

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง
ที่มีเครื่องรับแบบแมตช์ฟิลเตอร์และเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์

STUDY ON SNR GAIN AND BER PERFORMANCES OF ULTRA WIDEBAND
COMMUNICATIONS WITH MATCHED FILTER AND
CORRELATION RECEIVERS



กุลทรี เทพลี
KULTHAREE TEPLLEE

วท.
ก 25
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

74565

- 3 ต.ค. 2550

b. 11803823
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY ON SNR GAIN AND BER PERFORMANCES OF ULTRA WIDEBAND
COMMUNICATIONS WITH MATCHED FILTER AND
CORRELATION RECEIVERS**



**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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่งที่มีเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์

นักศึกษา

นางสาวกุลชรี เทพลี

รหัสนักศึกษา

48061011

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมสารสนเทศ

พ.ศ.

2550

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.พิชญ สุพรรณกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพอัตราขยายของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) และอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง (UWB) ที่มีเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ โดยใช้สัญญาณส่ง UWB เป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต ซึ่งเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารของคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC) ได้ใช้ช่องสัญญาณอวกาศว่างและช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นผิวพิจารณาในช่วงความถี่ที่กว้าง ดังนั้น ผลกระทบความเพี้ยนที่เกิดจากช่องสัญญาณ UWB เหล่านี้จึงถูกรวมเข้าไปด้วย ได้ศึกษาและแสดงประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ในแต่ละกรณี

Thesis Title	Study on SNR Gain and BER Performances of Ultra Wideband Communications with Matched Filter and Correlation Receivers
Student	Miss. Kultharee Teplee
Student ID	48061011
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst. Prof. Pichaya Supanakoon

ABSTRACT

In this thesis, the signal-to-noise ratio (SNR) gain and bit error rate (BER) performances of ultra wideband (UWB) communications with matched filter and correlation receivers are studied. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which satisfied the UWB signal definition and Federal Communications Commission (FCC) indoor and outdoor limit spectral masks, are used as the UWB transmitted signals. The free space and ground reflection channels, which considered the wide frequency range, are used. Therefore, the distortion effects caused from these UWB channels are included. The SNR gain and BER performances of each case are studied and demonstrated.

Thesis Title	Study on SNR Gain and BER Performances of Ultra Wideband Communications with Matched Filter and Correlation Receivers
Student	Miss. Kultharee Teplee
Student ID	48061011
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst. Prof. Pichaya Supanakoon

ABSTRACT

In this thesis, the signal-to-noise ratio (SNR) gain and bit error rate (BER) performances of ultra wideband (UWB) communications with matched filter and correlation receivers are studied. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which satisfied the UWB signal definition and Federal Communications Commission (FCC) indoor and outdoor limit spectral masks, are used as the UWB transmitted signals. The free space and ground reflection channels, which considered the wide frequency range, are used. Therefore, the distortion effects caused from these UWB channels are included. The SNR gain and BER performances of each case are studied and demonstrated.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิชญ์ สุพรรณกุล ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ เนื่องจากการอนุเคราะห์ อบรมสั่งสอน ชี้แนะแนวทางเกี่ยวกับงานวิจัย ตลอดจนความห่วงใยที่คอยสอบถามปัญหาของงานวิจัย ผู้เขียนมีความซาบซึ้งใจต่อความเป็นอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์อย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์ สถาพร พรหมวงศ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ผู้ดูแลลูกศิษย์อย่างดี ให้ความอนุเคราะห์ความรู้ต่างๆ คอยเสนอแนะการนำเสนองานวิจัยอย่างดียิ่ง ทำให้ข้าพเจ้ามีความรู้และสามารถนำเสนองานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณ ผศ. มนต์ชัย แซ่มซ้อย ในการถ่ายทอดความรู้ทางด้านวิชาการจนผู้เขียนสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี

ขอบคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้โดยตลอด

ขอบคุณพี่น้องและเพื่อนๆ ที่คอยให้ข้อเสนอแนะ และคอยสอบถามถึงความคืบหน้าของงานวิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ คุณความดีและประโยชน์ที่พึงบังเกิดมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นผลมาจากความกรุณาของบิดา มารดา คณาจารย์ทุกท่านผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และผู้สนับสนุน ข้าพเจ้าจึงขอยกคุณความดีเหล่านั้นขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กุลฑรี เทพดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย	3
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา	3
บทที่ 2 ระบบการสื่อสาร UWB.....	5
2.1 บทนำ	5
2.2 นิยามและข้อกำหนดของการสื่อสาร UWB	5
2.2.1 นิยามของสัญญาณ UWB	5
2.2.2 ข้อกำหนดของการสื่อสาร UWB	7
2.3 แบบแผนการมอดูเลต UWB	9
2.3.1 PPM	11
2.3.2 BPM	11
2.3.3 วิธีการมอดูเลตแบบอื่นๆ	12
2.4 บทสรุป	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสาร UWB ทางทฤษฎี	14
3.1 บทนำ	14
3.2 สัญญาณส่ง UWB	14
3.2.1 รูปคลื่นแถบผ่านเหลี่ยม	15
3.2.2 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	15
3.2.3 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต	16
3.3 ช่องสัญญาณ UWB	17
3.3.1 ช่องสัญญาณอวกาศว่าง	17
3.3.2 ช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	17
3.4 สัญญาณรับ UWB	19
3.5 เครื่องรับ UWB	19
3.5.1 เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์	19
3.5.2 เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์	20
3.6 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR	21
3.7 ประสิทธิภาพ BER	22
3.8 บทสรุป	23
บทที่ 4 ผลการคำนวณวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสาร UWB	24
4.1 บทนำ	24
4.2 สัญญาณส่ง UWB	24
4.2.1 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม	24
4.2.2 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	26
4.2.3 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต	28
4.3 ผลการคำนวณวิเคราะห์ช่องสัญญาณ UWB	31
4.3.1 ช่องสัญญาณอวกาศว่าง	31
4.3.2 ช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	33
4.4 ผลการคำนวณวิเคราะห์สัญญาณรับ UWB	33
4.4.1 สัญญาณรับ UWB ที่ผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	34
4.4.2 สัญญาณรับ UWB ที่ผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการคำนวณวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับ.....	40
4.5.1 สัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์.....	40
4.5.2 สัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์	47
4.6 ผลการคำนวณวิเคราะห์ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR	53
4.6.1 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์.....	54
4.6.2 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์	56
4.7 ผลการคำนวณวิเคราะห์ประสิทธิภาพ BER	57
4.7.1 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์.....	58
4.7.2 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์	64
4.8 บทสรุป.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลของประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR	72
5.2 สรุปผลของประสิทธิภาพ BER	73
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา	74
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก ก. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์	77
ประวัติผู้เขียน	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อจำกัดในการแพร่กระจาย PSD ที่กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคาร.....	8
2.2 ประเภทของการใช้งานที่ได้รับอนุมัติโดย FCC.....	9
4.1 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง.....	55
4.2 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง.....	55
4.3 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น.....	55
4.4 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น.....	56
4.5 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง.....	56
4.6 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง.....	57
4.7 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น.....	57
4.8 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น.....	57
5.1 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่น.....	72
5.2 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่น.....	73
5.3 SNR ที่ทำให้ประสิทธิภาพ BER เท่ากับ 10^{-3} ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่น.....	74
5.4 SNR ที่ทำให้ประสิทธิภาพ BER เท่ากับ 10^{-3} ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่น.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ช่วงความถี่และ PSD ของระบบการสื่อสาร UWB เทียบกับระบบการสื่อสารแถบแคบชนิดอื่น	6
2.2 ลักษณะของสัญญาณพัลส์ใน โดเมนเวลาและ PSD ของสัญญาณใน โดเมนความถี่	6
2.3 สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC	8
2.4 วิธีการมอดูเลตที่แตกต่างกันสำหรับการสื่อสาร UWB	9
2.5 การเปรียบเทียบวิธี PPM และ BPM สำหรับการสื่อสาร UWB	10
2.6 การเปรียบเทียบของเทคนิคการมอดูเลต สำหรับการสื่อสาร UWB	12
3.1 แบบจำลองการสะท้อนพื้น	18
4.1 รูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมใน โดเมนเวลาซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคาร	25
4.2 PSD ของรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคาร	25
4.3 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตใน โดเมนเวลาซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร	26
4.4 PSD ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร	27
4.5 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตใน โดเมนเวลาซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร	27
4.6 PSD ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร	28
4.7 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตใน โดเมนเวลาซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร	29
4.8 PSD ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร	29
4.9 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตใน โดเมนเวลาซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร	30
4.10 PSD ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณอวกาศว่างที่ระยะทาง 10 m ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 20 GHz	31
4.12 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณอวกาศว่างที่ระยะทาง 10 m ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 20 GHz	32
4.13 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นที่ระยะทาง 10 m ความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็น 1 m ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 20 GHz	32
4.14 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นที่ระยะทาง 10 m ความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็น 1 m ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 20 GHz	33
4.15 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัด ภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	34
4.16 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัด ภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	35
4.17 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัด ภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	35
4.18 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัด ภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	36
4.19 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัด ภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	36
4.20 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัด ภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	37
4.21 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัด ภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	38
4.22 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัด ภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	38
4.23 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัด ภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัด ภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น.....	40
4.25 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตาม สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณ อวกาศว่าง	41
4.26 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตาม สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	41
4.27 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตาม สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	42
4.28 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตาม สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	43
4.29 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตาม สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	43
4.30 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตาม สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณ การสะท้อนพื้น	44
4.31 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตาม สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	45
4.32 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตาม สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น.....	45
4.33 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตาม สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	46
4.34 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตาม สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น...	47
4.35 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัม มาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	47
4.36 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตาม สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.37	รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	49
4.38	รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	49
4.39	รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	50
4.40	รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์ค สำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ..	50
4.41	รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	51
4.42	รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	52
4.43	รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	52
4.44	รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	53
4.45	อัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์ที่มีแบนด์วิดท์สัญญาณตั้งแต่ 0.5 ถึง 7.5 GHz	54
4.46	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง.....	58
4.47	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	59
4.48	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง 60
4.50	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง 61
4.51	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น 61
4.52	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น 62
4.53	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น 63
4.54	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น 63
4.55	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น 64
4.56	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง 65
4.57	ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.58 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	66
4.59 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	67
4.60 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง	67
4.61 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	68
4.62 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	69
4.63 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น.....	69
4.64 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	70
4.65 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญญาณรบกวนแบบไวท์เกาส์ (Additive White Gaussian Noise)	AWGN
อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate)	BER
การมอดูเลตแบบสองเฟส (Bi-Phase Modulation)	BPM
กระแสตรง (Direct Current)	DC
คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission)	FCC
การเข้ารหัสเปิดปิด (On-Off Keying)	OOK
การมอดูเลตแบบขั้วตั้งฉาก (Orthogonal Pulse Modulation)	OPM
การมอดูเลตขนาดพัลส์ (Pulse Amplitude Modulation)	PAM
การมอดูเลตแบบเลื่อนตำแหน่ง (Pulse Position Modulation)	PPM
ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectral Density)	PSD
ความถี่วิทยุ (Radio Frequency)	RF
อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio)	SNR
แถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband)	UWB
เครือข่ายพื้นที่ร่างกายไร้สาย (Wireless Body Area Network)	WBAN
เครือข่ายพื้นที่เฉพาะแห่งไร้สาย (Wireless Local Area Network)	WLAN
เครือข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network)	WPAN
กิกกะเฮิรตซ์ (Gigahertz)	GHz
เฮิรตซ์ (Hertz)	Hz
เมกกะเฮิรตซ์ (Megahertz)	MHz
เมกกะบิตต่อวินาที (Megabit per Second)	Mbps
โวลต์ (Volt)	V
วัตต์ (Watt)	W
บิต (Bit)	bit
บิตต่อวินาที (Bit per Second)	bps
เดซิเบล (Decibel)	dB
เดซิเบลเทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก (Decibel Relative to Isotropic Antenna)	dBi
เดซิเบลเทียบกับกำลัง 1 มิลลิวัตต์ (Decibel Relative to Power of 1 Milliwatt)	dBm
เมตร (Meter)	m
มิลลิโวลต์ (Millivolt)	mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

นาโนวินาที (Nanosecond)	ns
วินาที (Second)	s
โอห์ม (Ohm)	Ω
ไมโคร โวลต์ (Microvolt)	μV
แอมพลิจูดสูงสุด (Maximum Amplitude), V	A
BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ที่ใช้แบบแผนมอดูเลตขั้วต่างกัน (BER of Correlation Receiver with Antipodal Modulation Scheme)	$B_{c,a}$
BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ที่ใช้แบบแผนมอดูเลตตั้งฉาก (BER of Correlation Receiver with Orthogonal Modulation Scheme)	$B_{c,o}$
BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ที่ใช้แบบแผนมอดูเลตขั้วต่างกัน (BER of Matched Filter Receiver with Antipodal Modulation Scheme)	$B_{m,a}$
BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ที่ใช้แบบแผนมอดูเลตตั้งฉาก (BER of Matched Filter Receiver with Orthogonal Modulation Scheme)	$B_{m,o}$
อัตราบิต (Bit Rate), bps	B_r
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient of Correlation Receiver)	C_c
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ (Matched Filter Coefficient of Correlation Receiver)	C_m
อัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ (SNR Gain of Correlation Receiver)	G_c
อัตราขยายของอวกาศว่าง (Free Space Gain)	G_f
อัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ (SNR Gain of Matched Receiver)	G_m
ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ (Frequency Transfer Function)	H
ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ (Frequency Transfer Function of Correlation Receiver)	H_c
ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณวิถีตรง (Frequency Transfer Function of Directed Path Channel)	H_d
ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณอวกาศว่าง (Frequency Transfer Function of Free Space Channel)	H_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น	
(Frequency Transfer Function of Ground Reflection Channel)	H_g
ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบแมตช์ฟิลเตอร์	
(Frequency Transfer Function of Matched Filter Receiver)	H_m
ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณวิถีสะท้อน	
(Frequency Transfer Function of Reflected Path Channel)	H_r
อิมพีแดนซ์ (Impedance), Ω	R
PSD ของสัญญาณส่ง (PSD of Transmitted Signal), W/Hz	S
PSD ของสัญญาณส่งที่แผ่กระจายออกมา (Radiated PSD of Transmitted Signal), W/Hz	S_R
SNR ที่อินพุตของเครื่องรับ (SNR at Input of Receiver)	S/N
ช่วงเวลาในหนึ่งรูปคลื่น (Time Interval of One Waveform), s	T_s
ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์	
(Spectral Density of Output Signal from Correlation Receiver), V/Hz	V_c
ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับแบบแมตช์ฟิลเตอร์	
(Spectral Density of Output Signal from Matched Filter Receiver), V/Hz	V_m
ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง (Spectral Density of Transmitted Signal), V/Hz	V_t
ความเร็วแสง (Velocity of Light), m/s	c
ระยะทาง (Distance), m	d
ระยะทางของวิถีตรง (Distance of Directed Path), m	d'
ระยะทางของวิถีสะท้อน (Distance of Reflected Path), m	d''
ความถี่ (Frequency), Hz	f
แบนด์วิดท์ (Bandwidth), Hz	f_b
ความถี่กลาง (Center Frequency), Hz	f_c
ความถี่พาห้ (Carrier Frequency), Hz	f_c
แบนด์วิดท์เชิงเศษส่วน (Fractional Bandwidth), Hz	f_f
ความถี่สูงสุด (Upper Frequency), Hz	f_H
ความถี่ต่ำสุด (Lower Frequency), Hz	f_L
ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์	
(Impulse Response of Correlation Receiver)	h_c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเครื่องรับแบบแมตช์ฟิลเตอร์ (Impulse Response of Matched Filter Receiver)	h_m
ความสูงของสายอากาศรับ (Height of Receiver Antenna), m	h_r
ความสูงของสายอากาศส่ง (Height of Transmitter Antenna), m	h_t
รูปคลื่นพัลส์ (Pulse Waveform), V	p
พัลส์ที่ถูกมอดูเลต (Modulated Pulse), V	s
เวลา (Time), s	t
ความกว้างพัลส์ (Pulse Width), s	t_b
คุณลักษณะ $1/e$ ของเวลาที่ลดลง ($1/e$ Characteristic Decay Time), s	t_d
รูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ (Output Signal waveform from Correlation Receiver), V	v_c
รูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับแบบแมตช์ฟิลเตอร์ (Output Signal Waveform from Matched Filter Receiver), V	v_m
รูปคลื่นสัญญาณรับ (Received Signal Waveform), V	v_r
รูปคลื่นสัญญาณส่ง (Transmitted Signal Waveform), V	v_t
สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient)	Γ
น้ำหนักพัลส์ (Pulse Weight)	σ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) และอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ของการสื่อสาร UWB

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ของการสื่อสาร UWB โดยใช้สัญญาณส่ง UWB เป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต ช่องสัญญาณของการสื่อสาร ได้ใช้ช่องสัญญาณอวกาศว่าง และช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ที่ด้านรับกำหนดให้มีเครื่องรับเป็นแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ ได้นำสัญญาณที่ได้จากเครื่องรับทั้งสองแบบมาพิจารณาหาประสิทธิภาพเมื่อทราบถึงประสิทธิภาพของระบบที่มีการพิจารณาถึงเครื่องรับและสัญญาณส่งที่แตกต่างกัน จะทำให้สามารถออกแบบระบบการสื่อสาร UWB ที่มีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมต่อการใช้งานได้เป็นอย่างดี

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมติฐานให้มีสัญญาณ UWB ที่ใช้ส่งเป็น 3 แบบคือ 1) รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม 2) รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และ 3) รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต โดยส่งผ่านช่องสัญญาณ UWB 2 แบบ คือ 1) ช่องสัญญาณอวกาศว่าง และ 2) ช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น แล้วใช้เครื่องรับ 2 แบบด้วยกันคือ 1) เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ และ 2) เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ โดยในระบบการสื่อสารนี้ได้ตั้งสมมติฐานให้สายอากาศเป็นแบบไอโซทรอปิกที่มีอัตราขยายเท่ากับ 0 dB; เท่ากันทุกความถี่ ซึ่งในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพได้กำหนดให้มีแบบแผนการมอดูเลตเป็นแบบชั่วคราวต่างกัน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ของระบบการสื่อสาร UWB ที่มีเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์ โดยใช้สัญญาณส่ง UWB เป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต ซึ่งเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารของ FCC [5] ได้ใช้ช่องสัญญาณอวกาศว่าง [6]-[8] และช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น [9], [10] ที่สามารถพิจารณาในช่วงความถี่ที่กว้างสำหรับการสื่อสาร UWB ทำให้สามารถพิจารณาผลกระทบของความเพี้ยนรูปคลื่น UWB ที่เกิดจากช่องสัญญาณได้ ได้พิจารณาแบบแผนการส่งเป็นแบบแผนการมอดูเลตชั่วคราวต่างกัน ทางด้านรับใช้เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์ ที่มีฟังก์ชันการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารวิทยุแถบกว้างยิ่ง (UWB) ได้มีบทบาทในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีความสะดวกในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์สื่อสารหรือระหว่างเครือข่ายด้วยกันไม่ว่าจะเป็น เครือข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (WPAN) เครือข่ายพื้นที่ร่างกายไร้สาย (WBAN) เครือข่ายพื้นที่เฉพาะแห่งไร้สาย (WLAN) เครือข่ายภายในอาคารสำนักงาน และเครือข่ายในที่พักอาศัย ที่เป็นเช่นนี้เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ในด้านต่างๆ 5 ประการคือ 1) จำนวนข้อมูลที่สามารถส่งได้ 2) อัตราเร็วในการส่งข้อมูล 3) จำนวนของผู้ใช้ในระบบ 4) ระยะทางที่สามารถส่งได้ และ 5) ความสามารถในการทำงานร่วมกัน ในปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายแบบหลายสื่อได้เข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้น ซึ่งระบบการสื่อสารแบบนี้มีความต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลสูงและมีความต้องการ การส่งข้อมูลในปริมาณที่มาก จึงทำให้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ที่ใช้งาน นั่นคือการสื่อสาร UWB สำหรับการสื่อสารไมโครเวฟ เทคโนโลยี UWB ได้กลายมาเป็นหัวข้อสำคัญในการวิจัย เนื่องจาก ระบบ UWB มีราคาถูกและมีคุณสมบัติการใช้กำลังส่งที่ต่ำ [1]-[3] การสื่อสาร UWB มีความแตกต่างจากเทคโนโลยีการสื่อสารความถี่วิทยุ (RF) อื่นๆ อยู่ 2 ประการหลักๆ โดยประการแรกนั้นคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC) [4] ได้กำหนดให้การสื่อสาร UWB มีช่วงสเปกตรัมความถี่จาก 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz ซึ่งมากกว่าแบนด์วิดท์ของเทคโนโลยีการสื่อสารวิทยุในปัจจุบันอย่างมาก และประการที่สองคือ การส่งสัญญาณของการสื่อสาร UWB จะส่งเป็นพัลส์ของความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (PSD) ที่ช่วงเวลาแคบมากๆ โดยมีความถี่อยู่ในช่วงสเปกตรัมของความถี่ที่กว้างมาก แทนการใช้วิธีมอดูเลตสัญญาณส่งกับคลื่นพาห์เหมือนกับเทคโนโลยีการสื่อสารวิทยุแบบอื่นๆ โดยพัลส์ของสัญญาณ UWB นี้ถูกพิจารณาเป็นสัญญาณรบกวนสำหรับระบบการสื่อสารอื่นๆ เนื่องจากมี PSD ที่น้อยกว่าระดับของสัญญาณรบกวน ดังนั้นสัญญาณ UWB จึงสามารถใช้ความถี่ร่วมกับระบบวิทยุอื่นๆ ได้ เนื่องจากไม่เกิดการแทรกสอดต่อระบบวิทยุอื่นๆ

ระบบการสื่อสารต่างๆ รวมทั้งการสื่อสาร UWB ประสิทธิภาพของการสื่อสารระบบนั้นๆ ถือว่ามีความสำคัญมากซึ่งองค์ประกอบในการสื่อสารที่สำคัญส่วนหนึ่งคือประสิทธิภาพของเครื่องรับที่ใช้ในระบบการสื่อสาร ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผ่านความถี่เป็นไปตามเงื่อนไขกำลังสัญญาณรบกวนระหว่างอินพุตและเอาต์พุตมีค่าคงที่ หากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ UWB ที่รับได้กับสัญญาณแม่แบบ หลังจากนั้น ได้ศึกษาและวิเคราะห์หาประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ในแต่ละกรณีเปรียบเทียบกัน

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

เนื่องจากงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพของการสื่อสาร UWB [11], [12] ไม่ได้พิจารณาเกี่ยวกับนิยามของสัญญาณ UWB และข้อกำหนดสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC รวมทั้งไม่ได้พิจารณาถึงความเพี้ยนของสัญญาณ UWB ที่เกิดจากการส่งผ่านช่องสัญญาณ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้สัญญาณส่ง รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต ซึ่งเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารของ FCC ได้ใช้ช่องสัญญาณที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับการสื่อสาร UWB ที่สามารถพิจารณาในช่วงความถี่ที่กว้างสำหรับการสื่อสาร UWB ดังนั้นผลกระทบความเพี้ยนที่เกิดจากช่องสัญญาณ UWB เหล่านี้จึงถูกรวมเข้าไปด้วย ซึ่งช่องสัญญาณที่เลือกพิจารณามีทั้งหมด 2 แบบด้วยกันคือ ช่องสัญญาณอวกาศว่าง และช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ของการสื่อสาร UWB ที่มีเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC เป็นสัญญาณส่ง UWB ซึ่งช่องสัญญาณที่ใช้พิจารณาได้แก่ ช่องสัญญาณอวกาศว่าง และช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นที่มีพื้น ได้พิจารณาแบบแผนการส่งเป็นแบบแผนการมอดูเลตชั่วคราว

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ ซึ่งประกอบไปด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงระบบการสื่อสาร UWB ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ นิยามและข้อกำหนดของการสื่อสาร UWB แบบแผนการมอดูเลต UWB และบทสรุป

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสาร UWB ทางทฤษฎี ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ สัญญาณส่ง UWB ช่องสัญญาณ UWB สัญญาณรับ UWB เครื่องรับ UWB ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ประสิทธิภาพ BER และบทสรุป

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการคำนวณวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสาร UWB ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ ผลการคำนวณวิเคราะห์สัญญาณส่ง UWB ผลการคำนวณวิเคราะห์ช่องสัญญาณ UWB ผลการคำนวณวิเคราะห์สัญญาณรับ UWB ผลการคำนวณวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับ ผลการคำนวณวิเคราะห์ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ผลการคำนวณวิเคราะห์ประสิทธิภาพ BER และบทสรุป

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ซึ่งประกอบไปด้วยสรุปผลของประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR สรุปผลของประสิทธิภาพ BER ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา



บทที่ 2

ระบบการสื่อสาร UWB

2.1 บทนำ

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในการสื่อสารมากขึ้นเนื่องจากมีความสะดวกสบายในการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ภายในอาคาร ภายในสำนักงาน หรือแม้กระทั่งภายในบ้าน เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายนี้มีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่มาก ดังนั้นจึงทำให้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายให้สอดคล้องกับความต้องการนี้ ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสาร UWB ก็เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อรองรับความต้องการนี้

เทคโนโลยีการสื่อสาร UWB นั้นมีจุดเด่นที่ราคาถูก และใช้กำลังส่งที่ต่ำมาก การสื่อสาร UWB มีความแตกต่างจากเทคโนโลยีการสื่อสาร RF อื่นๆ โดยการสื่อสาร UWB ใช้พัลส์ที่มี PSD อยู่ในช่วงสเปกตรัมของความถี่ที่กว้างมากแทนการใช้คลื่นความถี่พาห์แบบแถบแคบ

เนื่องจากระบบการสื่อสาร UWB เป็นระบบการสื่อสารที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก และได้มีสเปกตรัมไปซ้อนทับกับระบบการสื่อสารที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น WLAN เป็นต้น ดังนั้น FCC จึงได้กำหนดให้ PSD ที่แผ่กระจายออกมามีระดับที่ต่ำมาก และได้กำหนดแบนด์วิดท์ของสัญญาณ UWB สำหรับการสื่อสารต้องอยู่ในช่วงแถบความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz นอกจากนี้ทาง FCC ยังได้นิยามสัญญาณ UWB เป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz

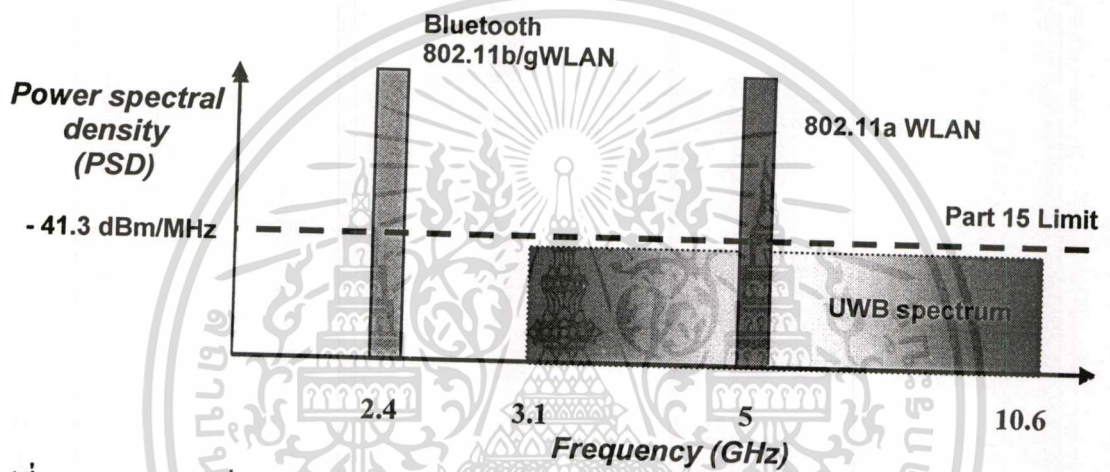
2.2 นิยามและข้อกำหนดของการสื่อสาร UWB [4]

2.2.1 นิยามของสัญญาณ UWB

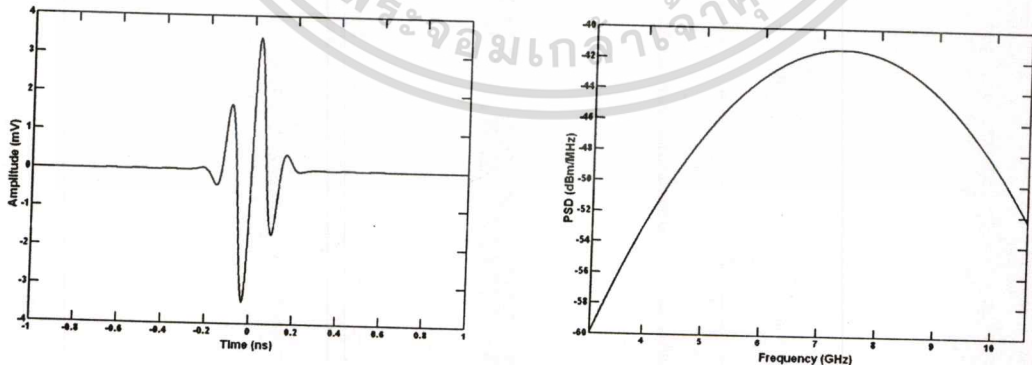
เทคโนโลยี UWB เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารที่ส่งสัญญาณเป็นพัลส์ที่มีความกว้างพัลส์แคบมากโดยมีหน่วยเป็น ns หรือน้อยกว่านั้น ซึ่งส่งผลให้เป็นเทคโนโลยีที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากสามารถส่งข้อมูลโดยมีอัตราการส่งที่มากกว่า 100 Mbps ในขณะที่เดียวกันเทคโนโลยีการสื่อสาร UWB นั้นมีการใช้กำลังส่งที่แปรผกผันกับอัตราการส่งข้อมูล กล่าวคือเทคโนโลยี UWB นี้มีการใช้กำลังของสัญญาณที่ต่ำมากๆ เนื่องจากสัญญาณ UWB มีกำลังที่ต่ำกว่าระดับของสัญญาณ RF อื่นๆ มาก ดังนั้น เมื่อทำการส่งสัญญาณในช่วงความถี่ของ UWB ที่กำหนดโดย FCC สัญญาณ UWB จะไม่ไปรบกวนสัญญาณของการสื่อสาร RF อื่นๆ จึงสามารถใช้เทคโนโลยี UWB ร่วมกับเทคโนโลยีการสื่อสาร RF อื่นๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเทคโนโลยีการสื่อสาร UWB นี้ มีการใช้ความถี่ช่วงเดียวกันกับระบบการสื่อสารแถบแคบอื่นๆ และเพื่อป้องกันปัญหาการแทรกสอดจากสัญญาณ UWB ทาง FCC จึงได้กำหนดช่วงความถี่ของเทคโนโลยี UWB ให้มีความถี่ตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz โดยมีแบนด์วิดท์สูงสุดเท่ากับ 7.5 GHz และจากการป้องกันปัญหาการรบกวนหรือการแทรกสอดจากสัญญาณ UWB ต่อสัญญาณ RF ในย่านความถี่เดียวกัน ทาง FCC จึงได้กำหนดให้สัญญาณ UWB ที่ถูกส่งออกมาต้องมี PSD ที่ต่ำกว่าระดับการจำกัดสัญญาณรบกวนส่วนที่ 15 หรือ -41.3 dBm/MHz ซึ่งเป็นระดับ PSD ของสัญญาณรบกวน โดยรูปที่ 2.1 เป็นการแสดงช่วงความถี่และ PSD ของระบบ UWB



รูปที่ 2.1 ช่วงความถี่และ PSD ของระบบการสื่อสาร UWB เทียบกับระบบการสื่อสารแถบแคบชนิดอื่น



รูปที่ 2.2 ลักษณะของสัญญาณพัลส์ใน โดเมนเวลาและ PSD ของสัญญาณใน โดเมนความถี่

สัญญาณของระบบ UWB จะเป็นสัญญาณพัลส์ โดยจะเป็นพัลส์แคบๆ ขนาดประมาณ 0.4 ns จึงทำให้มี PSD ที่กว้างมาก ดังนั้นจึงแผ่กระจายครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้างในไม่ช้ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับ GHz ลักษณะของสัญญาณพัลส์ในโดเมนเวลาและ PSD ของสัญญาณในโดเมนความถี่แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 สัญญาณ UWB จะถูกพิจารณาเป็นสัญญาณรบกวนสำหรับระบบการสื่อสารอื่น

