

การวิเคราะห์รูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขสำหรับการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

ANALYSIS OF MODIFIED SIMPLE WAVEFORMS FOR
ULTRA WIDEBAND COMMUNICATIONS

อภิรดี โพธิ์แพง
APIRADEE POKANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่สนับสนุนโดยศูนย์วิจัยวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-230-425

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์รูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขสำหรับการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

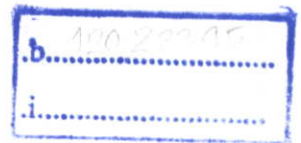
ANALYSIS OF MODIFIED SIMPLE WAVEFORMS FOR
ULTRA WIDEBAND COMMUNICATIONS



อภิรดี โพธิ์แข็ง

APIRADEE POKANG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....87064
วัน,เดือน,ปี.....30 ส.ค. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-230-425

**ANALYSIS OF MODIFIED SIMPLE WAVEFORMS FOR
ULTRA WIDEBAND COMMUNICATIONS**

APIRADEE POKANG

**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**

2008

KMITL-2008-EN-M-230-425

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์รูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขสำหรับการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง
นักศึกษา	นางสาวอภิรดี โพธิ์แข็ง
รหัสนักศึกษา	49061016
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.พิชญ สุพรรณกุล

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง (UWB) ซึ่งกำหนดโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC) รูปคลื่นอย่างง่ายที่ได้นำมาพิจารณาแก้ไขในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยรูปคลื่นเกาส์ รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่และรูปคลื่นเกาส์คี่และรูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขเหล่านี้สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของสมการรูปคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและสมการของความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมให้อยู่ในรูปแบบปิดได้ หลังจากนั้นได้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละรูปคลื่นที่ทำให้ได้ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (PSD) ที่แผ่กระจายออกมาเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดไว้สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคาร โดยแยกการพิจารณาออกเป็นสามกรณี คือ กรณีที่มีแบนด์วิดท์กว้างมากที่สุด กรณีที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกรณีที่มีกำลังเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขเหล่านี้สามารถนำมาใช้อ้างอิงสร้างเป็นสัญญาณ UWB ที่เป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB และข้อกำหนดสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคาร

Thesis Title	Analysis of Modified Simple Waveforms for Ultra Wideband Communications
Student	Miss Apiradee Pokang
Student ID.	49061016
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Asst. Prof. Pichaya Supanakoon

ABSTRACT

In this thesis, modified simple waveforms are analyzed to satisfy the definition of ultra wideband (UWB) signal regulated by Federal Communications Commission (FCC). The Gaussian, rectangular doublet and Gaussian doublet are considered to modify. These modified simple waveforms can be written in the term of closed form time domain and spectral density equations. After that, the radiated power spectral densities (PSD) of these waveforms are optimized to satisfy the FCC spectral masks for indoor and outdoor UWB communications. Maximum bandwidth, amplitude and average power cases are considered. These modified simple waveforms can be used as the reference transmitted signal that satisfy the UWB signal definition and FCC spectral mask for indoor and outdoor UWB communications.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและคำปรึกษา คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า จากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.พิชญ์ สุพรรณกุล ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ ผศ.มนต์ชัย แซ่ม้อย และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

สุดท้ายต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ชายของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบมอบให้กับบิดา มารดา และพี่ชาย ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งของข้าพเจ้า

อภิรดี โพธิ์แข็ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 รูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขสำหรับการสื่อสาร UWB.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 นิยามของสัญญาณ UWB.....	5
2.3 ข้อกำหนดของสัญญาณ UWB.....	5
2.4 PSD ของรูปคลื่น UWB.....	7
2.5 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข.....	7
2.6 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตที่ถูกแก้ไข.....	9
2.7 รูปคลื่นเกาส์ดับเลตที่ถูกแก้ไข.....	10
2.8 บทสรุป.....	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น UWB.....	12
3.1 บทนำ.....	12
3.2 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์.....	13
3.2.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ของรูปคลื่น.....	13
3.2.2 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่น.....	13
3.2.3 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บค่าที่เหมาะสมของรูปคลื่น.....	14
3.3 การกำหนดสเปกตรัมมาร์ค.....	14
3.4 การหาคุณสมบัติของรูปคลื่น.....	14
3.4.1 การหา PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่น.....	15
3.4.2 การหาแอมพลิจูดของรูปคลื่น.....	15
3.4.3 การหาแบนด์วิธของรูปคลื่น.....	16
3.4.4 การหาค่าลิ่งเฉลี่ยของรูปคลื่น.....	16
3.5 การตรวจสอบและเก็บค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น.....	16
3.5.1 การตรวจสอบนิยามของสัญญาณ UWB.....	17
3.5.2 การพิจารณาคุณสมบัติของรูปคลื่นกับพารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่น.....	18
3.5.3 การเก็บค่าคุณสมบัติของรูปคลื่นไว้ในพารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่น.....	18
3.5.4 การเก็บค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นไว้ในพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บค่าที่เหมาะสม ของรูปคลื่น.....	18
3.6 การปรับค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่น.....	18
3.7 ค่าสุดท้ายของพารามิเตอร์ของรูปคลื่น.....	18
3.8 บทสรุป.....	19
บทที่ 4 ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น.....	20
4.1 บทนำ.....	20
4.2 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข.....	20
4.3 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมค้ำบเลตที่ถูกแก้ไข.....	25
4.4 รูปคลื่นเกาส์ค้ำบเลตที่ถูกแก้ไข.....	29
4.5 บทสรุป.....	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	33
เอกสารอ้างอิง.....	35
ภาคผนวก ก.บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์.....	38
ภาคผนวก ข.สมการรูปคลื่นแกล๊สที่ถูกแก้ไข.....	50
ภาคผนวก ค.สมการรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเบิ้ลที่ถูกแก้ไข.....	62
ภาคผนวก ง.สมการรูปคลื่นแกล๊สดับเบิ้ลที่ถูกแก้ไข.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	71

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาสำหรับการสื่อสารภายในอาคารและ ภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....6
5.1	คุณสมบัติของรูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขให้เป็นไปตามข้อกำหนดสเปกตรัมมาร์คที่ กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคาร.....33
5.2	คุณสมบัติของรูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขให้เป็นไปตามข้อกำหนดสเปกตรัมมาร์คที่ กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายนอกอาคาร.....33

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....6
3.1	ขั้นตอนทั้งหมดในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น.....12
3.2	ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์.....13
3.3	ขั้นตอนการกำหนดสเปกตรัมมาร์ค.....14
3.4	ขั้นตอนการหาคุณสมบัติของรูปคลื่น.....15
3.5	ขั้นตอนตรวจสอบและเก็บค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....17
4.1	แบนด์วิดท์ของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....20
4.2	แอมพลิจูดสูงสุดของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....21
4.3	กำลังเฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....22
4.4	รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขในโดเมนเวลาที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC.....23
4.5	PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC.....23
4.6	รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขในโดเมนเวลาที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....24
4.7	PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....24
4.8	แบนด์วิดท์ของแต่ละรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลตที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....26
4.9	แอมพลิจูดสูงสุดของแต่ละรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลตที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....26
4.10	กำลังเฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลตที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....27
4.11	รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลตที่ถูกแก้ไขในโดเมนเวลาที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 PSD ที่แผ่กระจายออกมาจากรูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับเลดที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	28
4.13 แบนด์วิดท์ของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ระดับเลดที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	29
4.14 แอมพลิจูดสูงสุดของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ระดับเลดที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	30
4.15 กำลังเฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ระดับเลดที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	30
4.16 รูปคลื่นเกาส์ระดับเลดที่ถูกแก้ไขในโดเมนเวลาที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	31
4.17 PSD ที่แผ่กระจายออกมาจากรูปคลื่นเกาส์ระดับเลดที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	32

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

การมอดูเลตทางแอมพลิจูดของพัลส์ไบนารี (Binary Pulse Amplitude Modulation)	BPAM
กระแสตรง (Direct Current)	DC
สถาบันมาตรฐานการสื่อสารแห่งยุโรป (European Telecommunications Standards Institute)	ETSI
คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission)	FCC
กระทรวงพาณิชย์และการสื่อสารภายในประเทศ ของประเทศญี่ปุ่น (Ministry of Internal Affairs and Communications)	MIC
ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (Power Spectral Density)	PSD
ความถี่วิทยุ (Radio Frequency)	RF
เครื่องส่ง (Transmitter)	Tx
แถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband)	UWB
เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network)	WPAN
เครือข่ายไร้สายท้องถิ่น (Wireless Local Area Network)	WLAN
เฮิรตซ์ (Hertz)	Hz
กิกกะเฮิรตซ์ (Gigahertz)	GHz
เมกกะเฮิรตซ์ (Megahertz)	MHz
โวลต์ (Volt)	V
วัตต์ (Watt)	W
เดซิเบล (Decibel)	dB
เดซิเบลเทียบกับกำลัง 1 มิลลิวัตต์ (Decibel Relative to Power of 1 Milliwatt)	dBm
วินาที (Second)	s
นาโนวินาที (Nanosecond)	ns
โอห์ม (Ohm)	Ω
แอมพลิจูดสูงสุด (Maximum Amplitude), V	A
กำลังเฉลี่ย (Average Power), dBm	P_{av}
อิมพีแดนซ์ (Impedance), Ω	R
ช่วงเวลาในหนึ่งรูปคลื่น (Time Interval of One Waveform), s	T_S
ช่วงเวลาที่มึระดับลดลงเป็น $1/e$ เท่าของแอมพลิจูดสูงสุด ($1/e$ Characteristic Decay Time), s	d
ความถี่ (Frequency), Hz	f
ความถี่สูงสุด (Upper Frequency), Hz	f_H

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ความถี่ต่ำสุด (Lower Frequency), Hz	f_L
อันดับของการทำอนุพันธ์ (Order of Derivative)	n
เวลา (Time), s	t
ความกว้างพัลส์ (Pulse Width), s	t_b
ความหนาแน่นเชิงสเปกตรัม (Spectral Density), V/Hz	$F(f)$
PSD ของสัญญาณอินพุต (PSD of Input Signal), W/Hz	$S(f)$
PSD ที่แผ่กระจายออกมา (Radiated PSD), W/Hz	$S_R(f)$
รูปคลื่นสัญญาณ (Signal Waveform), V	$f(t)$

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีวิทยุแถบกว้างยิ่ง (UWB) ได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญสำหรับการสื่อสารไมโครเวฟ เนื่องจากว่ามีราคาถูก และใช้กำลังงานที่ต่ำ [1]-[3] ระบบ UWB เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่แตกต่างจากเทคโนโลยีการสื่อสารความถี่วิทยุ (RF) แบบอื่นตรงที่เทคโนโลยี UWB เป็นระบบสื่อสารที่ใช้สัญญาณพัลส์แคบๆ จึงทำให้ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (PSD) มีการกระจายอยู่ในช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ดังนั้น จึงทำให้ระบบ UWB นี้ใช้กำลังงานส่งที่ต่ำ ระบบการสื่อสาร UWB ไม่ต้องการมอดูเลตทางความถี่เข้ากับสัญญาณข้อมูลก่อนทำการส่ง ดังนั้น ในภาคส่งของระบบการสื่อสาร UWB จึงไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ประเภทการมอดูเลตทางความถี่ และเครื่องส่งที่มีกำลังมาก อีกทั้งทางด้านรับไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ประเภทดีมอดูเลตทางความถี่ จึงเป็นการลดต้นทุนของระบบการสื่อสารลงได้ เทคโนโลยีวิทยุ UWB เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นระบบการสื่อสารภายในอาคารเชิงพาณิชย์ที่มีระยะทางใช้งานที่ใกล้ กำลังต่ำ ราคาถูก เช่น เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPAN) [4]

เนื่องจากระบบการสื่อสาร UWB เป็นระบบการสื่อสารที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก และได้มีสเปกตรัมไปทับซ้อนกับระบบการสื่อสารที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น ระบบเครือข่ายไร้สายท้องถิ่น (WLAN) เป็นต้น ดังนั้นคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC) [5] จึงได้ตั้งข้อกำหนด PSD ที่แผ่กระจายออกมาของสัญญาณ แบนด์วิดท์ของสัญญาณ UWB จะพิจารณาที่ระดับลดลงมาจากระดับสูงสุด 10 dB โดยกำหนดให้แบนด์วิดท์ของสัญญาณ UWB สำหรับการสื่อสารต้องอยู่ในช่วงแถบความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz นอกจากนี้ FCC ยังได้นิยามสัญญาณ UWB เป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz

ในการกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาของสัญญาณ UWB ได้กำหนดในรูปแบบของสเปกตรัมมาร์ค โดยที่ระดับ PSD ของสัญญาณ UWB ที่แผ่กระจายออกมาจะต้องมีระดับไม่เกินระดับของสเปกตรัมมาร์คที่ได้กำหนดไว้ในแต่ละช่วงความถี่ ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาหรือสเปกตรัมมาร์คที่สำคัญในปัจจุบันได้กำหนดโดย FCC [5] สถาบันมาตรฐานการสื่อสารแห่งยุโรป (ETSI) [6], [7] และกระทรวงพาณิชย์และการสื่อสารภายในประเทศ (MIC) ของประเทศญี่ปุ่น [8]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การออกแบบและการสร้างรูปคลื่นสัญญาณส่งที่ใช้สำหรับการสื่อสาร UWB เป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะจะต้องมีแบนด์วิดท์หรือแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเป็นไปตามนิยามที่กำหนดโดย FCC รวมทั้งจะต้องมี PSD ที่แผ่กระจายออกมาเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คที่ได้กำหนดไว้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อนำเสนอการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณ UWB อย่างง่ายที่ถูกแก้ไขให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB ซึ่งกำหนดโดย FCC รูปคลื่น UWB อย่างง่ายที่ได้นำมาพิจารณาวิเคราะห์แก้ไขในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยรูปคลื่นเกาส์ รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่เลต และรูปคลื่นเกาส์คี่เลต รูปคลื่นสัญญาณ UWB เหล่านี้สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของสมการรูปคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและสมการของความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมให้อยู่ในรูปแบบปิดได้ ซึ่งสามารถสร้างรูปคลื่นได้โดยเพียงนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมมาแทนในสมการของรูปคลื่นที่ต้องการ หลังจากนั้นได้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละรูปคลื่นที่ทำให้ได้ PSD ที่แผ่กระจายออกมาเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดไว้สำหรับการสื่อสาร UWB ซึ่งจะทำการพิจารณาให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานของการศึกษาคือรูปคลื่นสัญญาณอย่างง่ายที่ยังไม่ได้เป็นไปตามนิยามและสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB สามารถทำการแก้ไขให้เป็นไปตามนิยามและสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ได้ โดยไม่ต้องใช้วิธีออกแบบสัญญาณที่ซับซ้อน พารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของรูปคลื่นสัญญาณ UWB ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้วิเคราะห์รูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไข ในการวิเคราะห์หา PSD ได้ตั้งสมมติฐานให้มีการส่งรูปคลื่นแบบการมอดูเลตทางแอมพลิจูดของพัลส์ไบนารี (BPAM) ที่มีลำดับการสุ่มแบบไบนารีที่สมมูลอย่างเป็นอิสระ เพื่อที่จะทำให้สามารถพิจารณาหา PSD ของแต่ละรูปคลื่นได้ง่าย [9]-[11] ในการหา PSD ที่แผ่กระจายออกมาจากสายอากาศ ได้ตั้งสมมติฐานให้สายอากาศเครื่องส่ง (Tx) เป็นแบบไอโซทรอปิก ซึ่งถ้าจะนำไปพิจารณากับสายอากาศชนิดอื่น จะต้องชดเชยแอมพลิจูดของสัญญาณกับแกนมากที่สุดของสายอากาศนั้นในโดเมนความถี่ และพิจารณาในกรณีที่มีการแมตช์กันอย่างสมบูรณ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เครื่องส่งกับสายอากาศ Tx ซึ่งเป็นกรณีที่มีการแผ่กระจายของสัญญาณออกมามากที่สุด ดังนั้น ในตามความเป็นจริงจะมีการแมตช์ไม่สมบูรณ์ จึงมั่นใจได้ว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละรูปคลื่นที่ได้นี้จะยังคงเป็นไปตามนิยามและสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้ตั้งสมมติฐานของสัญญาณ UWB ที่ดีไว้ 3 กรณี คือ มีแบนด์วิดท์กว้างสุด แอมพลิจูดสูงสุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุด ดังนั้น จึงได้หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามทั้งสามกรณีนี้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

สมการความหนาแน่นสเปกตรัมหาได้จากการใช้ทฤษฎีการแปลงฟูริเยร์ของสมการรูปคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา หลังจากนั้นจึงนำความหนาแน่นสเปกตรัมไปประมาณหา PSD ของสัญญาณที่แผ่กระจายออกมา และหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละรูปคลื่นสัญญาณ UWB อย่างง่ายโดยปรับพารามิเตอร์ให้รูปคลื่นเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB ที่กำหนดโดย FCC และเป็นไปตามข้อกำหนดของสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ทั้งภายในและภายนอกอาคาร

1.5 การเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

ได้มีการนำเสนอรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างชนิดต่างๆ ที่น่าจะนำมาใช้ในระบบการสื่อสาร UWB ได้ [12] แต่ก็ยังไม่ได้มีการนำเอารูปคลื่นเหล่านี้มาพิจารณาให้เป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB ที่กำหนดโดย FCC หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาเทคนิคต่าง ๆ ขึ้นมาสำหรับการออกแบบรูปคลื่น UWB เช่น การใช้ฟังก์ชันเซอร์ไมด์ [13]-[15] และ การใช้ฟังก์ชันคลื่นทรงกลม [16], [17] ได้มีการนำวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ออกแบบรูปคลื่น UWB [18], [19] ซึ่งเทคนิคเหล่านี้มีขั้นตอนที่ซับซ้อน และไม่สามารถเขียนเป็นสมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ให้อยู่ในรูปแบบปิดได้โดยตรง ถึงแม้ว่าได้มีการนำเสนอรูปคลื่นอย่างง่ายที่เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC [20] แต่รูปคลื่นอย่างง่ายบางชนิด ได้แก่ รูปคลื่นเกาส์ รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมู และรูปคลื่นเกาส์คางหมู ไม่สามารถทำให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC ได้ ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำรูปคลื่นเหล่านี้มาแก้ไข และหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละรูปคลื่นให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์รูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขสำหรับการสื่อสาร UWB รูปคลื่นอย่างง่ายที่นำมาแก้ไขประกอบด้วยรูปคลื่นเกาส์ รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมู และรูปคลื่นเกาส์คางหมู ซึ่งรูปคลื่นเกาส์จะทำการแก้ไขโดยการทำอนุพันธ์อันดับที่สูงขึ้น ส่วนรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูและรูปคลื่นเกาส์คางหมูจะทำการแก้ไขโดยเพิ่มพัลส์ที่มีแอมพลิจูดที่มีขนาดตรงข้ามเข้าไป ซึ่งรูปคลื่นเหล่านี้สามารถหาสมการในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ที่อยู่ในรูปแบบปิดได้ หลังจากนั้นได้หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB ที่กำหนดโดย FCC และเป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC ได้แยกการพิจารณาออกเป็นสามกรณี คือ กรณีที่มีแบนด์วิดท์กว้างมากที่สุด กรณีที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกรณีที่มีกำลังเฉลี่ยมากที่สุด

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ ซึ่งประกอบไปด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงรูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขสำหรับการสื่อสาร UWB ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ นิยามของสัญญาณ UWB ข้อกำหนดของสัญญาณ UWB PSD ของรูปคลื่น UWB รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลดที่ถูกแก้ไข รูปคลื่นเกาส์คี่ระดับเลดที่ถูกแก้ไข และบทสรุป

บทที่ 3 กล่าวถึงการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น UWB ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ การกำหนดสเปกตรัมมาร์ค การหาคุณสมบัติของรูปคลื่น การตรวจสอบและเก็บค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น การปรับค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่น ค่าสุดท้ายของพารามิเตอร์ของรูปคลื่น และบทสรุป

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลดที่ถูกแก้ไข รูปคลื่นเกาส์คี่ระดับเลดที่ถูกแก้ไข และบทสรุป

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

รูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขสำหรับการสื่อสาร UWB

2.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงนิยามและข้อกำหนดของการสื่อสาร UWB ที่กำหนดโดย FCC หลังจากนั้นได้กล่าวถึง PSD ของรูปคลื่น UWB และรูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขสำหรับการสื่อสาร UWB ซึ่งประกอบไปด้วย รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลตที่ถูกแก้ไข และรูปคลื่นเกาส์คี่ระดับเลตที่ถูกแก้ไข

2.2 นิยามของสัญญาณ UWB

FCC ได้กำหนดให้ UWB มีสเปกตรัมความถี่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และ FCC ยังได้นิยามสัญญาณ UWB ให้มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz โดยที่แบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนและแบนด์วิดท์ของสัญญาณ UWB นิยามดังนี้ [5]

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

$$\text{แบนด์วิดท์} = f_H - f_L \quad (2.2)$$

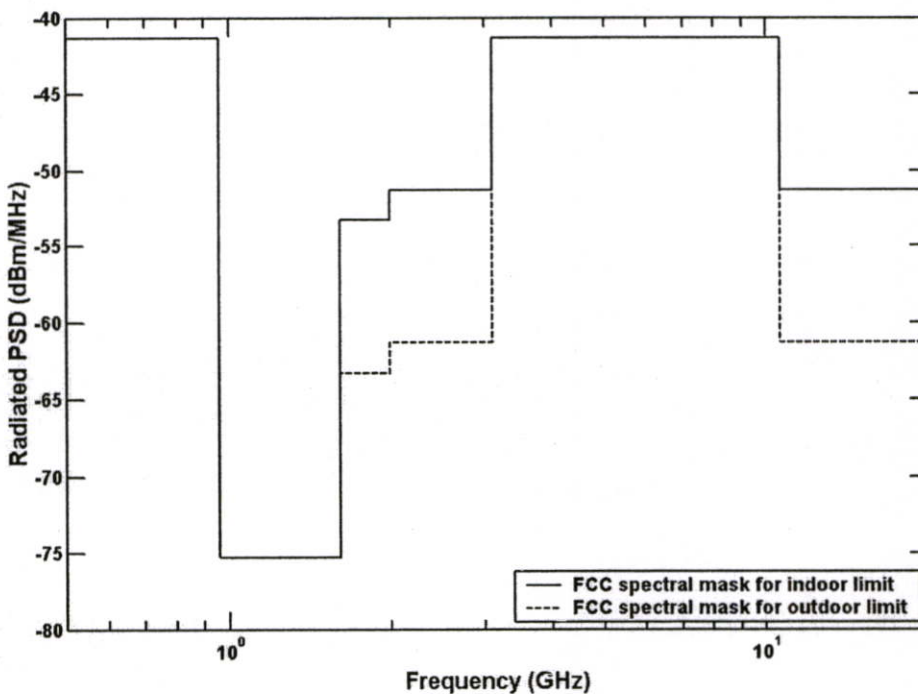
เมื่อ f_L และ f_H คือความถี่ต่ำสุดและความถี่สูงสุดที่จุด -10 dB ตามลำดับ

