

การประเมินค่าความเพี้ยนของรูปคลื่นที่เกิดจากสายอากาศแถบกว้างยิ่ง

EVALUATION OF WAVEFORM DISTORTION WITH
ULTRA WIDEBAND ANTENNAS

อรรถพล กีโพโรจน์

AUTTAPHOL KIPHAIROJ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประเมินค่าความเพี้ยนของรูปคลื่นที่เกิดจากสายอากาศแถบกว้างยิ่ง

EVALUATION OF WAVEFORM DISTORTION WITH
ULTRA WIDEBAND ANTENNAS



อรรถพล กีไพโรจน์

AUTTAPHOL KIPHAIROJ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 74606
วัน,เดือน,ปี..... - 8 ต.ค. 2550

b. 118 28168
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**EVALUATION OF WAVEFORM DISTORTION WITH
ULTRA WIDEBAND ANTENNAS**

AUTTAPHOL KIPHAIROJ

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

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประเมินค่าความเพี้ยนของรูปคลื่นที่เกิดจากสายอากาศแถบกว้างยิ่ง
Evaluation of Waveform Distortion with Ultra Wideband Antennas

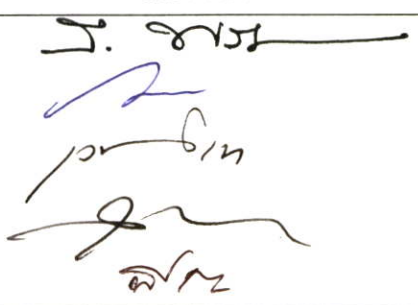
นักศึกษา นายอรรถพล กีไพโรจน์

รหัสประจำตัว 48061018

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.พิชญ สุพรรณกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
อาจารย์สถาพร	พรหมวงศ์	
ผศ.มนต์ชัย	แจ่มช้อย	
รศ.เวช	วิเวก	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาถิพงษ์	
ผศ.พิชญ	สุพรรณกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 21 กุมภาพันธ์ 2550 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... 2เดือน..... พฤษภาคม ๒๕๕๐..... พ.ศ. ๒๕๕๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินค่าความถี่ของรูปคลื่นที่เกิดจากสายอากาศแถบกว้างยิ่ง
นักศึกษา	นายอรรถพล กิไพโรจน์
รหัสนักศึกษา	48061018
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.พิชญ สุพรรณกุล

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์หาค่าความถี่ของรูปคลื่นที่เกิดจากสายอากาศแถบกว้างยิ่ง (UWB) ได้พิจารณาสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง และสายอากาศแบบไบโคเนคคอล ซึ่งรูปคลื่น UWB ที่ใช้ส่งได้พิจารณาเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต โดยที่รูปคลื่นแต่ละชนิดเป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB ของคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC) และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของสายอากาศ UWB แต่ละชนิดหาได้โดยใช้แบบแผนการวัด ได้แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นในมุมที่กำหนดของสายอากาศแต่ละชนิดที่เป็นทั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ จากผลที่ได้ทำให้สามารถทราบผลกระทบความถี่ของรูปคลื่นที่เกิดจากสายอากาศ UWB

Thesis Title	Evaluation of Waveform Distortion with Ultra Wideband Antennas
Student	Mr. Auttaphol Kiphairoj
Student ID	48061018
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst. Prof. Pichaya Supanakoon

ABSTRACT

In this thesis, the distortion of ultra wideband (UWB) pulse waveforms with trapezoidal, meander line and biconical antennas are analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which satisfied the Federal Communications Commission (FCC) definition of UWB signal and FCC spectral masks for the indoor and outdoor limits, are considered. The frequency transfer function of each UWB antenna is evaluated by using measurement scheme. The correlation coefficient of each waveform at the specific angles of antennas, which are used both transmitter and receiver antenna, is illustrated. From the results, we can see the distortion effects of the waveforms caused by UWB antennas.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและคำปรึกษา คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า จากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.พิชญ์ สุพรรณกุล ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สถาพร พรหมวงษ์ ผศ.มนต์ชัย แซ่มะซ้อย และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

สุดท้ายต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งของข้าพเจ้า

อรรถพล กีไพโรจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ระบบการสื่อสาร UWB.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ลักษณะเฉพาะของระบบการสื่อสาร UWB.....	5
2.3 จุดเด่นของระบบการสื่อสาร UWB.....	6
2.4 กฎข้อบังคับของระบบการสื่อสาร UWB.....	7
2.4.1 กฎข้อบังคับของระบบ UWB ในสหรัฐอเมริกา.....	7
2.4.2 กฎข้อบังคับของระบบ UWB ในยุโรป.....	8
2.5 นิยามของสัญญาณ UWB.....	9
2.6 บทสรุป.....	9
บทที่ 3 ทฤษฎีการหาค่าความเพี้ยน.....	10
3.1 บทนำ.....	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 รูปคลื่น UWB.....	10
3.2.1 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม.....	10
3.2.2 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลต.....	10
3.2.3 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลต.....	11
3.3 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศ UWB.....	11
3.3.1 สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	11
3.3.2 สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง.....	12
3.3.3 สายอากาศแบบไบโคเนคคอล.....	13
3.4 แบบแผนการวัด.....	14
3.5 การหาค่าความเพี้ยน.....	15
3.6 บทสรุป.....	17
บทที่ 4 ผลการหาค่าความเพี้ยน.....	18
4.1 บทนำ.....	18
4.2 สายอากาศทางด้านส่ง.....	18
4.2.1 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบ สี่เหลี่ยมคางหมู.....	18
4.2.2 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลาง.....	22
4.2.3 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบ ไบโคเนคคอล.....	26
4.3 สายอากาศทางด้านรับ.....	30
4.3.1 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบ สี่เหลี่ยมคางหมู.....	30
4.3.2 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลาง.....	34
4.3.3 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบ ไบโคเนคคอล.....	38
4.4 บทสรุป.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 สายอากาศทางด้านส่ง.....	43
5.1.1 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	43
5.1.2 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง.....	44
5.1.3 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบไบ โคนิคคอล.....	44
5.2 สายอากาศทางด้านรับ.....	45
5.2.1 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	45
5.2.2 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง.....	46
5.2.3 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบไบ โคนิคคอล.....	46
เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก ก. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์.....	50
ประวัติผู้เขียน.....	61

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	
ข้อจำกัดในการแพร่กระจาย PSD ที่กำหนดโดย FCC สำหรับการใช้งานในการ สื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....	8
2.2	
ข้อจำกัดในการแพร่กระจาย PSD ที่กำหนดโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการ สื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร.....	8
5.1	
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบ สี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านส่งสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร.....	43
5.2	
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านส่งสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร.....	44
5.3	
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบ ไบโคเนคคอลลทางด้านส่งสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร.....	45
5.4	
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบ สี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านรับสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร.....	45
5.5	
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านรับสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร.....	46
5.6	
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบ ไบโคเนคคอลลทางด้านรับสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร.....	47

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของสัญญาณพัลส์ในโดเมนเวลา (b) PSD ของสัญญาณในโดเมนความถี่.....	6
2.2 PSD ของการสื่อสาร UWB เทียบกับ PSD ของการสื่อสารแถบแคบ.....	6
2.3 สเปกตรัมมาร์คของการสื่อสาร UWB ที่กำหนดโดย FCC.....	9
3.1 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	12
3.2 แบบรูปการแผ่กระจายเฉลี่ยของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูที่วัดในแนวตั้ง ในช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6 GHz.....	12
3.3 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง.....	13
3.4 แบบรูปการแผ่กระจายเฉลี่ยของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางที่วัดในแนวนอน ในช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6 GHz.....	13
3.5 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบไบโคนิคอลล.....	14
3.6 แบบรูปการแผ่กระจายเฉลี่ยของสายอากาศแบบไบโคนิคอลลที่วัดในแนวตั้ง ในช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6 GHz.....	14
3.7 บล็อกไดอะแกรมของการหาค่าความเพี้ยน.....	16
4.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่ใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม คางหมูทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารและภายนอก อาคารที่กำหนดโดย FCC.....	19
4.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม คางหมูทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	19
4.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม คางหมูทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	20
4.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม คางหมูทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	21
4.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลต โดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม คางหมูทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....	21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมโดยใช้สายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารและ ภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....23
4.7	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....23
4.8	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....24
4.9	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....25
4.10	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....26
4.11	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมโดยใช้สายอากาศแบบ ไบโคไนคอลลทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารและ ภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....27
4.12	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ ไบโคไนคอลลทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....27
4.13	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ ไบโคไนคอลลทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....28
4.14	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ ไบโคไนคอลลทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ ไปโคนิคอลลทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....30
4.16	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมโดยใช้สายอากาศแบบ สี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคาร และภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....31
4.17	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ สี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....32
4.18	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ สี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....32
4.19	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ สี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....33
4.20	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ สี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....34
4.21	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมโดยใช้สายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคาร และภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....35
4.22	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....36
4.23	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....37
4.25	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ เส้นตัวนำกลางทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....38
4.26	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมโดยใช้สายอากาศแบบ ไบโคเนคคอลลทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารและ ภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC.....39
4.27	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ ไบโคเนคคอลลทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....40
4.28	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ ไบโคเนคคอลลทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....40
4.29	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ ไบโคเนคคอลลทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....41
4.30	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบ ไบโคเนคคอลลทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่ กำหนดโดย FCC.....42

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standards Institute)	ETSI
คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission)	FCC
ระบบบอกพิกัดโลก (Global Positioning System)	GPS
สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union)	ITU
ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectral Density)	PSD
ความถี่วิทยุ (Radio Frequency)	RF
แถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband)	UWB
กลุ่มการทำงานแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband Working Group)	UWBWG
เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer)	VNA
อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio)	VSWR
เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network)	WPAN
กิกกะเฮิรตซ์ (Gigahertz)	GHz
เฮิรตซ์ (Hertz)	Hz
เมกกะเฮิรตซ์ (Megahertz)	MHz
โวลต์ (Volt)	V
เดซิเบลเทียบกับกำลัง 1 มิลลิวัตต์ (Decibel Relative to Power of 1 Milliwatt)	dBm
เมตร (Meter)	m
มิลลิเมตร (Millimeter)	mm
นาโนวินาที (Nanosecond)	ns
วินาที (Second)	s
แอมพลิจูดสูงสุด (Maximum Amplitude), V	A
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)	C_t, C_r
ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของสายอากาศ (Antenna Transfer Function)	H_a
ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของอวกาศว่าง (Free Space Transfer Function)	H_f
ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของสายอากาศรับ (Receiver Antenna Transfer Function)	H_r
ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของสายอากาศส่ง (Transmitter Antenna Transfer Function)	H_t
ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นที่อินพุตของสายอากาศส่ง (Spectral Density of Waveform at Input of Transmitter Antenna), V/Hz	V_i

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศส่ง (Spectral Density of Radiated Waveform form Transmitter Antenna), V/Hz	V_t
ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นที่มาถึงสายอากาศรับ (Spectral Density of Incident Waveform at Receiver Antenna), V/Hz	V_r
ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นที่เอาต์พุทของสายอากาศรับ (Spectral Density of Waveform at Output of Receiver Antenna), V/Hz	V_o
ความเร็วแสง (Velocity of Light), m/s	c
ระยะทาง (Distance), m	d
ความถี่ (Frequency), Hz	f
แบนด์วิดท์ (Bandwidth), Hz	f_b
ความถี่กลาง (Center Frequency), Hz	f_c
ความถี่สูงสุด (Maximum Frequency), Hz	f_H
ความถี่ต่ำสุด (Minimum Frequency), Hz	f_L
เวลา (Time), s	t
ความกว้างพัลส์ (Pulse Width), s	t_b
คุณลักษณะ $1/e$ ของเวลาที่ลดลง ($1/e$ Characteristic Decay Time), s	t_d
รูปคลื่นที่อินพุทของสายอากาศส่ง (Waveform at Input of Transmitter Antenna), V	v_i
รูปคลื่นที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศส่ง (Radiated Waveform form Transmitter Antenna), V	v_t
รูปคลื่นที่มาถึงสายอากาศรับ (Incident Waveform at Receiver Antenna), V	v_r
รูปคลื่นที่เอาต์พุทของสายอากาศรับ (Waveform at Output of Receiver Antenna), V	v_o

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีวิทยุแถบกว้างยิ่ง (UWB) ได้กลายเป็นหัวข้อสำคัญสำหรับการสื่อสารไมโครเวฟ เนื่องจากมีราคาถูก มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง และใช้กำลังส่งที่ต่ำ [1]-[5] เทคโนโลยี UWB เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่แตกต่างจากเทคโนโลยีของความถี่วิทยุ (RF) อื่นตรงแทนที่จะใช้ความถี่คลื่นพาห์ สัญญาณของระบบ UWB จะเป็นสัญญาณพัลส์ในช่วงเวลาแคบๆ แต่ UWB จะส่งพัลส์ที่มีความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (PSD) อยู่ในช่วงสเปกตรัมความถี่ที่กว้างมากแทน เนื่องจากการสื่อสารในระบบ UWB ไม่ต้องมีการมอดูเลตสัญญาณพาห์เข้ากับสัญญาณข้อมูลก่อนทำการส่ง ดังนั้น ในภาคส่งของ UWB จึงไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ประเภทการมอดูเลตความถี่ และเครื่องส่งที่มีกำลังมาก จึงเป็นการลดต้นทุนของระบบการสื่อสารลงได้

คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC) [6] ได้กำหนดให้ UWB มีสเปกตรัมความถี่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และ FCC ยังได้นิยามสัญญาณ UWB ให้มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz PSD ของสัญญาณ UWB จะถูกพิจารณาเป็นสัญญาณรบกวนสำหรับระบบการสื่อสารอื่น เนื่องจากมี PSD ต่ำกว่าข้อกำหนดสัญญาณรบกวนส่วนที่ 15 เครื่องรับ UWB จะรวบรวมกำลังของสัญญาณที่รับได้เพื่อสร้างเป็นพัลส์ขึ้นมา ดังนั้น เทคโนโลยี UWB จึงสามารถนำมาใช้ร่วมกับเทคโนโลยี RF อื่น โดยที่ไม่มีการแทรกสอดกันหรือมีการแทรกสอดที่น้อยมาก เทคโนโลยีวิทยุ UWB เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นระบบการสื่อสารภายในอาคารเชิงพาณิชย์ที่มีระยะทางใช้งานที่ใกล้ กำลังต่ำ ราคาถูก เช่น เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPAN) [7]

สายอากาศได้ถูกนำมารวมเข้าไปในระบบ UWB ซึ่งจะไม่เหมือนกับระบบแถบแคบ ระบบ UWB ได้ส่งพัลส์ที่แคบมากในหน่วย ns หรือน้อยกว่า เป็นผลทำให้แบนด์วิดท์อยู่ในหน่วย GHz หรือมากกว่า จากมุมมองของการออกแบบระบบ ผลตอบสนองอิมพัลส์ของสายอากาศคือสิ่งที่สนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงหรือทำให้มีความเพี้ยนของพัลส์ที่ใช้ส่งหรือพัลส์ที่รับได้เกิดความเพี้ยนขึ้นอย่างมาก ถ้าต้องการออกแบบเครื่องรับแมตซ์ฟิลเตอร์ในระบบ UWB จะต้องทราบรูปร่างของพัลส์ที่ปลายสายอากาศรับอย่างชัดเจน ดังนั้น การหาค่าความเพี้ยนของรูปคลื่นที่เกิดจากสายอากาศ UWB จึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อวิเคราะห์หาความถี่ของรูปคลื่นพัลส์ UWB จากสายอากาศ 3 ชนิด คือ สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู [8]-[11] สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง [12]-[14] และสายอากาศแบบไบโคเนคคอลล สัญญาณส่งได้ใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต โดยที่รูปคลื่นแต่ละชนิดเป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB ของ FCC และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร [15] ได้หาฟังก์ชันถ่ายโอนความถี่ของสายอากาศ UWB โดยใช้แบบแผนการวัดที่ได้นำเสนอไว้ใน [16]-[19] ได้แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นในมุมที่กำหนดของสายอากาศแต่ละชนิด จากผลที่ได้ทำให้สามารถทราบผลกระทบความถี่ของรูปคลื่นแต่ละชนิดที่เกิดจากสายอากาศแบบ UWB ตามมุมที่กำหนด

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานของการศึกษาคือได้นำเอารูปคลื่นที่เป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB ของ FCC และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร โดยได้พิจารณารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต เป็นรูปคลื่นที่ใช้ส่งในโดเมนเวลา และความหนาแน่นสเปกตรัมในโดเมนความถี่ [15] โดยที่ได้แยกพิจารณารูปคลื่นออกเป็นสามกรณี คือจะใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุด ซึ่งได้นำพารามิเตอร์เหล่านี้มาพิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง และสายอากาศแบบไบโคเนคคอลล จากมุมต่างๆ ภายในอาคารและภายนอกอาคาร

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ได้พิจารณารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตเป็นรูปคลื่นอินพุต UWB ในโดเมนเวลา และความหนาแน่นสเปกตรัมในโดเมนความถี่ รูปคลื่นเหล่านี้สามารถทำให้เป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB ของ FCC และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร ซึ่งจะใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุด [15] และได้ใช้ทฤษฎีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อแสดงถึงค่าความถี่ของรูปคลื่นที่เกิดจากสายอากาศ