เทคโนโลยีการสื่อสาร UWB เป็นการสื่อสารที่มีความแตกต่างจากระบบการสื่อสาร RF แบบทั่วไป โดยมีความแตกต่างที่เป็นส่วนหลักๆ คือ ในการสื่อสาร RF แบบทั่วไปนั้น เมื่อมีการส่งข้อมูลข่าวสารต้องมีคลื่นพาห์เพื่อนำพาข่าวสาร ดังนั้นที่ด้านส่งจึงจำเป็นต้องมีภาคการมอดูเลตทางความถี่ของสัญญาณ แต่ในการสื่อสาร UWB นี้มีการส่งข้อมูลข่าวสารที่เป็นลักษณะของพัลส์ที่มีความกว้างพัลส์แคบมากๆ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีภาคการมอดูเลตและดีมอดูเลตทางความถี่ ส่งผลให้เทคโนโลยีการสื่อสาร UWB มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารแถบแคบ และข้อที่สองคือ ความกว้างของแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการเข้าครอบครองในระบบการสื่อสาร UWB ได้ถูกกำหนดโดย FCC ซึ่งได้กำหนดให้สัญญาณ UWB ต้องมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz โดยแบนด์วิดท์ f_b ได้จาก

$$f_b = f_H - f_L \quad (2.1)$$

เมื่อ f_H คือความถี่สูงสุด และ f_L คือความถี่ต่ำสุด ของสัญญาณ UWB โดยค่าความถี่สูงสุดและต่ำสุดของแถบความถี่นี้ ได้พิจารณาที่ตำแหน่งที่ระดับสูงสุดลดลงมา 10 dB

นอกเหนือจากแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการเข้าครอบครอง ทาง FCC ยังได้กำหนดแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนของระบบ UWB เข้ามาด้วย โดยกำหนดให้สัญญาณ UWB ต้องมีการใช้แบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่า หรือเท่ากับ 0.2 ซึ่งแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วน f_f นี้สามารถหาได้จาก

$$f_f = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \quad (2.2)$$

2.2.2 ข้อกำหนดของการสื่อสาร UWB

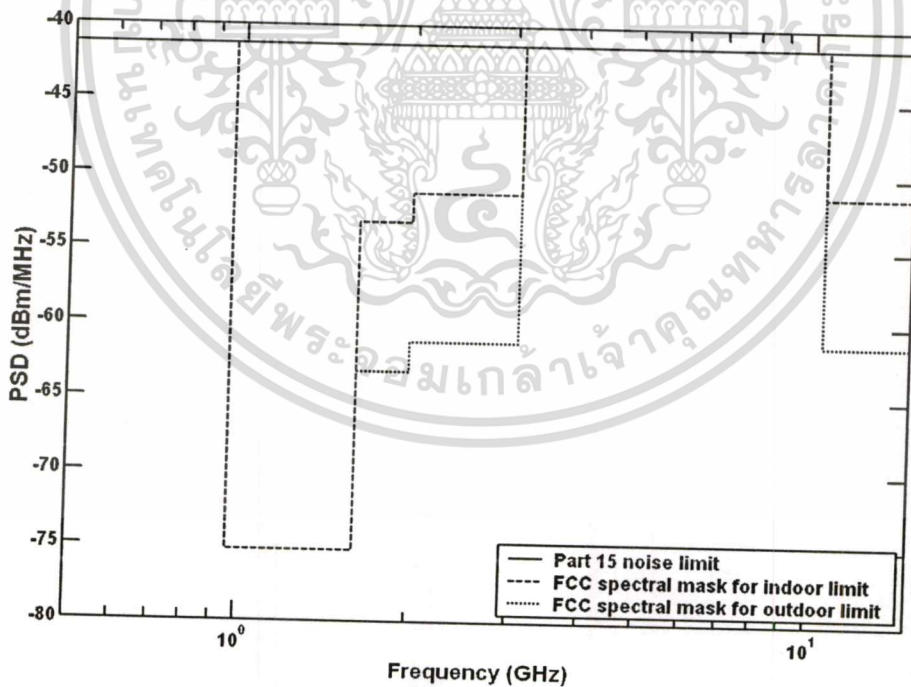
FCC ได้ออกข้อกำหนดเกี่ยวกับการใช้งานความถี่และแบนด์วิดท์สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสาร UWB โดยมีความถี่การใช้งานตั้งแต่ 3.1 ถึง 10.6 GHz และมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือกำหนดให้มีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz นอกจากนี้แล้วทาง FCC ยังได้อนุญาตให้อุปกรณ์ของระบบสื่อสาร UWB สามารถทำงานภายใต้การยกเว้นการอนุญาตในระดับข้อจำกัดของสัญญาณรบกวนส่วนที่ 15 ของกฎ FCC หรือ -41.3 dBm/MHz และยังสามารถกำหนดเกี่ยวกับการควบคุม PSD ของสัญญาณ UWB สำหรับกฎข้อบังคับของ FCC ได้กำหนดข้อจำกัด PSD ที่แผ่กระจายออกมาของระบบ UWB สำหรับใช้ในการสื่อสารภายในและภายนอกอาคารดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งการเปรียบเทียบระหว่างข้อกำหนดการจำกัด PSD ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการสื่อสาร UWB ที่ทาง FCC ได้กำหนดทั้งภายในและภายนอกอาคารได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 และได้จัดชนิดตามการใช้งานของอุปกรณ์ UWB ที่ย่านความถี่ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดการแผ่กระจาย PSD ที่กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคาร

แถบความถี่ (MHz)	ภายในอาคาร	ภายนอกอาคาร
	PSD (dBm/MHz)	PSD (dBm/MHz)
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



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อกำหนดภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ประเภทของการใช้งานที่ได้รับอนุมัติโดย FCC

การประยุกต์การใช้งาน	แถบความถี่ที่ใช้งาน
ระบบการสื่อสารและระบบการวัด	3.1-10.6 GHz
ระบบการสร้างภาพและเรดาร์ทะลุพื้น	< 960MHz หรือ 3.1-10.6 GHz
ระบบทะลุกำแพง	< 960MHz หรือ 1.99 -10.6 GHz
ระบบประเวศระวังภัย	1.99 -10.6 GHz
ยานพาหนะ	24 - 29 GHz

2.3 แบบแผนการมอดูเลต UWB [13]

พัลส์ของสัญญาณ UWB เพียงหนึ่งพัลส์ไม่สามารถประกอบเป็นด้วยข่าวสารได้ ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงข้อมูลข่าวสารทางดิจิทัลมาเป็นพัลส์อนาล็อก ซึ่งหมายถึงการมอดูเลตในระบบการสื่อสาร UWB ซึ่งมีการมอดูเลตอยู่หลายวิธี โดยรูปแบบการมอดูเลตสามารถกำหนดได้เป็น 2 ชนิดพื้นฐานคือ เทคนิคการมอดูเลตทางเวลา และเทคนิคการมอดูเลตทางรูปร่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วิธีการมอดูเลตที่แตกต่างกันสำหรับการสื่อสาร UWB

วิธีการมอดูเลตที่นิยมคือ การมอดูเลตแบบเปลี่ยนตำแหน่ง (PPM) เมื่อแต่ละพัลส์ถูกหน่วงเวลาหรือถูกส่งในช่วงเวลาที่แน่นอน ดังนั้นในระบบการสื่อสารแบบไบนารี จึงสามารถเลื่อนเวลา

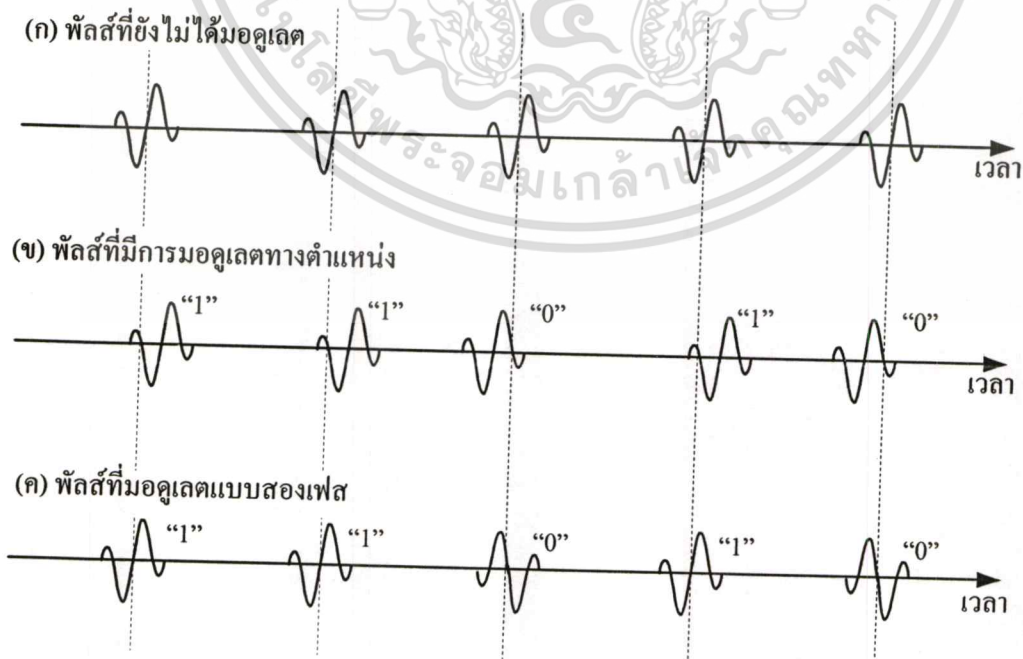
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ 2 แบบคือ เดินหน้า หรือ ถอยหลัง โดยในการกำหนดการหน่วงเวลาสำหรับแต่ละพัลส์ในระบบ แถวลำดับ M ที่สามารถสร้างขึ้นได้

สำหรับการมอดูเลตแบบอื่นๆ ที่มีการกลับพัลส์ นั่นคือมีการสร้างพัลส์ด้วยเฟสที่ตรงข้ามกัน ซึ่งเป็นที่รู้จักโดยทั่วไปว่าเป็น การมอดูเลตแบบสองเฟส (BPM) การมอดูเลตที่น่าสนใจอีกเทคนิคหนึ่งคือการมอดูเลตแบบตั้งฉาก (OPM) ซึ่งต้องการพัลส์ที่มีรูปร่างพิเศษที่ถูกสร้างขึ้นมา โดยแต่ละพัลส์นั้นมีรูปร่างตั้งฉากซึ่งกันและกัน

วิธีการมอดูเลตอย่างง่ายที่รู้จักกันดี เช่น การคีย์แบบออน-ออฟ (OOK) เป็นวิธีการมอดูเลตที่มีการส่งหรือไม่ส่งพัลส์ออกมา โดยขึ้นอยู่กับข่าวสารดิจิทัลที่ต้องการมอดูเลต ที่เป็น "1" หรือ "0" ตามลำดับ การมอดูเลตขนาดพัลส์ PAM เป็นเทคนิคการมอดูเลตที่ให้ขนาดของพัลส์แปรเปลี่ยนตามข้อมูลข่าวสารดิจิทัลที่ต้องการมอดูเลต

ในการอธิบายถึงเทคนิคการมอดูเลต อันดับแรกจะยกตัวอย่างเทคนิคการมอดูเลตที่นิยม 2 รูปแบบคือ PPM และ BPM ซึ่งสามารถเปรียบเทียบวิธีการมอดูเลตทั้งสองเทคนิคนี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5 รูปที่ 2.5 (ก) เป็นพัลส์ที่ยังไม่ได้ทำการมอดูเลต ตัวอย่างของพัลส์แบบ PPM ที่แสดงเป็นข้อมูลที่เป็บบิต "1" จะถูกหน่วงเวลาไป (พัลส์เคลื่อนที่ไปทางขวา) ส่วนพัลส์ที่แสดงเป็นข้อมูลที่เป็บบิต "0" จะถูกส่งก่อนพัลส์ที่ยังไม่ได้มอดูเลต (พัลส์เคลื่อนที่ไปทางซ้าย) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) สำหรับพัลส์แบบ BPM ซึ่งเป็นพัลส์ที่ถูกกลับเฟสจากข้อมูลบิต "0" และพัลส์ที่ไม่ได้กลับเฟส เป็นการจากข้อมูลบิต "1" ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 (ค)



รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบวิธี PPM และ BPM สำหรับการสื่อสาร UWB ขั้ประโยชน์ด้านการค้า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 PPM

พารามิเตอร์ที่สำคัญใน PPM คือ ค่าของการหน่วงเวลาของพัลส์ โดยการกำหนดให้พัลส์เป็นรูปคลื่นใดๆ $p(t)$ ซึ่งเราสามารถมอดูเลตข้อมูลโดยใช้พารามิเตอร์เวลาประวิง τ_i จะได้พัลส์ที่ถูกลมอดูเลต s_i เป็น

$$s_i = p(t - \tau_i) \quad (2.3)$$

เมื่อ t คือเวลา ตัวอย่างเช่น ถ้ากำหนดให้ $\tau_1 = -0.75$ $\tau_2 = -0.25$ $\tau_3 = 0.25$ และ $\tau_4 = 0.75$ s จะได้ระบบ PPM แบบแฉวลำดับ 4 ซึ่งจะได้พัลส์ที่ถูกลมอดูเลตทั้งหมดสี่แบบดังนี้

$$s_1 = p(t + 0.75) \quad (2.4ก)$$

$$s_2 = p(t + 0.25) \quad (2.4ข)$$

$$s_3 = p(t - 0.25) \quad (2.4ค)$$

$$s_4 = p(t - 0.75) \quad (2.4ง)$$

ข้อดีของ PPM ก็คือมีความง่ายในการประวิงเวลาหรือกล่าวได้ว่าระบบ UWB ต้องมีการควบคุมเวลาที่มีความละเอียดสูงสำหรับการมอดูเลตพัลส์ โดยเป็นหน่วยถึง ns ได้อย่างแม่นยำ

2.3.2 BPM

BPM สามารถกำหนดได้ว่าเป็นชนิดของการมอดูเลตรูปร่างพัลส์ ซึ่งเฟสในระบบการสื่อสารแถบแคบถูกกำหนดเป็นการหน่วงเวลาของคลื่นไซน์ แต่สำหรับระบบการสื่อสาร UWB การมอดูเลตแบบสองเฟสสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายโดยเป็นการกลับรูปร่างของพัลส์ ซึ่งจะได้

$$s_i = \sigma_i p(t) \quad (2.5)$$

เมื่อ σ_i เป็นน้ำหนักของพัลส์ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ -1 สำหรับไบนารีจะมีรูปร่างพัลส์อยู่ 2 แบบคือ s_1 และ s_2 ที่กำหนดได้เป็น

$$s_1 = p(t) \quad (2.6ก)$$

$$s_2 = -p(t) \quad (2.6ข)$$

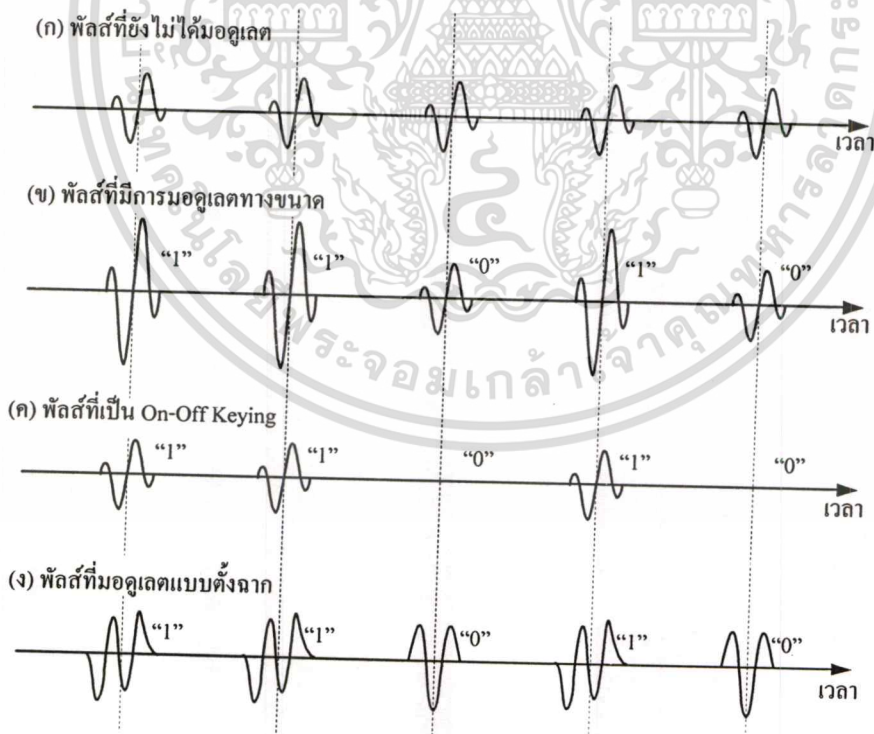
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งในเหตุผลสำหรับการใช้ BPM โดยเฉพาะในการเปรียบเทียบกับ PPM ซึ่งเป็นเทคนิคการมอดูเลตแบบเฟสเดียวคือ ประสิทธิภาพทางกำลังของสัญญาณในการตรวจจับ นั่นคือ BPM เป็นวิธีการมอดูเลตแบบชั่วต่างกัน ส่วน PPM เมื่อแยกพัลส์ที่มีการประวิงเวลาสำหรับแต่ละตำแหน่งพัลส์นั้น จะเป็นวิธีการมอดูเลตแบบชั่วตั้งฉาก

ตัวอย่างง่ายๆ สำหรับการแสดงถึงข้อดีของ BPM คือ เนื่องจาก PPM ต้องมีการประวิงเวลาพัลส์อยู่เสมอ จึงเป็นข้อจำกัดหลักเมื่อพัลส์ถูกส่งอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ BPM ใช้เพียงแค่การกลับรูปร่างของพัลส์ให้มีชั่วต่างกัน ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ง่ายกว่าการประวิงเวลาของ PPM มาก

2.3.3 วิธีการมอดูเลตแบบอื่นๆ

รูปที่ 2.6 (ก) แสดงขบวนพัลส์ที่ยังไม่ได้มอดูเลตซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบ รูปที่ 2.6 (ข) แสดงตัวอย่างของ PAM ซึ่งจะมีขนาดมากเมื่อส่งบิต "1" และมีขนาดน้อยลงเมื่อส่งบิต "0" ในขณะที่ 2.6 (ค) แสดงตัวอย่างของ OOK โดยพัลส์จะส่งเมื่อเป็นบิต "1" และจะไม่มีการส่งพัลส์เมื่อเป็นบิต "0" และรูปที่ 2.6 (ง) แสดงตัวอย่างของ OPM ซึ่งกำหนดให้บิต "1" เป็นพัลส์เฮอริเมเทียนที่ถูกแก้ไขอันดับที่ 3 และบิต "0" เป็นพัลส์เฮอริเมเทียนที่ถูกแก้ไขอันดับที่ 2



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบของเทคนิคการมอดูเลต สำหรับการสื่อสาร UWB

2.4 บทสรุป

บทที่ 2 นี้ ได้กล่าวถึงข้อกำหนดและระเบียบข้อบังคับของการสื่อสาร UWB ที่ได้มีการกำหนดโดย FCC ซึ่งได้แสดงถึงแถบความถี่ใช้งาน ตลอดจนข้อกำหนดของ PSD นอกจากนั้นแล้วยังได้กล่าวถึงการมอดูเลตแบบต่างๆ ของสัญญาณ UWB เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของพัลส์ที่ทำการมอดูเลต ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือ การมอดูเลตที่มีพื้นฐานทางเวลาและทางรูปร่างของพัลส์



บทที่ 3

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสาร UWB ทางทฤษฎี

3.1 บทนำ

ในบทที่ 3 นี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีสำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสาร UWB โดยสัญญาณส่ง UWB เป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต ซึ่งเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารของ FCC [5] โดยกำหนดให้สายอากาศเป็นสายอากาศไอโซทรอปิก และได้ใช้ช่องสัญญาณที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับการสื่อสาร UWB ที่สามารถพิจารณาในช่วงความถี่ที่กว้างสำหรับการสื่อสาร UWB [6]-[10] ดังนั้น ผลกระทบความถี่ที่เกิดขึ้นจากช่องสัญญาณ UWB เหล่านี้จึงถูกรวมเข้าไปด้วย แล้วได้กล่าวถึงทฤษฎีการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์ ที่ใช้แบบแผนมอดูเลตแบบชั่วคราวต่างกันและแบบตั้งฉาก

3.2 สัญญาณส่ง UWB [5]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาสัญญาณส่งเป็นรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต โดยกำหนดให้รูปคลื่นเป็นสัญญาณแรงดัน ในที่นี้จะกำหนดให้ PSD ของสัญญาณมีส่วนประกอบต่อเนื่องอย่างเดียว ดังนั้น PSD ของสัญญาณส่ง UWB S หาได้จาก

$$S(f) = \frac{1}{T_s} |V_r(f)|^2 \quad (3.1)$$

เมื่อ T_s คือช่วงเวลาในหนึ่งบิต และ V_r คือความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง UWB โดยที่ความหนาแน่นสเปกตรัมสามารถคำนวณได้จากการแปลงฟูรีเยร์ของรูปคลื่นสัญญาณส่ง UWB ในโดเมนเวลา v ,

$$V_r(f) = \int_{-\infty}^{\infty} v_r(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.2)$$

ในการพิจารณา PSD ที่แผ่กระจายออกมาจะกำหนดให้สายอากาศส่งเป็นสายอากาศแบบไอโซทรอปิก ได้พิจารณาให้อิมพีแดนซ์เครื่องส่งและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศส่งมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นจำนวนจริง เพื่อให้ได้กรณีในอุดมคติที่ PSD มีการแผ่กระจายออกมามากที่สุด ซึ่งได้กำหนดให้อิมพีแดนซ์เครื่องส่งและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศส่งเป็น $R \Omega$ และในวิทยานิพนธ์นี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงการสูญเสียเชิงวิถีและระบบการวัด PSD ที่ได้นำมาใช้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้น PSD ที่แผ่กระจายออกมาจากสายอากาศส่ง S_R สามารถหาได้จาก

$$S_R(f) = \frac{1}{4R} S(f) \quad (3.3)$$

3.2.1 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

รูปคลื่นในโดเมนเวลาและฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมกำหนดโดย

$$v_t(t) = \frac{A}{f_b} [f_H \text{sinc}(2f_H t) - f_L \text{sinc}(2f_L t)] \quad (3.4)$$

$$V_t(f) = \begin{cases} \frac{A}{2f_b} & \|f - f_c\| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & \|f - f_c\| > \frac{f_b}{2} \end{cases} \quad (3.5)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดสูงสุด f_b คือ แบนด์วิดท์ f_c คือ ความถี่กลาง $f_L = f_c - f_b/2$ คือความถี่ต่ำสุด และ $f_H = f_c + f_b/2$ คือความถี่สูงสุด

รูปคลื่นนี้มีความหนาแน่นสเปกตรัมเป็นรูปสี่เหลี่ยมทั้งในด้านความถี่บวกและความถี่ลบ โดยความหนาแน่นสเปกตรัมจะมีขนาดคงที่เท่ากับ $A/(2f_b)$ อยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ $-f_H$ ถึง $-f_L$ และ f_L ถึง f_H และจะมีเฟสเป็นศูนย์ รูปคลื่นนี้เป็นรูปคลื่น UWB ในอุดมคติ ดังนั้นจึงใช้พิจารณาหาขอบจำกัดสูงสุดที่เป็นไปได้ของแบนด์วิดท์มากที่สุด แอมพลิจูดมากที่สุด และกำลังมากที่สุดของรูปคลื่น UWB รูปคลื่นนี้จะมีความสมมาตรแบบฟังก์ชันคู่ และมีส่วนประกอบกระแสตรง (DC) เป็นศูนย์

3.2.2 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต

รูปคลื่นในโดเมนเวลาและฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตกำหนดโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_i(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_c t) & |t| \leq \frac{t_b}{2} \\ 0 & |t| > \frac{t_b}{2} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$V_i(f) = \frac{At_b}{j2} \{ \text{sinc}[t_b(f - f_c)] - \text{sinc}[t_b(f + f_c)] \} \quad (3.7)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม f_c คือความถี่พาห้ และ t_b คือความกว้างพัลส์

รูปคลื่นนี้เป็นการมอดูเลตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีแอมพลิจูด A และมีความกว้าง t_b (จาก $-t_b/2$ ถึง $t_b/2$) ด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ f_c เนื่องจากรูปคลื่นสี่เหลี่ยมนี้มีความสมมาตรแบบฟังก์ชันคู่ จึงใช้ฟังก์ชันไซน์ซึ่งมีความสมมาตรแบบฟังก์ชันคี่มามอดูเลตรูปคลื่นนี้ เพื่อให้ส่วนประกอบ DC ของรูปคลื่นมีค่าเป็นศูนย์

3.2.3 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต

รูปคลื่นในโดเมนเวลาและฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตกำหนดโดย

$$v_i(t) = A e^{-(t/t_d)^2} \sin(2\pi f_c t) \quad (3.8)$$

$$V_i(f) = \frac{At_d \sqrt{\pi}}{j2} \left[e^{-\pi^2 t_d^2 (f - f_c)^2} - e^{-\pi^2 t_d^2 (f + f_c)^2} \right] \quad (3.9)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดสูงสุดของรูปคลื่นเกาส์ f_c คือความถี่พาห้ และ $\pm t_d$ คือเวลาที่รูปคลื่นเกาส์มีแอมพลิจูดลดลงเป็น $1/e$ เท่าของแอมพลิจูดสูงสุด

รูปคลื่นนี้เป็นการมอดูเลตรูปคลื่นเกาส์ที่มีแอมพลิจูดสูงสุด A ที่เวลา $t=0$ และมีแอมพลิจูดลดลงเป็น A/e ที่เวลา $t = \pm d$ ด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ f_c เนื่องจากรูปคลื่นเกาส์นี้มีความสมมาตรแบบฟังก์ชันคู่จึงใช้ฟังก์ชันไซน์ซึ่งมีความสมมาตรแบบฟังก์ชันคี่มามอดูเลตรูปคลื่นนี้เพื่อให้ส่วนประกอบ DC ของรูปคลื่นมีค่าเป็นศูนย์เหมือนกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต

3.3 ช่องสัญญาณ UWB

ในการพิจารณาช่องสัญญาณ UWB จะกำหนดให้สายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นสายอากาศแบบไอโซทรอปิก ซึ่งมีเกนเท่ากับ 1 หรือ 0 dBi ที่ทุกช่วงความถี่ ช่องสัญญาณ UWB จะพิจารณาในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เพื่อที่จะสามารถพิจารณาในช่วงความถี่ได้กว้าง

3.3.1 ช่องสัญญาณอวกาศว่าง

สูตรการส่งผ่านอวกาศว่างของฟรีส [14] เป็นที่รู้จักกันดีและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับช่องสัญญาณแถบแคบ โดยพิจารณาในรูปแบบจำนวนจริงในความถี่ที่กำหนด อัตราขยายอวกาศว่างของฟรีสนิยามเป็น

$$G_f = \frac{c^2}{16\pi^2 f^2 d^2} \quad (3.10)$$

เมื่อ d เป็นระยะทาง และ c เป็นความเร็วแสง

สำหรับช่องสัญญาณอวกาศว่าง UWB ได้ใช้สูตรการส่งผ่านอวกาศว่างของฟรีสในรูปแบบเชิงซ้อน [6]-[8] ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณอวกาศว่าง H_f สามารถเขียนได้เป็น

$$H_f(f) = \frac{c}{4\pi|f|d} e^{-j2\pi fd/c} \quad (3.11)$$

สมการนี้เป็นไปตามคุณสมบัติของความสมเหตุสมผล (Causality) ซึ่งจะมีค่าที่ความถี่บวกเป็นสังยุคเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของค่าที่ความถี่ลบ

3.3.2 ช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น [9], [10]

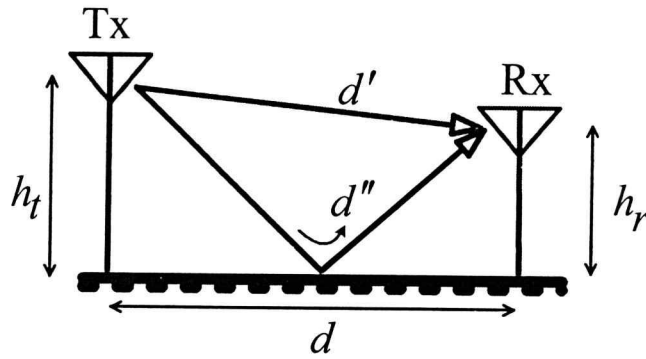
แบบจำลองการสะท้อนพื้นได้พิจารณาวิถีตรงและวิถีการสะท้อนพื้นดังแสดงในรูปที่ 3.1 ระยะทางของวิถีตรงแทนด้วย d' และระยะทางของวิถีสะท้อนแทนด้วย d'' ซึ่งหาได้จาก

$$d' = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \quad (3.12)$$

$$d'' = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} \quad (3.13)$$

เมื่อ h_t เป็นความสูงของสายอากาศส่ง และ h_r เป็นความสูงของสายอากาศรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แบบจำลองการสะท้อนพื้น

ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณวิถีตรง H_d และวิถีสะท้อน H_r จะพิจารณาในทำนองเดียวกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณอวกาศว่าง ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$H_d(f) = \frac{c}{4\pi|f|d'} e^{-j2\pi fd'/c} \quad (3.14)$$

$$H_r(f) = \Gamma \frac{c}{4\pi|f|d''} e^{-j2\pi fd''/c} \quad (3.15)$$

เมื่อ Γ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อน

ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น H_g จะเป็นการรวมกันของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณวิถีตรงและวิถีสะท้อน ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} H_g(f) &= H_d(f) + H_r(f) \\ &= \frac{c}{4\pi|f|d_g} e^{-j\theta_g} \end{aligned} \quad (3.16)$$

เมื่อ

$$d_g = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{d'^2} + \frac{2\Gamma}{d'd''} \cos\left[\frac{2\pi f(d'' - d')}{c}\right] + \frac{\Gamma^2}{d''^2}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_g = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{1}{d'} \sin \left(\frac{2\pi f d'}{c} \right) + \frac{\Gamma}{d''} \sin \left(\frac{2\pi f d''}{c} \right)}{\frac{1}{d'} \cos \left(\frac{2\pi f d'}{c} \right) + \frac{\Gamma}{d''} \cos \left(\frac{2\pi f d''}{c} \right)} \right]$$

3.4 สัญญาณรับ UWB

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรับ UWB V_r หาได้จากการนำความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งคูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H(f) \quad (3.19)$$

รูปคลื่นในโดเมนเวลาของสัญญาณรับ UWB หาได้จากการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับของความหนาแน่นสเปกตรัม ซึ่งจะได้

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi f t} df \quad (3.20)$$

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาความหนาแน่นสเปกตรัมสัญญาณส่ง UWB V_t เป็นของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ส่วนฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ H ได้พิจารณาเป็นของช่องสัญญาณอวกาศว่าง และช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3

3.5 เครื่องรับ UWB [15]-[17]

สำหรับเครื่องรับ UWB ได้พิจารณาเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์ที่ใช้สัญญาณแม่แบบเป็นสัญญาณส่ง โดยกำหนดให้ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับทั้งสองชนิดนี้เป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนระหว่างอินพุตและเอาต์พุตดังนี้

3.5.1 เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์

เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์หรือเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในทางทฤษฎี ซึ่งจะมีความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณแม่แบบเป็นสัญญาณเชิงซ้อนของ V_r โดยมีอัตราขยายเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนที่ ดังนั้น ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ H สามารถเขียนได้เป็นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_m(f) = \frac{\sqrt{f_b}}{\sqrt{\int_0^\infty |V_r(f)|^2 df}} V_r^*(f) \quad (3.21)$$

เมื่อ * เป็นตัวดำเนินการสังยุคเชิงซ้อน

ผลตอบสนองอิมพัลส์หรือสัญญาณแม่แบบของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ h_m สามารถหาได้จากการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$h_m(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_m(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.22)$$

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ V_m สามารถคำนวณได้จาก

$$V_m(f) = H_m(f) \cdot V_r(f) \quad (3.23)$$

รูปคลื่นในโดเมนเวลาของสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับแมตซ์ฟิลเตอร์หาได้จากการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับของความหนาแน่นสเปกตรัม ซึ่งจะได้

$$v_m(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_m(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.24)$$

3.5.2 เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์

เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์จะใช้สัญญาณส่ง UWB เป็นสัญญาณแม่แบบ ดังนั้น จะมีความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณแม่แบบเป็นสังยุคเชิงซ้อนของ V_r โดยมีอัตราขยายเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนคงที่ ดังนั้น ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ H_c สามารถเขียนได้เป็น

$$H_c(f) = \frac{\sqrt{f_b}}{\sqrt{\int_0^\infty |V_r(f)|^2 df}} V_r^*(f) \quad (3.25)$$

ผลตอบสนองอิมพัลส์หรือสัญญาณแม่แบบของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ h_c สามารถหาได้จากการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

เอกรงค์ฉบับนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_c(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.26)$$

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ V_c สามารถคำนวณได้จาก

$$V_c(f) = H_c(f) \cdot V_r(f) \quad (3.27)$$

รูปคลื่นในโดเมนเวลาของสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับสหสัมพันธ์หาได้จากการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับของความหนาแน่นสเปกตรัม ซึ่งจะได้

$$v_c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_c(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.28)$$

3.6 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR [16], [17]

เนื่องจากได้กำหนดให้ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์มีอัตราขยายเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนคงที่ ดังนั้น อัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์จึงสามารถนิยามเป็นอัตราระหว่างกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ได้จากเครื่องรับต่อกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ อัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ G_m และแบบสหสัมพันธ์ G_c สามารถคำนวณได้จาก

$$G_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} v_m^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} v_r^2(t) dt} \quad (3.29)$$

$$G_c = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} v_c^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} v_r^2(t) dt} \quad (3.30)$$