2.3 ข้อกำหนดของสัญญาณ UWB

ในการกำหนดระดับการแผ่กระจาย PSD ของสัญญาณ UWB ได้กำหนดในรูปแบบของสเปกตรัมมาร์ค โดยที่ระดับ PSD ของสัญญาณ UWB ที่แผ่กระจายออกมาจะต้องมีระดับไม่เกินระดับของสเปกตรัมมาร์คที่ได้กำหนดไว้ในแต่ละช่วงความถี่ ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาสำหรับการสื่อสารภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ส่วนสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดระดับ PSD ที่แผ่กระจายออกมาสำหรับการสื่อสารภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC [5]

ช่วงความถี่ที่กำหนด (MHz)	PSD (dBm/MHz) สำหรับการสื่อสารภายในอาคาร	PSD (dBm/MHz) สำหรับการสื่อสารภายนอกอาคาร
น้อยกว่า 960	-41.3	-41.3
960-1610	-75.3	-75.3
1610-1990	-53.3	-63.3
1990-3100	-51.3	-61.3
3100-10600	-41.3	-41.3
มากกว่า 10600	-51.3	-61.3



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC [5]

2.4 PSD ของรูปคลื่น UWB

ได้ทำการวิเคราะห์แก๊ไขรูปคลื่น โดยกำหนดให้รูปคลื่นเป็นสัญญาณแรงดัน เพื่อให้ได้ องค์ประกอบที่ต่อเนื่องของ PSD ได้กำหนดให้มีการส่งแบบ BPAM ที่มีลำดับการสุ่มการกระจาย ข้อมูลแบบไบนารีที่สมดุลอย่างเป็นอิสระ ดังนั้น PSD ที่มีหน่วยเป็น W/Hz ของสัญญาณที่อินพุตที่ สายอากาศ Tx $S(f)$ แสดงได้ดังนี้ [9]-[11]

$$S(f) = \frac{1}{T_s} |F(f)|^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ T_s คือช่วงเวลาในหนึ่งรูปคลื่น f คือความถี่ และ $F(f)$ คือฟังก์ชันความหนาแน่นเชิง สเปกตรัมของรูปคลื่น โดยที่ความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นสามารถคำนวณได้จากการ แปลงฟูริเยร์ของรูปคลื่นในโดเมนเวลา $f(t)$ โดยใช้

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.4)$$

เมื่อ t คือเวลา

ในการพิจารณา PSD ที่แผ่กระจายออกมาจะกำหนดให้สายอากาศ Tx เป็นสายอากาศแบบ ไอโซทรอปิก ได้พิจารณาให้อิมพีแดนซ์ภายในของวงจรและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากัน และมีค่าเป็นจำนวนจริง เพื่อให้ได้กรณีในอุดมคติที่ PSD มีการแผ่กระจายออกมามากที่สุด ได้ กำหนดให้อิมพีแดนซ์ภายในของวงจรและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็น R และในวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงการสูญเสียเชิงวิถีและระบบการวัด PSD ที่ได้นำมาใช้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้น PSD ที่แผ่กระจายออกมา $S_R(f)$ สามารถหาได้จาก

$$S_R(f) = \frac{1}{4R} S(f) \quad (2.5)$$

2.5 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก๊ไข

ได้ทำการวิเคราะห์แก๊ไขรูปคลื่นเกาส์ให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และ สเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC รูปคลื่น เกาส์ในโดเมนเวลา $f(t)$ และความหนาแน่นเชิงสเปกตรัม $F(f)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$f(t) = Ae^{-(t/d)^2} \quad (2.6)$$

$$F(f) = Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (2.7)$$

เมื่อ A และ d คือแอมพลิจูดสูงสุด และเวลาที่รูปคลื่นเกาส์มีแอมพลิจูดลดลงเป็น $1/e$ ของแอมพลิจูดสูงสุดตามลำดับ ฟังก์ชันความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมยังคงอยู่ในรูปของฟังก์ชันเกาส์และมีส่วนประกอบกระแสตรง (DC) ดังนั้น รูปคลื่นเกาส์นี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นสัญญาณ UWB

รูปคลื่นวงรอบเดี่ยวเป็นรูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่สอง รูปคลื่นนี้ในโดเมนเวลา $f''(t)$ และฟังก์ชันความหนาแน่นเชิงสเปกตรัม $F''(f)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$f''(t) = \left(-1 + \frac{2t^2}{d^2}\right) \frac{2A}{d^2} e^{-(t/d)^2} \quad (2.8)$$

$$F''(f) = -4Ad\pi^2\sqrt{\pi}f^2e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (2.9)$$

ถึงแม้ว่ารูปคลื่นนี้จะไม่มีส่วนประกอบ DC แต่รูปคลื่นนี้ไม่สามารถทำให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ FCC [20] ดังนั้น จึงทำการแก้ไขรูปคลื่นเกาส์โดยทำอนุพันธ์อันดับที่สูงขึ้น

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ n ในโดเมนเวลา $f^{(n)}(t)$ และความหนาแน่นเชิงสเปกตรัม $F^{(n)}(f)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$f^{(n)}(t) = \frac{d^n}{dt^n} f_0(t) \quad (2.10)$$

$$F^{(n)}(f) = (j2\pi f)^n F_0(f) \quad (2.11)$$

รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขเหล่านี้จะถูกลำมาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีที่มีแบนด์วิธกว้างที่สุด กรณีที่มีแอมพลิจูดสูงสุด และกรณีที่มีกำลังเฉลี่ยมากที่สุด โดยที่สมการของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขเหล่านี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

2.6 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตที่ถูกแก้ไข

ได้ทำการวิเคราะห์แก้ไขรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC รูปคลื่นสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา $f_1(t)$ และความหนาแน่นเชิงสเปกตรัม $F_1(f)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$f_1(t) = \begin{cases} A & |t| \leq \frac{t_b}{2} \\ 0 & |t| > \frac{t_b}{2} \end{cases} \quad (2.12)$$

$$F_1(f) = At_b \text{sinc}(t_b f) \quad (2.13)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดสูงสุด และ t_b คือความกว้างของพัลส์

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตในโดเมนเวลา $f_2(t)$ และฟังก์ชันความหนาแน่นเชิงสเปกตรัม $F_2(f)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$f_2(t) = \begin{cases} A & -t_b \leq t < 0 \\ -A & 0 \leq t < t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.14)$$

$$F_2(f) = j2At_b \text{sinc}(t_b f) \sin(\pi_b f) \quad (2.15)$$

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตประกอบด้วยรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม 2 พัลส์ซึ่งจะมีแอมพลิจูดตรงข้ามกัน และพัลส์แต่ละพัลส์มีความกว้างเป็น t_b พื้นที่ของรูปคลื่นมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น รูปคลื่นนี้จึงมีส่วนประกอบ DC เป็นศูนย์ ถึงแม้ว่ารูปคลื่นนี้จะมีส่วนประกอบ DC เป็นศูนย์ แต่รูปคลื่นนี้ไม่สามารถทำให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ FCC [20] ดังนั้น จึงได้ทำการแก้ไขรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตโดยการเพิ่มพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันเข้าไป

ตัวอย่างของการแก้ไขรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตเรียกว่ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมทริบเลต รูปคลื่นนี้ประกอบด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกัน 3 พัลส์ รูปคลื่นในโดเมนเวลา $f_3(t)$ และฟังก์ชันความหนาแน่นเชิงสเปกตรัม $F_3(f)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$f_3(t) = \begin{cases} A & -\frac{3}{2}t_b \leq t < -\frac{1}{2}t_b, \frac{1}{2}t_b \leq t < \frac{3}{2}t_b \\ -A & -\frac{1}{2} \leq t < \frac{1}{2}t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$F_3(f) = 2At_b \text{sinc}(t_b f) \left[\cos(2\pi t_b f) - \frac{1}{2} \right] \quad (2.17)$$

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลดถูกแก้ไขเหล่านี้จะถูกนำมาหาพหุนามตรีโกณมิติที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด กรณีที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกรณีที่มีกำลังเฉลี่ยมากที่สุด โดยที่สมการของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลดที่ถูกแก้ไขเหล่านี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค

2.7 รูปคลื่นเกาส์คี่ระดับเลดที่ถูกแก้ไข

ได้ทำการวิเคราะห์แก้ไขรูปคลื่นเกาส์คี่ระดับเลดให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC รูปคลื่นเกาส์คี่ระดับเลดในโดเมนเวลา $f_2(t)$ และความหนาแน่นเชิงสเปกตรัม $F_2(f)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$f_2(t) = A \left\{ e^{-[t+d]/d} - e^{-[t-d]/d} \right\} \quad (2.18)$$

$$F_2(f) = j2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2 d^2 f^2} \sin(2\pi fd) \quad (2.19)$$

เมื่อ A และ d คือแอมพลิจูดสูงสุด และเวลาที่รูปคลื่นเกาส์มีแอมพลิจูดลดลงเป็น $1/e$ ของแอมพลิจูดสูงสุดตามลำดับ

รูปคลื่นเกาส์คี่ระดับเลดประกอบด้วยรูปคลื่นพัลส์ของเกาส์ 2 พัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกัน แต่ละพัลส์จะแยกออกจากกันโดยช่วงเวลา d พื้นที่ของรูปคลื่นมีค่าเป็น 0 ดังนั้น รูปคลื่นนี้จึงมีส่วนประกอบ DC เป็นศูนย์ ถึงแม้ว่ารูปคลื่นนี้จะมีส่วนประกอบ DC เป็นศูนย์ แต่รูปคลื่นนี้ไม่สามารถทำให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ FCC เหมือนกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลด [20] ดังนั้น จึงได้ทำการแก้ไขรูปคลื่นเกาส์คี่ระดับเลดโดยการเพิ่มพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามเข้าไป

ตัวอย่างของการแก้ไขรูปคลื่นเกาส์คี่ระดับเลดเรียกว่ารูปคลื่นเกาส์ตรีปเลต รูปคลื่นนี้ประกอบด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันข้าม 3 พัลส์ รูปคลื่นในโดเมนเวลา $f_3(t)$ และฟังก์ชันความหนาแน่นเชิงสเปกตรัม $F_3(f)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$f_3(t) = A \left\{ e^{-[(t+2d)/d]^2} - e^{-(t/d)^2} + e^{-[(t-2d)/d]^2} \right\} \quad (2.20)$$

$$F_3(f) = 2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2d^2f^2} \left[\cos(4\pi fd) + \frac{1}{2} \right] \quad (2.21)$$

รูปคลื่นเกาส์ดับเลตที่ถูกแก้ไขเหล่านี้จะถูกนำมาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด กรณีที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกรณีที่มีกำลังเฉลี่ยมากที่สุด โดยที่สมการของรูปคลื่นเกาส์ดับเลตที่ถูกแก้ไขเหล่านี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง

2.8 บทสรุป

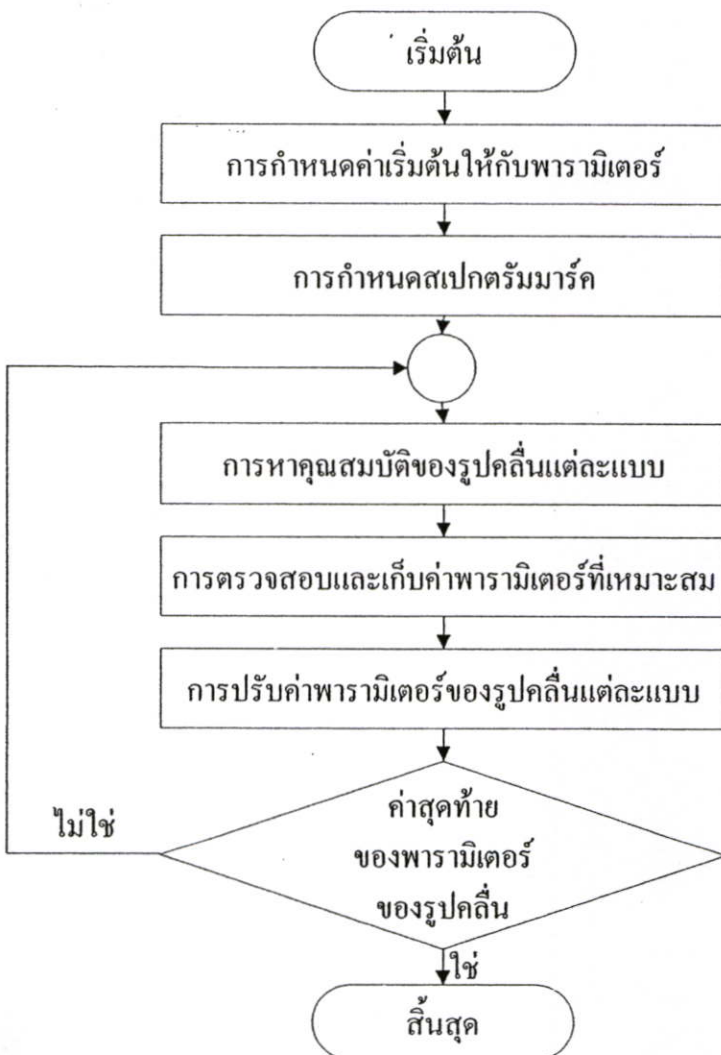
ในบทนี้ได้กล่าวถึง นิยามและข้อกำหนดของการสื่อสาร UWB การวิเคราะห์หา PSD ของรูปคลื่น UWB และรูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขสำหรับการสื่อสาร UWB ซึ่งประกอบด้วย รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข รูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตที่ถูกแก้ไข และรูปคลื่นเกาส์ดับเลตที่ถูกแก้ไข รูปคลื่นที่ถูกแก้ไขเหล่านี้จะนำมาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสาร UWB โดยขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

บทที่ 3

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น UWB

3.1 บทนำ

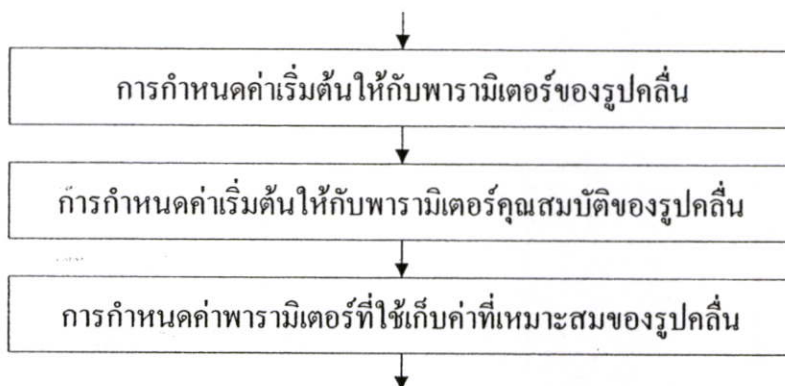
ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่นที่ถูกแก้ไข โดยทำให้เป็นไปตามนิยามและข้อกำหนดของสัญญาณ UWB ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 โดยจะมีขั้นตอนดังนี้ คือ กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ กำหนดสเปกตรัมมาร์ค หาคุณสมบัติของรูปคลื่น ตรวจสอบและเก็บค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น ปรับค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่น และตรวจสอบค่าสุดท้ายของพารามิเตอร์ของรูปคลื่น แผนภาพแสดงขั้นตอนทั้งหมดในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนทั้งหมดในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น

3.2 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์

ในการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์จะมีการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์อยู่ 3 ชนิด คือ พารามิเตอร์ของรูปคลื่น พารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่น และพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บค่าที่เหมาะสมของรูปคลื่น ซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์

3.2.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ของรูปคลื่น

การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ของรูปคลื่นจะกำหนดให้กับเฉพาะพารามิเตอร์เวลาของรูปคลื่น ซึ่งค่าเริ่มต้นนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของรูปคลื่น

- รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข และรูปคลื่นเกาส์คดับเลตที่ถูกแก้ไข จะกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ d โดยจะกำหนดให้มีค่าเริ่มต้นเท่ากับความละเอียดเวลา ซึ่งมีค่าเป็น 0.01 ns

- รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคดับเลตที่ถูกแก้ไข จะกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ t_b โดยจะกำหนดให้มีค่าเริ่มต้นเท่ากับความละเอียดเวลา ซึ่งมีค่าเป็น 0.01 ns

3.2.2 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่น

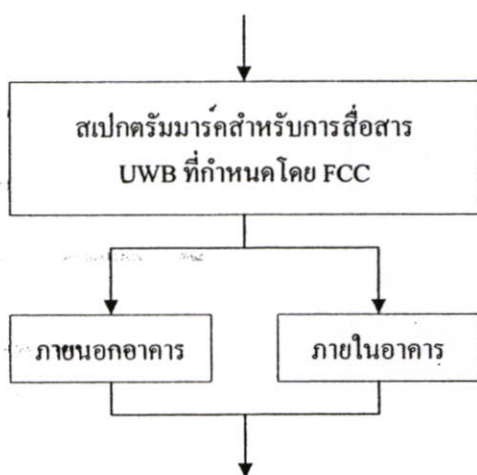
พารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่นประกอบไปด้วย แบนด์วิดท์ แอมพลิจูด และกำลังเฉลี่ยของรูปคลื่น พารามิเตอร์เหล่านี้จะใช้เป็นเงื่อนไขตรวจสอบหาค่ากรณีที่รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างสุด แอมพลิจูดสูงสุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุด โดยจะกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ทั้งหมดนี้เป็น 0

3.2.3 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บค่าที่เหมาะสมของรูปคลื่น

พารามิเตอร์ที่ใช้เก็บค่าที่เหมาะสมของรูปคลื่นจะแบ่งออกตามกรณีที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีของรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างสุด แอมพลิจูดสูงสุด และ กำลังเฉลี่ยมากที่สุด โดยแต่ละกรณีนี้จะมีพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บค่าแอมพลิจูดของรูปคลื่น แบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนของรูปคลื่น แบนด์วิดท์ของรูปคลื่น กำลังเฉลี่ยของรูปคลื่น และพารามิเตอร์ของรูปคลื่น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดนี้จะกำหนดให้มีค่าเริ่มต้นเป็น 0

3.3 การกำหนดสเปกตรัมมาร์ค

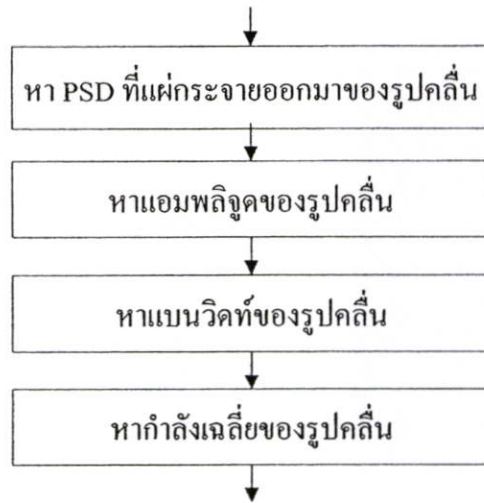
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ที่กำหนดโดย FCC ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งสเปกตรัมมาร์คจะมีการกำหนดอยู่ 2 ประเภท คือ สำหรับการสื่อสารภายในอาคาร และสำหรับการสื่อสารภายนอกอาคาร ซึ่งรายละเอียดของสเปกตรัมมาร์คได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 กราฟของสเปกตรัมมาร์คจะพิจารณาในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.5 GHz ถึง 20 GHz โดยมีความละเอียดความถี่เป็น 0.01 GHz แผนภาพแสดงขั้นตอนการกำหนดสเปกตรัมมาร์คแสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการกำหนดสเปกตรัมมาร์ค

3.4 การหาคุณสมบัติของรูปคลื่น

ในขั้นตอนนี้จะทำการหาคุณสมบัติของรูปคลื่น ซึ่งประกอบไปด้วยการหา PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่น การหาแอมพลิจูดของรูปคลื่น การหาแบนด์วิดท์ของรูปคลื่น และการหากำลังเฉลี่ยของรูปคลื่น แผนภาพขั้นตอนการหาคุณสมบัติของรูปคลื่นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการหาคุณสมบัติของรูปคลื่น

3.4.1 การหา PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่น

ในการพิจารณาหาค่า PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่น ขั้นแรกจะทำการหา PSD ของรูปคลื่นแต่ละชนิดโดยใช้สมการที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งพิจารณาในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.5 GHz ถึง 20 GHz โดยมีความละเอียดความถี่เป็น 0.01 GHz หลังจากนั้น ทำการหา PSD ที่แผ่กระจายออกมาโดยใช้สมการที่ (2.3) และ (2.5) โดยทำการนอร์มัลไลซ์ให้พารามิเตอร์ $A = 1$ V, $T_s = 1$ s และ $R = 1$ Ω ซึ่งค่าที่ถูกต้องของพารามิเตอร์ A จะทำการหาในขั้นตอนต่อไป โดยจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ T_s และ R หลังจากนั้นเปลี่ยนหน่วย PSD ที่ได้ ซึ่งมีหน่วยเป็น W/Hz ให้มีหน่วยเป็น dBm/MHz โดยใช้สมการ

$$S_R(f)[\text{dBm/MHz}] = 10 \log\{S_R(f)[\text{W/Hz}]\} + 150 \quad (3.1)$$

3.4.2 การหาแอมพลิจูดของรูปคลื่น

ในการหาแอมพลิจูดของรูปคลื่น จะนำค่า PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นที่ได้จากขั้นตอนในหัวข้อ 3.4.1 มาลบกับสเปกตรัมมาร์คที่ได้จากขั้นตอนในหัวข้อ 3.3 (ภายในอาคาร หรือภายนอกอาคาร) หลังจากนั้นนำค่าที่มากที่สุดมาพิจารณาแอมพลิจูดสูงสุดของรูปคลื่น A โดยใช้สมการ

$$A = 10^{-d_{\max}/20} \quad (3.2)$$

เมื่อ d_{\max} เป็นค่ามากที่สุดของค่าที่ได้จากการนำเอา PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นมาลบกับสเปกตรัมมาร์ค ค่าแอมพลิจูดที่ได้นี้เป็นค่าแอมพลิจูดของรูปคลื่นที่มี $T_s = 1$ s และ $R = 1$ Ω ดังนั้น ค่าแอมพลิจูดที่แท้จริงจะต้องคูณด้วย $\sqrt{RT_s}$

3.4.3 การหาแบนด์วิดท์ของรูปคลื่น

ในการหาแบนด์วิดท์ของรูปคลื่นนั้น ในขั้นตอนแรกจะทำการหาความถี่ต่ำสุดและความถี่สูงสุดที่ PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นมีระดับลดลงมาจากระดับสูงสุด -10 dB หลังจากนั้นทำการหาแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนและแบนด์วิดท์ของรูปคลื่นโดยใช้สมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ

3.4.4 การหาค่ากำลังเฉลี่ยของรูปคลื่น

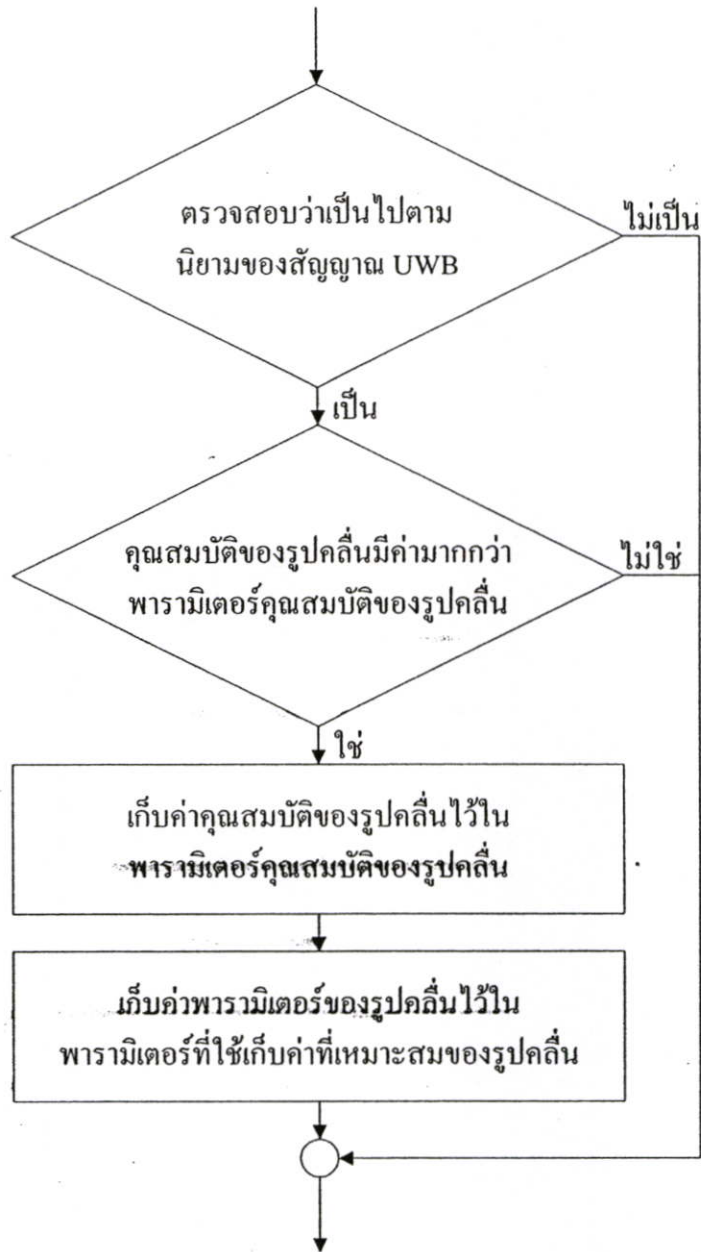
กำลังเฉลี่ยของรูปคลื่นในหน่วย dBm จะพิจารณาในช่วงความถี่ที่อยู่ในแถบผ่านของสเปกตรัมมาร์คที่กำลังพิจารณา ซึ่งหาได้จากสมการ

$$P_{av} [\text{dBm}] = 10 \log \left\{ 2 \int_{f_L}^{f_H} S_R(f) [\text{W/Hz}] df \right\} + 30 \quad (3.3)$$

เมื่อ $S_R(f) [\text{W/Hz}]$ เป็น PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นในหน่วย W/Hz ที่ได้จากขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.4.1 โดยทำการอินทิเกรตแอมพลิจูดที่ได้จากขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.4.2 ส่วน f_L และ f_H เป็นความถี่ต่ำสุดและความถี่สูงสุดของแถบผ่านสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC ซึ่งมีค่าเป็น 3.1 GHz และ 10.6 GHz ตามลำดับ

3.5 การตรวจสอบและเก็บค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น

ในขั้นตอนนี้จะทำการตรวจสอบคุณสมบัติของรูปคลื่นที่ได้ว่าเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB ที่กำหนดโดย FCC หรือไม่ ถ้าเป็นก็จะทำการตรวจสอบว่าคุณสมบัติของรูปคลื่นที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่เก็บไว้ในพารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่นหรือไม่ ถ้าใช่จะทำการเก็บค่าคุณสมบัติของรูปคลื่นไว้ในพารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่น และเก็บค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นไว้ในพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บค่าที่เหมาะสมของรูปคลื่น ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทำงานค่าในพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บค่าที่เหมาะสมของรูปคลื่นจะเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่นในแต่ละกรณี แต่ถ้าพารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่นมีค่าเป็นศูนย์แสดงว่ารูปคลื่นไม่สามารถทำให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB ในกรณีนั้นได้ แผนภาพขั้นตอนการตรวจสอบและเก็บค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 และแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนตรวจสอบและเก็บค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

3.5.1 การตรวจสอบนิยามของสัญญาณ UWB

ในการตรวจสอบว่าเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB หรือไม่จะใช้สมการตรรก

$$P \equiv P_1 \wedge (P_2 \vee P_3) \tag{3.4}$$

เมื่อ P_1 เป็นนิพจน์ความถี่ต่ำสุดและความถี่สูงสุดของรูปคลื่นอยู่ในช่วงแถบผ่านของสเปกตรัมมาร์ค P_2 เป็นนิพจน์แบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนของรูปคลื่นที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 และ P_3 เป็นนิพจน์แบนด์วิดท์ของสัญญาณ UWB มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz โดยที่รูปคลื่นจะเป็นไปตามนิยาม UWB ก็ต่อเมื่อนิพจน์ P มีค่าเป็นจริง

3.5.2 การพิจารณาค่าคุณสมบัติของรูปคลื่นกับพารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่น

จะทำการพิจารณาค่าคุณสมบัติของรูปคลื่นที่ได้จากขั้นตอนในหัวข้อ 3.4.2 ถึง 3.4.4 ว่ามีค่ามากกว่าที่เก็บไว้ในพารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่นหรือไม่ ถ้าใช่แสดงว่ารูปคลื่นที่ได้จะเป็นไปตามเงื่อนไขในกรณีนั้น

3.5.3 การเก็บค่าคุณสมบัติของรูปคลื่นไว้ในพารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่น

ในขั้นตอนนี้จะทำการเก็บค่าคุณสมบัติของรูปคลื่นไว้ในพารามิเตอร์คุณสมบัติของรูปคลื่นเพื่อนำไปใช้เป็นค่าใหม่สำหรับกำหนดเงื่อนไขในการพิจารณาว่ารูปคลื่นเป็นกรณีที่มีแบนด์วิดท์กว้างสุด แอมพลิจูดสูงสุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุด

3.5.4 การเก็บค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นไว้ในพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บค่าที่เหมาะสมของรูปคลื่น

ในขั้นตอนนี้จะเก็บค่าแอมพลิจูดของรูปคลื่น แบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนของรูปคลื่น แบนด์วิดท์ของรูปคลื่น กำลังเฉลี่ยของรูปคลื่น และพารามิเตอร์ของรูปคลื่น ที่เป็นไปตามเงื่อนไขในแต่ละกรณี

3.6 การปรับค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่น

ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นจะปรับให้มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับความละเอียดในการพิจารณา โดยที่พารามิเตอร์ d สำหรับรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข และรูปคลื่นเกาส์ดับเลตที่ถูกแก้ไข รวมทั้งพารามิเตอร์ t_b สำหรับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตที่ถูกแก้ไข จะปรับให้มีค่าเพิ่มขึ้น 0.01 ns

3.7 ค่าสุดท้ายของพารามิเตอร์ของรูปคลื่น

ในขั้นตอนนี้จะทำการตรวจสอบพารามิเตอร์ของรูปคลื่นว่ามีค่าเท่ากับค่าสุดท้ายของพารามิเตอร์ของรูปคลื่นหรือไม่ โดยที่ค่าสุดท้ายของพารามิเตอร์ d สำหรับรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข และรูปคลื่นเกาส์ดับเลตที่ถูกแก้ไข รวมทั้งพารามิเตอร์ t_b สำหรับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตที่ถูกแก้ไขจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3.00 ns

3.8 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่นสำหรับกรณีที่มีแบนด์วิดท์กว้างสุด แอมพลิจูดสูงสุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุด ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่นที่ได้สำหรับแต่ละกรณีเหล่านี้ รวมทั้งรูปคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และ PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์ค ได้แสดงไว้ในบทที่ 4

บทที่ 4

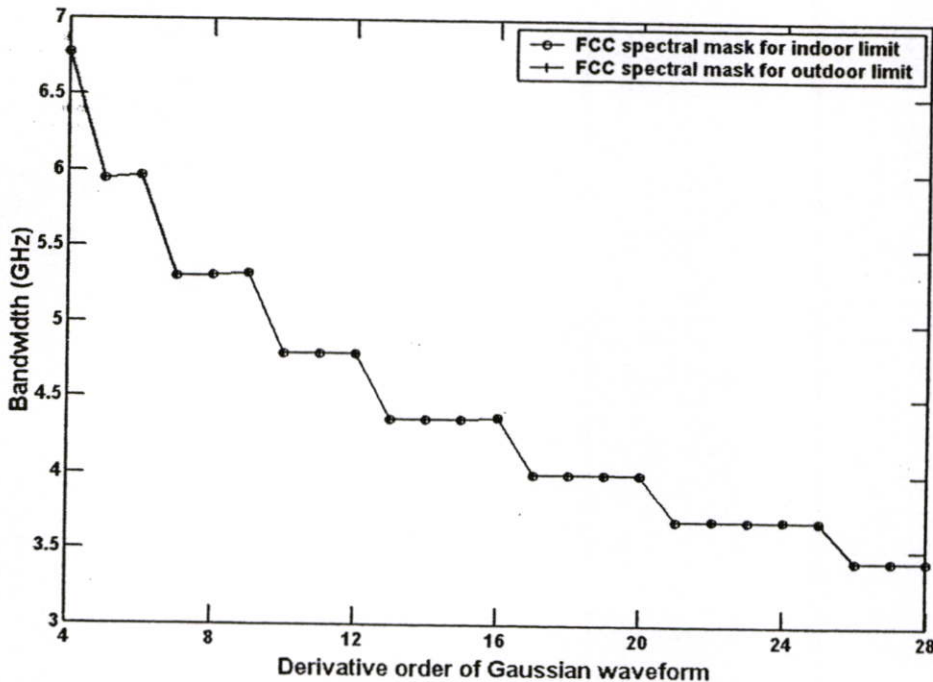
ผลหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่น

4.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลของการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลขคี่ที่ถูกแก้ไข และรูปคลื่นเกาส์คี่ระดับเลขคี่ที่ถูกแก้ไข โดยทำให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB ที่กำหนดโดย FCC และข้อกำหนด PSD ที่เผยแพร่จากออกมาและสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

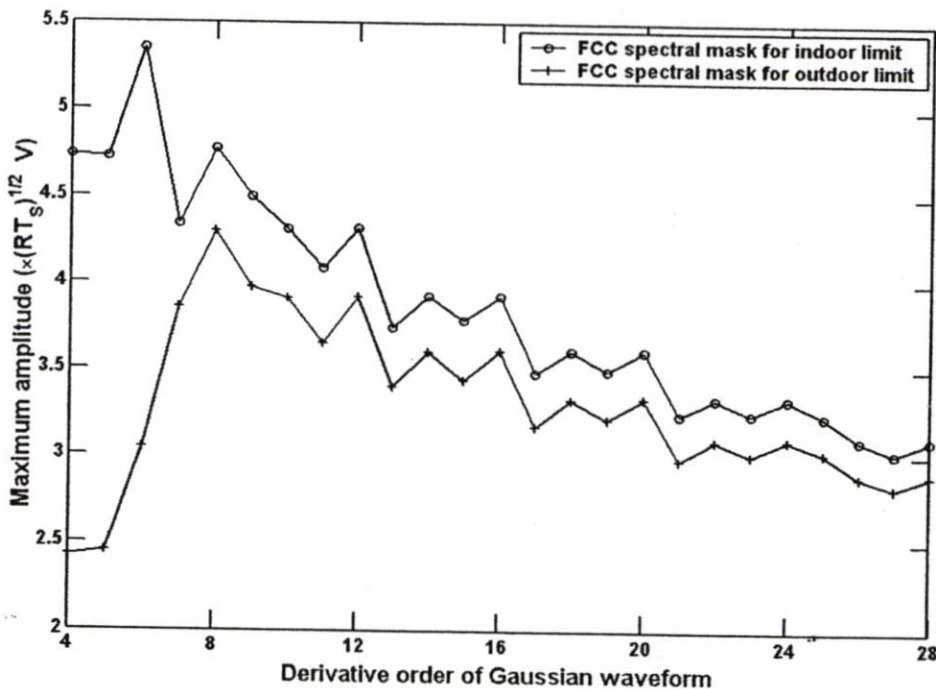
4.2 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข [21]

จะมีเพียงรูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 4 ถึง 28 เท่านั้นที่สามารถทำให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC รูปที่ 4.1 แสดงแบนด์วิดท์ของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC แบนด์วิดท์ของรูปคลื่นที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC มีค่าเท่ากัน รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 4 มีแบนด์วิดท์มากที่สุดเป็น 6.78 GHz



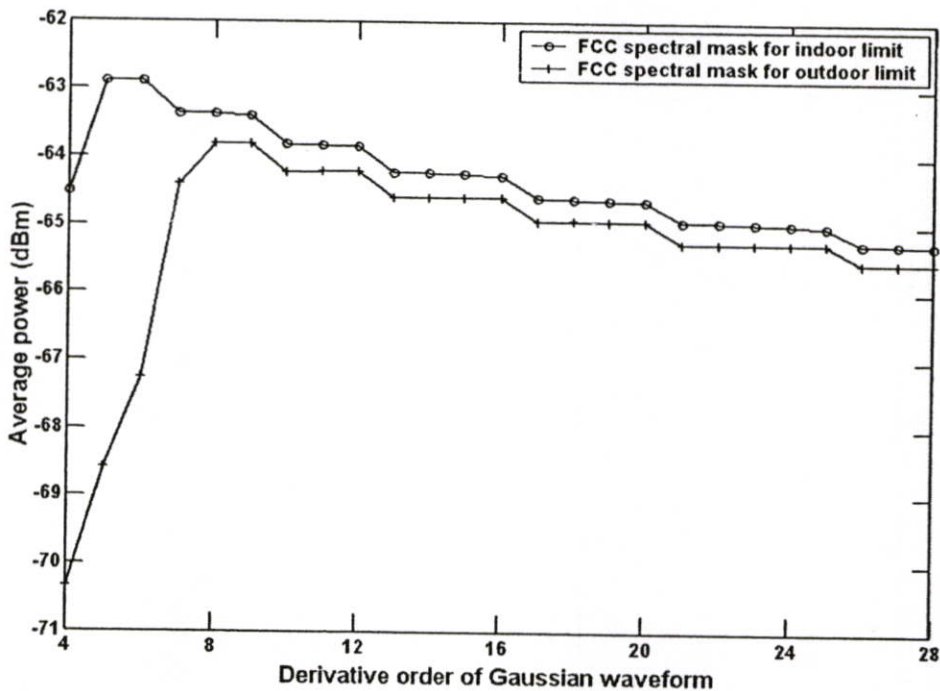
รูปที่ 4.1 แบนด์วิดท์ของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

แอมพลิจูดสูงสุดของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 แอมพลิจูดสูงสุดของรูปคลื่นที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคาร จะมีค่ามากกว่าแอมพลิจูดสูงสุดสำหรับการสื่อสาร UWB ภายนอกอาคาร ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายนอกอาคารที่บางความถี่มีระดับที่ต่ำกว่าสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคาร รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 6 และ 8 มีแอมพลิจูดสูงสุดสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคาร คือมีค่าเป็น $5.35\sqrt{RT_s}$ V และ $4.30\sqrt{RT_s}$ V ตามลำดับ



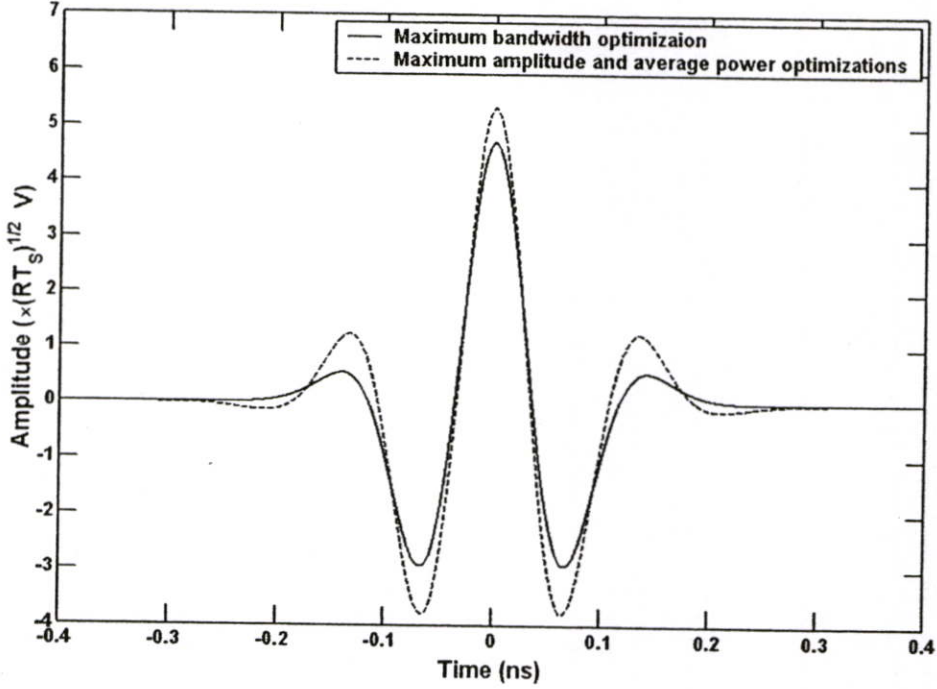
รูปที่ 4.2 แอมพลิจูดสูงสุดของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

รูปที่ 4.3 แสดงกำลังเฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ซึ่งคล้ายกับกรณีของแอมพลิจูดสูงสุด กำลังเฉลี่ยของรูปคลื่นที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคารจะมีค่ามากกว่ากำลังเฉลี่ยสำหรับการสื่อสาร UWB ภายนอกอาคาร รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 6 และ 8 มีกำลังเฉลี่ยมากที่สุดสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคาร คือมีค่าเป็น -62.88 dBm และ -63.81 dBm ตามลำดับ

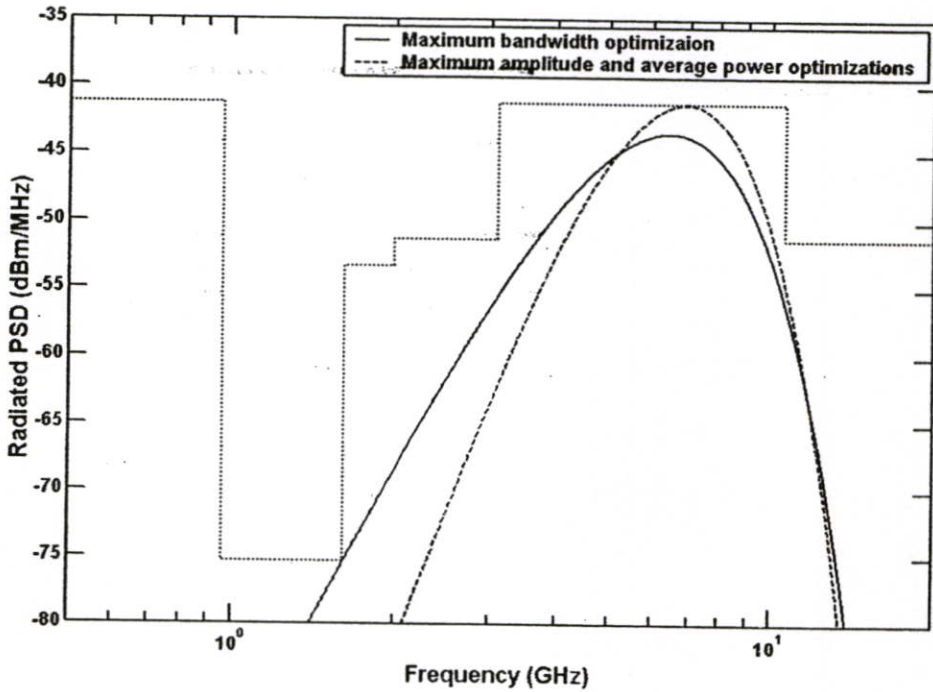


รูปที่ 4.3 กำลังเฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

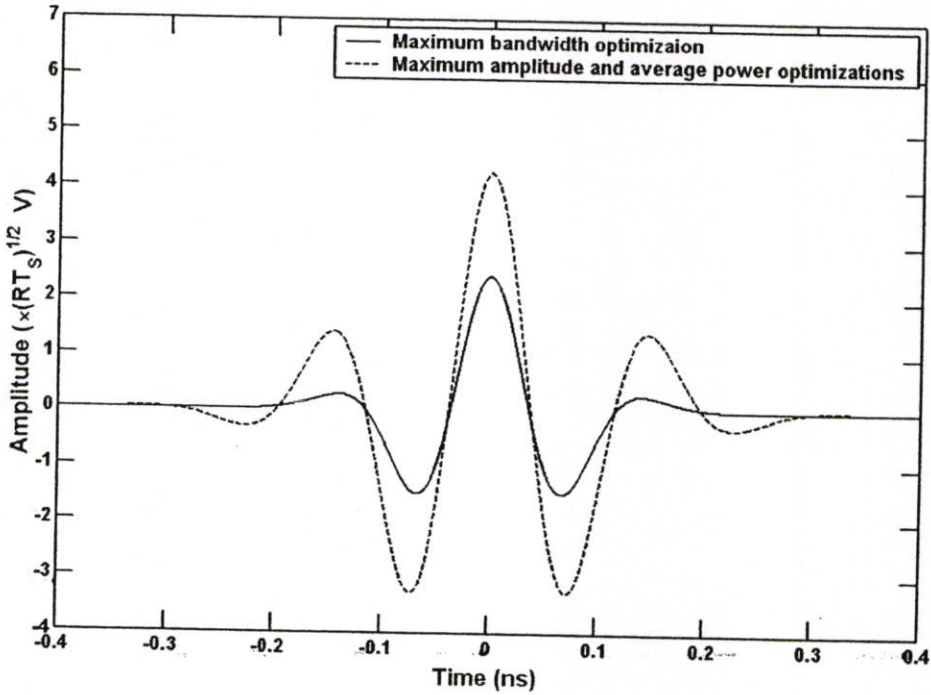
ต่อมาได้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของรูปคลื่นเหล่านี้ที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อกำหนดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้แบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุดคือรูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 4 โดยมีพารามิเตอร์ $d=0.07$ ns และ $A=9.47 \times 10^{-42} \sqrt{RT_s}$ V แอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ $4.73\sqrt{RT_s}$ V โดยรูปคลื่นที่ได้จะมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 1.00 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 6.78 GHz มีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -64.52 dBm พารามิเตอร์ที่ได้แอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน คือ รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับ 6 โดยมีพารามิเตอร์ $d=0.08$ ns และ $A=-1.77 \times 10^{-62} \sqrt{RT_s}$ V แอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ $5.35\sqrt{RT_s}$ V โดยรูปคลื่นที่ได้จะมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 0.84 และมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 5.97 GHz มีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -62.88 dBm รูปคลื่นในโดเมนเวลาที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคาร และ PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นที่ได้นี้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