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

สายอากาศเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญสำหรับเทคโนโลยีวิทยุ UWB แต่สายอากาศทั่วไปได้ถูกออกแบบที่เพียงความถี่เดียวสำหรับการใช้ในระบบแถบแคบทั่วไป ดังนั้น ถ้ามีอิมพัลส์ถูกกระตุ้นที่สายอากาศเหล่านี้ พัลส์จะเกิดความเพี้ยนอย่างมากและมีการแพร่กระจายไปตามเวลา ต่อมาได้มีการพัฒนาสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง และสายอากาศแบบไบโคเนคคัล ขึ้นมาสำหรับเป็นสายอากาศ UWB แม้ว่าสายอากาศนี้จะมีอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ต่ำในย่านความถี่ตั้งแต่ 3.1-10.6 GHz แต่ก็ไม่จำเป็นที่จะเหมาะสมสำหรับการสื่อสาร UWB สายอากาศอาจจะสามารถทำให้เกิดความเพี้ยนของพัลส์ UWB อย่างมากได้ ได้มีการวิเคราะห์ผลกระทบความเพี้ยนของรูปคลื่น UWB ที่เกิดจากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู [11] โดยใช้รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตศึกษาหาความเพี้ยนที่เกิดขึ้น แต่รูปคลื่นที่ใช้ยังไม่ได้ทำให้เป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB ของ FCC และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อจำกัดภายในและภายนอกอาคาร ยังไม่ได้รับการพิจารณารูปคลื่น UWB ชนิดอื่น รวมทั้งยังไม่ได้มีการพิจารณาหาค่าความเพี้ยนของสายอากาศ UWB ชนิดอื่นมาเปรียบเทียบ

1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์หาความเพี้ยนของรูปคลื่นพัลส์ UWB จากสายอากาศ 3 ชนิด คือ สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู [8]-[11] สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง [12]-[14] และสายอากาศแบบไบโคเนคคัล สัญญาณส่งได้ใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต โดยที่รูปคลื่นแต่ละชนิดเป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB ของ FCC และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร [15] โดยแยกพิจารณาออกเป็นสามกรณี คือจะใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุด ได้หาฟังก์ชันถ่ายโอนความถี่ของสายอากาศ UWB โดยใช้แบบแผนการวัดที่ได้นำเสนอไว้ใน [16]-[19] ได้แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นในมุมที่กำหนดของสายอากาศแต่ละชนิด โดยได้พิจารณาทั้งกรณีที่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับ จากผลที่ได้ทำให้สามารถเห็นผลกระทบความเพี้ยนของรูปคลื่นแต่ละชนิดที่เกิดจากสายอากาศ UWB ตามมุมที่กำหนด

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ความเพี้ยนของรูปคลื่นพัลส์ UWB จากสายอากาศ โดยอันดับแรกได้ศึกษาเกี่ยวกับความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา ตลอดจนสมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ใน

การวิจัย การเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน และได้กำหนดขอบเขตของการวิจัย หลังจากนั้นได้ศึกษาเกี่ยวกับนิยามและข้อกำหนดของสัญญาณ UWB ที่กำหนดโดย FCC ศึกษาถึงสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC ได้ศึกษาและแสดงการจำลองรูปคลื่น UWB ได้แก่รูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลต และรูปคลื่นแบบเกาส์ที่ถูกลมอดูเลต ทำการศึกษาเงื่อนไขรวมถึงวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของรูปคลื่นให้เป็นที่ไปตามสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดสำหรับการสื่อสาร UWB ที่ทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างสุด แอมพลิจูดสูงสุด และกำลังเฉลี่ยมากที่สุด พิจารณาโครงสร้างและขนาดของสายอากาศ UWB แบบแผนการวัดหาค่าความเพี้ยนจากสายอากาศ 3 ชนิด คือ สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง และสายอากาศแบบไบโคเนคคอลล หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นที่แผ่กระจายและรับได้จากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง และสายอากาศแบบไบโคเนคคอลลจากมุมต่างๆ สำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร โดยพิจารณาให้เป็นทั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ และได้สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะไว้ในบทสุดท้าย

บทที่ 2

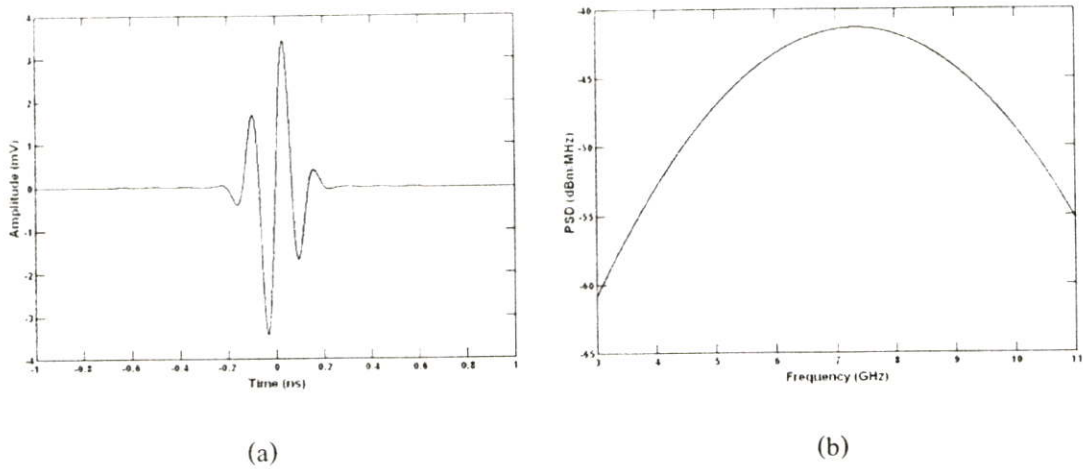
ระบบการสื่อสาร UWB

2.1 บทนำ

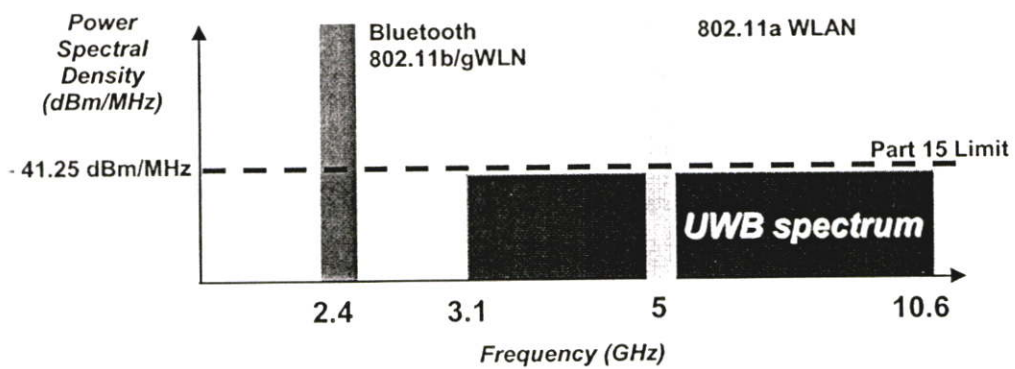
ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีความเร็วสูงทำให้ระบบการสื่อสาร UWB ได้รับความสนใจสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารประเภทต่างๆ มากขึ้น โดยการสื่อสาร UWB เป็นวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารไร้สาย โดยมีการใช้แถบความถี่ในการส่งที่กว้างมาก ประกอบกับใช้กำลังส่งที่น้อย ซึ่งสัญญาณของระบบ UWB นั้นมีความแตกต่างกับระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน 2 ประการ คือ การส่งสัญญาณ UWB นั้นจะทำการส่งสัญญาณในลักษณะที่เป็นอิมพัลส์ โดยไม่มีการนำเอาสัญญาณข้อมูลไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาห้ อีกประการหนึ่งสัญญาณ UWB จะมีสัดส่วนของแบนด์วิดท์ในการส่งมากกว่าหรือเท่ากับ 0.20 ของแถบความถี่กลาง หรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz ซึ่งจะพบว่ามีความกว้างกว่าแถบความถี่ของระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาก โดยที่ทาง FCC ได้กำหนดแถบความถี่ที่ใช้ในระบบการสื่อสาร UWB ไว้ที่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.5 GHz จากการที่ระบบการสื่อสาร UWB ใช้แถบความถี่ที่กว้างมาก โดยที่แถบความถี่ที่ใช้นั้นได้มีการทับซ้อนกับระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งทาง FCC กำหนดระดับของ PSD ของสัญญาณในระบบ UWB ไว้ไม่เกิน -41.3 dBm/MHz

2.2 ลักษณะเฉพาะของระบบการสื่อสาร UWB

ระบบ UWB เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่แตกต่างจากการสื่อสารทางคลื่น RF แบบอื่นๆ จุดเด่นของระบบ UWB คือเป็นระบบสื่อสารที่ไม่ต้องใช้คลื่นพาห้เหมือนในระบบอื่น สัญญาณของระบบ UWB จะเป็นสัญญาณพัลส์ โดยจะเป็นพัลส์แคบๆ ขนาดประมาณ 0.4 ns จึงทำให้มีความหนาแน่นสเปกตรัมที่กว้างมาก ดังนั้น จึงแผ่กระจายครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้างในระดับ GHz ลักษณะของสัญญาณพัลส์ในโดเมนเวลา และ PSD ของสัญญาณในโดเมนความถี่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 สัญญาณ UWB จะพิจารณาเป็นสัญญาณรบกวนสำหรับระบบการสื่อสารอื่น เนื่องจากมี PSD ต่ำกว่าข้อจำกัดสัญญาณรบกวนส่วนที่ 15 เครื่องรับ UWB จะรวบรวมกำลังของสัญญาณที่รับได้เพื่อสร้างเป็นพัลส์ขึ้นมา ดังนั้น เทคโนโลยี UWB จึงสามารถนำมาใช้ร่วมกับเทคโนโลยี RF อื่น โดยที่ไม่มีการแทรกสอดกันหรือมีการแทรกสอดที่น้อยมาก สเปกตรัมของการสื่อสาร UWB เทียบกับสเปกตรัมของระบบแถบแคบอื่น แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 เทคโนโลยี UWB เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นระบบการสื่อสารภายในอาคารเชิงพาณิชย์ที่มีระยะทางใช้งานที่ใกล้ กำลังต่ำ ราคาถูก เช่น WPAN [7]



รูปที่ 2.1 (a) ลักษณะของสัญญาณพัลส์ใน โดเมนเวลา (b) PSD ของสัญญาณใน โดเมนความถี่



รูปที่ 2.2 PSD ของการสื่อสาร UWB เทียบกับ PSD ของการสื่อสารแถบแคบ

2.3 จุดเด่นของระบบการสื่อสาร UWB

ระบบ UWB เป็นระบบที่มีจุดเด่นที่น่าสนใจสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสาร อาทิเช่น

- เป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อยและมีต้นทุนต่ำ

ความซับซ้อนน้อย และต้นทุนที่ต่ำของระบบ UWB เกิดขึ้นจากปัจจัยทางลักษณะเบสแบนด์ของการส่งสัญญาณ ซึ่งไม่เหมือนกับระบบการส่งสัญญาณ RF แบบอื่นๆ โดยที่เครื่องส่งจะทำการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากๆ ในโดเมนทางเวลา ซึ่งสามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นออกไปโดยปราศจากการมอดูเลตด้วย RF หรือคลื่นพาห้รวมเข้าไป แต่อาจจะมีการใช้คลื่นพาห้ในการสร้างรูปคลื่นเพื่อให้ได้ PSD ของรูปคลื่นเป็นไปตามข้อกำหนดของ FCC

- มีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน

สัญญาณแบบ UWB นี้มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณรบกวน ซึ่งทำให้การตรวจจับหาสัญญาณทำได้ยาก และยังปรากฏในเอกสารทางการวิจัยว่าการส่งสัญญาณแบบ UWB นั้นไม่ก่อให้เกิดผลการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบคลื่น RF อื่นๆ เนื่องจากสัญญาณของระบบ UWB นั้นมีการแพร่กระจายกำลังงานในระดับต่ำประมาณระดับของสัญญาณรบกวน จึงทำให้ระบบอื่นมองว่าสัญญาณ UWB นี้คือ สัญญาณรบกวนเลขถูกกำจัดออกจากการพิจารณาของระบบ

- มีความต้านทานต่อคลื่นหลายวิถี และการรบกวนของสัญญาณความถี่ใกล้เคียง

เนื่องด้วยมีแบนด์วิดท์ของสัญญาณส่งที่กว้างจึงทำให้ได้รับผลกระทบจากคลื่นหลายวิถีอย่างมาก เมื่อระบบมีแบนด์วิดท์ที่กว้างนั้นทำให้เกิดความแตกต่างทางความถี่อย่างมากซึ่งรวมเข้ากับการส่งสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องจึงทำให้สัญญาณ UWB ที่มีการมอดูเลตทางเวลานั้นมีความต้านทานต่อการแพร่กระจายของคลื่นหลายวิถีที่รุนแรง และการรบกวนหรือแทรกสอดจากสัญญาณความถี่ใกล้เคียงได้

- มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลาสำหรับการกำหนดตำแหน่งและการประยุกต์ใช้ใน ระบบติดตาม

พัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากๆ นั้นหมายถึง ระบบ UWB มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมตำแหน่ง และคำนวณเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่าระบบบอกพิกัดโลก (GPS) และระบบ RF แบบอื่นๆ

2.4 กฎข้อบังคับของระบบการสื่อสาร UWB

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ได้กำหนดขึ้นในการสื่อสาร UWB คือ การจัดสรรความถี่ในการใช้งาน ได้มีการก่อตั้งกลุ่มการทำงานขึ้นมาอย่างเป็นทางการ โดยใช้ชื่อว่า กลุ่มการทำงานแถบกว้างยิ่ง (UWBWG) เพื่อทำการเจรจาข้อตกลงร่วมกับ FCC เช่นเดียวกันกับในยุโรปก็ได้มีการหาข้อตกลงการจัดสรรคลื่นความถี่และการแทรกสอดของความถี่วิทยุ ซึ่งสถาบันที่จัดสรรคลื่นความถี่สำหรับการใช้งานในระบบ UWB ในยุโรป คือ สถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (ETSI) และสหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU)

2.4.1 กฎข้อบังคับของระบบ UWB ในสหรัฐอเมริกา

FCC ได้อนุญาตให้ใช้เทคโนโลยีสื่อสาร UWB โดยแบ่งอุปกรณ์เทคโนโลยี UWB ตามชนิดการประยุกต์ใช้งาน และกำหนดข้อบังคับอย่างเข้มงวด เพื่อเป็นการยืนยันว่าเทคโนโลยี UWB จะไม่ไปแทรกสอดกับระบบการสื่อสารวิทยุอื่นๆ และให้ได้รับประโยชน์จากการใช้เทคโนโลยีอย่างเต็มที่

สำหรับกฎข้อบังคับของ FCC ได้กำหนดข้อกำหนดการแผ่กระจาย PSD ของระบบ UWB สำหรับใช้ในการสื่อสารภายในอาคารและภายนอกอาคารดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดในการแผ่กระจาย PSD ที่กำหนดโดย FCC สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร

ความถี่ [MHz]	ภายในอาคาร	ภายนอกอาคาร
	PSD (dBm/MHz)	PSD (dBm/MHz)
960 – 1610	-75.3	-75.3
1610 – 1990	-53.3	-63.3
1990 – 3100	-51.3	-61.3
3100 – 10600	-41.3	-41.3
สูงกว่า 10600	-51.3	-61.3

2.4.2 กฎข้อบังคับของระบบ UWB ในยุโรป

ปัจจุบันโครงสร้างของข้อกำหนดระบบ UWB ในทวีปยุโรปอยู่ในช่วงรอข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของระบบ UWB บนระบบเดิมที่มีใช้กันอยู่ โดยทางยุโรปนั้นบางส่วนของข้อกำหนดจะรัดกุมกว่าของทางสหรัฐอเมริกา เพราะทางด้านยุโรปนั้นในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ต้องแสดงให้เห็นว่าส่งผลกระทบน้อยหรือไม่ส่งผลเสียหายต่อระบบเดิมที่มีอยู่ ข้อกำหนดการแผ่กระจาย PSD สำหรับการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย ITU หรือ ETSI แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดในการแผ่กระจาย PSD ที่กำหนดโดย ETSI สำหรับการใช้งานในการสื่อสารทั้งภายในและภายนอกอาคาร

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

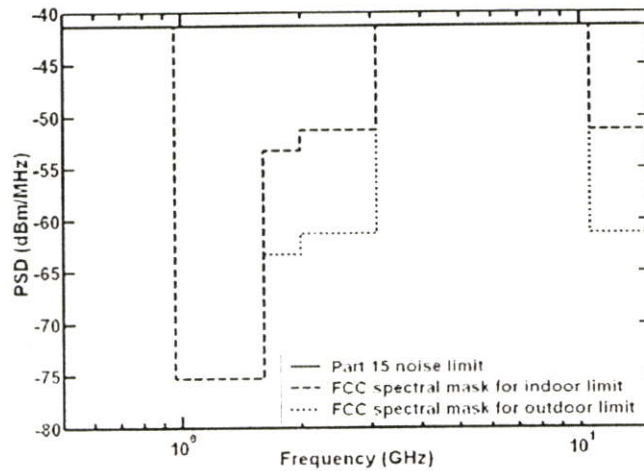
2.5 นิยามของสัญญาณ UWB

สำหรับการสื่อสาร UWB นิยามของสัญญาณ UWB ที่กำหนดโดย FCC คือ จะต้องมีความ PSD หลักอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และจะต้องมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz โดยที่แบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนและแบนด์วิดท์ของสัญญาณ UWB นิยามดังนี้

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

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

เมื่อ f_L และ f_H คือความถี่ต่ำสุดและความถี่สูงสุดที่ PSD มีระดับลดลงจากระดับสูงสุด -10 dB ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมมาร์คของการสื่อสาร UWB ที่กำหนดโดย FCC

2.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาของเทคโนโลยี UWB รวมทั้งข้อกำหนดในการใช้งาน กฎข้อบังคับต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นช่วงความถี่การใช้งานซึ่งสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ของระบบ ระดับการแผ่กระจายของ PSD ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งได้กำหนดโดยองค์กรหลักที่มีหน้าที่เกี่ยวข้อง คือ FCC และ ETSI หรือ ITU นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงลักษณะเฉพาะและความสามารถในการใช้งานของเทคโนโลยี UWB อีกด้วย

บทที่ 3

ทฤษฎีการหาค่าความเพี้ยน

3.1 บทนำ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณารูปคลื่นที่เป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB ของ FCC และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร ได้พิจารณารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต เป็นรูปคลื่นอินพุตในโดเมนเวลา และความหนาแน่นสเปกตรัมในโดเมนความถี่ รูปคลื่นเหล่านี้สามารถทำให้เป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB ของ FCC และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร ซึ่งจะใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงสุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด

3.2 รูปคลื่น UWB [15]