อัตราขยาย SNR สามารถนำมาใช้หาความสัมพันธ์ระหว่าง SNR ที่ด้านอินพุตกับที่ด้านเอาต์พุตของเครื่องรับ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็นอัตราระหว่าง SNR ที่ด้านเอาต์พุตต่อ SNR ที่ด้านอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ประสิทธิภาพ BER [15]-[18]

ประสิทธิภาพ BER สามารถพิจารณาโดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่รับได้กับสัญญาณแม่แบบ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ C_m และแบบสหสัมพันธ์ C_c สามารถเขียนได้เป็น

$$C_m = \frac{\max |r_{v_r, h_m}(\tau)|}{\sqrt{\max |r_{v_r}(\tau)| \cdot \max |r_{h_m}(\tau)|}} \quad (3.31)$$

$$C_c = \frac{\max |r_{v_r, h_c}(\tau)|}{\sqrt{\max |r_{v_r}(\tau)| \cdot \max |r_{h_c}(\tau)|}} \quad (3.32)$$

เมื่อ r_{fg} เป็นสหสัมพันธ์แบบไขว้ระหว่างสัญญาณ $f(t)$ กับ $g(t)$ และ r_f เป็นสหสัมพันธ์แบบออโตของฟังก์ชัน $f(t)$ ซึ่งมีนิยามเป็น

$$r_{fg}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t+\tau)dt$$

$$r_f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)f(t+\tau)dt$$

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะเป็นพารามิเตอร์แสดงถึงประสิทธิภาพของเครื่องรับในการตรวจจับสัญญาณ UWB ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1 เมื่อสัญญาณแม่แบบของเครื่องรับเหมือนกับสัญญาณรับ UWB และจะมีค่าเป็น 0 เมื่อสัญญาณแม่แบบของเครื่องรับเป็นออร์โธโกนอลกับสัญญาณรับ UWB ดังนั้น สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งมีสัญญาณแม่แบบเหมือนกับสัญญาณรับ UWB จะมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ ซึ่งเป็นเครื่องรับในทางอุดมคติที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของเครื่องรับ UWB

แบบแผนการมอดูเลต UWB สามารถแบ่งออกเป็นแบบแผนมอดูเลตชั่วคราวต่างกัน เช่น BPM และแบบแผนมอดูเลตตั้งฉาก เช่น PPM ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 สำหรับเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นเครื่องรับในอุดมคติ จะมีประสิทธิภาพ BER เท่ากับประสิทธิภาพ BER เชิงทฤษฎีในสัญญาณรบกวนแบบไวท์เกาส์ (AWGN) ของแบบแผนมอดูเลตชั่วคราวต่างกัน $B_{m,a}$ และแบบแผนมอดูเลตตั้งฉาก $B_{m,o}$ ซึ่งหาได้จาก

$$B_{m,a} = Q \left(\sqrt{\frac{2C_m G_m f_b}{B_r} S/N} \right) \quad (3.33)$$

$$B_{m,o} = Q \left(\sqrt{\frac{C_m G_m f_b}{B_r} S/N} \right) \quad (3.34)$$

เมื่อ B_r เป็นอัตราบิต S/N เป็น SNR ที่อินพุตของเครื่องรับ และ

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

สำหรับเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ ประสิทธิภาพ BER ใน AWGN ของแบบแผนมอดูเลต
 ขั้วต่างกัน $B_{c,a}$ และแบบแผนมอดูเลตตั้งฉาก $B_{c,o}$ สามารถหาได้จาก

$$B_{c,a} = Q \left(\sqrt{\frac{2C_c G_c f_b}{B_r} S/N} \right) \quad (3.35)$$

$$B_{c,o} = Q \left(\sqrt{\frac{C_c G_c f_b}{B_r} S/N} \right) \quad (3.36)$$

SNR จะถูกนอร์มัลไลซ์ด้วยกำลังเฉลี่ยของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นกำลังเฉลี่ยมาก
 สุดในเชิงทฤษฎีของสัญญาณ UWB สำหรับพิจารณาสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC

3.8 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีสำหรับการหาประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ซึ่งได้ใช้
 สัญญาณส่งที่ต่างกัน 3 รูปแบบคือ รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และ
 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต โดยมีช่องสัญญาณสำหรับการสื่อสาร UWB ที่พิจารณาความเพี้ยนและ
 ใช้เครื่องรับเป็นแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ และแบบสหสัมพันธ์ จากนั้นจึงได้หาอัตราขยาย SNR และ
 BER โดยได้กำหนดให้มีแบบแผนการมอดูเลตแบบขั้วตั้งฉากและแบบขั้วต่างกัน ทฤษฎีทั้งหมดนี้
 จะนำมาใช้ในการศึกษาหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร UWB ในบทต่อไป

บทที่ 4

ผลการคำนวณวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสาร UWB

4.1 บทนำ

ในบทที่ 4 นี้เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ของการสื่อสาร UWB ซึ่งเป็นการจำลองแบบโดยมีเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตและรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตเป็นสัญญาณส่ง UWB โดยได้พิจารณาช่องสัญญาณ 2 แบบคือช่องสัญญาณอวกาศว่าง UWB และช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นที่ได้ทำการศึกษาจากบทที่ผ่านมา โดยกำหนดให้อัตราบิตเป็น 110 Mbps ซึ่งจะทำให้มีช่วงเวลาในหนึ่งรูปคลื่นเป็น 9.09 ns และกำหนดให้ระยะทางเป็น 10 m พารามิเตอร์ที่กำหนดนี้เป็นไปตามมาตรฐานของ IEEE 802.15.3a [19] ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้สัญญาณส่ง ช่องสัญญาณ และเครื่องรับที่แตกต่างกันเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบจากสัญญาณส่งและช่องสัญญาณ รวมถึงประสิทธิภาพของเครื่องรับที่มีต่อประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ของการสื่อสาร UWB

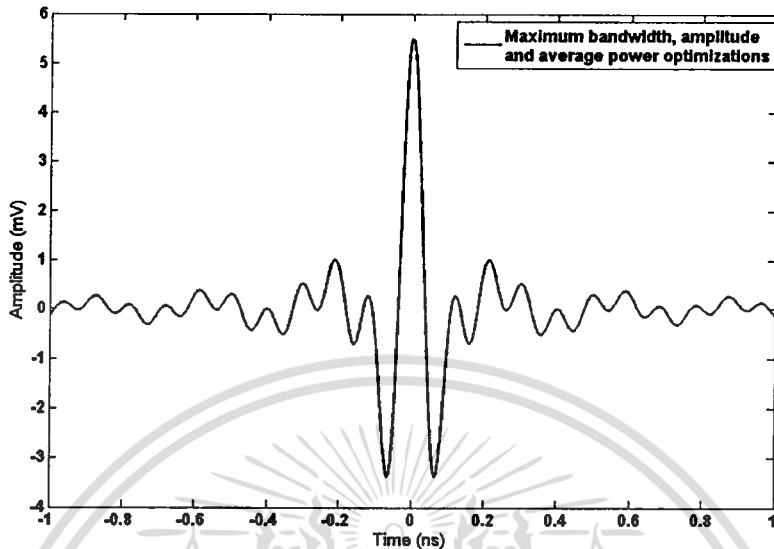
4.2 ผลการคำนวณวิเคราะห์สัญญาณส่ง UWB [5]

สัญญาณส่ง UWB ที่นำมาศึกษาคือรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตและรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต ซึ่งกำหนดให้อัตราบิตเป็น 110 Mbps ซึ่งจะมีช่วงเวลาในหนึ่งรูปคลื่นเป็น 9.09 ns และได้กำหนดให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศส่งและเครื่องส่งเป็น 50 Ω รูปคลื่นที่ใช้ส่งทั้งหมดนี้จะถูกทำให้เป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ภายใต้เงื่อนไขที่ทำให้สัญญาณมีแบนด์วิดท์กว้างสุด แอมพลิจูดสูงสุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุด

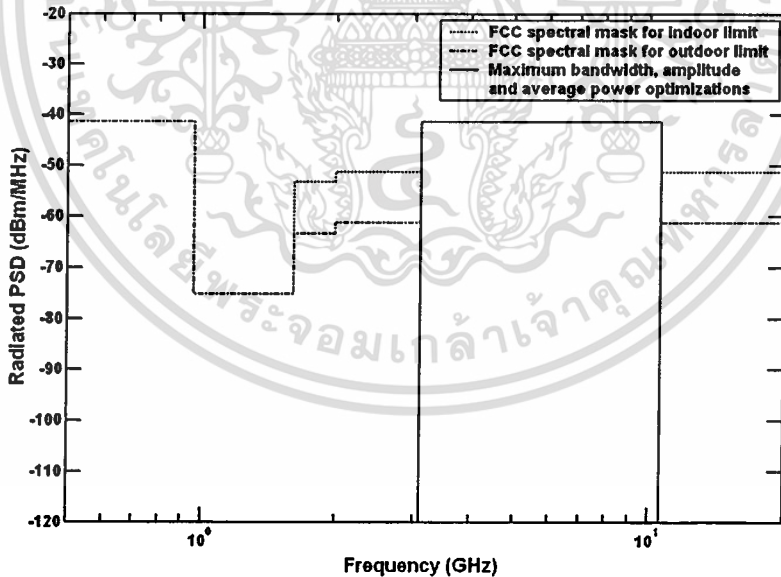
4.2.1 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลาหาได้จากสมการที่ (3.4) และ PSD ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมสามารถหาได้จากสมการที่ (3.5) ซึ่งเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารภายใต้เงื่อนไขที่ทำให้สัญญาณมีแบนด์วิดท์กว้างสุด แอมพลิจูดสูงสุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุดจะมีพารามิเตอร์ที่เท่ากัน นั่นคือ $f_b = 7.50$ GHz, $f_c = 6.85$ GHz, $f_L = 3.10$ GHz, $f_H = 10.60$ GHz และ $A = 5.50$ mV โดยรูปคลื่นที่ได้จะมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 1.09 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.5 GHz มีกำลังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลี่ยเท่ากับ -59.54 dBm สำหรับรูปคลื่นใน โดเมนเวลาและ PSD ของรูปคลื่นที่ได้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 รูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมใน โดเมนเวลาซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคาร

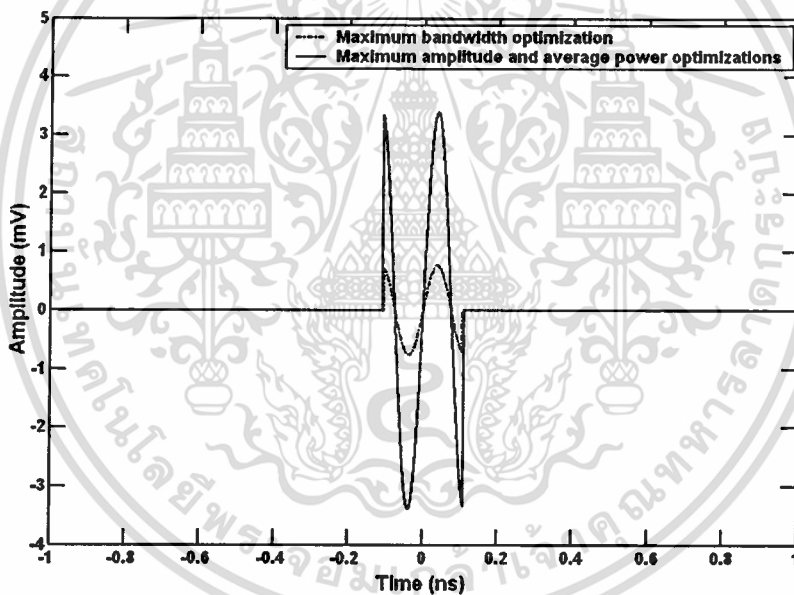


รูปที่ 4.2 PSD ของรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตในโดเมนเวลาหาได้จากสมการที่ (3.6) และ PSD ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตสามารถหาได้จากสมการที่ (3.7) ซึ่งเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารจะมีพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุดคือ $t_b = 0.21$ ns, $f_c = 6.62$ GHz และ $A = 0.76$ mV โดยรูปคลื่นที่ได้จะมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 1.09 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.42 GHz และมีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -75.44 dBm ส่วนพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากับ $t_b = 0.22$ ns, $f_c = 6.58$ GHz และ $A = 3.39$ mV โดยรูปคลื่นที่ได้จะมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 0.98 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 6.72 GHz และมีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -62.24 dBm สำหรับรูปคลื่นในโดเมนเวลาและ PSD ของรูปคลื่นที่ได้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

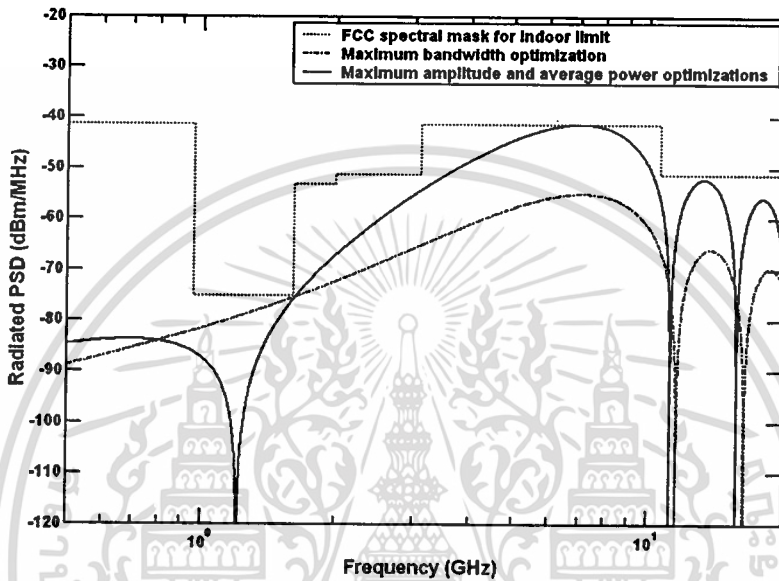


รูปที่ 4.3 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตในโดเมนเวลาซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร

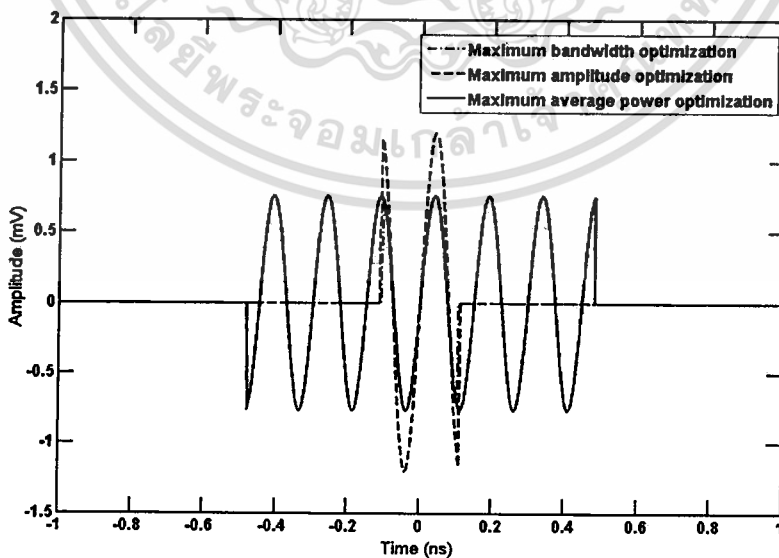
รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารจะมีพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุดคือ $t_b = 0.21$ ns, $f_c = 6.62$ GHz และ $A = 0.76$ mV โดยรูปคลื่นที่ได้มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 1.09 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.42 GHz และมีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -75.44 dBm พารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุดคือ $t_b = 0.22$ ns, $f_c = 6.46$ GHz และ $A = 1.20$ mV โดยรูปคลื่นที่ได้มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 1.03 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 6.87 GHz และมีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -62.24 dBm สำหรับรูปคลื่นในโดเมนเวลาและ PSD ของรูปคลื่นที่ได้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลี่ยเท่ากับ -71.32 dBm ส่วนพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังเฉลี่ยมากที่สุดคือ $t_b = 0.96$ ns, $f_c = 6.72$ GHz และ $A = 0.76$ mV โดยรูปคลื่นที่ได้มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 0.23 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.54 GHz และมีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -68.22 dBm สำหรับรูปคลื่นในโดเมนเวลาและ PSD ของรูปคลื่นที่ได้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

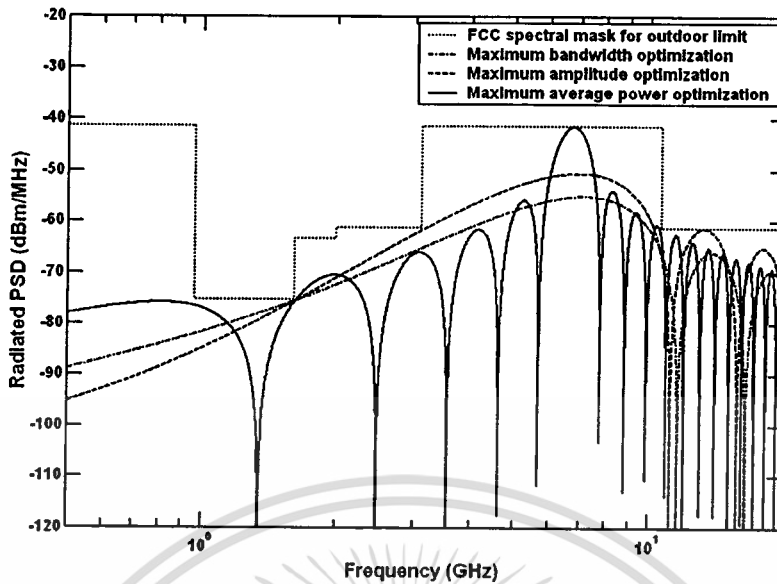


รูปที่ 4.4 PSD ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตในโดเมนเวลาซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



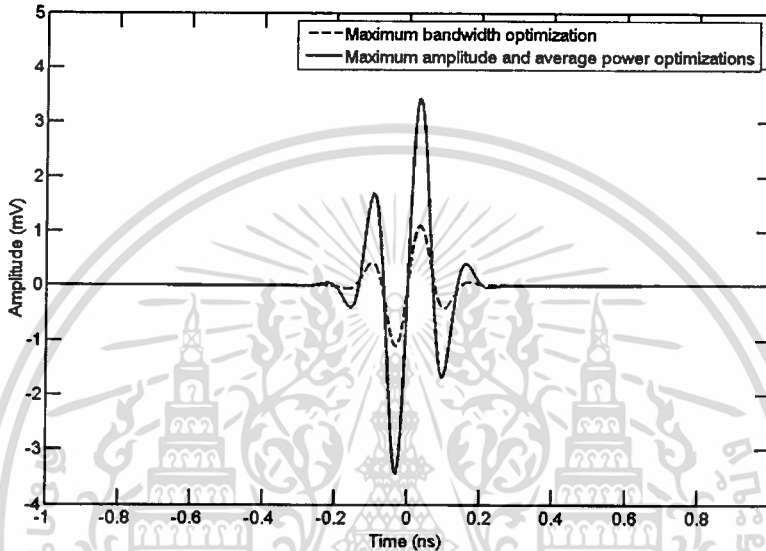
รูปที่ 4.6 PSD ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร

4.2.3 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต

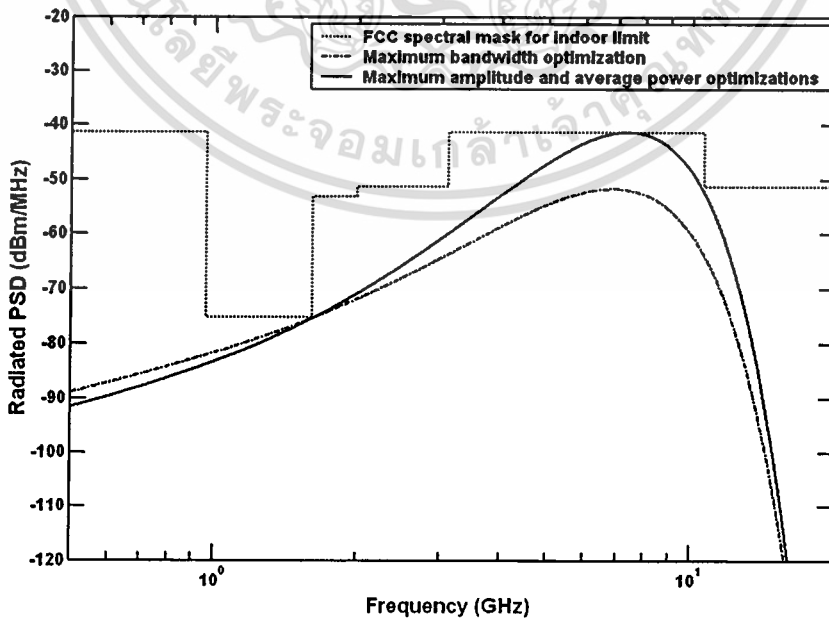
รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตในโดเมนเวลาหาได้จากสมการที่ (3.8) และ PSD ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตสามารถหาได้จากสมการที่ (3.9) ซึ่งเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารจะมีพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุดคือ $t_d = 0.10$ ns, $f_c = 6.85$ GHz และ $A = 1.25$ mV โดยรูปคลื่นที่ได้มีแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 1.10 mV มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 1.00 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 6.82 GHz และมีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -72.21 dBm ส่วนพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากันคือ $t_d = 0.11$ ns, $f_c = 7.34$ GHz และ $A = 3.76$ mV โดยรูปคลื่นที่ได้มีแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 3.43 mV มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 0.84 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 6.20 GHz และมีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -62.75 dBm สำหรับรูปคลื่นในโดเมนเวลาและ PSD ของรูปคลื่นที่ได้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารจะมีพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุดคือ $t_d = 0.10$ ns, $f_c = 6.85$ GHz และ $A = 1.25$ mV โดยรูปคลื่นที่ได้มีแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 1.10 mV มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 1.00 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 6.82 GHz และมีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -72.71 dBm ส่วนพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากที่สุดมีค่าเท่ากับคือ $t_d = 0.13$ ns, $f_c = 6.85$ GHz และ $A = 3.18$ mV โดยรูปคลื่นที่ได้มีแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 2.95 mV มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 0.77 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 5.24 GHz และมีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -63.43 dBm สำหรับรูปคลื่นในโดเมนเวลาและ PSD ของรูปคลื่นที่ได้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

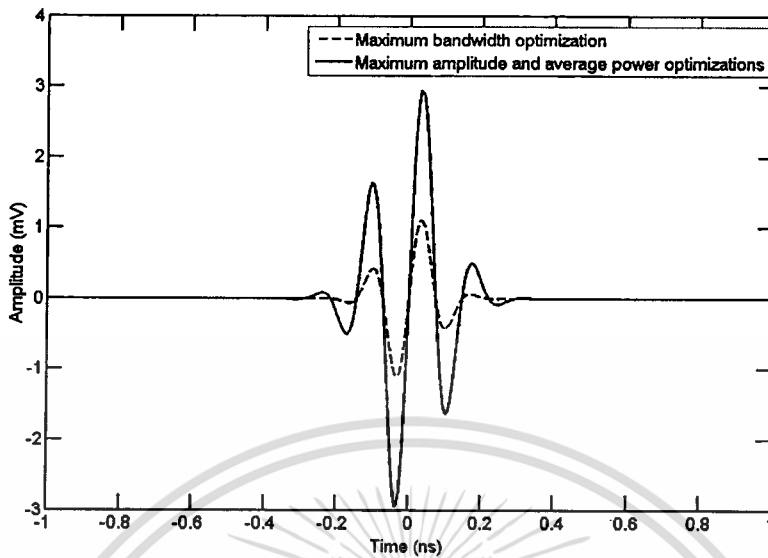


รูปที่ 4.7 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตใน โดเมนเวลาซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร

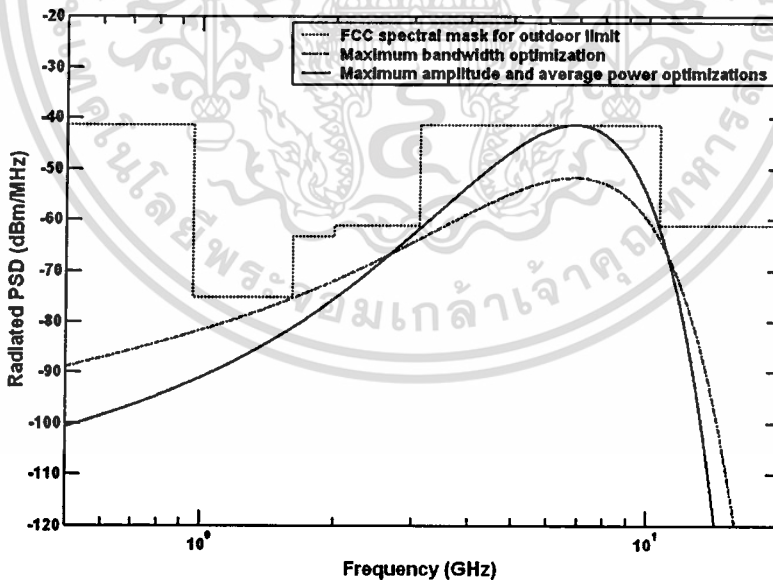


รูปที่ 4.8 PSD ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัด

เอกสารนี้เป็นภายในอาคารไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตใน โดเมนเวลาซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร



รูปที่ 4.10 PSD ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร

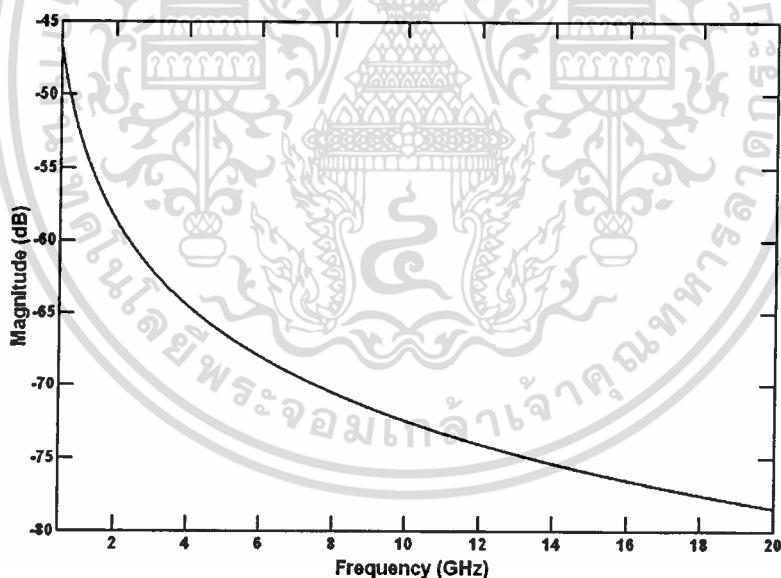
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการคำนวณวิเคราะห์ช่องสัญญาณ UWB

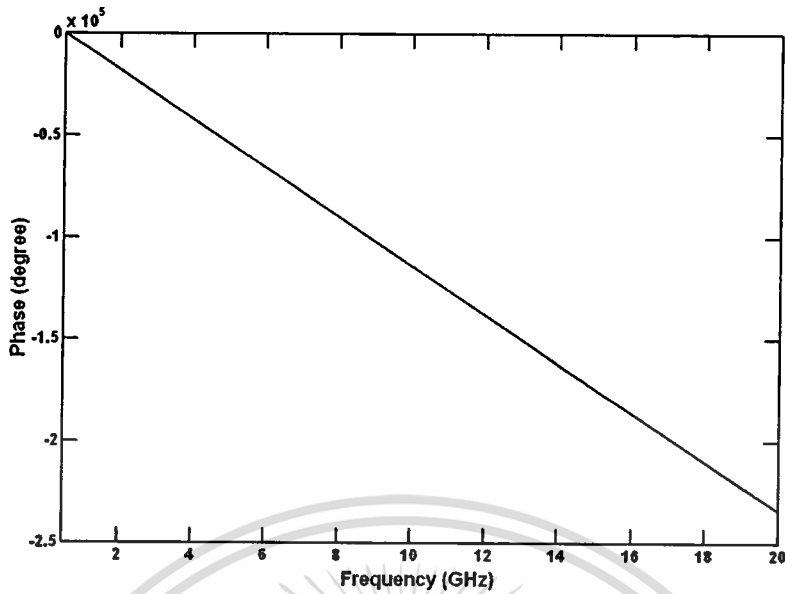
ช่องสัญญาณ UWB จะพิจารณาโดยใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ใน ช่วงความถี่ที่กว้าง และรวมผลกระทบความถี่ของรูปคลื่นที่เกิดจากช่องสัญญาณเข้าไปด้วย ในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดช่วงความถี่ในการวิเคราะห์ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 20 GHz ซึ่งเป็น ช่วงความถี่ที่ครอบคลุมความถี่ที่กำหนดในสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคาร และกำหนดระยะทางที่ 10 m

4.3.1 ช่องสัญญาณอวกาศว่าง [6]-[8]

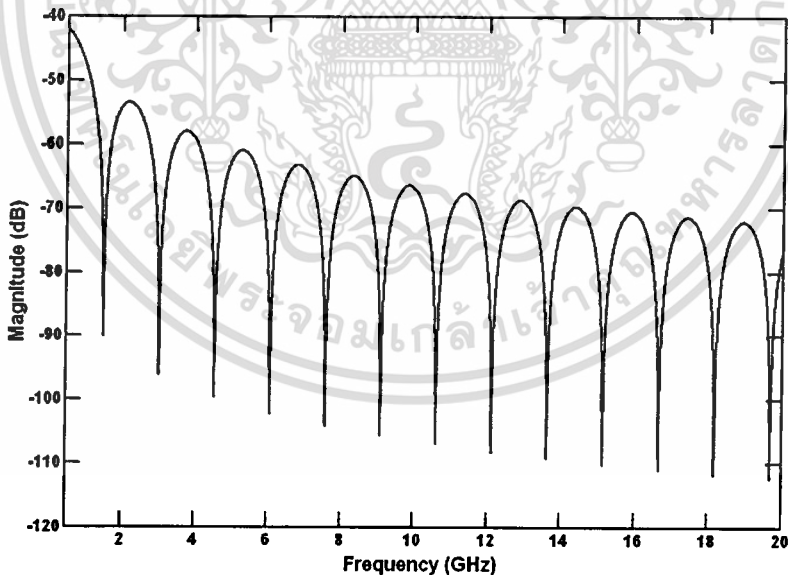
ช่องสัญญาณอวกาศว่างที่นำมาวิเคราะห์ได้ใช้สูตรการส่งผ่านของฟรีสที่ขยายมาเป็น ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในรูปแบบเชิงซ้อน (3.11) ซึ่งจะได้ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน ความถี่ที่ระยะทาง 10 m ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะมีขนาดลดลงเมื่อ ความถี่เพิ่มขึ้น ส่วนเฟสจะเป็นเชิงเส้นตามความถี่ โดยจะมีความชัน เป็นค่าติดลบ



รูปที่ 4.11 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณอวกาศว่างที่ระยะทาง 10 m ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 20 GHz



รูปที่ 4.12 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณอวกาศที่ระยะทาง 10 m ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 20 GHz



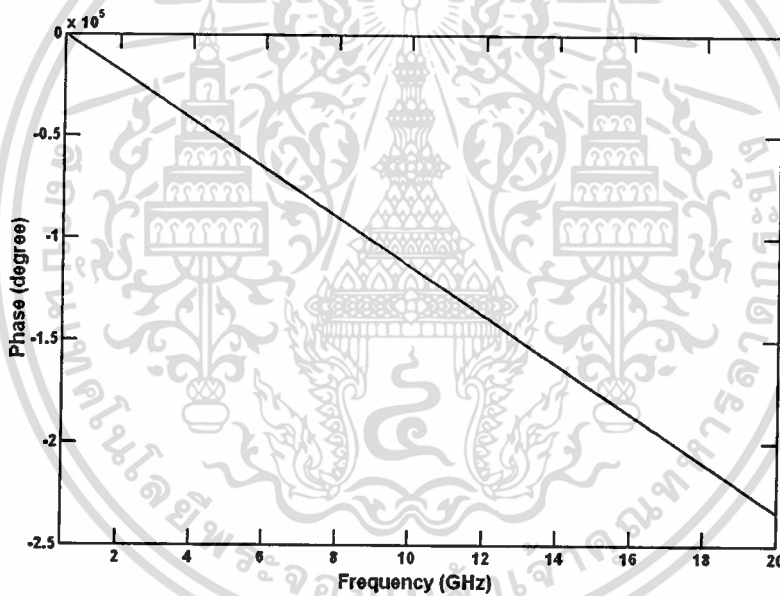
รูปที่ 4.13 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นที่ระยะทาง 10 m ความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็น 1 m ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 20 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น [9], [10]

สำหรับช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นใช้สมการ (3.16) โดยกำหนดให้ความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็น 1 m โดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็น -1 ซึ่งเป็นคุณสมบัติของพื้นที่เป็นตัวนำสมบูรณ์ และเป็นกรณีที่แย่ที่สุดเนื่องจากสัญญาณที่สะท้อนพื้นจะสะท้อนกลับหมดและมีกรกลับมาเฟสทำให้ไปแทรกสอดกับสัญญาณตรงได้มากที่สุด

ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นที่มีความสูงของสายอากาศส่งและรับเป็น 1 m แสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่จะเกิดเฟดดิ้งขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ส่วนเฟสจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตามความถี่ และมีค่าประมาณเท่ากับเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณอวกาศว่างที่ระยะทางเท่ากัน



รูปที่ 4.14 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นในระยะทาง 10 m ความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็น 1 m ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 20 GHz

4.4 ผลการคำนวณวิเคราะห์สัญญาณรับ UWB

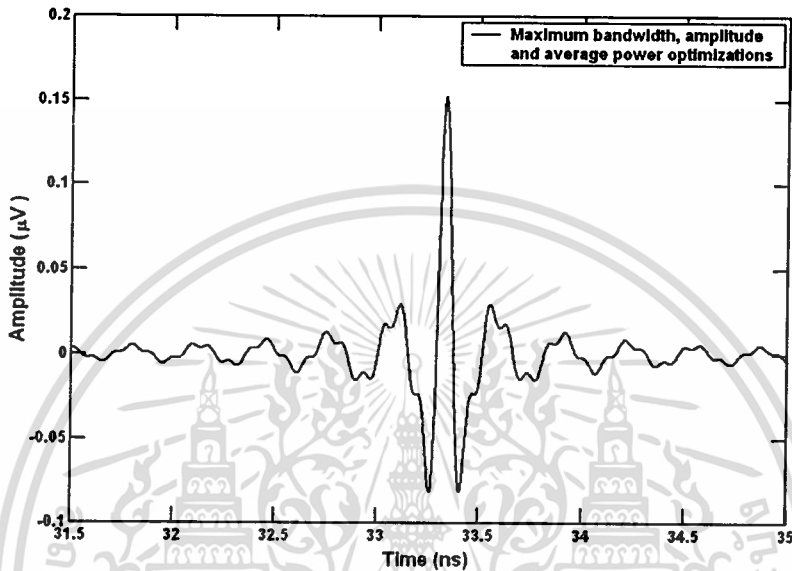
ได้ทำการวิเคราะห์หาสัญญาณรับ UWB จากแต่ละสัญญาณส่งและช่องสัญญาณ UWB ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ โดยได้จากการแทนในสมการที่ (3.20) ซึ่งจากผลที่ได้สามารถเห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นที่เกิดจากผลกระทบของช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 สัญญาณรับ UWB ที่ผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

รูปที่ 4.15 แสดงรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.15 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -127.15 dBm

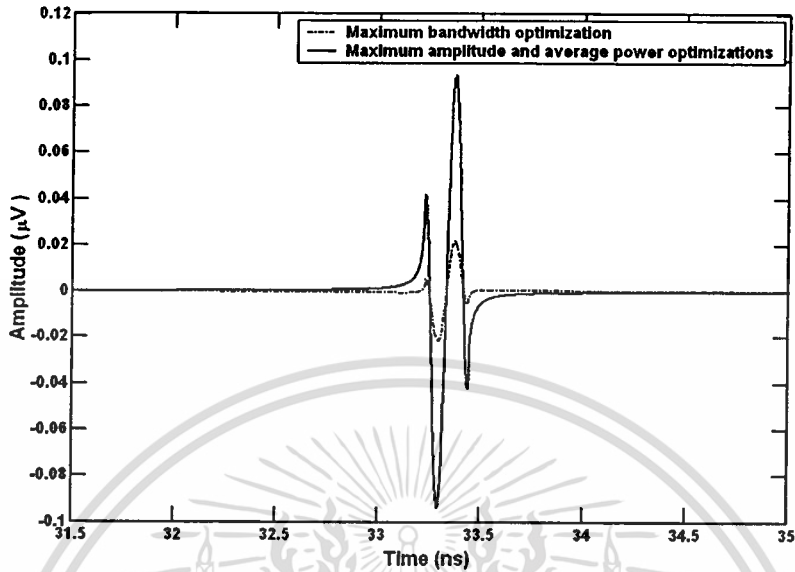


รูปที่ 4.15 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

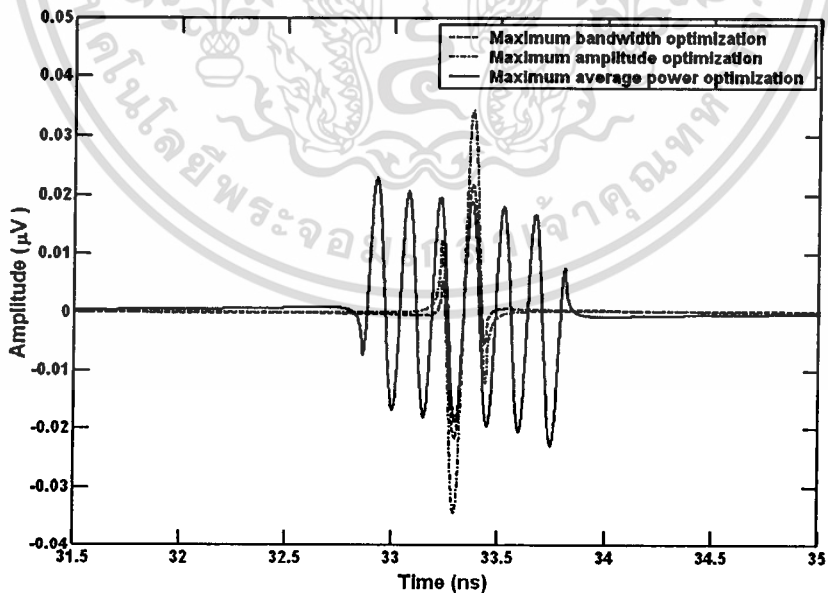
รูปที่ 4.16 แสดงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.02 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -143.58 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.09 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -130.62 dBm

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.17 ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.02 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -143.58 dBm ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.03 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -139.42 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.02 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -137.05 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง



รูปที่ 4.17 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

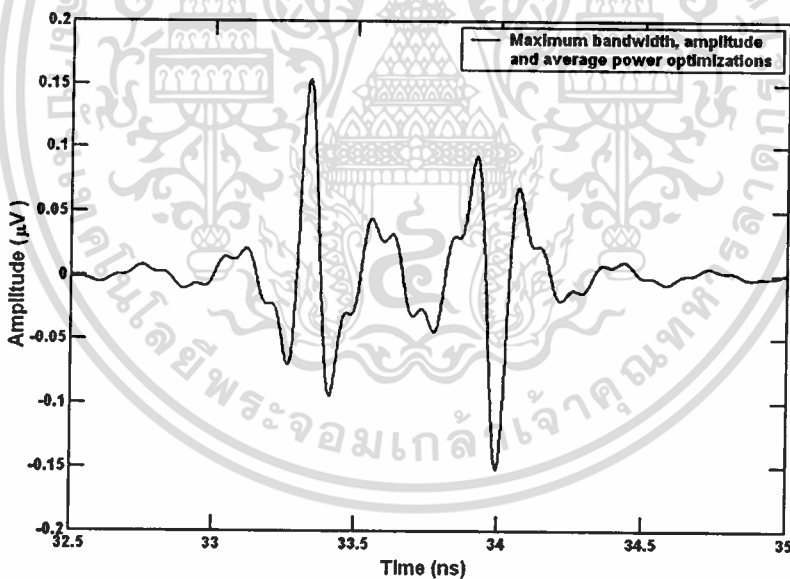
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.19 ในกรณีที่ เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิธที่กว้างที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.03 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -140.90 dBm ส่วนในกรณีที่ เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.08 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -132.12 dBm

4.4.2 สัญญาณรับ UWB ที่ผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

สัญญาณรับ UWB ที่ผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นจะประกอบไปด้วยรูปคลื่น 2 รูปคลื่นที่มาจากวิถีตรงและวิถีสะท้อน โดยที่รูปคลื่นที่มาจากวิถีสะท้อนจะมีการประวิงเวลาช้ากว่าและมีแอมพลิจูดตรงข้ามกับรูปคลื่นที่มาจากวิถีตรง

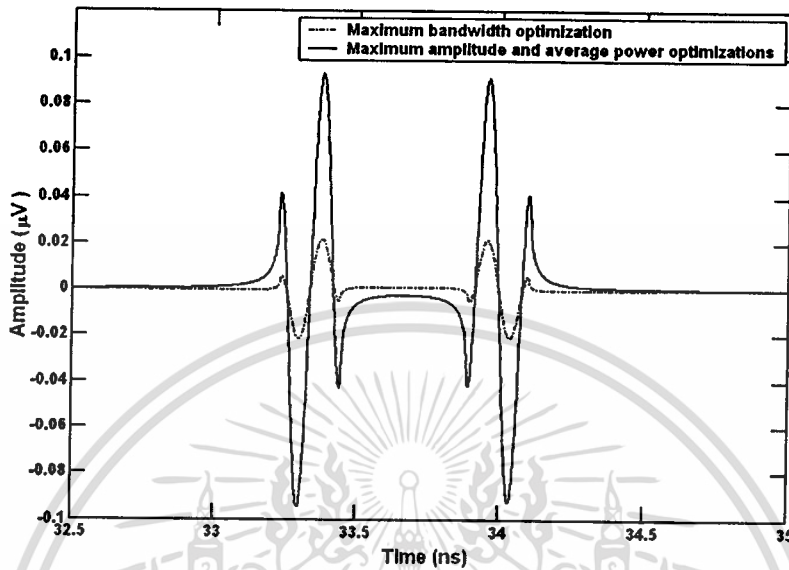
รูปที่ 4.20 แสดงรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.15 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -124.16 dBm



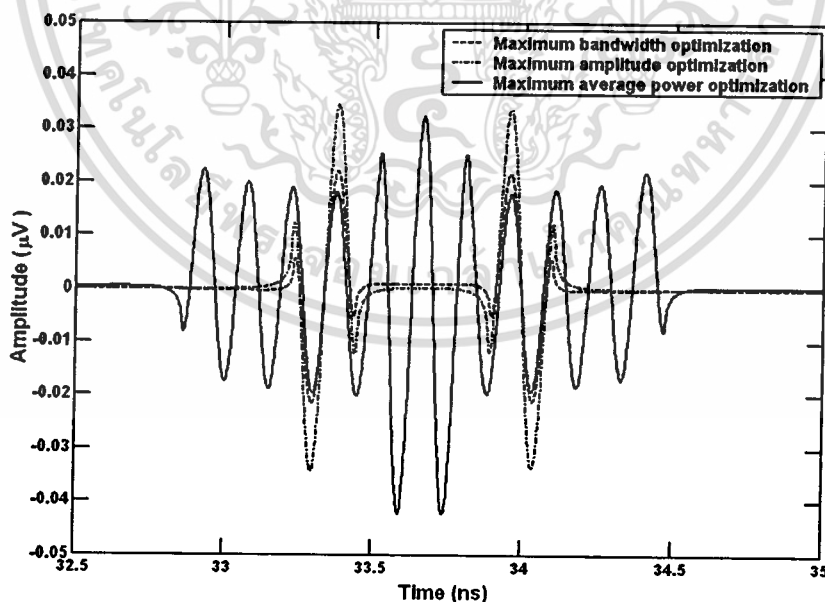
รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

รูปที่ 4.21 แสดงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ในกรณีที่ เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิธที่กว้างที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.02 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น -140.66 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.09 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -127.70 dBm



รูปที่ 4.21 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

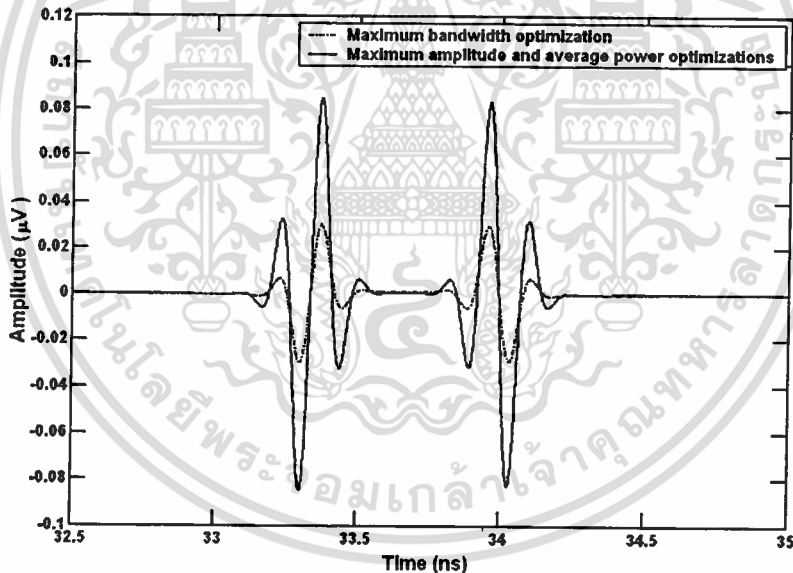


รูปที่ 4.22 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.22 ในกรณีที่เป็นการเป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิธที่กว้างที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.02 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -140.66 dBm ในกรณีที่เป็นการเป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.03 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -136.49 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นการเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.04 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -133.11 dBm

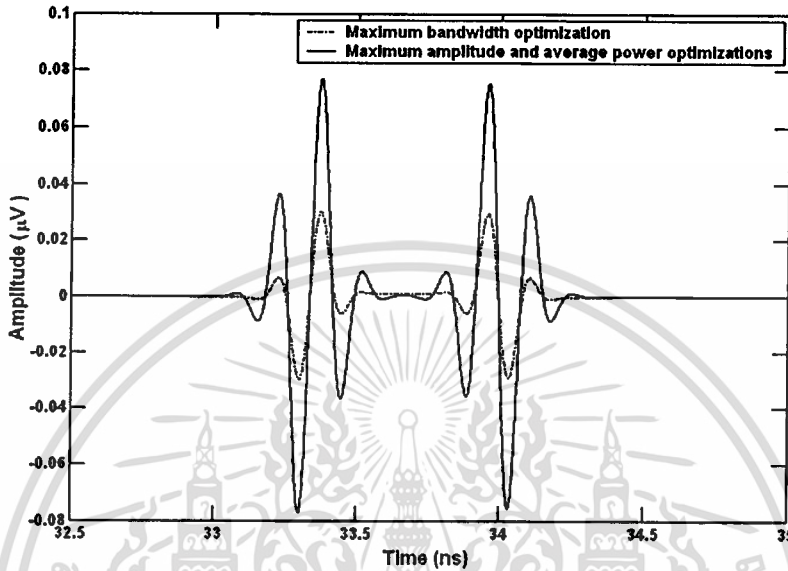
รูปที่ 4.23 แสดงรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ในกรณีที่เป็นการเป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิธที่กว้างที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.03 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -137.97 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นการเป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.09 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -128.93 dBm



รูปที่ 4.23 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.24 ในกรณีที่เป็นการเป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิธที่กว้างที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.03 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ย

เป็น -137.97 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นที่รับได้นี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.08 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -129.19 dBm



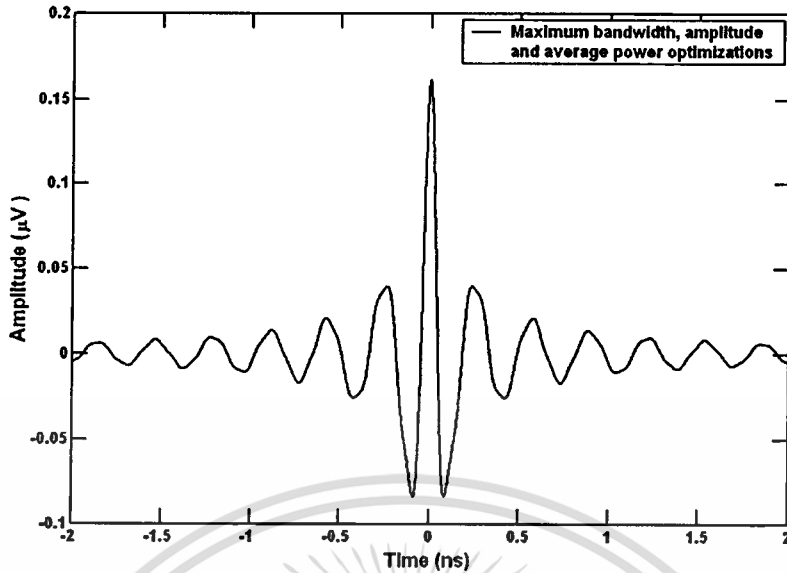
รูปที่ 4.24 รูปคลื่นแก๊สที่ถูกมอดูเลตที่รับได้ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

4.5 ผลการคำนวณวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับ

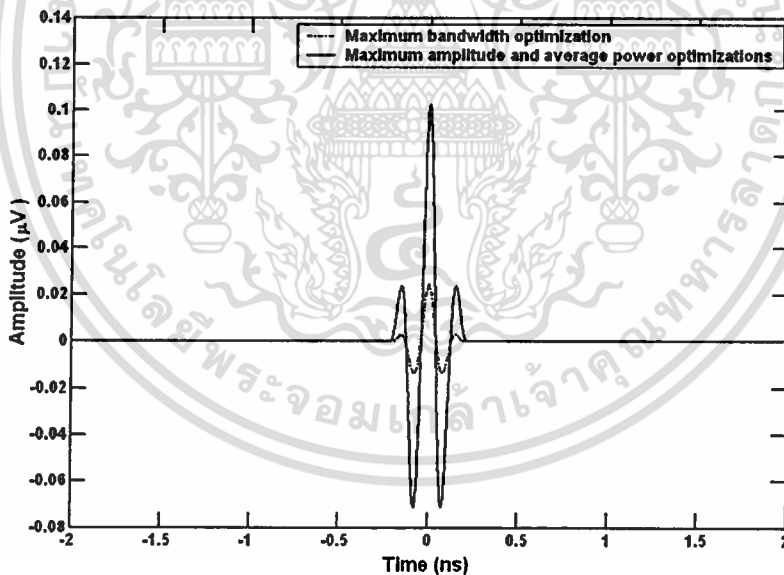
สัญญาณที่รับได้ในแต่ละกรณี จะถูกนำมาวิเคราะห์ผ่านเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งพิจารณาได้จากสมการที่ (3.24) และแบบสหสัมพันธ์พิจารณาได้จากสมการที่ (3.28) โดยได้กำหนดให้อัตราขยายของเครื่องรับเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนคงที่

4.5.1 สัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์

รูปที่ 4.25 แสดงรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.16 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -125.19 dBm



รูปที่ 4.25 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

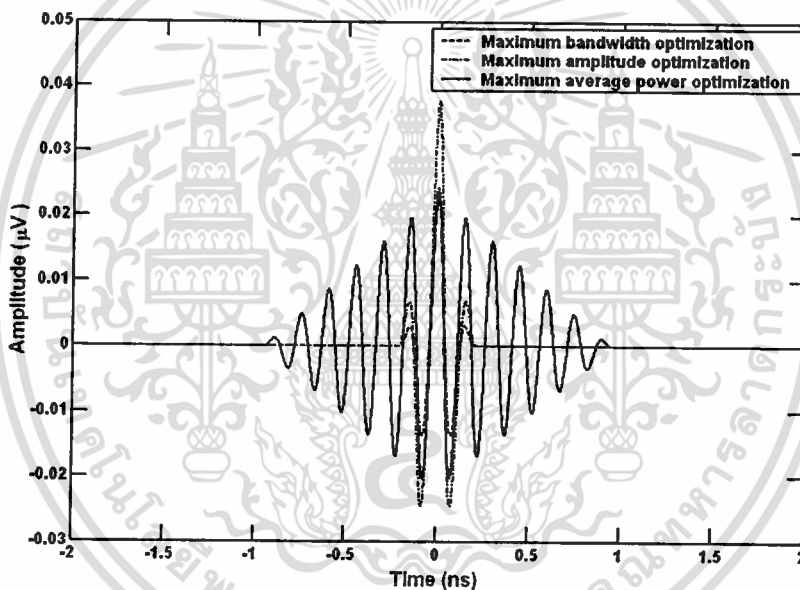


รูปที่ 4.26 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

รูปที่ 4.26 แสดงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง ในกรณีที่ เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิธที่กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.02 \mu\text{V}$ และมี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นจำเป็นต้องใช้ขอขานการคำ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังเฉลี่ยเป็น -143.58 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.10 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -130.25 dBm

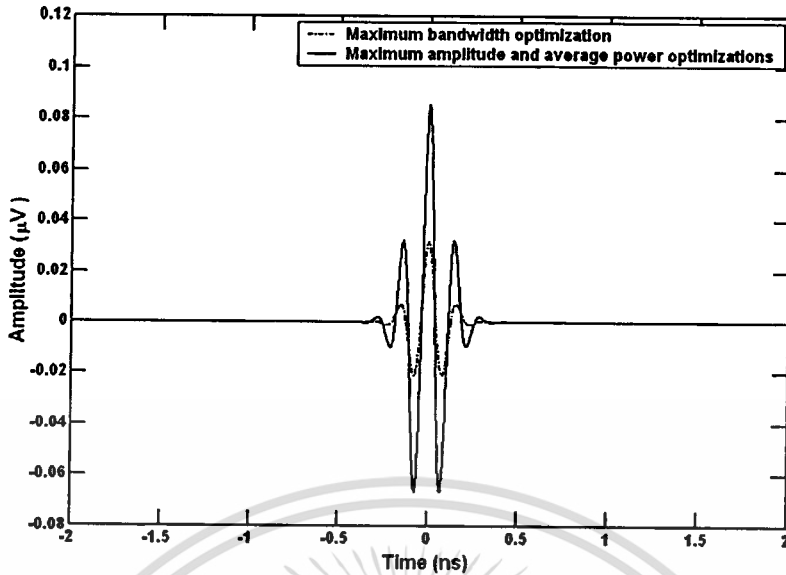
รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.27 ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.02 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -143.58 dBm ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.04 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -139.16 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.02 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -137.05 dBm



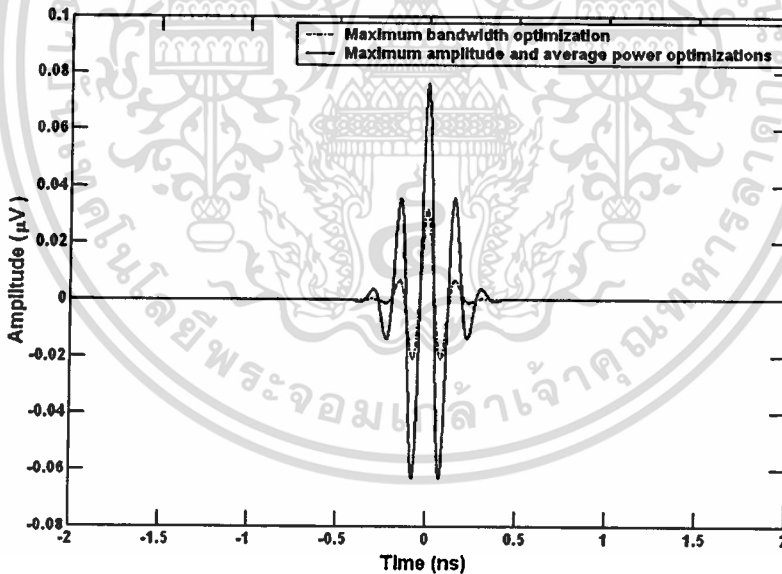
รูปที่ 4.27 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

รูปที่ 4.28 แสดงรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.03 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -140.54 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.09 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -131.29 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

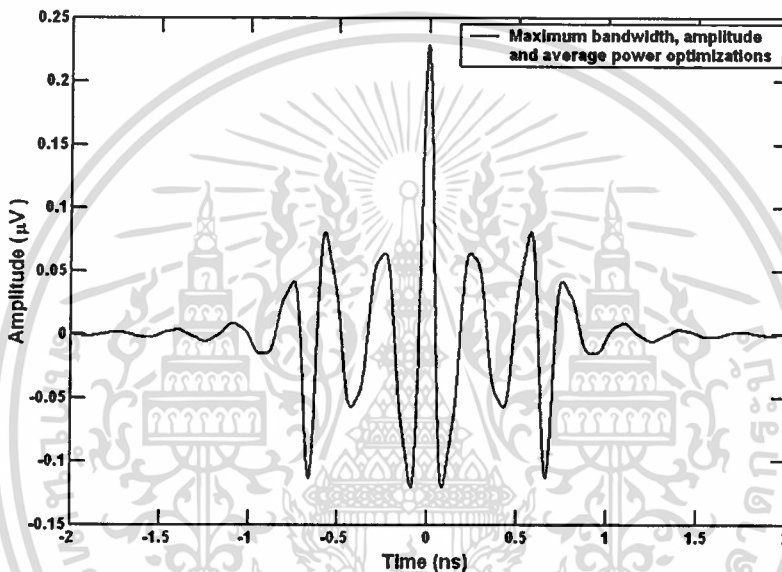


รูปที่ 4.29 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.29 ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.03 \mu\text{V}$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยวิธีใดก็ตาม การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

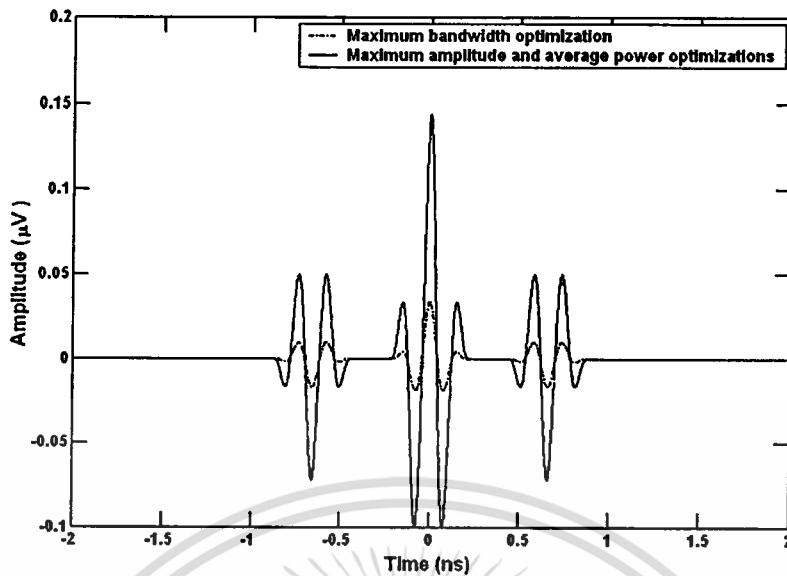
และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -140.54 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.08 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -131.49 dBm

รูปที่ 4.30 แสดงรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.23 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -120.65 dBm

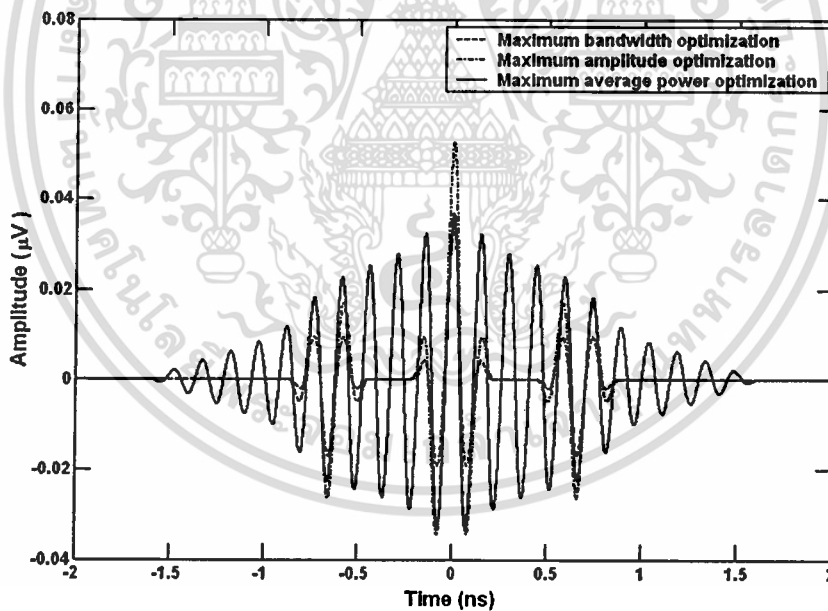


รูปที่ 4.30 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

รูปที่ 4.31 แสดงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.03 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -138.90 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.14 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -125.26 dBm



รูปที่ 4.31 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

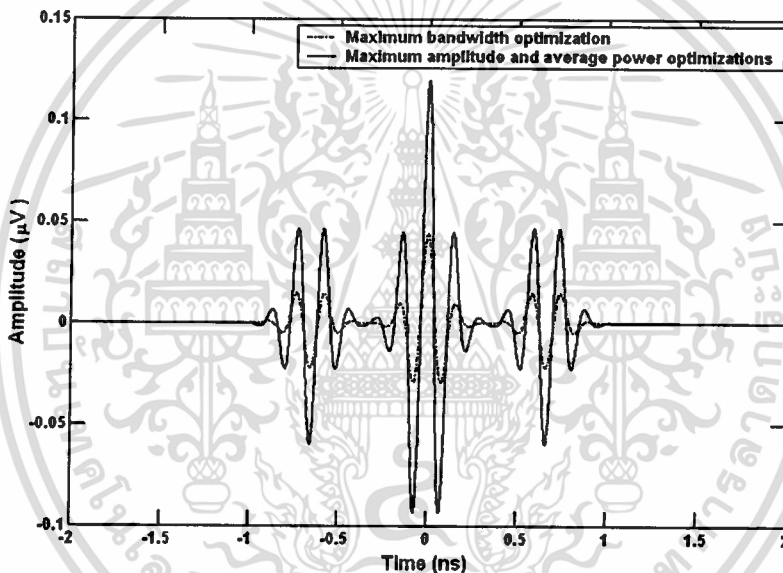


รูปที่ 4.32 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.32 ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิธที่กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

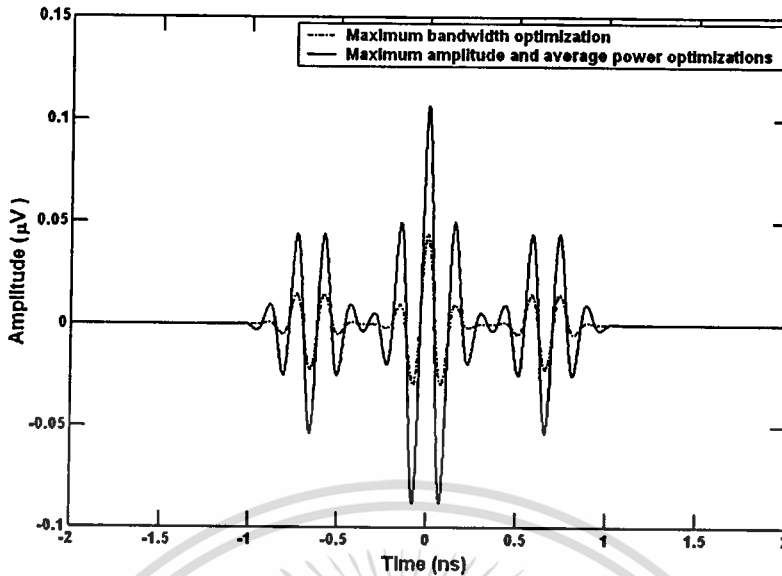
เป็น $0.03 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -138.90 dBm ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.05 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -134.48 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.04 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -131.61 dBm

รูปที่ 4.33 แสดงรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิธที่กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.04 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -135.86 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.12 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -126.60 dBm



รูปที่ 4.33 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

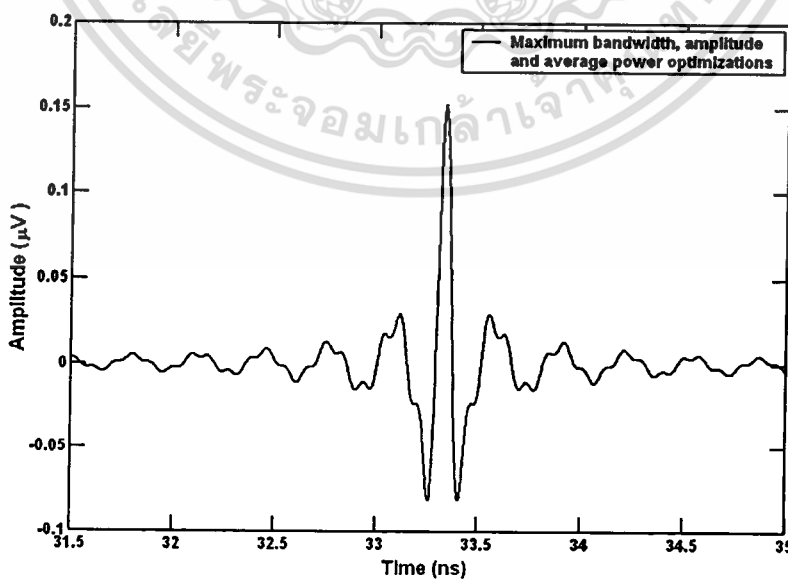
รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.34 ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิธที่กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.04 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -135.86 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.11 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -126.80 dBm



รูปที่ 4.34 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

4.5.2 สัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์

รูปที่ 4.35 แสดงรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.15 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -127.15 dBm

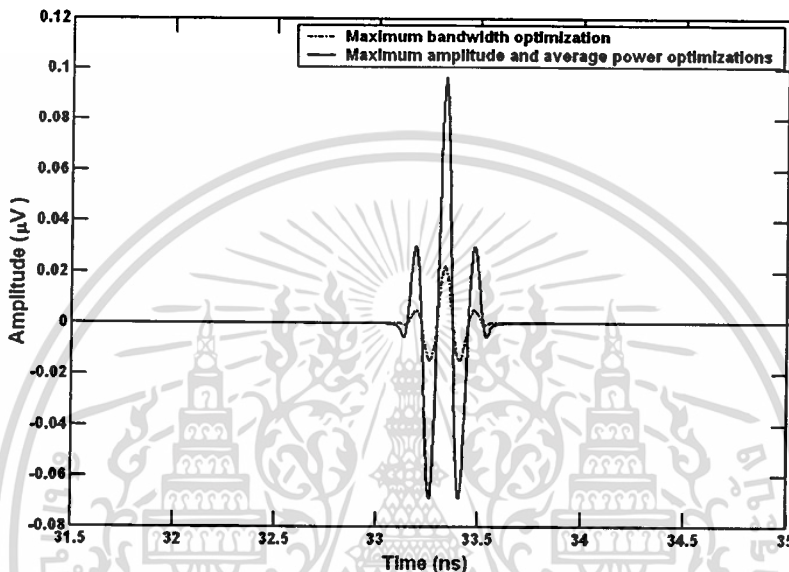


รูปที่ 4.35 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.36 แสดงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.02 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -144.07 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.10 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -130.81 dBm

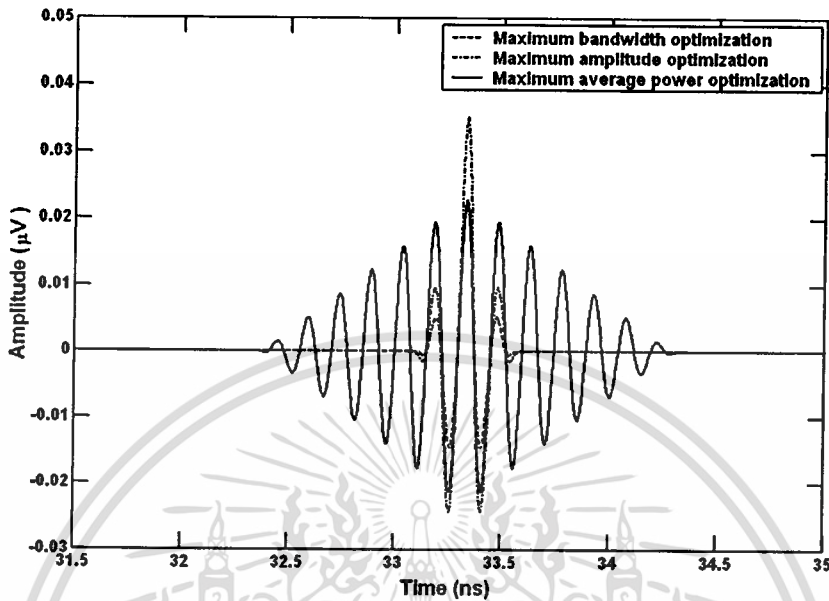


รูปที่ 4.36 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

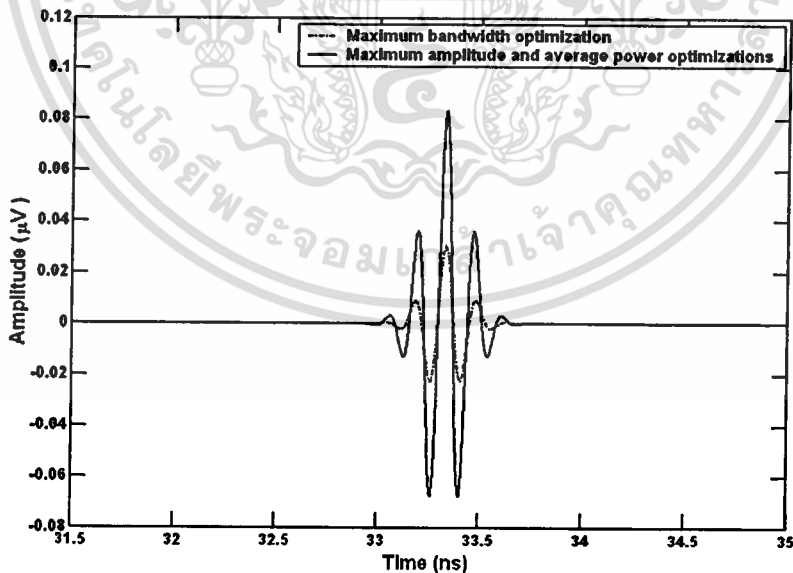
รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.37 ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.02 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -144.07 dBm ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.04 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -139.70 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.02 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -137.28 dBm

รูปที่ 4.38 แสดงรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.03 \mu\text{V}$ และมีกำลัง

เฉลี่ยเป็น -140.63 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.08 μV และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -131.37 dBm



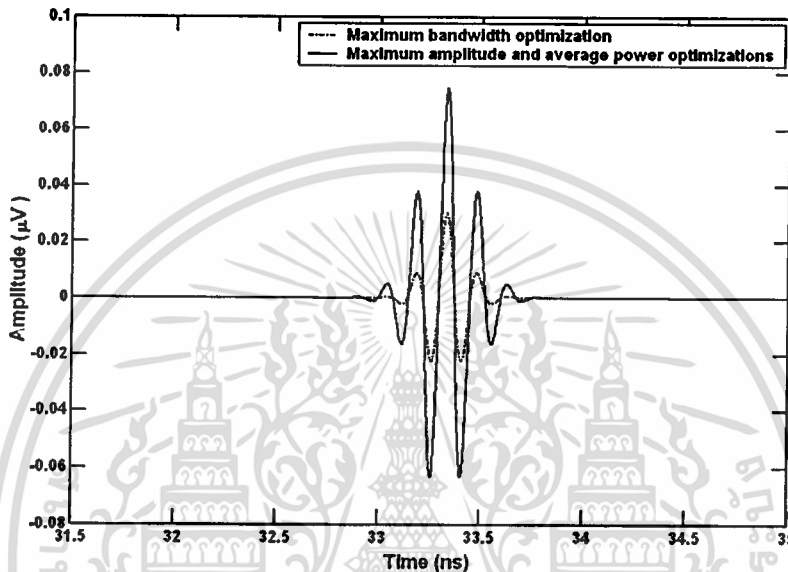
รูปที่ 4.37 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง



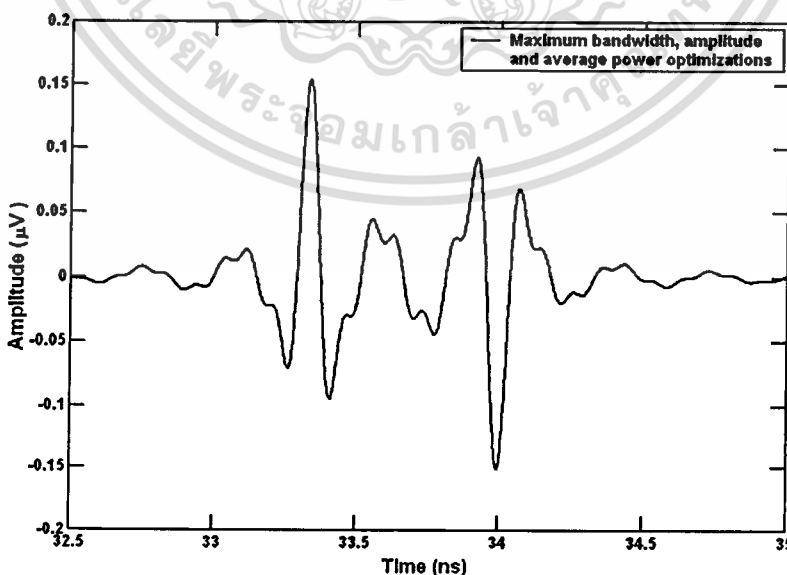
รูปที่ 4.38 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.39 ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิคท์กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.03 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -140.63 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.08 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -131.55 dBm



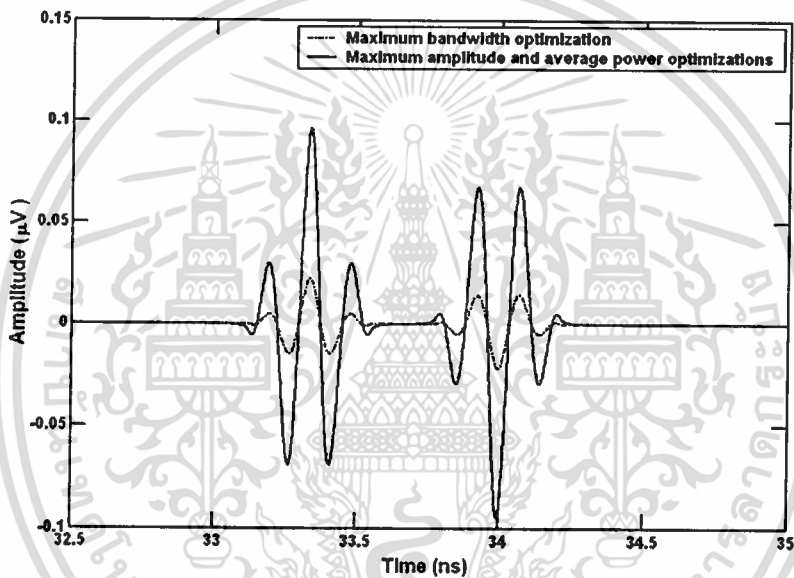
รูปที่ 4.39 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง



รูปที่ 4.40 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น การคำนวณการบิดเบือนสัญญาณและการบิดเบือนสัญญาณอื่น ๆ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

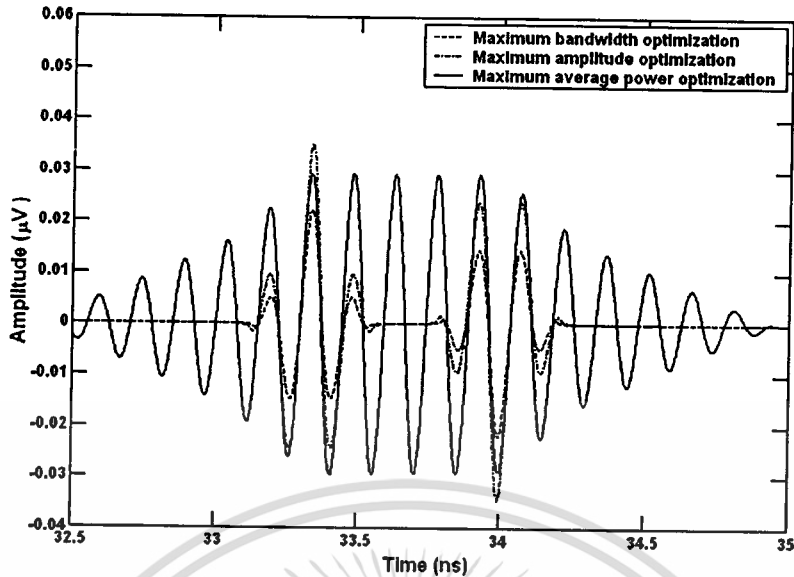
รูปที่ 4.40 แสดงรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.15 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -124.16 dBm

รูปที่ 4.41 แสดงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.02 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -141.14 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.10 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -127.88 dBm



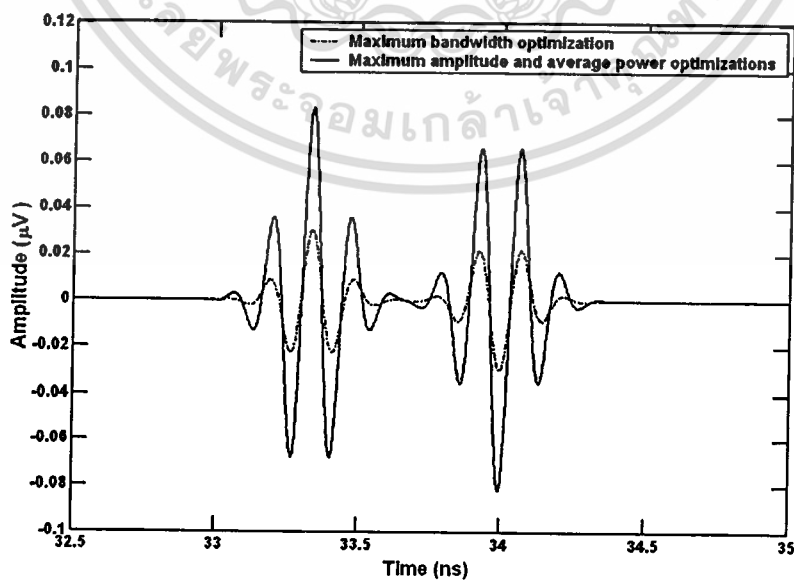
รูปที่ 4.41 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.42 ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.02 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -141.14 dBm ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.04 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -136.78 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.03 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -132.64 dBm



รูปที่ 4.42 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

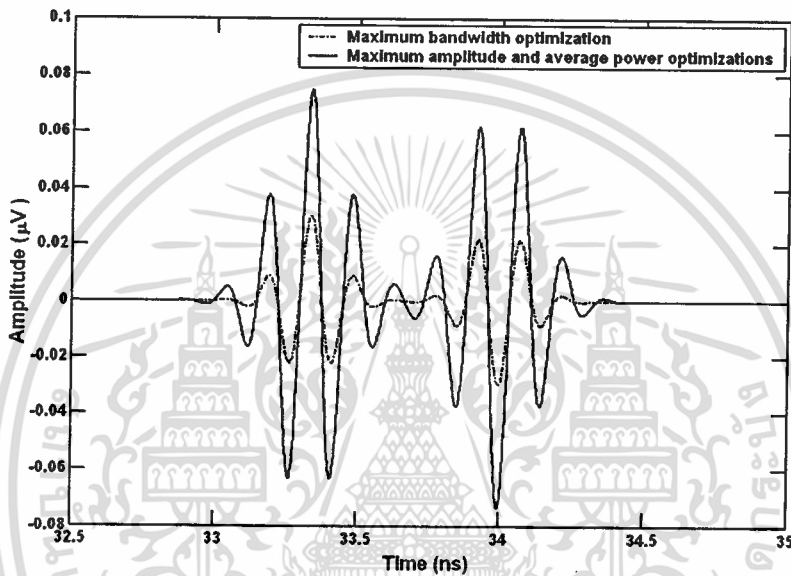
รูปที่ 4.43 แสดงรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิธที่กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.03 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -137.70 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.08 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -128.44 dBm



รูปที่ 4.43 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

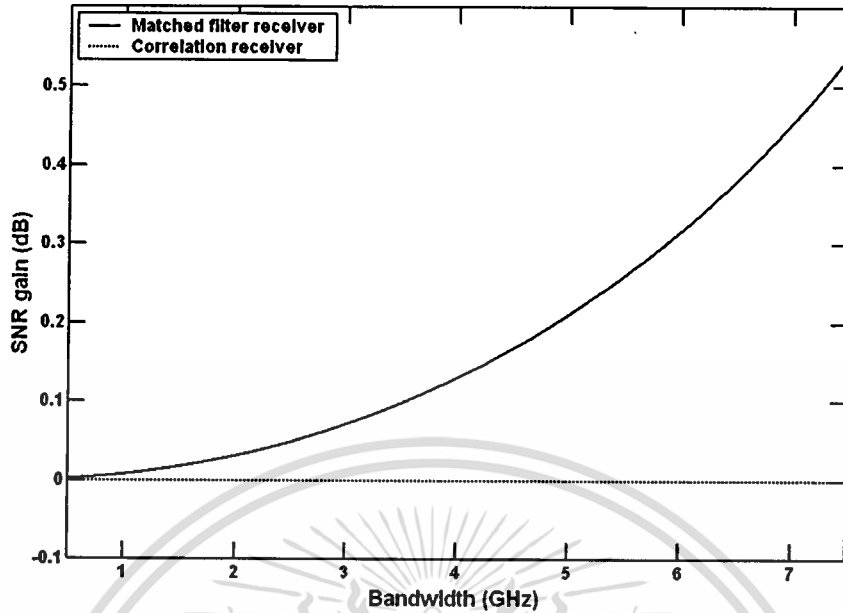
รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.44 ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.03 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -137.70 dBm ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นนี้จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $0.08 \mu\text{V}$ และมีกำลังเฉลี่ยเป็น -128.62 dBm



รูปที่ 4.44 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตที่ได้จากเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

4.6 ผลการคำนวณวิเคราะห์ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR

ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR นิยามเป็นอัตราระหว่างกำลังเฉลี่ยของสัญญาณจากเครื่องรับต่อกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ได้จากสมการที่ (3.29) และแบบสหสัมพันธ์ได้จากสมการที่ (3.30) โดยพิจารณาจากสัญญาณที่รับได้ในแต่ละกรณี



รูปที่ 4.45 อัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์ที่มีแบนด์วิดท์สัญญาณตั้งแต่ 0.5 ถึง 7.5 GHz

ขั้นแรกได้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์ของสัญญาณกับอัตราขยาย SNR โดยได้ใช้สัญญาณแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปที่ 4.45 แสดงอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์ที่มีแบนด์วิดท์สัญญาณตั้งแต่ 0.5 ถึง 7.5 GHz อัตราขยาย SNR ของเครื่องรับสหสัมพันธ์มีค่าคงที่เป็น 0 dB ในขณะที่ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อแบนด์วิดท์สัญญาณกว้างมากขึ้น สำหรับเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ อัตราขยาย SNR ของแบนด์วิดท์ 0.5 GHz มีค่าประมาณ 0.00 dB ในขณะที่อัตราขยาย SNR ของแบนด์วิดท์ 7.5 GHz มีค่าประมาณ 0.54 dB ซึ่งผลที่ได้นี้สรุปได้ว่าสัญญาณแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่มีแบนด์วิดท์มากขึ้นจะสามารถเพิ่มอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ได้

4.6.1 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์

ตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างและเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารตามลำดับ จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมจะมีประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR มากสุด รองลงมาเป็นรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

รูปคลื่น	เงื่อนไขของรูปคลื่น		
	แบนด์วิดท์กว้างที่สุด	แอมพลิจูดสูงที่สุด	กำลังเฉลี่ยมากที่สุด
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	1.96 dB	1.96 dB	1.96 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	0.00 dB	0.37 dB	0.37 dB
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	0.36 dB	0.57 dB	0.57 dB

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

รูปคลื่น	เงื่อนไขของรูปคลื่น		
	แบนด์วิดท์กว้างที่สุด	แอมพลิจูดสูงที่สุด	กำลังเฉลี่ยมากที่สุด
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	1.96 dB	1.96 dB	1.96 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	0.00 dB	0.26 dB	0.00 dB
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	0.36 dB	0.63 dB	0.63 dB

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

รูปคลื่น	เงื่อนไขของรูปคลื่น		
	แบนด์วิดท์กว้างที่สุด	แอมพลิจูดสูงที่สุด	กำลังเฉลี่ยมากที่สุด
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	3.51 dB	3.51 dB	3.51 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	1.76 dB	2.44 dB	2.44 dB
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	2.11 dB	2.33 dB	2.33 dB

ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นและเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมยังคงมีประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR มากสุด โดยเฉลี่ยแล้วรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตจะมีประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR มากกว่ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ในกรณีที่เป็นช่องสัญญาณการสะท้อนจะมีค่ามากกว่าในกรณีที่เป็นช่องสัญญาณอวกาศว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

รูปคลื่น	เงื่อนไขของรูปคลื่น		
	แบนด์วิธที่กว้างที่สุด	แอมพลิจูดสูงสุด	กำลังเฉลี่ยมากที่สุด
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	3.51 dB	3.51 dB	3.51 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลต	1.76 dB	2.01 dB	1.50 dB
เกาส์ที่ถูกลมอดูเลต	2.11 dB	2.39 dB	2.39 dB

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

รูปคลื่น	เงื่อนไขของรูปคลื่น		
	แบนด์วิธที่กว้างที่สุด	แอมพลิจูดสูงสุด	กำลังเฉลี่ยมากที่สุด
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	0.00 dB	0.00 dB	0.00 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลต	-0.49 dB	-0.19 dB	-0.19 dB
เกาส์ที่ถูกลมอดูเลต	0.27 dB	0.49 dB	0.49 dB

4.6.2 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์

ตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างและเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นและเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมจะมีประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR เป็น 0 dB ในทุกกรณี รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลตจะมีประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR มากกว่ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลตอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉลี่ยแล้วประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ในกรณีที่ผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนจะมีค่ามากกว่าในกรณีที่ผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง และประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์จะมีค่าน้อยกว่าของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

รูปคลื่น	เงื่อนไขของรูปคลื่น		
	แบนด์วิดท์กว้างที่สุด	แอมพลิจูดสูงที่สุด	กำลังเฉลี่ยมากที่สุด
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	0.00 dB	0.00 dB	0.00 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	-0.49 dB	-0.28 dB	-0.23 dB
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	0.27 dB	0.57 dB	0.57 dB

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

รูปคลื่น	เงื่อนไขของรูปคลื่น		
	แบนด์วิดท์กว้างที่สุด	แอมพลิจูดสูงที่สุด	กำลังเฉลี่ยมากที่สุด
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	0.00 dB	0.00 dB	0.00 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	-0.48 dB	-0.18 dB	-0.18 dB
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	0.27 dB	0.49 dB	0.49 dB

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

รูปคลื่น	เงื่อนไขของรูปคลื่น		
	แบนด์วิดท์กว้างที่สุด	แอมพลิจูดสูงที่สุด	กำลังเฉลี่ยมากที่สุด
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	0.00 dB	0.00 dB	0.00 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	-0.48 dB	-0.29 dB	0.47 dB
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	0.27 dB	0.57 dB	0.57 dB

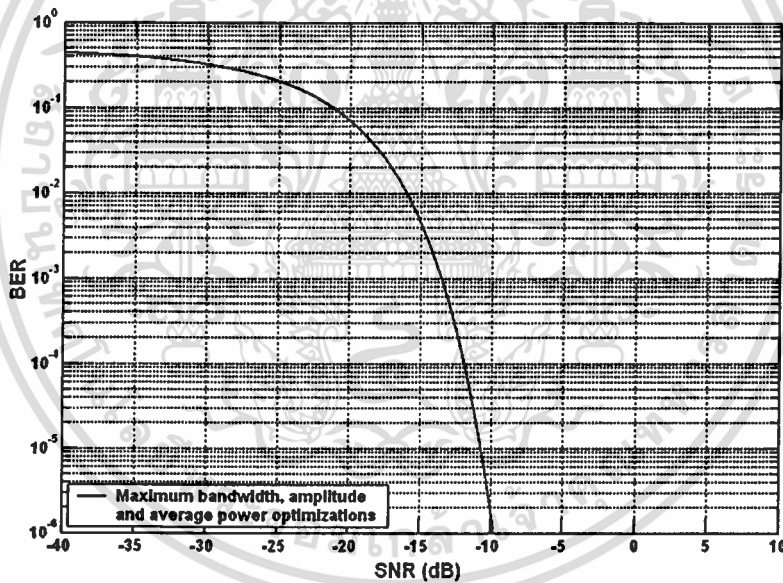
4.7 ผลการคำนวณวิเคราะห์ประสิทธิภาพ BER

ในหัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์โดยมีรูปคลื่นสัญญาณส่ง UWB และช่องสัญญาณแต่ละแบบ โดยจะเลือกวิเคราะห์เฉพาะแบบแผนมอดูเลตแบบชั่วคราวกันเท่านั้นซึ่งสำหรับเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์จะใช้สมการที่ (3.33) และเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์จะใช้สมการที่ (3.35) ส่วนแบบแผนมอดูเลตแบบตั้ง
 ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้อัตราบิตเป็น 110 Mbps ซึ่งจะทำให้มีช่วงเวลาในหนึ่งรูปคลื่นเป็น 9.09 ns และกำหนดให้ระยะทางเป็น 10 m พารามิเตอร์ที่กำหนดนี้เป็นไปตามมาตรฐานของ IEEE 802.15.3a [19] ซึ่งในการศึกษาประสิทธิภาพ BER นี้ จะใช้ระดับที่ 10^{-3} เป็นระดับอ้างอิงเพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพ BER ในแต่ละกรณี

4.7.1 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์

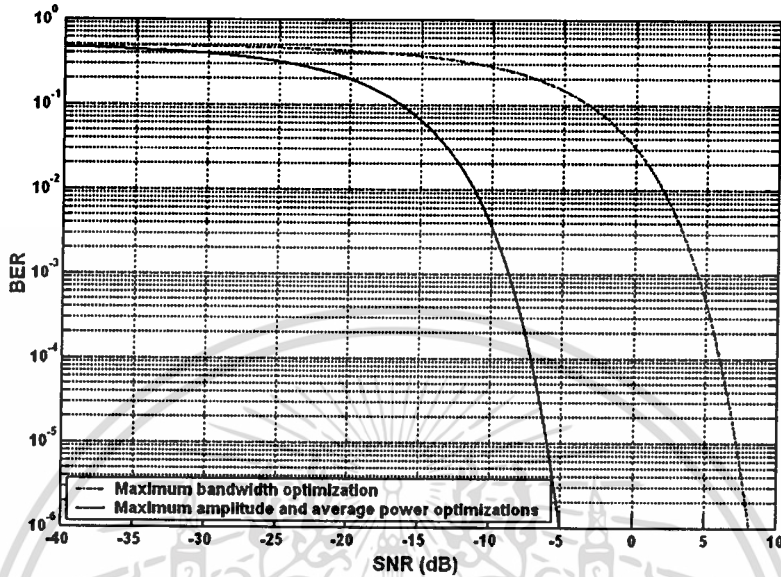
รูปที่ 4.46 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง ซึ่งเป็นกรณีที่มีประสิทธิภาพ BER ดีที่สุดในช่องสัญญาณอวกาศว่าง โดยมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -13.50 dB



รูปที่ 4.46 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

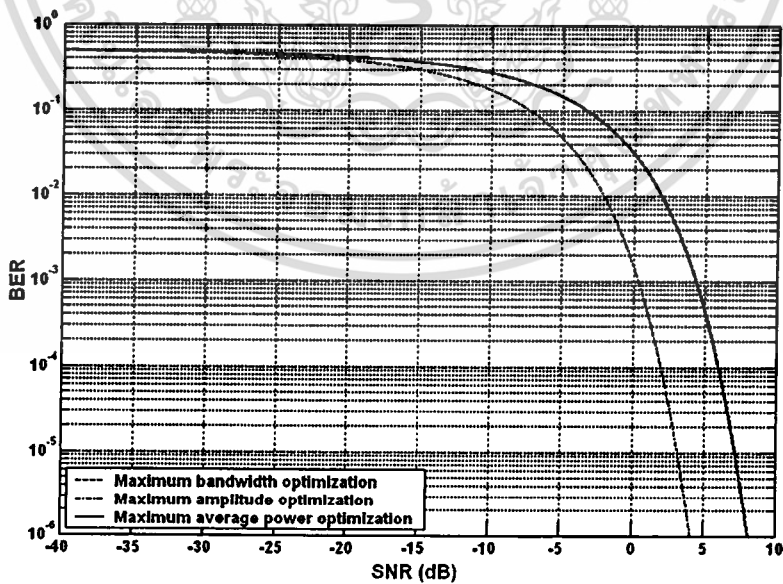
รูปที่ 4.47 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านเอกสช่องสัญญาณอวกาศว่าง ในกรณีที่เป็นการเดินทางในแนวคอร์ดที่กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ราคาไม่แพงกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SNR เท่ากับ 4.41 dB ส่วนในกรณีที่ขึ้นไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -8.74 dB



รูปที่ 4.47

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง



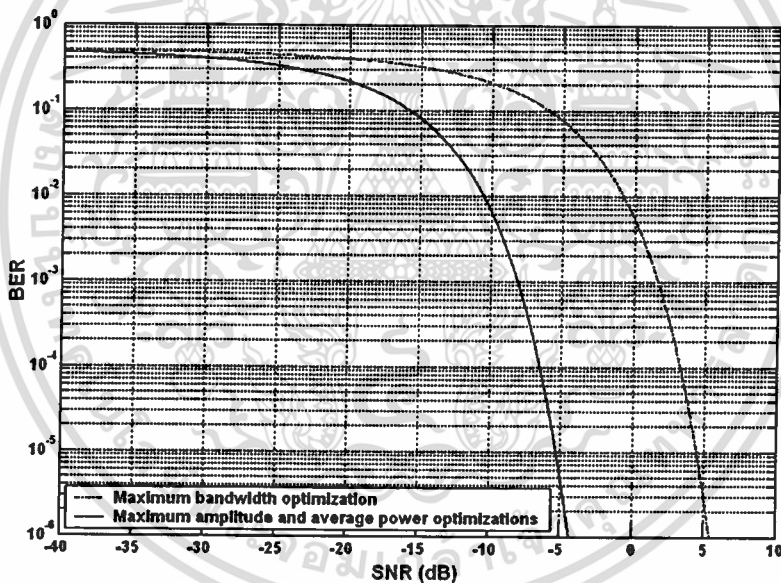
รูปที่ 4.48

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารช่องสัญญาณอวกาศว่างงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างได้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.48 ในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 4.41 dB ในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 0.36 dB ส่วนในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 4.35 dB

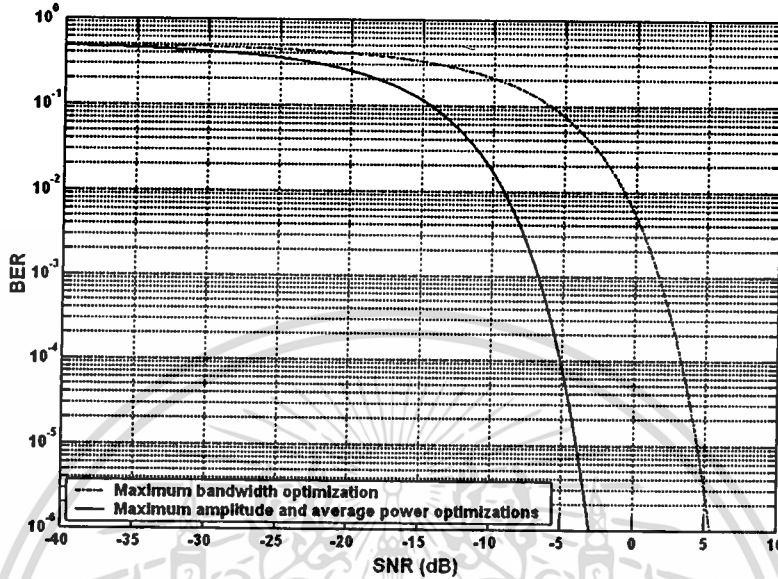
รูปที่ 4.49 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง ในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 1.69 dB ส่วนในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -8.07 dB



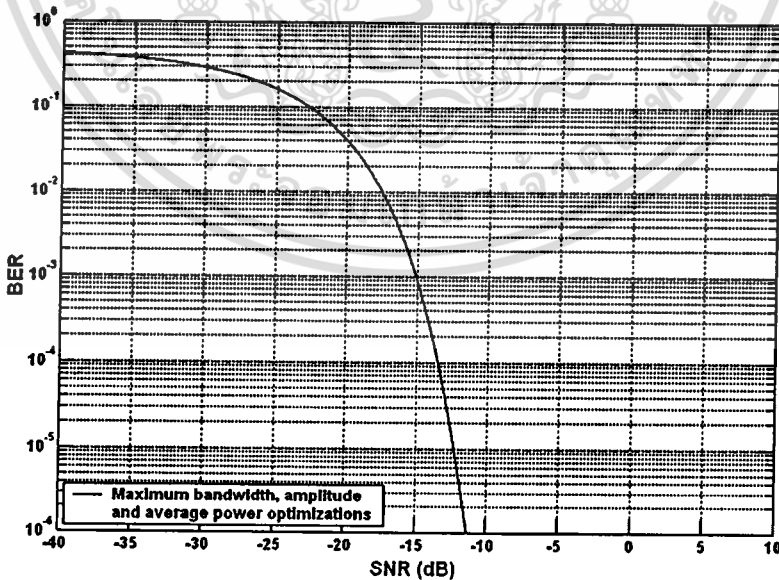
รูปที่ 4.49 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างได้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.50 ในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่

SNR เท่ากับ 1.69 dB ส่วนในกรณีที่ขึ้นไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -6.73 dB



รูปที่ 4.50 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอากาศว่าง

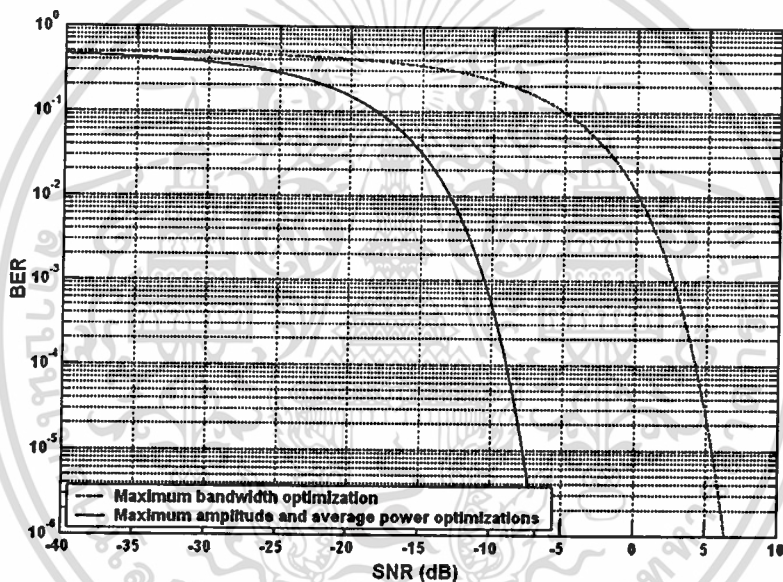


รูปที่ 4.51 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านที่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นภาษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.51 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ซึ่งเป็นกรณีที่มีประสิทธิภาพ BER ดีที่สุดในช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น โดยมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -15.06 dB

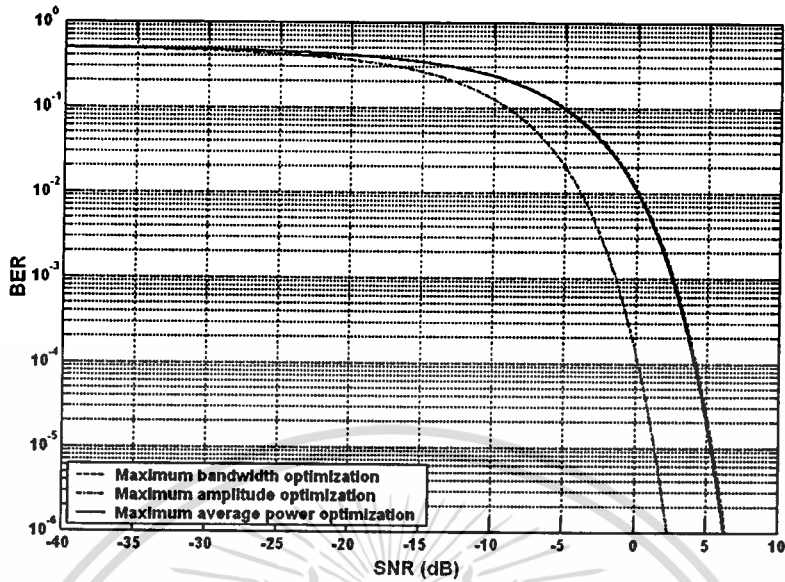
รูปที่ 4.52 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 2.65 dB ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -10.50 dB



รูปที่ 4.52 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

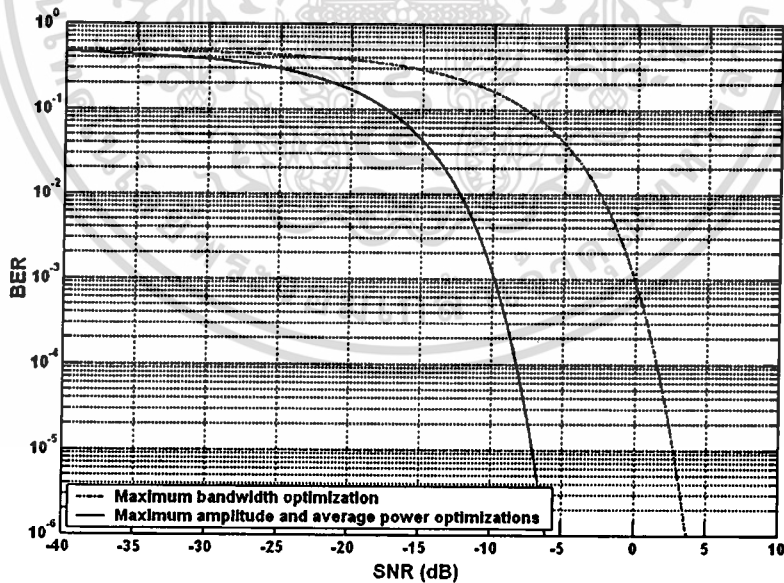
ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.53 ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 2.65 dB ในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -1.40 dB ส่วนในกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 2.51 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.53

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น



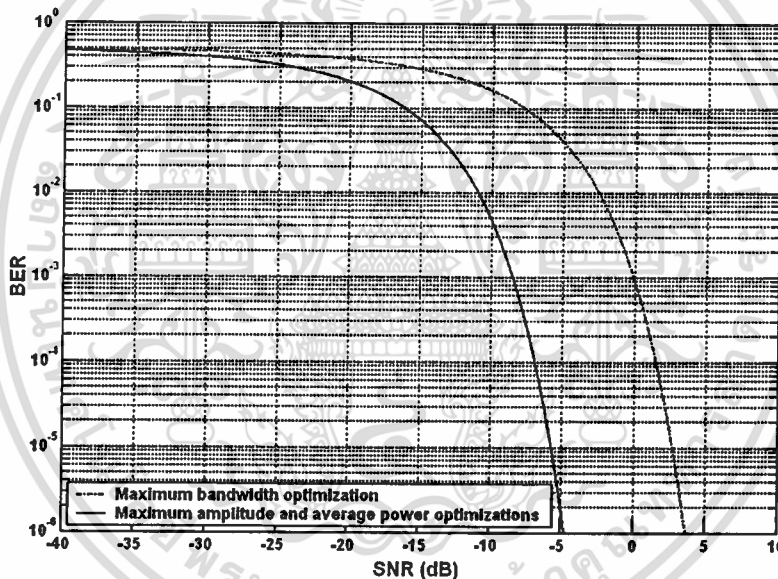
รูปที่ 4.54

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.54 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -0.07 dB ส่วนในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -9.84 dB

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.55 ในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -0.07 dB ส่วนในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -8.49 dB

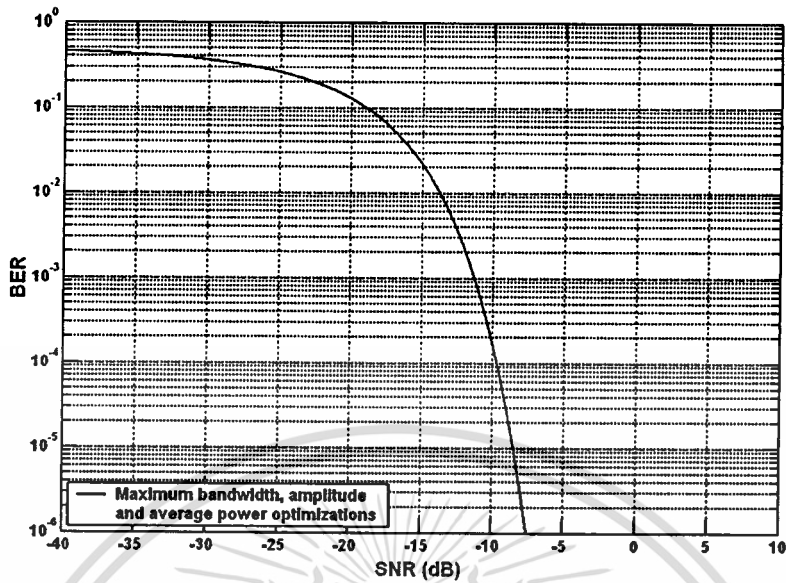


รูปที่ 4.55 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

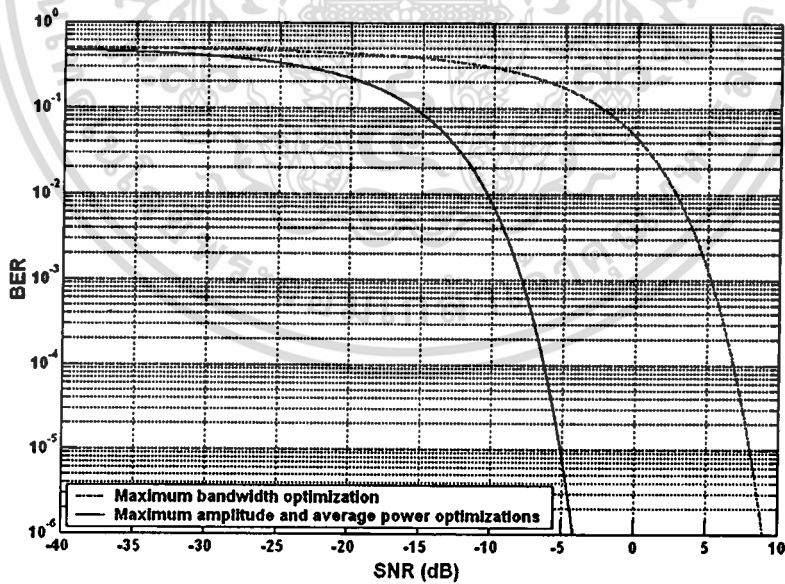
4.7.2 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์

รูปที่ 4.56 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง ซึ่งมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -11.27 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

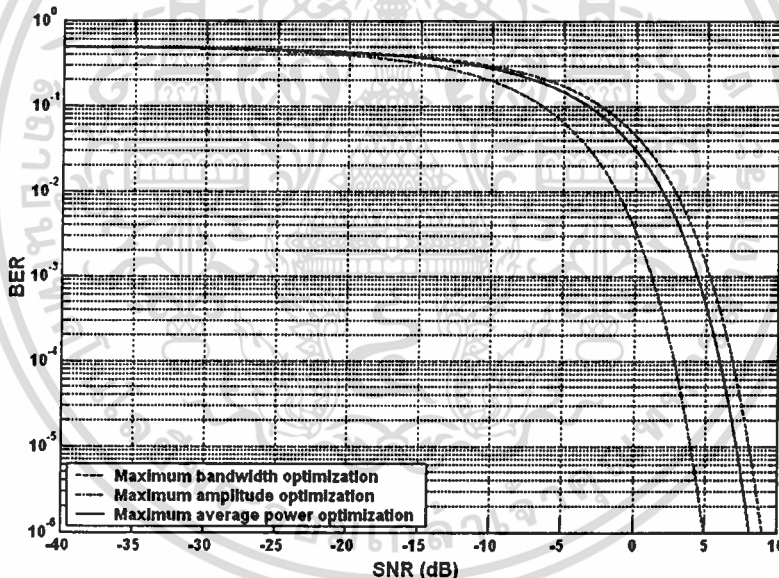


รูปที่ 4.57 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.57 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง ในกรณีที่เป็นการเพิ่มแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 5.25 dB ส่วนในกรณีที่เป็นการเพิ่มแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -7.92 dB

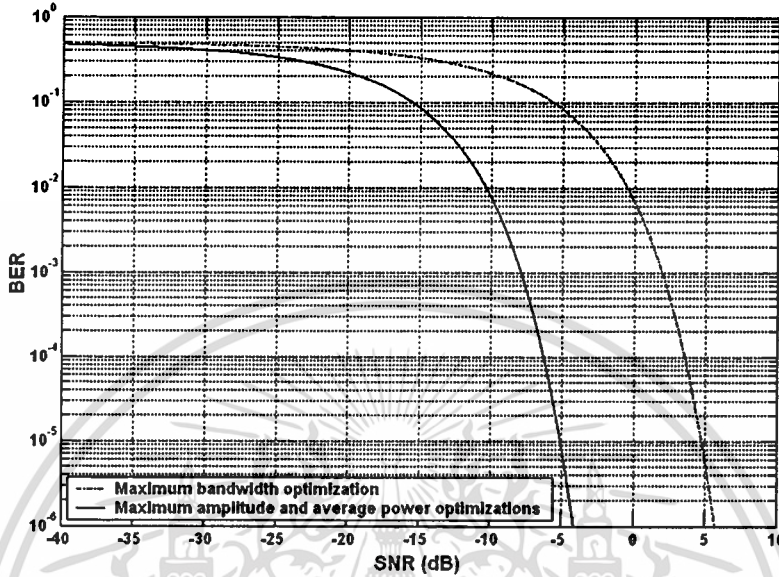
ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.58 ในกรณีที่เป็นการเพิ่มแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 5.25 dB ในกรณีที่เป็นการเพิ่มแอมพลิจูดสูงสุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 1.19 dB ส่วนในกรณีที่เป็นการเพิ่มกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 4.37 dB



รูปที่ 4.58 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

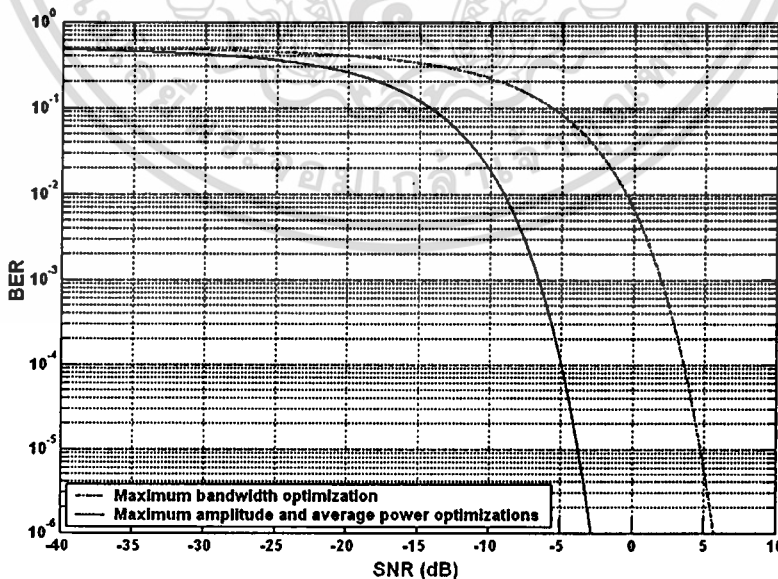
รูปที่ 4.59 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง ในกรณีที่เป็นการเพิ่มแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ

1.97 dB ส่วนในกรณีที่ขึ้นไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -7.88 dB



รูปที่ 4.59

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง



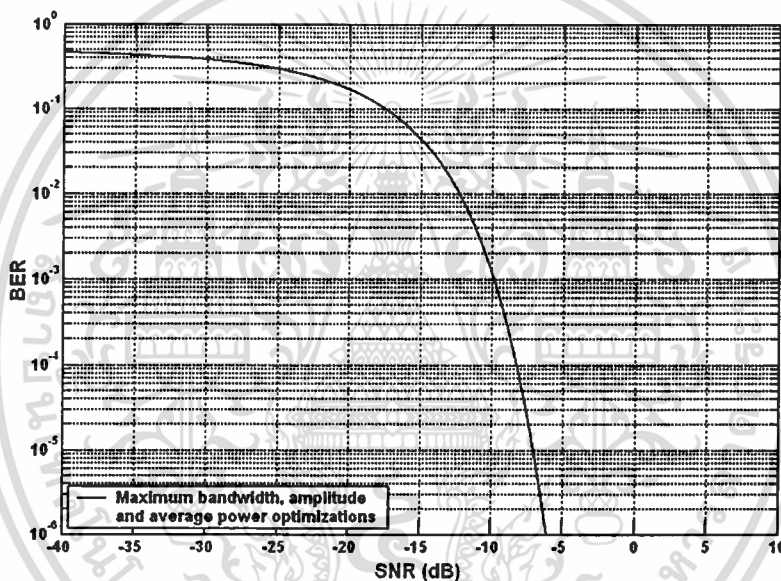
รูปที่ 4.60

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

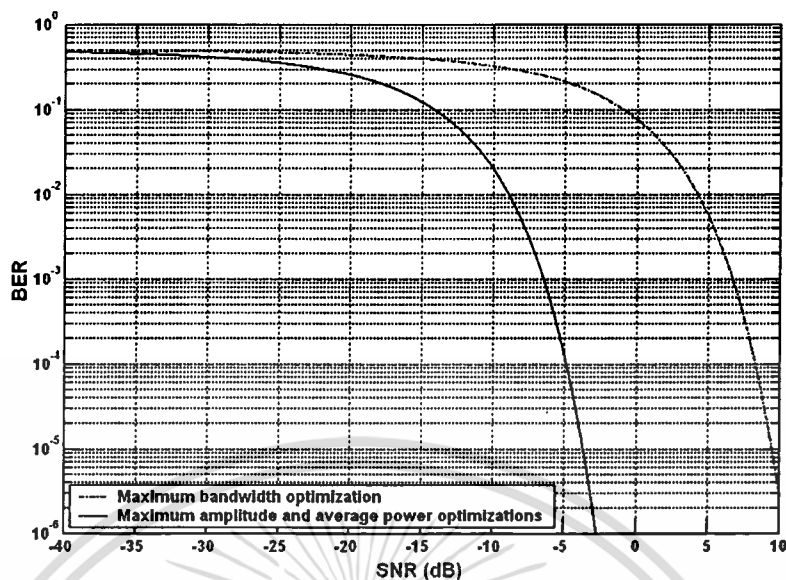
ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.60 ในกรณีที่เป็นการเป็นไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 1.97 dB ส่วนในกรณีที่เป็นการเป็นไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -6.57 dB

รูปที่ 4.61 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ซึ่งมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -9.83 dB

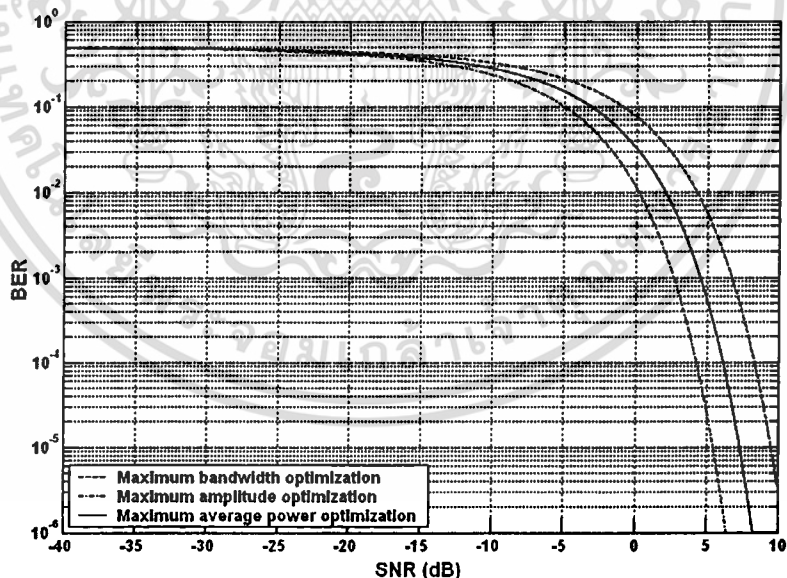


รูปที่ 4.61 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

รูปที่ 4.62 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ในกรณีที่เป็นการเป็นไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 6.71 dB ส่วนในกรณีที่เป็นการเป็นไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -6.45 dB



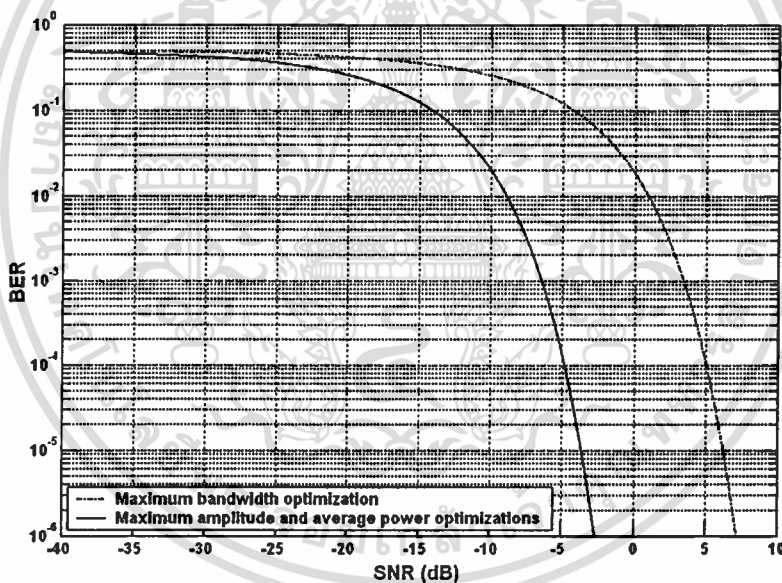
รูปที่ 4.62 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น



รูปที่ 4.63 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.63 ในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 6.71 dB ในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 2.66 dB ส่วนในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 4.52 dB

รูปที่ 4.64 แสดงประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ 3.43 dB ส่วนในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -6.42 dB

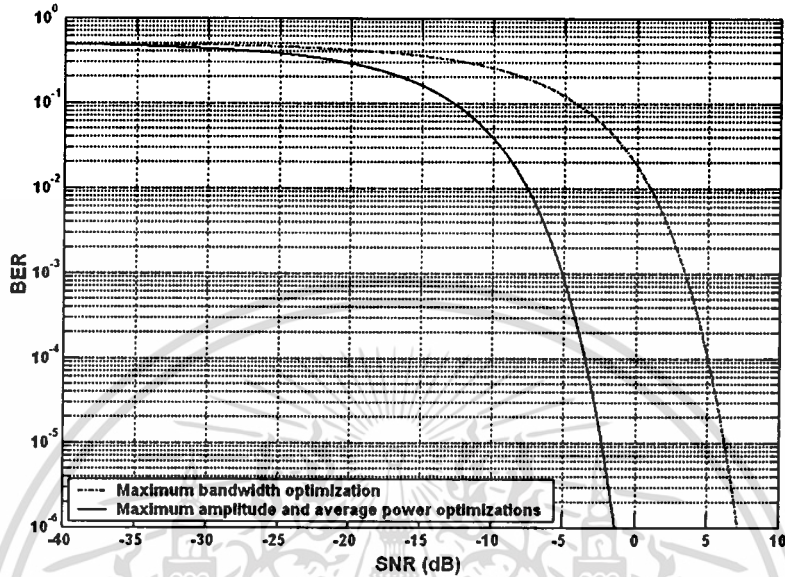


รูปที่ 4.64 ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.65 ในกรณีที่เป็นการไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์กว้างที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SNR เท่ากับ 3.43 dB ส่วนในกรณีที่ขึ้นไปตามเงื่อนไขแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุด จะมี BER เป็น 10^{-3} ที่ SNR เท่ากับ -5.11 dB



รูปที่ 4.65

ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลต ซึ่งเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคารและผ่านช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น

4.8 บทสรุป

ในบทนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์สำหรับการสื่อสาร UWB โดยได้กำหนดสัญญาณส่ง UWB เป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลต ส่งผ่านช่องสัญญาณอวกาศว่างและการสะท้อนพื้น ได้พิจารณาหารูปคลื่นที่รับได้และรูปคลื่นที่ได้จากเครื่องรับในแต่ละกรณี โดยกำหนดให้เป็นแบบแผนการมอดูเลตแบบชั่วคราวต่างกัน ผลที่ได้นี้สามารถนำมาใช้อ้างอิงถึงประสิทธิภาพของระบบ UWB และนำไปพิจารณาออกแบบระบบการสื่อสาร UWB ที่มีประสิทธิภาพ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ของระบบการสื่อสาร UWB ที่มีเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์ โดยใช้สัญญาณส่ง UWB เป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต ซึ่งเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคารของ FCC ได้ใช้ช่องสัญญาณอวกาศว่าง [6]-[8] และช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นที่ที่สามารถพิจารณาในช่วงความถี่ที่กว้างสำหรับการสื่อสาร UWB ทางด้านรับใช้เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์และแบบสหสัมพันธ์ที่มีฟังก์ชันการส่งผ่านความถี่เป็นไปตามเงื่อนไขกำลังสัญญาณรบกวนระหว่างอินพุตและเอาต์พุตมีค่าคงที่ หลังจากนั้นได้หารูปคลื่นที่รับได้ และรูปคลื่นที่ได้จากเครื่องรับเพื่อนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR และ BER ในแต่ละกรณี ซึ่งผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลของประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR

ตารางที่ 5.1 แสดงประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่น จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมจะมีประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ที่ดีที่สุดสำหรับทั้งช่องสัญญาณอวกาศว่างและการสะท้อนพื้น ส่วนรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตจะมีประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ที่มากกว่ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตสำหรับช่องสัญญาณอวกาศว่าง แต่สำหรับช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตจะมีประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ที่มากกว่า ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR สำหรับช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นจะมีค่ามากกว่าสำหรับช่องสัญญาณอวกาศว่าง เนื่องจากมีอัตราขยายที่เกิดจากการแมตซ์กันทั้งรูปคลื่นวิถีตรงและรูปคลื่นวิถีสะท้อนมาเสริมกัน

ตารางที่ 5.1 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่น

รูปคลื่น	ช่องสัญญาณ	
	อวกาศว่าง	การสะท้อนพื้น
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	1.96 dB	3.51 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	0.37 dB	2.44 dB
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	0.63 dB	2.39 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่นได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตจะมีประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ที่ดีที่สุด รองลงมาเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม และรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามลำดับ สำหรับเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR สำหรับช่องสัญญาณอวกาศว่างและการสะท้อนพื้นจะมีค่าประมาณเท่ากัน ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR เมื่อใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมจะมีค่าเป็น 0 dB เนื่องจากฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์จะมีคุณสมบัติเป็นวงจกรองแถบผ่านในอุดมคติที่มีอัตราขยายเป็น 0 dB ในช่วงความถี่แถบผ่าน เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขกำลังสัญญาณรบกวนระหว่างอินพุตและเอาต์พุตมีค่าคงที่

ตารางที่ 5.2 ประสิทธิภาพอัตราขยาย SNR ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่น

รูปคลื่น	ช่องสัญญาณ	
	อวกาศว่าง	การสะท้อนพื้น
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	0.00 dB	0.00 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	-0.19 dB	-0.18 dB
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	0.57 dB	0.57 dB

5.2 สรุปผลของประสิทธิภาพ BER

ตารางที่ 5.3 แสดง SNR ที่ทำให้ประสิทธิภาพ BER เท่ากับ 10^{-3} ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่น รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมจะมีประสิทธิภาพ BER ดีที่สุดทั้งสำหรับช่องสัญญาณอวกาศว่างและการสะท้อนพื้น รองลงมาเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตและรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต ตามลำดับ ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์สำหรับช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นจะดีกว่าช่องสัญญาณอวกาศว่าง เนื่องจากสัญญาณแม่แบบจะแมตซ์ทั้งรูปคลื่นวิถีตรงและรูปคลื่นวิถีสะท้อนจะทำให้เกิดการเสริมกันเป็นผลให้มีประสิทธิภาพ BER ดีขึ้น

SNR ที่ทำให้ประสิทธิภาพ BER เท่ากับ 10^{-3} ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่นแสดงไว้ในตารางที่ 5.4 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมยังคงมีประสิทธิภาพ BER ดีที่สุดทั้งสำหรับช่องสัญญาณอวกาศว่างและการสะท้อนพื้น รองลงมาเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตและรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตตามลำดับ ประสิทธิภาพ BER ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์สำหรับช่องสัญญาณอวกาศว่างจะดีกว่าช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น เนื่องจากสัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่แบบเป็นรูปคลื่นส่ง ดังนั้น รูปคลื่นที่รับได้จากช่องสัญญาณการสะท้อนพื้นจะเกิดความเพี้ยนเมื่อเทียบกับรูปคลื่นส่งมากกว่าจากช่องสัญญาณอวกาศว่างมาก

ตารางที่ 5.3 SNR ที่ทำให้ประสิทธิภาพ BER เท่ากับ 10^{-3} ของเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่น

รูปคลื่น	ช่องสัญญาณ	
	อวกาศว่าง	การสะท้อนพื้น
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	-13.50 dB	-15.06 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	-8.74 dB	-10.50 dB
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	-8.07 dB	-9.84 dB

ตารางที่ 5.4 SNR ที่ทำให้ประสิทธิภาพ BER เท่ากับ 10^{-3} ของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ในกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละรูปคลื่น

รูปคลื่น	ช่องสัญญาณ	
	อวกาศว่าง	การสะท้อนพื้น
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	-11.27 dB	-9.83 dB
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	-7.92 dB	-6.45 dB
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	-7.88 dB	-6.42 dB

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

ในการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังไม่ได้พิจารณาคูสมบัติของสายอากาศที่ใช้ส่งและรับ ดังนั้นเพื่อในการออกแบบระบบการสื่อสาร UWB ที่มีความถูกต้อง จึงควรวิเคราะห์ที่สายอากาศแบบต่างๆ ช่องสัญญาณที่ใช้วิเคราะห์ก็คือช่องสัญญาณอวกาศว่างและช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น ยังเป็นช่องสัญญาณเชิงทฤษฎี จึงควรจะพัฒนามาเป็นช่องสัญญาณที่ได้จากการวัดจริงมาวิเคราะห์ เพื่อให้เข้าใจในการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a new technology," **2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)**, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.
- [2] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: The emergence of an Important RF Technology," **2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)**, vol. 2, pp. 1169-1172, May 2001.
- [3] 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.
- [4] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rule Regarding UWB Transmission Systems," **First Report**, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [5] P. Supanakoon, K. Wansiang, S. Promwong and J. Takada, "Simple Waveform for UWB Communication," **The 2005 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology International Conference (ECTI-CON 2005)**, pp.626-629, May 2005.
- [6] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' Transmission Formula for UWB Systems," **Technical Report of IEICE**, WBS2003-8/MW2003-20, May 2003.
- [7] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, "Experimental Evaluation Scheme of UWB Antenna Performance," **Technical Meeting on Instrument and Measurement**, IEE Japan, IM-03-35, June 2003.
- [8] S. Promwong, W. Hachitani, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Experimental Study of Ultra-Wideband Transmission Based on Friis' Transmission Formula," **The Third International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT) 2003**, vol. 1, pp. 467-470, Sept.2003.
- [9] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Theoretical Ground Reflection Model for UWB Communication Systems," **The International Symposium on Communications and Information Technologies 2004 (ISCIT 2004)**, pp. 1208-1212, Oct 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Path Loss and Matched Filter Gain of Free Space and Ground Reflection Channels for UWB Radio Systems," **The International Conference on Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering (TENCON 2004)**, pp. 125-128, Nov 2004.
- [11] Z. Bai, W. Zhang, S. Xu, W. Liu and K. Kwak, "On The Performance of Multiple Access DS-BPAM UWB System in Data and Image Transmission," **IEEE International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT)**, vol. 2, pp. 851-854, Oct. 2005.
- [12] J. Cha, K. Kwak, C. Lee, J. Jeong and I. Lee, "Chaotic-OOK UWB Modem Using New Unipolar ZCD Codes for Wireless Pan," **International Conference on Consumer Electronics (ICCE)**, pp. 197-198, Jan. 2006.
- [13] M. Ghavami, L. B. Michael and R. Kohno, **Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering**, John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [14] H. T. Friis, "A Note on A Simple Transmission Formula," **Proc. IRE**, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.
- [15] P. Supanakon, K. Teplee, S. Phomwong, S. Keawmechai and J. Takada, "Theoretical SNR Gain and BER Performances of UWB Communications with Matched Filter and Correlation Receivers," **The International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2006)**, no. 3, pp. 269-272, July 2006.
- [16] K. Teplee, P. Supanakon, S. Phomwong and J. Takada, "BER Performance of UWB Communications with Matched Filter and Correlation Receivers," **The 2007 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON 2007)**, no. 2, pp. 872-875, May 2007.
- [17] K. Teplee, P. Supanakon, S. Phomwong and J. Takada, "BER Performance of UWB Waveforms Satisfied FCC Indoor and Outdoor Spectral Masks," **Have been published on Thammasat International Journal of Science and Technology (TIJSAT)**.
- [18] J. G. Proakis, **Digital Communications**, 4th edition, McGraw-Hill, 2001
- [19] J. Foester, "Channel Modeling Sub-committee Report Final," **IEEE P802.15-02/368r5-SG3a**, Nov. 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

- [1] P. Supanakon, K. Teplee, S. Phomwong, S. Keawmechai and J. Takada, "Theoretical SNR Gain and BER Performances of UWB Communications with Matched Filter and Correlation Receivers," The International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2006), no. 3, pp. 269-272, July 2006
- [2] K. Teplee, P. Supanakon, S. Phomwong and J. Takada, "BER Performance of UWB Communications with Matched Filter and Correlation Receivers," The 2007 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON 2007), no. 2, pp. 872-875, May 2007.
- [3] K. Teplee, P. Supanakon, S. Phomwong and J. Takada, "BER Performance of UWB Waveforms Satisfied FCC Indoor and Outdoor Spectral Masks," Have been published on Thammasat International Journal of Science and Technology (TIJSAT).

ITC-CSCC 2006

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

PROCEEDINGS

VOLUME III

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

THEORETICAL SNR GAIN AND BER PERFORMANCES OF UWB COMMUNICATIONS WITH MATCHED FILTER AND CORRELATION RECEIVERS

Pichaya Supanakoon^{1,2}, Kultharee Teplee², Sathapron Promwong^{1,2}, Sompoph Keawmechai² and Jun-ichi Takada³

¹Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT),

²Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

E-mail: {kspichay,s8061011,kpsathap,kksompop}@kmitl.ac.th

³Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1-S6-4, O-okayama, Meguro-ku, 152-8550, Tokyo, Japan.

E-mail: takada@ide.titech.ac.jp

ABSTRACT

In this paper, theoretical signal-to-noise ratio (SNR) gain and bit error rate (BER) performances of ultra wideband (UWB) communications with matched filter and correlation receivers are proposed. The rectangular passband pulse with specific center frequency and bandwidth is used as the UWB transmitted signal. The complex form of Friis' transmission formula is considered as the UWB free space channel. Therefore, the distortion effect caused from free space channel can consider. After that, the closed form expressions of SNR gain and BER performances are derived and illustrated. The results are discussed in the paper.

Keywords: Ultra wideband (UWB) communications, matched filter receiver, correlation receiver.

1. INTRODUCTION

Recently, ultra wideband (UWB) radio technology has become an important topic for microwave communication because of its low cost and low power consumption potentials [1]-[2]. The UWB technology is different from other radio frequency (RF) technologies. Instead of using a narrow carrier frequency, UWB transmits pulses with power spectral density (PSD) in the range of the ultra wide frequency spectrum. The Federal Communications Commission (FCC) [3] in US specified that UWB signal has a frequency spectrum ranging from 3.1 to 10.6 GHz. The FCC defined the UWB signal as those which have a fractional bandwidth equal or greater than 0.20, or occupies bandwidth equal or greater than 500 MHz.

The Friis' transmission formula [4] is widely used to calculate the free space path loss for narrow band communication. After that, the complex form of Friis' transmission formula is developed for UWB communications [5]-[7]. The matched filter and correlation receivers are used as the UWB receivers [8]-[9]. Although, the performances of UWB communications are analyzed [10]-[11], there are

no considerations about the FCC regulation of UWB signal and distortion of UWB signal caused by free space channel.

In this paper, theoretical signal-to-noise ratio (SNR) gain and bit error rate (BER) performances of UWB communications with matched filter and correlation receivers are proposed. The rectangular passband pulse with specific center frequency and bandwidth is used as the UWB transmitted signal [12]. The complex form of Friis' transmission formula is considered as the UWB free space channel. Therefore, the distortion effect caused by free space channel can consider. At the receiver, the matched filter and correlation receivers with frequency transfer functions satisfied the constant noise power condition between the input and output are used. After that, the closed form expressions of SNR gain and BER performances are derived and illustrated.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2, the theoretical closed form expressions of SNR gain and BER performances for UWB communications with matched filter and correlation receivers are derived. Next, analysis results are illustrated in Sec. 3. Finally, the conclusions are discussed in Sec. 4.

2. THEORETICAL SNR GAIN AND BER PERFORMANCES

2.1. UWB Transmitted Signal

The UWB transmitted signal considered in this paper is a rectangular passband pulse. The expression of this signal in time domain v_t and its spectral density function V_t are [12]

$$v_t(t) = \frac{A}{f_b} [f_H \text{sinc}(2f_H t) - f_L \text{sinc}(2f_L t)], \quad (1)$$

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

where t is the time, f is the frequency, A is the peak amplitude, f_c is the center frequency, f_b is the spectral bandwidth, $f_L = f_c - f_b/2$ is the lowest frequency, $f_H = f_c + f_b/2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

is the highest frequency and $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$. This signal has A V peak amplitude at time of zero and its spectral density is real constant of $1/(2f_b)$ in the frequency ranges from $-f_H$ to $-f_L$ and f_L to f_H .

2.2. UWB Free Space Channel

For the UWB free space channel, the complex form of Friis' transmission formula is used [5]-[7]. The transmitting (Tx) and receiving (Rx) antennas are considered to have one constant gains. The frequency transfer function of free space channel H_f can be written as

$$H_f(f, d) = \frac{c}{4\pi|f|d} e^{-j2\pi f d/c}, \quad (3)$$

where d is the transmitter-receiver (T-R) separation distance and c is the velocity of light. This equation is satisfied for both positive and negative frequencies as it satisfies the causality.

2.3. UWB Received Signal

The spectral density of UWB received signal V_r is calculated by using the multiplication between H_f and V_t , which can be written as

$$\begin{aligned} V_r(f, d) &= H_f(f, d) \cdot V_t(f) \\ &= \begin{cases} \frac{cA}{8\pi f_b |f| d} e^{-j2\pi f d/c} & ||f| - f_c| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & ||f| - f_c| > \frac{f_b}{2} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

This spectral density of UWB received signal included the distortion effect caused by the UWB free space channel.

2.4. UWB Receivers

In this paper, the matched filter and correlation receivers with frequency transfer functions satisfied the constant noise power condition between the input and output are considered. The output signals of both receivers are evaluated.

2.4.1. Matched Filter Receiver

For the matched filter or optimum correlation receivers, the spectral density of template signal is the complex conjugate of V_r with the gain is satisfied the constant noise power condition. Therefore, the frequency transfer function of matched filter receiver H_m can be written as

$$\begin{aligned} H_m(f, d) &= \frac{\sqrt{f_b}}{\sqrt{\int_0^\infty |V_r(f, d)|^2 df}} V_r^*(f, d), \\ &= \begin{cases} \frac{\sqrt{f_b}}{|f|} e^{j2\pi f d/c} & ||f| - f_c| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & ||f| - f_c| > \frac{f_b}{2} \end{cases}, \end{aligned} \quad (5)$$

where $*$ is the complex conjugate operator.

The spectral density of output signal from matched filter receiver V_m is calculated by using the multiplication between H_m and V_r , which can be written as

$$\begin{aligned} V_m(f, d) &= H_m(f, d) \cdot V_r(f, d) \\ &= \begin{cases} \frac{cA\sqrt{f_b}}{8\pi f_b |f|^2 d} & ||f| - f_c| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & ||f| - f_c| > \frac{f_b}{2} \end{cases}. \end{aligned} \quad (6)$$

2.4.2. Correlation Receiver

For the correlation or transmitted template signal receivers, the spectral density of template signal is the complex conjugate of V_t with the gain is satisfied the constant noise power condition. Therefore, the frequency transfer function of correlation receiver H_c can be written as

$$\begin{aligned} H_c(f) &= \frac{\sqrt{f_b}}{\sqrt{\int_0^\infty |V_t(f)|^2 df}} V_t^*(f), \\ &= \begin{cases} 1 & ||f| - f_c| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & ||f| - f_c| > \frac{f_b}{2} \end{cases}. \end{aligned} \quad (7)$$

From this equation, the ideal band-pass filter is the correlation receiver of the rectangular passband waveform.

The spectral density of output signal from correlation receiver V_c is calculated by using the multiplication between H_c and V_r , which can be written as

$$\begin{aligned} V_c(f, d) &= H_c(f) \cdot V_r(f, d) \\ &= \begin{cases} \frac{cA}{8\pi f_b |f| d} & ||f| - f_c| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & ||f| - f_c| > \frac{f_b}{2} \end{cases}, \end{aligned} \quad (8)$$

which is the same pulse of the UWB received signal.

2.5. SNR Gain Performance

The matched filter and correlation receivers used peak detector to decide the digital data. Therefore, the theoretical SNR gain of these receivers are defined as the ratio between peak power of received signal at receiver input and that of signal at receiver output. The SNR gains of matched filter and correlation receivers, G_m and G_c in dB can be respectively derived as

$$\begin{aligned} G_m &= 20 \log \left[\frac{\int_0^\infty |V_m(f, d)| df}{\int_0^\infty |V_r(f, d)| df} \right], \\ &= 20 \log \left[\frac{f_b}{\sqrt{f_L f_H} \ln \left(\frac{f_H}{f_L} \right)} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} G_c &= 20 \log \left[\frac{\int_0^\infty |V_c(f, d)| df}{\int_0^\infty |V_r(f, d)| df} \right], \\ &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

The SNR gain of matched filter receiver depended on frequency parameters of UWB pulse while that of correlation receiver is 0 dB constant value.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6. BER Performance

The theoretical BER performance is considered by using the correlation coefficient between received and template signals. The correlation coefficients of matched filter and correlation receivers, C_m and C_c can be respectively derived as

$$C_m = \frac{\int_0^\infty |V_m(f, d)| df}{\sqrt{\int_0^\infty |V_r(f, d)|^2 df \cdot \int_0^\infty |H_m(f, d)|^2 df}},$$

$$= 1, \quad (11)$$

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

$$= \frac{\sqrt{f_L f_H} \ln\left(\frac{f_H}{f_L}\right)}{f_b}. \quad (12)$$

The correlation coefficient of matched filter receiver is the ideal case while that of correlation receiver is depended on frequency parameters of UWB pulse.

The UWB modulation schemes can be classified in to the antipodal modulation scheme such as binary pulse amplitude modulation (BPAM) and orthogonal modulation scheme such as on-off keying (OOK) and pulse position modulation (PPM) with modulation index of $\delta = 1$.

For the matched filter receiver which is ideal case, the theoretical BER performance bounds in the additive white Gaussian noise (AWGN) of the antipodal and orthogonal modulation schemes, $B_{m,a}$ and $B_{m,o}$, can be respectively written as [14]

$$B_{m,a} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (13)$$

$$B_{m,o} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right), \quad (14)$$

where E_b is the energy per bit, N_0 is the noise power spectral density and

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt, \quad x \geq 0.$$

For the correlation receiver, the theoretical BER performance bounds in the AWGN of the antipodal and orthogonal modulation schemes, $B_{c,a}$ and $B_{c,o}$, can be respectively written as

$$B_{c,a} = Q\left(\sqrt{\frac{2\sqrt{f_L f_H} \ln\left(\frac{f_H}{f_L}\right) E_b}{f_b N_0}}\right), \quad (15)$$

$$B_{c,o} = Q\left(\sqrt{\frac{\sqrt{f_L f_H} \ln\left(\frac{f_H}{f_L}\right) E_b}{f_b N_0}}\right). \quad (16)$$

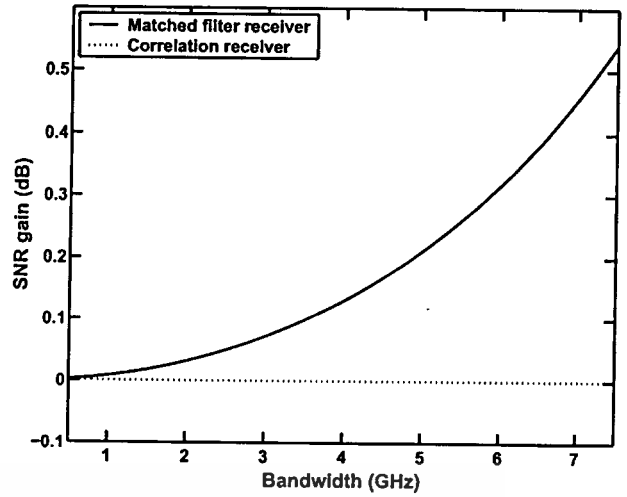


Fig.1: SNR gains of matched filter and correlation receivers along the bandwidth from 0.5 to 7.5 GHz.

3. PERFORMANCE ANALYSIS RESULTS

In this section, the performances of theoretical SNR gain and BER are analyzed. The rectangular passband pulse is used as the UWB transmitted signal. The center frequency f_c is set to be 6.85 GHz for all analyses, which is the center frequency of UWB frequency bandwidth specified by FCC [3].

Figure 1 shows the SNR gains of matched filter and correlation receivers along the signal bandwidth from 0.5 to 7.5 GHz. The SNR gain of correlation receiver is 0 dB constant value, while that of matched filter receiver is higher when the signal bandwidth is wider. For the matched filter receiver, the SNR gain of 0.5 GHz bandwidth is about 0.00 dB, while the SNR gain of 7.5 GHz bandwidth is about 0.54 dB.

For the BER analysis, the three cases of UWB signals are considered. The signal bandwidths of first, second and last cases are respectively set to be 0.5, 4.0 and 7.5 GHz, which are the minimum, middle and maximum bandwidths of UWB signals specified by FCC [3]. The BER of both matched filter and correlation receivers for the antipodal and orthogonal modulation schemes are shown in Figs. 2 and 3, respectively. The BER of antipodal modulation scheme is less than that of orthogonal modulation scheme, because of the decision threshold level of antipodal modulation scheme wider than that of orthogonal modulation scheme. The BER of matched filter receiver is the same for all cases of UWB signals and is the theoretical BER bound, because of the correlation coefficient is equal to 1.00 that is the template signal is perfectly matched with received signal. Then, the distortion caused from free space channel can be eliminated. For the correlation receiver, the BER is higher when the bandwidth of UWB signal is wider. That because the fact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

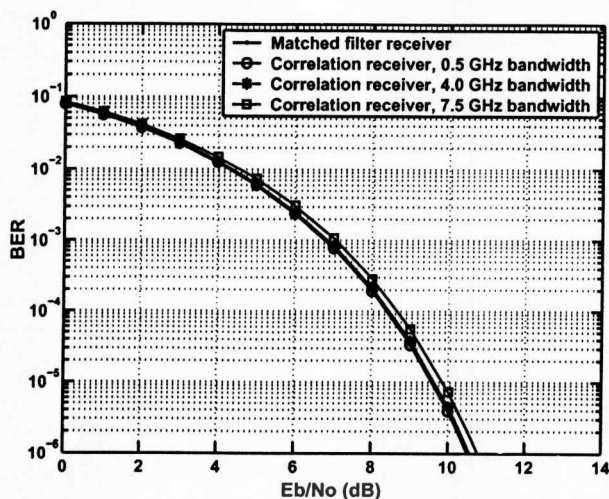


Fig.2: BER of the matched filter and correlation receivers for the antipodal modulation scheme.

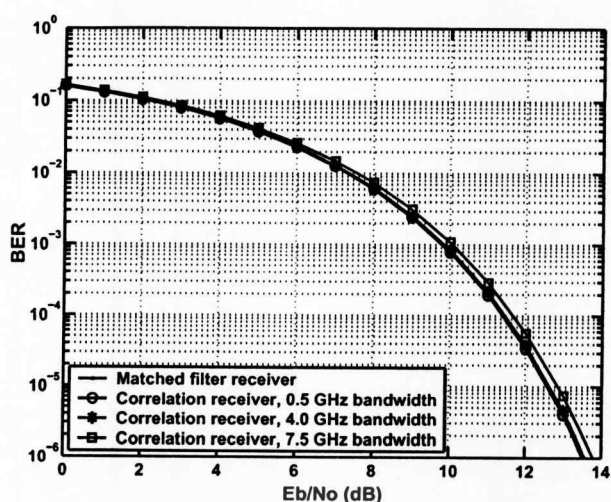


Fig.3: BER of the matched filter and correlation receivers for the orthogonal modulation scheme.

of wider signal bandwidth has more distortion caused from free space channel. The BER of 0.5 GHz signal bandwidth is identical with that of matched filter receiver, because of the correlation coefficient is about 1.00, while the others are equal to 0.99 and 0.94 for 4.0 and 7.5 GHz signal bandwidths, respectively.

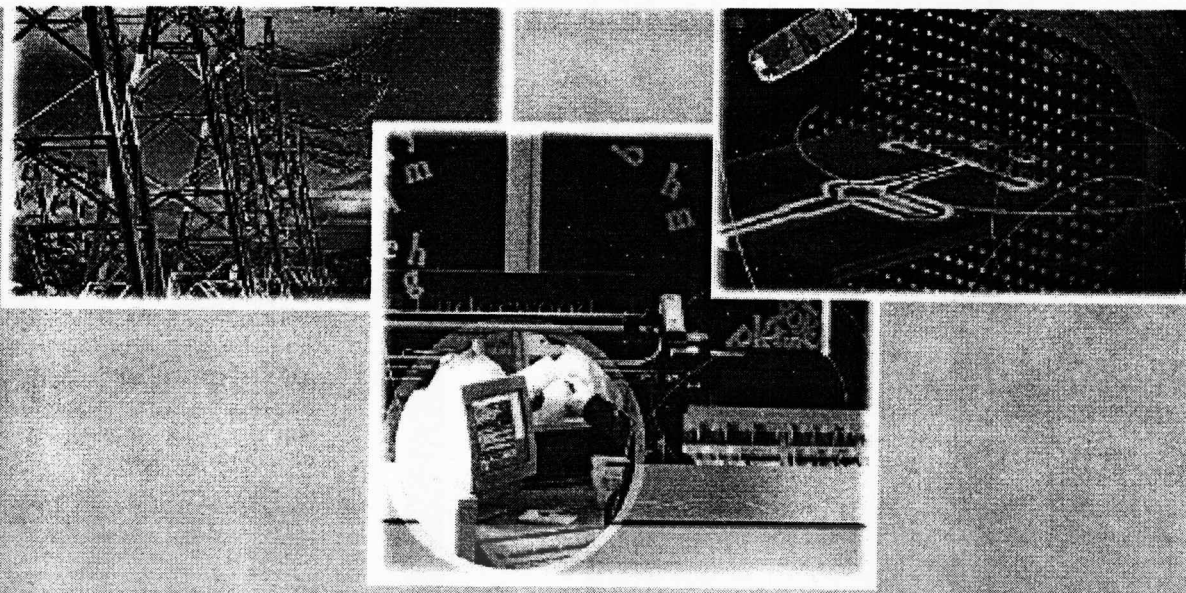
4. CONCLUSION

In this paper, theoretical SNR gain and BER performances of UWB communications with matched filter and correlation receivers are proposed. The distortion effect caused from free space channel is considered. From the results, the SNR gain of correlation receiver is equal to 0 dB, while that of matched filter receiver is higher when the signal bandwidth is wider. For the matched filter receiver, the BER is the ideal theoretical bound which is the minimum BER case. For the correlation receiver, the BER is higher when the signal bandwidth is wider. That because the fact of wider signal bandwidth has more distortion cause from free space channel. Therefore, the design of template signal approached to ideal matched filter case is very attractive challenge for improving both SNR gain and BER performances.

5. REFERENCES

- [1] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New Technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.
- [2] 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.
- [3] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [4] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," *Proc. IRE*, Vol 34, no 5, pp. 254-256, May 1946.
- [5] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' Transmission Formula for UWB Systems," *Technical Report of IE-ICE*, WBS2003-8/MW2003-20, May 2003.
- [6] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, "Experimental Evaluation Scheme of UWB Antenna Performance," *Technical Meeting on Instrument and Measurement*, IEE Japan, IM-03-35, June 2003.
- [7] S. Promwong, W. Hachitani, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Experimental Study of Ultra-Wideband Transmission Based on Friis' Transmission Formula," *The Third International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT) 2003*, vol. 1, pp. 467-470, Sept. 2003.
- [8] X. Xu and R. M. Narayanan, "Impact of Different Correlation Receiving Techniques on The Imaging Performance of UWB Random Noise Radar," *2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 7, pp. 4525-4527, July 2003.
- [9] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Path Loss and Matched Filter Gain for UWB System," *2004 International Symposium on Antenna and Propagation (ISAP)*, pp. 97-100, Aug. 2004.
- [10] Z. Bai, W. Zhang, S. Xu, W. Liu and K. Kwak, "On The Performance of Multiple Access DS-BPAM UWB System in Data and Impage Transmission," *IEEE International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT)*, vol. 2, pp. 851-854, Oct. 2005.
- [11] J. Cha, K. Kwak, C. Lee, J. Jeong and I. Lee, "Chaotic-OOK UWB Modem Using New Unipolar ZCD Codes for Wireless Pan," *International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 197-198, Jan. 2006.
- [12] P. Supanakoon, K. Wansiang, S. Promwong and J. Takada, "Simple Waveform for UWB Communication," *The 2005 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON 2005)*, pp. 626-629, May 2005.
- [13] I. Oppermann, M. Hamalainen and J. Iinatti, *UWB Theory and Applications*, John Wiley & Sons, 2004.
- [14] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th edition, McGraw-Hill, 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ECTI-CON 2007

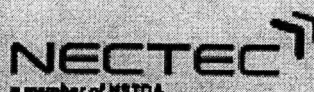
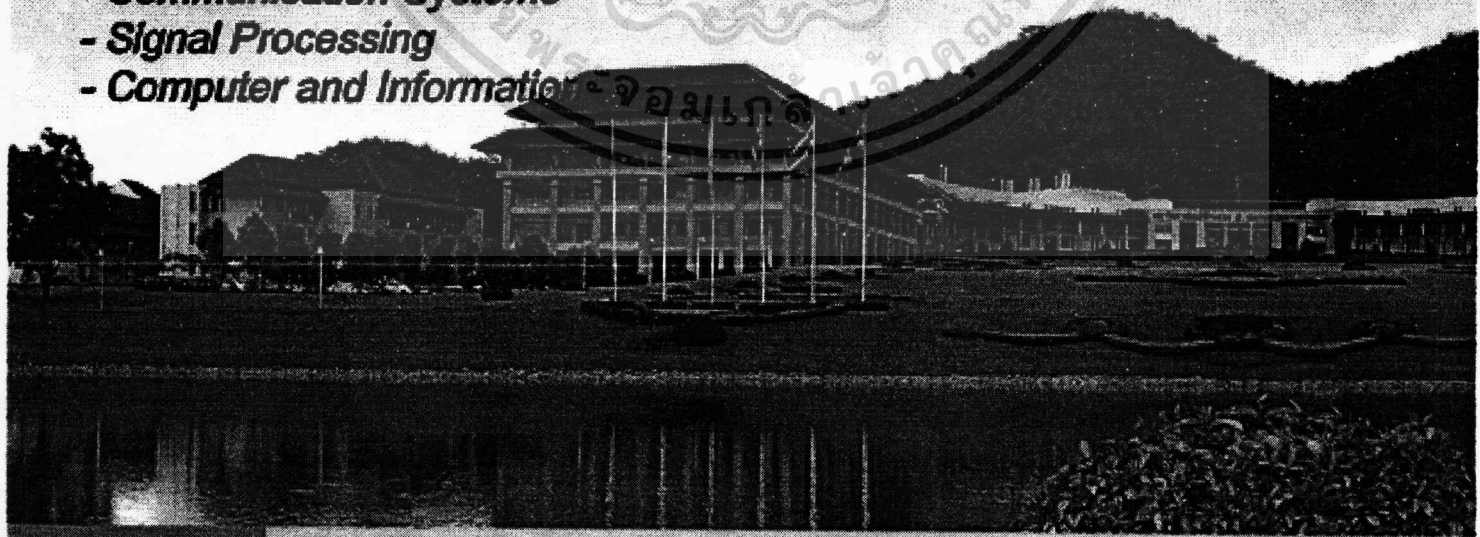
Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand
May 9-12, 2007

VOLUME 1

- Circuits and Systems
- Control Engineering
- Electrical Power Engineering
- Other Related Fields

VOLUME 2

- Communication Systems
- Signal Processing
- Computer and Information



BER Performance of UWB Communications with Matched Filter and Correlation Receivers

Kultharee Teplee*, Pichaya Supanakoon*,†, Sathaporn Promwong*,† and Jun-ichi Takada‡

*Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,

†Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabung, Bangkok 10520, THAILAND

E-mail: {s8061011,kspichay,kpsathap}@kmitl.ac.th

‡Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,

2-12-1-S6-4, O-okayama, Meguro-ku, 152-8550, Tokyo, Japan

E-mail: takada@ide.titech.ac.jp

Abstract—In this paper, the bit error rate (BER) performance of ultra wideband (UWB) communications with matched filter and correlation receivers are analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which is satisfied the UWB signal definition and Federal Communications Commission (FCC) indoor and outdoor limit spectral masks, are used as the transmitted UWB signal. The complex form of Friis' transmission formula is considered as the UWB free space channel. Therefore, the distortion effects caused from the channel are included. The BER performance of each waveform is shown and compared. The results are discussed in the conclusion.

I. INTRODUCTION

An ultra wideband (UWB) radio technology has become an important topic for microwave communication because of its low cost and low power consumption potentials [1]-[3]. The UWB differs from the conventional narrow band radio frequency (RF) and spread spectrum (SS) technologies. The UWB uses an extremely wideband of RF spectrum to transmit the data with very short pulses and power spectral density (PSD) in the range of ultra wide frequency spectrum instead of using narrow carrier frequency in traditional RF technologies. The UWB is a unique and new usage of recently legalized frequency spectrum. The UWB technology is specified the frequencies ranging from 3.1 GHz to 10.6 GHz by Federal Communications Commission (FCC) [4]. The FCC defined the UWB signal as those, which have a fractional bandwidth equal or greater than 0.20, or occupied bandwidth equal or greater than 500 MHz.

The Friis' transmission formula [5] is widely used to calculate the free space path loss for narrow band communications. After that, the complex form of Friis' transmission formula is developed for UWB communications [6]-[8]. The matched filter and correlation receivers are used as the UWB receivers [9]-[12]. Although, the performances of UWB communications are analyzed [13], [14], there are no considerations about the FCC regulation of UWB signal and distortion of UWB signal caused by channel. After that, the rectangular waveform distorted by UWB free space channel is used to derive the theoretical BER

performance [15]. However, there are no considerations about other causal waveforms.

In this paper, the BER performance of UWB communications with matched filter and correlation receivers are analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which is satisfied the UWB signal definition and FCC indoor and outdoor limit spectral masks [16], are used as the transmitted UWB signal. The complex form of Friis' transmission formula is considered as the UWB free space channel. The spectral density of received signal considering the distortion caused by free space channel is evaluated. At the receiver, the matched filter and correlation receivers with frequency transfer functions, which is satisfied the constant noise power condition between the input and output, are used. The BER performance of each waveform is shown and compared.

This paper is organized as follows. Sections 2 and 3, the UWB waveform models and analysis of BER performance are briefly discussed, respectively. Next the analysis results are illustrated in Sec. 4. Finally, the conclusions are discussed in Sec. 5.

II. UWB WAVEFORM MODELS

For UWB waveforms, the rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms are considered as the UWB transmitted waveform (v_t) in time domain and its spectral density (V_t) in frequency domain. These waveforms can satisfy the FCC definition of UWB signal and FCC spectral masks for indoor and outdoor limits. The parameters obtained from maximum bandwidth, amplitude and average power optimizations, which is proposed in [16], are used.

A. Rectangular Passband Waveform

The rectangular passband transmitted waveform in time domain and its spectral density function are given by

$$v_t(t) = \frac{A}{f_b} [f_H \text{sinc}(2f_H t) - f_L \text{sinc}(2f_L t)], \quad (1)$$

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

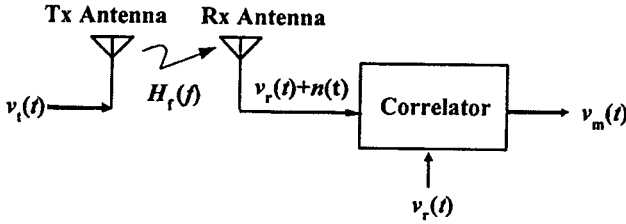


Fig. 1. Block diagram of matched filter receiver system.

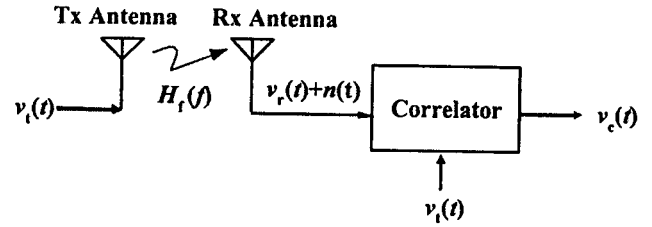


Fig. 2. Block diagram of correlation receiver system.

where A is the maximum amplitude, f_b is the occupied bandwidth, f_c is the center frequency, $f_L = f_c - f_b/2$ and $f_H = f_c + f_b/2$ are the minimum and maximum frequencies.

B. Modulated Rectangular Waveform

The modulated rectangular transmitted waveform in time domain and its spectral density function are given by

$$v_t(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_c t) & |t| \leq \frac{t_b}{2} \\ 0 & |t| > \frac{t_b}{2} \end{cases}, \quad (3)$$

$$V_t(f) = \frac{At_b}{j2} \begin{cases} \text{sinc}[t_b(f - f_c)] \\ -\text{sinc}[t_b(f + f_c)] \end{cases}, \quad (4)$$

where A is the maximum amplitude, f_c is the carrier frequency and t_b is the pulse width of waveform.

C. Modulated Gaussian Waveform

The modulated Gaussian transmitted waveform in time domain and its spectral density function are given by

$$v_t(t) = Ae^{-(t/d)^2} \sin(2\pi f_c t), \quad (5)$$

$$V_t(f) = \frac{Ad\sqrt{\pi}}{j2} \begin{bmatrix} e^{-\pi^2 d^2 (f - f_c)^2} \\ -e^{-\pi^2 d^2 (f + f_c)^2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

where A is the maximum amplitude of envelope waveform, f_c is the carrier frequency and d is the $1/e$ characteristic decay time.

III. ANALYSIS OF BER PERFORMANCE

In this section, the analysis of BER performance is theoretically discussed. The UWB waveform models discussed in Sec. 2 are used as the UWB transmitted waveforms. For UWB free space channel, the complex form of Friis' transmission formula is used [6]-[8]. The transmitting (Tx) and receiving (Rx) antennas are considered to have one constant gains. The frequency transfer function of free space channel H_f can be written as

$$H_f(f, d) = \frac{c}{4\pi|f|d} e^{-j2\pi f d/c}, \quad (7)$$

where d is the transmitter-receiver (T-R) separation distance and c is the velocity of light. This equation is satisfied for both positive and negative frequencies as it satisfies the causality.

The spectral density of UWB received signal V_r is calculated by using multiplication between H_f and V_t , which can be written as

$$V_r(f, d) = H_f(f, d) \cdot V_t(f). \quad (8)$$

This spectral density of UWB received signal includes the distortion effect caused by UWB free space channel.

The matched filter and correlation receivers with frequency transfer functions satisfied constant noise power condition between input and output are considered. For matched filter receiver or optimum correlation receiver, the spectral density of template signal is the complex conjugate of V_r . The block diagram of matched filter receiver system is shown in Fig. 1. For correlation or transmitted template signal receiver, the spectral density of template signal is the complex conjugate of V_t . Figure 2 shows the block diagram of correlation receiver system. The receiver gains of both receivers are satisfied the constant noise power condition. Therefore, the frequency transfer functions of matched filter and correlation receivers, (H_m and H_c), can be written as

$$H_m(f, d) = \frac{\sqrt{2f_b}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_r(f, d)|^2 df}} V_r^*(f, d), \quad (9)$$

$$H_c(f, d) = \frac{\sqrt{2f_b}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_t(f, d)|^2 df}} V_t^*(f, d), \quad (10)$$

where $*$ is the complex conjugate operator.

The spectral densities of output signal from matched filter and correlation receivers, (V_m and V_c), can be written as

$$V_m(f, d) = H_m(f, d) \cdot V_r(f, d), \quad (11)$$

$$V_c(f, d) = H_c(f, d) \cdot V_t(f, d). \quad (12)$$

The signal-to-noise ratio (SNR) gain of these receivers are defined as the ratio between average power of received signal at receiver input and that at receiver output. The SNR gains of matched filter and correlation receivers, G_m and G_c can be respectively written as

$$G_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |V_m(f, d)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |V_r(f, d)|^2 df}, \quad (13)$$

$$G_c = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |V_c(f, d)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |V_t(f, d)|^2 df}. \quad (14)$$

The efficiency of receiver is considered by using correlation coefficient between received and template signals. The correlation coefficients of matched filter and correlation receivers, C_m

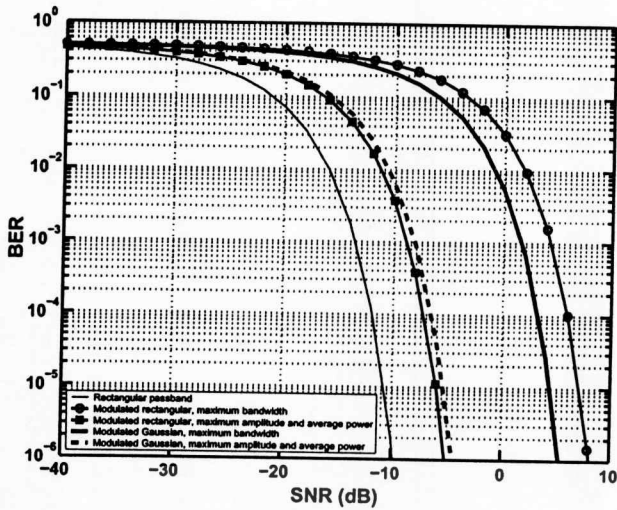


Fig. 3. BER performance of matched filter receiver for UWB waveforms satisfied FCC indoor limit spectral mask.

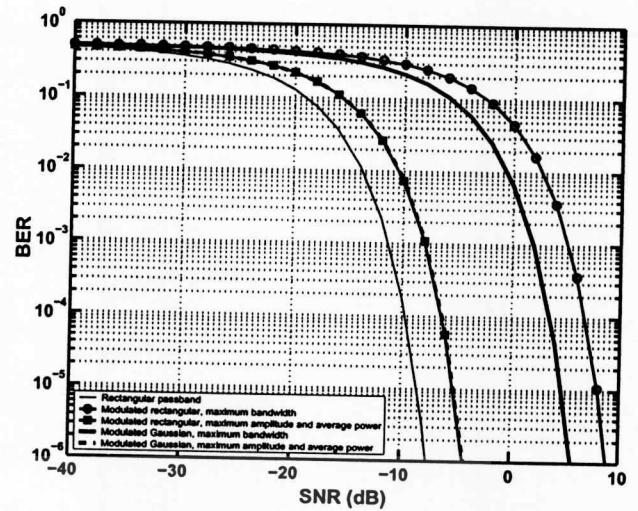


Fig. 4. BER performance of correlation receiver for UWB waveforms satisfied FCC indoor limit spectral mask.

and C_c can be respectively written as

$$C_m = \frac{\max \left| \int_{-\infty}^{\infty} V_m(f, d) e^{j2\pi f t} df \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_r(f, d)|^2 df \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |H_m(f, d)|^2 df}}, \quad (15)$$

$$C_c = \frac{\max \left| \int_{-\infty}^{\infty} V_c(f, d) e^{j2\pi f t} df \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_r(f, d)|^2 df \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |H_c(f, d)|^2 df}}, \quad (16)$$

The UWB modulation schemes can be classified in to the antipodal modulation scheme such as binary pulse amplitude modulation (BPAM) and orthogonal modulation scheme such as on-off keying (OOK) and pulse position modulation (PPM) with modulation index of $\delta = 1$ [17]. In this paper, only BER performance of antipodal modulation scheme is considered. For orthogonal modulation scheme, the BER performance can be evaluated in the same way as shown in [15], [18]. The BER performance of matched filter and correlation receivers, B_m and B_c , in additive white Gaussian noise (AWGN) for antipodal modulation scheme can be respectively written as

$$B_m = Q \left(\sqrt{\frac{2C_m G_m f_b S}{B_r N}} \right), \quad (17)$$

$$B_c = Q \left(\sqrt{\frac{2C_c G_c f_b S}{B_r N}} \right), \quad (18)$$

where B_r is the bit rate, S/N is the SNR at input of receiver and

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt, \quad x \geq 0.$$

The SNR is normalized by average power of rectangular passband waveform, which is the theoretical maximum average power of UWB signal, for considering FCC spectral masks. Moreover, the distortion effect caused from UWB channel,

occupied bandwidth and bit rate are also included to analyze the BER performance.

IV. ANALYSIS RESULTS

In this section, the analysis results of BER performance are shown. The BER performance of transmitted waveforms, which are the rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, are analyzed. The T-R separation distance is set to be 10 m, while the bit rate is set to be 110 Mbps. These parameters are based on the IEEE 802.15.3a [19]. The parameters of each waveform, which obtained from the maximum bandwidth, amplitude and average power optimizations satisfied FCC spectral masks for indoor and outdoor limits [15], are used.

Figures 3 and 4 show the BER performances of matched filter and correlation receivers for UWB waveforms satisfied FCC indoor limit spectral mask, respectively. The BER performances of rectangular passband waveforms are lowest for both matched filter and correlation receivers. The BER performances of maximum amplitude and average power optimizations are less than that of maximum bandwidth optimizations. That is because the maximum bandwidth optimizations are much less average power and slightly more bandwidth compared with maximum amplitude and average power optimizations [16]. For comparison between modulated rectangular and Gaussian waveforms, the BER performance of modulated rectangular and Gaussian waveforms with maximum amplitude and average power optimizations are almost the same and are better than the others.

The BER performances of matched filter and correlation receivers for UWB waveforms satisfied FCC outdoor limit spectral mask are shown in Figs. 5 and 6, respectively. The BER performances of rectangular passband waveforms are also lowest for both matched filter and correlation receivers. For

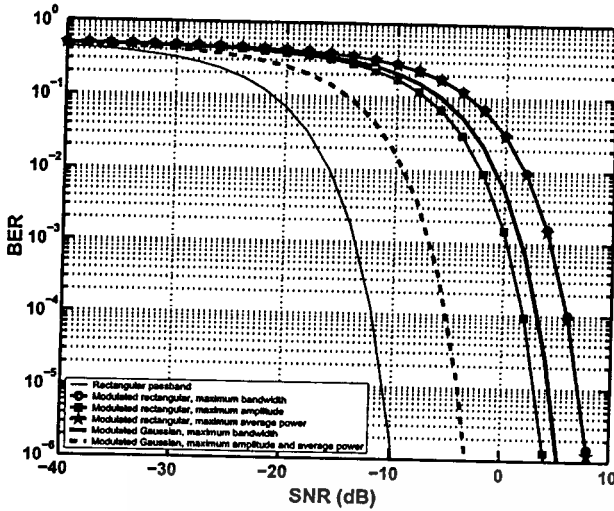


Fig. 5. BER performance of matched filter receiver for UWB waveforms satisfied FCC outdoor limit spectral mask.

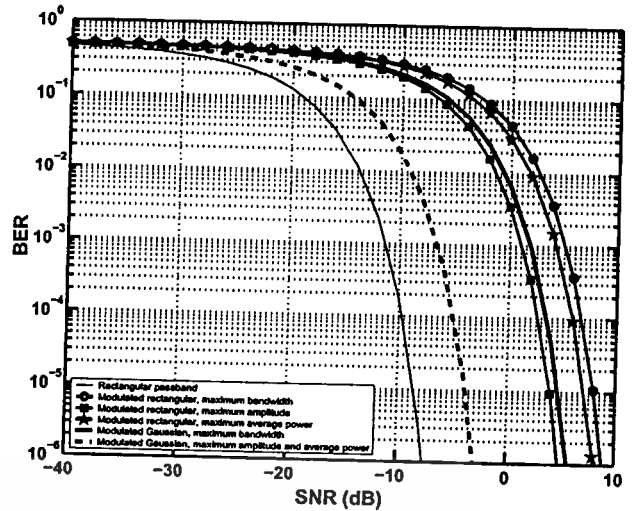


Fig. 6. BER performance of correlation receiver for UWB waveforms satisfied FCC outdoor limit spectral mask.

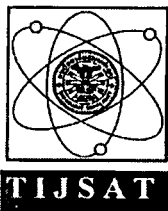
comparison between modulated rectangular and Gaussian waveforms, the BER performance of modulated Gaussian waveform with maximum amplitude and average power optimizations are clearly better than the others.

V. CONCLUSION

In this paper, the BER performance of UWB communications with matched filter and correlation receivers are analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which is satisfied the UWB signal definition and FCC indoor and outdoor limit spectral masks, are used as the transmitted UWB signal. From the results, the BER performance of rectangular passband waveform with matched filter receiver is the ideal theoretical bound, which is the minimum BER performance case. The modulated rectangular and Gaussian waveforms with maximum amplitude and average power optimizations are appropriate for FCC indoor limit spectral mask, while the modulated Gaussian waveform with maximum amplitude and average power optimizations is appropriate for FCC outdoor limit spectral mask.

REFERENCES

- [1] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New Technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.
- [2] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: The emergence of an Important RF Technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1169-1172, May 2001.
- [3] 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.
- [4] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [5] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," *Proc. IRE*, Vol 34, no 5, pp. 254-256, May 1946.
- [6] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' Transmission Formula for UWB Systems," *Technical Report of IEICE*, WBS2003-8/MW2003-20, May 2003.
- [7] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, "Experimental Evaluation Scheme of UWB Antenna Performance," *Technical Meeting on Instrumentation and Measurement*, IEE Japan, IM-03-35, June 2003.
- [8] S. Promwong, W. Hachitani, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Experimental Study of Ultra-Wideband Transmission Based on Friis' Transmission Formula," *The Third International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT) 2003*, vol. 1, pp. 467-470, Sept. 2003.
- [9] X. Xu and R. M. Narayanan, "Impact of Different Correlation Receiving Techniques on The Imaging Performance of UWB Random Noise Radar," *2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 7, pp. 4525-4527, July 2003.
- [10] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Path Loss and Matched Filter Gain for UWB System," *2004 International Symposium on Antenna and Propagation (ISAP)*, pp. 97-100, Aug. 2004.
- [11] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Path Loss and Matched Filter Gain of Free Space and Ground Reflection Channels for UWB Radio Systems," *IEEE TENCON 2004 on Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering*, pp. 125-128, Nov. 2004.
- [12] J. Wu, Y. Zhao and H. Xiang, "Performance of Ultra-Wideband Correlation Receiver Using Rectangular Template Signal in AWGN Channel," *2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, vol. 1, pp. 348-351, Sept. 2005.
- [13] Z. Bai, W. Zhang, S. Xu, W. Liu and K. Kwak, "On The Performance of Multiple Access DS-BPAM UWB System in Data and Image Transmission," *IEEE International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT)*, vol. 2, pp. 851-854, Oct. 2005.
- [14] J. Cha, K. Kwak, C. Lee, J. Jeong and I. Lee, "Chaotic-OOK UWB Modem Using New Unipolar ZCD Codes for Wireless Pan," *International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 197-198, Jan. 2006.
- [15] P. Supanakoon, K. Teplee, S. Promwong, S. Keawmechai and J. Takada, "Theoretical SNR Gain and BER Performances of UWB Communications with Matched Filter and Correlation Receivers," *The International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2006)*, no. 3, pp. 269-272, July 2006.
- [16] P. Supanakoon, K. Wansiang, S. Promwong and J. Takada, "Simple Waveform for UWB Communication," *The 2005 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON 2005)*, pp. 626-629, May 2005.
- [17] I. Oppermann, M. Hamalainen and J. Iinatti, *UWB Theory and Applications*, John Wiley & Sons, 2004.
- [18] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th edition, McGraw-Hill, 2001.
- [19] J. Foester, "Channel Modeling Sub-committee Report Final," *IEEE P802.15-02/368r5-SG3a*, Nov. 2002.



THAMMASAT INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Academic Services Division , Office of The Rector Building, 99 Thammasat University,
Klongluang Pathum-Thani, **THAILAND**. 12121 Tel. (66) 0-2564-4440-79 Ext.1174

March 2 , 2007

Dear Miss.Kultharee Teplee et al.,

I am pleased to inform you that the editorial board of Thammasat International Journal of Science and Technology (TIJSAT) has already considered your paper entitled **“BER Performance of UWB Waveforms Satisfied FCC Indoor and Outdoor Spectral Masks”** and has approved it for acceptance to be published in Vol.12 No.2 April - June 2007.

Yours faithfully,

(Assoc. Prof. Dr. Boonhong Chongkid)
Editor

Tel.0-2564-4440-79 Ext.1174

Fax.0-2564-4435

E-mail: tijSAT@yahoo.com

www.tijSAT.tu.ac.the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BER Performance of UWB Waveforms Satisfied FCC Indoor and Outdoor Spectral Masks

Kultharee Teplee^{*}, Pichaya Supanakoon^{*†}, Sathaporn Promwong^{*†} and Jun-ichi Takada[‡]

^{*}Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,

[†]Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabung, Bangkok 10520, THAILAND
E-mail: {s8061011,kspichay,kpsathap}@kmitl.ac.th

[‡]Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1-S6-4, O-okayama, Meguro-ku, 152-8550, Tokyo, Japan
E-mail: takada@ide.titech.ac.jp

Abstract

In this paper, the bit error rate (BER) performance of ultra wideband (UWB) waveforms with matched filter and correlation receivers is analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which are satisfied the UWB signal definition and Federal Communications Commission (FCC) indoor and outdoor limit spectral masks, are used as the transmitted UWB signals. The complex form of Friis' transmission formula is considered as the UWB free space channel. Therefore, the distortion effects caused from the channel are included. The BER performance of each waveform is shown and compared. The results are discussed in the conclusion.

Keyword: Bit error rate (BER), ultra wideband (UWB), indoor and outdoor spectral masks, antipodal and orthogonal modulations, matched filter and correlation receivers.

1. Introduction

An ultra wideband (UWB) radio technology has become an important topic for microwave communications because of its low cost and low power consumption potentials [1], [2]. The UWB radio technology differs from the conventional narrow band radio frequency (RF) and spread spectrum (SS) technologies. The UWB radio technology uses an extremely wideband of RF spectrum to transmit the data with very short pulses and power spectral density (PSD) in the range of ultra wide frequency spectrum instead of using narrow carrier frequency in traditional RF technologies. The UWB radio technology is a unique and new usage of recently legalized frequency spectrum. The UWB radio technology is specified the frequencies ranging from 3.1 GHz to 10.6 GHz by Federal Communications Commission (FCC) [3]. The FCC defined the UWB signal as those, which have a fractional bandwidth equal or greater than 0.20, or occupied bandwidth equal

or greater than 500 MHz.

The PSD of UWB signal dose not exceed the FCC part 15 limits or -41.3 dBm/MHz, so that the PSD of UWB signal is considered as the noise for other radio communication systems. Therefore, the UWB radio technology can coexist with other RF communications without interference. Moreover, the UWB radio technology is an ideal candidate that can be utilized for commercial, short-range, low power and low cost indoor communication systems, such as wireless personal area networks (WPANs) [4].

The Friis' transmission formula [5] is widely used to calculate the free space path loss for narrowband communications. After that, the complex form of Friis' transmission formula is developed for UWB communications [6]-[8]. The matched filter and correlation receivers are used as the UWB receivers [9]-[11]. Although, the performances of UWB communications are analyzed [12], [13], there are no considerations about the FCC regulation of UWB signal and

distortion of UWB signal caused by channel. After that, the rectangular waveform distorted by UWB free space channel is used to derive the theoretical BER performance [14]. However, there are no considerations about other causal waveforms.

In this paper, the BER performance of UWB waveforms with matched filter and correlation receivers is analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which is satisfied the UWB signal definition and FCC indoor and outdoor limit spectral masks [15], are used as the transmitted UWB signal. The complex form of Friis' transmission formula is considered as the UWB free space channel. The spectral density of received signal considering the distortion caused by free space channel is evaluated. At the receiver, the matched filter and correlation receivers with frequency transfer functions, which are satisfied the constant noise power condition between the input and output, are used. The BER performance of each waveform is shown and compared.

This paper is organized as follows. Sections 2 and 3, the UWB waveform models and BER performance analysis are briefly discussed, respectively. Next the analysis results are illustrated in Sec. 4. Finally, the conclusions are discussed in Sec. 5.

2. UWB Waveform Models

For UWB waveforms, the rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms are considered as the UWB transmitted waveform v_i in time domain and its spectral density V_i in frequency domain. These waveforms can satisfy the FCC definition of UWB signal and FCC spectral masks for indoor and outdoor limits. The parameters obtained from maximum bandwidth, amplitude and average power optimizations, which are proposed in [15], are used.

2.1 Rectangular Passband Waveform

The rectangular passband transmitted waveform in time domain and its spectral density function are given by

$$v_i(t) = \frac{A}{f_b} [f_H \text{sinc}(2f_H t) - f_L \text{sinc}(2f_L t)] \quad (1)$$

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

where A is the maximum amplitude, f_b is the occupied bandwidth, f_c is the center frequency, $f_L = f_c - f_b/2$ and $f_H = f_c + f_b/2$ are the minimum and maximum frequencies. This waveform has the $A/2f_b$ constant magnitude of spectral density in $-f_H$ to $-f_L$ and f_L to f_H frequency ranges. The area of its spectral density is $\int_{-\infty}^{\infty} F(f)df = A$, then this waveform has the A maximum amplitude at $t = 0$. This is the ideal case of UWB waveform then it used to consider the upper limit of maximum bandwidth, amplitude and average power for UWB waveform.

2.2 Modulated Rectangular Waveform

The modulated rectangular transmitted waveform in time domain and its spectral density function are given by

$$v_i(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_c t) & |t| \leq \frac{t_b}{2} \\ 0 & |t| > \frac{t_b}{2} \end{cases} \quad (3)$$

$$V_i(f) = \frac{At_b}{j2} \begin{cases} \text{sinc}|t_b(f - f_c)| \\ -\text{sinc}|t_b(f + f_c)| \end{cases} \quad (4)$$

where A is the maximum amplitude, f_c is the carrier frequency and t_b is the pulse width of waveform

This waveform is modulated between the A constant amplitude and t_b width rectangular pulse and f_c carrier frequency. The sine function is used for reducing direct current (DC) component of modulated waveform to zero.

2.3 Modulated Gaussian Waveform

The modulated Gaussian transmitted waveform in time domain and its spectral density function are given by

$$v_i(t) = Ae^{-(t/d)^2} \sin(2\pi f_c t) \quad (5)$$

$$V_i(f) = \frac{Ad\sqrt{\pi}}{j2} \left[e^{-\pi^2 d^2 (f-f_c)^2} - e^{-\pi^2 d^2 (f+f_c)^2} \right] \quad (6)$$

where A is the maximum amplitude of envelope waveform, f_c is the carrier frequency and d is the $1/e$ characteristic decay time.

This waveform is modulated between the A maximum amplitude and d $1/e$ characteristic decay time Gaussian pulse and f_c carrier frequency. The sine function is used for reducing direct current (DC) component of modulated waveform to zero, same the modulated rectangular waveform.

3. BER Performance Analysis

In this section, the analysis of BER performance is theoretically discussed. The UWB waveform models discussed in Sec. 2 are used as the UWB transmitted waveforms. For UWB free space channel, the complex form of Friis' transmission formula is used [6]-[8]. The transmitting (Tx) and receiving (Rx) antennas are considered to have one constant gains. The frequency transfer function of free space channel H_f can be written as

$$H_f(f, d) = \frac{c}{4\pi|f|d} e^{-j2\pi f d/c} \quad (7)$$

where d is the transmitter-receiver (T-R) separation distance and c is the velocity of light. This equation is satisfied for both positive and negative frequencies as it satisfies the causality.

The spectral density of UWB received signal V_r is calculated by using multiplication between H_f and V_i , which can be written as

$$V_r(f, d) = H_f(f, d) \cdot V_i(f) \quad (8)$$

This spectral density of UWB received signal includes the distortion effect caused by UWB free space channel.

The matched filter and correlation receivers with frequency transfer functions satisfied constant noise power condition between input and output are considered. For matched filter receiver or optimum correlation receiver, the spectral density of template signal is the complex conjugate of V_r . For correlation or transmitted template signal receivers, the

spectral density of template signal is the complex conjugate of V_r . The receiver gains are satisfied the constant noise power condition. Therefore, the frequency transfer functions of matched filter and correlation receivers, H_m and H_c , can be written as

$$H_m(f, d) = \frac{\sqrt{2f_b}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_r(f, d)|^2 df}} V_r^*(f, d) \quad (9)$$

$$H_c(f, d) = \frac{\sqrt{2f_b}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_i(f, d)|^2 df}} V_i^*(f, d) \quad (10)$$

where $*$ is the complex conjugate operator.

The spectral densities of output signal from matched filter and correlation receivers, V_m and V_c can be written as

$$V_m(f, d) = H_m(f, d) \cdot V_r(f, d) \quad (11)$$

$$V_c(f, d) = H_c(f, d) \cdot V_i(f, d) \quad (12)$$

The signal-to-noise ratio (SNR) gain of these receivers is defined as the ratio between average powers of received signal at receiver input and that at receiver output. The SNR gains of matched filter and correlation receivers, G_m and G_c can be respectively written as

$$G_m = \frac{\int_0^{\infty} |V_m(f, d)|^2 df}{\int_0^{\infty} |V_r(f, d)|^2 df} \quad (13)$$

$$G_c = \frac{\int_0^{\infty} |V_c(f, d)|^2 df}{\int_0^{\infty} |V_i(f, d)|^2 df} \quad (14)$$

The efficiency of receiver is considered by using correlation coefficient between received and template signals. The correlation coefficients of matched filter and correlation receivers, C_m and C_c can be respectively written as

$$C_m = \frac{\max \left| \int_{-\infty}^{\infty} V_m(f, d) e^{j2\pi f t} df \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_r(f, d)|^2 df \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |H_m(f, d)|^2 df}} \quad (15)$$

$$C_c = \frac{\max \left| \int_{-\infty}^{\infty} V_c(f, d) e^{j2\pi f t} df \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |V_i(f, d)|^2 df \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |H_c(f, d)|^2 df}} \quad (16)$$

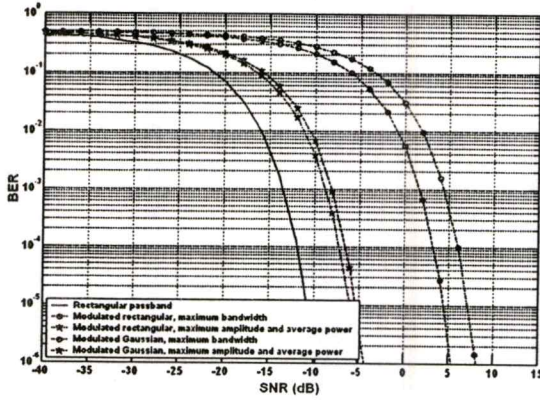


Fig. 1 BER of UWB waveform with matched filter receiver satisfied FCC indoor limit spectral mask for antipodal modulation scheme.

The UWB modulation schemes can be classified in to the antipodal modulation scheme such as binary pulse amplitude modulation (BPAM) and orthogonal modulation scheme such as on-off keying (OOK) and pulse position modulation (PPM) with modulation index of $\delta=1$ [16]. In this paper, BER performance of antipodal and orthogonal modulation scheme is considered. The BER performance of matched filter and correlation receivers for antipodal modulation scheme, $B_{m,a}$ and $B_{c,a}$, in additive white Gaussian noise (AWGN) can be respectively written as [17]

$$B_{m,a} = Q \left(\sqrt{\frac{2C_m G_m f_b S}{B_r N}} \right) \quad (17)$$

$$B_{c,a} = Q \left(\sqrt{\frac{2C_c G_c f_b S}{B_r N}} \right) \quad (18)$$

The BER performance of matched filter and correlation receivers for orthogonal modulation scheme, $B_{m,o}$ and $B_{c,o}$, in AWGN can be written as [17]

$$B_{m,o} = Q \left(\sqrt{\frac{C_m G_m f_b S}{B_r N}} \right) \quad (19)$$

$$B_{c,o} = Q \left(\sqrt{\frac{C_c G_c f_b S}{B_r N}} \right) \quad (20)$$

where B_r is the bit rate, S/N is the SNR at input of receiver and

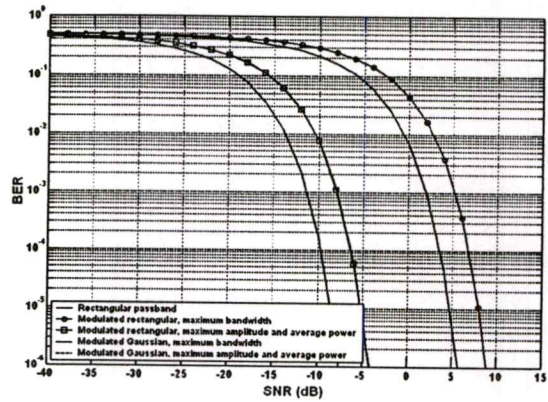


Fig. 2 BER of UWB waveform with correlation receiver satisfied FCC indoor limit spectral mask for antipodal modulation scheme.

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

The SNR is normalized by average power of rectangular passband waveform, which is the theoretical maximum average power of UWB signal, for considering FCC spectral masks. Moreover, the distortion effect caused from UWB channel, occupied bandwidth and bit rate are also included to analyze the BER performance.

4. Analysis Results

In this section, the analysis results of BER performance are shown. The BER performance of transmitted waveforms, which are the rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, are analyzed. The TR separation distance is set to be 10 m, while the bit rate is set to be 110 Mbps. These parameters are based on the IEEE 802.15.3a [18]. The parameters of each waveform obtained from the maximum bandwidth, amplitude and average power optimizations satisfied FCC spectral masks for indoor and outdoor limits are used [14].

Figures 1 to 4 show the BER performances of matched filter and correlation receivers for UWB waveforms satisfied FCC indoor limit spectral mask. The BER performances for antipodal modulation scheme are shown in Figs. 1 to 2, and that for orthogonal modulation scheme are shown in Figs. 3 to 4.

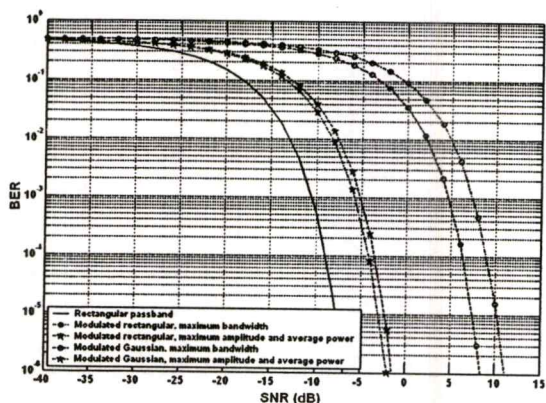


Fig. 3 BER of UWB waveform with matched filter receiver satisfied FCC indoor limit spectral mask for orthogonal modulation scheme.

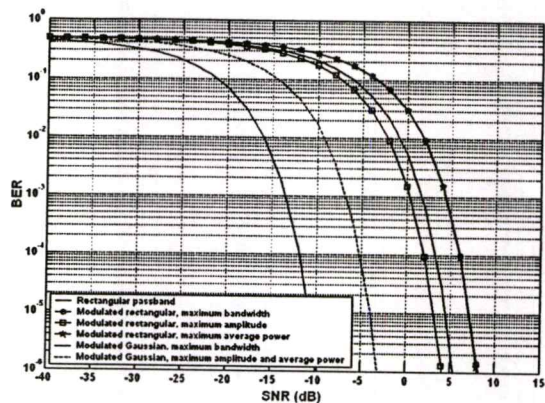


Fig. 5 BER of UWB waveform with matched filter receiver satisfied FCC outdoor limit spectral mask for antipodal modulation scheme.

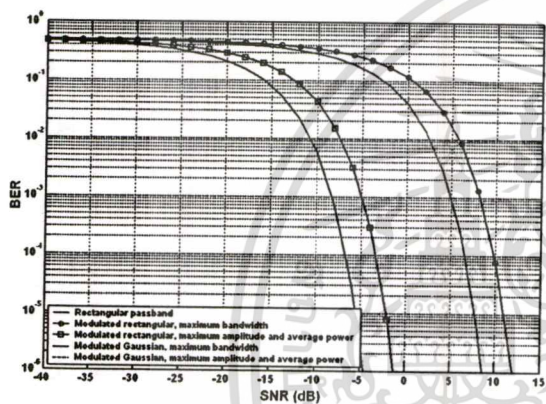


Fig. 4 BER of UWB waveform with correlation receiver satisfied FCC indoor limit spectral mask for orthogonal modulation scheme.

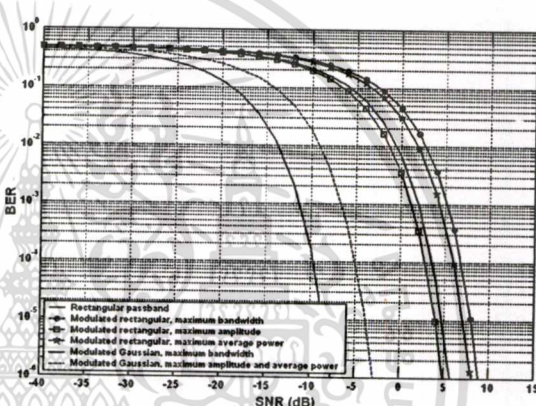


Fig. 6 BER of UWB waveform with correlation receiver satisfied FCC outdoor limit spectral mask for antipodal modulation scheme.

From these figures, we can see that the BER performances of rectangular passband waveforms are lowest for all cases. The BER performances of waveform obtained from maximum amplitude and average power optimizations are less than that obtained from maximum bandwidth optimizations. That is because the waveforms obtained from maximum bandwidth optimizations are much less average power and slightly more bandwidth compared with that obtained from maximum amplitude and average power optimizations [15]. For comparison between modulated rectangular and Gaussian waveforms, the BER performance of modulated rectangular and Gaussian waveforms with maximum amplitude and average power optimizations are almost the same and are better than the others.

The BER performances of matched filter and correlation receivers for UWB waveforms satisfied FCC outdoor limit spectral mask are shown in Figs. 5 to 8. The BER performances for antipodal modulation scheme are shown in Figs. 5 to 6, and that for orthogonal modulation scheme are shown in Figs. 7 to 8.

The BER performances of rectangular passband waveforms are also lowest. The BER performances for FCC outdoor limit spectral mask are more than that for FCC indoor limit spectral mask. For comparison between modulated rectangular and Gaussian waveforms, the BER performances of modulated Gaussian waveform with maximum amplitude and average power optimizations are clearly better than the others. That is because the side lobe spectrum of modulated Gaussian waveform less

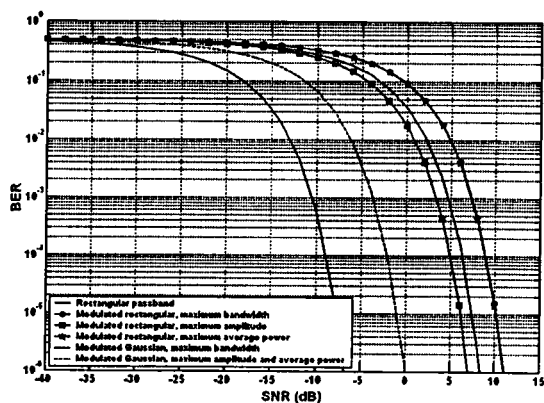


Fig. 7 BER of UWB waveform with matched filter receiver satisfied FCC outdoor limit spectral mask for orthogonal modulation scheme.

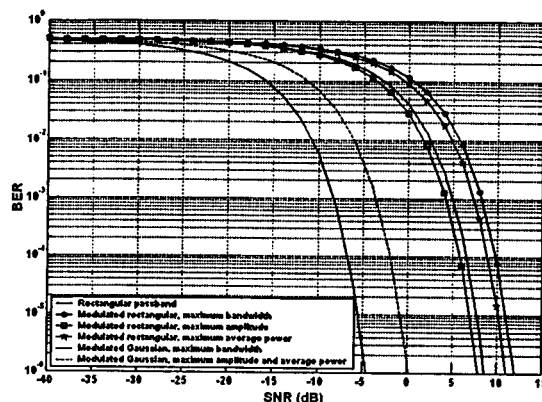


Fig. 8 BER of UWB waveform with correlation receiver satisfied FCC outdoor limit spectral mask for orthogonal modulation scheme.

than that of modulated rectangular waveforms and the FCC outdoor spectral mask is very strict compared with the FCC indoor spectral mask. Therefore, the modulated Gaussian waveform is appropriate for this case.

For considering the modulation scheme, the BER of antipodal modulation scheme is less than that of orthogonal modulation scheme because of the decision threshold level of antipodal modulation scheme is wider than of orthogonal modulation scheme.

5. Conclusion

In this paper, the BER performance of UWB waveforms with matched filter and correlation receivers are analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which are satisfied the UWB signal definition and FCC indoor and outdoor limit spectral masks with antipodal and orthogonal modulation schemes, are used as the transmitted UWB signal. From the results, the BER of rectangular passband waveform with matched filter receiver is the ideal theoretical bound, which is the minimum BER performance case. The modulated rectangular and Gaussian waveforms with maximum amplitude and average power optimizations are appropriate for FCC indoor limit spectral mask, while the modulated Gaussian waveform with maximum amplitude and average power optimizations is appropriated for FCC outdoor limit spectral mask.

6. Reference

- [1] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New Technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.
- [2] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: The emergence of an Important RF Technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1169-1172, May 2001.
- [3] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [4] J. Farserotu, A. Hutter, F. Platbrood, J. Gerrits and A. Pollini, "UWB Transmission and MIMO Antenna Systems for Nomadic User and Mobile PAN," *Wireless Personal Communications*, no. 22, pp. 197-317, 2002.
- [5] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," *Proc. IRE*, Vol 34, no 5, pp. 254-256, May 1946.
- [6] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' Transmission Formula for UWB Systems," *Technical Report of IEICE*, WBS2003- 8/MW2003-20, May 2003.
- [7] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, "Experimental Evaluation Scheme of UWB Antenna Performance," *Technical Meeting*

- on Instrument and Measurement, IEE Japan, IM-03-35, June 2003.
- [8] S. Promwong, W. Hachitani, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Experimental Study of Ultra-Wideband Transmission Based on Friis' Transmission Formula," *The Third International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT) 2003*, vol. 1, pp. 467-470, Sept. 2003.
- [9] X. Xu and R. M. Narayanan, "Impact of Different Correlation Receiving Techniques on The Imaging Performance of UWB Random Noise Radar," *2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 7, pp. 4525-4527, July 2003.
- [10] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Path Loss and Matched Filter Gain for UWB System," *2004 International Symposium on Antenna and Propagation (ISAP)*, pp. 97-100, Aug. 2004.
- [11] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Path Loss and Matched Filter Gain of Free Space and Ground Reflection Channels for UWB Radio Systems," *IEEE TENCON 2004 on Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering*, pp. 125-128, Nov. 2004.
- [12] Z. Bai, W. Zhang, S. Xu, W. Liu and K. Kwak, "On The Performance of Multiple Access DS-BPAM UWB System in Data and Impage Transmission," *IEEE International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT)*, vol. 2, pp. 851-854, Oct. 2005.
- [13] J. Cha, K. Kwak, C. Lee, J. Jeong and I. Lee, "Chaotic-OOK UWB Modem Using New Unipolar ZCD Codes for Wireless Pan," *International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 197-198, Jan. 2006.
- [14] P. Supanakoon, K. Teplee, S. Promwong, S. Keawmechai and J. Takada, "Theoretical SNR Gain and BER Performances of UWB Communications with Matched Filter and Correlation Receivers," *The International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2006)*, no. 3, pp. 269-272, July 2006.
- [15] P. Supanakoon, K. Wansiang, S. Promwong and J. Takada, "Simple Waveform for UWB Communication," *The 2005 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON 2005)*, pp. 626-629, May 2005.
- [16] I. Oppermann, M. Hamalainen and J. Linatti, *UWB Theory and Applications*, John Wiley & Sons, 2004.
- [17] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th edition, McGraw-Hill, 2001.
- [18] J. Foester, "Channel Modeling Subcommittee Report Final," *IEEE P802.15-02/368r5-SG3a*, Nov. 2002.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นางสาวกุลขารี เทพลี
 วัน เดือน ปีเกิด 12 กุมภาพันธ์ 2523
 ที่อยู่ 59/8 หมู่ 6 ตำบลลาดขัวญ อำเภอมือง จังหวัดนนทบุรี 11000
 ประวัติการศึกษา 2546 วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้