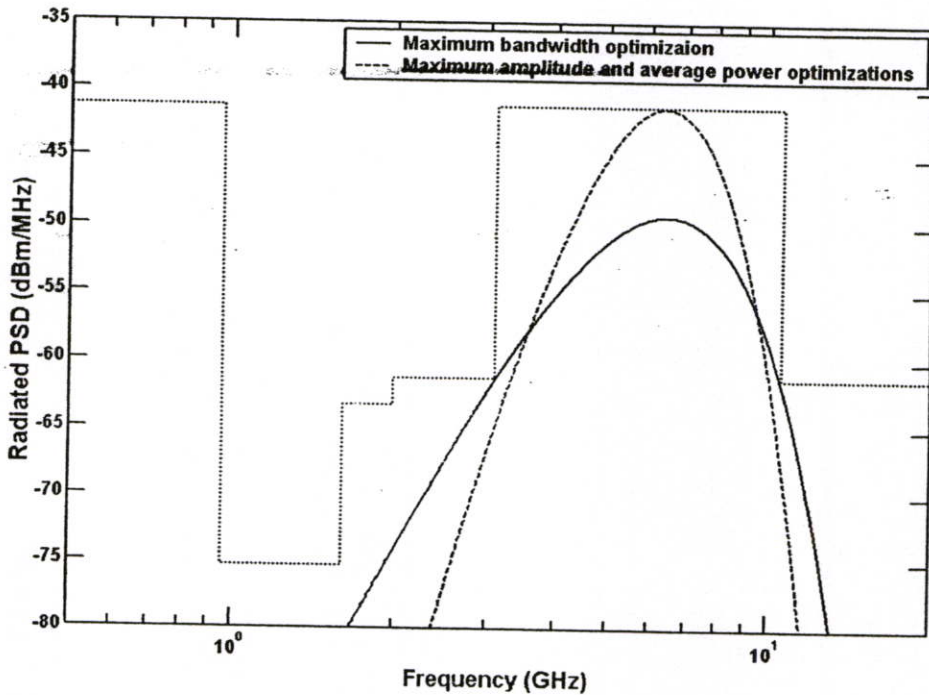
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขใน โดเมนเวลาที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC



รูปที่ 4.5 PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์ค สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขใน โดเมนเวลาที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC



รูปที่ 4.7 PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์ค สำหรับการสื่อสาร UWB ภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

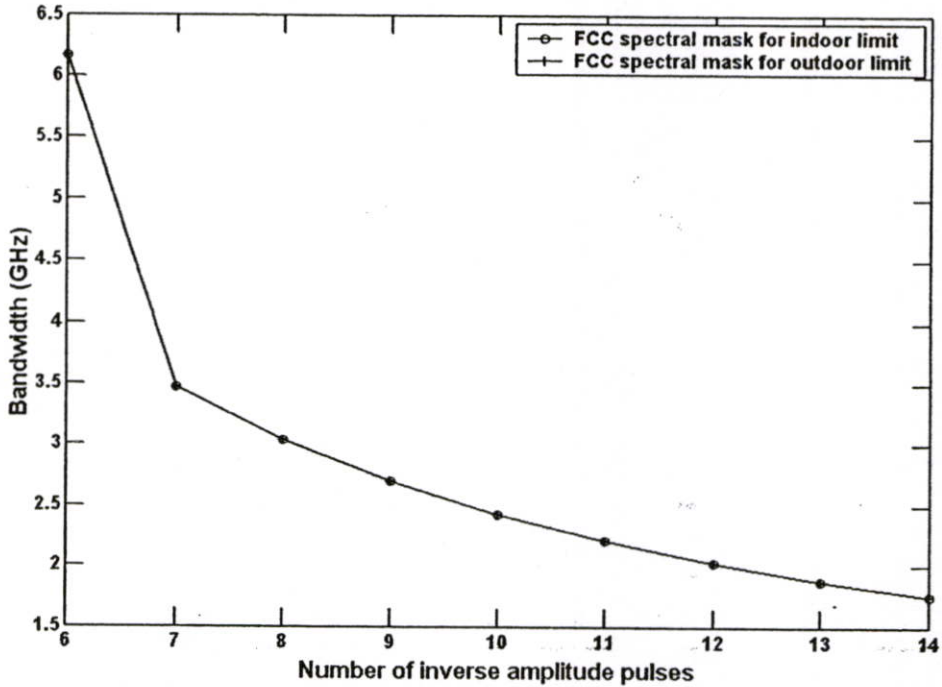
สำหรับข้อกำหนดภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ทำให้ได้แบนด์วิดท์กว้างสุดคือรูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 4 โดยมีพารามิเตอร์ $d=0.07$ ns และ $A=4.85 \times 10^{-42} \sqrt{RT_s}$ V แอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ $2.42 \sqrt{RT_s}$ โดยรูปคลื่นที่ได้จะมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 1.00 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 6.78 GHz มีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -70.34 dBm พารามิเตอร์ที่ทำให้ได้แอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากันคือรูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 8 โดยมีพารามิเตอร์ $d=0.1$ ns และ $A=2.55 \times 10^{-83} \sqrt{RT_s}$ V แอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ $4.30 \sqrt{RT_s}$ V โดยรูปคลื่นที่ได้จะมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 0.73 และมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 4.78 GHz มีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -63.81 dBm รูปคลื่นในโดเมนเวลาที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายนอกอาคาร และ PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นที่ได้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

4.3 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลขที่ถูกรบกวน [22]

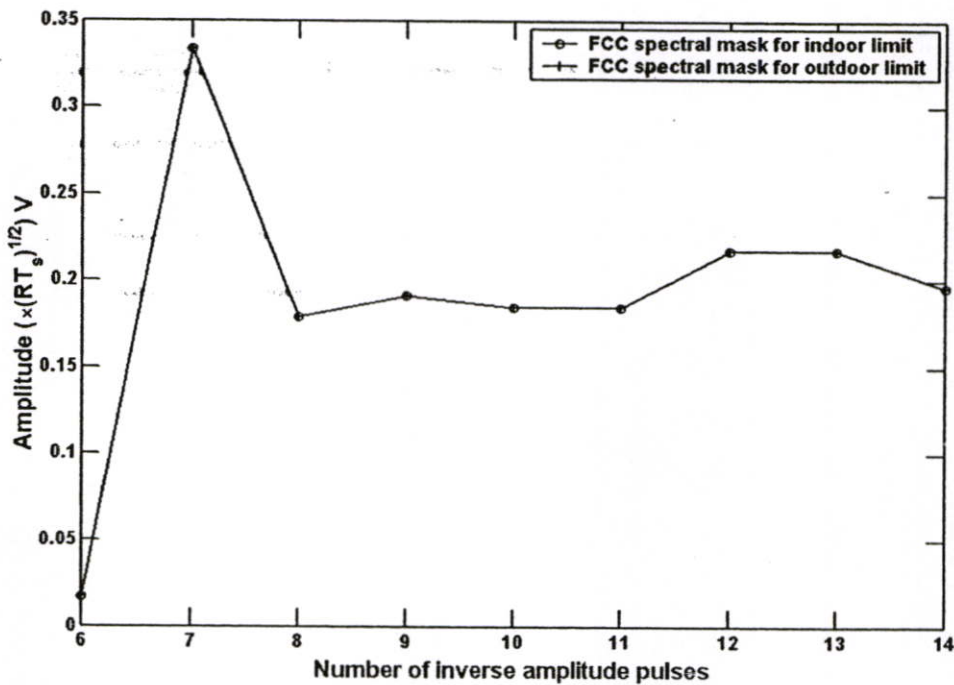
จะมีเพียงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลขที่ถูกรบกวน โดยการเพิ่มพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงกันข้ามเข้าไปตั้งแต่ 6 ถึง 14 พัลส์เท่านั้นที่สามารถทำให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC รูปที่ 4.8 แสดงแบนด์วิดท์ของแต่ละรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลขที่ถูกรบกวนที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC แบนด์วิดท์ของรูปคลื่นที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC มีค่าเท่ากัน รูปคลื่นสี่เหลี่ยมเซกซุเพิล (Sextuplet) ซึ่งประกอบไปด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันจำนวน 6 พัลส์ มีแบนด์วิดท์มากสุดเป็น 6.17 GHz

แอมพลิจูดสูงสุดของแต่ละรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลขที่ถูกรบกวนที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 แอมพลิจูดสูงสุดของรูปคลื่นที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC มีค่าเท่ากัน รูปคลื่นสี่เหลี่ยมเซปทุเพิล (Septuplet) ซึ่งประกอบไปด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันจำนวน 7 พัลส์ มีแอมพลิจูดสูงที่สุดเป็น $0.33 \sqrt{RT_s}$ V

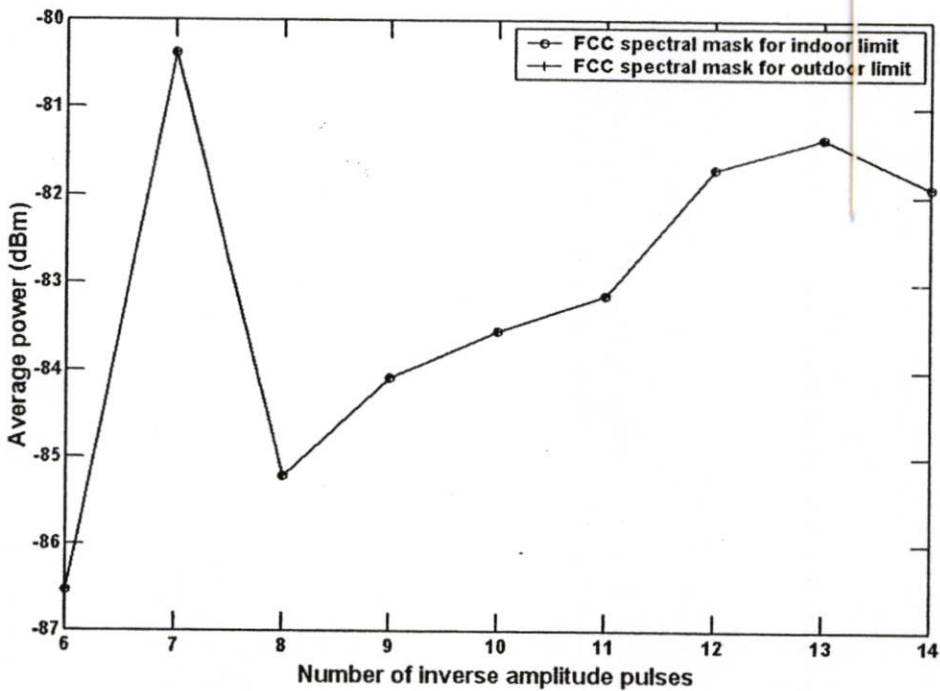
รูปที่ 4.10 แสดงกำลังเฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลขที่ถูกรบกวนที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC กำลังเฉลี่ยของรูปคลื่นที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC มีค่าเท่ากัน รูปคลื่นสี่เหลี่ยมเซปทุเพิลซึ่งประกอบไปด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันจำนวน 7 พัลส์ มีกำลังเฉลี่ยมากสุดเป็น -80.37 dBm



รูปที่ 4.8 แบนด์วิดท์ของแต่ละรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

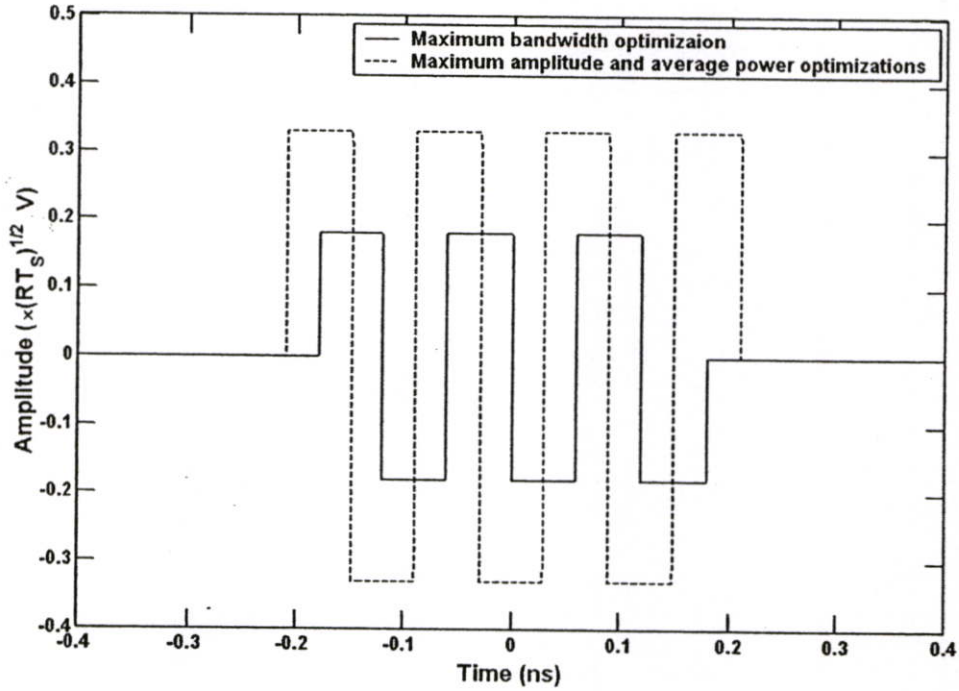


รูปที่ 4.9 แอมพลิจูดสูงสุดของแต่ละรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

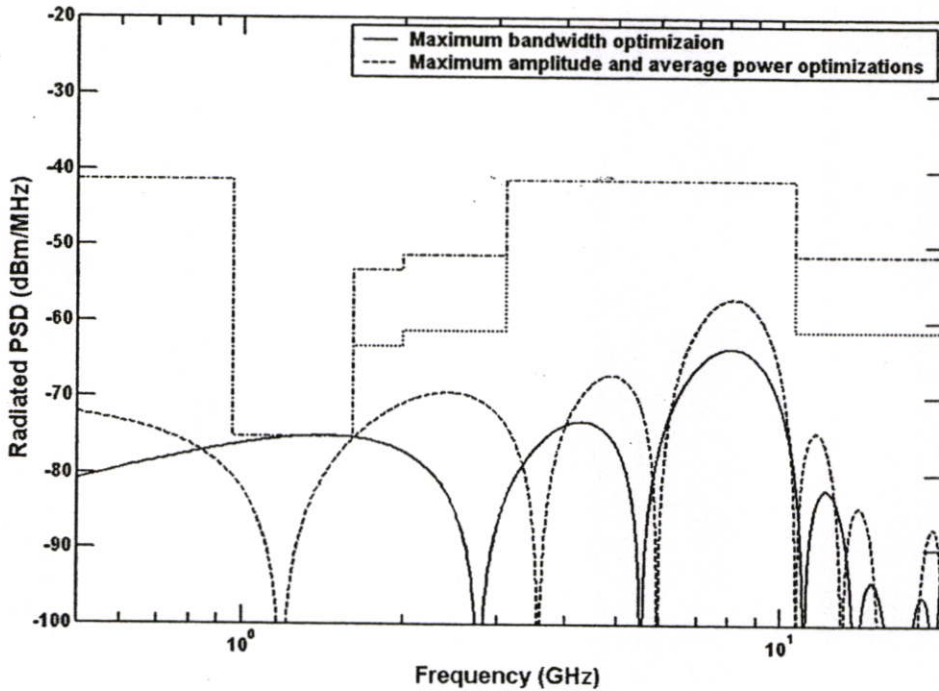


รูปที่ 4.10 กำลังเฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับเลตที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์ค สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

ต่อมาได้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของรูปคลื่นเหล่านี้ที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์ค สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อกำหนดภายใน และภายนอกอาคารจะได้ผลที่เหมือนกัน พารามิเตอร์ที่ได้แบนด์วิดท์กว้างสุดคือรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เชกทูเพลตซึ่งประกอบไปด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันจำนวน 6 พัลส์ โดยมีพารามิเตอร์ $d=0.06$ ns และ $A=0.18\sqrt{RT_s}$ V โดยรูปคลื่นที่ได้จะมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 0.87 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 6.17 GHz มีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -86.53 dBm พารามิเตอร์ที่ได้แอมพลิจูดสูงสุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากันกัน คือ รูปคลื่นสี่เหลี่ยมเชกทูเพลตซึ่งประกอบไปด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันจำนวน 7 พัลส์ โดยมีพารามิเตอร์ $d=0.06$ ns และ $A=0.33\sqrt{RT_s}$ V โดยรูปคลื่นที่ได้จะมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 0.42 และมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 3.47 GHz มีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -80.38 dBm รูปคลื่นในโดเมนเวลาที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคาร และ PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นที่ได้นี้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลดที่ถูกแก้ไขในโดเมนเวลาที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

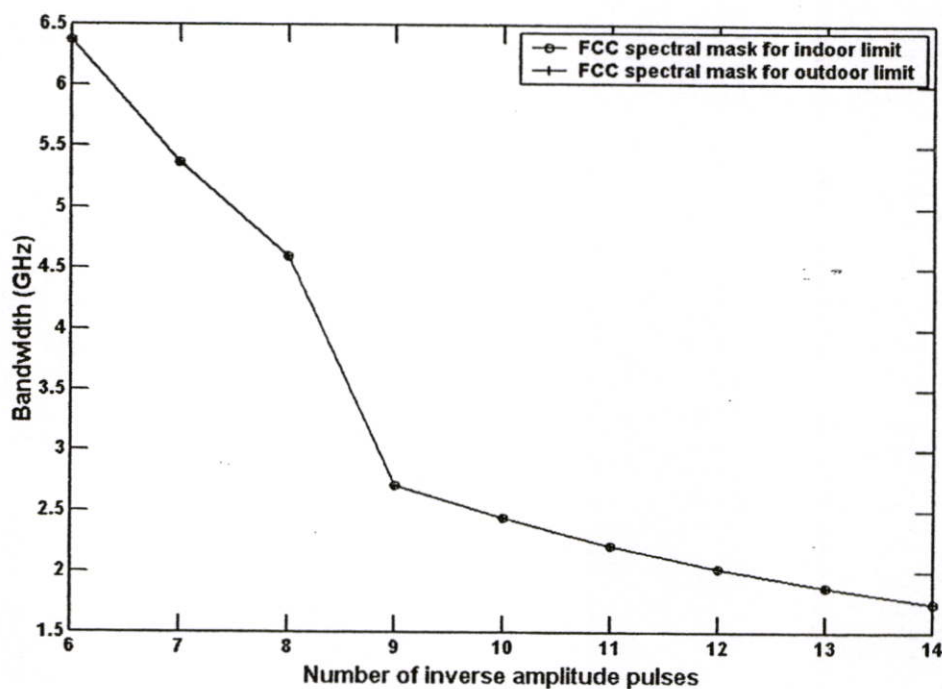


รูปที่ 4.12 PSD ที่แผ่กระจายออกมาของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลดที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

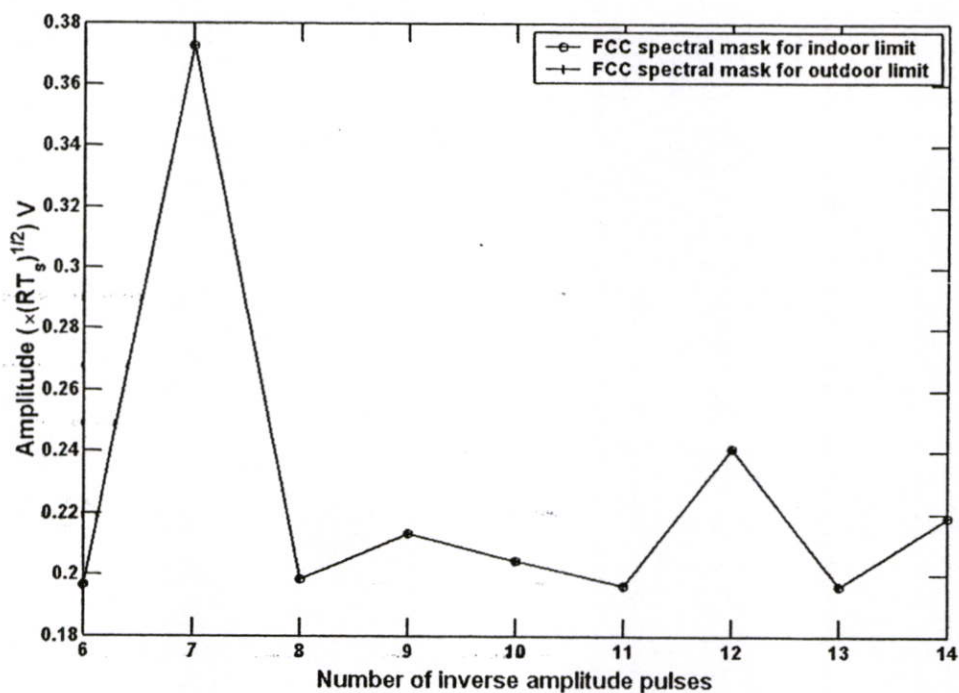
4.4 รูปคลื่นเกาส์ระดับเลตที่ถูกแก้ไข [22]

จะมีเพียงรูปคลื่นเกาส์ระดับเลตที่ถูกแก้ไขโดยการเพิ่มพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงกันข้ามเข้าไป ตั้งแต่ 6 ถึง 14 พัลส์เท่านั้นที่สามารถทำให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC รูปที่ 4.13 แสดงแบนด์วิดท์ของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ระดับเลตที่ถูกแก้ไขที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC แบนด์วิดท์ของรูปคลื่นที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC มีค่าเท่ากัน รูปคลื่นเกาส์เชพทูปเลตซึ่งประกอบไปด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันจำนวน 6 พัลส์ มีแบนด์วิดท์มากที่สุดเป็น 6.37 GHz

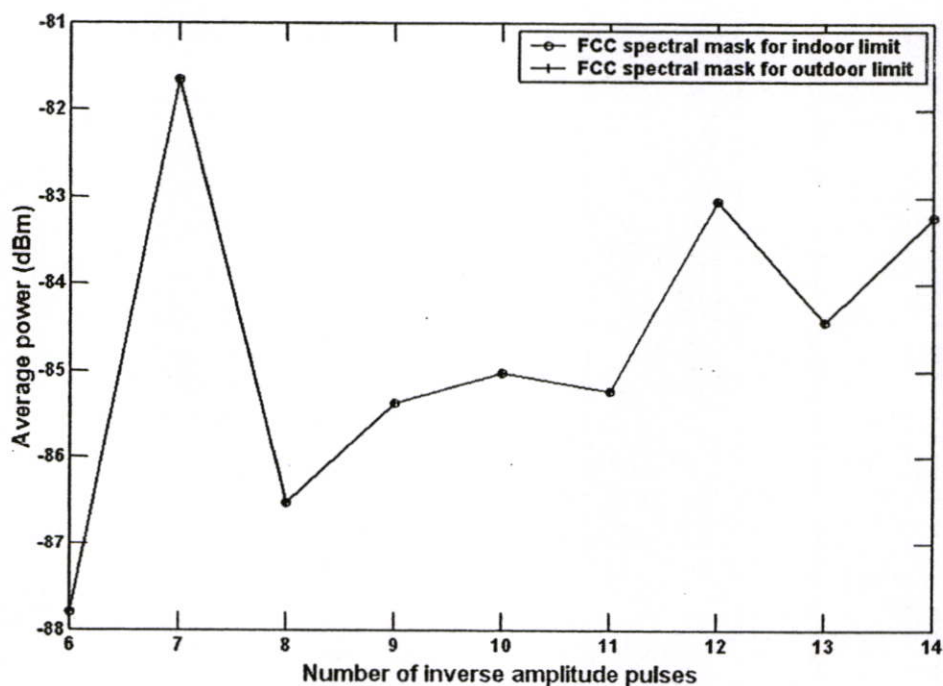
แอมพลิจูดสูงสุดของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ระดับเลตที่ถูกแก้ไขที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 แอมพลิจูดสูงสุดของรูปคลื่นที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC มีค่าเท่ากัน รูปคลื่นเกาส์เชพทูปเลตซึ่งประกอบไปด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันจำนวน 7 พัลส์ มีแอมพลิจูดสูงสุดมากที่สุดเป็น $0.37\sqrt{RT_s}$ V