3.2.1 รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

รูปคลื่นในโดเมนเวลาและฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นแบบแถบผ่านสี่เหลี่ยมกำหนดโดย

$$f(t) = \frac{A}{f_b} [f_H \text{sinc}(2f_H t) - f_L \text{sinc}(2f_L t)] \quad (3.1)$$

$$F(f) = \begin{cases} \frac{A}{2f_b} & \|f - f_c\| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & \|f - f_c\| > \frac{f_b}{2} \end{cases} \quad (3.2)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดสูงสุด (V) f_b คือแบนด์วิดท์ (Hz) f_c คือความถี่กลาง (Hz) $f_L = f_c - f_b/2$ คือความถี่ต่ำสุด (Hz) และ $f_H = f_c + f_b/2$ คือความถี่สูงสุด (Hz)

3.2.2 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต

รูปคลื่นในโดเมนเวลาและฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตกำหนดโดย

$$f(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_c t) & |t| \leq \frac{t_b}{2} \\ 0 & |t| > \frac{t_b}{2} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$F(f) = \frac{At_b}{j2} \{\text{sinc}[t_b(f - f_c)] - \text{sinc}[t_b(f + f_c)]\} \quad (3.4)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (V) f_c คือความถี่พาห้ (Hz) และ t_b คือความกว้างพัลส์ (s)

3.2.3 รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต

รูปคลื่นใน โดเมนเวลาและฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นแบบเกาส์ที่ถูกมอดูเลตกำหนดโดย

$$f(t) = Ae^{-(t/t_d)^2} \sin(2\pi f_c t) \quad (3.5)$$

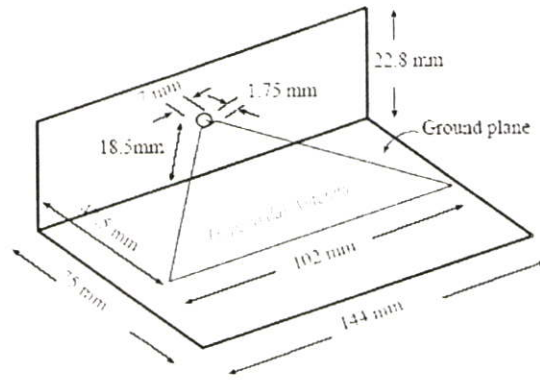
$$F(f) = \frac{At_d \sqrt{\pi}}{j2} \left[e^{-\pi^2 t_d^2 (f - f_c)^2} - e^{-\pi^2 t_d^2 (f + f_c)^2} \right] \quad (3.6)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดสูงสุดของรูปคลื่นเกาส์ (V) f_c คือความถี่พาห้ (Hz) และ $\pm t_d$ คือเวลาที่รูปคลื่นเกาส์มีแอมพลิจูดลดลงเป็น $1/e$ เท่าของแอมพลิจูดสูงสุด (s)

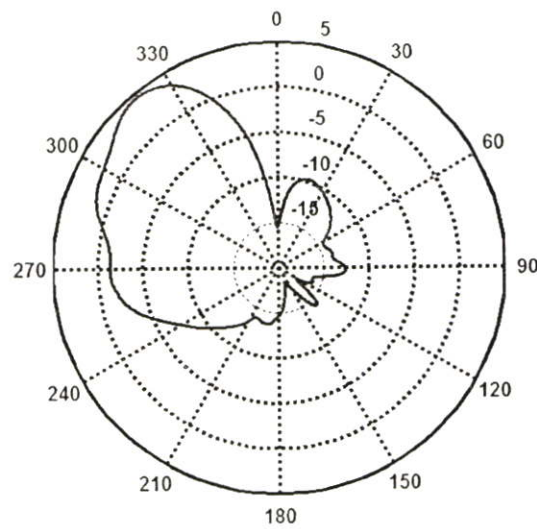
3.3 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศ UWB

3.3.1 สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

ได้นำสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูมาพิจารณาความถี่ของรูปคลื่น UWB โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 [8]-[11] แบบรูปการแผ่กระจายเฉลี่ยที่วัดในแนวตั้งในช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6 GHz แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



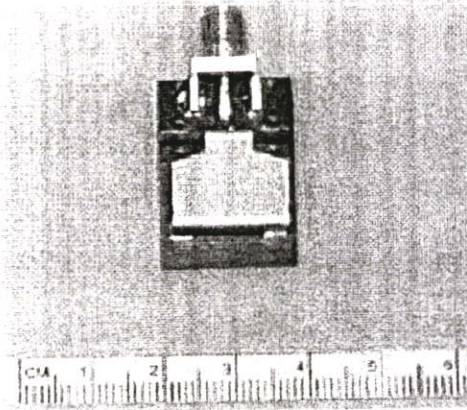
รูปที่ 3.1 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู



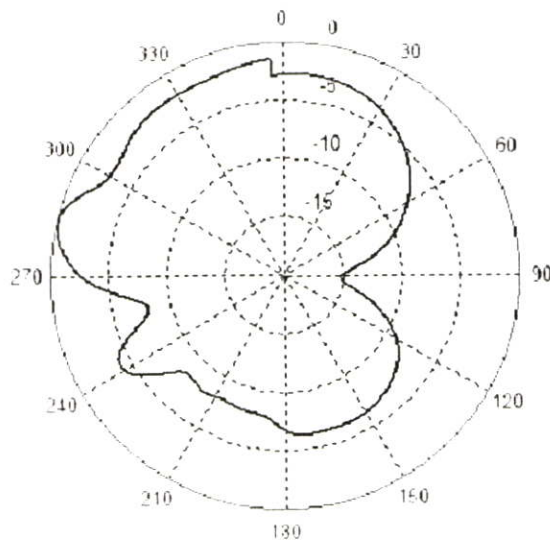
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแผ่กระจายเฉลี่ยของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูที่วัดในแนวตั้งในช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6 GHz

3.3.2 สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง

ได้นำสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางมาพิจารณาความถี่ของรูปคลื่น UWB โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 [12]-[14] แบบรูปการแผ่กระจายเฉลี่ยที่วัดในแนวนอนในช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6 GHz แสดงไว้ในรูปที่ 3.4



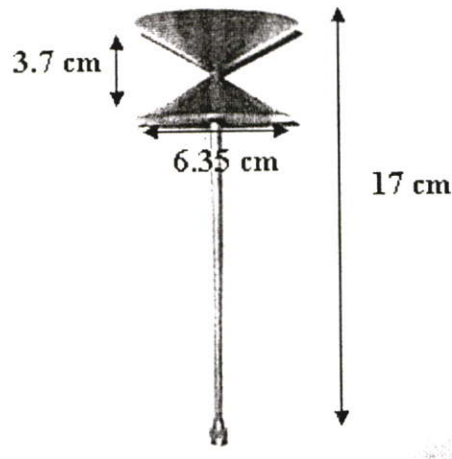
รูปที่ 3.3 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง



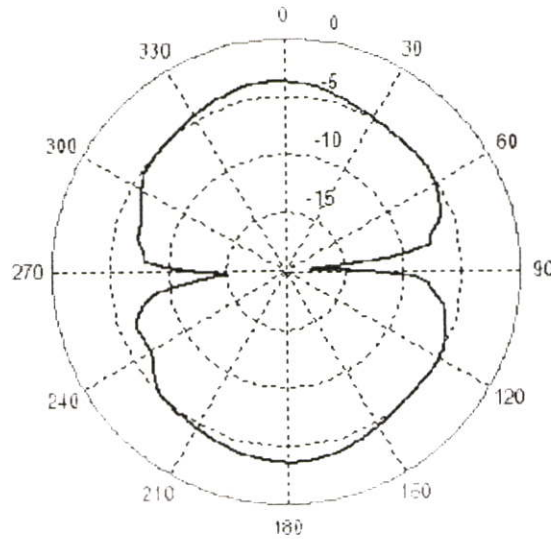
รูปที่ 3.4 แบบรูปการแผ่กระจายเฉลี่ยของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางที่วัดในแนวนอนในช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6 GHz

3.3.3 สายอากาศแบบไบโคเนคคอลล

ได้นำสายอากาศแบบไบโคเนคคอลลมาพิจารณาความเพี้ยนของรูปคลื่น UWB โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบไบโคเนคคอลลนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 แบบรูปการแผ่กระจายเฉลี่ยที่วัดในแนวตั้งในช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6 GHz แสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศแบบไบโคนิกอล



รูปที่ 3.6 แบบรูปการแผ่กระจายเฉลี่ยของสายอากาศแบบไบโคนิกอลที่วัดในแนวตั้งในช่วงความถี่ 3.1 ถึง 10.6 GHz

3.4 แบบแผนการวัด

คุณสมบัติฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของสายอากาศที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3 จะได้มาจากการทำแบบแผนการวัด ซึ่งจะทำกรวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ UWB โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (VNA) ในห้องไร้การสะท้อน หลังจากนั้นนำผลที่วัดได้มาวิเคราะห์หาฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของแต่ละมุมของสายอากาศ ในการวัดจะใช้แบบแผนที่ได้นำเสนอไว้ใน [16]-[19]

ในการวัดได้กำหนดให้สายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นสายอากาศชนิดเดียวกันและมีขนาดเท่ากัน ซึ่งจะประมาณให้ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่ง H_t และฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศรับ H_r มีค่าเท่ากัน นั่นคือ $H_t = H_r = H_a$ ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ H_c ที่วัดได้ กับฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศ H_a เป็น

$$H_c(f) = H_t(f) \cdot H_f(f) \cdot H_r(f) = H_f(f) \cdot H_a^2(f) \quad (3.7)$$

เมื่อ H_f เป็นความหนาแน่นของอวกาศว่าง ซึ่งนิยามเป็น

$$H_f(f) = \frac{c}{4\pi df} e^{-j2\pi df/c} \quad (3.8)$$

c เป็นความเร็วแสง และ d เป็นระยะทางระหว่างสายอากาศส่งถึงสายอากาศรับ ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของสายอากาศหาได้จาก

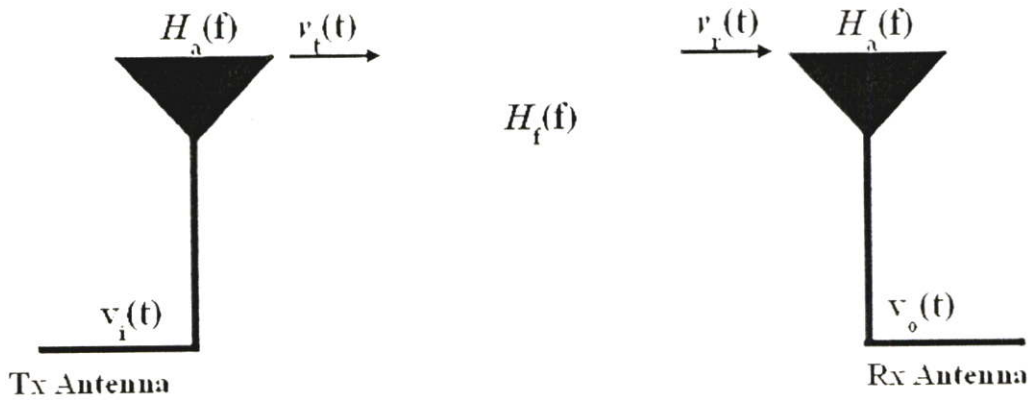
$$H_a(f) = \sqrt{\frac{H_c(f)}{H_f(f)}} = \sqrt{\frac{4\pi fd}{c} e^{j2\pi fd/c} H_c(f)} \quad (3.9)$$

โดยจะทำการวัดและวิเคราะห์หาฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง และสายอากาศแบบไบโคเนคคัล

3.5 การหาค่าความเพี้ยน

สำหรับการวิเคราะห์ความเพี้ยน จะพิจารณาจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง และสายอากาศแบบไบโคเนคคัลในมุมที่กำหนด บล็อกไดอะแกรมของการหาค่าความเพี้ยนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 โดยได้ใช้ความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นที่อินพุตของสายอากาศส่ง V_i ซึ่งสามารถคำนวณหาความหนาแน่นสเปกตรัมของรูปคลื่นที่แผ่กระจายออกมาจากสายอากาศส่ง V_r ได้จาก

$$V_r(f) = V_i(f) \cdot H_a(f) \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของการหาค่าความเพี้ยน

รูปคลื่นที่แผ่กระจายออกมาจากสายอากาศส่ง v_r สามารถคำนวณได้โดยทำการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับของความหนาแน่นสเปกตรัม นั่นคือ

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.11)$$

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศรับ V_r จะสามารถหาได้จาก

$$V_r(f) = V_i(f) \cdot H_r(f) \quad (3.12)$$

รูปคลื่นที่มาถึงสายอากาศรับ v_r สามารถคำนวณได้โดยทำการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับของความหนาแน่นสเปกตรัม นั่นคือ

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.13)$$

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตของสายอากาศรับ V_o จะสามารถหาได้จาก

$$V_o(f) = V_r(f) \cdot H_a(f) \quad (3.14)$$

รูปคลื่นที่เอาต์พุตของสายอากาศรับ v_o สามารถคำนวณได้โดยทำการแปลงฟูรีเยร์ย้อนกลับของความหนาแน่นสเปกตรัม นั่นคือ

$$v_o(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_o(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.15)$$

ความเพี้ยนของรูปคลื่น UWB ที่เกิดจากสายอากาศส่ง หาได้จากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ C_t ที่พิจารณาจากสัญญาณที่อินพุตของสายอากาศส่งเทียบกับสัญญาณที่แผ่กระจายออกมาจากสายอากาศส่ง ซึ่งมีนิยามเป็น

$$C_t = \frac{\max \left| \int_{-\infty}^{\infty} v_i^*(t) \cdot v_i(t + \tau) dt \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |v_i(t)|^2 dt \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |v_i(t)|^2 dt}} \quad (3.16)$$

ในทำนองเดียวกัน ความเพี้ยนของรูปคลื่น UWB ที่เกิดจากสายอากาศรับ หาได้จากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ C_r ที่พิจารณาจากสัญญาณที่มาถึงสายอากาศรับเทียบกับสัญญาณที่เอาต์พุตของสายอากาศรับ ซึ่งมีนิยามเป็น

$$C_r = \frac{\max \left| \int_{-\infty}^{\infty} v_r^*(t) \cdot v_o(t + \tau) dt \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |v_r(t)|^2 dt \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |v_o(t)|^2 dt}} \quad (3.17)$$

3.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงแบบจำลองรูปคลื่นอย่างง่ายที่เป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB ที่กำหนดโดย FCC รวมทั้งทำให้เป็นไปตามข้อกำหนดของสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC โดยได้พิจารณารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต ส่วนสายอากาศ UWB ได้พิจารณาสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง และสายอากาศแบบไบโคเนกอล รวมทั้งทฤษฎีที่ใช้หาความเพี้ยนของสายอากาศ UWB ที่เป็นทั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับในเทอมของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

บทที่ 4

ผลการหาค่าความเพี้ยน

4.1 บทนำ

ความเพี้ยนของรูปคลื่น UWB จากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง และสายอากาศแบบไบโคเนคคัล ได้พิจารณาจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดยได้หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดไว้ ได้นำพารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด [15] ซึ่งเป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB ของ FCC และหน้ากาสเปกตรัมที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและภายนอกอาคาร

4.2 สายอากาศทางด้านส่ง

4.2.1 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู [20]

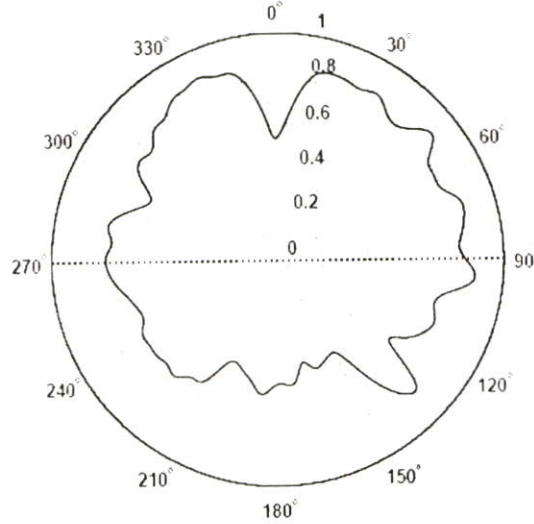
4.2.1.1 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

สำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน รูปที่ 4.1 ได้แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมสำหรับหน้ากาสเปกตรัมภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ตามมุมที่กำหนด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.88 ที่มุม 51.13° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.47 ที่มุม 166.5° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.71

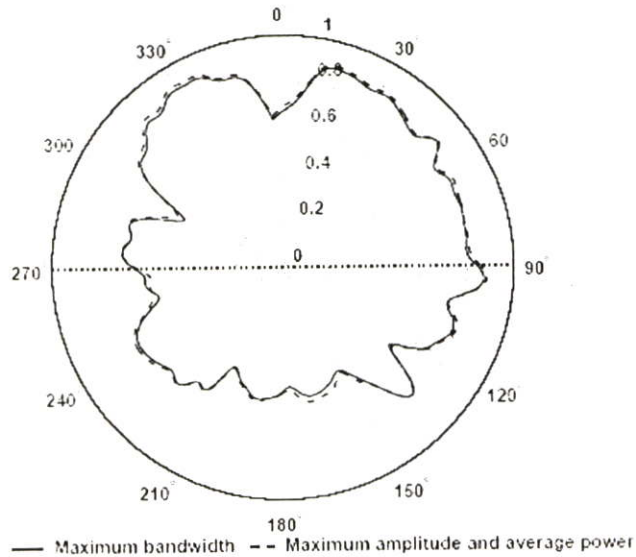
4.2.1.2 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต

สำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.90 ที่มุม 335.2° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.47 ที่มุม 296.4° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.71 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด

และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.91 ที่มุม 328.8° และ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.48 ที่มุม 205.7° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.72

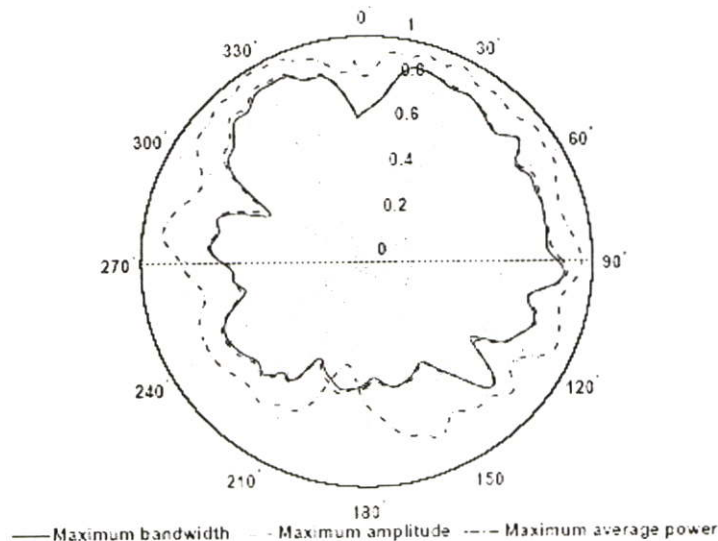


รูปที่ 4.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม คางหมูทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC



รูปที่ 4.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC

สำหรับข้อกำหนดภายนอกอาคาร สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลต ตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุดจะมีค่าใกล้เคียงกับของรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และจะมีค่าน้อยกว่าของรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.90 ที่มุม 335.2° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.47 ที่มุม 296.4° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.71 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.91 ที่มุม 328.8° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.49 ที่มุม 205.8° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.72 สำหรับรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 328.2° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.47 ที่มุม 190.6° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.84

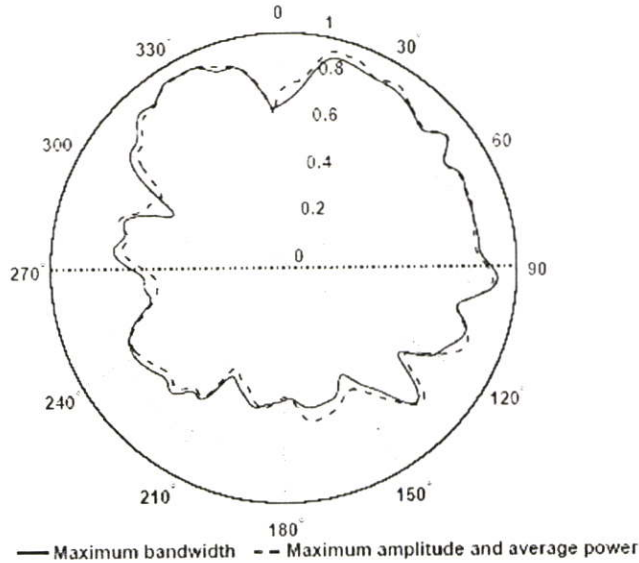


รูปที่ 4.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดยFCC

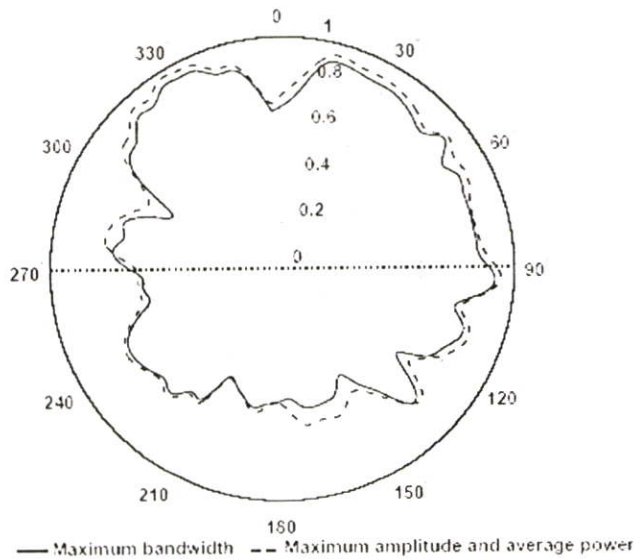
4.2.1.3 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลต

สำหรับข้อกำหนดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.94 ที่มุม 328.8° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุด มีค่า 0.51 ที่

มุม 205.3° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.74 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.95 ที่มุม 15.0° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.47 ที่มุม 205.5° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.75



รูปที่ 4.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม คางหมูทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC



รูปที่ 4.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม คางหมูทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

สำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.94 ที่มุม 328.8° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.51 ที่มุม 205.3° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.74 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.97 ที่มุม 328.5° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.52 ที่มุม 205.1° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.78

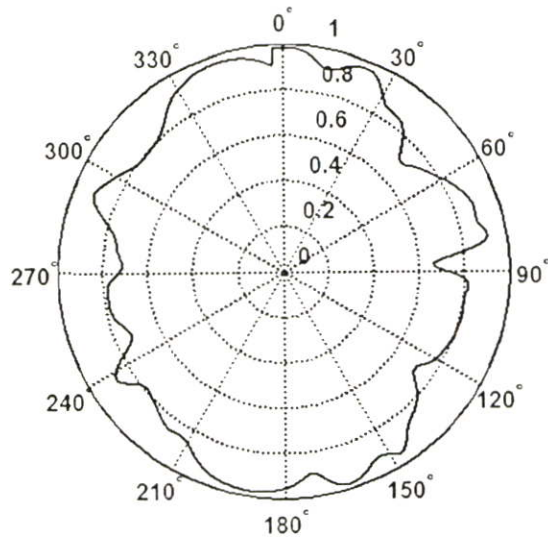
4.2.2 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง [21]

4.2.2.1 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

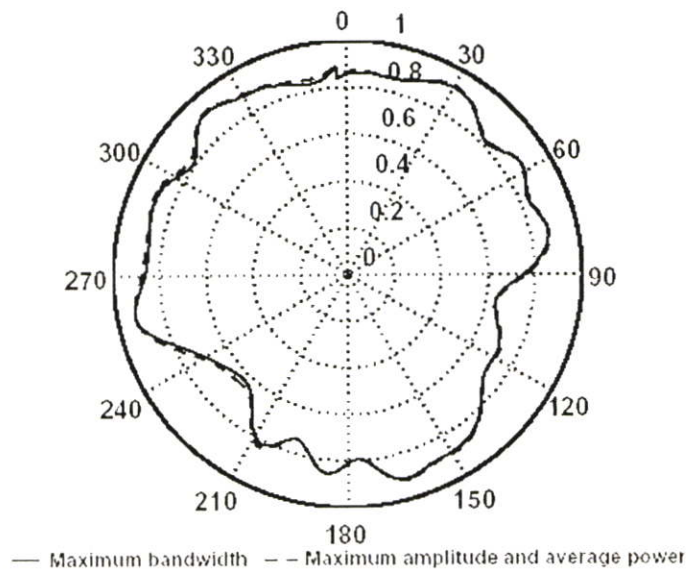
สำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน รูปที่ 4.6 ได้แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมสำหรับหน้ากากสเปกตรัมภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ตามมุมที่กำหนด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.95 ที่มุม 258.3° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.59 ที่มุม 224.9° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.77

4.2.2.2 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต

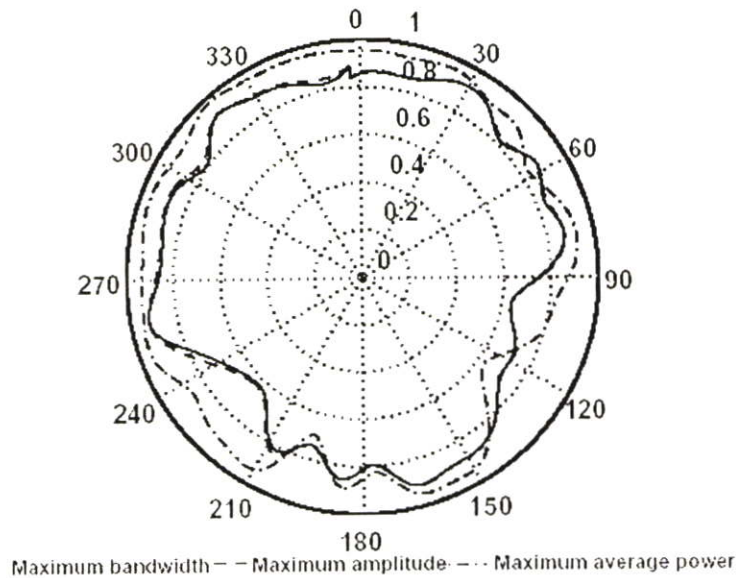
สำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.92 ที่มุม 258.9° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.62 ที่มุม 224.9° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.77 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.92 ที่มุม 259.0° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.64 ที่มุม 101.1° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.77



รูปที่ 4.6 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม โดยใช้สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC



รูปที่ 4.7 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลต โดยใช้สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC



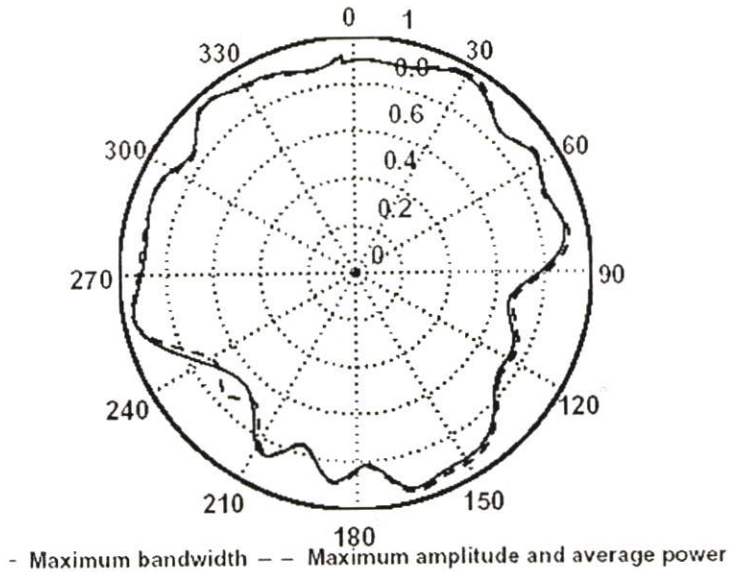
รูปที่ 4.8 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดยFCC

สำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุดจะมีค่าใกล้เคียงกับของรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และจะมีค่าน้อยกว่าของรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.92 ที่มุม 258.9° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.62 ที่มุม 294.9° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.77 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.92 ที่มุม 258.7° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.63 ที่มุม 225.0° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.77 สำหรับรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.97 ที่มุม 319.3° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.63 ที่มุม 125.8° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.80

4.2.2.3 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต

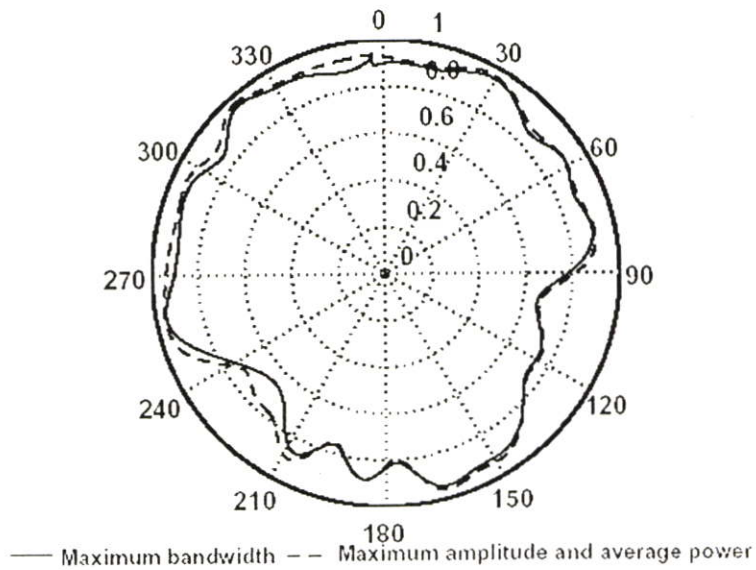
สำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.95 ที่มุม 319.4° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.66 ที่มุม 101.4° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.80 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.96 ที่มุม 30.5° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.68 ที่มุม 101.1° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.82



รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแก๊สที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC

สำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแก๊สที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.95 ที่มุม 319.4° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.66 ที่มุม 101.4° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.80 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.97 ที่มุม 319.1° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.66 ที่มุม 101.9° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.81



รูปที่ 4.10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแก๊สที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

4.2.3 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบไบโคเนคคัล

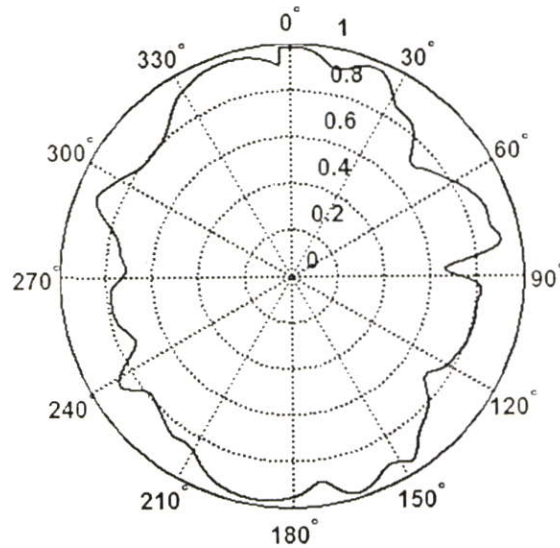
4.2.3.1 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

สำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงสุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน รูปที่ 4.11 ได้แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมสำหรับหน้ากาสเปกตรัมภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ตามมุมที่กำหนด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.66 ที่มุม 87.4° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.80

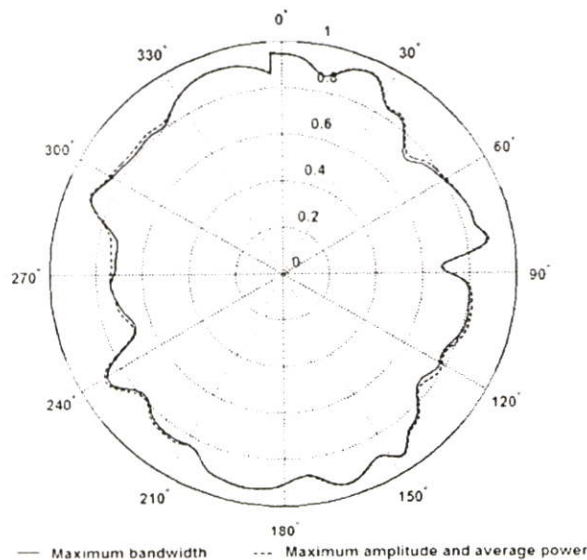
4.2.3.2 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต

สำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงสุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.94 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.66 ที่มุม

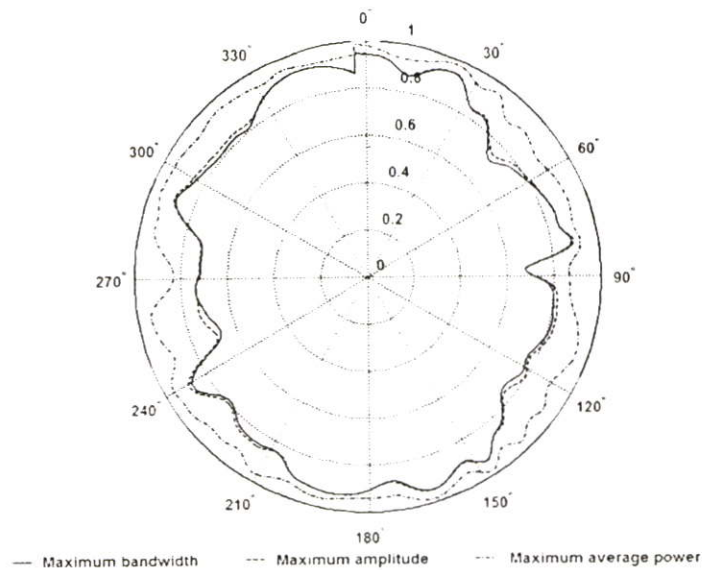
250.6° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.80 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.95 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.67 ที่มุม 250° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.81



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมโดยใช้สายอากาศแบบไบโคนิคอลทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC



รูปที่ 4.12 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบไบโคนิคอลทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC



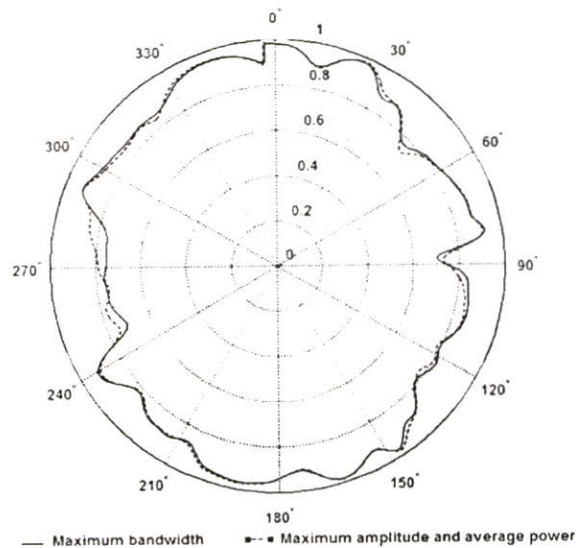
รูปที่ 4.13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบไบโคเนคอลลทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

สำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุดจะมีค่าใกล้เคียงกับของรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และจะมีค่าน้อยกว่าของรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.94 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.66 ที่มุม 250.6° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.80 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.95 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.67 ที่มุม 87.6° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.81 สำหรับรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 163.5° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.82 ที่มุม 270.9° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.90

4.2.3.3 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต

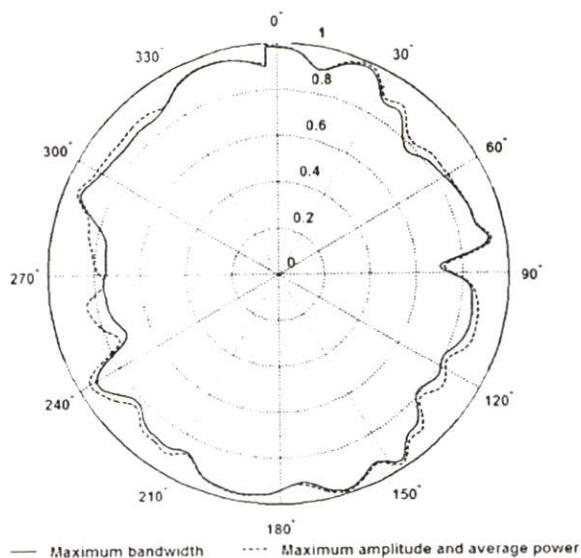
สำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.70 ที่มุม

87.7° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.84 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.73 ที่มุม 88.4° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.85



รูปที่ 4.14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบไบโคเนคอลลทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC

สำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.70 ที่มุม 87.7° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.84 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.99 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.72 ที่มุม 87.8° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.85



รูปที่ 4.15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบไบโคเนคอลลทางด้านส่งตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

4.3 สายอากาศทางด้านรับ

4.3.1 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

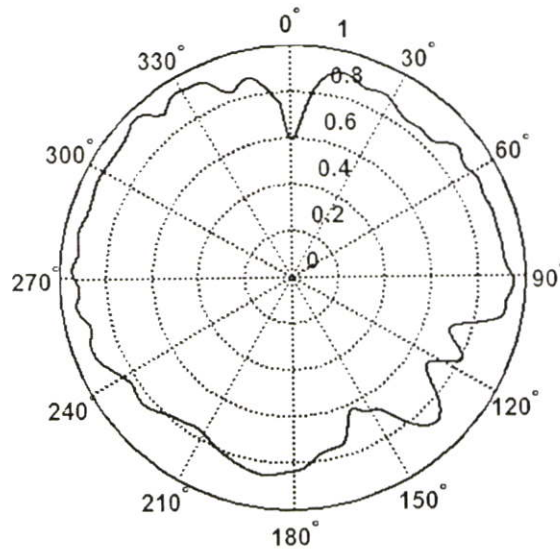
4.3.1.1 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

สำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน รูปที่ 4.16 ได้แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมสำหรับหน้ากาสเปกตรัมภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ตามมุมที่กำหนด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.96 ที่มุม 314.2° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.59 ที่มุม 0.5° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.77

4.3.1.2 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต

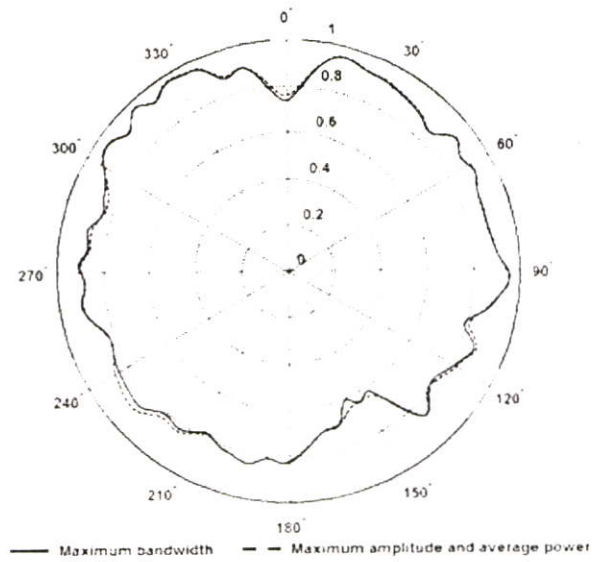
สำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.17 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.96 ที่มุม 328.4° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.60 ที่

มุม 156.5° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.78 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.97 ที่มุม 328.4° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.63 ที่มุม 150.9° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.80

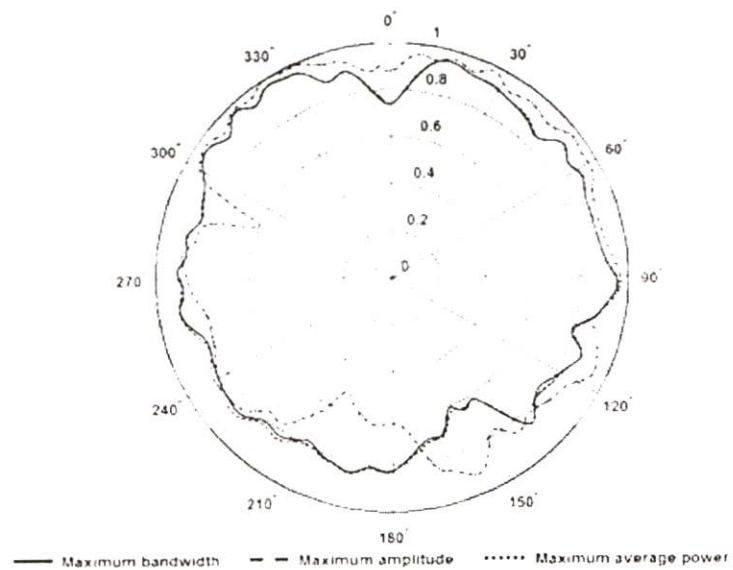


รูปที่ 4.16 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม โดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม ทางมุมทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

สำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.18 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุดจะมีค่าใกล้เคียงกับของรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และจะมีค่าน้อยกว่าของรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.96 ที่มุม 328.4° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.60 ที่มุม 156.5° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.78 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.97 ที่มุม 328.4° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.62 ที่มุม 155.7° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.79 สำหรับรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.99 ที่มุม 328.4° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.51 ที่มุม 201.2° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.75



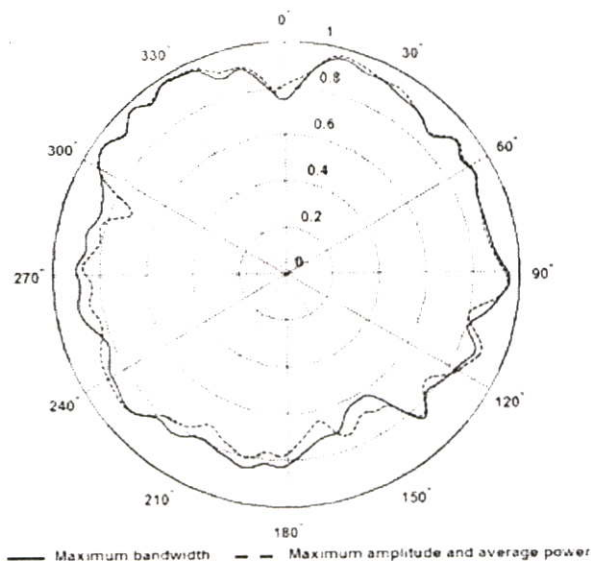
รูปที่ 4.17 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC



รูปที่ 4.18 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

4.3.1.3 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแก๊สที่ถูกมอดูเลต

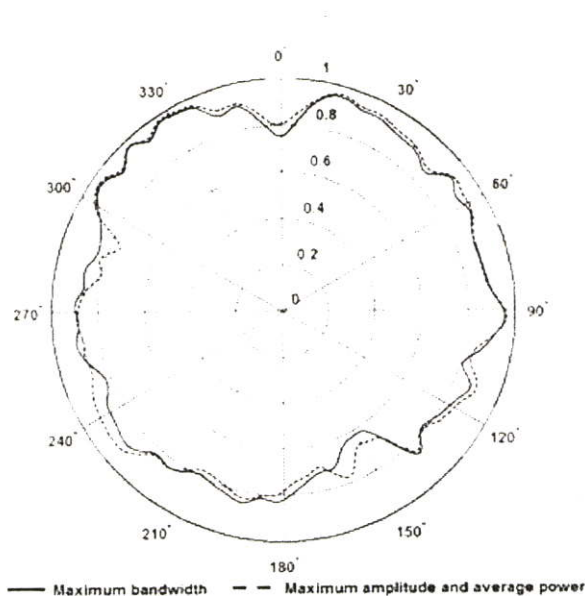
สำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงสุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแก๊สที่ถูกมอดูเลตตาม มุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.19 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.97 ที่มุม 328.4° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.62 ที่ มุม 149.3° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.79 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงสุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 328.4° และ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.64 ที่มุม 168° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.81



รูปที่ 4.19 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแก๊สที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม คางหมูทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC

สำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงสุด และ กำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแก๊สที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่ กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.20 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มากที่สุดมีค่า 0.97 ที่มุม 328.4° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.62 ที่มุม 329.3° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.79 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงสุด และกำลัง

งานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 328.4° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.66 ที่มุม 330.5° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.82



รูปที่ 4.20 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม คางหมูทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

4.3.2 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง

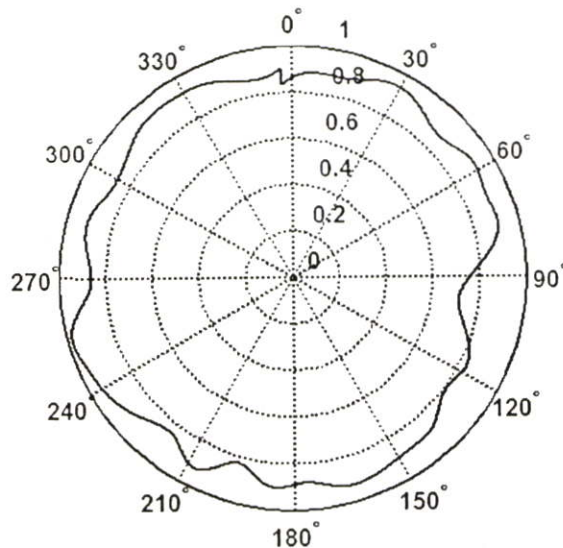
4.3.2.1 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

สำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน รูปที่ 4.21 ได้แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมสำหรับหน้ากาสเปกตรัมภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ตามมุมที่กำหนด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.97 ที่มุม 253.3° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.71 ที่มุม 97.6° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.84

4.3.2.2 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต

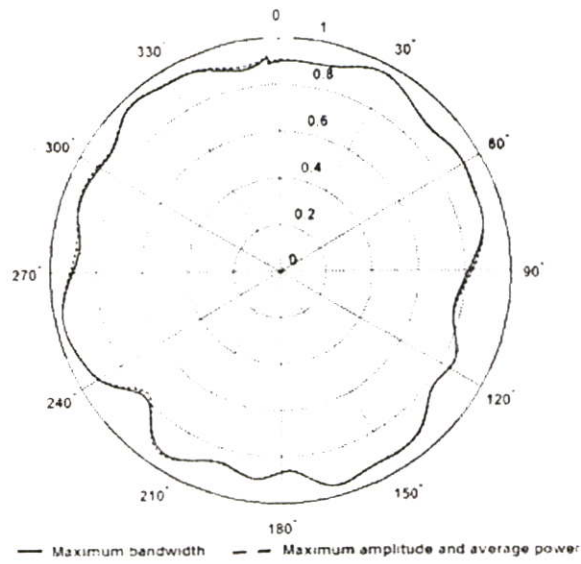
สำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต

ตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.22 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.96 ที่มุม 255.6° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.76 ที่มุม 101.5° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.86 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.96 ที่มุม 318.9° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.75 ที่มุม 102.3° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.85

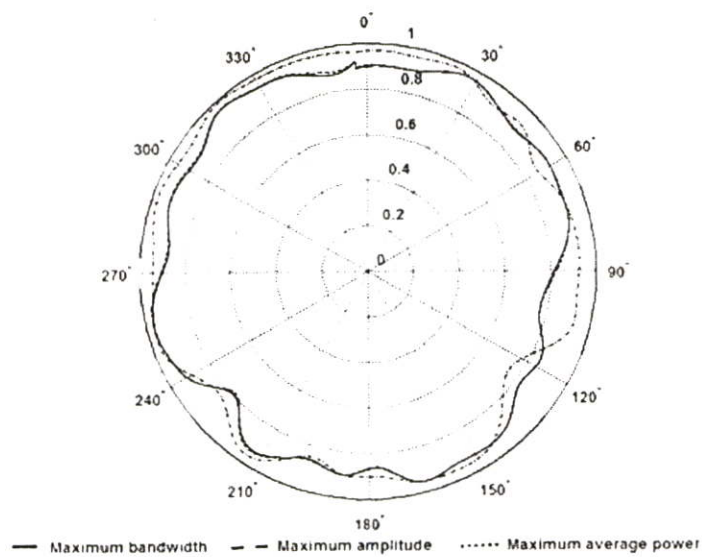


รูปที่ 4.21 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมโดยใช้สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

สำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.23 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุดจะมีค่าใกล้เคียงกับของรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และจะมีค่าน้อยกว่าของรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.96 ที่มุม 255.6° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.76 ที่มุม 101.5° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.86 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.96 ที่มุม 256° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.77 ที่มุม 102° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.86 สำหรับรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 319.2° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.75 ที่มุม 125.1° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.86



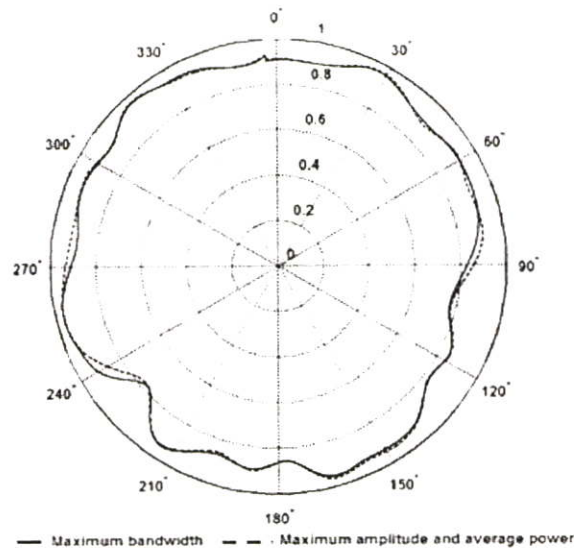
รูปที่ 4.22 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC



รูปที่ 4.23 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

4.3.2.3 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลต

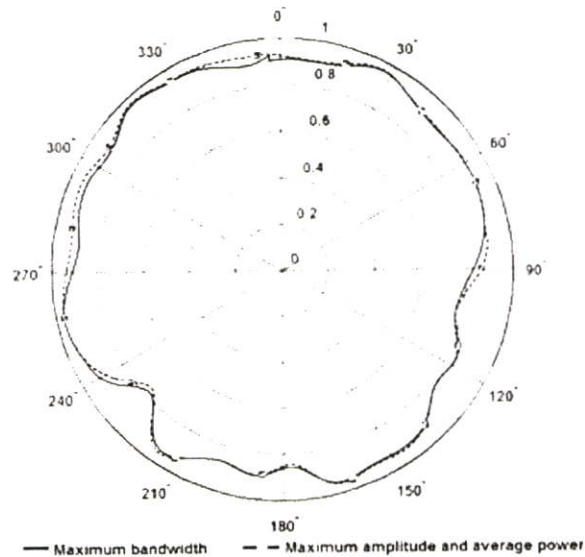
สำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.24 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.96 ที่มุม 256° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.77 ที่มุม 102.6° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.86 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.97 ที่มุม 318.7° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.77 ที่มุม 229° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.87



รูปที่ 4.24 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC

สำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.25 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.96 ที่มุม 256° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.77 ที่มุม 102.6° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.86 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลัง

งานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.97 ที่มุม 318.1° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.76 ที่มุม 228.4° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.86

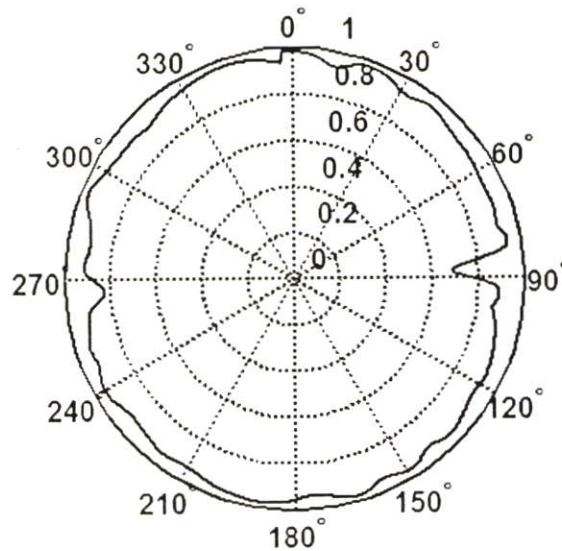


รูปที่ 4.25 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

4.3.3 ผลที่ได้จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ด้วยสายอากาศแบบไบโคเนคคัล

4.3.3.1 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

สำหรับข้อจำกัดภายในอาคารและภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด แอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน รูปที่ 4.26 ได้แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมสำหรับหน้ากาสเปกตรัมภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC ตามมุมที่กำหนด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.68 ที่มุม 87.2° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.83



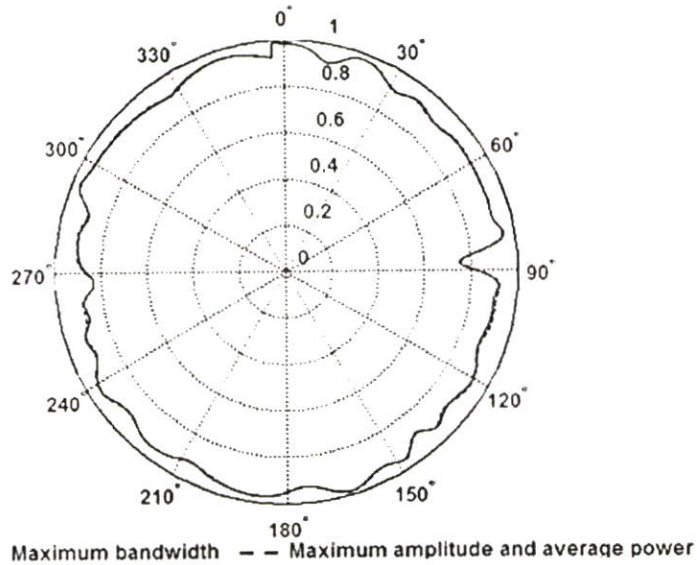
รูปที่ 4.26 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมโดยใช้สายอากาศแบบไบโคเนคอลลทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

4.3.3.2 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต

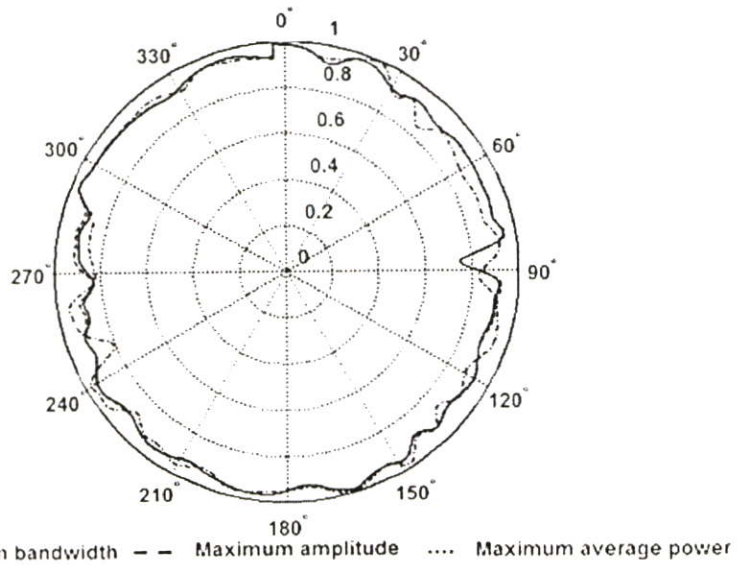
สำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.27 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.74 ที่มุม 87.2° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.86 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.99 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.75 ที่มุม 87.2° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.87

สำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.28 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุดจะมีค่าใกล้เคียงกับของรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และจะมีค่าน้อยกว่าของรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.98 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.74 ที่มุม 87.2° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.86 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.99 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.74 ที่มุม 87.2°

ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.86 สำหรับรูปคลื่นที่มีกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.99 ที่มุม 163.5° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.80 ที่มุม 247.4° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.89



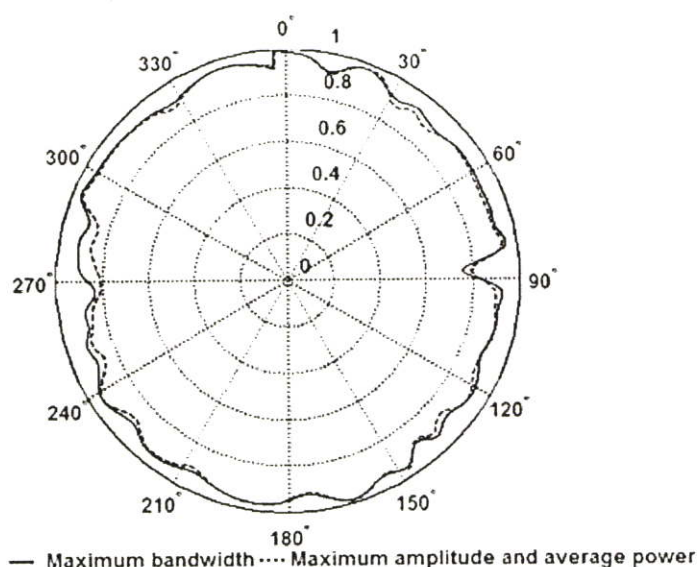
รูปที่ 4.27 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบไบโคเนคอลลทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC



รูปที่ 4.28 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบไบโคเนคอลลทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

4.3.3.3 การหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลต

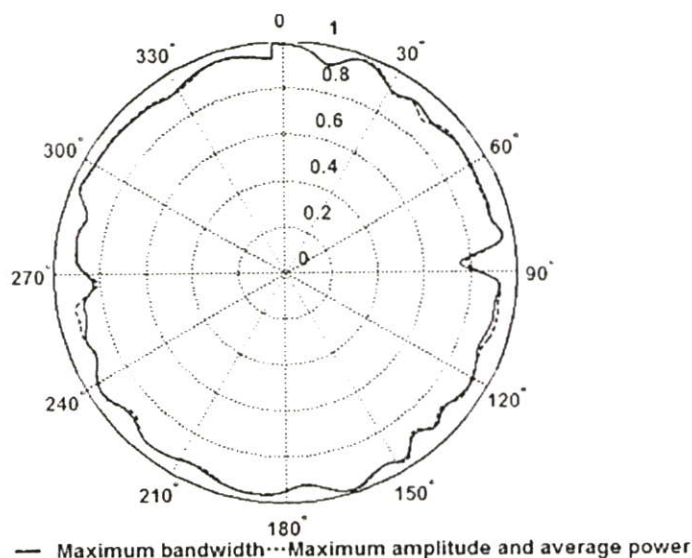
สำหรับข้อจำกัดภายในอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำให้รูปคลื่นมีแอมพลิจูดสูงสุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.29 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.99 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.75 ที่มุม 87.2° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.87 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงสุดและกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.99 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.74 ที่มุม 87.4° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.86



รูปที่ 4.29 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบไปโคนิคอลลทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายในอาคารที่กำหนดโดย FCC

สำหรับข้อจำกัดภายนอกอาคาร พารามิเตอร์ที่ได้จากรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงสุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตตามมุมที่กำหนดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.30 สำหรับรูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.99 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.75 ที่มุม 87.2° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.87 สำหรับรูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงสุด และกำลัง

งานเฉลี่ยมากที่สุด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดมีค่า 0.99 ที่มุม 357° และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุดมีค่า 0.78 ที่มุม 87.2° ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.88



รูปที่ 4.30 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรูปคลื่นแก๊สที่ถูกมอดูเลตโดยใช้สายอากาศแบบไบโคนิคอลลทางด้านรับตามมุมที่กำหนดสำหรับสเปกตรัมมาร์คภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC

4.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้หาความเพี้ยนของรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต และรูปคลื่นแก๊สที่ถูกมอดูเลต ที่เกิดจากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง และสายอากาศแบบไบโคนิคอล โดยกำหนดให้สายอากาศเป็นทั้งสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับ ได้หาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นตามมุมที่กำหนดของสายอากาศ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้นี้จะพารามิเตอร์ที่ใช้บอกปริมาณความเพี้ยนของสัญญาณ UWB ที่เกิดจากสายอากาศ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญคุณสมบัติหนึ่งของสายอากาศ UWB

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการไปแล้วได้ทำให้รูปคลื่นอย่างง่ายเป็นไปตามนิยามของสัญญาณ UWB ที่กำหนดโดย FCC รวมทั้งทำให้เป็นไปตามข้อกำหนดของสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC โดยได้พิจารณารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลต ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ใช้รูปคลื่นอย่างง่ายเหล่านี้มาพิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นที่แผ่กระจายและรับได้จากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง และสายอากาศแบบใบ โคนิคอล จากมุมต่างๆ ภายในอาคารและภายนอกอาคาร โดยกำหนดให้สายอากาศเป็นทั้งสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับ ซึ่งผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สายอากาศทางด้านส่ง

5.1.1 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

ผลที่ได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูจากมุมต่างๆ ภายในอาคารและภายนอกอาคาร ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านส่งสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร

รูปคลื่น	ค่าเฉลี่ยแบนด์วิดท์กว้างที่สุด		ค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดสูงสุด		ค่าเฉลี่ยกำลังเฉลี่ยมากที่สุด	
	ในอาคาร	นอกอาคาร	ในอาคาร	นอกอาคาร	ในอาคาร	นอกอาคาร
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
สี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลต	0.71	0.71	0.72	0.72	0.72	0.84
เกาส์ที่ถูกลมอดูเลต	0.74	0.74	0.75	0.78	0.75	0.78

จากตารางที่ 5.1 สรุปได้ว่าคุณสมบัติที่ได้จากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู โดยได้ใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอดูเลต และรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอดูเลต เมื่อที่

รูปคลื่นแต่ละชนิดเป็นไปตามนิยามสัญญาณ UWB ของ FCC และสเปกตรัมมาร์คที่กำหนดโดย FCC สำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร จากผลที่ได้จะสามารถทราบคุณสมบัติความถี่ของรูปคลื่น UWB แต่ละชนิดตามมุมที่กำหนดของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู รูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างจะมีแนวโน้มที่จะเกิดความถี่ขึ้นได้มากขึ้น ด้วยเหตุนี้รูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุดจะเกิดความถี่มากกว่ารูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด โดยเฉลี่ยแล้วรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตมีค่าความถี่ต่ำที่สุด และรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตมีความถี่ที่น้อยกว่ารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

5.1.2 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง

ผลที่ได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางจากมุมต่างๆ ภายในอาคารและภายนอกอาคารได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านส่งสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร

รูปคลื่น	ค่าเฉลี่ยแบนด์วิดท์ กว้างที่สุด		ค่าเฉลี่ยแอมพลิจูด สูงที่สุด		ค่าเฉลี่ยกำลังเฉลี่ย มากที่สุด	
	ใน อาคาร	นอก อาคาร	ใน อาคาร	นอก อาคาร	ใน อาคาร	นอก อาคาร
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	0.77	0.77	0.78	0.77	0.78	0.80
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	0.80	0.80	0.82	0.81	0.82	0.81

จากตารางที่ 5.2 สรุปคุณสมบัติที่ได้จากสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางได้ว่า รูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างจะมีแนวโน้มที่จะเกิดความถี่ได้มากที่สุด และโดยเฉลี่ยแล้วรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตมีค่าความถี่ต่ำที่สุด และรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลตมีความถี่ที่น้อยกว่ารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

5.1.3 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบไบโคเนคคอด

ผลที่ได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศแบบไบโคเนคคอดจากมุมต่างๆ ภายในอาคารและภายนอกอาคารได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบไบโคเนคคอลลทางด้านส่งสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร

รูปคลื่น	ค่าเฉลี่ยแบนด์วิดท์ กว้างที่สุด		ค่าเฉลี่ยแอมพลิจูด สูงที่สุด		ค่าเฉลี่ยกำลังเฉลี่ย มากที่สุด	
	ใน อาคาร	นอก อาคาร	ใน อาคาร	นอก อาคาร	ใน อาคาร	นอก อาคาร
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
สี่เหลี่ยมที่ถูกลมอคูเลต	0.80	0.80	0.81	0.81	0.81	0.90
เกาส์ที่ถูกลมอคูเลต	0.84	0.84	0.85	0.85	0.85	0.85

จากตารางที่ 5.3 จะสามารถทราบคุณสมบัติความเพี้ยนของรูปคลื่น UWB แต่ละชนิดตามมุมที่กำหนดของสายอากาศแบบไบโคเนคคอลล รูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์กว้างที่สุดจะเกิดความเพี้ยนมากกว่ารูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด รูปคลื่นเกาส์ที่ถูกลมอคูเลตมีความเพี้ยนต่ำที่สุด และรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลมอคูเลตมีความเพี้ยนที่น้อยกว่ารูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

5.2 สายอากาศทางด้านรับ

5.2.1 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

ผลที่ได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นที่รับได้จากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูจากมุมต่างๆ ภายในอาคารและภายนอกอาคารได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านรับสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร

รูปคลื่น	ค่าเฉลี่ยแบนด์วิดท์ กว้างที่สุด		ค่าเฉลี่ยแอมพลิจูด สูงที่สุด		ค่าเฉลี่ยกำลังเฉลี่ย มากที่สุด	
	ใน อาคาร	นอก อาคาร	ใน อาคาร	นอก อาคาร	ใน อาคาร	นอก อาคาร
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
สี่เหลี่ยมที่ถูกลมอคูเลต	0.78	0.78	0.80	0.79	0.80	0.75
เกาส์ที่ถูกลมอคูเลต	0.79	0.79	0.81	0.82	0.81	0.82

จากตารางที่ 5.4 สรุปคุณสมบัติที่ได้จากสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านรับได้ว่า รูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุดทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคารจะมีแวนโวม์ที่จะเกิดความเพี้ยนได้มากที่สุด โดยเฉลี่ยแล้วรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตมีค่าความเพี้ยนต่ำที่สุด และรูปคลื่นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมมีความเพี้ยนที่มากที่สุด

5.2.2 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง

ผลที่ได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นที่รับได้จากสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางที่มุมต่างๆ ภายในอาคารและภายนอกอาคารได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลางทางด้านรับสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร

รูปคลื่น	ค่าเฉลี่ยแบนด์วิดท์ กว้างที่สุด		ค่าเฉลี่ยแอมพลิจูด สูงที่สุด		ค่าเฉลี่ยกำลังเฉลี่ย มากที่สุด	
	ใน อาคาร	นอก อาคาร	ใน อาคาร	นอก อาคาร	ใน อาคาร	นอก อาคาร
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	0.86	0.86	0.85	0.86	0.85	0.86
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	0.86	0.86	0.87	0.86	0.87	0.86

จากตารางที่ 5.5 จะสามารถทราบคุณสมบัติความเพี้ยนของรูปคลื่น UWB แต่ละชนิดตามมุมที่กำหนดของสายอากาศแบบเส้นตัวนำกลาง รูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุดทั้งภายในและภายนอกอาคารจะมีแวนโวม์ที่จะเกิดความเพี้ยนได้มากที่สุด โดยเฉลี่ยแล้วรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตมีค่าความเพี้ยนต่ำที่สุด และรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมมีความเพี้ยนที่มากที่สุด

5.2.3 สรุปผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศแบบไบโคนิคอลล

ผลที่ได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่นที่รับได้จากสายอากาศแบบไบโคนิคอลลจากมุมต่างๆ ภายในอาคารและภายนอกอาคารได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของแต่ละรูปคลื่นที่ได้จากสายอากาศแบบไบโคเนคคอลลทางด้านรับสำหรับข้อกำหนดภายในอาคารและภายนอกอาคาร

รูปคลื่น	ค่าเฉลี่ยแบนด์วิดท์กว้างที่สุด		ค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดสูงที่สุด		ค่าเฉลี่ยกำลังเฉลี่ยมากที่สุด	
	ในอาคาร	นอกอาคาร	ในอาคาร	นอกอาคาร	ในอาคาร	นอกอาคาร
แถบผ่านสี่เหลี่ยม	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
สี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต	0.86	0.86	0.87	0.86	0.87	0.89
เกาส์ที่ถูกมอดูเลต	0.87	0.87	0.86	0.88	0.86	0.88

จากตารางที่ 5.6 สรุปคุณสมบัติที่ได้จากสายอากาศแบบไบโคเนคคอลได้ว่า รูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างจะมีแนวโน้มที่จะเกิดความเพี้ยนได้มากขึ้น ด้วยเหตุนี้รูปคลื่นที่มีแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุดจะเกิดความเพี้ยนมากกว่ารูปคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด และกำลังงานเฉลี่ยมากที่สุด โดยเฉลี่ยแล้วรูปคลื่นเกาส์ที่ถูกมอดูเลตมีค่าความเพี้ยนต่ำที่สุด

ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากแนวคิดที่ได้ทำการวิเคราะห์หาความเพี้ยนของรูปคลื่น UWB โดยได้หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละรูปคลื่น UWB ที่มุมต่างๆ ของสายอากาศ สามารถนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์หาความเพี้ยนของสายอากาศ UWB ชนิดอื่นได้ และสามารถนำค่าที่ได้นี้มากำหนดปริมาณความเพี้ยนของสัญญาณ UWB ที่เกิดจากสายอากาศทั้งในการใช้เป็นสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.D. Taylor, "Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems," **CRC press**, London, UK, pp. 670, 1994.
- [2] OSD/DARPA, "Ultra-Wideband Radar Review Panel," **Assessment of Ultra-Wideband (UWB) Technology**, Arlington, VA.:DARPA, 1990.
- [3] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a new technology," **2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)**, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rule Regarding UWB Transmission Systems," **First Report**, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [7] J. Farserotu, A. Hutter, F. Platbrood, J. Gerrits ans A. Pollini, "UWB Transmission and MIMO Antenna Systems for Nomadic User and Mobile PAN," **Wireless Personal Communications**, no. 22, pp. 197-317, 2002.
- [8] A. Duzdar and G. Kompa, "A Novel Trapezoidal Antenna Fed by a Ground Image Plane and Backed by A Reflector," **30th European Microwave Conference (EuMC) 2000**, vol. 2, pp. 1-4, Paris, France, Oct. 2000.
- [9] P. Eskelinen, "Improvements of An Inverted Trapezoidal Pulse Antenna," **IEEE Antennas Propagation Magazine**, vol. 43, no. 3, pp. 82-86, June 2001.
- [10] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, "Experimental Evaloation Scheme of UWB Antenna Performance," **Technical Meeting on Instrument and Measurement**, IEE Japan, IM 03-35, June 2003.
- [11] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, M. Chamchoy, A. Pradabphon and P. Tangtisanon, "Distortion Analysis of UWB Pulse Caused by Trapezoidal Antenna," **26th Electrical Engineering Conference (EECON-26)**, pp. 1494-1499, Nov. 2004.

- [12] Skycross Inc., "3.1 – 10.6 GHz UWB antenna for commercial UWB applications," <http://www.skycross.com/>
- [13] "Meander Line Loaded Antenna," **U.S. Patent 5,790,080**, Aug. 1998.
- [14] "Wideband Meander Line Loaded Antenna," **U.S. Patent 6,492,953 B2**, Dec. 2002.
- [15] P. Supanakoon, K. Wansiang, S. Promwong and J. Takada "Simple Waveform for UWB Communication," **The 2005 Electrical Engineer/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON 2005)**, pp. 626-629, May 2005.o
- [16] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' Transmission Formula for UWB Systems," **Technical Report of IEICE**, WBS2003-8/MW2003-20, May 2003.
- [17] S. Promwong, W. Hachitani, J. Takada, P. Supanakoon and P.Tangtisanon, "Experimental Study of Ultra-Wideband Transmission Based on Friis' Transmission Formula," **The Third International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT) 2003**, vol. 1, pp. 467-470, Sept. 2003.
- [18] S. Promwong and J. Takada, "Free Space Link Budget Estimation Scheme for Ultra Wideband Impulse Radio with Imperfect Antennas," **IEICE Electronics Express**, vol. 1, no. 7, pp. 188-192, July 2004.
- [19] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, "Free Space Link Budget Evaluation of UWB-IR Systems," **2004 International Workshop on Ultra Wideband Systems joint with Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (Joint UWBST & IWUWBS 2004)**, Kyoto, Japan, pp. 312-316, May 2004.
- [20] P. Supanakoon, A. Kiphairoj, S. Promwong, and J. Takada, "Distortion Analysis of UWB Pulse Waveforms with Trapezoidal Antenna," **The 2006 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON)**, vol. 2, pp. 638-641, May 2006.
- [21] A. Kiphairoj, P. Supanakoon, S. Promwong, and J. Takada, "Distortion Analysis of Ultra Wideband Pulse Waveforms with Meander Line Antenna," **International Symposium on Communications and Information Technologies 2006 (ISCIT 2006)**, F1F-4, Oct. 2006.

ภาคผนวก ก

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

- [1] Pichaya Supanakoon, **Auttaphol Kiphairoj**, Sathaporn Promwong and Jun-ichi Takada, “Distortion Analysis of UWB Pulse Waveforms with Trapezoidal Antenna,” The 2006 ECTI International Conference (ECTI-CON 2006), vol. 2, pp. 638-641, May 2006.
- [2] **Auttaphol Kiphairoj**, Pichaya Supanakoon, Sathaporn Promwong and Jun-ichi Takada, “Distortion Analysis of UWB Pulse Waveforms with Meander Line Antenna,” International Symposium on Communications and Information Technologies 2006 (ISCIT 2006), F1F-4, Oct. 2006.

ECTI-CON 2006

THE 2006 ECTI INTERNATIONAL CONFERENCE

ECTI
Association

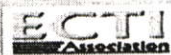
ECTI
2006

Enter to the Proceeding

Proceedings of the 2006 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference

May 10-13, 2006

Ubonburi Hotel, Ubon Ratchathani, THAILAND



Distortion Analysis of UWB Pulse Waveforms with Trapezoidal Antenna

Pichaya Supanakoon¹, Auttaphol Kiphairoj¹, Sathaporn Promwong¹ and Jun-ichi Takada²

¹Department of Information Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.
E-mail: {kspichay.s8061018,kpsathap}@kmitl.ac.th

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

ABSTRACT

In this paper, the distortion of ultra wideband (UWB) pulse waveforms with trapezoidal antenna is analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which satisfied the Federal Communications Commission (FCC) definition of UWB signal and FCC spectral masks for the indoor and outdoor limits, are considered. The frequency transfer function of trapezoidal antenna is evaluated by using measurement scheme. The correlation coefficient of each waveform at the specific angle is illustrated. From the results, we can see the distortion effect of each waveform caused by trapezoidal antenna along the specific angle.

1. INTRODUCTION

Recently, ultra wideband (UWB) radio technology has become an important topic for microwave communication because its potential is low cost and low power consumption properties [1]-[5]. UWB is different from other radio frequency (RF) technologies. Instead of using a narrow carrier frequency, UWB transmits pulses of power spectral density (PSD) in the range of the ultra wide frequency spectrum. The Federal Communications Commission (FCC) [6] in US specified that UWB signals have a frequency spectrum ranging from 3.1 to 10.6 GHz. The FCC defined the UWB signal as those which have a fractional bandwidth greater than 0.20 or occupied bandwidth greater than 500 MHz.

The power density of the UWB signal is considered to be noise for other communication systems because its power spectrum is below the part 15 noise limit. The UWB receiver collects the power of the received signal to rebuild the pulse. Therefore, UWB radio technology can coexist with other RF technologies without interference. Moreover, UWB radio technology is an ideal candidate that can be utilized for commercial, short-range, low power, low cost indoor communication systems such as wireless personal area networks (WPANs) [7].

Antenna is an important part of the UWB radio technology, for the reason that the conventional antennas are designed at only single frequency for using in general narrow band systems. If the impulse is excited do these antennas, the pulse will strongly distort and has time dispersion. For the UWB communication, the distortion between

two waveforms is considered in the time domain by using the correlation coefficient. The correlation coefficient is equal to 1 when the waveforms are identical and is decreased when the waveform is more differ from another. The trapezoidal antenna is developed for the UWB antenna [8]-[9]. Although this antenna has low VSWR in frequency range from 3.1 to 10.6 GHz, it dose not necessarily appropriate for UWB communication. The antenna can cause the strong distortion of UWB pulse. The effects of distortion caused by trapezoidal antenna are analyzed [10]. The modulated Gaussian waveform is used to study the distortion. But this waveform is not satisfied the FCC definition of UWB signal and FCC spectral masks for the indoor and outdoor limits and only modulated Gaussian waveform is considered.

In this paper, the distortion of UWB pulse waveforms with trapezoidal antenna is analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which satisfied FCC definition of UWB signal and FCC spectral masks for the indoor and outdoor limits [11], are considered. The frequency transfer function of trapezoidal antenna at the specific angle is evaluated by using measurement scheme that proposed in [12]-[15]. The correlation coefficient of each waveform at the specific angle is illustrated. From the results, we can see the distortion effect of each waveform caused by trapezoidal antenna along the specific angle.

This paper is organized as follows. Section 2 and 3, the UWB waveform and measurement scheme are briefly explained. Next, the distortion analysis is discussed in Sec. 4. The distortion analysis results are illustrated in Sec. 5. Finally, conclusions are discussed in Sec. 6.

2. UWB WAVEFORMS

For the UWB waveforms, the rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms are considered as the input waveform (r_i) in time domain and its spectral density (V_i) in frequency domain. These waveforms can satisfy the FCC definition of UWB signal and FCC spectral masks for the indoor and outdoor limits. The parameters obtained from maximum bandwidth, amplitude and average power optimizations, which proposed in [11], are used.

2.1 Rectangular Passband Waveform

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

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

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

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

2.2 Modulated Rectangular Waveform

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

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

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

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

2.3 Modulated Gaussian Waveform

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

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

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

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

3. MEASUREMENT SCHEME

The trapezoidal antenna is used to consider the distortion of UWB waveform. The structure and dimension of this antenna are shown in Fig. 1.

The frequency transfer function of UWB channel was measurement in frequency domain by using vector network analyzer (VNA) in an anechoic chamber. The frequency transfer function of trapezoidal antenna at each specific direction is evaluated by using measurement scheme that proposed in [12]-[15].

4. DISTORTION ANALYSIS

For the distortion analysis, correlation coefficient of each waveform at the specific angle of trapezoidal antenna is evaluated. The input waveform and its spectral density defined in Sec. 2 are used. The spectral density of radiated waveform (V_r) is computed by using

$$V_r(f) = V_i(f) \cdot H_a(f), \quad (7)$$

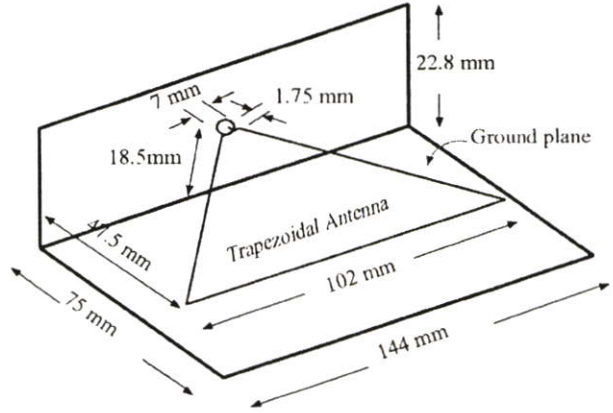


Fig.1: Structure and dimensions of trapezoidal antenna.

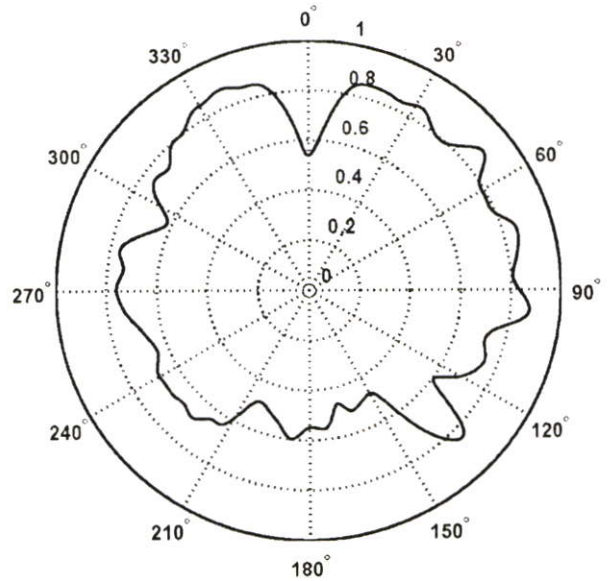


Fig.2: Correlation coefficient of rectangular passband waveform along the specific angle for the indoor and outdoor FCC spectral masks.

where H_a is the frequency transfer function of trapezoidal antenna obtained from measurement scheme described in Sec. 3

The radiated waveform (v_r) is calculated by using the inverse Fourier transform of its spectral density, which is

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi f t} df. \quad (8)$$

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

$$C = \frac{\max | \int_{-\infty}^{\infty} v_i^*(t) \cdot v_r(t + \tau) dt |}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |v_i(t)|^2 dt \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |v_r(t)|^2 dt}}. \quad (9)$$

5. ANALYSIS RESULTS

In this paper, the distortion of UWB waveforms with trapezoidal antenna is analyzed as the correlation coef-

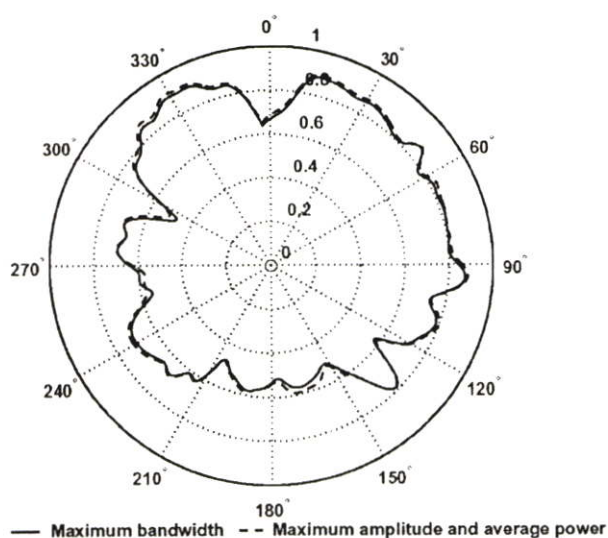


Fig.3: Correlation coefficient of modulated rectangular waveform along the specific angle for the indoor FCC spectral masks.

ficient. The correlation coefficient of the rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms are evaluated along the specific angle. The parameter of each waveform, which obtained from the maximum bandwidth, amplitude and average power optimizations satisfied the FCC spectral masks for indoor and outdoor limits [11], are used.

5.1 Rectangular Passband Waveform

For the indoor and outdoor limits, the parameter obtained from the maximum bandwidth, amplitude and average power optimizations are the same. Figure 2 shows the correlation coefficient of rectangular passband waveform along the specific angle for the indoor and outdoor FCC spectral masks. The maximum and minimum correlation coefficients are 0.88 and 0.47 at 51.3° and 166.5° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.71.

5.2 Modulated Rectangular Waveform

For the indoor limit, the parameters obtained from the maximum amplitude and average power optimizations are the same. The correlation coefficients of modulated rectangular waveform along the specific angle are shown in Fig. 3. For the maximum bandwidth optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.90 and 0.47 at 335.2° and 296.4° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.71. For the maximum amplitude and average power optimizations, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.91 and 0.48 at 328.8° and 205.7° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.72.

For the outdoor limit, the correlation coefficients of modulated rectangular waveform along the specific angle are shown in Fig. 4. The correlation coefficients obtained

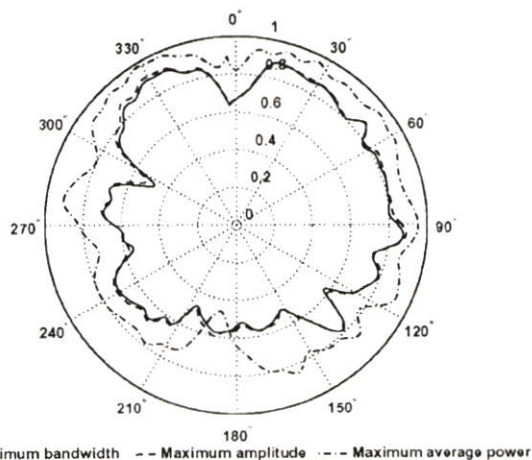


Fig.4: Correlation coefficient of modulated rectangular waveform along the specific angle for the outdoor FCC spectral masks.

from maximum bandwidth and amplitude optimizations are almost the same and less than that obtained from maximum average power optimization at almost all specific angle. For the maximum bandwidth optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.90 and 0.47 at 335.2° and 296.4° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.71. For the maximum amplitude optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.91 and 0.49 at 328.8° and 205.8° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.72. For the maximum average power optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.98 and 0.47 at 328.2° and 190.6° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.84.

5.3 Modulated Gaussian Waveform

For the indoor limit, the parameters obtained from the maximum amplitude and average power optimizations are the same. The correlation coefficients of modulated Gaussian waveform along the specific angle are shown in Fig. 5. For the maximum bandwidth optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.94 and 0.51 at 328.8° and 205.3° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.74. For the maximum amplitude and average power optimizations, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.95 and 0.47 at 15.0° and 205.5° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.75.

For the outdoor limit, the parameters obtained from the maximum amplitude and average power optimizations are the same. The correlation coefficients of modulated rectangular waveform along the specific angle are shown in Fig. 6. For the maximum bandwidth optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.94 and 0.51 at 328.8° and 205.3° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.74. For the maximum amplitude and average power optimizations, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.97 and 0.52 at

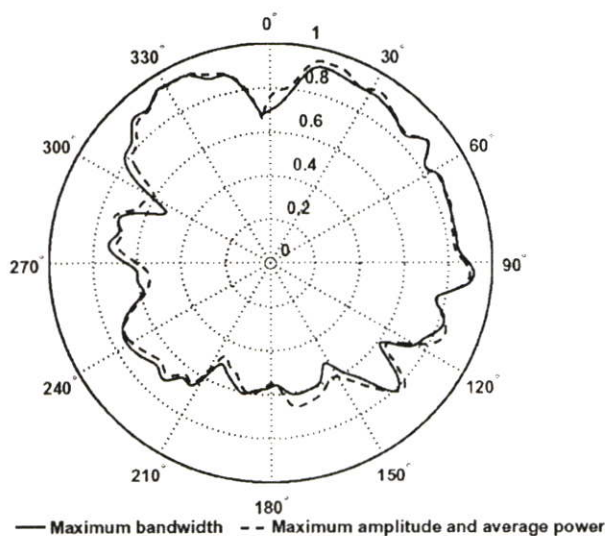


Fig. 5: Correlation coefficient of modulated Gaussian waveform along the specific angle for the indoor FCC spectral masks.

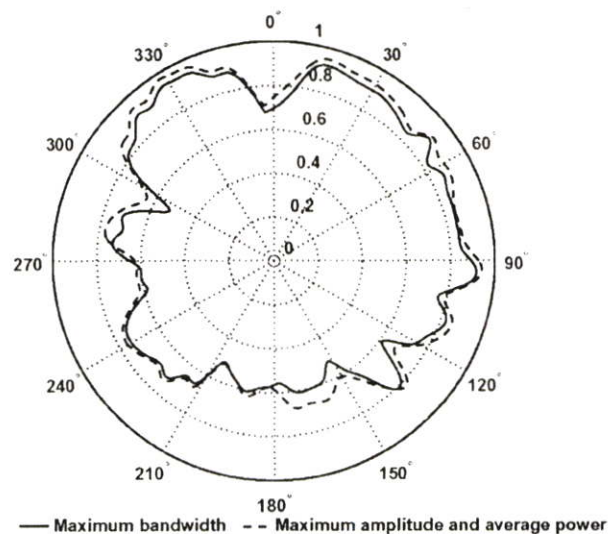


Fig. 6: Correlation coefficient of modulated Gaussian waveform along the specific angle for the outdoor FCC spectral masks.

328.5° and 205.1° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.78.

6. CONCLUSIONS

In this paper, the distortion of ultra wideband (UWB) pulse waveforms with trapezoidal antenna is analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which satisfied the FCC definition of UWB signal and FCC spectral masks for the indoor and outdoor limits, are considered. From the results, we can see the distortion characteristic of each UWB waveform along the specific angle of trapezoidal antenna. The wide bandwidth waveform trends to have more distortion. Therefore, the waveform obtain from the maximum bandwidth optimization has the distortion more than that obtained from the maximum amplitude and average power optimizations. Averagely, the modulated Gaussian waveform has lowest distortion and the modulated rectangular waveform has the distortion less than the rectangular passband waveform.

References

- [1] J. D. Taylor, "Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems," CRC press, London, UK, pp. 670, 1994.
- [2] OSD/DARPA, "Ultra-Wideband Radar Review Panel," Assessment of Ultra-Wideband (UWB) Technology. Arlington, VA.: DARPA, 1990.
- [3] K. Siwiak, "Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New Technology," *2001 Spring IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 1088-1093, May 2001.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [7] 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.
- [8] A. Duzdar and G. Kompa, "A Novel Trapezoidal Antenna Fed by a Ground Image Plane and Backed by A Reflector," *30th European Microwave Conference (EuMC) 2000*, vol. 2, pp. 1-4, Paris, France, Oct. 2000.
- [9] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, "Experimental Evaluation Scheme of UWB Antenna Performance," *Technical Meeting on Instrument and Measurement*, IEE Japan, IM-03-35, June 2003.
- [10] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, M. Chamchoy, A. Pradabphon and P. Tangtisanon, "Distortion Analysis of UWB Pulse Caused by Trapezoidal Antenna," *26th Electrical Engineering Conference (EECON-26)*, pp. 1494-1499, Nov. 2004.
- [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 2005)*, pp. 626-629, May 2005.
- [12] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' Transmission Formula for UWB Systems," *Technical Report of IEICE*, WBS2003-8/MW2003-20, May 2003.
- [13] S. Promwong, W. Hachitani, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Experimental Study of Ultra-Wideband Transmission Based on Friis' Transmission Formula," *The Third International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT) 2003*, vol. 1, pp. 467-470, Sept. 2003.
- [14] S. Promwong and J. Takada, "Free Space Link Budget Estimation Scheme for Ultra Wideband Impulse Radio with Imperfect Antennas," *IEICE Electronics Express*, vol. 1, no. 7, pp. 188-192, July 2004.
- [15] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, "Free Space Link Budget Estimation of UWB-IR Systems," *2004 International Workshop on Ultra Wideband Systems joint with Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (Joint UWBST & IWUWBS 2004)*, Kyoto, Japan, pp. 312-316, May 2004.

IEEE

International Symposium on Communications and Information Technologies 2006 (ISCIT 2006)

October 18-20, 2006
Grand Mercure Fortune Hotel, Bangkok, Thailand



Office WEB site: www.telecom.kmitl.ac.th/iscit2006

ACCESS

Sponsored by:
 NECTEC, Thailand
 ECTI, Thailand
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand
 IEEE Circuits and Systems Society
 Technical Sponsored by: IEICE, Japan

©2006 IEEE. Personal use of this material is permitted. However, permission to reprint/republish this material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution to servers or lists, or to reuse any copyrighted component of this work in other works must be obtained from the IEEE.

IEEE Catalog Number: 06EX1447 ISBN: 0-7803-9741-X Library of Congress: 2006927941

Distortion Analysis of Ultra Wideband Pulse Waveforms with Meander Line Antenna

Auttaphol Kiphairoj¹, Pichaya Supanakoon^{1,2}, Sathaporn Promwong^{1,2} and Jun-ichi Takada³

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.

Email: {s8061018,kspichay,kpsathap}@kmitl.ac.th

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

Email: takada@ide.titech.ac.jp

Abstract—In this paper, the distortion of ultra wideband (UWB) pulse waveforms with meander line antenna (MLA) is analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which satisfied the Federal Communications Commission (FCC) definition of UWB signal and FCC spectral masks for the indoor and outdoor limits, are considered. The frequency transfer function of MLA is evaluated by using measurement scheme. The correlation coefficient of each waveform at the specific angle is illustrated. From the results, we can see the distortion effect of each waveform caused by MLA along the specific angle.

I. INTRODUCTION

Recently, ultra wideband (UWB) radio technology has become an important topic for microwave communication because its potential is low cost and low power consumption properties [1]- [2]. UWB is different from other radio frequency (RF) technologies. Instead of using a narrow carrier frequency, UWB transmits pulses of power spectral density (PSD) in the range of the ultra wide frequency spectrum. The Federal Communications Commission (FCC) [3] in US specified that UWB signals have a frequency spectrum ranging from 3.1 to 10.6 GHz. The FCC defined the 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 power density of the UWB signal is considered to be noise for other communication systems because its power spectrum is below the part 15 noise limit. The UWB receiver collects the power of the received signal to rebuild the pulse. Therefore, UWB radio technology can coexist with other RF technologies without interference. Moreover, UWB radio technology is an ideal candidate that can be utilized for commercial, short-range, low power, low cost indoor communication systems such as wireless personal area networks (WPANs) [4].

Antenna is an important part of the UWB radio technology, for the reason that the conventional antennas are designed at only single frequency for using in general narrow band systems. If the impulse is excited do these antennas, the pulse will strongly distort and has time dispersion. For the UWB

communication, the distortion between two waveforms is considered in the time domain by using the correlation coefficient. The correlation coefficient is equal to 1 when the waveforms are identical and is decreased when the waveform is more differ from another. The trapezoidal antenna is developed for the UWB antenna [5]- [6]. Although this antenna has low VSWR in frequency range from 3.1 to 10.6 GHz, it dose not necessarily appropriate for UWB communication. The antenna can cause the strong distortion of UWB pulse. The effects of distortion caused by trapezoidal antenna are analyzed [7]. The modulated Gaussian waveform is used to study the distortion. After that, the rectangular passband, the modulated rectangular and the modulated Gaussian waveforms satisfied the FCC definition of UWB signal and FCC spectral masks for the indoor and outdoor limits are used to considered the distortion of trapezoidal antenna [8]. For commercial UWB antenna, the SMT-3TO10M-A meander line antenna (MLA) is developed by SkyCross company [9]. Therefore, the distortion analysis of this antenna for UWB communications is necessary.

In this paper, the distortion of UWB pulse waveforms with MLA is analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which satisfied the FCC definition of UWB signal and FCC spectral masks for the indoor and outdoor limits [10], are considered. The frequency transfer function of MLA at the specific angle is evaluated by using measurement scheme that proposed in [11]- [13]. The correlation coefficient of each waveform at the specific angle is illustrated. From the results, we can see the distortion effect of each waveform caused by MLA along the specific angle.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2 and 3, the UWB waveform and measurement scheme are briefly explained. Next, the distortion analysis is discussed in Sec.4. The distortion analysis results are illustrated in Sec. 5. Finally, conclusions are discussed in Sec.6.

II. WAVEFORM MODELS

For the UWB waveforms, the rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms are considered as the input waveform (v_i) in time domain and its

spectral density (V_i) in frequency domain. These waveforms can satisfy the FCC definition of UWB signal and FCC spectral masks for the indoor and outdoor limits. The parameters obtained from maximum bandwidth, amplitude and average power optimizations, which proposed in [10], are used.

A. Rectangular Passband Waveform

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

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

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

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

B. Modulated Rectangular Waveform

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

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

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

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

C. Modulated Gaussian Waveform

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

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

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

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

III. MEASUREMENT SCHEME

The SkyCross' SMT-3TO10M-A MLS is used to consider the distortion of UWB waveform. This antenna has been one of the first commercial product [9]. It is a miniature antenna with $16 \times 13.6 \times 3$ mm as shown in Fig. 1. The detailed structure and its operation are described in [14], [15].

The frequency transfer function of UWB channel was measured as S_{21} in frequency domain by using vector network analyzer (VNA) in an anechoic chamber. The VNA was operated in the response measurement mode, where Port-1 was the transmitter (Tx) port and Port-2 was the receiver (Rx) port. The calibration of VNA is done at the connectors of the cables to be connected to the antennas. Therefore, all the impairments of the antenna characteristics are included in the measurement results. The frequency transfer function of MLA at each specific direction is evaluated by using the scheme based on this measurement that proposed in [11]- [13].

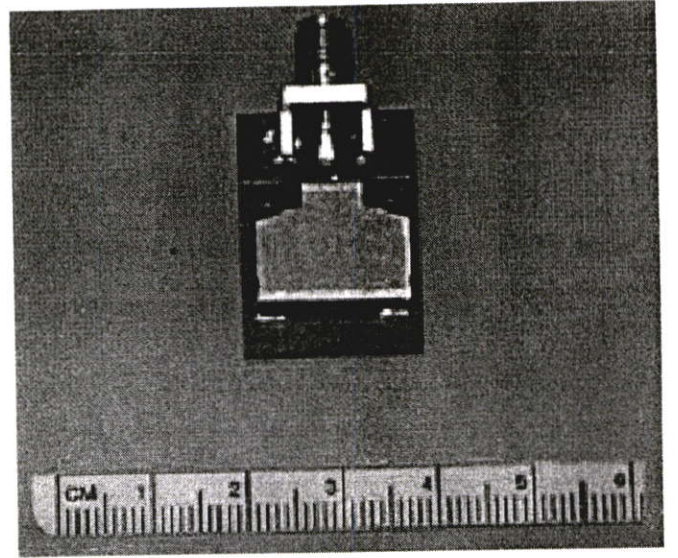


Fig. 1. Meander Line Antenna [9].

IV. DISTORTION ANALYSIS

For the distortion analysis, correlation coefficient of each waveform at the specific angle of MLA is evaluated. The input waveform and its spectral density defined in Sec. 2 are used. The spectral density of radiated waveform (V_r) is computed by using

$$V_r(f) = V_i(f) \cdot H_a(f), \quad (7)$$

where H_a is the frequency transfer function of MLA obtained from measurement scheme described in Sec. 3

The radiated waveform (v_r) is calculated by using the inverse Fourier transform of its spectral density, which is

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi f t} df. \quad (8)$$

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

$$C = \frac{\max |\int_{-\infty}^{\infty} v_i^*(t) \cdot v_r(t + \tau) dt|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |v_i(t)|^2 dt \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |v_r(t)|^2 dt}}. \quad (9)$$

V. ANALYSIS RESULTS

In this paper, the distortion of UWB waveforms with MLA is analyzed as the correlation coefficient. The correlation coefficient of the rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms are evaluated along the specific angle. The parameter of each waveform, which obtained from the maximum bandwidth, amplitude and average power optimizations satisfied the FCC spectral masks for indoor and outdoor limits [10], are used.

A. Rectangular Passband Waveform

For the indoor and outdoor limits, the parameter obtained from the maximum bandwidth, amplitude and average power

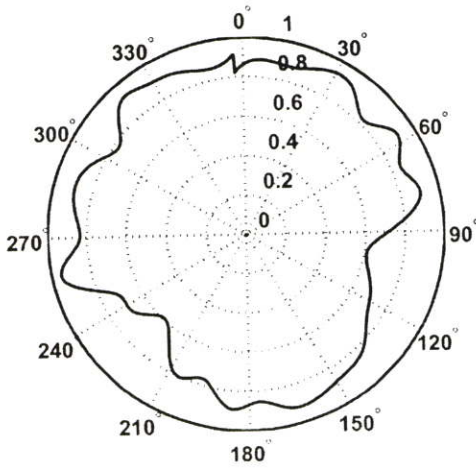


Fig. 2. Correlation coefficient of rectangular passband waveform along the specific angle for the indoor and outdoor FCC spectral masks.

optimizations are the same. Fig. 2 shows the correlation coefficient of rectangular passband waveform along the specific angle for the indoor and outdoor FCC spectral masks. The maximum and minimum correlation coefficients are 0.95 and 0.59 at 258.3° and 224.9° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.77.

B. Modulated Rectangular Waveform

For the indoor limit, the parameters obtained from the maximum amplitude and average power optimizations are the same. The correlation coefficients of modulated rectangular waveform along the specific angle are shown in Fig. 3. For the maximum bandwidth optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.92 and 0.62 at 258.9° and 224.9° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.77. For the maximum amplitude and average power optimizations, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.92 and 0.64 at 259.0° and 101.1° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.78.

For the outdoor limit, the correlation coefficients of modulated rectangular waveform along the specific angle are shown in Fig. 4. The correlation coefficients obtained from maximum bandwidth and amplitude optimizations are almost the same and less than that obtained from maximum average power optimization at almost all specific angle. For the maximum bandwidth optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.92 and 0.62 at 258.9° and 224.9° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.77. For the maximum amplitude optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.92 and 0.63 at 258.7° and 225.0° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.77. For the maximum average power optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.97 and 0.63 at 319.3° and 125.8° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.80.

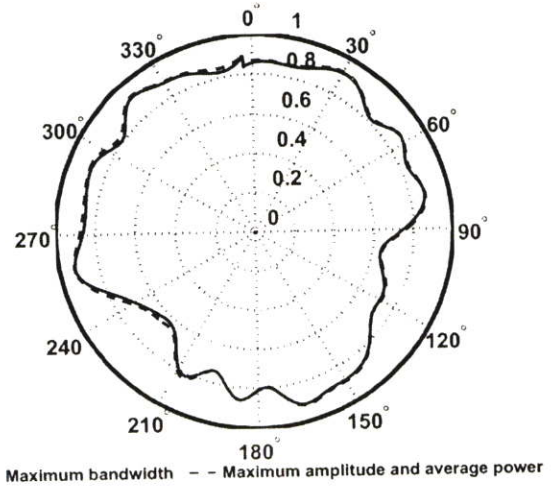


Fig. 3. Correlation coefficient of modulated rectangular waveform along the specific angle for the indoor FCC spectral masks.

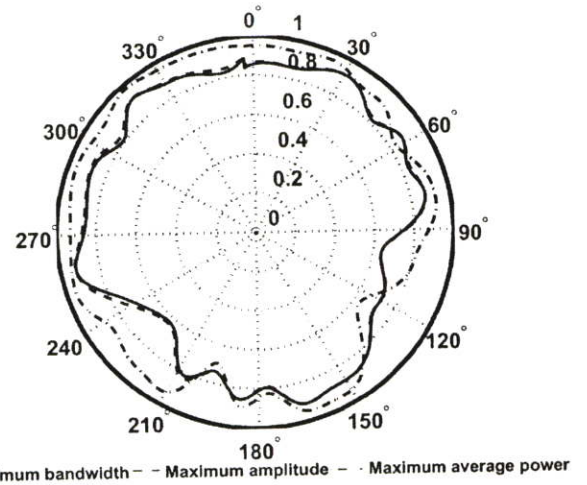


Fig. 4. Correlation coefficient of modulated rectangular waveform along the specific angle for the outdoor FCC spectral masks.

C. Modulated Gaussian Waveform

For the indoor limit, the parameters obtained from the maximum amplitude and average power optimizations are the same. The correlation coefficients of modulated Gaussian waveform along the specific angle are shown in Fig. 5. For the maximum bandwidth optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.95 and 0.66 at 319.4° and 101.4° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.80. For the maximum amplitude and average power optimizations, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.96 and 0.68 at 30.5° and 101.1° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.82.

For the outdoor limit, the parameters obtained from the maximum amplitude and average power optimizations are the same. The correlation coefficients of modulated rectangular waveform along the specific angle are shown in Fig. 6. For

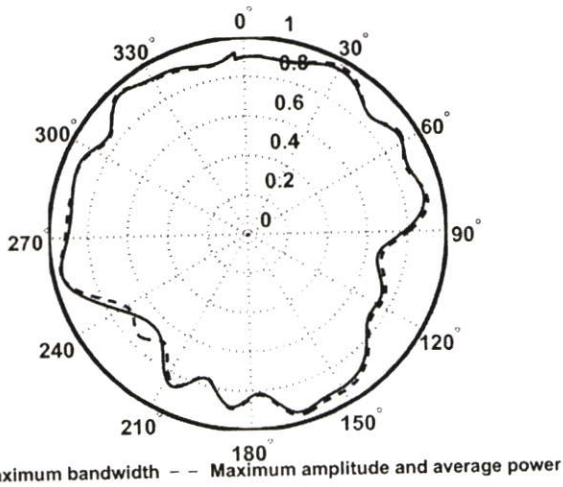


Fig. 5. Correlation coefficient of modulated Gaussian waveform along the specific angle for the indoor FCC spectral masks.

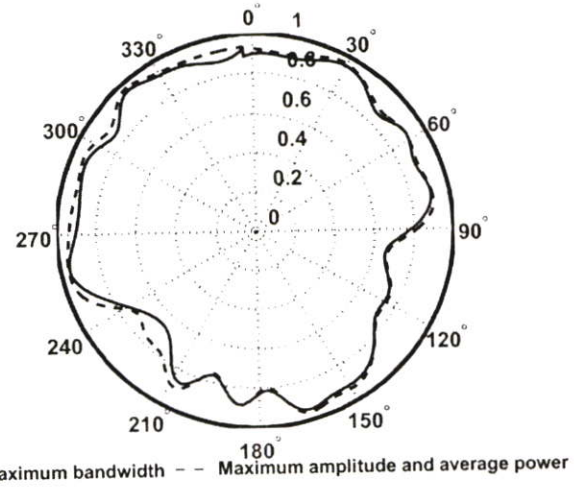


Fig. 6. Correlation coefficient of modulated Gaussian waveform along the specific angle for the outdoor FCC spectral masks.

the maximum bandwidth optimization, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.95 and 0.66 at 319.4° and 101.4° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.80. For the maximum amplitude and average power optimizations, the maximum and minimum correlation coefficients are 0.97 and 0.66 at 319.1° and 101.9° angles, respectively. The mean of correlation coefficient is 0.81.

VI. CONCLUSION

In this paper, the distortion of UWB pulse waveforms with MLA is analyzed. The rectangular passband, modulated rectangular and modulated Gaussian waveforms, which satisfied the FCC definition of UWB signal and FCC spectral masks for the indoor and outdoor limits, are considered. From the results, we can see the distortion characteristic of each UWB waveform along the specific angle of MLA. The wide bandwidth waveform trends to have more distortion. Therefore, the waveform obtain from the maximum bandwidth optimization has the distortion more than that obtained from the maximum amplitude and average power optimizations. Averagely, the modulated Gaussian waveform has lowest distortion and the modulated rectangular waveform has the distortion less than the rectangular passband waveform.

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] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems," *First Report*, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [4] J. Farserotu, A. Hutter, F. Platbrood, J. Gerrits and A. Pollini, "UWB Transmission and MIMO Antenna Systems for Nomadic User and Mobile PAN," *Wireless Personal Communications*, no. 22, pp. 197-317, 2002.
- [5] A. Duzdar and G. Kompas, "A Novel Trapezoidal Antenna Fed by a Ground Image Plane and Backed by A Reflector," *30th European Microwave Conference (EuMC) 2000*, vol. 2, pp. 1-4, Paris, France, Oct. 2000.
- [6] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, "Experimental Evaluation Scheme of UWB Antenna Performance," *Technical Meeting on Instrument and Measurement*, IEE Japan, IM-03-35, June 2003.
- [7] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, M. Chamchoy, A. Pradabphon and P. Tangtisanon, "Distortion Analysis of UWB Pulse Caused by Trapezoidal Antenna," *26th Electrical Engineering Conference (EECON)*, pp. 1494-1499, Nov. 2004.
- [8] P. Supanakoon, A. Kiphairoj, S. Promwong, and J. Takada, "Distortion Analysis of UWB Pulse Waveforms with Trapezoidal Antenna" *The 2006 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology International Conference (ECTI-CON)*, vol. 2, pp. 638-641, May 2006.
- [9] Skycross Inc., "3.1 – 10 GHz UWB antenna for commercial UWB applications," <http://www.skycross.com/>
- [10] 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.
- [11] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' Transmission Formula for UWB Systems," *Technical Report of IEICE*, WBS2003-8/MW2003-20, May 2003.
- [12] S. Promwong, W. Hachitani, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Experimental Study of Ultra-Wideband Transmission Based on Friis' Transmission Formula," *The Third International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT) 2003*, vol. 1, pp. 467-470, Sept. 2003.
- [13] S. Promwong, W. Hachitani and J. Takada, "Free Space Link Budget Estimation of UWB-IR Systems," *2004 International Workshop on Ultra Wideband Systems joint with Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (Joint UWBST & IWUWBS 2004)*, Kyoto, Japan, pp. 312-316, May 2004.
- [14] "Meander Line Loaded Antenna," *U.S. Patent 5,790,080*, Aug. 1998.
- [15] "Wideband Meander Line Loaded Antenna," *U.S. Patent 6,492,953 B2*, Dec. 2002.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอรรถพล กีไพโรจน์
วัน เดือน ปีเกิด	25 ตุลาคม 2525
ที่อยู่	1/2 หมู่ 2 ตำบลโคกกลอย อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา 84120
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2544	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตพระนครเหนือ
พ.ศ. 2547	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง