined as the ratio between the maximum absolute amplitude of the transmitted and the received waveforms and can be written as

$$PL(d)[dB] = 20\log\left(\frac{max|v_t(t)|}{max|v_r(t,d)|}\right). \quad (7)$$

The distortion of UWB waveform is considered as the correlation coefficient between the transmitted and received wavforms. It is defined as

$$C(d) = \frac{max|\int_{-\infty}^{\infty} v_t(t)\cdot v_r(t+\tau d)dt|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty}|v_t(t)|^2dt\cdot\int_{-\infty}^{\infty}|v_r(t,d)|^2dt}}. \quad (8)$$

4. RESULTS

From results of the experiments, Fig. 6 shows the magnitude of channel transfer function at 2 m Tx and Rx separation distance. The average propagation loss is about 48.21 dB. Figure 7 shows magnitude of channel transfer function at 8 m Tx and Rx separation distance. The average propagation loss is about 56.73 dB. From these results, the average propagation loss is increased when Tx and Rx separation distance is increased. Moreover, the multipath fading in Fig. 7 is more than that in Fig. 6, because of in Fig. 7 the Tx and Rx separation distance is more than that in Fig. 6.

Figures 8 and 9 show phases of channel transfer functions at 2 and 8 m, respectively. The phase in Fig. 8 is linear while that in Fig. 9 is begin nonlinear at frequency about 9 GHz.

The propagation loss is modeled by using the linear regression model [6]. Figure 10 shows propagation loss of this measurement. The path loss exponent is 2.36 and propagation loss is 51.52 dB at 1 m.

The distortion of UWB waveform is analyzed as the correlation coefficient. Figure 11 shows the correlation coefficient. The correlation coefficient is 0.73 at 2 m Tx and Rx separate and 0.32 at 8 m Tx and Rx separation distance.

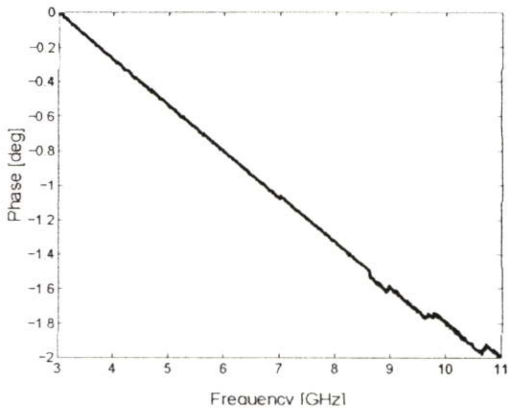


Fig.8: Phase of channel transfer function at 2m.

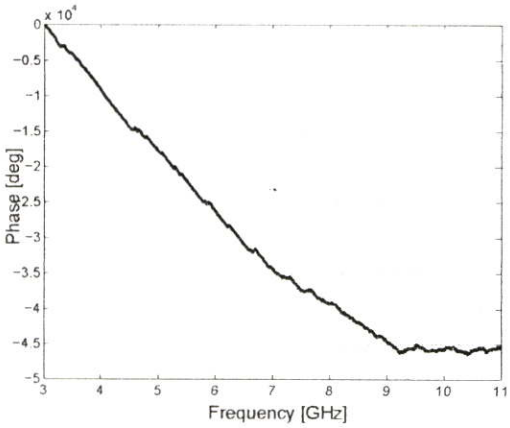


Fig.9: Phase of channel transfer function at 8m.

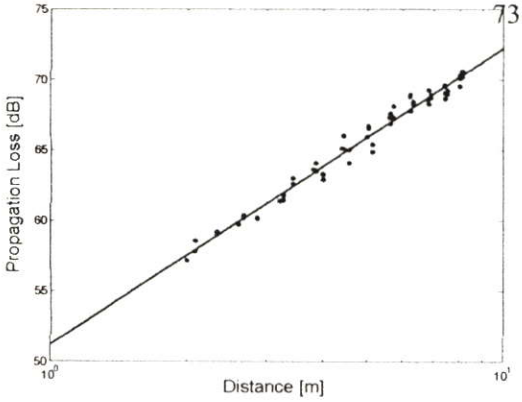


Fig.10: Propagation loss.

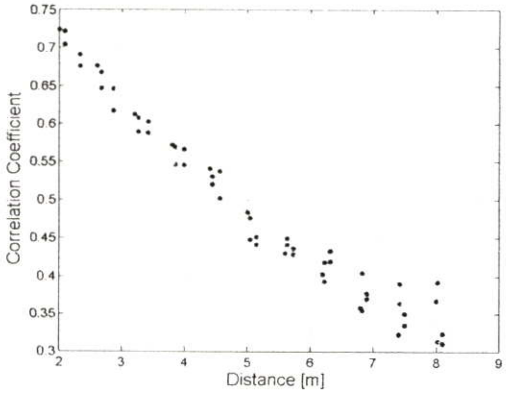


Fig.11: Correlation Coefficient.

5. CONCLUSION

In this paper, we discuss the channel transfer function in an outdoor propagation loss and distortion of UWB system in an outdoor environment. The linear regression model is used to consider the path loss exponent. From the results, we can see that the propagation loss and multipath fading at 8 m Tx and Rx separation distance are more than that is 2 m Tx and Rx separation distance. The path loss exponent value of this experiment is similar to path loss exponent of free space (the path loss exponent of free space is 2). The distortion of UWB waveform is analyzed as the correlation coefficient. The correlation coefficient valued is decreased along the Tx and Rx separation distance. This approach data is useful for design and evaluation of UWB wireless systems.

6. REFERENCES

[1] Federal Communication Commissio,*"Revision of part 15 of the commission's rules regrading UWB Transmission Systems,"* First Report, FCC 02-48,Apr.2002

[2] IEEE 802.15.3 ,*"IEEE standard for wireless personal area networks (WPAN)"*, http://www.ieee802.org/15/pub/TG3a.html.

[3] Simon R. Saunders ,*"Antennas and propagation for wireless communication systems"*, John Wiley-Sons,Ltd, 1999.

[4] S. Promwong and W. Hachitani, and J. Takada ,*"Free Space Link Budget Evaluation of UWB-IR Systems"*, 2004 International conference on Ultra Wideband Systems and Technology (UWBST2004), pp. 312-316, May 2004.

[5] M. Ghavami, L.B.Michael,R.Kohno ,*"Ultra wideband signals and systems in communcation engineering"*, John Wiley-Sons,Ltd, 2004.

[6] Rappaport, *"T. S. Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Ed)"*, Prentice Hall, NJ. 2002.

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

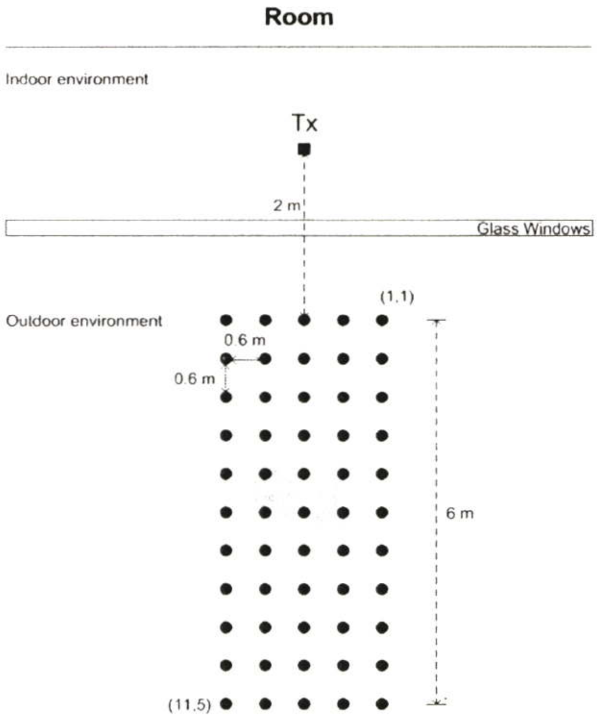


Fig. 2. First model: Tx antenna is in the indoor environment, while the Rx antenna is in the outdoor environment and is varied its position each 0.6 m.

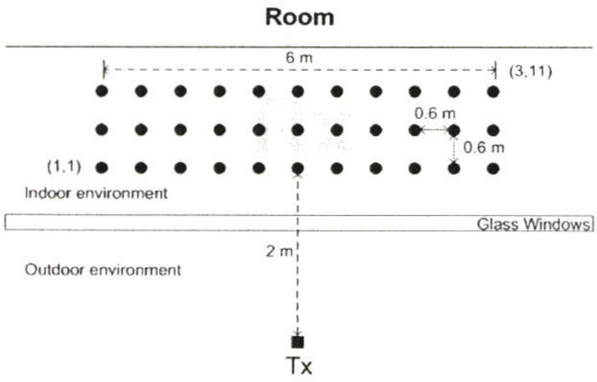


Fig. 3. Second model: Tx antenna is in the outdoor environment, while the Rx antenna is in the indoor environment and is varied its position each 0.6 m.

C. Parameters of experiments

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

III. UWB Signal Processing

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

TABLE I

Measurement setup parameters

Parameter	Value
Frequency range	3 GHz $\sim$ 11 GHz
Number of frequency point	801
Tx antenna height	2.65 m
Rx antenna height	2.65 m
Tx and Rx separate (first model)	2-8 m(each 0.6m)
Tx and Rx separate (second model)	2-3.2 m(each 0.6m)

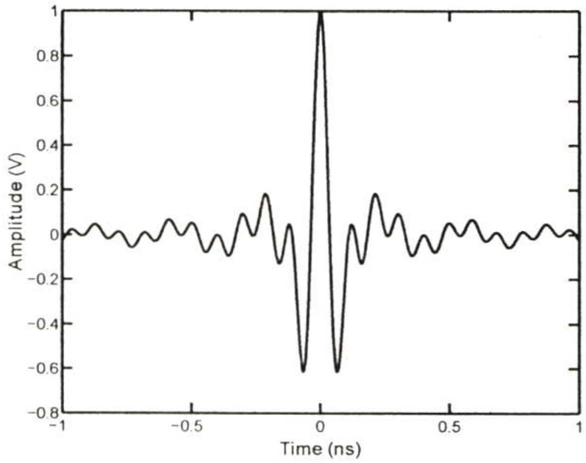


Fig. 4. Transmitted signal waveform.

$$v_t(t) = \frac{1}{f_b}\left[\begin{array}{c} f_{max}\text{sinc}(2f_{max}t) \\ -f_{min}\text{sinc}(2f_{min}t) \end{array}\right], \quad (1)$$

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

where f_{min} = 3.1 GHz is the minimum frequency, f_{max} = 10.6 GHz is the maxmimum frequency, f_b is spectral bandwidth, f_c is the center frequency and sinc(x) = sin(πx)/πx. This signal waveform is shown in Fig. 4.

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

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

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

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

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

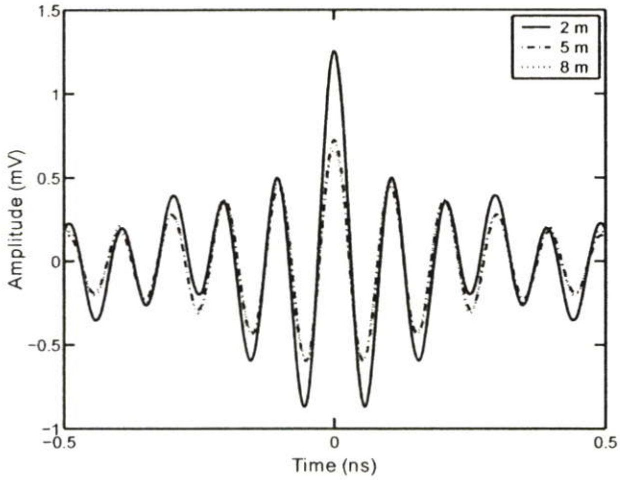


Fig. 5. Amplitudes of the signal waveform at the output of the matched filter using the optimum matched filter for the first model.

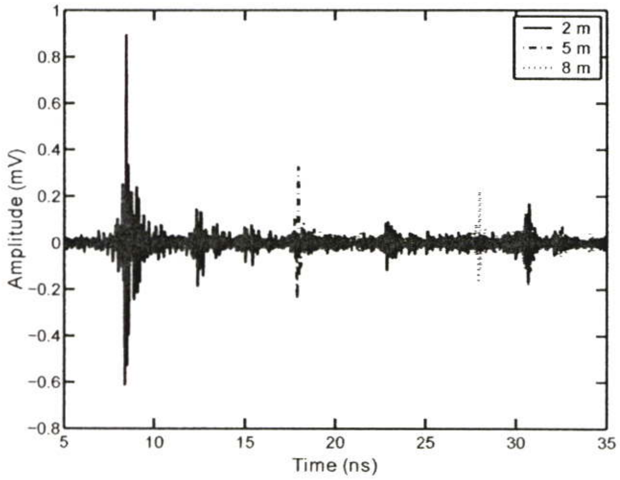


Fig. 6. Amplitudes of the signal waveform at the output of the matched filter using the transmitted signal template for the first model

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

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

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

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

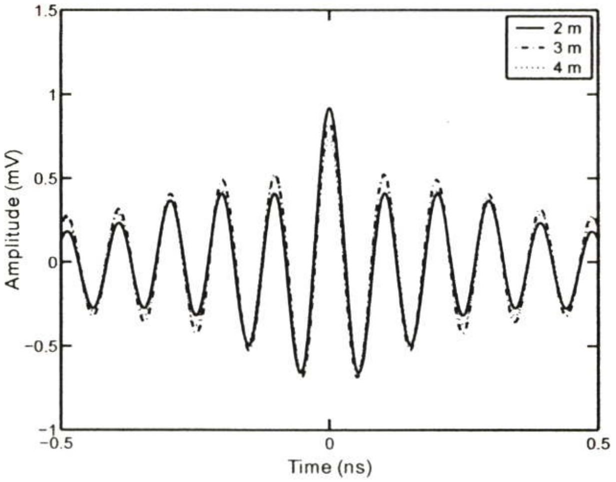


Fig. 7. Amplitudes of the signal waveform at the output of the matched filter using the optimum matched filter for the second model.

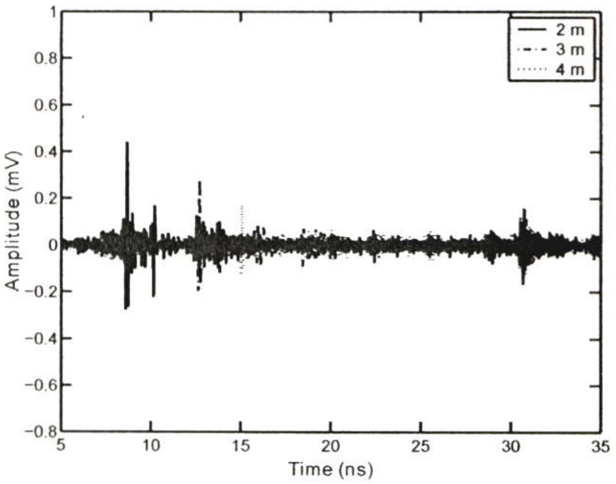


Fig. 8. Amplitudes of the signal waveform at the output of the matched filter using the transmitted signal template for the second model.

$$V_{\mathrm{MF}}(f) \quad = \quad V_{\mathrm{r}}(f) \cdot H_{\mathrm{MF}}(f). \tag{6}$$

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

$$v_{\mathrm{MF}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{\mathrm{MF}}(f) e^{\mathrm{j}2\pi \mathrm{ft}} df. \tag{7}$$

$$TG = 20 \log \frac{max|v_{\mathrm{MF}}(t)|}{max|v_{\mathrm{t}}(t)|}. \tag{8}$$

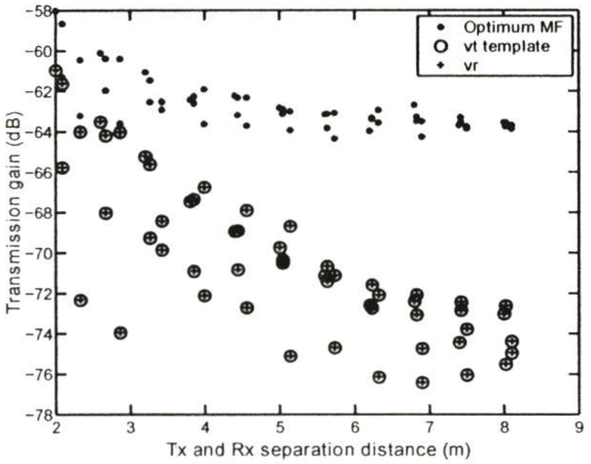


Fig. 9. Transmission gains using the optimum matched filter and transmitted signal template are compared with the transmission gain of received signal for the first model.

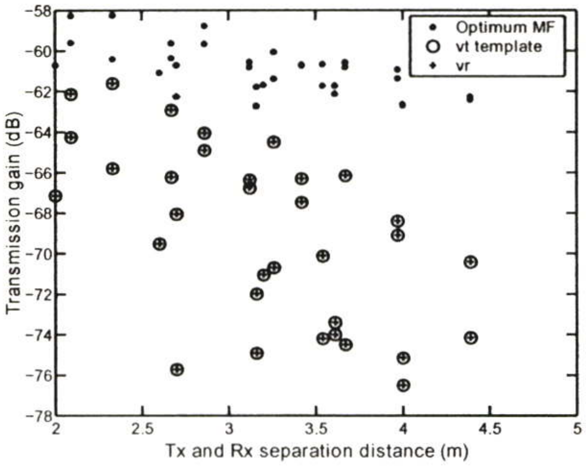


Fig. 10. Transmission gains using the optimum matched filter and transmitted signal template are compared with the transmission gain of received signal for the second model.

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

IV. RESULTS

From the result of the improvement, both models was improved by using optimum matched filter and transmitted signal template.

Fig. 5, shows the amplitudes of the signal waveforms at the output of the matched filter using optimum matched filter for the first model. The amplitudes of the signal waveforms at the output of the matched filter using the transmitted signal template for the first model are shown in Fig. 6. The peak amplitudes of optimum matched filter is higher than that of the transmitted signal template.

For the second model, Figs. 7 and 8 show the amplitude of the signal waveform at the matched filter using the optimum matched filter and the transmitted signal template, respectively. The peak amplitudes of the optimum matched filters are also higher than that of the transmitted signal template.

The transmission gains using the optimum matched filter and transmitted signal template are compared with the transmission gain of received signal for the first and second models are shown in Figs. 9 and 10, respectively. We can see that the optimum matched filter can be improved the the transmission gain, while the transmission gain of the transmitted signal template is the same with that of the received signal.

V. CONCLUSION

In this paper, we discuss the characterization of transmission loss with indoor and outdoor in ultra wideband impulse radio (UWB-IR) system. The transmission gain can be improvement by using the optimum matched filter at the receiver side, while the results of the transmitted signal template is the same with the received signal. This approach is more useful to design and evaluate the UWB-IR wireless systems.

REFERENCES

[1] Y. Tiyaworanan, S. Promwong, P. Supanakoon, N. Sukutamtanti, R. Muanghlua,*"Experimental Study of Indoor/Outdoor Propagation Loss for Ultra Wideband Impulse Radio System,"* 2006 ECTI International Conference, vol. 2, pp. 650-653, May 2006.

[2] K. Siwiak,*"Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New Technology,"* 2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.

[3] K. Siwiak, *"Ultra-Wide Band Radio: The emergence of an Importance RF Technology,"* 2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 2, pp. 1169-1172, May 2001.

[4] K. Siwiak, *"Impact of ultra wide band transmissions on a generic receiver,"* 2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 2, pp. 1181-1183, May 2001.

[5] J.D. Taylor, *"Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems,"* CRC press, London, UK, pp. 670, 1994.

[6] OSD/DARAPA, *"Ultra-Wideband Radar Review Panel,"* Assessment of Ultra-Wideband (UWB) Technology. Arlington, VA.: DARPA, 1990.

[7] Federal Communication Commissio,*"Revision of part 15 of the commission's rules regrading UWB Transmission Systems,"* First Report, FCC 02-48,Apr.2002

[8] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, and P. Tangtisanon *"Path Loss and Matched Filter Gain for UWB System,"* Proc. The 2004 international symposium on antennas and propagation (ISAP'04), pp. 97-100, Aug. 2004.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายยุทธนา ติยวรนันท์
วัน เดือน ปีเกิด	27 กรกฎาคม 2525
ที่อยู่	136 ถ.ศรีเชียงใหม่ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.สุรินทร์ 32000
ประวัติการศึกษา	2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตองครักษ์

ผลงานวิจัย

พ.ศ.2549

Yoottana Tiyawornan, Sathaporn Promwong, Pichaya Supanakoon, Nikorn Sukutamtanti, Rangsan Muanghlua, "Experimental Study of Indoor/Outdoor Propagation Loss for Ultra Wideband impulse Radio System," ECTI-CON 2006, pp. 650-653, May 2006.

Yoottana Tiyawornan, Sathaporn Promwong, Pichaya Supanakoon, Rangsan Muanghlua, Anake Ruangphanit, "Outdoor Propagation Loss for Ultra Wideband Impulse Radio System," ITC-CSCC2006, pp. 253-256, July 2006.

Yoottana Tiyaworanan, Sathaporn Promwong, and Pichaya Supanakoon, "Characterization of Transmission Loss with Indoor and Outdoor in UWB Impulse Radio Systems," ISCIT2006, pp. F3F-1, October 2006.