รูปที่ 4.13 แบนด์วิดท์ของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ระดับเลตที่ถูกแก้ไขที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

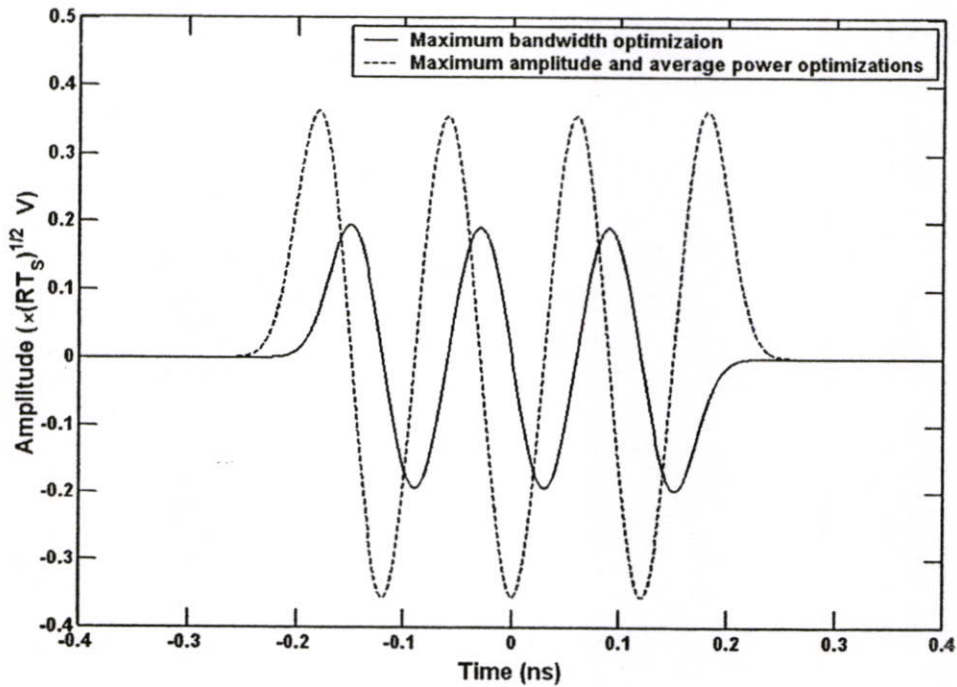


รูปที่ 4.14 แอมพลิจูดสูงสุดของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ระดับเลดที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC



รูปที่ 4.15 กำลังเฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ระดับเลดที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

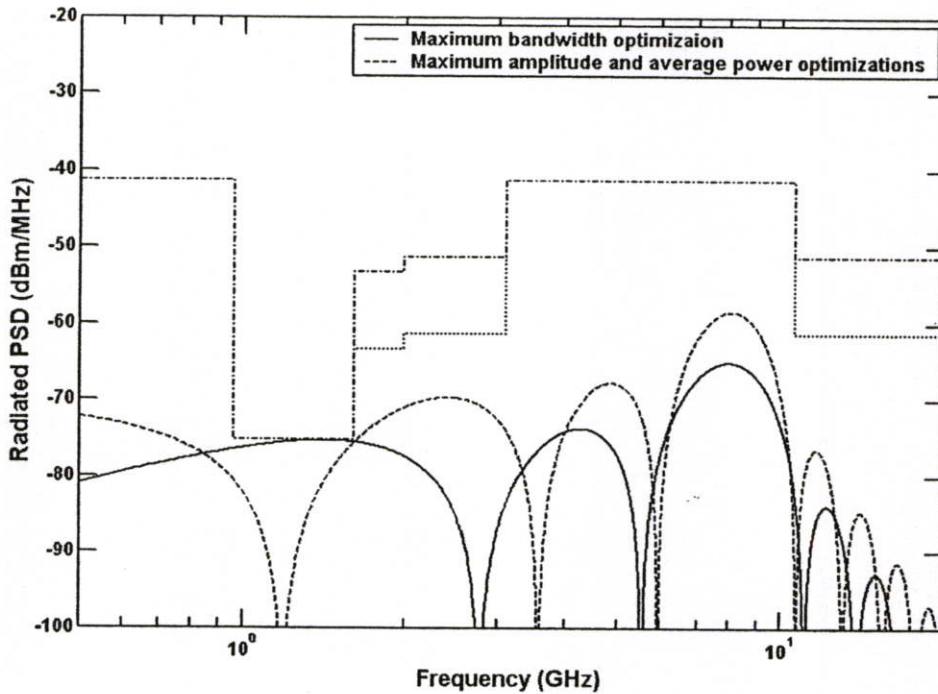
รูปที่ 4.15 แสดงกำลังเฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นเกาส์ระดับเลดที่ถูกแก้ไขที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC กำลังเฉลี่ยของรูปคลื่นที่ทำให้เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC มีค่าเท่ากัน รูปคลื่นเกาส์เซพทูเพลดซึ่งประกอบไปด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันจำนวน 7 พัลส์ มีกำลังเฉลี่ยมากที่สุดเป็น -81.65 dBm



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นเกาส์ระดับเลดที่ถูกแก้ไขในโดเมนเวลาที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

ต่อมาได้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของรูปคลื่นเหล่านี้ที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อกำหนดภายในและภายนอกอาคารจะได้ผลที่เหมือนกัน พารามิเตอร์ที่ได้แบนด์วิดท์กว้างสุดคือรูปคลื่นเกาส์เซพทูเพลดซึ่งประกอบไปด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันจำนวน 6 พัลส์ โดยมีพารามิเตอร์ $d=0.03$ ns และ $A=0.20\sqrt{RT_s}$ v โดยรูปคลื่นที่ได้จะมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 0.91 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 6.37 GHz มีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ -87.79 dBm พารามิเตอร์ที่ได้แอมพลิจูดสูงสุดและกำลังเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากันกัน คือ รูปคลื่นเกาส์เซพทูเพลดซึ่งประกอบไปด้วยพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันจำนวน 7 พัลส์ โดยมีพารามิเตอร์ $d=0.03$ ns และ $A=0.37\sqrt{RT_s}$ v โดยรูปคลื่นที่ได้จะมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนเท่ากับ 0.74 และมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 5.37 GHz มี

กำลังเฉลี่ยเท่ากับ -81.65 dBm รูปคลื่นในโดเมนเวลาที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคาร และ PSD ที่แผ่กระจายออกมาจากรูปคลื่นที่ได้นี้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 PSD ที่แผ่กระจายออกมาจากรูปคลื่นเกาส์ระดับเลตที่ถูกแก้ไขที่เป็นไปตามสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

4.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้วิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขสำหรับการสื่อสาร UWB ซึ่งประกอบไปด้วยรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข รูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับเลตที่ถูกแก้ไข และรูปคลื่นเกาส์ระดับเลตที่ถูกแก้ไข จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขจะมีคุณสมบัติดีกว่ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับเลตที่ถูกแก้ไขและรูปคลื่นเกาส์ระดับเลตที่ถูกแก้ไขอย่างชัดเจน ส่วนรูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับเลตที่ถูกแก้ไขจะมีกำลังเฉลี่ยมากกว่า แต่มีแบนด์วิดท์และแอมพลิจูดสูงสุดน้อยกว่ารูปคลื่นเกาส์ระดับเลตที่ถูกแก้ไข รูปคลื่นที่ได้นี้สามารถใช้อ้างอิงเป็นสัญญาณ UWB ที่เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB ที่กำหนดโดย FCC และข้อกำหนด PSD ที่แผ่กระจายออกมาและสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์แก้ไขรูปคลื่นอย่างง่ายสำหรับการสื่อสาร UWB ซึ่งประกอบไปด้วยรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคี่ระดับเลตที่ถูกแก้ไข และรูปคลื่นเกาส์คี่ระดับเลตที่ถูกแก้ไข โดยการทำให้รูปคลื่นเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB ที่กำหนดโดย FCC รวมทั้งทำให้เป็นไปตามข้อกำหนดของสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่นแต่ละชนิดให้เป็นไปตามเงื่อนไขแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุด สำหรับผลของการศึกษาสรุปได้ดังนี้

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แก้ไขรูปคลื่นอย่างง่ายให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคาร ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของรูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขให้เป็นไปตามข้อกำหนดสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคาร

รูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไข	แบนด์วิดท์กว้างที่สุด (GHz)	แอมพลิจูดสูงที่สุด (V)	กำลังเฉลี่ยมากที่สุด (dBm)
เกาส์	6.78	$5.35 \sqrt{RT_s}$	-62.88
สี่เหลี่ยมคี่ระดับเลต	6.17	$0.33 \sqrt{RT_s}$	-80.38
เกาส์คี่ระดับเลต	6.37	$0.37 \sqrt{RT_s}$	-81.65

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของรูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไขให้เป็นไปตามข้อกำหนดสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายนอกอาคาร

รูปคลื่นอย่างง่ายที่ถูกแก้ไข	แบนด์วิดท์กว้างที่สุด (GHz)	แอมพลิจูดสูงที่สุด (V)	กำลังเฉลี่ยมากที่สุด (dBm)
เกาส์	6.78	$4.30 \sqrt{RT_s}$	-63.81
สี่เหลี่ยมคี่ระดับเลต	6.17	$0.33 \sqrt{RT_s}$	-80.38
เกาส์คี่ระดับเลต	6.37	$0.37 \sqrt{RT_s}$	-81.65

จากตารางที่ 5.1 และ 5.2 สรุปได้ว่ารูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขให้เป็นไปตามข้อกำหนดสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารมีคุณสมบัติ

จากตารางที่ 5.1 และ 5.2 สรุปได้ว่ารูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขให้เป็นไปตามข้อกำหนดสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารมีคุณสมบัติดีกว่ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับเลตที่ถูกแก้ไขและรูปคลื่นเกาส์ระดับเลตที่ถูกแก้ไขอย่างชัดเจน ส่วนรูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับเลตที่ถูกแก้ไขและรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไขให้เป็นไปตามข้อกำหนดสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในอาคารจะมีคุณสมบัติเหมือนกับภายนอกอาคาร รูปคลื่นเกาส์ระดับเลตที่ถูกแก้ไขจะมีแบนด์วิดท์และแอมพลิจูดสูงสุดมากกว่า แต่จะมีกำลังเฉลี่ยน้อยกว่ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับเลตที่ถูกแก้ไข

ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากแนวคิดที่ได้ทำการวิเคราะห์แก้ไขรูปคลื่นอย่างง่ายสำหรับการสื่อสาร UWB จากผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ผลที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการทำงานโดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่นนั้นยังไม่ได้พิจารณาถึงการสูญเสียเชิงวิถีและระบบการวัด และยังกำหนดให้สายอากาศเป็นสายอากาศแบบไอโซทรอปิก ดังนั้น จึงควรนำเอาสิ่งที่ยังไม่ได้พิจารณาเข้ามาช่วยในการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ รวมทั้งพิจารณาสายอากาศที่ใช้จริงด้วย ซึ่งจะทำให้ได้ผลที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รูปคลื่นที่ถูกแก้ไขเหล่านี้สามารถนำมาใช้อ้างอิงสร้างเป็นสัญญาณ UWB ที่เป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB และข้อกำหนดสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคาร

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] 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] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rule Regarding UWB Transmission Systems," **First Report**, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [6] ETSI, "Harmonised Standards Covering Ultrawide Band (UWB) Applications," **Standardisation Mandate: DG ENTR/G/3M/329**, Brussels, Feb. 2003.
- [7] ETSI, "ECC Decision on The Harmonised Conditions for Device Using UWB Technology in Bands below 10.6 GHz," **Electronic Communications Committee: ECC/DEC/(06)AA**, Cascais, Oct. 2005.
- [8] MIC, "Japan's UWB Emission Policy Advances," **EE Times**, Washington, 26 Aug. 2005.
- [9] M. Z. Win, "On The Power Spectral Density of Digital Pulse Streams Generated by M-Ary Cyclostationary Sequences in The Presence of Stationary Timing Jitter," **IEEE Transactions on Communications**, vol. 46, no. 9, pp. 1135-1145, Sept. 1998.
- [10] S. S. Mo, A. D. Gelman, J. Gopal, "Frame Synchronization in UWB Using Multiple SYNC Words to Eliminate Line Frequencies," **2003 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**, vol. 2, pp. 773-778, March 2003.
- [11] S. S. Mo, A. D. Gelman, "Scrambler Design to Reduce Power Spectral Density of UWB Signals in IEEE 802.15.3a," **2004 IEEE Conference on Communications**, vol. 6, pp. 3586-3590, June 2004.

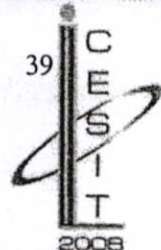
- [12] B. Allen, S. A. Ghorashi and M. Ghavami, "A Review of Pulse Design for Impulse Radio," **2004 IEE Seminar on Ultra Wideband Communications Technologies and System Design**, pp. 93-97, July 2004.
- [13] C. A. Corral, S. Sibecas, S. Emami and G. Stratis, "Pulse Spectrum Optimization for Ultra-Wideband Communication," **2002 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Techniques**, pp. 31-35, May 2002.
- [14] L. B. Michael, M. Ghavami and R. Kohno, "Multiple Pulse Generator for Ultra-Wideband Communication Using Hermite Polynomial Based Orthogonal Pulses," **2002 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Techniques**, pp. 47-51, May 2002.
- [15] B. Hu and N. C. Beaulieu, "Pulse Shaping in UWB Communication Systems," **2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC)**, vol. 7, pp. 5175-5179, Sept. 2004.
- [16] R. Dilmaghani, M. Ghavami, B. Allen, H. Aghvami, "Novel UWB Pulse Shaping Using Prolate Spheroidal Wave functions," **14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)**, vol. 7, pp. 602-606, Sept. 2003.
- [17] L. Yin and Z. Hongbo, "UWB Pulse Design Using The Approximate Prolate Spheroidal Wave Functions," **IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE)**, vol. 1, pp. 450-453, Aug. 2005.
- [18] A. B. Parr, B. L. Cho and Z. Ding, "A New UWB Pulse Generator for FCC Spectral Masks," **The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC)**, vol. 3, pp. 1664-1666, April 2003.
- [19] A. B. Parr, B. L. Cho, K. Wallace and Z. Ding, "A Novel Ultra-Wideband Pulse Design Algorithm," **IEEE Communications Letters**, vol. 7, no. 5, pp. 219-221, May 2003.
- [20] 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.

- [21] A. Pokang, P. Supanakoon, S. Promwong and N. Sukutamtanti, "Modified Gaussian Waveforms for Ultra Wideband Communications," **The 2008 International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology (ICESIT 2008)**, pp. 152-156, Feb. 2008.
- [22] A. Pokang, P. Supanakoon, S. Promwong and N. Sukutamtanti, "Modified Doublet Waveforms Satisfying FCC Spectral Masks for Ultra Wideband Communication," **Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics 2008 (APSAEM08)**, pp. 335-338, July 2008.

ภาคผนวก ก

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

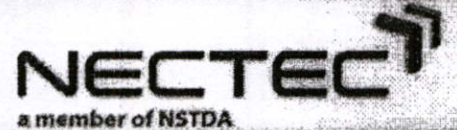
- [1] **A. Pokang**, P. Supanakoon, S. Promwong and N. Sukutamtanti, "Modified Gaussian Waveforms for Ultra Wideband Communications," The 2008 International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology (ICESIT 2008), pp. 152-156, Feb. 2008.
- [2] **A. Pokang**, P. Supanakoon, S. Promwong and N. Sukutamtanti, "Modified Doublet Waveforms Satisfying FCC Spectral Masks for Ultra Wideband Communication," Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics 2008 (APSAEM08), pp. 335-338, July 2008.



ICESTIT 2008

**THE 2008 INTERNATIONAL CONFERENCE ON
EMBEDDED SYSTEMS AND INTELLIGENT TECHNOLOGY**

February 27-29, 2008
Grand Mercure Fortune Hotel, Bangkok, Thailand



Modified Gaussian Waveforms for Ultra Wideband Communications

Apiradee Pokang¹, Pichaya Supanakoon^{1,2}, Sathaporn Promwong^{1,2} and Nikorn Sukutamanti¹

¹Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,

²Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand
 E-mail: {9061016,kpsichay,kpsathap,ksnikorn}@kmitl.ac.th

Abstract—Ultra wideband (UWB) waveform is necessary to satisfy the regulation of Federal Communications Commission (FCC) for preventing interference to other communications. In this paper, modified Gaussian waveforms are presented to satisfy the FCC signal definition and spectral masks. The derivatives of Gaussian waveform are considered. They are optimized for maximum bandwidth, amplitude and average power in the FCC spectral masks for indoor and outdoor limits ranging from 3.1 to 10.6 GHz. The binary pulse amplitude modulation (PAM) with balance binary data independent identically distribution (i.i.d.) random sequence is considered to easily derived the power spectral density (PSD) of waveforms. The PSDs and parameters of optimized waveforms are shown. The optimized results are discussed in the conclusion.

Keywords—ultra wideband (UWB); Gaussian waveform; spectral mask

I. INTRODUCTION

Ultra wideband (UWB) radio technology has become an important topic for microwave communication because of its potential low cost and low power consumption properties [1]-[3]. UWB technologies are difference from other radio frequency (RF) technologies. Among UWB technologies is advantageous with respect to the simple hardware. Instead of using a narrow band carrier modulation, pulse trains with ultra wide frequency spectrum are transmitted. The Federal Communications Commission (FCC) specified that the main band of UWB signal is in a frequency spectrum ranging from 3.1 to 10.6 GHz. The FCC defined UWB signal as those, which have a fractional bandwidth greater than or equal to 0.20, or occupied bandwidth greater than or equal to 500 MHz. The fractional and occupied bandwidth are defined as [4]

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

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

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

The power spectral density (PSD) of UWB signal is considered to be noise for other communication systems because its PSD is not excess the spectral masks for indoor and

TABLE I. PSD RADIATION LIMITS PROPOSED BY FCC [4]

Frequency (MHz)	PSD (dBm/MHz) for indoor limit	PSD (dBm/MHz) for outdoor limit
Less than 960	-41.3	-41.3
960-1610	-75.3	-75.3
1610-1990	-53.3	-63.3
1990-3100	-51.3	-61.3
3100-10600	-41.3	-41.3
More than 10600	-51.3	-61.3

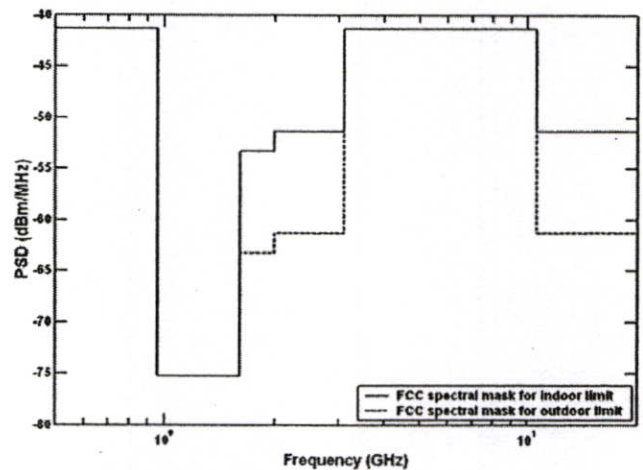


Figure 1. FCC spectral masks for UWB communications [4]

outdoor limits. The PSD radiation limits proposed by FCC and FCC spectral masks for UWB communications are shown in Table 1 and Fig. 1, respectively [4]. UWB receiver collects the power of the received signal to rebuild the pulse. Therefore, UWB radio technologies can coexist with other RF technologies without interference.

Numerous UWB waveforms have been proposed [5]. Although the waveform designs are reviewed, UWB signal definition and spectral masks were not considered. There are many techniques for designing UWB waveform such as by using Hermite function [6]-[7] and prolate spheroidal wave function [8]. The numerical technique is also used to design the UWB waveform [9]-[10]. Although these waveforms have very high spectral efficiency in the designed frequency range, the algorithms of these techniques are complicated. The simple

waveforms for UWB communications are proposed to satisfy the FCC spectral masks [11]. The Gaussian monocycle, which is second order derivative of Gaussian waveform, cannot satisfy FCC regulation. Therefore, this waveform is necessary to modify for satisfying FCC regulation.

In this paper, modified Gaussian waveforms are presented to satisfy the FCC signal definition and spectral masks. The derivatives of Gaussian waveform are considered. They are optimized for maximum bandwidth, amplitude and average power in the FCC spectral masks for indoor and outdoor limits ranging from 3.1 to 10.6 GHz. The binary pulse amplitude modulation (PAM) with balance binary data independent identically distribution (i.i.d.) random sequence is considered to easily derived the PSD of waveforms [12]. The PSDs and parameters of optimized waveforms are shown. The optimized results are discussed in the conclusion.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2, the modified Gaussian waveforms are explained. Next, the optimization results are illustrated in Section 3. Finally, conclusion is discussed in Section 4.

II. MODIFIED GAUSSIAN WAVEFORMS

Gaussian waveform is modified to satisfy the FCC UWB signal definition and spectral masks for indoor and outdoor limits. The Gaussian waveform in time domain f_0 and its spectral density function F_0 can be written as

$$f_0(t) = Ae^{-(t/d)^2}, \quad (3)$$

$$F_0(f) = Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2 d^2 f^2}, \quad (4)$$

where t is time, f is frequency, A and d are the maximum amplitude and $1/e$ characteristic decay time of Gaussian waveform, respectively. The spectral density function is also Gaussian function and has direct current (DC) component. Therefore, Gaussian waveform is not suitable for UWB signal.

Monocycle waveform is the second order derivative of the Gaussian waveform. This waveform in time domain f_2 and its spectral density function F_2 are respectively given by

$$f_2(t) = \left(-1 + \frac{2t^2}{d^2}\right) \frac{2A}{d^2} e^{-(t/d)^2}, \quad (5)$$

$$F_2(f) = -4Ad\pi^2 \sqrt{\pi} f^2 e^{-\pi^2 d^2 f^2}. \quad (6)$$

Although this waveform does not have DC component, it cannot optimize to satisfy FCC regulation [11]. Then, the Gaussian waveform is modified using higher order derivative.

The n -th order derivative of Gaussian waveform in time domain f_n and its spectral density function F_n can be expressed as

$$f_n(t) = \frac{d^n}{dt^n} f_0(t), \quad (7)$$

$$F_n(f) = (j2\pi f)^n F_0(f). \quad (8)$$

This waveform is used to optimize for maximum bandwidth, amplitude and average power. The detail of optimization is described in Section 3.

The optimized waveform is assumed to be voltage signal. For obtaining the continuous component of PSD, the binary PAM with balance binary data i.i.d random sequence is considered. Then, the PSD of the transmitted waveform can be simplified to [12]

$$S(f) = \frac{1}{T_s} |F(f)|^2, \quad (9)$$

where T_s is the time interval of one waveform and F is the spectral density of waveform.

For considering the radiation power, the transmitter (Tx) antenna is assumed to be isotropic antenna. The internal circuit and Tx antenna impedances are assumed to be same real value R . This is ideal case with maximum radiation power. If this case satisfies the FCC regulation, it guarantees that other cases also satisfy the FCC regulation. In this paper, the path loss and measurement system are not considered. The radiation PSD of this ideal case can be written as

$$S_R(f) = \frac{1}{4R} S(f). \quad (10)$$

III. OPTIMIZATION RESULTS

The n -th derivatives of Gaussian waveform are optimized for UWB communications. The UWB signal definition by FCC is considered [4]. The condition of f_L and f_H are set to $3.1 \text{ GHz} \leq f_L < f_H \leq 10.6 \text{ GHz}$. Each waveform must have fractional bandwidth greater than or equal to 0.20, or occupied bandwidth greater than or equal to 500 MHz. After that, each waveform is satisfied the FCC spectral masks for indoor and outdoor limits. The three assumptions for good UWB signal waveform are considered. First is wide bandwidth for reducing the effect of multipath fading [13]. Next is high amplitude for increasing the efficiency of peak detection receiver. Final is high average power for increasing signal to noise ration (SNR). Then, each waveform is optimized for maximum bandwidth, amplitude and average power in the frequency ranging from 3.1 to 10.6 GHz. For the optimization, the solution of f is 0.01 GHz, t is 0.01 ns and d is 0.01 ns.

Only 4th and higher 4th order derivatives of Gaussian waveform can be optimize to satisfy the FCC signal definition and spectral masks for indoor and outdoor limits. Fig. 2 shows the bandwidth of each optimized waveform satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits. The bandwidth

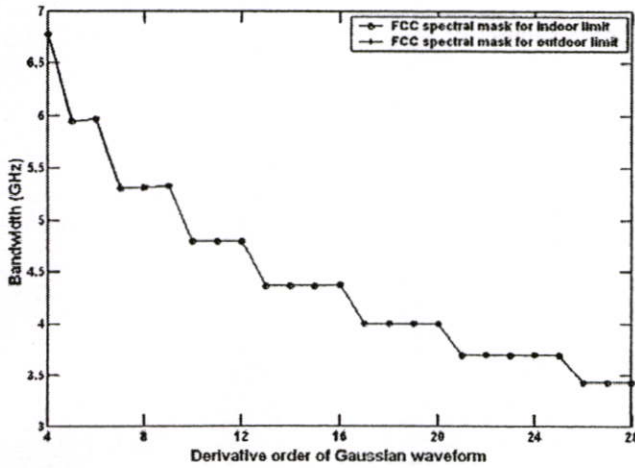


Figure 2. Bandwidth of each optimized waveform satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits

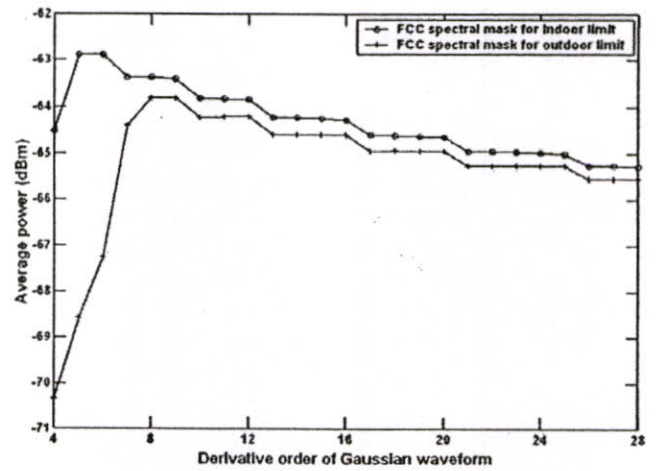


Figure 4. Average power of each optimized waveform satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits

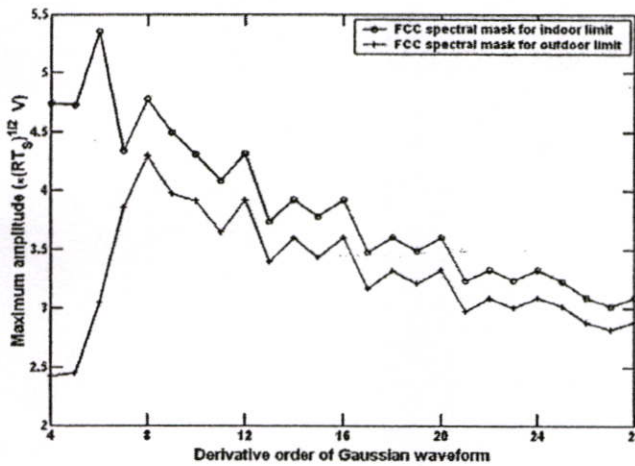


Figure 3. Maximum amplitude of each optimized waveform satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits

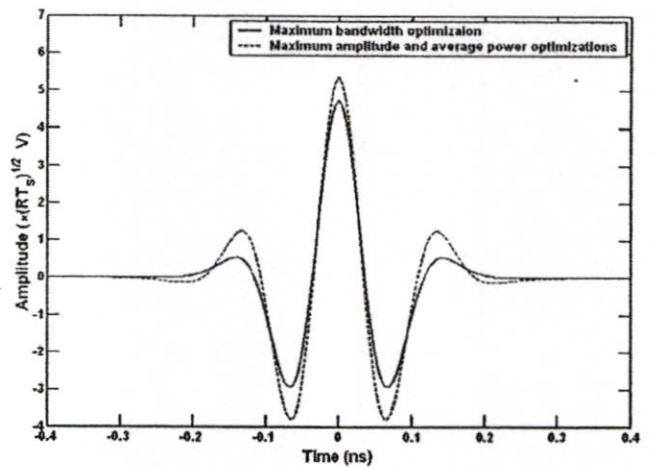


Figure 5. Optimized waveforms in time domain satisfying FCC spectral mask for indoor limit

of optimized waveforms satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits is the same. The 4th derivative of Gaussian waveform has widest bandwidth that is 6.78 GHz.

The maximum amplitude of each optimized waveform satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits is shown in Fig. 3. The maximum amplitude of all optimized waveforms satisfying FCC spectral mask for indoor limit is more than that for outdoor limit because the spectral mask for outdoor limit at some frequency range is lower than that for indoor limit. The 6th and 8th derivatives of Gaussian waveform have highest maximum amplitude that is about $5.35(RT_s)^{1/2}$ and $4.30(RT_s)^{1/2}$ V for indoor and outdoor limits, respectively.

Fig. 4 shows the average power of each optimized waveform satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits. Like the maximum amplitude, the average power of all optimized waveforms satisfying FCC spectral mask for indoor limit is more than that for outdoor limit. The 6th and 8th derivatives of Gaussian waveform have highest

average power that is about -62.88 and -63.81 dBm for indoor and outdoor limits, respectively. Next, the parameter of these waveforms are separately considered to satisfy FCC spectral mask for indoor and outdoor limits

A. FCC Spectral Mask for Indoor Limit

For maximum bandwidth optimization, the optimum waveform is 4th order derivative of Gaussian waveform with parameters $d = 0.07$ ns and $A = 9.47 \times 10^{-42} \sqrt{RT_s}$ V. The maximum amplitude is $4.73(RT_s)^{1/2}$ V. This waveform has 1.00 fractional bandwidth and 6.78 GHz occupied bandwidth. The average power of this waveform is -64.52 dBm.

For maximum amplitude and average power optimizations, the results are the same. The optimum waveform is 6th order derivative of Gaussian waveform with parameters $d = 0.08$ ns and $A = -1.17 \times 10^{-62} \sqrt{RT_s}$ V. The maximum amplitude is $5.35(RT_s)^{1/2}$ V. This waveform has 0.84 fractional bandwidth

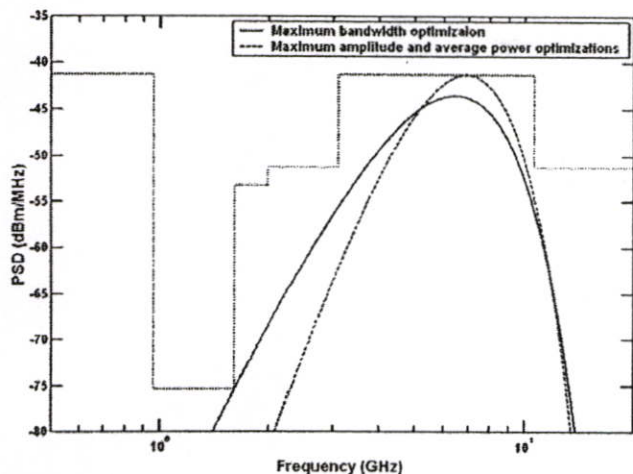


Figure 6. PSDs of optimized waveforms compared with FCC spectral mask for indoor limit

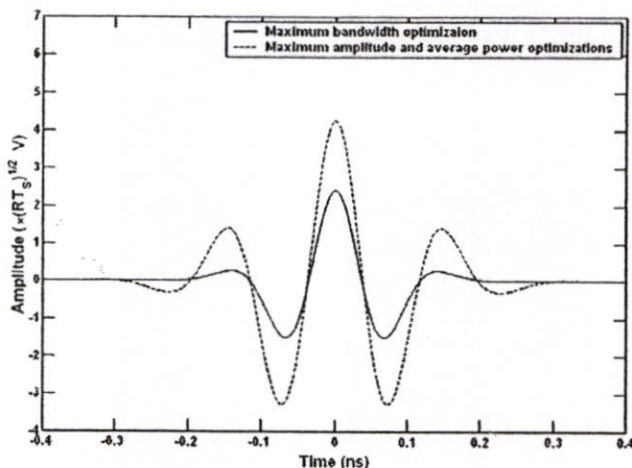


Figure 7. Optimized waveforms in time domain satisfying FCC spectral mask for outdoor limit

and 5.97 GHz occupied bandwidth. The average power of this waveform is -62.88 dBm. These waveforms in time domain satisfying FCC spectral mask for indoor limit and their PSDs of compared with FCC spectral mask for indoor limit are shown in Figs. 5 and 6, respectively.

B. FCC Spectral Mask for Outdoor Limit

For maximum bandwidth optimization, the optimum waveform is 4th order derivative of Gaussian waveform with parameters $d = 0.07$ ns and $A = 4.85 \times 10^{-42} \sqrt{RT_s}$ V. The maximum amplitude is $2.42(RT_s)^{1/2}$ V. This waveform has 1.00 fractional bandwidth and 6.78 GHz occupied bandwidth. The average power of this waveform is -70.34 dBm.

For maximum amplitude and average power optimizations, the results are the same. The optimum waveform is 8th order derivative of Gaussian waveform with parameters $d = 0.10$ ns and $A = 2.55 \times 10^{-83} \sqrt{RT_s}$ V. The maximum amplitude is $4.30(RT_s)^{1/2}$ V. This waveform has 0.73 fractional bandwidth and 4.78 GHz occupied bandwidth. The average power of this waveform is -63.81 dBm. These waveforms in time domain satisfying FCC spectral mask for outdoor limit and their PSDs of compared with FCC spectral mask for outdoor limit are shown in Figs. 7 and 8, respectively.

IV. CONCLUSION

In this paper, modified Gaussian waveforms are presented to satisfy the FCC signal definition and spectral masks. The derivatives of Gaussian waveform are considered. From the results, we can see that the 4th order derivatives of Gaussian waveform has maximum bandwidth satisfying both FCC spectral masks for indoor and outdoor limits. The 6th and 8th order derivatives of Gaussian waveform have both maximum amplitude and average power satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits, respectively.

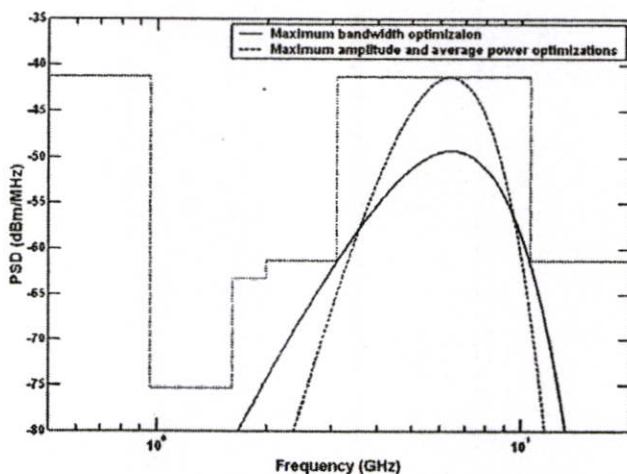


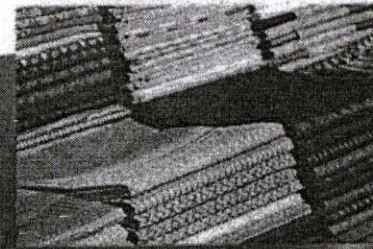
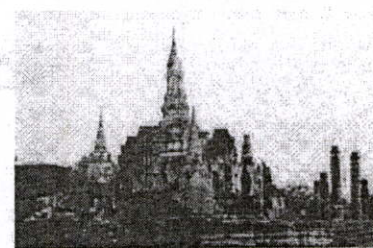
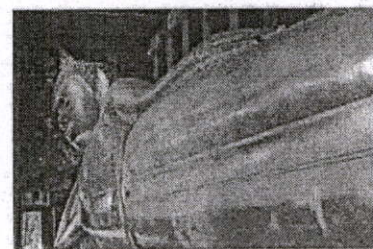
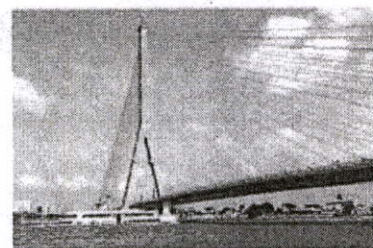
Figure 8. PSDs of optimized waveforms compared with FCC spectral mask for outdoor limit

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] B. Allen, S. A. Ghorashi and M. Ghavami, "A review of pulse design for impulse radio," 2004 IEEE Seminar on Ultra Wideband Communications Technologies and System Design, pp. 93-97, Jul. 2004.
- [6] M. Ghavami, L. B. Miscael, R. Khono, "Hermite function based orthogonal pulses for ultra wideband communication," The Fourth International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), pp. 437-440, Sep. 2001.

- [7] L. B. Michael, M. Ghavami and R. Kohno, "Multiple pulse generator for ultra-wideband communication using Hermite polynomial based orthogonal pulses," 2002 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Techniques, pp. 47-51, May 2002.
- [8] R. Dilmaghani, M. Ghavami, B. Allen and H. Aghvami, "Novel UWB pulse shaping using prolate spheroidal wave functions," IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), vol. 1, pp. 602-606, Sept. 2003.
- [9] A. B. Parr, B. L. Cho, K. Wallace and Z. Ding, "A new UWB pulse generator for FCC spectral masks," The 57th IEEE Seminannual Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 3, pp. 1664-1666, Apr. 2003.
- [10] A. B. Parr, B. L. Cho, K. Wallace and Z. Ding, "A novel ultra wideband pulse design algorithm," IEEE Communications Letters, vol. 7, no. 5, pp. 219-221, May 2003.
- [11] 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), pp. 626-629, May 2005.
- [12] M. Z. Win, "On the power spectral density of digital pulse streams generated by M-ary cyclostationary sequences in the presence of stationary timing jitter," IEEE Transaction on Communications, vol. 46, no. 9, pp. 1135-1145, Sept. 1998.
- [13] M. Welborn and J. McCorkle, "The importance of fractional bandwidth in ultra wideband pulse design," IEEE International Conference on Communications (ICC), vol. 2, pp. 753-757, 2002.

Sponsors



Technical Papers CD

APSAEM08

Bangkok, Thailand, July 24-25, 2008.

Organized by Department of Electrical Technology Education,
King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT)

Symposium
Information

Keynote and
Invited Speech

Technical
Papers

Author Index

Search



Modified Doublet Waveforms Satisfying FCC Spectral Masks for Ultra Wideband Communications

Apiradee Pokang¹, Pichaya Supanakoon^{1,2}, Sathaporn Promwong^{1,2} and Nikorn Sukutamtanti¹

¹Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,

²Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand

E-mail: {s9061016, kspichay, kpsathap, ksnikorn}@kmitl.ac.th

Ultra Wideband (UWB) waveform is necessary to satisfy the regulation of Federal Communications Commission (FCC) for preventing interference to other communications. In this paper, modified doublet waveforms are presented to satisfy the FCC signal definition and spectral masks. The modifications of rectangular and Gaussian doublet waveforms are considered. They are optimized for maximum bandwidth, amplitude and average power in the FCC spectral masks for indoor and outdoor limits ranging from 3.1 to 10.6 GHz. The binary pulse amplitude modulation (PAM) with balance binary data independent identically distribution (i.i.d.) random sequence is considered to easily derive the power spectral density (PSD) of each waveform. The optimized results are discussed in the conclusion.

Keywords: doublet waveform, spectral mask, power spectral density (PSD), ultra wideband (UWB).

1. INTRODUCTION

Ultra wideband (UWB) radio technology has become an important topic for microwave communication because of its potential low cost and low power consumption properties [1]. UWB technologies are different from other radio frequency (RF) technologies. Among UWB technologies is advantageous with respect to the simple hardware. Instead of using a narrow band carrier modulation, pulse trains with ultra wide frequency spectrum are transmitted. The Federal Communications Commission (FCC) specified that the main band of UWB signal is in a frequency spectrum ranging from 3.1 to 10.6 GHz. The FCC defined UWB signal as those, which have a fractional bandwidth greater than or equal to 0.20, or occupied bandwidth greater than or equal to 500 MHz [2].

The power spectral density (PSD) of UWB signal is considered to be noise for other communication systems because its PSD is not excess the spectral masks for indoor and outdoor limits. UWB receiver collects the power of the received signal to rebuild the pulse. Therefore, UWB radio technologies can coexist with other RF technologies without interference.

Numerous UWB waveforms have been proposed [3]. Although, the waveform designs are reviewed, UWB signal definition and spectral masks were not considered. There are many techniques for designing UWB waveform such as by using Hermite function [4], [5] and prolate spheroidal wave function [6]. The numerical technique is also used to design the UWB waveform [7], [8]. Although these waveforms have very high spectral efficiency in the designed frequency range, the algorithms of these techniques are complicated. The simple waveforms for UWB

communications are proposed to satisfy the FCC spectral masks [9]. The doublet rectangular and Gaussian waveforms cannot satisfy FCC regulation. Therefore, these waveforms are necessary to modify for satisfying FCC regulation.

In this paper, the modified doublet waveforms are presented to satisfy the FCC signal definition and spectral masks. The modifications of rectangular and Gaussian doublet are considered. They are optimized for maximum bandwidth, amplitude and average power in the FCC spectral masks for indoor and outdoor limits ranging from 3.1 to 10.6 GHz. The binary pulse amplitude modulation (PAM) with balance binary data independent identically distribution (i.i.d.) random sequence is considered to easily derive the power spectral density (PSD) of each waveform [10]. The PSDs and parameters of optimized waveforms are shown. The optimized results are discussed in the conclusion.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2, the modified rectangular and Gaussian doublet waveforms are explained. Next, the optimization results are illustrated in Section 3. Finally, conclusion is discussed in Section 4.

2. MODIFIED DOUBLET WAVEFORMS

The modifications of rectangular and Gaussian doublet waveforms are considered. The waveform is assumed to be voltage signal. For obtaining the continuous component of PSD, the binary PAM with balance binary data i.i.d. random sequence is considered. Then, the PSD of the transmitted waveform $S(f)$ can be simplified to [10]

$$S(f) = \frac{1}{T_S} |F(f)|^2, \quad (3)$$

where T_S is the time interval of one waveform and $F(f)$ is the spectral density of waveform. The spectral density can be calculated by using Fourier transform,

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j2\pi ft} dt, \quad (4)$$

where $f(t)$ is the waveform in time domain.

For considering the radiated power, the transmitter (Tx) antenna is assumed to be isotropic antenna. The internal circuit and Tx antenna impedances are assumed to be same real value R . This is ideal case with maximum radiated power. If this case satisfies the FCC regulation, it guarantees that other cases also satisfy the FCC regulation. In this paper, the path loss and measurement system are not considered. The radiated PSD of this ideal case $S_R(f)$ can be written as

$$S_R(f) = \frac{1}{4R} S(f). \quad (5)$$

The rectangular waveform in time domain and its spectral density are defined as follow

$$f(t) = \begin{cases} A & |t| \leq \frac{t_b}{2} \\ 0 & |t| > \frac{t_b}{2} \end{cases}, \quad (6)$$

$$F(f) = jAt_b \operatorname{sinc}(t_b f), \quad (7)$$

where A is the amplitude and t_b is the pulse width.

The Gaussian waveform in time domain and its spectral density are define as follow

$$f(t) = Ae^{-(t/d)^2}, \quad (8)$$

$$F(f) = Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2 d^2 f^2}, \quad (9)$$

where A is the maximum amplitude, d is the $1/e$ characteristic decay time.

Doublet waveform [3] consists of two pulses, where one is the inverse amplitude of the other and the pulses are separated by a time gap between the maximum amplitude of each pulse.

For the rectangular doublet waveform, the waveform in time domain and its spectral density are defined as follow

$$f(t) = \begin{cases} A & t_b \leq t < 0 \\ -A & 0 \leq t < t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}, \quad (10)$$

$$F(f) = j2At_b \operatorname{sinc}(t_b f) \sin(\pi t_b f). \quad (11)$$

This waveform is consisted two rectangular pulses which one is the inverse amplitude of the other each pulse has t_b width. The area of its waveform is equal to 0 and then this waveform has zero direct current (DC) component.

For the Gaussian doublet waveform, the waveform in time domain and its spectral density are defined as follow

$$f(t) = A\{e^{-[(t+d)/d]^2} - e^{-[(t-d)/d]^2}\}, \quad (12)$$

$$F(f) = j2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2 d^2 f^2} \sin(2\pi fd). \quad (13)$$

This waveform is consisted two Gaussian pulses which one is the inverse amplitude of the other and the pulses are separated by the time gap of d between the maximum of each. This waveform has zero DC component same the rectangular doublet waveform.

Although the rectangular and Gaussian doublet waveforms have zero DC component and can be accomplished the wide bandwidth by adjusting the pulse width, they cannot satisfy the FCC regulation [9]. Therefore, these waveforms are modified by adding more inverse amplitude pulse.

The example modified doublet waveforms called triplet waveforms are shown. The triplet waveform consists of three inverses amplitude pulses. The rectangular triplet waveform in time domain and its spectral density are defined as follow

$$f(t) = \begin{cases} A & -\frac{3}{2}t_b \leq t < -\frac{1}{2}t_b, \frac{1}{2}t_b \leq t < \frac{3}{2}t_b \\ -A & -\frac{1}{2}t_b \leq t < \frac{1}{2}t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}, \quad (14)$$

$$F(f) = 2At_b \operatorname{sinc}(t_b f) \left[\cos(2\pi ft_b) - \frac{1}{2} \right]. \quad (15)$$

The Gaussian triplet waveform in time domain and its spectral density are defined as follow

$$f(t) = A\{e^{-[(t+2d)/d]^2} - e^{-(t/d)^2} + e^{-[(t-2d)/d]^2}\}, \quad (16)$$

$$F(f) = 2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2 d^2 f^2} \left[\cos(4\pi fd) + \frac{1}{2} \right]. \quad (17)$$

The other modified waveforms with more inverses amplitude pulses are derived in the same way. The results of optimized waveforms are described in next section.

3. OPTIMIZATION RESULTS

The modified rectangular and Gaussian doublet waveforms are optimized for UWB communications. The UWB signal definition by FCC is considered [2]. The condition of f_L and f_H are set to $3.1 \text{ GHz} \leq f_L < f_H \leq 10.6 \text{ GHz}$. Each waveform must have fractional bandwidth greater than or equal to 0.20, or occupied bandwidth greater than or equal to 500 MHz. After that, each waveform is satisfied the FCC spectral masks for indoor and outdoor limits. The three assumptions for good UWB signal waveform are considered. First is wide bandwidth for reducing the effect of multipath fading [11]. Next is high amplitude for increasing the efficiency of peak detection receiver. Final is high average power for increasing signal to noise ratio (SNR). Then, each waveform is optimized for maximum bandwidth, amplitude and average power in the frequency ranging from 3.1 to 10.6 GHz. For the optimization, the solution of f is 0.01 GHz, t , t_b and d are 0.01 ns.

Only 6 to 14 inverse amplitude pulses can be optimized to satisfy the FCC signal definition and spectral masks. The results satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits are the same. Fig. 1 shows the bandwidth of each optimized waveform satisfying FCC spectral masks. The bandwidths of modified Gaussian doublet waveforms with 6 to 8 inverse amplitude pulses are wider than that of modified rectangular doublet waveforms with same inverse. For the waveforms with 9 to 14 inverse amplitude pulses, the bandwidths are almost the same. The Gaussian sextuplet waveform with 6 inverse amplitude pulses has widest bandwidth that is 6.37 GHz.

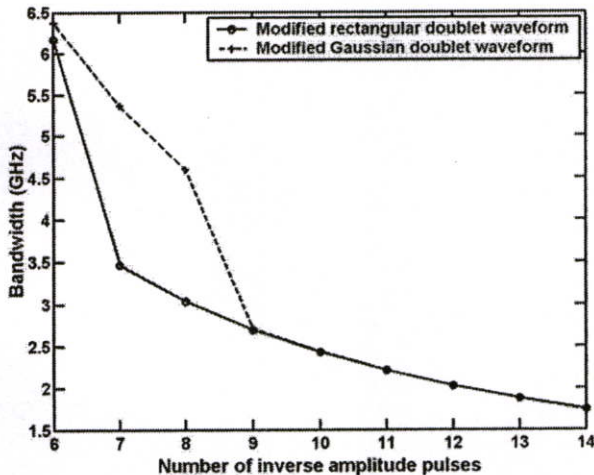


Fig. 1. Bandwidth of each optimized waveform satisfy FCC spectral masks

The maximum amplitude of each optimized waveform satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits is shown in Fig. 2. The maximum amplitude of most modified Gaussian doublet waveforms are more than that of modified rectangular doublet waveforms. The Gaussian septuplet waveform

with 7 inverse amplitude pulses has highest maximum amplitude that is about $0.37\sqrt{RT_S}$ V.

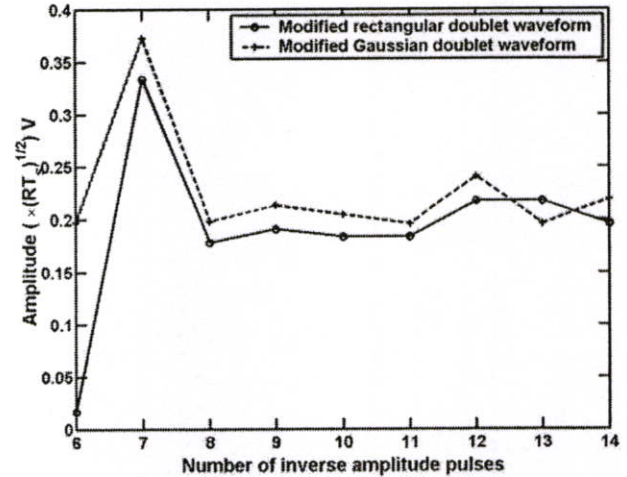


Fig. 2. Maximum amplitude of each optimized waveform satisfy FCC spectral masks

Fig. 3 shows the average power of each optimized waveform satisfying FCC spectral masks. Unlike the maximum amplitude, the average power of all modified Gaussian doublet waveforms are less than that of all modified rectangular doublet waveforms. The rectangular septuplet waveform with 7 inverse amplitude pulses has highest average power that is about -80.38 dBm.

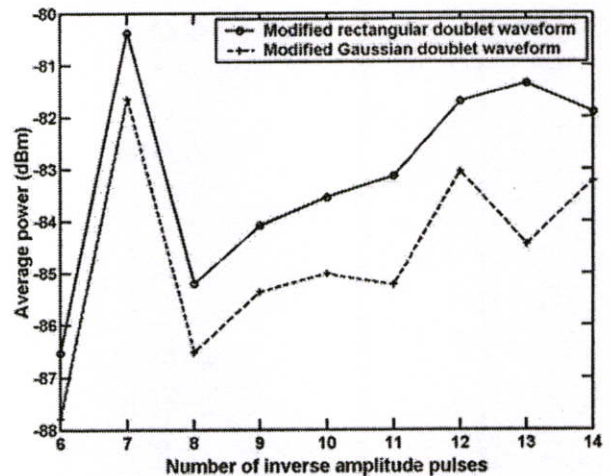


Fig. 3. Average power of each optimized waveform satisfy FCC spectral masks

Next, the parameters of these optimized waveforms are considered. For maximum bandwidth optimization, the optimum waveform is the Gaussian sextuplet waveform with parameters $d = 0.03$ ns and $A = 0.20\sqrt{RT_S}$ V. This waveform has 0.91 fractional bandwidth and 6.37 GHz occupied bandwidth. The average power of this waveform is -87.79 dBm.

For maximum amplitude optimization, the optimum waveform is the Gaussian septuplet waveform with parameters $d = 0.03$ ns and $A = 0.37\sqrt{RT_S}$ V. This

waveform has 0.74 fractional bandwidth and 5.37 GHz occupied bandwidth. The average power of this waveform is -81.65 dBm.

For maximum average power optimization, the optimum waveform is the rectangular septuplet waveform with parameters $d = 0.06$ ns and $A = 0.33\sqrt{RT_S}$ V. This waveform has 0.42 fractional bandwidth and 3.47 GHz occupied bandwidth. The average power of this waveform is -80.38 dBm. These optimum waveforms in time domain and their radiated PSDs compared with FCC spectral masks for indoor and outdoor limits are shown in Figs. 4 and 5, respectively.

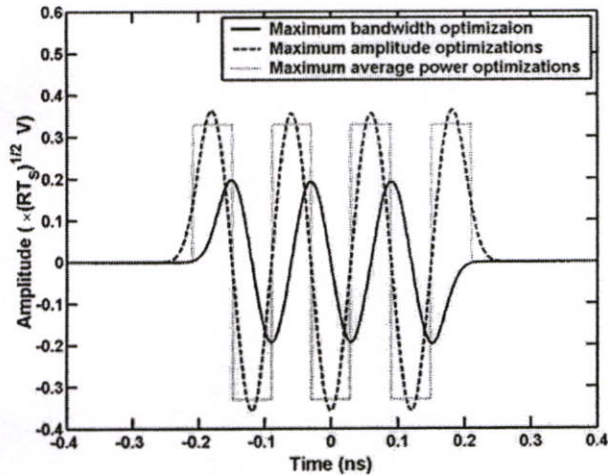


Fig. 4. Optimum waveforms in time domain

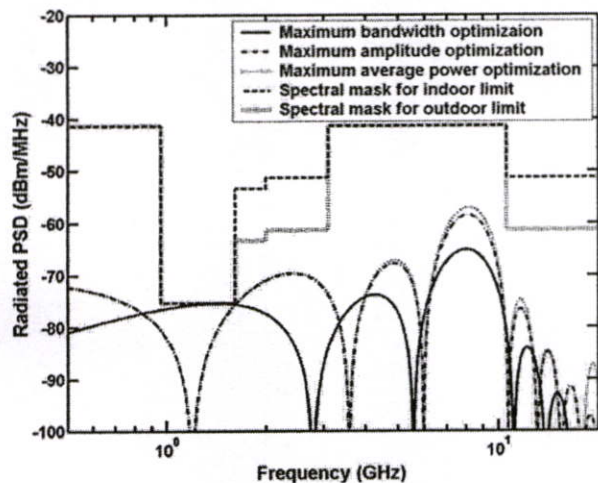


Fig. 5. Radiated PSDs compared with spectral masks

4. CONCLUSION

In this paper, modified doublet waveforms are presented to satisfy the FCC signal definition and spectral masks. The modifications of rectangular and Gaussian doublet waveforms are considered. From the results, we can see that the results satisfying FCC spectral masks for indoor and outdoor limits are the same. The Gaussian sextuplet waveform with 6 inverse amplitude pulses has widest bandwidth, while the Gaussian and rectangular septuplet waveforms have highest maximum amplitude and average power, respectively.

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] Federal Communications Commission, "Revision of part 15 of the commission's rules regarding UWB transmission systems," *First Report*, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [3] B. Allen, S. A. Ghorashi and M. Ghavami, "A review of pulse design for impulse radio," *2004 IEE Seminar on Ultra Wideband Communications Technologies and System Design*, pp. 93-97, Jul. 2004.
- [4] M. Ghavami, L. B. Miscael, R. Khono, "Hermite function based orthogonal pulses for ultra wideband communication," *The Fourth International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pp. 437-440, Sep. 2001.
- [5] L. B. Michael, M. Ghavami and R. Kohno, "Multiple pulse generator for ultra-wideband communication using Hermite polynomial based orthogonal pulses," *2002 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Techniques*, pp. 47-51, May 2002.
- [6] R. Dilmaghani, M. Ghavami, B. Allen and H. Aghvami, "Novel UWB pulse shaping using prolate spheroidal wave functions," *IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, vol. 1, pp. 602-606, Sept. 2003.
- [7] A. B. Parr, B. L. Cho, K. Wallace and Z. Ding, "A new UWB pulse generator for FCC spectral masks," *The 57th IEEE Semianual Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 3, pp. 1664-1666, Apr. 2003.
- [8] —, "A novel ultra wideband pulse design algorithm," *IEEE Communications Letters*, vol. 7, no. 5, pp. 219-221, May 2003.
- [9] 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)*, pp. 626-629, May 2005.
- [10] M. Z. Win, "On the power spectral density of digital pulse streams generated by M-ary cyclostationary sequences in the presence of stationary timing jitter," *IEEE Transaction on Communications*, vol. 46, no. 9, pp. 1135-1145, Sept. 1998.
- [11] M. Welborn and J. McCorkle, "The importance of fractional bandwidth in ultra wideband pulse design," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, vol. 2, pp. 753-757, 2002.

ภาคผนวก ข

สมการรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกแก้ไข

ได้ทำการแก้ไขรูปคลื่นเกาส์โดยทำอนุพันธ์อันดับที่สูงขึ้น ซึ่งจะมีเพียงรูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 4 ถึง 28 เท่านั้นที่สามารถทำให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC สมการรูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 4 ถึง 28 ในโดเมนเวลา และความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมแสดงดังต่อไปนี้

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 4

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(4)}(t) = \left(3 - \frac{12t^2}{d^2} + \frac{4t^4}{d^4} \right) \frac{4Ae^{-(t/d)^2}}{d^4} \quad (\text{ข.1})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(4)}(f) = 16Ad\pi^4 \sqrt{\pi} f^4 e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.2})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 5

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(5)}(t) = \left(-15 + \frac{20t^2}{d^2} - \frac{4t^4}{d^4} \right) \frac{8Ate^{-(t/d)^2}}{d^6} \quad (\text{ข.3})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(5)}(f) = j32Ad\pi^5 \sqrt{\pi} f^5 e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.4})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 6

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(6)}(t) = \left(-15 + \frac{90t^2}{d^2} - \frac{60t^4}{d^4} + \frac{8t^6}{d^6} \right) \frac{8Ae^{-(t/d)^2}}{d^6} \quad (\text{ข.5})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(6)}(f) = -64Ad\pi^6 \sqrt{\pi} f^6 e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.6})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 7

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(7)}(t) = \left(105 - \frac{210t^2}{d^2} + \frac{84t^4}{d^4} - \frac{8t^6}{d^6} \right) \frac{16Ate^{-(t/d)^2}}{d^8} \quad (\text{ข.7})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(7)}(f) = -j128Ad\pi^7 \sqrt{\pi} f^7 e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.8})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 8

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(8)}(t) = \left(105 - \frac{840t^2}{d^2} + \frac{840t^4}{d^4} - \frac{224t^6}{d^6} + \frac{16t^8}{d^8} \right) \frac{16Ae^{-(t/d)^2}}{d^8} \quad (\text{ข.9})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(8)}(f) = 256Ad\pi^8 \sqrt{\pi} f^8 e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.10})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 9

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(9)}(t) = \left(-945 + \frac{2520t^2}{d^2} - \frac{1512t^4}{d^4} + \frac{288t^6}{d^6} - \frac{16t^8}{d^8} \right) \frac{32Ate^{-(t/d)^2}}{d^{10}} \quad (\text{ข.11})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(9)}(f) = j512Ad\pi^9 \sqrt{\pi} f^9 e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.12})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 10

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(10)}(t) = \left(\begin{array}{l} -945 + \frac{9450t^2}{d^2} - \frac{12600t^4}{d^4} \\ + \frac{5040t^6}{d^6} - \frac{720t^8}{d^8} + \frac{32t^{10}}{d^{10}} \end{array} \right) \frac{32Ae^{-(t/d)^2}}{d^{10}} \quad (\text{ข.13})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(10)}(f) = -1024Ad\pi^{10} \sqrt{\pi} f^{10} e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.14})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 11

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(11)}(t) = \left(\begin{array}{l} 10395 - \frac{34650t^2}{d^2} + \frac{27720t^4}{d^4} \\ - \frac{7920t^6}{d^6} + \frac{880t^8}{d^8} - \frac{32t^{10}}{d^{10}} \end{array} \right) \frac{64Ate^{-(t/d)^2}}{d^{12}} \quad (\text{ข.15})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(11)}(f) = -j2048Ad\pi^{11} \sqrt{\pi} f^{11} e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.16})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 12

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(12)}(t) = \left(\begin{array}{c} 10395 - \frac{124740t^2}{d^2} + \frac{207900t^4}{d^4} - \\ \frac{110880t^6}{d^6} + \frac{23760t^8}{d^8} - \frac{2112t^{10}}{d^{10}} + \frac{64t^{12}}{d^{12}} \end{array} \right) \frac{64Ae^{-(t/d)^2}}{d^{12}} \quad (\text{ข.17})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(12)}(f) = 4096Ad\pi^{12}\sqrt{\pi}f^{12}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.18})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 13

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(13)}(t) = \left(\begin{array}{c} -135135 + \frac{540540t^2}{d^2} - \frac{540540t^4}{d^4} \\ + \frac{205920t^6}{d^6} - \frac{34320t^8}{d^8} + \frac{2496t^{10}}{d^{10}} - \frac{64t^{12}}{d^{12}} \end{array} \right) \frac{128Ate^{-(t/d)^2}}{d^{14}} \quad (\text{ข.19})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(13)}(f) = j8192Ad\pi^{13}\sqrt{\pi}f^{13}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.20})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 14

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(14)}(t) = \left(\begin{array}{c} -135135 + \frac{1891890t^2}{d^2} - \frac{3783780t^4}{d^4} + \frac{2522520t^6}{d^6} \\ - \frac{720720t^8}{d^8} + \frac{96096t^{10}}{d^{10}} - \frac{5824t^{12}}{d^{12}} + \frac{128t^{14}}{d^{14}} \end{array} \right) \frac{128Ae^{-(t/d)^2}}{d^{14}} \quad (\text{ข.21})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(14)}(f) = -16384Ad\pi^{14}\sqrt{\pi}f^{14}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.22})$$

รูปคลื่นแก๊สเชิงอนุพันธ์อันดับที่ 15

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(15)}(t) = \left(\begin{array}{l} 2027025 - \frac{9459450t^2}{d^2} + \frac{11351340t^4}{d^4} \\ - \frac{5405400t^6}{d^6} + \frac{1201200t^8}{d^8} \\ - \frac{131040t^{10}}{d^{10}} + \frac{6720t^{12}}{d^{12}} - \frac{128t^{14}}{d^{14}} \end{array} \right) \frac{256Ate^{-(t/d)^2}}{d^{16}} \quad (\text{ข.23})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(15)}(f) = -j32768Ad\pi^{15}\sqrt{\pi}f^{15}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.24})$$

รูปคลื่นแก๊สเชิงอนุพันธ์อันดับที่ 16

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(16)}(t) = \left(\begin{array}{l} 2027025 - \frac{32432400t^2}{d^2} + \frac{74575600t^4}{d^4} \\ - \frac{60540480t^6}{d^6} + \frac{21621600t^8}{d^8} - \frac{3843840t^{10}}{d^{10}} \\ + \frac{349440t^{12}}{d^{12}} - \frac{15360t^{14}}{d^{14}} + \frac{256t^{16}}{d^{16}} \end{array} \right) \frac{256Ae^{-(t/d)^2}}{d^{16}} \quad (\text{ข.25})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(16)}(f) = 65536Ad\pi^{16}\sqrt{\pi}f^{16}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.26})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 17

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(17)}(t) = \left(\begin{array}{l} -34459425 + \frac{183783600t^2}{d^2} - \frac{257297040t^4}{d^4} \\ + \frac{147026880t^6}{d^6} - \frac{40840800t^8}{d^8} + \frac{5940480t^{10}}{d^{10}} \\ - \frac{456960t^{12}}{d^{12}} + \frac{17408t^{14}}{d^{14}} - \frac{256t^{16}}{d^{16}} \end{array} \right) \frac{512Ate^{-(t/d)^2}}{d^{18}} \quad (\text{ข.27})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(17)}(f) = j131072Ad\pi^{17} \sqrt{\pi} f^{17} e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.28})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 18

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(18)}(t) = \left(\begin{array}{l} -34459425 + \frac{620269650t^2}{d^2} - \frac{1654052400t^4}{d^4} \\ + \frac{1543782240t^6}{d^6} - \frac{661620960t^8}{d^8} \\ + \frac{147026880t^{10}}{d^{10}} - \frac{17821440t^{12}}{d^{12}} \\ + \frac{1175040t^{14}}{d^{14}} - \frac{39168t^{16}}{d^{16}} + \frac{512t^{18}}{d^{18}} \end{array} \right) \frac{512Ae^{-(t/d)^2}}{d^{18}} \quad (\text{ข.29})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(18)}(f) = -262144Ad\pi^{18} \sqrt{\pi} f^{18} e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.30})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 19

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(19)}(t) = \left(\begin{array}{l} 654729075 - \frac{3928374450t^2}{d^2} + \frac{6285399120t^4}{d^4} \\ - \frac{4190266080t^6}{d^6} + \frac{1396755360t^8}{d^8} \\ - \frac{253955520t^{10}}{d^{10}} + \frac{26046720t^{12}}{d^{12}} \\ - \frac{1488384t^{14}}{d^{14}} + \frac{43776t^{16}}{d^{16}} - \frac{512t^{18}}{d^{18}} \end{array} \right) \frac{1024Ate^{-(t/d)^2}}{d^{20}} \quad (\text{ข.31})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(19)}(f) = -j524228Ad\pi^{19}\sqrt{\pi}f^{19}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.32})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 20

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(20)}(t) = \left(\begin{array}{l} 654729075 - \frac{13094581500t^2}{d^2} \\ + \frac{39283744500t^4}{d^4} - \frac{41902660800t^6}{d^6} \\ + \frac{20951330400t^8}{d^8} - \frac{5587021440t^{10}}{d^{10}} \\ + \frac{846518400t^{12}}{d^{12}} - \frac{74419200t^{14}}{d^{14}} \\ + \frac{3720960t^{16}}{d^{16}} - \frac{97280t^{18}}{d^{18}} + \frac{1024t^{20}}{d^{20}} \end{array} \right) \frac{1024Ae^{-(t/d)^2}}{d^{20}} \quad (\text{ข.33})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(20)}(f) = 1048456Ad\pi^{20}\sqrt{\pi}f^{20}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.34})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 21

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(21)}(t) = \left(\begin{array}{l} -13749310575 + \frac{91662070500t^2}{d^2} \\ -\frac{164991726900t^4}{d^4} + \frac{125707982400t^6}{d^6} \\ -\frac{48886437600t^8}{d^8} + \frac{10666131840t^{10}}{d^{10}} \\ -\frac{1367452800t^{12}}{d^{12}} + \frac{104186880t^{14}}{d^{14}} \\ -\frac{4596480t^{16}}{d^{16}} + \frac{107520t^{18}}{d^{18}} - \frac{1024t^{20}}{d^{20}} \end{array} \right) \frac{2048Ate^{-(t/d)^2}}{d^{22}} \quad (\text{ข.35})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(21)}(f) = j2096912Ad\pi^{21}\sqrt{\pi}f^{21}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.36})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 22

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(22)}(t) = \left(\begin{array}{l} -13749310575 + \frac{302484832650t^2}{d^2} \\ -\frac{1008282775500t^4}{d^4} + \frac{1209939330600t^6}{d^6} \\ -\frac{691393903200t^8}{d^8} + \frac{215100325440t^{10}}{d^{10}} \\ -\frac{39109150080t^{12}}{d^{12}} + \frac{4297708800t^{14}}{d^{14}} \\ -\frac{286513920t^{16}}{d^{16}} + \frac{11235840t^{18}}{d^{18}} \\ -\frac{236544t^{20}}{d^{20}} + \frac{2048t^{22}}{d^{22}} \end{array} \right) \frac{2048Ae^{-(t/d)^2}}{d^{22}} \quad (\text{ข.37})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(22)}(f) = -4193824Ad\pi^{22}\sqrt{\pi}f^{22}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.38})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 23

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(23)}(t) = \left(\begin{array}{l} 316234143225 - \frac{2319050383650t^2}{d^2} \\ + \frac{4638100767300t^4}{d^4} - \frac{3975514943400t^6}{d^6} \\ + \frac{1766895530400t^8}{d^8} - \frac{449755225290t^{10}}{d^{10}} \\ + \frac{69193111680t^{12}}{d^{12}} - \frac{6589820160t^{14}}{d^{14}} \\ + \frac{387636480t^{16}}{d^{16}} - \frac{13601280t^{18}}{d^{18}} \\ + \frac{259072t^{20}}{d^{20}} - \frac{2048t^{22}}{d^{22}} \end{array} \right) \frac{4096Ate^{-(t/d)^2}}{d^{24}} \quad (\text{ข.39})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(23)}(f) = -j8387648Ad\pi^{23}\sqrt{\pi}f^{23}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.40})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 24

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(24)}(t) = \left(\begin{array}{l} 316234143225 - \frac{7589619437400t^2}{d^2} \\ + \frac{27828604603800t^4}{d^4} - \frac{37104806138400t^6}{d^6} \\ + \frac{23853089660400t^8}{d^8} - \frac{8481098545920t^{10}}{d^{10}} \\ + \frac{1799020903680t^{12}}{d^{12}} - \frac{237233525760t^{14}}{d^{14}} \\ + \frac{19769460480t^{16}}{d^{16}} - \frac{1033697280t^{18}}{d^{18}} \\ + \frac{32643072t^{20}}{d^{20}} - \frac{565248t^{22}}{d^{22}} + \frac{4096t^{24}}{d^{24}} \end{array} \right) \frac{4096Ae^{-(t/d)^2}}{d^{24}} \quad (\text{ข.41})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(24)}(f) = 16775296Ad\pi^{24} \sqrt{\pi} f^{24} e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.42})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 25

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(25)}(t) = \left(\begin{array}{l} -7905853580625 + \frac{63246828645000t^2}{d^2} \\ \frac{139143023019000t^4}{d^4} + \frac{132517164780000t^6}{d^6} \\ \frac{66258582390000t^8}{d^8} + \frac{19275223968000t^{10}}{d^{10}} \\ \frac{3459655584000t^{12}}{d^{12}} + \frac{395389209600t^{14}}{d^{14}} \\ \frac{29072736000t^{16}}{d^{16}} + \frac{1360128000t^{18}}{d^{18}} \\ \frac{38860800t^{20}}{d^{20}} + \frac{614400t^{22}}{d^{22}} - \frac{4096t^{24}}{d^{24}} \end{array} \right) \frac{8192Ate^{-(t/d)^2}}{d^{24}} \quad (\text{ข.43})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(25)}(f) = j33550592Ad\pi^{25} \sqrt{\pi} f^{25} e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.44})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 26

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(26)}(t) = \left(\begin{array}{l} -7905853580625 + \frac{2055521093096250t^2}{d^2} \\ -\frac{822208772385000t^4}{d^4} + \frac{1205906199498000t^6}{d^6} \\ -\frac{861361571070000t^8}{d^8} + \frac{344544628428000t^{10}}{d^{10}} \\ -\frac{83525970528000t^{12}}{d^{12}} + \frac{12850149312000t^{14}}{d^{14}} \\ -\frac{1285014931200t^{16}}{d^{16}} + \frac{83987904000t^{18}}{d^{18}} \\ -\frac{3536332800t^{20}}{d^{20}} + \frac{91852800t^{22}}{d^{22}} \\ -\frac{1331200t^{24}}{d^{24}} + \frac{8192t^{26}}{d^{26}} \end{array} \right) \frac{8192Ae^{-(t/d)^2}}{d^{26}} \quad (\text{ข.45})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(26)}(f) = -67101184Ad\pi^{26} \sqrt{\pi} f^{26} e^{-\pi^2 d^2 f^2} \quad (\text{ข.46})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 27

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(27)}(t) = \left(\begin{array}{l} 213458046676785 - \frac{1849969737866250t^2}{d^2} \\ + \frac{4439928380879000t^4}{d^4} - \frac{4651352483778000t^6}{d^6} \\ + \frac{2584084713210000t^8}{d^8} - \frac{845700451596000t^{10}}{d^{10}} \\ + \frac{173477015712000t^{12}}{d^{12}} - \frac{23130268761600t^{14}}{d^{14}} \\ + \frac{2040906067200t^{16}}{d^{16}} - \frac{119351232000t^{18}}{d^{18}} \\ + \frac{4546713600t^{20}}{d^{20}} - \frac{107827200t^{22}}{d^{22}} + \frac{1437696t^{24}}{d^{24}} \\ - \frac{8192t^{26}}{d^{26}} \end{array} \right) \frac{16384Ate^{-(t/d)^2}}{d^{28}} \quad (\text{ข.47})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(27)}(f) = -j134202368Ad\pi^{27}\sqrt{\pi}f^{27}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.48})$$

รูปคลื่นเกาส์เชิงอนุพันธ์อันดับที่ 28

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f^{(28)}(t) = \left(\begin{array}{l} 213458046676785 - \frac{5976825306952500t^2}{d^2} \\ + \frac{25899576330127500t^4}{d^4} - \frac{41439322128204000t^6}{d^6} \\ + \frac{32559467386446000t^8}{d^8} - \frac{14470874393976000t^{10}}{d^{10}} \\ + \frac{13946602107448000t^{12}}{d^{12}} - \frac{693908062848000t^{14}}{d^{14}} \\ + \frac{80955940665600t^{16}}{d^{16}} - \frac{6349485542400t^{18}}{d^{18}} \\ + \frac{334183449600t^{20}}{d^{20}} - \frac{11573452800t^{22}}{d^{22}} \\ + \frac{251596800t^{24}}{d^{24}} - \frac{3096576t^{26}}{d^{26}} + \frac{16384t^{28}}{d^{28}} \end{array} \right) \frac{16384Ae^{-(t/d)^2}}{d^{28}} \quad (\text{ข.49})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F^{(28)}(f) = 268404736Ad\pi^{28}\sqrt{\pi}f^{28}e^{-\pi^2d^2f^2} \quad (\text{ข.50})$$

ภาคผนวก ค

สมการรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตที่ถูกแก้ไข

ได้ทำการแก้ไขรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลต โดยการเพิ่มพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันเข้าไป ซึ่งจะมีเพียงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตที่ถูกแก้ไข โดยการเพิ่มพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงกันข้ามเข้าไป ตั้งแต่ 6 ถึง 14 พัลส์เท่านั้นที่สามารถทำให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC สมการรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดับเลตที่มีการเพิ่มพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันเข้าไปตั้งแต่ 6 ถึง 14 พัลส์ ในโดเมนเวลา และความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมแสดงดังต่อไปนี้

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมเซกซุเพิลต (Sextuplet)

สมการรูปคลื่นใน โดเมนเวลาคือ

$$f_6(t) = \begin{cases} A & -3t_b \leq t < -2t_b, -t_b \leq t < 0, t_b \leq t < 2t_b \\ -A & -2t_b \leq t < -t_b, 0 \leq t < t_b, 2t_b \leq t < 3t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (\text{ค.1})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_6(f) = j2At_b \text{sinc}(t_b f) [\sin(5\pi f t_b) - \sin(3\pi f t_b) + \sin(\pi f t_b)] \quad (\text{ค.2})$$

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมเซพทุเพิลต (Septuplet)

สมการรูปคลื่นใน โดเมนเวลาคือ

$$f_7(t) = \begin{cases} A & -\frac{7}{2}t_b \leq t < -\frac{5}{2}t_b, -\frac{3}{2}t_b \leq t < -\frac{1}{2}t_b, \\ & \frac{1}{2}t_b \leq t < \frac{3}{2}t_b, \frac{5}{2}t_b \leq t < \frac{7}{2}t_b \\ -A & -\frac{5}{2}t_b \leq t < -\frac{3}{2}t_b, -\frac{1}{2}t_b \leq t < \frac{1}{2}t_b, \frac{3}{2}t_b \leq t < \frac{5}{2}t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (\text{ค.3})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_7(f) = 2At_b \operatorname{sinc}(t_b f) \left[\cos(6\pi ft_b) - \cos(4\pi ft_b) + \cos(2\pi ft_b) - \frac{1}{2} \right] \quad (\text{ก.4})$$

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมออกทิวเพด (Octuplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_8(t) = \begin{cases} A & -4t_b \leq t < -3t_b, -2t_b \leq t < -t_b, 0 \leq t < t_b, 2t_b \leq t < 3t_b \\ -A & -3t_b \leq t < -2t_b, -t_b \leq t < 0, t_b \leq t < 2t_b, 3t_b \leq t < 4t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (\text{ก.5})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_8(f) = j2At_b \operatorname{sinc}(t_b f) [\sin(7\pi ft_b) - \sin(5\pi ft_b) + \sin(3\pi ft_b) - \sin(\pi ft_b)] \quad (\text{ก.6})$$

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมนอนนูนเพด (Nonuplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_9(t) = \begin{cases} A & -\frac{9}{2}t_b \leq t < -\frac{7}{2}t_b, -\frac{5}{2}t_b \leq t < -\frac{3}{2}t_b, -\frac{1}{2}t_b \leq t < \frac{1}{2}t_b, \\ & \frac{3}{2}t_b \leq t < \frac{5}{2}t_b, \frac{7}{2}t_b \leq t < \frac{9}{2}t_b \\ -A & -\frac{7}{2}t_b \leq t < -\frac{5}{2}t_b, -\frac{3}{2}t_b \leq t < -\frac{1}{2}t_b, \\ & \frac{1}{2}t_b \leq t < \frac{3}{2}t_b, \frac{5}{2}t_b \leq t < \frac{7}{2}t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (\text{ก.7})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_9(f) = 2At_b \operatorname{sinc}(t_b f) \left[\begin{aligned} & \cos(8\pi ft_b) - \cos(6\pi ft_b) \\ & + \cos(4\pi ft_b) - \cos(2\pi ft_b) + \frac{1}{2} \end{aligned} \right] \quad (\text{ก.8})$$

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมดีคาเพด (Decaplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_{10}(t) = \begin{cases} A & -5t_b \leq t < -4t_b, -3t_b \leq t < -2t_b, -t_b \leq t < 0, \\ & t_b \leq t < 2t_b, 3t_b \leq t < 4t_b \\ -A & -4t_b \leq t < -3t_b, -2t_b \leq t < -t_b, 0 \leq t < t_b, \\ & 2t_b \leq t < 3t_b, 4t_b \leq t < 5t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (\text{ค.9})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_{10}(f) = j2At_b \operatorname{sinc}(t_b f) \begin{bmatrix} \sin(9\pi ft_b) - \sin(7\pi ft_b) + \sin(5\pi ft_b) \\ -\sin(3\pi ft_b) + \sin(\pi ft_b) \end{bmatrix} \quad (\text{ค.10})$$

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมอันดับคาเพลต (Undecaplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_{11}(t) = \begin{cases} A & -\frac{11}{2}t_b \leq t < -\frac{9}{2}t_b, -\frac{7}{2}t_b \leq t < -\frac{5}{2}t_b, -\frac{3}{2}t_b \leq t < -\frac{1}{2}t_b, \\ & \frac{1}{2}t_b \leq t < \frac{3}{2}t_b, \frac{5}{2}t_b \leq t < \frac{7}{2}t_b, \frac{9}{2}t_b \leq t < \frac{11}{2}t_b \\ -A & -\frac{9}{2}t_b \leq t < -\frac{7}{2}t_b, -\frac{5}{2}t_b \leq t < -\frac{3}{2}t_b, -\frac{1}{2}t_b \leq t < \frac{1}{2}t_b, \\ & \frac{3}{2}t_b \leq t < \frac{5}{2}t_b, \frac{7}{2}t_b \leq t < \frac{9}{2}t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (\text{ค.11})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_{11}(f) = 2At_b \operatorname{sinc}(t_b f) \begin{bmatrix} \cos(10\pi ft_b) - \cos(8\pi ft_b) + \cos(6\pi ft_b) \\ -\cos(4\pi ft_b) + \cos(2\pi ft_b) - \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{ค.12})$$

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมดิวดีคาเพลต (Duodecaplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_{12}(t) = \begin{cases} A & -6t_b \leq t < -5t_b, -4t_b \leq t < -3t_b, -2t_b \leq t < -t_b, \\ & 0 \leq t < t_b, 2t_b \leq t < 3t_b, 4t_b \leq t < 5t_b \\ -A & -5t_b \leq t < -4t_b, -3t_b \leq t < -2t_b, -t_b \leq t < 0, \\ & t_b \leq t < 2t_b, 3t_b \leq t < 4t_b, 5t_b \leq t < 6t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (\text{ค.13})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_{12}(f) = j2At_b \text{sinc}(t_b f) \left[\begin{array}{l} \sin(11\pi f t_b) - \sin(9\pi f t_b) + \sin(7\pi f t_b) \\ -\sin(5\pi f t_b) + \sin(3\pi f t_b) - \sin(\pi f t_b) \end{array} \right] \quad (\text{ค.14})$$

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมทรีเดคาเพลต (Tredcaplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_{13}(t) = \begin{cases} A & -\frac{13}{2}t_b \leq t < -\frac{11}{2}t_b, -\frac{9}{2}t_b \leq t < -\frac{7}{2}t_b, -\frac{5}{2}t_b \leq t < -\frac{3}{2}t_b, \\ & -\frac{1}{2}t_b \leq t < \frac{1}{2}t_b, \frac{3}{2}t_b \leq t < \frac{5}{2}t_b, \\ & \frac{7}{2}t_b \leq t < \frac{9}{2}t_b, \frac{11}{2}t_b \leq t < \frac{13}{2}t_b \\ -A & -\frac{11}{2}t_b \leq t < -\frac{9}{2}t_b, -\frac{7}{2}t_b \leq t < -\frac{5}{2}t_b, \\ & -\frac{3}{2}t_b \leq t < -\frac{1}{2}t_b, \frac{1}{2}t_b \leq t < \frac{3}{2}t_b, \\ & \frac{5}{2}t_b \leq t < \frac{7}{2}t_b, \frac{9}{2}t_b \leq t < \frac{11}{2}t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (\text{ค.15})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_{13}(f) = 2At_b \text{sinc}(t_b f) \left[\begin{array}{l} \cos(12\pi f t_b) - \cos(10\pi f t_b) + \cos(8\pi f t_b) \\ -\cos(6\pi f t_b) + \cos(4\pi f t_b) - \cos(2\pi f t_b) + \frac{1}{2} \end{array} \right] \quad (\text{ค.16})$$

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมควอโตรเดคาเพลต (Quattrodecaplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_{14}(t) = \begin{cases} A & -7t_b \leq t < -6t_b, -5t_b \leq t < -4t_b, -3t_b \leq t < -2t_b, \\ & -t_b \leq t < 0, t_b \leq t < 2t_b, 3t_b \leq t < 4t_b, 5t_b \leq t < 6t_b \\ -A & -6t_b \leq t < -5t_b, -4t_b \leq t < -3t_b, -2t_b \leq t < -t_b, \\ & 0 \leq t < t_b, 2t_b \leq t < 3t_b, 4t_b \leq t < 5t_b, 6t_b \leq t < 7t_b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (\text{ก.17})$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_{14}(f) = j2At_b \operatorname{sinc}(t_b f) \begin{bmatrix} \sin(13\pi f t_b) - \sin(11\pi f t_b) + \sin(9\pi f t_b) \\ -\sin(7\pi f t_b) + \sin(5\pi f t_b) \\ -\sin(3\pi f t_b) + \sin(\pi f t_b) \end{bmatrix} \quad (\text{ก.18})$$

ภาคผนวก ง

สมการรูปคลื่นเกาส์ระดับเลขที่ถูกรบกวน

ได้ทำการแก้ไขรูปคลื่นเกาส์ระดับเลขที่ถูกรบกวนโดยการเพิ่มพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันเข้าไป ซึ่งจะมีเพียงรูปคลื่นเกาส์ระดับเลขที่ถูกรบกวนโดยการเพิ่มพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงกันข้ามเข้าไปตั้งแต่ 6 ถึง 14 พัลส์เท่านั้นที่สามารถทำให้เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB และสเปกตรัมมาร์คสำหรับการสื่อสาร UWB ภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC สมการรูปคลื่นเกาส์ระดับเลขที่มีการเพิ่มพัลส์ที่มีแอมพลิจูดตรงข้ามกันเข้าไปตั้งแต่ 6 ถึง 14 พัลส์ ในโดเมนเวลา และความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมแสดงดังต่อไปนี้

รูปคลื่นเกาส์เซกซุเพิลต (Sextuplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_6(t) = A \begin{pmatrix} e^{-[(t+5d)/d]^2} - e^{-[(t+3d)/d]^2} + e^{-[(t+d)/d]^2} \\ -e^{-[(t-d)/d]^2} + e^{-[(t-3d)/d]^2} - e^{-[(t-5d)/d]^2} \end{pmatrix} \quad (ง.1)$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_6(f) = j2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2d^2f^2} [\sin(10\pi fd) - \sin(6\pi fd) + \sin(2\pi fd)] \quad (ง.2)$$

รูปคลื่นเกาส์เซพทุเพิลต (Septuplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_7(t) = A \begin{pmatrix} e^{-[(t+6d)/d]^2} - e^{-[(t+4d)/d]^2} + e^{-[(t+2d)/d]^2} - e^{-[(t/d)]^2} \\ + e^{-[(t-2d)/d]^2} - e^{-[(t-4d)/d]^2} + e^{-[(t-6d)/d]^2} \end{pmatrix} \quad (ง.3)$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_7(f) = 2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2d^2f^2} \left[\cos(12\pi fd) - \cos(8\pi fd) + \cos(4\pi fd) - \frac{1}{2} \right] \quad (ง.4)$$

รูปคลื่นเก้าข้อออกทูเพลต (Octuplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_8(t) = A \left(\begin{array}{l} e^{-[(t+7d)/d]^2} - e^{-[(t+5d)/d]^2} + e^{-[(t+3d)/d]^2} - e^{-[(t+d)/d]^2} + \\ e^{-[(t-d)/d]^2} - e^{-[(t-3d)/d]^2} + e^{-[(t-5d)/d]^2} - e^{-[(t-7d)/d]^2} \end{array} \right) \quad (3.5)$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_8(f) = j2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2d^2f^2} [\sin(14\pi fd) - \sin(10\pi fd) + \sin(6\pi fd) - \sin(2\pi fd)] \quad (3.6)$$

รูปคลื่นเก้าข้อนอนูเพลต (Nonuplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_9(t) = A \left(\begin{array}{l} e^{-[(t+8d)/d]^2} - e^{-[(t+6d)/d]^2} + e^{-[(t+4d)/d]^2} - e^{-[(t+2d)/d]^2} + e^{-[(t/d)^2} - \\ e^{-[(t-2d)/d]^2} + e^{-[(t-4d)/d]^2} - e^{-[(t-6d)/d]^2} + e^{-[(t-8d)/d]^2} \end{array} \right) \quad (3.7)$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_9(f) = 2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2d^2f^2} \left[\begin{array}{l} \cos(16\pi fd) - \cos(12\pi fd) + \cos(8\pi fd) \\ - \cos(4\pi fd) + \frac{1}{2} \end{array} \right] \quad (3.8)$$

รูปคลื่นเก้าข้อดีคาเพลต (Decaplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_{10}(t) = A \left(\begin{array}{l} e^{-[(t+9d)/d]^2} - e^{-[(t+7d)/d]^2} + e^{-[(t+5d)/d]^2} - e^{-[(t+3d)/d]^2} + e^{-[(t+d)/d]^2} - \\ e^{-[(t-d)/d]^2} + e^{-[(t-3d)/d]^2} - e^{-[(t-5d)/d]^2} + e^{-[(t-7d)/d]^2} - e^{-[(t-9d)/d]^2} \end{array} \right) \quad (3.9)$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_{10}(f) = j2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2d^2f^2} \left[\begin{array}{l} \sin(18\pi fd) - \sin(14\pi fd) + \sin(10\pi fd) - \\ \sin(6\pi fd) + \sin(2\pi fd) \end{array} \right] \quad (3.10)$$

รูปคลื่นเก้าส่วนอันติคาเพลต (Undecaplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_{11}(t) = A \begin{pmatrix} e^{-[(t+10d)/d]^2} - e^{-[(t+8d)/d]^2} + e^{-[(t+6d)/d]^2} - e^{-[(t+4d)/d]^2} \\ + e^{-[(t+2d)/d]^2} - e^{-[t/d]^2} + e^{-[(t-2d)/d]^2} - e^{-[(t-4d)/d]^2} \\ + e^{-[(t-6d)/d]^2} - e^{-[(t-8d)/d]^2} + e^{-[(t-10)/d]^2} \end{pmatrix} \quad (9.11)$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_{11}(f) = 2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2d^2f^2} \begin{bmatrix} \cos(20\pi fd) - \cos(16\pi fd) + \cos(12\pi fd) - \\ \cos(8\pi fd) + \cos(4\pi fd) - \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (9.12)$$

รูปคลื่นเก้าส่วนดูดีคาเพลต (Duodecaplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_{12}(t) = A \begin{pmatrix} e^{-[(t+11d)/d]^2} - e^{-[(t+9d)/d]^2} + e^{-[(t+7d)/d]^2} - e^{-[(t+5d)/d]^2} \\ + e^{-[(t+3d)/d]^2} - e^{-[(t+d)/d]^2} + e^{-[(t-d)/d]^2} - e^{-[(t-3d)/d]^2} \\ + e^{-[(t-5d)/d]^2} - e^{-[(t-7d)/d]^2} + e^{-[(t-9d)/d]^2} - e^{-[(t-11d)/d]^2} \end{pmatrix} \quad (9.13)$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_{12}(f) = j2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2d^2f^2} \begin{bmatrix} \sin(22\pi fd) - \sin(18\pi fd) + \sin(14\pi fd) - \\ \sin(10\pi fd) + \sin(6\pi fd) - \sin(2\pi fd) \end{bmatrix} \quad (9.14)$$

รูปคลื่นเก้าส่วนทรีดีคาเพลต (Tredcaplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_{13}(t) = A \begin{pmatrix} e^{-[(t+12d)/d]^2} - e^{-[(t+10d)/d]^2} + e^{-[(t+8d)/d]^2} - e^{-[(t+6d)/d]^2} + e^{-[(t+4d)/d]^2} \\ - e^{-[(t+2d)/d]^2} + e^{-[t/d]^2} - e^{-[(t-2d)/d]^2} + e^{-[(t-4d)/d]^2} \\ - e^{-[(t-6d)/d]^2} + e^{-[(t-8d)/d]^2} - e^{-[(t-10d)/d]^2} + e^{-[(t-12d)/d]^2} \end{pmatrix} \quad (9.15)$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_{13}(f) = 2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2 d^2 f^2} \left[\begin{array}{l} \cos(24\pi fd) - \cos(20\pi fd) + \cos(16\pi fd) \\ -\cos(12\pi fd) + \cos(8\pi fd) - \cos(4\pi fd) + \frac{1}{2} \end{array} \right] \quad (3.16)$$

รูปคลื่นแกตส์ควอโทรดีคาเพลต (Quattrodecaplet)

สมการรูปคลื่นในโดเมนเวลาคือ

$$f_{14}(t) = A \left(\begin{array}{l} e^{-[(t+13d)/d]^2} - e^{-[(t+11d)/d]^2} + e^{-[(t+9d)/d]^2} - e^{-[(t+7d)/d]^2} \\ + e^{-[(t+5d)/d]^2} - e^{-[(t+3d)/d]^2} + e^{-[(t+d)/d]^2} - e^{-[(t-d)/d]^2} \\ + e^{-[(t-3d)/d]^2} - e^{-[(t-5d)/d]^2} + e^{-[(t-7d)/d]^2} \\ - e^{-[(t-9d)/d]^2} + e^{-[(t-11d)/d]^2} - e^{-[(t-13d)/d]^2} \end{array} \right) \quad (3.17)$$

สมการความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของรูปคลื่นคือ

$$F_{14}(f) = j2Ad\sqrt{\pi}e^{-\pi^2 d^2 f^2} \left[\begin{array}{l} \sin(26\pi fd) - \sin(22\pi fd) + \sin(18\pi fd) - \sin(14\pi fd) \\ + \sin(10\pi fd) - \sin(6\pi fd) + \sin(2\pi fd) \end{array} \right] \quad (3.18)$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวอภิรดี โพธิ์แข็ง
วัน เดือน ปีเกิด	7 ธันวาคม 2523
ที่อยู่	28/1 หมู่ 10 ต.ท่ากระเสริม อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น 40140
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2548	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง