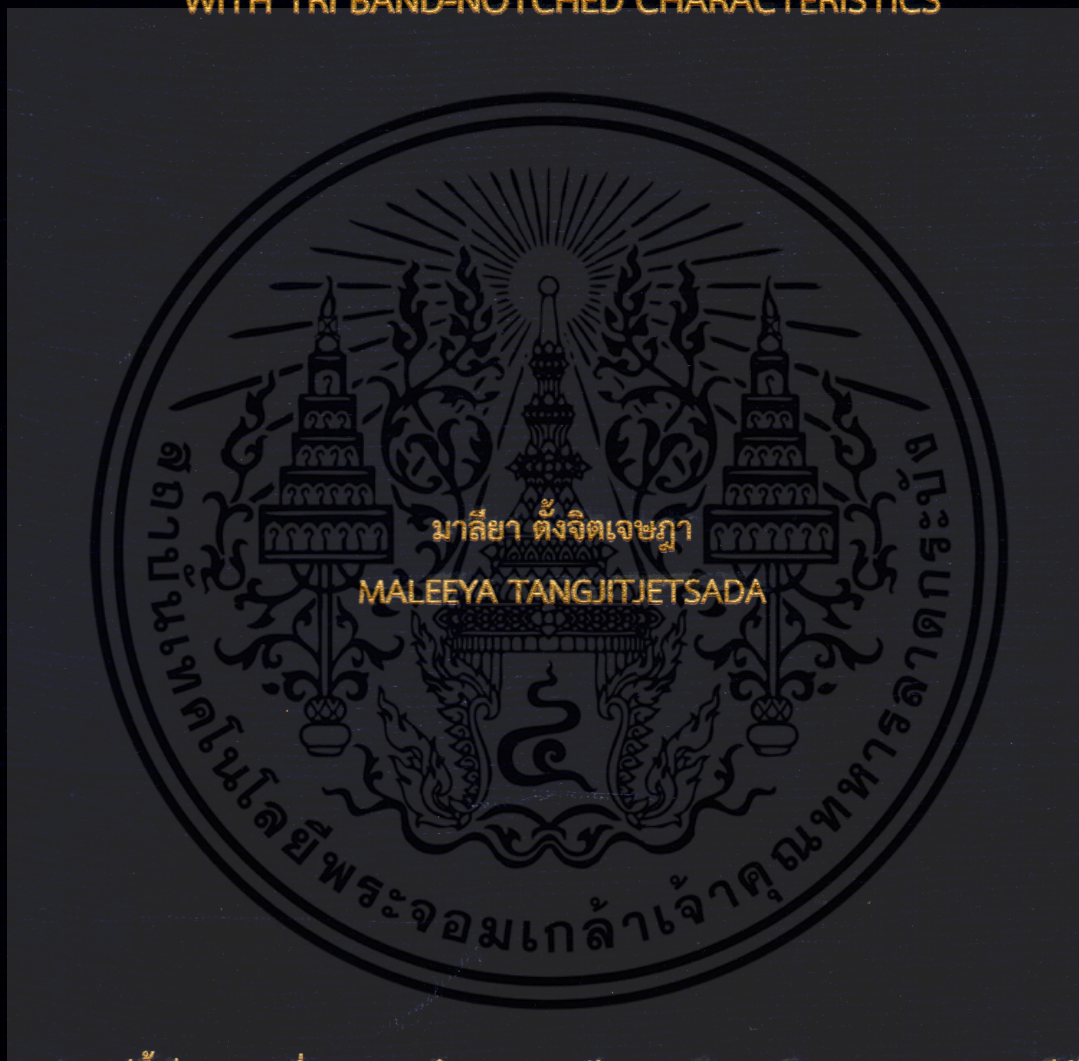


การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบไมลาร์ฟิล์ม สำหรับระบบอัลตรา
ไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์สามย่านความถี่

DESIGN OF COMPACT MILAR THIN-FILM UWB ANTENNA
WITH TRI BAND-NOTCHED CHARACTERISTICS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-D-018-158

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบไมลาร์ฟิล์ม สำหรับระบบอัลตรา
ไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์สามย่านความถี่

DESIGN OF COMPACT MILAR THIN-FILM UWB ANTENNA
WITH TRI BAND-NOTCHED CHARACTERISTICS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-D-018-158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF COMPACT MILAR THIN-FILM UWB ANTENNA
WITH TRI BAND-NOTCHED CHARACTERISTICS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบไม่ล่าฟิล์มสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์สามย่านความถี่

Thesis Title Design of Compact Milar Thin - Film UWB Antenna with Tri Band-Notched Characteristics

นักศึกษา นางสาวมาลีญา ตั้งจิตเจษฎา

รหัสประจำตัว 50060005

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-D-018-158

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุรพันธุ์	เอื้อไพบูลย์	
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์	หล้าสกุล	
รศ.ดร.กนก	เจนจิระพงศ์เวช	
ดร.วันวิสา	ชัชวงษ์	
รศ.ดร.ชวลิต	เบญจางคประเสริฐ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 15.00-17.00 น.
 สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-402

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 วันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบไมเลาฟิล์ม สำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์สามย่านความถี่
นักศึกษา	นางสาวมาลีญา ตั้งจิตเจษฎา
รหัสประจำตัว	50060005
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่โครงข่ายระบบสื่อสาร ตัวสายอากาศมีขนาด 34.5×27.3 มม.². ใช้ไมเลาฟิล์มที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.2หนา 0.3 มม. เป็นวัสดุฐานรอง ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม IE3D โดยสายอากาศประกอบด้วยช่องเปิดรูปแปดเหลี่ยมทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่น มีสตริปรูปร่างคล้ายส้อมช่วยในการปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์ และบริเวณเหนือส่วนแพร่กระจายคลื่นทำการเจาะช่องเปิดแคบสำหรับนอตช์ย่านความถี่ WLAN (5.1-5.8 GHz) และเจาะช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำบริเวณขอบด้านบนของสายอากาศเพื่อนอตช์ย่านความถี่ WiMAX (3.3-3.7 GHz) นอกจากนี้ยังเพิ่มการนอตช์ความถี่ด้วยการกรีดช่องแคบๆ ระหว่างช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องเปิดแคบเพื่อนอตช์ย่านความถี่สำหรับระบบสื่อสารดาวเทียม X-Band Downlink (7.25-7.75 GHz) เมื่อทำการสร้างและวัดผลทดสอบสายอากาศ พบว่าสายอากาศมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ตั้งแต่ 2.8-13.5 GHz นั่นคือสายอากาศสามารถทำงานได้ตลอดทั้งย่านอัลตราไวด์แบนด์ และสามารถนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ได้ และเมื่อเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D พบว่าค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้มีความสอดคล้องกัน และตัวสายอากาศมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ขนาดเล็ก บาง วัสดุที่ใช้มีความยืดหยุ่นและราคาถูก เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ในระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบพกพา

Thesis Title	Design of Compact Milar Thin-Film UWB Antenna with Tri Band-Notched Characteristics
Student	Ms. Maleeya Tangjitjetsada
Student ID.	50060005
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chawalit Benjangkaprasert

ABSTRACT

This paper presents a new compact thin-film ultra-wideband (UWB) antenna with band-notched characteristics. The antenna achieves compact dimension which is $34.5 \times 27.3 \text{ mm}^2$. This antenna is printed on Milar[®] Polyester film of which substrate is 0.3 mm thick with dielectric constant of 3.2. The antenna contains an octagonal slot with fork-like tuning stub. The dual band-notched characteristics are realized by two difference types of slots. Narrow slot and U-shape slot are etched on the radiator to obtain two notched bands in the range of 5.1-5.8 GHz for WLAN and 3.3-3.7 GHz for WiMAX, respectively. In addition to achieve the band-notched characteristic of X-band satellite communication system. The slit is etched on the radiator between octagonal slot and narrow slot. The antenna operates in the frequency range of 2.8-13.5 GHz with impedance matching cover entire bandwidth and reasonable radiation properties. It also exhibits triple band-notched characteristics, first notched frequency is in the range of 5.1-5.8 GHz (WLAN band), second notched frequency is in the range of 3.3-3.7 (WiMAX band) and the last notched frequency is in the range of 7.25-7.75 GHz (X-band Downlink). The antenna is designed and simulated by using the commercial IE3D software, which is based on the method of moments. The antenna was fabricated and measured using Agilent E363B PNA network analyzers. The characteristic of the fabricated antenna show high correlation with that obtained from the simulation. The results confirm that proposed antenna can achieve notch performance for WLAN, WiMAX and X-band satellite communication systems and is also suitable for various portable UWB applications.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ชวลิต เบญจางคประเสริฐ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ไพฑูรย์ รักเหลือ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบสายอากาศและทำการทดลอง

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ การสื่อสารไร้สาย ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับการให้ซอฟต์แวร์โปรแกรมจำลอง IE3D และเครื่องมือวัดในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และผ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

มาลียา ตั้งจิตเจษฎา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์.....	5
2.1.1 ระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	5
2.1.2 คุณสมบัติพื้นฐานของสัญญาณและระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	6
2.1.3 การประยุกต์ใช้งานระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	9
2.1.4 ข้อบังคับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์.....	10
2.1.5 มาตรฐานเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์.....	13
2.2 สายอากาศอัลตราไวด์แบนด์.....	15
2.2.1 ความเป็นมาของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์.....	15
2.2.2 คุณลักษณะของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์.....	16
2.3 สายอากาศไมโครสตริป.....	20
2.3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป.....	21
2.4 สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม.....	22
2.4.1 การหาคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง.....	23
2.4.2 การหาคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ชนิดมีกราวด์ด้านล่าง.....	25
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่.....	29
3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ความถี่ย่าน WLAN และ WiMAX.....	29
3.1.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	29
3.1.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX.....	35
3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ความถี่ย่าน WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink.....	39
3.2.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	39
3.2.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ความถี่.....	48
3.3 การวิเคราะห์การจำลองการแพร่กระจายกระแส.....	61
3.3.1 การจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ความถี่ WLAN และ WiMAX.....	62
3.3.2 การจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink.....	63
3.4 การวิเคราะห์การจำลองคุณลักษณะอื่น ๆ ของสายอากาศ.....	63
3.4.1 การวิเคราะห์การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล.....	64
3.4.2 การวิเคราะห์การจำลองอัตราขยายของสายอากาศ.....	66
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	68
4.1 การสร้างสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ความถี่ในย่าน WiMAX และ WLAN.....	68
4.2 การวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของสายอากาศ.....	69
4.2.1 การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	69
4.2.2 การวัดค่าแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล.....	74
4.2.3 การวัดค่าอัตราขยาย.....	78
4.2.4 การวัดค่าประวิงเวลากลุ่ม.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	82
5.1 สรุป.....	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	83
5.3 แนวทางการพัฒนา.....	84
เอกสารอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก ก.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งช่องความถี่ตามมาตรฐาน IEEE802.15.4a.....	14
3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ ($f_c = 6.85 \text{ GHz}$).....	35
3.2 พารามิเตอร์ของช่องเปิดสำหรับการนอตช์ย่านความถี่ WLAN ($f_{nc} = 5.5 \text{ GHz}$) และ WiMAX ($f_{nc} = 3.5 \text{ GHz}$).....	37
3.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX.....	39
3.4 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ ($f_c = 6.85 \text{ GHz}$).....	47
3.5 พารามิเตอร์ของช่องเปิดแคบสำหรับการนอตช์ย่านความถี่ WLAN ($f_{n1} = 5.5 \text{ GHz}$).....	51
3.6 พารามิเตอร์ของช่องเปิดตัวยู สำหรับการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX ($f_{n2} = 3.5 \text{ GHz}$).....	55
3.7 พารามิเตอร์ของช่องแคบ สำหรับการนอตช์ย่านความถี่ X-Band Downlink ($f_{n3} = 7.5 \text{ GHz}$).....	60
3.8 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink.....	61
4.1 ค่า S11 และ VSWR ของสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยม เมื่อพิจารณา ณ ค่ากลางของความถี่นอตช์ของสายอากาศที่สร้างจริงและจากการจำลอง.....	72
4.2 ค่า S11 และ VSWR ของสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม เมื่อพิจารณา ณ ค่ากลางของความถี่นอตช์ของสายอากาศที่สร้างจริงและจากการจำลอง.....	73

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	ลักษณะการส่งสัญญาณระหว่างเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และ เทคโนโลยีแถบความถี่แคบ.....	6
2.2	การแบ่งแถบความถี่ OFDM ของระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	7
2.3	เทคนิคการกล้ำสัญญาณ IR-UWB.....	7
2.4	(ก) เกาส์เซียนพัลส์และอนุพันธ์ (ข) ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของเกาส์เซียนพัลส์.....	9
2.5	การผลิตพัลส์แคเรียร์.....	9
2.6	ค่าการแพร่กระจายกำลังงาน UWB ของ FCC สำหรับสัญญาณภายในและ ภายนอกอาคาร.....	11
2.7	เปรียบเทียบการแพร่กระจายกำลังงาน UWB ภายในอาคารระหว่าง ECC กับ FCC.....	11
2.8	เปรียบเทียบการแพร่กระจายกำลังงาน UWB ภายในอาคารระหว่าง ประเทศญี่ปุ่นกับ FCC.....	12
2.9	ย่านความถี่ที่มีการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายต่าง ๆ.....	13
2.10	ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังในการส่งสัญญาณ.....	15
2.11	การสะท้อนกลับระหว่างสายอากาศและสายนำสัญญาณเมื่อ (ก) เปิดวงจร (ข) ลัดวงจร.....	17
2.12	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศอุดมคติ (ก) แบบทิศทาง (ข) แบบรอบตัว.....	18
2.13	(ก) ผลตอบสนองทางเฟส (ข) ค่าประวิงเวลากลุ่ม.....	19
2.14	เปรียบเทียบจำนวนระลอกคลื่นกับขนาดการประวิงเวลา.....	20
2.15	โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป.....	21
2.16	โครงสร้างสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง.....	22
2.17	โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง.....	23
2.18	การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม.....	23
3.1	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบ อัลตราไวด์แบนด์.....	30
3.2	ผลการจำลอง Return loss ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับ ระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	35
3.3	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบ อัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX.....	36
3.4	ผลการจำลอง Return loss ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับ ระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX.....	38
3.5	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับ ระบบอัลตราไวด์แบนด์.....	40
3.6	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ L_s	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_s	42
3.8	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ L_{ss}	42
3.9	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_s	43
3.10	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ L_p	43
3.11	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ L_c	44
3.12	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ L_t	44
3.13	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_p	45
3.14	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_c	45
3.15	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_t	46
3.16	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ T	46
3.17	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ F และ S	47
3.18	ผลการจำลอง Return loss ระหว่างสายอากาศไมโครสตริปแบบ ช่องเปิดสี่เหลี่ยมและแปดเหลี่ยม.....	47
3.19	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ ที่นอตซ์ความถี่ WLAN.....	49
3.20	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับความยาวของช่องเปิดแคบ L_{n1}	50
3.21	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับความกว้างของช่องเปิดแคบ W_{n1}	50
3.22	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับระยะระหว่างสายอากาศ ช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องเปิดแคบ G_1	51
3.23	ผลการจำลอง Return loss ของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN.....	51
3.24	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ ที่นอตซ์ความถี่ย่าน WiMAX และ WLAN.....	52
3.25	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ L_{n2}	53
3.26	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ W_{n2}	54
3.27	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ G_u	54
3.28	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ L_u	55
3.29	ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ G_2	55
3.30	ผลการจำลอง Return loss ของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX และ WLAN.....	56
3.31	เปรียบเทียบผลการจำลอง Return loss ระหว่างสายอากาศไมโครสตริปสำหรับ ระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมกับแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ ย่านความถี่ WiMAX และ WLAN.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.32 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ ที่นอตช์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink.....	57
3.33 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ $Ln3$	58
3.34 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ $Wn3$	59
3.35 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ $G3$	59
3.36 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ $G1$	60
3.37 ผลการจำลอง Return loss ของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink.....	60
3.38 ผลการจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด สี่เหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX.....	62
3.39 ผลการจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด แปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX.....	62
3.40 ผลการจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด แปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink.....	63
3.41 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตรา ไวด์แบนด์ (ก) แบบช่องสี่เหลี่ยม (ข) แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม ที่มีการนอตช์ย่าน ความถี่ WLAN และ WiMAX เมื่อพิจารณาที่ความถี่รีโซแนนซ์ 4.5 GHz.....	64
3.42 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตรา ไวด์แบนด์ (ก) แบบช่องสี่เหลี่ยม (ข) แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม ที่มีการนอตช์ย่าน ความถี่ WLAN และ WiMAX เมื่อพิจารณาที่ความถี่รีโซแนนซ์ 7 GHz.....	65
3.43 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตรา ไวด์แบนด์ (ก) แบบช่องสี่เหลี่ยม (ข) แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม ที่มีการนอตช์ย่าน ความถี่ WLAN และ WiMAX เมื่อพิจารณาที่ความถี่รีโซแนนซ์ 10 GHz.....	65
3.44 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปแบบแปดเหลี่ยมสำหรับ ระบบอัลตราไวด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink เมื่อพิจารณาที่ความถี่รีโซแนนซ์ (ก) 4.5 GHz (ข) 10 GHz.....	66
3.45 ผลการจำลองอัตราขยายสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบ ช่องเปิดสี่เหลี่ยมและแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX และ WLAN.....	67
3.46 ผลการจำลองอัตราขยายสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบ ช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink..	67
4.1 สายอากาศที่สร้างจริง.....	68
4.2 การวัดสายอากาศที่สร้างจริง.....	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ผลการวัดค่า Return loss ของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง.....	70
4.4 ผลการวัดค่า VSWR ของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง.....	71
4.5 ผลการวัดค่า Return loss ของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง.....	71
4.6 ผลการวัดค่า VSWR ของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง.....	71
4.7 ผลการวัดค่า Return loss ระหว่างสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิด แปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ที่สร้างจริง.....	72
4.8 ผลการวัดค่า Return loss ของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง....	73
4.9 ผลการวัดค่า VSWR ของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง.....	73
4.10 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศในห้อง Anechoic chamber.....	74
4.11 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศในระนาบ (ก) XZ และ (ข) YZ.....	74
4.12 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ณ ความถี่ต่าง ๆ ในระนาบ XZ และ YZ.....	75
4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ณ ความถี่ต่าง ๆ ในระนาบ XZ และ YZ.....	76
4.14 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ณ ความถี่ต่าง ๆ ในระนาบ XZ และ YZ.....	77
4.15 ผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง.....	78
4.16 ผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่าน ความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง.....	79
4.17 ผลการวัดค่าอัตราขยายระหว่างสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยม ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ที่สร้างจริง.....	79
4.18 ผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง....	80
4.19 ค่าประวิงเวลากลุ่มของสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ความถี่ ในย่าน WLAN และ WiMAX.....	80
4.20 ค่าประวิงเวลากลุ่มของสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ความถี่ ในย่าน WLAN และ WiMAX.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด X1 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.21	ค่าประวิงเวลากลุ่มของสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ความถี่ ในย่าน WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink.....	81
5.1	การเปรียบเทียบสายอากาศที่สร้างจริงทั้ง 3 โครงสร้าง.....	83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อXIIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายได้ถูกพัฒนาและมีการนำไปใช้ในงานที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานสื่อสารส่วนบุคคลหรือระบบเครือข่ายภายในองค์กร เช่น ระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ และระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย เป็นต้น และผลจากการพัฒนาในช่วงศตวรรษที่ผ่านมาคือ ขนาดของอุปกรณ์เล็กลง การส่งผ่านข่าวสารเร็วขึ้น และอัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้น เมื่อเทคโนโลยีก้าวหน้ามากขึ้น อุปกรณ์ที่ใช้มีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นสายอากาศซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานหนึ่งที่สำคัญของระบบสื่อสารไร้สาย จึงต้องมีการพัฒนาให้มีความสอดคล้องกับอุปกรณ์และความต้องการของเทคโนโลยี

ระบบสื่อสารไร้สายที่กำลังมีการพัฒนาอย่างมากระบบหนึ่ง คือ ระบบสื่อสารไร้สายโดยเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra Wideband: UWB) เนื่องจากเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มีการส่งข้อมูลในลักษณะของพัลส์แคบ ๆ ผ่านย่านความถี่แถบกว้าง ทำให้สามารถถ่ายโอนข้อมูลจำนวนมากในระยะทางใกล้ ๆ ได้ โดยมีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลสูงมาก แต่กลับใช้ความหนาแน่นกำลังงานเชิงสเปกตรัมในระดับต่ำ แต่ปัญหาอย่างหนึ่งของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ คือ ช่วงความถี่ที่ซ้ำซ้อนกับความถี่ของเทคโนโลยีโครงข่ายเดิมที่มีการใช้งานมาก่อนหน้าแล้ว ซึ่งจะทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญญาณของระบบสื่อสารเดิมกับสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ได้ ถึงแม้ว่ากำลังของการแพร่กระจายคลื่นในระบบอัลตราไวด์แบนด์จะมีขนาดต่ำ แต่เพื่อป้องกันการแทรกสอดของสัญญาณที่อาจจะทำให้เกิดการรบกวนสัญญาณของโครงข่ายไร้สายที่ใช้ความถี่ซ้ำซ้อนกัน การออกแบบสายอากาศให้มีการนอตช์ย่านความถี่ที่ซ้ำกัน จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหา นี้ ดังนั้นเพื่อให้การรับส่งสัญญาณมีประสิทธิภาพที่สุด จึงได้เกิดการพัฒนารูปแบบสายอากาศที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนสัญญาณของระบบสื่อสารเดิม โดยเฉพาะย่านความถี่ที่มีการใช้งานมาก นั่นคือในช่วง 3.3-3.7 GHz สำหรับโครงข่ายไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access: WiMAX) และ 5.1-5.8 GHz สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพยายามสร้างสายอากาศที่มีคุณลักษณะนอตช์ความถี่ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การเจาะช่องเปิดรูปร่างต่าง ๆ [1-5] การทำสตัป (Stub) [6] การเพิ่มพาราซิติก (Parasitic) [7] การเจาะร่องบนระนาบกราวน์ [8] การใช้โครงสร้างแบบ EBG (Electromagnetic Bandgap) [9] การเจาะร่องบนสายอากาศ [10] และการนำวิธีต่างๆ ข้างต้นมาผสมผสานกัน [11-12] อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่กล่าวมายังมีข้อด้อยอยู่บ้าง เช่น สามารถนอตช์ได้เพียงความถี่เดียว หรือบางงานวิจัยที่สามารถนอตช์ได้สองความถี่หรือหลายความถี่ แต่กลับมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและสร้างได้ยากหรือความถี่ที่นอตช์ได้ไม่ใช่นาน WiMAX และ WLAN ทั้งสองความถี่

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษา วิเคราะห์ ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีขนาดกะทัดรัด มีความยืดหยุ่น และมีการนอตช์ความถี่ในย่านที่ต้องการ โดยได้ออกแบบและสร้างสายอากาศใน 3 โครงสร้าง คือ โครงสร้างที่หนึ่งสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีสตัปรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมและป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม ทำหน้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร่กระจายสัญญาณที่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ และเพิ่มการนอตซ์ความถี่ย่านโครงข่าย WLAN ด้วยการเจาะช่องเปิดแคบบริเวณด้านบนของส่วนแพร่กระจายคลื่น หลังจากนั้นจึงเพิ่มช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำบริเวณขอบด้านบนของสายอากาศเพื่อนอตซ์ความถี่ย่านโครงข่าย WiMAX ซึ่งช่องเปิดที่เจาะเพิ่มเข้าไปทั้งสองช่องนี้สามารถปรับขนาดเพื่อควบคุมความถี่ที่ต้องการนอตซ์ได้ และโครงสร้างที่สองเป็นการพัฒนาสายอากาศโครงสร้างเดิมให้มีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เพิ่มมากขึ้น โดยทำการปรับบริเวณขอบด้านข้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยมให้มีลักษณะลาดเอียงเป็นรูปแปดเหลี่ยม เนื่องจากโครงสร้างสายอากาศที่มีลักษณะลาดเอียง โค้งงอหรือการเพิ่มขอบมุมจะทำให้อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศกว้างขึ้นอันเนื่องมาจากผลของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของสายอากาศ หลังจากนั้นจึงเพิ่มการนอตซ์ความถี่ในย่าน WLAN และ WiMAX ด้วยการเจาะช่องเปิดแคบและช่องเปิดรูปตัวยูบริเวณเดียวกับโครงสร้างสายอากาศเดิม และโครงสร้างสุดท้ายได้พัฒนาจากสายอากาศโครงสร้างที่สอง โดยเพิ่มการนอตซ์ย่านความถี่ของระบบสื่อสารดาวเทียมสำหรับกิจการทหาร X-Band Downlink ในช่วง 7.25-7.75 GHz ด้วยการกรีดช่องแคบ ๆ บนสายอากาศบริเวณระหว่างช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องเปิดแคบ ซึ่งการออกแบบสายอากาศมีการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป IE3D รวมทั้งสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ และผลที่ได้จากการวัดสายอากาศที่สร้างจริงและการจำลองมีลักษณะสอดคล้องกัน โดยสายอากาศที่ได้มีขนาดเล็ก รูปร่างไม่ซับซ้อน มีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ดี และมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ครอบคลุมตลอดย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ (2.8-13.5 GHz) ยกเว้นบริเวณที่มีการนอตซ์ความถี่

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ออกแบบ ทำการสร้างและวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ที่มีการใช้งานในระบบสื่อสารเดิม ที่มีขนาดเล็ก มีความยืดหยุ่น เหมาะสมต่อการใช้งานกับอุปกรณ์ชนิดพกพาและมีคุณลักษณะของสายอากาศในระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่ดี เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์รับส่งข้อมูลในการสื่อสารระยะใกล้ในบริเวณชุมชนที่มีการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายที่หลากหลาย

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์นั้นสามารถทำงานในย่านความถี่กว้างยิ่ง คือ 3.1-10.6 GHz ซึ่งหากนำไปใช้งานในบริเวณที่มีโครงข่ายการสื่อสารไร้สายเดิมอยู่ เช่น WLAN หรือ WiMAX จะทำให้เกิดการแทรกสอดสัญญาณระหว่างโครงข่ายได้ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้สายอากาศซึ่งเป็นส่วนแรกของการรับส่งข้อมูลจึงถูกออกแบบให้สามารถนอตซ์ความถี่ในย่านที่มีการใช้งานอยู่แล้ว โดยการนอตซ์สายอากาศนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเจาะช่องเปิด การเพิ่มพาราซิติกหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายอากาศในบริเวณย่านความถี่ที่ต้องการนอตซ์ ซึ่งการทำเช่นนี้เป็นการรบกวนการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่นั้น เนื่องจากทำให้การกระจายกระแสในบริเวณย่านความถี่ที่นอตซ์นี้แปรปรวน และไม่สามารถแผ่คลื่นในช่วงความถี่ที่นอตซ์ได้ ดังนั้นจึงไม่ทำให้เกิดการรบกวนสัญญาณของโครงข่ายไร้สายเดิม

1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

1.4.1 เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์

เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ คือ เทคโนโลยีสื่อสารด้วยการส่งคลื่นอัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์ที่แคบมากและเป็นที่รู้กันดีว่าพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบ ๆ จะมีสเปกตรัมที่กว้างมาก นั่นคือสามารถส่งผ่านข้อมูลได้ด้วยอัตราเร็วสูงและมีกำลังงานต่ำ และเนื่องจากขนาดสัญญาณพัลส์ที่แคบมากนี้เองจึงทำให้สามารถแยกตัวสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ออกจากสัญญาณที่ไม่ต้องการจากการเกิดการสะท้อนหลายเส้นทาง (Multipath reflection) ได้ ยิ่งไปกว่านั้นองค์ประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ยังมีประสิทธิภาพในการแพร่กระจายผ่านวัสดุอย่างอิฐและซีเมนต์ได้อีกด้วย จากข้อดีต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์กำลังได้รับความสนใจในการพัฒนาอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นอย่างมาก และสายอากาศเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สิ่งสำคัญโดยทั่วไปในการออกแบบสายอากาศ คือ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการรับ-ส่งสัญญาณได้อย่างครอบคลุมและวัดทิศทางของสัญญาณได้ถูกต้อง แต่สายอากาศโดยทั่วไปไม่สามารถใช้กับระบบอัลตราไวด์แบนด์ได้ ซึ่งในการออกแบบและสร้างสายอากาศสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์นั้น มีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

1. สายอากาศสามารถรับ-ส่งสัญญาณได้ครอบคลุมย่านความถี่ 3.1-10.6 GHz
2. สายอากาศควรมีขนาดเล็ก เพื่อความสะดวกต่อการใช้งานกับอุปกรณ์พกพา
3. สายอากาศควรจะสามารถสร้างง่ายและมีราคาถูก

1.4.2 สายนำสัญญาณระนาบร่วม (Co-planar waveguide: CPW)

สายนำสัญญาณระนาบร่วมเป็นสายส่งสัญญาณบนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับส่งสัญญาณไมโครเวฟ โครงสร้างของสายนำสัญญาณประกอบด้วยสตริป (Strip) อยู่ตรงกลางด้านบนของวัสดุฐานรอง (Substrate) ด้านข้างทั้ง 2 ด้านของสตริปเป็นระนาบกราวด์ และมีร่องแคบ ๆ กั้นระหว่างแผ่นสตริปกับระนาบกราวด์ ลักษณะการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าบนสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมจะมีลักษณะแบบ Quasi-TEM (Quasi-Transverse Electromagnetic) ข้อดีของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม คือ สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุได้ง่ายมาก เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการเจาะรูผ่านฐานรองไดอิเล็กทริกเพื่อเชื่อมต่อกราวด์ให้กับอุปกรณ์เหล่านั้น สามารถนำมาต่อรวมในวงจรเดียวกันกับไมโครสตริปได้ง่าย การผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ (Dispersion) และค่าความสูญเสีย (Loss) ต่ำ จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้นทำให้โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม เหมาะกับการทำเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของสายอากาศระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ความถี่

1.5.2 ออกแบบและจำลองผลสายอากาศสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ความถี่ในย่าน WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink โดยใช้โปรแกรม IE3D

1.5.3 สร้างสายอากาศสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ความถี่ในย่าน WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink และวัดค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ที่สำคัญของสายอากาศ

1.5.4 วิเคราะห์ผลการวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศต้นแบบเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศระบบอัลตราไวด์แบนด์

1.6.2 ออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์

1.6.3 ออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ความถี่ในย่าน WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink

1.6.4 สร้างและทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ความถี่ในย่าน WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ ซึ่งเนื้อหาที่สำคัญในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ คุณลักษณะของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป และสายนำสัญญาณระนาบร่วม

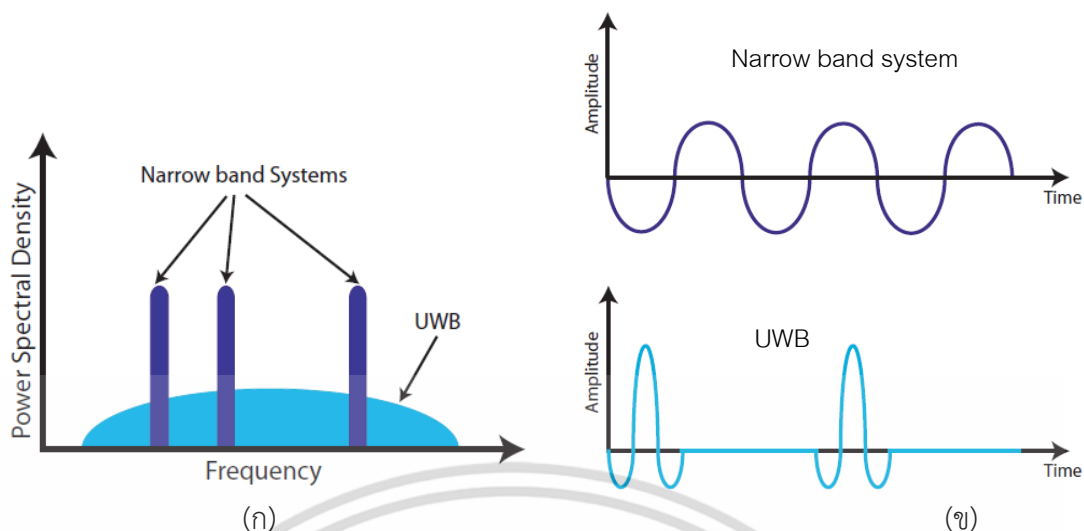
2.1 เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์

ที่ผ่านมาได้มีการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศในหลากหลายรูปแบบสำหรับการนำไปใช้งานด้วยวัตถุประสงค์ต่าง ๆ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะเป็นการออกแบบสายอากาศสำหรับใช้ในย่านความถี่แคบ สำหรับสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ซึ่งมีการใช้งานในย่านความถี่กว้างนั้นเพิ่งจะมีการศึกษาเป็นอย่างมากในช่วงเวลาไม่กี่ปีมานี้ และก่อนที่จะกล่าวถึงทฤษฎีสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ เพื่อให้เข้าใจระบบสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์มากยิ่งขึ้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความหมายและเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ ข้อบังคับและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ระบบอัลตราไวด์แบนด์

ระบบสื่อสารไร้สายอัลตราไวด์แบนด์ คือ เทคโนโลยีสื่อสารด้วยการส่งคลื่นที่มีแถบความถี่กว้างยิ่ง ซึ่งเกิดจากสัญญาณพัลส์ที่แคบมากหรืออิมพัลส์ ในอดีตที่ผ่านมาเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือทางทหาร ซึ่งในปัจจุบันมีผู้ใช้และผู้ให้บริการด้านอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสารจำนวนมากที่มีความสนใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ เนื่องจากจุดเด่นที่สำคัญของเทคโนโลยีนี้ คือ เป็นระบบการสื่อสารที่มีต้นทุนต่ำ ใช้กำลังงานในระดับต่ำ ในขณะที่มีอัตราเร็วของการรับส่งข้อมูลสูงมาก [13] โดยเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์นี้ มีการรับส่งสัญญาณที่แตกต่างจากเทคโนโลยีแถบความถี่แคบ (Narrowband) เมื่อพิจารณาในขอบเขตความถี่ เทคโนโลยีแถบความถี่แคบจะมีการแพร่กระจายสัญญาณในลักษณะของการแบ่งแยกความถี่ แต่เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์จะมีการแพร่กระจายสัญญาณพัลส์ตลอดช่วงความถี่ที่มีแบนด์วิดท์กว้างมากและมีกำลังงานต่ำ ซึ่งทำให้ไม่เกิดสัญญาณรบกวนแบบแทรกสอด และเมื่อพิจารณาในขอบเขตเวลาเทคโนโลยีแถบความถี่แคบจะส่งสัญญาณในลักษณะเป็นสัญญาณไซน์ต่อเนื่อง ในขณะที่เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์จะส่งสัญญาณในลักษณะของขบวนพัลส์จำนวนมากต่อวินาที โดยมีความกว้างพัลส์อยู่ในระดับนาโนวินาที (10^{-9} วินาที) ซึ่งลักษณะการส่งสัญญาณที่แตกต่างกันของทั้งสองระบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ลักษณะการส่งสัญญาณระหว่างเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และเทคโนโลยีแถบความถี่แคบเมื่อพิจารณาในขอบเขต (ก) ความถี่ (ข) เวลา

2.1.2 คุณสมบัติพื้นฐานของสัญญาณและระบบอัลตราไวด์แบนด์

2.1.2.1 สเปกตรัมความถี่สัญญาณ UWB

ในปี ค.ศ. 2002 คณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสารของสหรัฐอเมริกา (Federal Communication Commission: FCC) ได้กำหนดให้ย่านความถี่ระหว่าง 3.1-10.6 GHz เป็นย่านความถี่สำหรับส่งผ่านสัญญาณในระบบอัลตราไวด์แบนด์ได้โดยไม่ต้องขอใบอนุญาต [14] โดยค่ากำลังงานแผ่ประสิทธิภาพแบบไอโซทรอปิก (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) ไม่ควรเกิน -41.3 dBm และได้กำหนดให้สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์จะต้องมีแถบความถี่อย่างน้อย 500 MHz หรือมีค่าสัดส่วนแบนด์วิดท์ (Fractional Bandwidth: B_f) ในการส่งสัญญาณไม่น้อยกว่า 0.20 เท่าของค่าความถี่กลาง ซึ่งสัดส่วนแบนด์วิดท์ (B_f) ของสัญญาณสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (2.1)

$$B_f = \frac{BW}{f_c} = \frac{2(f_h - f_l)}{(f_h + f_l)} \quad (2.1)$$

โดย BW คือ แถบความถี่ที่ใช้งานในระบบอัลตราไวด์แบนด์

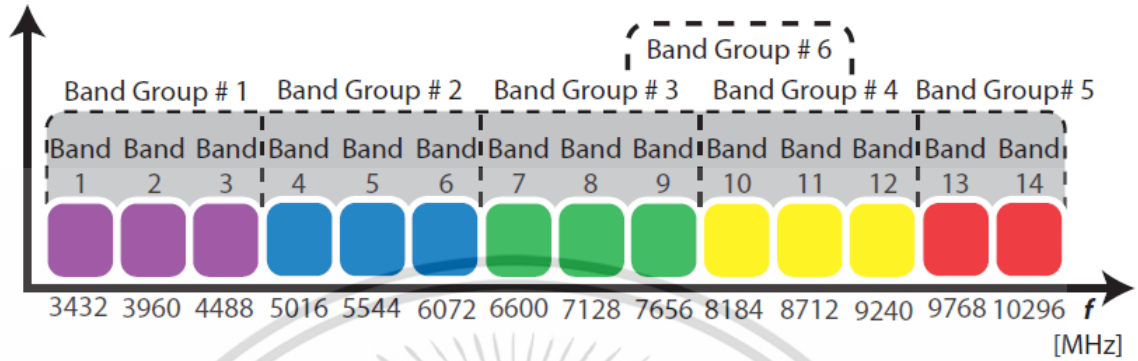
f_h คือ ความถี่สูงสุด f_c คือ ความถี่กลาง และ f_l คือ ความถี่ต่ำสุดของแถบความถี่ที่ใช้งานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่ระดับกำลังสัญญาณเป็น -10 dB

2.1.2.2 Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MB-OFDM)

MB-OFDM เป็นการแบ่งแถบความถี่ออกเป็นความถี่ย่อย ๆ โดยแต่ละความถี่ย่อยจะมีสัญญาณพาห์แตกต่างกัน เพื่อให้การใช้งานความถี่เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด ในการทำ MB-OFDM ของระบบอัลตราไวด์แบนด์นั้นแถบความถี่อัลตราไวด์แบนด์ขนาด 7.5 GHz จะถูกแบ่งเป็นแถบความถี่ย่อย 14 แบนด์ แต่ละแบนด์มีขนาด 528 MHz โดยแถบความถี่ย่อย 12 แบนด์แรกจะถูกแบ่งเป็น 4 กลุ่ม แต่ละกลุ่มมี 3 แบนด์และแถบความถี่ย่อย 2 แบนด์สุดท้ายรวมกันเป็นกลุ่มที่ 5 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มสุดท้ายกลุ่มที่ 6 เกิดจากการรวมกันตั้งแต่แบนด์ที่ 9 ถึงแบนด์ที่ 11 ซึ่งการแบ่งความถี่แบบนี้แสดงดังรูปที่ 2.2 ในการส่งผ่านสัญญาณข่าวสารนั้น OFDM จะกระจายข้อมูลไปบนสัญญาณพาหะที่แต่ละความถี่



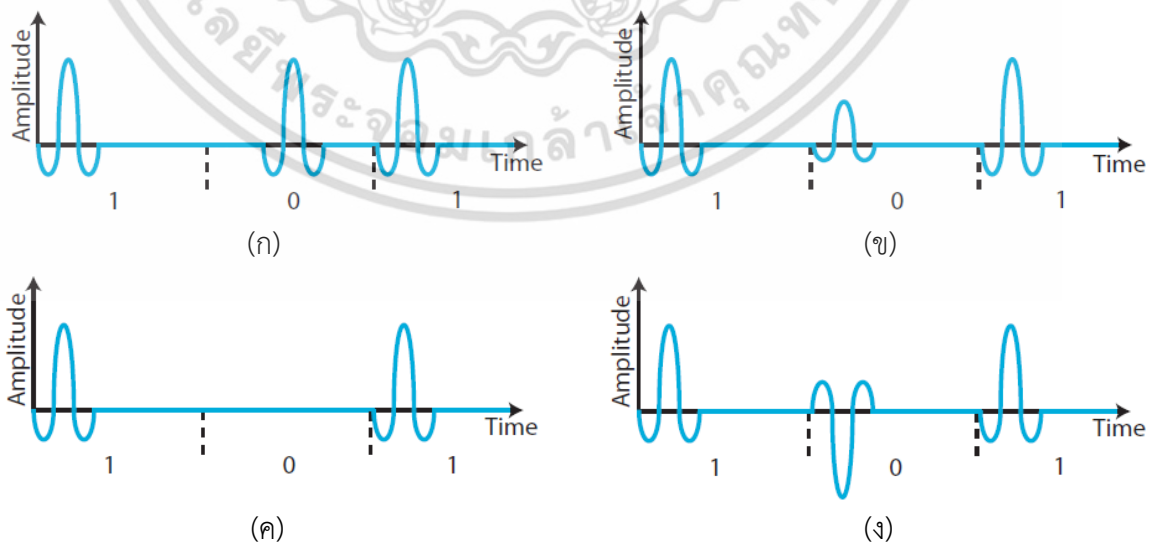
รูปที่ 2.2 การแบ่งแถบความถี่ OFDM ของระบบอัลตราไวด์แบนด์

2.1.2.3 Impulse Radio UWB (IR-UWB)

สัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างมากของระบบ UWB ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) นั้นสามารถสร้างได้จากสัญญาณพัลส์แคบ ๆ ดังแสดงในรูป 2.1 (ข) ซึ่งพัลส์ UWB นี้เรียกว่า Impulse Radio UWB โดยพัลส์ที่ส่งจะแทนบิตของสัญญาณข่าวสาร และตามข้อกำหนดของ FCC ความกว้างของพัลส์ต้องมีขนาดอย่างน้อย 2 นาโนวินาที (เพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ 500 MHz) และมีขนาดเล็ก (มีกำลังงานต่ำ)

2.1.2.4 การกล้ำสัญญาณ (Modulation)

การกล้ำสัญญาณอิมพัลส์นั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่มีการศึกษาและนิยมใช้กล้ำสัญญาณอิมพัลส์ค่อนข้างมากแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เทคนิคการกล้ำสัญญาณ IR-UWB (ก) PPM (ข) PAM (ค) OOK และ (ง) BPSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก). PPM (Pulse Position Modulation) เป็นเทคนิคการกล้ำสัญญาณที่นิยมใช้กับสัญญาณ IR-UWB มากที่สุด สัญญาณ PPM จะเกิดพัลส์ ณ ตำแหน่งเวลาที่แตกต่างกัน และพัลส์ที่ตำแหน่งต่างกันจะแทนค่าลอจิกบิตที่ต่างกัน จากรูปที่ 2.3 (ก) บิต 1 ถูกส่ง ณ ตำแหน่งเริ่มต้นคาบเวลา ในขณะที่บิต 0 ถูกส่ง ณ ตำแหน่งกลางคาบเวลา

ข). PAM (Pulse Amplitude Modulation) การกล้ำสัญญาณแบบ PAM จะเกิดพัลส์ที่มีขนาดแตกต่างกันตามลอจิกของบิต จากรูปที่ 2.3 (ข) จะเห็นว่าบิต 1 ถูกแทนด้วยพัลส์ที่มีขนาดสูงกว่าพัลส์ของบิต 0

ค). OOK (On - Off Keying) จัดเป็นการกล้ำสัญญาณที่ง่ายที่สุดและใช้กำลังงานต่ำ สัญญาณ OOK แสดงดังรูปที่ 2.3 (ค) โดยสัญญาณพัลส์จะแทนบิต 1 และบิต 0 ไม่มีสัญญาณ

ง). BPSK (Binary Phase Shift Keying) สัญญาณพัลส์ของ BPSK จะเปลี่ยนเฟสตามลอจิกของบิต จากรูปที่ 2.3 (ง) จะเห็นว่าพัลส์ของบิต 1 มีเฟสตรงกันข้าม (180°) กับพัลส์ของบิต 0

การส่งสัญญาณพัลส์ IR-UWB สามารถใช้เทคนิคการกล้ำสัญญาณที่มีความซับซ้อนมากกว่านี้ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของข่าวสารที่ต้องการส่งและอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณที่ใช้

2.1.2.5 Pulse shapes

ระบบอัลตราไวด์แบนด์จะทำการส่งผ่านสัญญาณอิมพัลส์ ซึ่งครอบคลุมความถี่ย่านอัลตราไวด์แบนด์ และมีกำลังงานต่ำ โดยรูปร่างของพัลส์จะขึ้นอยู่กับวงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณและสายอากาศ ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับ-ส่งคลื่น ชนิดของพัลส์ที่สามารถใช้งานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ และมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของ FCC นั้นมีหลายชนิด แต่ที่นิยมและรู้จักกันโดยทั่วไป คือ เกาส์เซียนพัลส์

- สัญญาณพัลส์แบบเกาส์ (Gaussian pulse) เป็นสัญญาณที่นิยมนำมาใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ เนื่องจากมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนมากนักและสามารถสร้างได้ง่าย ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.2)

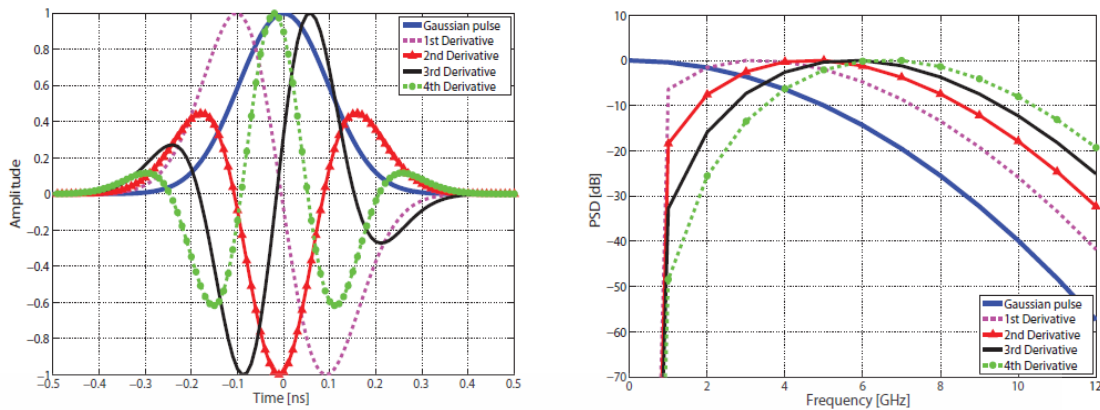
$$T(t) = K_1 e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ K_1 คือแอมพลิจูดของเกาส์เซียนพัลส์ t คือช่วงเวลาของพัลส์ และ τ คือความกว้างของพัลส์ สัญญาณที่ได้จากสมการ (2.2) คือสัญญาณพัลส์เบสแบนด์ (Baseband pulse) และค่าความถี่กลางอยู่ที่ 0 Hz จะเห็นว่าสัญญาณที่ได้มีส่วนประกอบของกระแสตรง (DC component) ซึ่งไม่สามารถส่งสัญญาณผ่านสายอากาศออกไปได้ ดังนั้นเพื่อปรับสัญญาณให้มีความถี่สูงขึ้นและตัดองค์ประกอบไฟตรง สามารถทำได้โดยนำสมการที่ (2.2) มาทำอนุพันธ์จะได้ตามสมการที่ (2.3)

$$T_n(t) = K_1 \frac{d^n}{dt^n} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \quad (2.3)$$

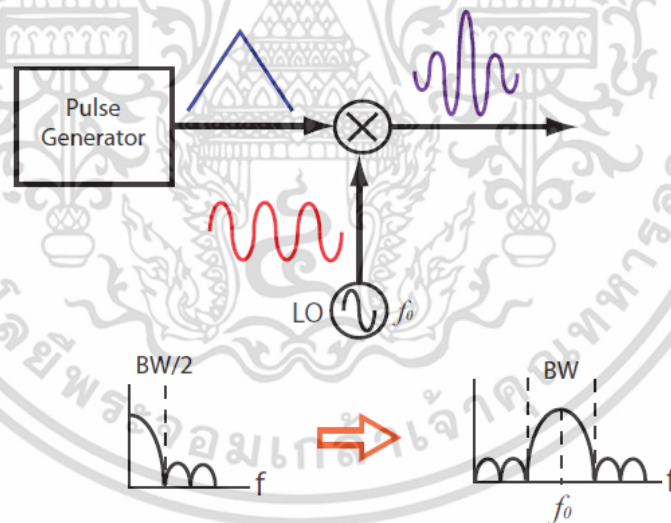
รูปที่ 2.4 แสดงสัญญาณเกาส์เซียนพัลส์และอนุพันธ์ของมันในขอบเขตเวลา และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของเกาส์เซียนพัลส์ในขอบเขตความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 (ก) เกาส์เซียนพัลส์และอนุพันธ์ (ข) ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของเกาส์เซียนพัลส์

Carrier-based วิธีที่ง่ายที่สุดในการสร้างพัลส์อัลตราไวด์แบนด์ คือการสร้างสัญญาณพัลส์เบสแบนด์ จากนั้นทำการแปลงความถี่ขึ้นไปให้ได้ย่านที่เราต้องการ รูปที่ 2.5 แสดงการสร้างสัญญาณพัลส์ UWB โดยเริ่มจากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ผลิตสัญญาณพัลส์เบสแบนด์ จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกนำไปเพิ่มความถี่ โดยการคูณกับสัญญาณความถี่สูงที่ผลิตจากโลคอลออสซิลเลเตอร์ สัญญาณพัลส์แคเรียร์ (Carrier-based pulse) ที่ได้จะมีแถบความถี่เท่ากับ 528 MHz ซึ่งก็คือแถบความถี่ที่ถูกจัดสรรบนแถบความถี่ย่อยของ MB-OFDM



รูปที่ 2.5 การผลิตพัลส์แคเรียร์

2.1.3 การประยุกต์ใช้งาน

จากข้อดีต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว (ต้นทุนต่ำ ใช้กำลังงานในระดับต่ำ และมีอัตราเร็วของการรับส่งข้อมูลสูงมาก) เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาระบบสื่อสารไร้สายแบบแถบกว้างและสามารถประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารต่าง ๆ ได้มากมาย โดยสามารถแบ่งกลุ่มของการประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การสื่อสารที่มีการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูง : สถาบันวิชาชีพวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE) ได้กำหนดมาตรฐานการใช้งาน ได้แก่ มาตรฐาน IEEE 802.15.3a สำหรับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ในการสื่อสารระยะสั้นที่มีการส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงโดยมีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลต่ำสุดที่ 110 Mbps ที่ระยะทาง 10 เมตร เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อระยะสั้นแทนสายเคเบิล เช่น การเชื่อมต่อระยะสั้นเพื่อถ่ายโอนข้อมูลภาพ ข้อมูลมัลติมีเดีย หรือข้อมูลอื่น ๆ ที่ใช้ในระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless personal area networks: WPAN)

- ระบบสื่อสารที่มีการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วต่ำ : มาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็นมาตรฐานสำหรับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ในการสื่อสารระยะสั้นที่มีการส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วต่ำ สามารถใช้กำลังส่งสัญญาณต่ำและระบบการทำงานมีความซับซ้อนน้อยมาก มาตรฐานนี้สนับสนุนการใช้งานเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ ที่ย่านความถี่ไม่มีลิขสิทธิ์และสามารถใช้งานย่านความถี่นี้ได้โดยสากล เช่น การใช้งานเทคโนโลยี UWB ด้านเซนเซอร์หรือตัวตรวจจับ ของเล่นที่โต้ตอบได้ และรีโมทคอนโทรล เป็นต้น

นอกจากการประยุกต์ใช้งานตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว ระบบอัลตราไวด์แบนด์ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับเทคโนโลยีอื่น ๆ อีก เช่น เทคโนโลยีเรดาร์ และเทคโนโลยีที่ใช้ในการระบุสิ่งต่าง ๆ ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Identification: RFID)

2.1.4 ข้อบังคับเทคโนโลยี UWB

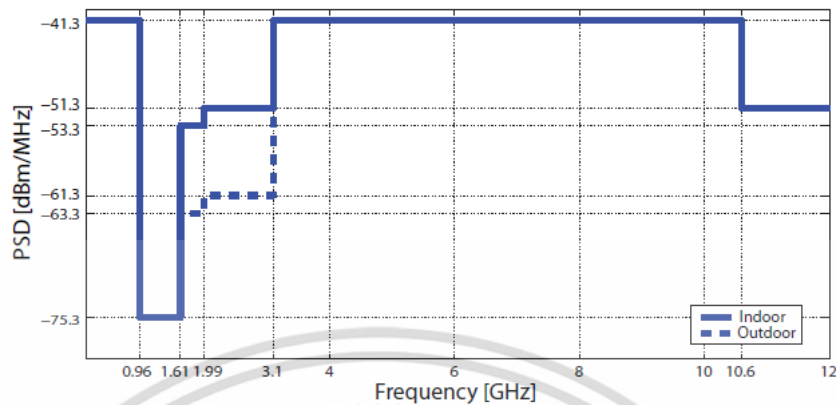
โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ เรามักจะนึกถึงเทคโนโลยีการสื่อสารที่มีความถี่อยู่ในช่วง 3.1-10.6 GHz และมีแถบความถี่ในการส่งสัญญาณมากกว่า 500 MHz หรือมากกว่า 20% ของค่าความถี่กลาง มีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังในการส่งสัญญาณแต่ละแถบความถี่ไม่เกิน 41.3 dBm อย่างไรก็ตามนี้เป็นข้อกำหนดขององค์การกิจการโทรคมนาคม (Federal Communications Commission: FCC) ซึ่งเป็นหน่วยงานของประเทศสหรัฐอเมริกา ทำให้มีผลบังคับเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกาเท่านั้น โดยระหว่างปี ค.ศ. 2002 ถึง 2007 ได้มีการกำหนดกรอบการใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ในยุโรปและเอเชียบางส่วน โดยข้อกำหนดที่ได้รับความสนใจ ได้แก่ การกำหนดค่ามาตรฐานการแพร่กระจายกำลังงาน (Spectral mask) และองค์ประกอบอื่นของระบบเพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ไปรบกวนสัญญาณของระบบสื่อสารเดิมที่มีอยู่แล้ว ซึ่งข้อกำหนดที่สำคัญขององค์กรที่มีความสำคัญในการกำหนดทิศทางของระบบโทรคมนาคมจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2.1.4.1 ข้อบังคับของประเทศสหรัฐอเมริกา

สหรัฐอเมริกาเป็นประเทศแรกที่ได้พัฒนาข้อกำหนดและกรอบการทำงานของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ ในปี ค.ศ. 2002 คณะกรรมการ FCC ได้จัดสรรย่านความถี่ใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์โดยไม่ต้องมีการขออนุญาตอยู่ในช่วง 3.1-10.6 GHz มีแบนด์วิดท์ 7.5 GHz และสามารถครอบครองแถบความถี่ในการส่งสัญญาณมากกว่า 500 MHz หรือมากกว่า 20% ของค่าความถี่กลาง และมีการรับส่งสัญญาณในรูปแบบของสัญญาณพัลส์ ซึ่งมีความกว้างของพัลส์อยู่ในช่วง 100 ns – 300 ns มีค่าการแพร่กระจายกำลังงานในการส่งสัญญาณตามรูปที่

2.6 โดยค่าการแพร่กระจายกำลังงานของอุปกรณ์ UWB ภายในอาคารและอุปกรณ์พกพาที่แต่ละแถบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

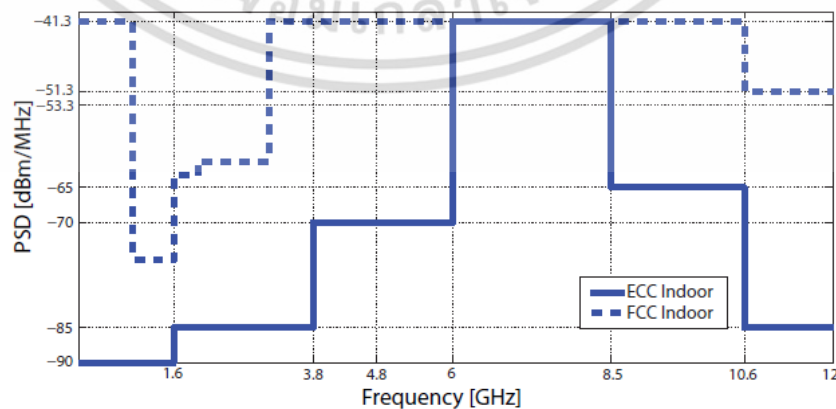
ความถี่จะไม่เกิน -41.3 dBm และไม่เกิน -75.3 dBm สำหรับย่านความถี่ในการใช้งาน GPS (0.96 GHz – 1.61 GHz)



รูปที่ 2.6 ค่าการแพร่กระจายกำลังงาน UWB ของ FCC สำหรับสัญญาณภายในและภายนอกอาคาร

2.1.4.2 ข้อบังคับของยุโรป

ETSI (European Technical Standard Institute) และ CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administration) เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบการออกข้อบังคับและกรอบการทำงานของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ของประเทศในยุโรป โดยมีคณะกรรมการการสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ (The Electronic Communications Committee, ECC) เป็นผู้ศึกษาข้อบังคับต่าง ๆ ซึ่งได้ข้อสรุปว่า การส่งผ่านสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ควรทำภายในอาคารและหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณการสื่อสารของระบบสื่อสารเดิม โดยอุปกรณ์ภาคส่งจะต้องหยุดส่งสัญญาณภายใน 10 วินาทีจนกว่าจะได้รับการตอบกลับจากอุปกรณ์ภาครับ และการใช้งานภายนอกอาคารจะต้องไม่ใช่รูปแบบติดตั้งถาวร การเปรียบเทียบค่าการแพร่กระจายกำลังงานภายในอาคารของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ ระหว่าง ECC กับ FCC แสดงดังรูปที่ 2.7 จะเห็นว่ามาตรฐานยุโรปจะมีความเข้มงวดในการใช้งานอุปกรณ์มากกว่า ยกเว้นช่วงความถี่ 6 GHz – 8.5 GHz ทั้งสองมาตรฐานยอมให้มีค่าการแพร่กระจายกำลังงานเท่ากันคือไม่เกิน -41.3 dBm

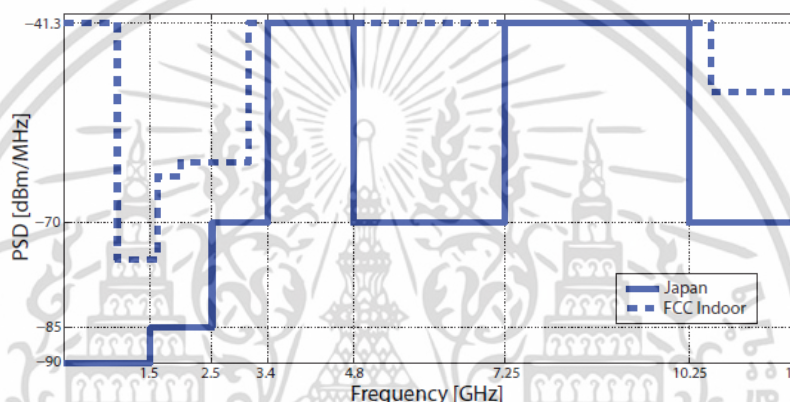


รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบการแพร่กระจายกำลังงาน UWB ภายในอาคารระหว่าง ECC กับ FCC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.3 ข้อบังคับของประเทศญี่ปุ่น

ประเทศญี่ปุ่นได้แบ่งการศึกษาการแพร่กระจายกำลังงาน UWB ภายในอาคาร ออกเป็น 2 ช่วงความถี่ ช่วงแรกตั้งแต่ 3.4 GHz ถึง 4.8 GHz และช่วงที่สองตั้งแต่ 7.25 GHz ถึง 10.25 GHz โดยในช่วงความถี่ 3.4 GHz – 4.8 GHz นั้นอุปกรณ์ที่ส่งสัญญาณ UWB ต้องสามารถลดการแทรกสอดกับสัญญาณสื่อสารอื่นๆ ที่ให้บริการในบริเวณเดียวกันได้ เทคโนโลยีช่วยลดการแทรกสอดสัญญาณนี้ เรียกว่า DAA (Detect And Avoid) สำหรับอุปกรณ์ UWB ที่ไม่มีเทคโนโลยี DAA ต้องมีค่าการแพร่กระจายกำลังเฉลี่ยไม่เกิน -70 dBm/Hz และมีค่ากำลังสูงสุดไม่เกิน -60 dBm/Hz ในขณะที่ช่วงความถี่ที่สอง (7.25 GHz – 10.25 GHz) ไม่จำเป็นต้องมี DAA และค่าการแพร่กระจายกำลังงานเฉลี่ยจะต้องไม่เกิน -41.3 dBm เช่นเดียวกับ FCC รูปที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการแพร่กระจายกำลังงานภายในอาคารของเทคโนโลยี UWB ระหว่างมาตรฐานประเทศญี่ปุ่นกับ FCC



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบการแพร่กระจายกำลังงาน UWB ภายในอาคารระหว่างประเทศญี่ปุ่นกับ FCC

2.1.4.4 ข้อบังคับของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ

ปี ค.ศ. 2006 สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ กลุ่มวิทยุคมนาคม (The International Telecommunications Union Radiocommunication Sector: ITU-R) ได้ออกข้อบังคับสำหรับอุปกรณ์ของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ เพื่อให้อุปกรณ์ทำงานโดยไม่เกิดการแทรกสอดสัญญาณในระบบสื่อสารเดิม ซึ่งหัวข้อที่สำคัญประกอบด้วย

- SM.1754 - เทคนิคการวัดการส่งผ่านสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ : เป็นหัวข้อที่แนะนำวิธีวัดสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์ในขอบเขตความถี่และขอบเขตเวลา
- SM.1755 - คุณสมบัติของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ : แสดงข้อกำหนดและนิยาม รวมถึงข้อมูลทางเทคนิคและลักษณะการทำงานของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์
- SM.1756 - กรอบการทำงานสำหรับอุปกรณ์ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ : ข้อแนะนำสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์เพื่อป้องกันการแทรกสอดระหว่างสัญญาณอัลตราไวด์แบนด์กับสัญญาณในระบบสื่อสารเดิม โดยเฉพาะการสื่อสารระยะสั้นที่ต้องขอใบอนุญาต และข้อแนะนำการจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานของระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่เกี่ยวข้องกับระบบสื่อสารอื่น ๆ

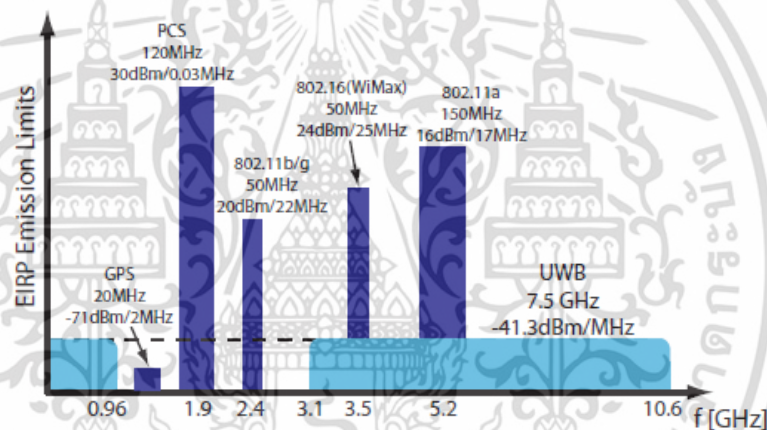
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● SM.1757 - ผลกระทบของอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ในระบบโทรคมนาคม : รวบรวมและศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์ในเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ที่มีต่ออุปกรณ์ของระบบสื่อสารเดิม

2.1.5 มาตรฐานเทคโนโลยี UWB

ระบบอัลตราไวด์แบนด์เป็นระบบที่มีการใช้งานย่านความถี่ร่วมกับระบบสื่อสารอื่น และเนื่องจากตัวมันเองมีกำลังงานในการส่งสัญญาณต่ำ ดังนั้นสัญญาณ UWB จึงถูกมองเป็นสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารแถบความถี่แคบซึ่งมีกำลังส่งสัญญาณสูง การใช้งานย่านความถี่ระหว่างระบบอัลตราไวด์แบนด์และระบบสื่อสารแถบความถี่แคบอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าระบบสื่อสารไร้สาย WLAN (Wireless Local Area Network) ตามมาตรฐาน IEEE802.11a มีการใช้งานย่านความถี่ร่วมกับระบบอัลตราไวด์แบนด์มากที่สุด

ปัจจุบันหน่วยงานที่ทำการกำหนดมาตรฐานของระบบสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์มีสองหน่วยงานคือ IEEE ซึ่งเป็นมาตรฐานอเมริกา และ Ecma ซึ่งเป็นมาตรฐานยุโรป



รูปที่ 2.9 ย่านความถี่ที่มีการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายต่าง ๆ

2.1.5.1 มาตรฐาน IEEE 802.15.4a

เป็นมาตรฐานในระดับชั้น Wireless Medium Access Control (MAC) และ Physical Layer (PHY) สำหรับโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคลที่มีอัตราการส่งข้อมูลต่ำ (Low-Rate Wireless Personal Area Network: LR-WPAN) ด้วยเทคโนโลยี IR-UWB ซึ่งแบ่งแถบความถี่ในการส่งข้อมูลอย่างอิสระต่อกัน 3 แถบความถี่ ดังนี้

- แถบความถี่จิกะเฮิร์ตซ์ย่อย (Sub - gigahertz band) : ประกอบด้วยช่องสัญญาณ 1 ช่อง มีสเปกตรัมตั้งแต่ 249.6 MHz – 749.6 MHz
- แถบความถี่ต่ำ (The low band) : ประกอบด้วยช่องสัญญาณ 4 ช่อง มีสเปกตรัมตั้งแต่ 3.1 GHz – 4.8 GHz
- แถบความถี่สูง (The high band) : ประกอบด้วยช่องสัญญาณ 11 ช่อง มีสเปกตรัมตั้งแต่ 6 GHz – 10.6 GHz

ตารางที่ 2.1 แสดงการแบ่งแถบความถี่ในการส่งข้อมูลสำหรับโครงข่าย LR-WPAN ด้วยเทคโนโลยี IR-UWB สำหรับอุปกรณ์ในระบบ UWB นั้นจะต้องสามารถส่งสัญญาณได้อย่างน้อยไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งช่องสัญญาณ จะเห็นว่าหากต้องการส่งสัญญาณในแถบความถี่กะเอิร์ทซ์ย่อยอุปกรณ์ต้องรองรับช่องสัญญาณ 0 และรองรับช่องสัญญาณที่ 3 สำหรับส่งสัญญาณแถบความถี่ต่ำ และช่องสัญญาณที่ 9 สำหรับแถบความถี่สูง ช่องสัญญาณที่เหลือถูกจัดเป็นช่องทางเลือก โดยช่องสัญญาณที่ 4, 7, 11, และ 15 จะมีแถบความถี่กว้างกว่าช่องอื่นเนื่องจากการทับซ้อนความถี่กับช่องสัญญาณที่ความถี่ต่ำกว่า ซึ่งช่องสัญญาณเหล่านี้จะถูกเตรียมไว้สำหรับอุปกรณ์ที่ส่งสัญญาณที่มีกำลังงานสูงและมีระยะส่งไกล

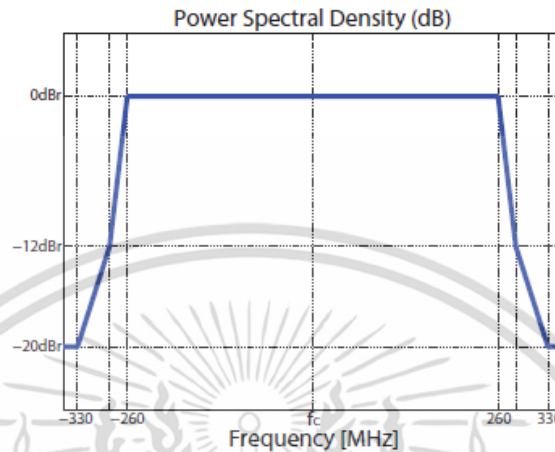
ตารางที่ 2.1 การแบ่งช่องความถี่ตามมาตรฐาน IEEE802.15.4a

Channel Number	Center Frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)	Mandatory/Optional
0	499.2	499.2	Mandatory below 1 GHz
1	3494.4	499.2	Optional
2	3993.6	499.2	Optional
3	4492.8	499.2	Mandatory in low band
4	3993.6	1331.2	Optional
5	6489.6	499.2	Optional
6	6988.8	499.2	Optional
7	6489.6	1081.6	Optional
8	7488.0	499.2	Optional
9	7987.2	499.2	Mandatory in high band
10	8486.4	499.2	Optional
11	7987.2	1331.2	Optional
12	8985.6	499.2	Optional
13	9484.8	499.2	Optional
14	9984.0	499.2	Optional
15	9484.8	1354.97	Optional

2.1.5.2 มาตรฐาน Emca (European Computer Manufacturers Association)

ปี ค.ศ. 2007 องค์กร IEC (The International Electrotechnical Commission) ของทวีปยุโรปได้ออกมาตรฐานสำหรับการสื่อสารระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการรับส่งข้อมูลความเร็วสูง ซึ่งกำหนดโดยหน่วยงาน Emca เป็นมาตรฐานที่ทำการแบ่งช่วงถี่แบบ MB-OFDM โดยกำหนดในระดับ Physical Layer (PHY) และ Medium Access Control (MAC) สำหรับโครงข่ายไร้สายระยะสั้นที่รับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง โดยเพื่อให้สเปกตรัมความถี่ระหว่าง 3.1 GHz–10.6 GHz รองรับ การส่งข้อมูลในอัตราเร็วไม่น้อยกว่า 480 Mb/s จะทำการแบ่งสเปกตรัมออกเป็น 14 แบนด์ แต่ละแบนด์มีความกว้างเท่ากับ 528 MHz โดย 12 แบนด์แรกจะถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มแต่ละกลุ่มมี 3 แบนด์ และ 2 แบนด์สุดท้ายรวมกันเป็นกลุ่มที่ 5 และแบนด์ที่ 6 จะอยู่ในสเปกตรัมของ 4 กลุ่มแรก การแบ่งสเปกตรัมแบบนี้เป็นที่นิยมใช้ทั่วไป นอกจากนี้ Emca ยังได้กำหนดค่ากำลังในการส่ง ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณสำหรับทุกแบนด์ดังรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าการส่งสัญญาณที่ความถี่ -260 MHz ถึง 260 MHz ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังไม่ควรเกิน 0 dBm (dB สัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นกำลังสูงสุด) ไม่เกิน -12 dBm เมื่อส่งสัญญาณความถี่ระหว่าง -285 MHz ถึง 285 MHz และไม่เกิน -20 dBm เมื่อส่งสัญญาณที่ความถี่ต่ำและสูงกว่า 330 MHz เป็นต้นไป



รูปที่ 2.10 ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังในการส่งสัญญาณ

2.2 สายอากาศอัลตราไวด์แบนด์

2.2.1 ความเป็นมาของสายอากาศ

สายอากาศเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญสำหรับระบบสื่อสารไร้สาย ทำหน้าที่แผ่กระจายหรือรับคลื่นวิทยุ โดยสายอากาศที่เหมาะสมจะสามารถส่งผ่านสัญญาณวิทยุระหว่างภาคส่งและภาครับได้อย่างถูกต้อง สายอากาศตัวแรกของโลกถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1886 เมื่อ Heinrich R. Hertz ศาสตราจารย์ชาวเยอรมันได้นำเสนอผลการทดลองสร้างสายอากาศไดโพลที่สามารถ รับ-ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ โดยสายอากาศตัวนี้สามารถรับ-ส่งสัญญาณได้ในระยะทาง 20 เมตร ต่อมาในปี ค.ศ. 1901 Guglielmo Marconi ได้ทำการส่งสัญญาณรหัสมอร์ส (Morse code) ระยะไกลข้ามแอตแลนติกจากเมืองคอร์นวอลล์ ประเทศอังกฤษไปยัง เซนต์จอห์น นิวฟันด์แลนด์ โดยใช้สายอากาศแบบเส้นลวดขนาดใหญ่ต่อเชื่อมกับกราวด์ได้สำเร็จ จากจุดเริ่มต้นนี้เองทำให้สายอากาศได้รับความสนใจและถูกพัฒนาต่อมา โดยสายอากาศในช่วงแรกจะถูกออกแบบสำหรับรับ-ส่งสัญญาณที่มีแบนด์แคบ เช่น สัญญาณวิทยุ AM, FM ซึ่งช่องสัญญาณมีแถบความถี่แคบเพียงกิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) และในปลายปี ค.ศ. 1930 เมื่อมีการนำโทรทัศน์มาใช้งาน สายอากาศได้ถูกออกแบบให้สามารถรับ-ส่งสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างขึ้นในระดับเมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ได้ และตั้งแต่เริ่มเข้าสู่ยุคโทรทัศน์เคลื่อนที่ ในปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา สัญญาณวิทยุได้ถูกนำไปใช้งานที่ความถี่สูงในระดับเมกะเฮิร์ตซ์ถึงจิกะเฮิร์ตซ์ (MHz - GHz)

ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 กองทัพอากาศสหรัฐได้ทำการส่งผ่านสัญญาณที่มีลักษณะเป็นพัลส์แคบ ๆ ซึ่งถูกใช้สำหรับงานเรดาร์ทางทหาร โดยสายอากาศที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นสายอากาศแบบทิศทาง สายอากาศฮอร์น สายอากาศอาร์เรย์และสายอากาศเลนส์

ปัจจุบันระบบสื่อสารได้พัฒนาไปสู่การสื่อสารความเร็วสูงและสามารถส่งข้อมูลได้ครั้งละมาก ๆ แต่อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณก็ยังคงมีลักษณะเป็นคลื่นต่อเนื่องและคุณลักษณะของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศจะแสดงในโดเมนความถี่ และได้มีการนำแนวคิดการส่งสัญญาณเป็นพัลส์แคบ ๆ ไม่ต่อเนื่อง มาพัฒนาเป็นระบบสื่อสารไร้สายอัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งมีข้อดี คือ มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลสูงมาก แต่กลับใช้ความหนาแน่นกำลังงานเชิงสเปกตรัมในระดับต่ำ แต่เนื่องจากเป็นระบบที่มีการใช้งานย่านความถี่กว้างมาก (7.5 GHz) ทำให้เกิดปัญหาความถี่ที่ซ้ำซ้อนกับความถี่ของเทคโนโลยีโครงข่ายเดิม ซึ่งจะทำให้เกิดการแทรกสอดของสัญญาณได้ ดังนั้นเพื่อให้การรับส่งสัญญาณมีประสิทธิภาพที่สุด จึงได้เกิดการพัฒนารูปแบบสายอากาศที่เหมาะสมกับการใช้งาน

2.2.2 คุณลักษณะของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wideband Antenna)

การศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของสายอากาศที่ได้ออกแบบ โดยส่วนใหญ่การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแบนด์แคบ มักจะทำในโดเมนความถี่เท่านั้น ในขณะที่สายอากาศแบบอัลตราไวด์แบนด์ จะมีการวิเคราะห์คุณลักษณะในโดเมนเวลาร่วมด้วย สำหรับพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นพารามิเตอร์ที่รู้จักกันเป็นอย่างดีและใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศอย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงจะกล่าวถึงอย่างสั้น ๆ เท่านั้น

2.2.2.1 การแมตช์สายอากาศ (Antenna Matching)

การแมตช์สายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากพารามิเตอร์หนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเมื่อทำการออกแบบสายอากาศ โดยพารามิเตอร์นี้จะแสดงปริมาณพลังงานที่สะท้อนกลับจากการแผ่กระจายคลื่น โดยสายอากาศในอุดมคติจะแผ่กระจายคลื่นไปยังปลายทางทั้งหมด ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการสะท้อนกลับของสัญญาณ ณ ตำแหน่งอินพุตระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ สายอากาศควรจะมีการแมตช์กับสายนำสัญญาณ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดการแมตช์สายอากาศประกอบด้วย

- ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน (Voltage reflection coefficient: Γ หรือ S_{11}) คือ อัตราส่วนระหว่างคลื่นที่สะท้อนกลับกับคลื่นที่ตกกระทบสายอากาศ สามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ (2.4) กรณีที่มีการแมตช์ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณที่สมบูรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน Γ จะเท่ากับ 0 และกรณีที่มีการแมตช์สายอากาศแย่มากที่สุด Γ จะเท่ากับ 1 หรือ -1 ซึ่งเหมือนกับความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ที่โหลดเมื่อมีการเปิดวงจรหรือลัดวงจร ตามรูปที่ 2.11

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_C}{Z_A + Z_C} \quad (2.4)$$

โดย Z_A คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และ Z_C คืออิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ และสามารถเขียนค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในเทอมของกำลังได้ตามสมการที่ (2.5)

$$\Gamma_{dB} = 20 \log|\Gamma| \quad (2.5)$$

- ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return loss: RL) คือค่าที่ได้จากส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลัง สายอากาศที่มีการแมตช์ที่ดีจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำ โดยทั่วไปค่า RL จะต้องต่ำกว่า -10 dB ค่า RL หาได้จากสมการที่ (2.6)

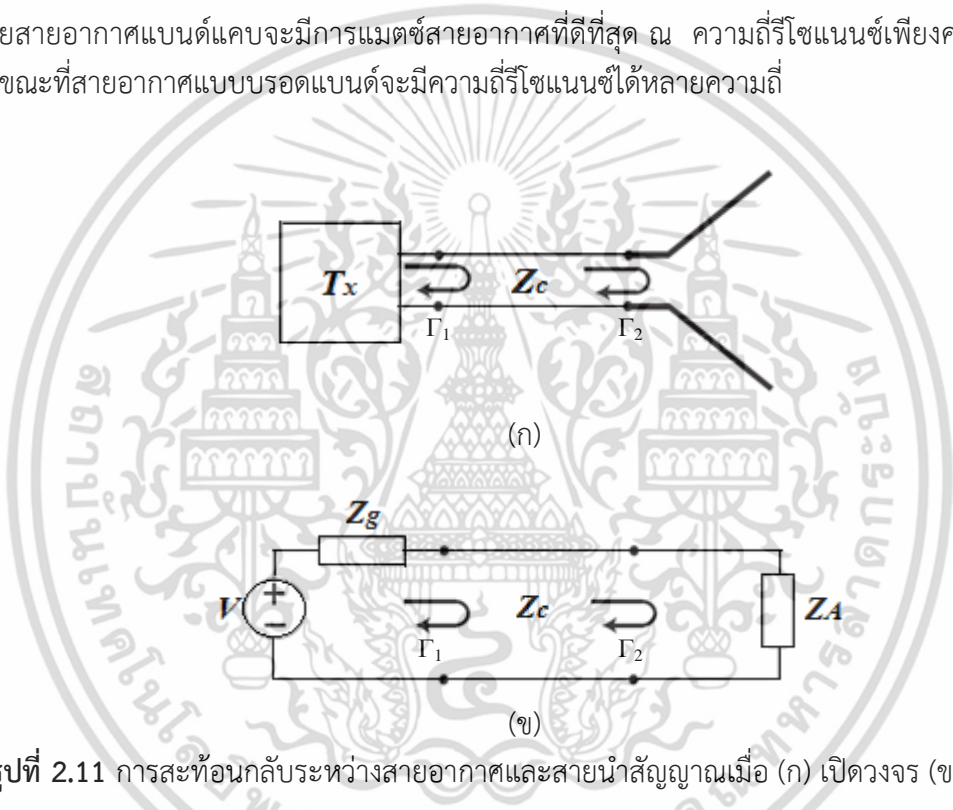
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$RL = -20 \log |\Gamma| \tag{2.6}$$

• ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage standing wave ratio: VSWR) เมื่อสายอากาศและสายนำสัญญาณไม่แมตช์กัน จะทำให้มีคลื่นสะท้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายเกิดเป็นคลื่นนิ่งในสายนำสัญญาณ ดังนั้นค่า VSWR จึงแสดงอัตราส่วนระหว่างคลื่นที่ไปข้างหน้ากับคลื่นสะท้อนกลับ ตามสมการที่ (2.7) และสายอากาศที่ดีควรมีคลื่นสะท้อนกลับน้อย นั่นคือค่า VSWR ควรจะมีค่าไม่เกิน 2

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \tag{2.7}$$

โดยสายอากาศแบนด์แคบจะมีการแมตช์สายอากาศที่ดีที่สุด ณ ความถี่โซแนนซ์เพียงความถี่เดียว ในขณะที่สายอากาศแบบบรอดแบนด์จะมีความถี่โซแนนซ์ได้หลายความถี่



รูปที่ 2.11 การสะท้อนกลับระหว่างสายอากาศและสายนำสัญญาณเมื่อ (ก) เปิดวงจร (ข) ลัดวงจร

2.2.2.2 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล เป็นการแสดงคุณสมบัติการแผ่กระจายพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศว่างของสายอากาศด้วยภาพ โดยมักจะพิจารณาในพิกัดทรงกลม เนื่องจากแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในอากาศว่างเป็นการวัดในระบบของพิกัดทรงกลมรัศมีคงที่ ดังนั้นตำแหน่งต่าง ๆ จึงเป็นฟังก์ชันของมุม θ (Elevation) และมุม ϕ (Azimuth) โดยเมื่อพิจารณาระนาบที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม θ ในขณะที่มุม $\phi = 0^\circ$ เรียกระนาบไฟฟ้า (E-plane) และระนาบที่มีเปลี่ยนแปลงมุม ϕ ในขณะที่มุม $\theta = 90^\circ$ เรียกระนาบแม่เหล็ก (H-plane)

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นได้แก่

• การวัดสภาพเจาะจง (Directivity: D) คือการวัดทิศทางที่คลื่นแผ่กระจายไปมากที่สุด เมื่อเทียบกับการแผ่กระจายในทิศทางอื่น ๆ คำนวณได้ตามสมการที่ (2.8) ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.8)$$

โดย U คือ ความเข้มของการแผ่กระจายในทิศทางของสายอากาศ U_0 คือ ความเข้มเฉลี่ยของการแผ่กระจายในทุกทิศทาง และ P_{rad} คือ กำลังการแผ่กระจายของสายอากาศ

- อัตราขยาย (Gain: G) เป็นพารามิเตอร์ซึ่งใช้วัดประสิทธิภาพในการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ (Efficiency: e) ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับการวัดสภาพเจาะจง การวัดอัตราขยายของสายอากาศพิจารณาได้ตามสมการที่ (2.9) ซึ่งในการคำนวณจะไม่คิดการสูญเสียซึ่งเกิดจากการไม่แมตซ์อิมพีแดนซ์และโพลาริเซชันของสายอากาศ

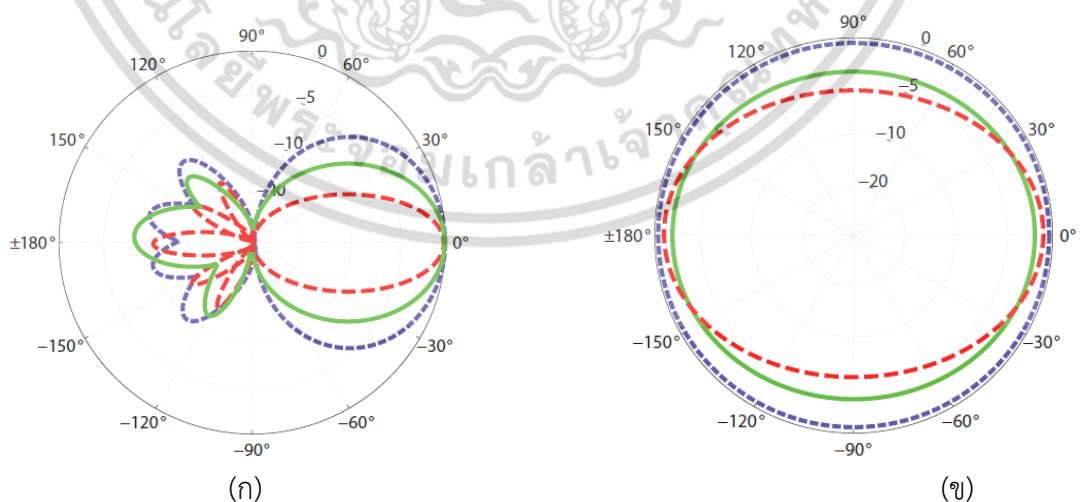
$$G = eD \quad (2.9)$$

เนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศใด ๆ จะพิจารณาเทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก (Isotropic antenna) ดังนั้นค่าการวัดสภาพเจาะจงและอัตราขยายจะมีหน่วยเป็น dBi

- ประสิทธิภาพการแผ่กระจายพลังงาน (Radiation Efficiency: e) แสดงอัตราส่วนระหว่างกำลังในการแผ่กระจายสัญญาณทั้งหมดของสายอากาศส่งกับกำลังที่รับสัญญาณได้ของสายอากาศรับ ตามสมการที่ (2.10)

$$e = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} - P_{loss}} \quad (2.10)$$

โดย P_{loss} คือกำลังที่สูญเสียไปในสายอากาศ P_{rad} คือกำลังในการแผ่กระจายคลื่น และ P_{in} คือกำลังอินพุตที่สายอากาศรับ



รูปที่ 2.12 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศอุดมคติ (ก) แบบทิศทาง (ข) แบบรอบตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.12 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามที่ความถี่แตกต่างกัน โดย (ก) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional antenna) ซึ่งจะมีการแผ่กระจายคลื่นหลัก (Principal pattern) หรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น สายอากาศลักษณะนี้จะมีอัตราขยายในทิศทางที่กำหนดค่อนข้างสูง และ (ข) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional antenna) ซึ่งจะมีการแผ่กระจายหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกันในทุกทิศทาง สายอากาศลักษณะนี้จะมีอัตราขยายในทุกทิศทางใกล้เคียงกันแต่จะมีค่าอัตราขยายไม่สูงนัก ซึ่งสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์เป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในลักษณะนี้

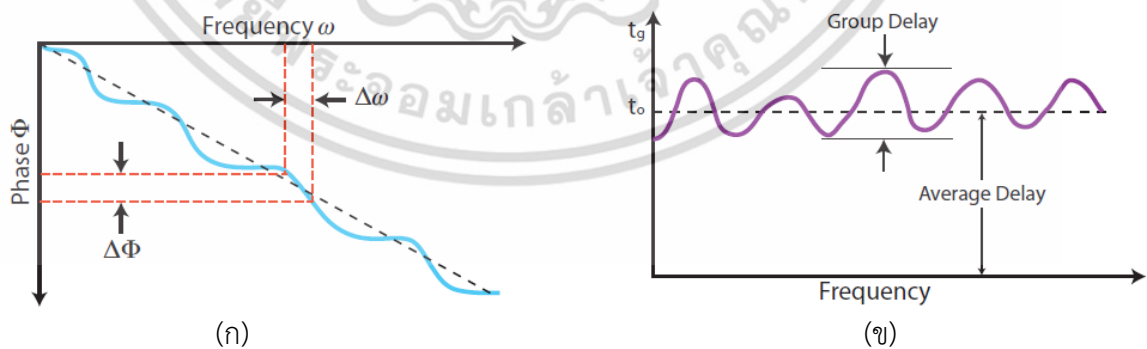
2.2.2.3 ค่าประวิงเวลากลุ่ม (Group delay)

ค่าประวิงเวลากลุ่มหรือค่าการเบี่ยงเบนเฟสเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ต้องทำการพิจารณา เมื่อทำการรับส่งสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงคุณลักษณะความผิดเพี้ยนของสัญญาณพัลส์ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ โดยการส่งสัญญาณในระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่ดีจะต้องมีการเบี่ยงเบนเฟสน้อยที่สุด นั่นคือการประวิงเวลากลุ่มควรมีลักษณะราบเรียบใกล้เคียงเส้นตรงมากที่สุด ซึ่งการวัดค่าประวิงเวลากลุ่มที่ยอมรับจะอยู่ในช่วงนาโนวินาที การคำนวณค่าประวิงเวลากลุ่มหรือการเปลี่ยนแปลงเฟสทำได้ดังสมการ (2.11)-(2.12) โดยสมการที่ (2.11) แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนในโดเมนความถี่ $H(\omega)$ ซึ่งเทียบเท่ากับผลตอบสนองอิมพัลส์ $h(t)$ ในโดเมนเวลา

$$H(\omega) = A(\omega)e^{j\Phi(\omega)} \quad (2.11)$$

เมื่อ $A(\omega)$ คือขนาด และ $\Phi(\omega)$ คือผลตอบสนองเฟสของอุปกรณ์ และค่าประวิงเวลากลุ่มหาได้จากการทำอนุพันธ์ผลตอบสนองเฟสเทียบกับความถี่ ตามสมการที่ (2.12)

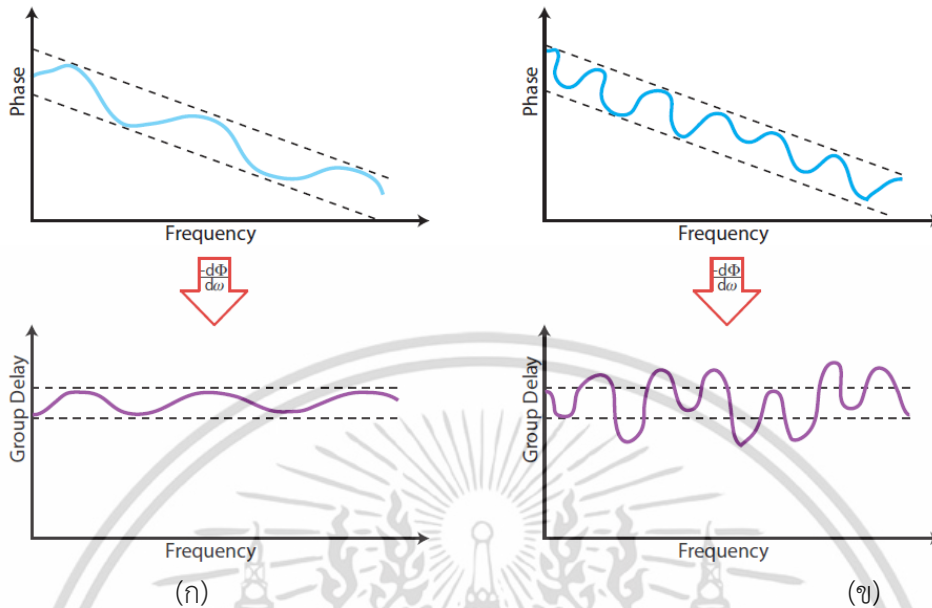
$$\tau = -\frac{d\Phi(\omega)}{d\omega} = -\frac{1}{360^\circ} \frac{d\Phi(f)}{df} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.13 (ก) ผลตอบสนองทางเฟส (ข) ค่าประวิงเวลากลุ่ม

ค่าประวิงเวลากลุ่มได้มาจากการเบี่ยงเบนของผลตอบสนองทางเฟส จากรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าถ้ากราฟของผลตอบสนองทางเฟสมีลักษณะเป็นเส้นตรงจะได้ค่าประวิงเวลากลุ่มเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อผลตอบสนองทางเฟสมีการเบี่ยงเบนจะส่งผลให้ค่าประวิงเวลากลุ่มมีการเบี่ยงเบนไม่สม่ำเสมอใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าคงที่เช่นกัน และค่าความล่าช้าเฉลี่ย (Average delay) แสดงถึงเวลาเฉลี่ยในการส่งผ่าน สัญญาณระหว่างอุปกรณ์



รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบจำนวนระลอกคลื่นกับขนาดการประวิงเวลา (ก) น้อย (ข) มาก

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเบี่ยงเบนเฟสทำให้สัญญาณในระบบสื่อสารมีความผิดเพี้ยน และค่าระลอกคลื่นของเฟสสามารถวัดได้โดยใช้ค้ำยอดถึงยอด (Peak to peak) แต่อย่างไรก็ตามนั้น ยังไม่เพียงพอที่จะใช้แสดงคุณลักษณะความผิดเพี้ยนของเฟส ในขณะที่ค่าประวิงเวลากลุ่มซึ่งคิดจาก จำนวนระลอกคลื่นของเฟสต่อหนึ่งหน่วยความถี่จะนิยมใช้เป็นตัวชี้ความผิดเพี้ยนเฟสมากกว่า จากรูป ที่ 2.14 แสดงความแตกต่างของค่าประวิงเวลากลุ่มในขณะที่ระลอกคลื่นของเฟสมีค้ำยอดถึงยอด เท่ากัน แต่มีจำนวนระลอกต่อหนึ่งหน่วยความถี่ไม่เท่ากัน จะเห็นว่าเฟสที่มีจำนวนระลอกคลื่น มากกว่าค่าประวิงเวลาจะใหญ่กว่า

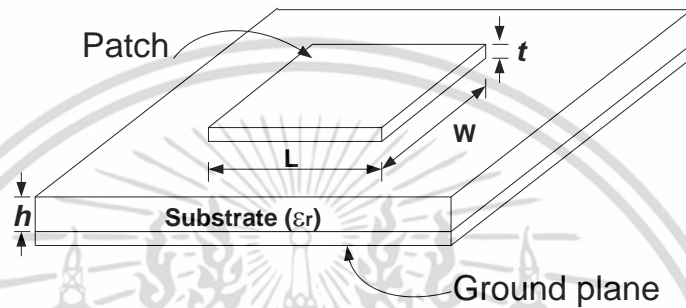
2.3 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna)

สายอากาศแบบไมโครสตริปหรือสายอากาศแบบระนาบได้เริ่มถูกใช้งานครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1970 ในช่วงแรกการพัฒนาไปใช้งานมีค่อนข้างน้อยเนื่องจาก สายอากาศชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำแต่ มีข้อดีคือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ตัวสายอากาศมีความแข็งแรง เหมาะกับการใช้ในยานอวกาศที่สูง ดังนั้นเมื่อเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายพัฒนาขึ้นอุปกรณ์ในระบบมีขนาดเล็กลง จึงมีการพัฒนา สายอากาศไมโครสตริปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีความเหมาะสมกับอุปกรณ์ขนาดเล็กเช่น คอมพิวเตอร์พกพา โทรศัพท์มือถือ และเนื่องจากสายอากาศมักจะถูกออกแบบมาให้ใช้งานโดยเฉพาะ กับความถี่ใดความถี่หนึ่ง ดังนั้นรูปร่างของสายอากาศจึงแตกต่างกันไปตามความเหมาะสมของความถี่ ใช้งานเป็นหลัก รูปแบบพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบหลัก ๆ คือ สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Microstrip patch antenna) สายอากาศไมโครสตริปแบบไดโพล (Microstrip dipole antenna) และ สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด (Microstrip slot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

antenna) ในแต่ละชนิดจะมีรูปแบบและคุณสมบัติแตกต่างกันไป ดังนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

โครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริปจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบพื้นฐานคือ ส่วนของวัสดุฐานรองหรือที่เรียกว่า ซับสเตรท (Substrate) ซึ่งมีค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์คือ ϵ_r และมีความหนา h ด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองเป็นแผ่นตัวนำสำหรับแผ่กระจายคลื่นหรือที่เรียกว่า แพทช์ (Patch) มีความกว้างเท่ากับ W ความยาว L และอีกด้านของวัสดุฐานรองเป็นแผ่นระนาบกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป

2.3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปจะคำนวณขนาดของสายอากาศ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) [15] ได้ดังสมการ (2.13)-(2.16)

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.13)$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (2.14)$$

โดยที่

$$\Delta L = h(0.412) \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.15)$$

และถ้า $\frac{W}{h} > 1$ จะได้

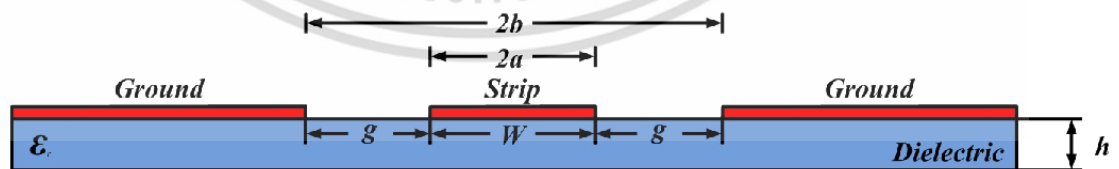
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เมื่อเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

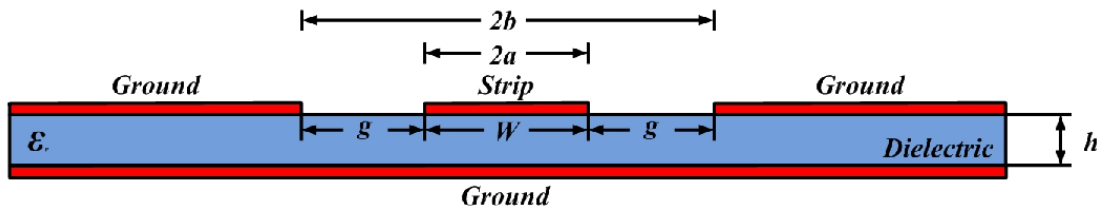
W	คือ	ความกว้างของสายอากาศ
L	คือ	ความยาวของสายอากาศ
h	คือ	ความสูงของวัสดุฐานรอง
c	คือ	ความเร็วแสงในอากาศมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s
f_r	คือ	ความถี่ที่ต้องการออกแบบ
ϵ_r	คือ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
ϵ_{eff}	คือ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

2.4 สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide)

สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมถูกคิดค้นโดย Wen ในปี ค.ศ.1969 ในที่นี้จะขอกล่าวถึงสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม 2 ชนิด คือ สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง (Co-Planar Waveguide: CPW) และสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่มีกราวด์ด้านล่าง (Conductor-Backed Co-Planar Waveguide: CBCPW) โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.16 ประกอบด้วยสตริป (Strip) อยู่ตรงกลางด้านบนบนของฐานไดอิเล็กตริก (Substrate) โดยมีความกว้างของสตริป คือ W และด้านข้างทั้ง 2 ด้านของสตริปเป็นระนาบกราวด์โดยมีร่องแคบ ๆ กั้นระหว่างแผ่นสตริปกับระนาบกราวด์ และมีความหนาของฐานรองไดอิเล็กตริก คือ h ส่วนสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง แสดงดังรูปที่ 2.17 จะต่างกับชนิดแรกตรงที่มีกราวด์ด้านล่างของฐานรองไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นมา ข้อดีของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม คือ สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุได้ง่ายมาก เนื่องจากไม่ต้องการเจาะรูผ่านฐานรองไดอิเล็กตริกเพื่อเชื่อมต่อกราวด์ให้กับอุปกรณ์เหล่านั้น สามารถนำมาต่อรวมในวงจรเดียวกันกับไมโครสตริปได้ง่าย การบิดเบี้ยวของรูปสัญญาณ (Dispersion) และค่าความสูญเสีย (Loss) ต่ำกว่าการใช้สายนำสัญญาณไมโครสตริป จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้นทำให้โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมเหมาะกับการทำเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ



รูปที่ 2.16 โครงสร้างสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง



รูปที่ 2.17 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง

การแพร่กระจายของสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าในสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมนั้นจะมีลักษณะที่ตั้งฉากกัน โดยสนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ระหว่างแถบโลหะที่ถูกคั่นด้วยช่องเปิด ส่วนสนามแม่เหล็กนั้นจะเคลื่อนที่ล้อมรอบแผ่นโลหะในทิศทางตามความหนาของวัสดุฐานรอง แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม

2.4.1 การหาอิมพีแดนซ์คาแรกเตอร์ริสติกของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

การหาค่าอิมพีแดนซ์คาแรกเตอร์ริสติกของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบการส่งคงรูป (Conformal Mapping) [16] นั้น จะทำบนพื้นฐานการวิเคราะห์แบบ quasi-TEM โดยอาศัยเทคนิคการหาค่าความจุไฟฟ้า และค่าความเหนี่ยวนำที่กระจายอยู่บนสายนำสัญญาณ ซึ่งจากลักษณะของสายนำสัญญาณระนาบร่วมที่มีแผ่นสตริปและกราวด์วางอยู่บนระนาบเดียวกัน ทำให้ผลของค่าความเหนี่ยวนำมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ และค่าคุณลักษณะพื้นฐานต่าง ๆ ของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของวัสดุฐานรอง (ϵ_{eff}) ความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ (V_p) และอิมพีแดนซ์คาแรกเตอร์ริสติกของสายนำสัญญาณ (Z_0) สามารถหาได้จากสมการ (2.17)-(2.19)

$$\epsilon_{eff} = \frac{C_{CPW}}{C_0} \quad (2.17)$$

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_0 = \frac{1}{C_0 V_P} \quad (2.19)$$

โดย C_{CPW} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณ CPW
 C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณในอากาศว่าง
 c คือ ค่าความเร็วแสง เท่ากับ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

จากวิธีการประมาณของ Veyres-Fouad Hanna [17] ค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณสามารถหาได้ตามสมการ (2.20)-(2-22)

$$C_{CPW} = C_0 + C_1 \quad (2.20)$$

$$C_0 = 4\epsilon_0 \frac{K'(k_0)}{K(k_0)} \quad (2.21)$$

$$C_1 = 2\epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \quad (2.22)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้า ณ ตำแหน่งขอบบนของวัสดุฐานรอง
 C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้า ณ ตำแหน่งขอบล่างของวัสดุฐานรอง
 ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ
 ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง
 $K(k)$ คือ อินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรก (Complete Elliptic Integral of The First Kind)
 $K'(k)$ คือ คอมพลิเมนต์ (Compliment) ของ $K(k)$

และการอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรกสามารถหาได้ตามสมการ (2.23)

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} ; 0 < k < 1 \quad (2.23)$$

เมื่อ θ หมายถึง ตัวแปรเชิงซ้อน $= \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 k^4 + \dots \right\}$

โดย $K'(k) = K(k')$ และ $k' = \sqrt{1 - k^2}$

เมื่อกำหนด

$$k_0 = \frac{W}{2g + W} \quad (2.24)$$

$$k_1 = \frac{\sinh(W\pi/4h)}{\sinh((2g + W)\pi/4h)} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ W คือ ความกว้างแผ่นสตริปของสายนำสัญญาณ
 g คือ ความกว้างของช่องระหว่างแผ่นสตริปกับกราวด์
 h คือ ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก

การคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรกกับคอมพลิเมนต์ของตัวเอง $\left(\frac{K(k)}{K'(k)}\right)$ ด้วยวิธีการประมาณของ Hilberg [18] จะแบ่งได้ 2 กรณี แสดงตามสมการ (2.26)-(2.27)

กรณี $0 \leq k \leq 0.707$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{2 \ln[2(1 + \sqrt{k'}) / (1 - \sqrt{k'})]} \quad (2.26)$$

กรณี $0.707 \leq k \leq 1$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{1}{\pi} 2 \ln[2(1 + \sqrt{k'}) / (1 - \sqrt{k'})] \quad (2.27)$$

ดังนั้นจะได้ค่าอิมพีแดนซ์คาแรกเตอร์รีซิสติฟแสดงในเทอมอัตราส่วนของการอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรก ดังสมการ (2.28)

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{K(k_0)}{K'(k_0)} \quad (2.28)$$

โดยที่

$$\epsilon_{eff} = 1 + \frac{1}{2}(\epsilon_r - 1) \frac{K'(k_1) K(k_0)}{K(k_1) K'(k_0)} \quad (2.29)$$

และ
$$\frac{K'(k_1) K(k_0)}{K(k_1) K'(k_0)} = q = \text{Filling Factor}$$

2.4.2 การหาอิมพีแดนซ์คาแรกเตอร์รีซิสติฟของสายนำสัญญาณระนาบแบบท่อนำคลื่นร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง

การวิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์คาแรกเตอร์รีซิสติฟของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง สามารถคำนวณได้จาก [19] ดังสมการ (2.30)-(2.33)

$$k_2 = \frac{W}{2g + W} \quad (2.30)$$

$$k_3 = \frac{\tanh(W\pi/4h)}{\tanh((2g + W)\pi/4h)} \quad (2.31)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{1}{K(k_2)/K'(k_2) + K(k_3)/K'(k_3)} \quad (2.32)$$

โดยที่

$$\epsilon_{eff} = \frac{1 + \epsilon_r (K'(k_2)/K(k_2))(K(k_3)/K'(k_3))}{1 + (K'(k_2)/K(k_2))(K(k_3)/K'(k_3))} \quad (2.33)$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สายอากาศเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายเนื่องจากเป็นตัวแพร่กระจายคลื่น และการรับส่งสัญญาณของระบบ จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับสายอากาศด้วยส่วนหนึ่ง โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสารไร้สายระบบอัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งมีการส่งสัญญาณด้วยแถบความถี่กว้าง และปัจจุบันอุปกรณ์การสื่อสารยังมีขนาดเล็กเพื่อสะดวกต่อการพกพา ทำให้สายอากาศต้องมีขนาดเล็กตามไปด้วย ดังนั้นสายอากาศไมโครสตริปจึงมักถูกเลือกมาใช้งานเนื่องจากข้อดีของมัน คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและเหมาะที่จะใช้งานในย่านความถี่สูง นอกจากนี้การออกแบบสายอากาศในระบบอัลตราไวด์แบนด์ยังต้องคำนึงถึงการรบกวนสัญญาณที่มีต่อโครงข่ายของระบบสื่อสารไร้สายเดิม เนื่องจากความถี่ที่ซ้ำซ้อนกัน โดยเฉพาะระบบสื่อสารไร้สายที่นิยมใช้งาน เช่น โครงข่าย WLAN และ WiMAX และที่ผ่านมามีการศึกษาและออกแบบสายอากาศเพื่อทำการลดข้อจำกัดดังกล่าวนี้ ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาสายอากาศรูปแบบต่างๆ เพื่อรองรับการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ โดยในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้เริ่มจากการศึกษาการออกแบบสายอากาศระบบอัลตราไวด์แบนด์ ต่อจากนั้นจึงศึกษางานวิจัยที่ทำการนอศ์ย่านความถี่ที่ซ้ำซ้อนกับความถี่เดิม ดังเช่น

1) E.G. Lim, Z. Wang, C.U. Lei, Y. Wang and K.L. Man [20] นำเสนอการศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศอัลตราไวด์แบนด์แบบระนาบแผ่นวงจรพิมพ์ (UWB planar printed circuit board) ในโครงสร้างต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และนำเสนอการออกแบบสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่ทำงานบนย่านความถี่ 2-11.3 GHz โดยสายอากาศมีขนาด 70 มม. × 60 มม. × 0.79 มม. ใช้วัสดุฐานรองคือ RT/Duriod 5870 สายอากาศที่ได้มีคุณลักษณะของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่ดี แต่มีขนาดค่อนข้างใหญ่

2) J. William and R. Nakkeeran [21] นำเสนอสายอากาศสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ โดยสายอากาศมีโครงสร้างเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยม ที่มีการป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม และใช้สตัปรูปคล้ายกากบาทสำหรับปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์ ทำให้ได้ความถี่แถบกว้างที่มีค่าแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 4.8–12.8 GHz โดยสายอากาศมีขนาด 28 มม. × 21 มม. × 16 มม. ใช้ FR4 เป็นวัสดุฐานรอง จึงได้สายอากาศที่มีขนาดเล็ก แต่สายอากาศยังไม่ครอบคลุมความถี่อัลตราไวด์แบนด์

3) S. Soltani, M. Azarmanesh, P. Lotfi and G. Dadashzadeh [8] นำเสนอสายอากาศแพตช์โมโนโพลขนาดเล็กรูปรางหกเหลี่ยม ที่ป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณระนาบแบบ ACS (Asymmetric coplanar strip) โดยปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์สำหรับความถี่ย่านอัลตราไวด์แบนด์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับขนาดของแพตช์หกเหลี่ยม และทำการนอตซ์ความถี่ด้วยการเซาะร่องบนระนาบกราวน์ สายอากาศมีขนาด 11.4 มม. × 21.5 มม. × 1 มม. ใช้ FR4 เป็นวัสดุฐานรอง ผลการศึกษาได้สายอากาศขนาดเล็กที่มีการทำงานบนย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ และสามารถนอตซ์ความถี่ย่าน WLAN ได้

4) D. Zhou, S. Gao, F. Zhu, R.A. Abd-Alhameed and J.D. Xu [10] นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแพตช์โมโนโพล รูปร่างครึ่งวงกลมร่วมกับสี่เหลี่ยมคางหมูคว่ำ ซึ่งทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ โดยมีการป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริป และทำการนอตซ์ความถี่ด้วยการเซาะร่องบนแผ่นแพตช์ สายอากาศมีขนาด 35 มม. × 35 มม. × 1.575 มม. จากผลการทดลองได้สายอากาศที่ทำงานบนย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์และสามารถนอตซ์ความถี่ในช่วง 5.15-5.35 GHz และ 5.725-5.825 GHz

5) S.S. Thwin [5] นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแพตช์โมโนโพลที่มีขนาดเล็ก โดยมีแพตช์สี่เหลี่ยมเป็นส่วนแพร่กระจายคลื่นและมีระนาบกราวน์อยู่บริเวณส่วนล่างของด้านหลังสายอากาศทำการป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริป ในการปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์เพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ในย่านอัลตราไวด์แบนด์นั้น ทำโดยการเจาะขอบล่างของแพตช์สี่เหลี่ยมให้เป็นขั้นบันไดและเจาะขอบของระนาบกราวน์ให้เป็นช่องสี่เหลี่ยม นอกจากนี้ยังเพิ่มช่องเปิดรูปตัวยูบนสายนำสัญญาณและช่องเปิดรูปตัวยูคว่ำบนแพตช์สี่เหลี่ยมเพื่อนอตซ์ความถี่ช่วง 3-4 GHz และ 5-6 GHz จากการออกแบบได้สายอากาศที่มีขนาด 30 มม. × 30 มม. × 1.6 มม. และใช้วัสดุฐานรองเป็น FR4 ผลการทดลองพบว่าสายอากาศมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านอัลตราไวด์แบนด์ ยกเว้นบริเวณที่มีการนอตซ์ความถี่ คือย่าน WLAN และ WiMAX

6) Y.S. Li, X.D. Yang, C.Y. Liu and T. Jiang [22] นำเสนอสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ขนาดกะทัดรัดที่มีการกระตุ้นด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม โดยมีแพตช์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการเจาะช่องเปิดสี่เหลี่ยมรอบตัวแพตช์ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่น และทำการนอตซ์ย่านความถี่ โดยการเพิ่มช่องเปิดรูปตัว H บริเวณด้านบนของสายอากาศเพื่อนอตซ์ความถี่ช่วง 5-6 GHz และเจาะช่องเปิดรูปตัว U บนตัวแพตช์จัตุรัสเพื่อนอตซ์ความถี่ช่วง 7.7-8.5 GHz จากการออกแบบสายอากาศมีขนาด 28 มม. × 21 มม. × 1.6 มม. ใช้วัสดุฐานรองเป็น FR4 ผลการทดลองได้สายอากาศมีแบนด์วิดท์ที่ครอบคลุมย่านความถี่ของระบบอัลตราไวด์แบนด์ นอกจากนี้ยังสามารถนอตซ์ช่วงความถี่ที่ 5-6 GHz สำหรับ WLAN และ 7.7-8.5 GHz สำหรับ X-band

7) C. Luo, J. Hong and H. Xiong [23] นำเสนอสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์รูปร่างตัวยู ที่มีสายนำสัญญาณเป็นไมโครสตริป และสามารถนอตซ์ความถี่ได้ 3 ย่านความถี่ (WiMAX, WLAN และ X-Band) โดยการเจาะช่องเปิดรูปตัว C ที่มีขนาดเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของย่าน WiMAX และครึ่งความยาวคลื่นของย่าน X-Band บริเวณแพร่กระจายคลื่นเพื่อนอตซ์ความถี่ย่าน WiMAX และ X-Band ตามลำดับ และทำการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN โดยการเจาะช่องเปิดรูปตัวยูบนระนาบกราวน์ ผลการทดลองได้สายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่ทำงานบนย่านความถี่ 2.8-12 GHz และสามารถนอตซ์ความถี่ได้ 3 ย่านความถี่ สายอากาศมีขนาด 24 มม. × 33 มม. × 1 มม. ใช้ FR4 เป็นวัสดุฐานรอง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่ามีความพยายามที่จะพัฒนาสายอากาศสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ให้มีขนาดเล็กลง โดยใช้สัณฐานรูปแบบต่าง ๆ มาช่วยปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของสายอากาศให้มีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ครอบคลุมตลอดย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ และต่อมาได้มีการนำเทคนิคต่าง ๆ มาช่วยนอตซ์ความถี่ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่กล่าวมาข้างมีข้อด้อยอยู่บ้าง เช่น สายอากาศมีความแข็งแรงแต่ขาดความยืดหยุ่นเนื่องจากวัสดุฐานรองที่ใช้ส่วนใหญ่เป็น FR4 และสามารถนอตซ์ได้เพียงความถี่เดียว หรือบางงานวิจัยที่สามารถนอตซ์ได้สองความถี่หรือหลายความถี่ แต่กลับมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและสร้างได้ยาก

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้ออกแบบและสร้างสายอากาศสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ที่เข้ากับโครงข่ายสื่อสารเดิม ได้แก่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ตัวสายอากาศมีขนาดเล็ก บาง น้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสามารถโค้งงอได้ สร้างง่ายมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและราคาถูก โดยรายละเอียดในการออกแบบและสร้างจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่

ที่ผ่านมาได้มีการออกแบบสายอากาศอัลตราไวต์แบนด์อย่างหลากหลาย โดยการออกแบบสายอากาศนั้นจะขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้งาน เช่น ระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ต้องการสายอากาศที่มีการแพร่กระจายสัญญาณแบบรอบทิศทาง ในขณะที่ระบบสื่อสารเรดาร์ที่ต้องการสายอากาศที่มีการแพร่กระจายสัญญาณแบบทิศทาง สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศที่สามารถทำงานได้ตลอดทั้งย่านความถี่อัลตราไวต์แบนด์ ตัวสายอากาศมีประสิทธิภาพสูง น้ำหนักเบา ขนาดเล็กและสร้างได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณของระบบสื่อสารที่มีการใช้งานอยู่ก่อนได้ โดยโครงข่ายไร้สายที่ผู้จัดทำได้เลือกทำการนอตช์ ได้แก่ โครงข่าย WLAN ในย่านความถี่ 5.1-5.8 GHz โครงข่าย WiMAX ในย่านความถี่ 3.3-3.7 GHz เนื่องจากเป็นย่านความถี่ที่ประเทศส่วนใหญ่รวมทั้งประเทศไทยเลือกใช้งาน และโครงข่ายสื่อสารดาวเทียมสำหรับกิจการทหาร X-Band Downlink ในย่านความถี่ 7.25-7.75 GHz โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบสายอากาศที่มีการนอตช์ย่านความถี่ดังนี้

1. สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ 2 โครงข่ายคือ WLAN และ WiMAX
2. สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ 2 โครงข่าย คือ WLAN และ WiMAX และมีการนอตช์ย่านความถี่ 3 โครงข่ายคือ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink

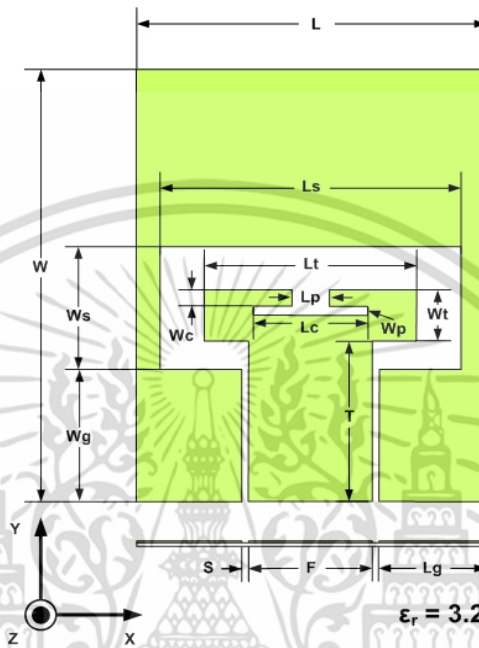
3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์ที่มีการนอตช์ความถี่ย่าน WLAN และ WiMAX

การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศในหัวข้อนี้ จะทำการออกแบบสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมก่อน เมื่อได้สายอากาศที่มีแมตซ์อิมพีแดนซ์ตลอดทั้งย่านความถี่อัลตราไวต์แบนด์แล้ว หลังจากนั้นจึงได้ออกแบบการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ตามลำดับ โดยการออกแบบสายอากาศนั้นจะทำการคำนวณขนาดโครงสร้างของสายอากาศและขนาดสายนำสัญญาณ หลังจากนั้นจึงทำการจำลองสายอากาศที่ได้จากการคำนวณบนโปรแกรม IE3D เพื่อปรับหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสมที่สุด

3.1.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์

ในการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์ได้เลือกใช้สายอากาศไมโครสตริป เนื่องจากมีคุณสมบัติตรงกับวัตถุประสงค์ คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ตัวสายอากาศมีความแข็งแรง เหมาะกับการใช้ในงานย่านความถี่สูง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุฐานรอง (Substrate) ชนิดแผ่นฟิล์ม Milar® Polyester Film เพื่อให้ได้สายอากาศบางและมีความยืดหยุ่น สำหรับส่วนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายคลื่นนั้นเพื่อให้่ายต่อการสร้าง จึงได้ออกแบบให้มีลักษณะเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยม และป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม (Coplanar waveguide: CPW) เนื่องจากสะดวกต่อการนำสายอากาศไปต่อร่วมกับวงจรไมโครเวฟ และใช้สตัด์รูปร่างคล้ายส้อมมาช่วยในปรับจูนแมตซ์อิมพีแดนซ์ เนื่องจากมีพารามิเตอร์ในการช่วยปรับจูนมากกว่ารูปแบบอื่น โครงสร้าง และพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์

W	คือ	ความกว้างของสายอากาศ
W_s	คือ	ความกว้างของช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
W_g	คือ	ระยะจากขอบล่างของสายอากาศถึงช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า
W_t	คือ	ความกว้างของขาสตัด์รูปร่างคล้ายส้อม
W_c	คือ	ความกว้างของขาด้านบนสตัด์รูปร่างคล้ายส้อม
W_p	คือ	ความกว้างของขาด้านในสตัด์รูปร่างคล้ายส้อม
L	คือ	ความยาวของสายอากาศ
L_s	คือ	ความยาวของช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
L_g	คือ	ความยาวของระนาบกราวด์ด้านล่างของสายอากาศ
L_t	คือ	ความยาวของขาสตัด์รูปร่างคล้ายส้อม
L_c	คือ	ความยาวของขาด้านในสตัด์รูปร่างคล้ายส้อม
L_p	คือ	ความยาวของขาด้านบนสตัด์รูปร่างคล้ายส้อม
T	คือ	ความยาวสตริปของสายส่งสัญญาณระนาบร่วม
F	คือ	ความกว้างสตริปของสายส่งสัญญาณระนาบร่วม
S	คือ	ช่องว่างระหว่างสตริปกับระนาบกราวด์ของสายส่งสัญญาณระนาบร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.1 การคำนวณขนาดโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์

ในการคำนวณโครงสร้างสายอากาศได้กำหนดให้ความถี่รีโซแนนซ์มีขนาดเท่ากับความถี่ต่ำของย่านอัลตราไวต์แบนด์ นั่นคือ $f_r = 3.1$ GHz และวัสดุฐานรองมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 3.2$ ความหนาของวัสดุฐานรอง $h = 0.3$ มม. ค่าความนำของวัสดุตัวนำ $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m ความหนาของวัสดุตัวนำ $t = 0.1$ มม. ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย $\tan \delta = 0.009$ และสายนำสัญญาณมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม

การออกแบบขนาดโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป เริ่มจากการคำนวณความกว้างของสายอากาศ (W) และความยาวของสายอากาศ (L) จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) จากนั้นจึงคำนวณขนาดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามสมการที่ (3.5) [24]

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (3.2)$$

โดย c คือ ความเร็วแสงในอากาศมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s
 f_r คือ ความถี่ที่ต้องการออกแบบมีค่าเท่ากับ 3.1 GHz
 ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
 ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

และ

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} \quad (3.3)$$

$$\Delta L = h(0.412) \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.4)$$

1. คำนวณความกว้างของสายอากาศ (W)

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3.1 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{3.2 + 1}}$$

$$W = 34.5 \text{ มม.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คำนวณความยาวของสายอากาศ (L)- คำนวณค่า ϵ_{eff}

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2} = \frac{3.2 + 1}{2} + \frac{3.2 - 1}{2} \left(1 + \frac{12(0.3)}{34.5}\right)^{-1/2}$$

$$\epsilon_{eff} = 3.147$$

- คำนวณค่า ΔL

$$\Delta L = h(0.412) \frac{(\epsilon_r + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} ; \frac{W}{h} = \frac{34.5 \times 10^{-3}}{0.3 \times 10^{-3}} = 115$$

$$= (0.3 \times 0.412) \frac{(3.2 + 0.3)(115 + 0.264)}{(3.147 - 0.258)(115 + 0.8)} = 0.149 \text{ มม.}$$

- คำนวณความยาวของสายอากาศ

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3.0 \times 10^9 \sqrt{3.147}} - 2(0.149)$$

$$L = 27.6 \text{ มม.}$$

3. คำนวณขนาดช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากสมการพื้นฐานคือ

$$f_c = \frac{c}{\lambda_g \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.5)$$

โดย f_c คือ ความถี่กลางของย่านอัลตราไวด์แบนด์

$$f_c = \frac{f_h + f_l}{2} = \frac{10.6 + 3.10}{2} = 6.85 \text{ GHz}$$

และ λ_g คือ ความยาวคลื่นของความถี่กลางของย่านอัลตราไวด์แบนด์
 ดังนั้นจากสมการที่ (3.5) จะได้

$$\lambda_g = \frac{3 \times 10^8}{6.85 \times 10^9 \times \sqrt{3.147}} = 24.69 \text{ มม.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ λ_g มีความสัมพันธ์กับความยาวรอบช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (L_g) นั่นคือ $\lambda_g = 2L_g$

โดยการออกแบบขนาดของ L_g เพื่อให้เกิดการแมตช์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่อัลตราไวต์แบนด์ จะใช้การปรับพารามิเตอร์ของสตัปมาช่วย และทำการจำลองโครงสร้างสายอากาศบนโปรแกรม IE3D เพื่อปรับให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

3.1.1.2 การคำนวณขนาดของสายนำสัญญาณระนาบร่วม (Coplanar Waveguide)

การคำนวณขนาดของสายนำสัญญาณระนาบร่วมนั้นจะทำการคำนวณใน 2 ส่วนคือ

1. คำนวณความยาวของสายนำสัญญาณ (T) โดยใช้สูตรคำนวณการหาความยาวของสายส่งไมโครสตริป ดังสมการที่ (3.6) [25] คือ

$$T = \frac{90^\circ \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right)}{\sqrt{\epsilon_{eff}} k_0} \quad (3.6)$$

โดย k_0 คือ ค่าคงที่การแผ่กระจายคลื่นในอากาศ

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (3.7)$$

และ c คือ ความเร็วแสงในอากาศมีค่าเท่ากับ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

f คือ ความถี่ในที่นี่เลือกความถี่ต่ำสุด คือ 3.1 GHz

ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ 3.147

จะได้

$$T = \frac{90^\circ \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right)}{\sqrt{3.147} (64.9)} = 13.6 \text{ มม.}$$

2. คำนวณความกว้างของแผ่นสตริป (F) และช่องระหว่างแผ่นสตริปกับระนาบกราวด์ (S) เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์คาเรกเตอร์ริสติกที่ 50Ω ตามสมการที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อสายนำสัญญาณระนาบร่วมของบทที่ 2 โดยกำหนดให้ $F = 10$ มม. $S = 0.25$ มม. วัสดุฐานรองสูง 0.3 มม. ค่า $\epsilon_r = 3.2$ จะได้

$$k_0 = \frac{F}{2s + F} = \frac{10}{2(0.25) + 10} = 0.95$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{และ } k_1 = \frac{\sinh\left(\frac{W\pi}{4h}\right)}{\sinh\left(\frac{(2S+W)\pi}{4h}\right)} = \frac{\sinh\left(\frac{10\pi}{4(0.3)}\right)}{\sinh\left(\frac{10.5\pi}{4(0.3)}\right)} = 0.27$$

$$k' = \sqrt{1-k^2} ; k'_0 = 0.3 \text{ และ } k'_1 = 0.96$$

กรณี k_0 ; $0.707 \leq k \leq 1$

$$\frac{K(k_0)}{K'(k_0)} = \frac{1}{\pi} 2 \ln \left(\frac{2(1+\sqrt{k'_0})}{1-\sqrt{k'_0}} \right) = \frac{1}{\pi} 2 \ln \left(\frac{2(1+\sqrt{0.3})}{1-\sqrt{0.3}} \right) = 1.22$$

กรณี k_1 ; $0 \leq k \leq 0.707$

$$\frac{K(k_1)}{K'(k_1)} = \frac{\pi}{2 \ln \left(\frac{2(1+\sqrt{k'_1})}{1-\sqrt{k'_1}} \right)} = \frac{\pi}{2 \ln \left(\frac{2(1+\sqrt{0.96})}{1-\sqrt{0.96}} \right)} = 0.3$$

จะได้

$$\varepsilon_{eff} = 1 + \frac{1}{2} (\varepsilon_r - 1) \frac{K'(k_1) K(k_0)}{K(k_1) K'(k_0)} = 1 + \frac{1}{2} (3.2 - 1) \frac{1.22}{0.3} = 5.47$$

และ

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \frac{K(k_0)}{K'(k_0)} = \frac{30\pi}{\sqrt{5.47}} \times 1.22 = 49.16\Omega$$

ดังนั้น ความกว้างของแผ่นสตริป (F) = 10 มม. และช่องระหว่างแผ่นสตริปกับกราวด์ (S) = 0.25 มม.

3.1.1.3 การปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์

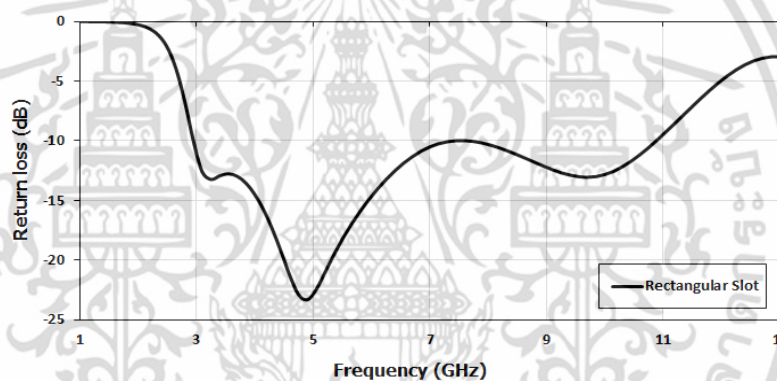
เมื่อคำนวณขนาดของสายอากาศและสายนำสัญญาณแล้ว จะทำการจำลองโครงสร้างสายอากาศบนโปรแกรม IE3D และปรับพารามิเตอร์อื่นๆ เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ในการปรับพารามิเตอร์นั้นจะทำได้โดยการพิจารณาค่าความสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) โดยปรับขนาดพารามิเตอร์ให้สายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ผลของการปรับค่าพารามิเตอร์จะได้สายอากาศที่มีแมตซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์แสดงดังรูปที่ 3.2 และค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดแสดงดังตารางที่ 3.1 จากผลการจำลองพบว่าสายอากาศมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ คือ 2.9-10.8 GHz และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวทั้งหมดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมกับค่าความยาวคลื่นที่ได้คำนวณไว้จะเห็นว่าความยาวที่ใช้ในการสร้างจริงมีขนาด $L_{gs} = 4.32\lambda_g$

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ ($f_c = 6.85$ GHz)

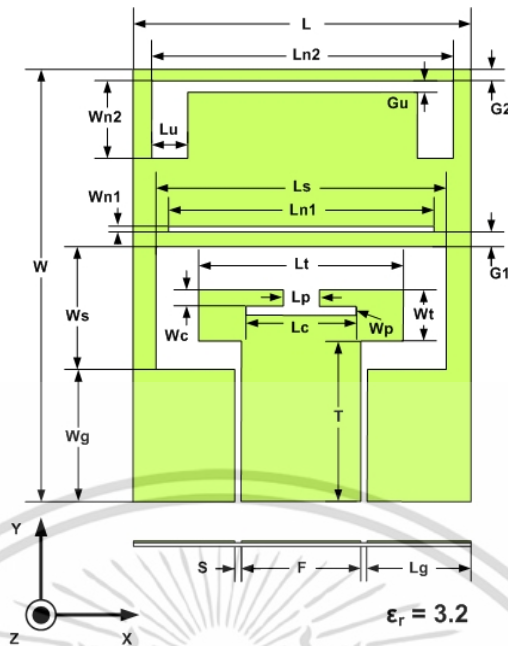
พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W_s	9.8	L_s	23.3
W_t	4	L_t	16.5
W_p	0.8	L_p	3
W_c	1.2	L_c	9
W_g	10.5	L_g	8.3
F	9.7	T	12.7
S	0.5		



รูปที่ 3.2 ผลการจำลอง Return loss ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์

3.1.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX

ในหัวข้อนี้จะทำการนอตซ์ความถี่ของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบในหัวข้อ 3.1.1 โดยการเจาะช่องเปิดลงไปบนบริเวณแพร่กระจายคลื่นเหนือตัวสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ เนื่องจากลักษณะแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมนี้สร้างได้ง่ายและให้ผลการทดลองที่ดี โดยทำการเจาะช่องเปิดสี่เหลี่ยมแคบบริเวณเหนือโครงสร้างของช่องเปิดอัลตราไวด์แบนด์เพื่อนอตซ์ย่านความถี่ WLAN (5.1-5.8 GHz) และเจาะช่องเปิดด้วยบริเวณขอบด้านบนของสายอากาศเพื่อนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX (3.3-3.7 GHz) โครงสร้างของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX และ WLAN แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX

- L_{n1} คือ ความยาวของช่องเปิดแคบที่นอตช์ย่านความถี่ WLAN
 L_{n2} คือ ความยาวของช่องเปิดตัวอยู่ที่นอตช์ย่านความถี่ WiMAX
 W_{n1} คือ ความกว้างของช่องเปิดแคบที่นอตช์ย่านความถี่ WLAN
 W_{n2} คือ ความยาวขาของช่องเปิดตัวอยู่ที่นอตช์ย่านความถี่ WiMAX
 $G1$ คือ ระยะระหว่างช่องเปิด UWB กับช่องเปิดแคบที่นอตช์ย่านความถี่ WLAN
 $G2$ คือ ระยะห่างระหว่างขอบของสายอากาศกับช่องเปิดตัวอยู่ที่นอตช์ย่านความถี่ WiMAX
 L_u คือ ความกว้างขาของช่องเปิดตัวอยู่ที่นอตช์ย่านความถี่ WiMAX
 G_u คือ ระยะระหว่างความยาวด้านนอกและด้านในของช่องเปิดตัวอยู่

3.1.2.1 การคำนวณขนาดของช่องเปิดที่นอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX

การออกแบบขนาดของช่องเปิดที่ใช้ในการนอตช์ความถี่ในย่าน WLAN และ WiMAX สามารถคำนวณได้จากสมการพื้นฐานคือ

$$f_{nc} = \frac{c}{\lambda_{gn} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.8)$$

โดย f_{nc} คือ ความถี่กลางของย่านความถี่นอตช์ สำหรับย่าน WLAN เท่ากับ 5.5 GHz และ WiMAX เท่ากับ 3.5 GHz

λ_{gn} คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่นอตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ความยาวคลื่นของความถี่นอตซ์ (λ_{gn}) ในย่าน WLAN = 30.71 มม. และย่าน WiMAX = 48.26 มม. และความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กับขนาดของช่องเปิดของย่านความถี่นอตซ์ นั่นคือ $\lambda_{gn} = 2L_{gn}$ ดังนั้น

$$f_{nc} = \frac{c}{2L_{gn}\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.9)$$

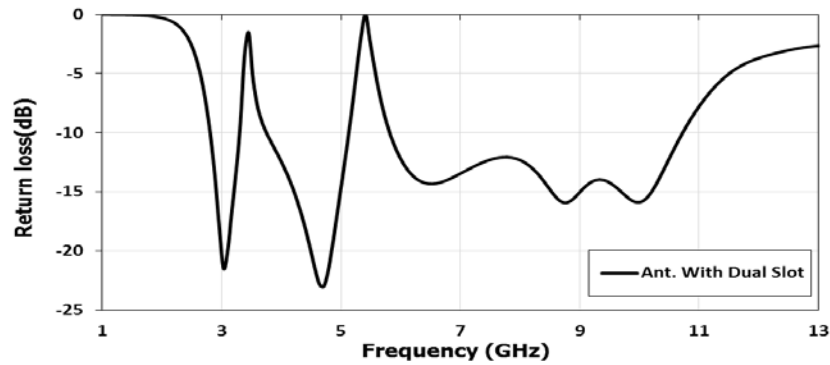
L_{gn} คือ ความยาวของช่องเปิดสี่เหลี่ยมแคบที่นอตซ์ความถี่ในย่าน WLAN และความยาวเส้นรอบรูปของช่องเปิดตัวอยู่ที่นอตซ์ความถี่ในย่าน WiMAX

3.1.2.2 การปรับพารามิเตอร์ของช่องเปิดที่นอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX

เมื่อทราบขนาดของช่องเปิดที่ทำการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ที่ได้จากการคำนวณแล้ว จะทำการจำลองโครงสร้างสายอากาศบนโปรแกรม IE3D และปรับพารามิเตอร์ของช่องเปิดที่นอตซ์ย่านความถี่ทั้ง 2 ย่าน โดยคงขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ไว้เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ยกเว้นบริเวณที่มีการนอตซ์ความถี่ ผลการจำลองจะได้ค่าพารามิเตอร์ของช่องเปิดสำหรับการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ที่ดีที่สุดแสดงดังตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.4 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านอัลตราไวด์แบนด์ยกเว้นบริเวณย่านความถี่ WLAN และ WiMAX

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของช่องเปิดสำหรับการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN ($f_{nc} = 5.5 \text{ GHz}$) และ WiMAX ($f_{nc} = 3.5 \text{ GHz}$)

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
$Ln1$	21.4
$Ln2$	24.3
$Wn1$	0.5
$Wn2$	6.3
$G1$	1.35
$G2$	0.75
Lu	2.75
Gu	1



รูปที่ 3.4 ผลการจำลอง Return loss ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX

จากผลการจำลองเพื่อหาขนาดช่องเปิดที่เหมาะสมที่สุดในการนอตช์ความถี่ในย่าน WLAN และ WiMAX พบว่าสายอากาศมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ตั้งแต่ 2.8-10.6 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านอัลตราไวด์แบนด์ ยกเว้นบริเวณที่ทำการนอตช์ความถี่ ได้แก่ ย่าน WLAN (5.5 GHz) และ WiMAX (3.5 GHz) โดยขนาดพารามิเตอร์ของช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีผลต่อการนอตช์ความถี่ WLAN มากที่สุด คือความยาวของช่องเปิดสี่เหลี่ยมแคบ L_{n1} และขนาดพารามิเตอร์ของช่องเปิดตัวยูที่มีผลต่อการนอตช์ความถี่ WiMAX ได้แก่ L_{n2} , W_{n2} และ G_u และสามารถเขียนสมการความถี่นอตช์ย่าน WLAN (f_{nwl}) และ WiMAX (f_{nwi}) ได้ดังสมการที่ (3.10) และ (3.11) ตามลำดับ

$$f_{nwl} = \frac{c}{(0.715(2L_{gnwl} \sqrt{\epsilon_{eff}}))} \quad (3.10)$$

โดย L_{gnwl} คือความยาวของช่องเปิดสี่เหลี่ยมแคบ L_{n1} และความยาวช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่ใช้สร้างจริงมีขนาด $L_{gnwl} = 0.7\lambda_{gn}$

$$f_{nwi} = \frac{c}{(0.336(2L_{gnwi} \sqrt{\epsilon_{eff}}))} \quad (3.11)$$

โดย L_{gnwi} คือความยาวทั้งหมดของช่องเปิดตัวยู เท่ากับ $2L_{n2} + 4W_{n2} - 2G_u$ และความยาวช่องเปิดตัวยูที่ใช้สร้างจริงมีขนาด $L_{gnwi} = 1.488\lambda_{gnwi}$

จากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของสายอากาศแสดงดัง ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX

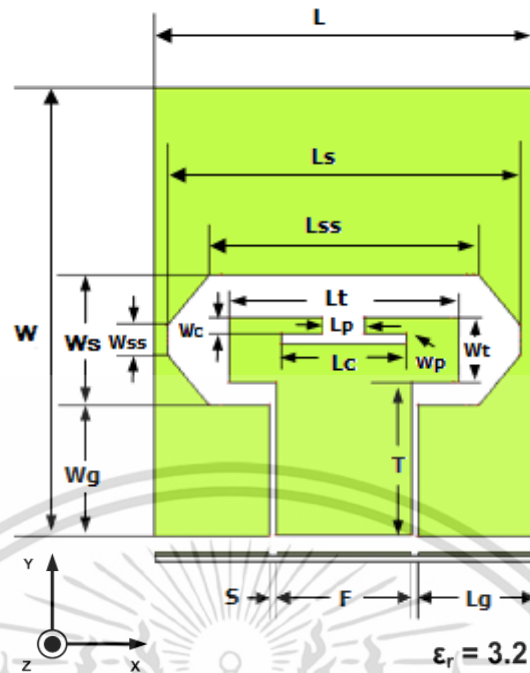
พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W_s	9.8	L_s	23.3
W_t	4	L_t	16.5
W_p	0.8	L_p	3
W_c	1.2	L_c	9
W_g	10.5	L_g	8.3
F	9.7	T	12.7
S	0.5	L_{n1}	21.4
W_{n1}	0.5	L_{n2}	24.3
W_{n2}	6.3	L_u	2.75
G_1	1.35	G_u	1
G_2	0.75		

3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ความถี่ย่าน WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink

ในหัวข้อนี้จะทำการพัฒนาสายอากาศที่ได้จากหัวข้อ 3.1 ให้มีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์มากขึ้น โดยในการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศในหัวข้อนี้จะทำ 2 ขั้นตอน คือ การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ หลังจากนั้นจึงออกแบบการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band Downlink ตามลำดับ

3.2.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์

ในการพัฒนาสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นนั้น ผู้วิจัยได้เลือกทำการปรับปรุงร่างของส่วนแพร่กระจายคลื่น โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดพารามิเตอร์ใด ๆ ของสายอากาศ และเนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าโครงสร้างสายอากาศที่มีลักษณะลาดเอียงหรือโค้งงอจะมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศกว้างขึ้น อันเนื่องมาจากผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อบริเวณขอบของสายอากาศ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับบริเวณขอบด้านนอกของช่องเปิดสี่เหลี่ยมให้มีลักษณะลาดเอียงเป็นรูปแปดเหลี่ยม โดยยังคงขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศในหัวข้อ 3.1.1 ไว้ดังเดิม โครงสร้างสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมแสดงตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์

- | | | |
|----------|-----|--|
| W | คือ | ความกว้างของสายอากาศ |
| W_s | คือ | ความกว้างขอบด้านนอกของช่องเปิดรูปแปดเหลี่ยม |
| W_{ss} | คือ | ความกว้างขอบด้านในของช่องเปิดรูปแปดเหลี่ยม |
| W_g | คือ | ระยะจากขอบล่างของสายอากาศถึงช่องเปิดแปดเหลี่ยม |
| W_t | คือ | ความกว้างของขาตั้งรูปรางคล้ายส้อม |
| W_c | คือ | ความกว้างของขาตั้งบนสตริปรูปรางคล้ายส้อม |
| W_p | คือ | ความกว้างของขาตั้งในสตริปรูปรางคล้ายส้อม |
| L | คือ | ความยาวของสายอากาศ |
| L_s | คือ | ความยาวขอบด้านนอกของช่องเปิดรูปแปดเหลี่ยม |
| L_{ss} | คือ | ความยาวขอบด้านในของช่องเปิดรูปแปดเหลี่ยม |
| L_g | คือ | ความยาวของระนาบกราวด์ด้านล่างของสายอากาศ |
| L_t | คือ | ความยาวของขาตั้งรูปรางคล้ายส้อม |
| L_c | คือ | ความยาวของขาตั้งบนสตริปรูปรางคล้ายส้อม |
| L_p | คือ | ความยาวของขาตั้งบนสตริปรูปรางคล้ายส้อม |
| T | คือ | ความยาวสตริปของสายส่งสัญญาณระนาบร่วม |
| F | คือ | ความกว้างสตริปของสายนำสัญญาณระนาบร่วม |
| S | คือ | ช่องว่างระหว่างสตริปกับระนาบกราวด์ของสายนำสัญญาณ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.1 ขนาดโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์

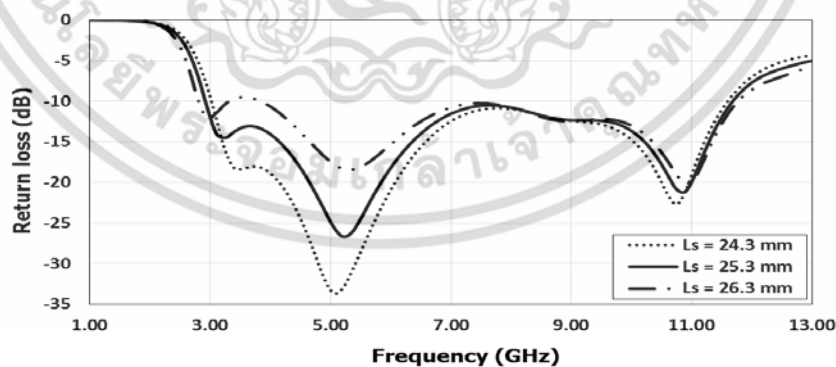
เนื่องจากการพัฒนาสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมให้มีแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นนั้นจะใช้วิธีปรับโครงสร้างจากสายอากาศเดิมในหัวข้อ 3.1.1 ให้เป็นช่องเปิดแปดเหลี่ยมโดยไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดใด ๆ ของตัวสายอากาศเดิม ดังนั้นจึงยังคงขนาดโครงสร้างเดิมของสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้ นั่นคือความกว้างของสายอากาศ (W) = 34.5 มม. ความยาวของสายอากาศ (L) = 27.6 มม. ความยาวรอบช่องเปิดอัลตราไวด์แบนด์ (L_{gs}) = $4.32\lambda_g$ ความยาวของสายนำสัญญาณ (T) = 12.7 มม. ความกว้างของแผ่นสตริปของสายนำสัญญาณ (F) = 9.7 มม. และขนาดช่องระหว่างแผ่นสตริปกับกราวด์ (S) = 0.5 มม.

3.2.1.2 การปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์

เมื่อทำการปรับโครงสร้างส่วนใดส่วนหนึ่งของสายอากาศแล้ว จะต้องปรับพารามิเตอร์อื่นร่วมด้วย เพื่อให้สายอากาศมีการแมตช์อิมพีแดนซ์ตลอดทั้งย่านที่ออกแบบ โดยทำการจำลองโครงสร้างสายอากาศบนโปรแกรม IE3D และปรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ L_s , W_s , L_{ss} , W_{ss} , L_t , W_t , W_c , W_p , L_c และ L_p ซึ่งผลการจำลองการปรับพารามิเตอร์แสดงดังต่อไปนี้

1. การจำลองปรับความยาวด้านนอกของช่องเปิดแปดเหลี่ยม L_s

ผลการจำลองโครงสร้างของสายอากาศเมื่อทำการปรับขนาดความยาวของช่องเปิด L_s จาก 24.3 มม. ถึง 26.3 มม. แสดงดังรูปที่ 3.6 พบว่าการปรับพารามิเตอร์ L_s มีผลกระทบต่อแมตช์อิมพีแดนซ์ โดยสายอากาศที่มีขนาดพารามิเตอร์ L_s สั้นกว่าจะมีแมตช์อิมพีแดนซ์ดีกว่า แต่มีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์แคบกว่าสายอากาศที่มีขนาดพารามิเตอร์ L_s ยาวกว่า

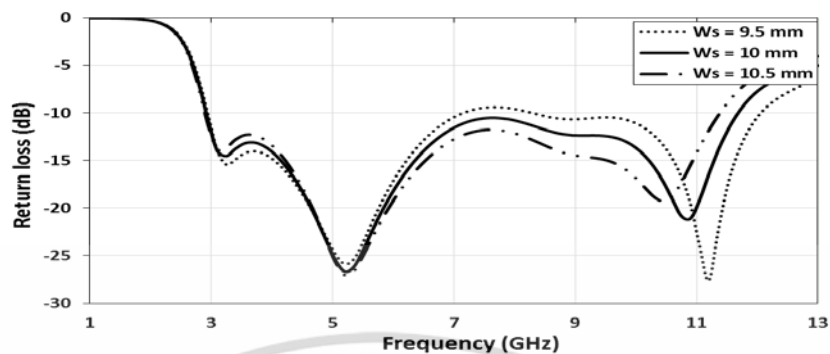


รูปที่ 3.6 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ L_s

2. การจำลองปรับความกว้างขอบด้านนอกของช่องเปิดแปดเหลี่ยม W_s

ผลการจำลองโครงสร้างสายอากาศเมื่อทำการปรับขนาดความกว้างของช่องเปิด W_s ตั้งแต่ 9.5 มม. ถึง 10.5 มม. แสดงดังรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าการปรับขนาดของพารามิเตอร์ W_s มีผลต่อแมตช์อิมพีแดนซ์บริเวณความถี่อัลตราไวด์แบนด์ด้านความถี่สูง นั่นคือ สายอากาศที่มีขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

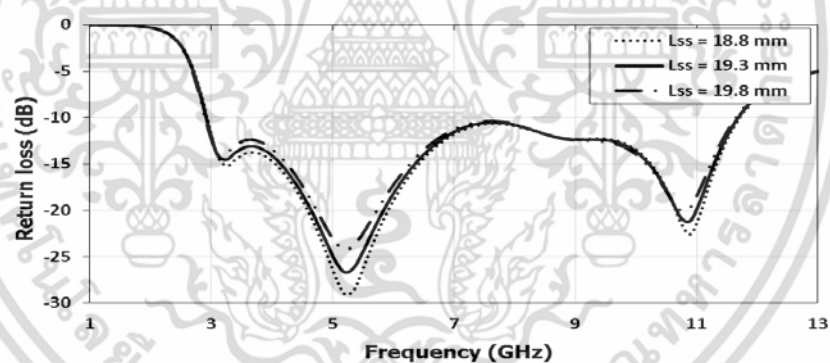
พารามิเตอร์ W_s ยาวกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า ในขณะที่ความถี่รีโซแนนซ์เลื่อนไปทางความถี่ต่ำ และมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์แคบกว่าสายอากาศที่มีขนาดพารามิเตอร์ W_s สั้นกว่า



รูปที่ 3.7 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_s

3. การจำลองปรับความยาวด้านในของช่องเปิดแปดเหลี่ยม L_{ss}

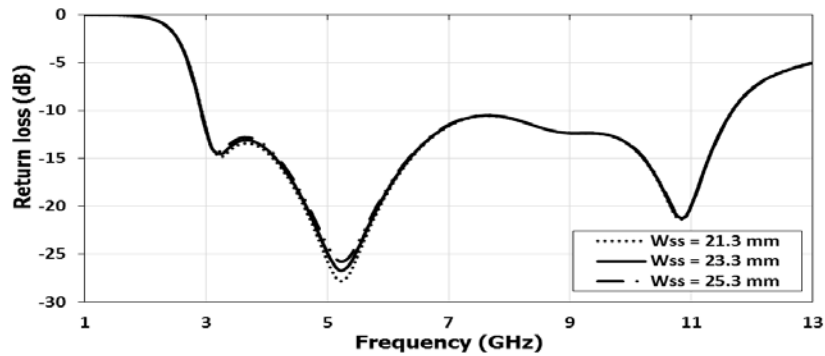
ผลการจำลองโครงสร้างสายอากาศเมื่อทำการปรับขนาดความยาว L_{ss} ตั้งแต่ 18.8 มม. ถึง 19.8 มม. แสดงดังรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าการปรับขนาดของพารามิเตอร์ L_{ss} มีผลกระทบต่อแมตซ์อิมพีแดนซ์ตลอดทั้งย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์โดยสายอากาศที่มีขนาดพารามิเตอร์ L_{ss} สั้นกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า ในขณะที่อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.8 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ L_{ss}

4. การจำลองปรับความกว้างด้านในของช่องเปิดแปดเหลี่ยม W_{ss}

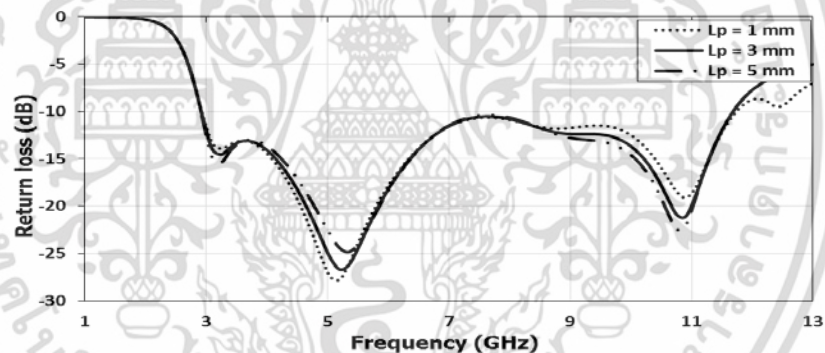
ผลการจำลองโครงสร้างสายอากาศจากการปรับขนาดความยาวขอบด้านในของช่องเปิดแปดเหลี่ยม W_{ss} ตั้งแต่ 21.3 มม. ถึง 25.3 มม. แสดงดังรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าการปรับขนาดของพารามิเตอร์ W_{ss} แทบจะไม่มีผลต่ออิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศ แต่มีผลกระทบเล็กน้อยต่อแมตซ์อิมพีแดนซ์บริเวณย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ด้านความถี่ต่ำ โดยสายอากาศที่มีขนาดพารามิเตอร์ W_{ss} สั้นกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 3.9 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_s

5. การจำลองพารามิเตอร์สตัป L_p

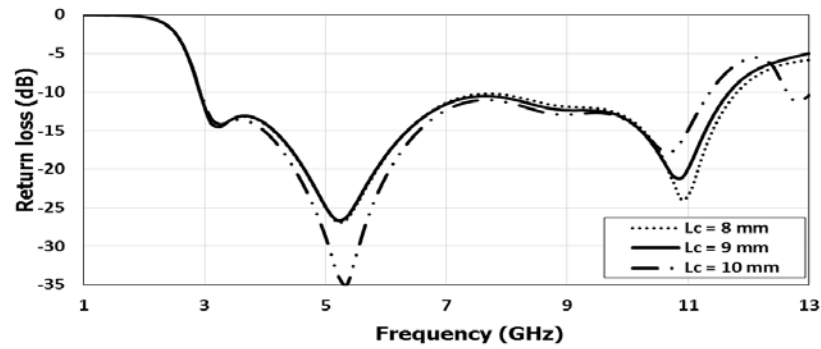
ผลการจำลองเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_p ตั้งแต่ 1 มม. ถึง 5 มม. แสดงดังรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับขนาดพารามิเตอร์ L_p สายอากาศจะมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ใกล้เคียงกัน แต่มีแมตซ์อิมพีแดนซ์ต่างกันคือ ที่ความถี่อัลตราไวด์แบนด์ด้านความถี่สูง สายอากาศที่มีขนาด L_p ยาวกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า ในขณะที่ด้านความถี่ต่ำ สายอากาศที่มีขนาด L_p สั้นกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า



รูปที่ 3.10 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ L_p

6. การจำลองปรับพารามิเตอร์สตัป L_c

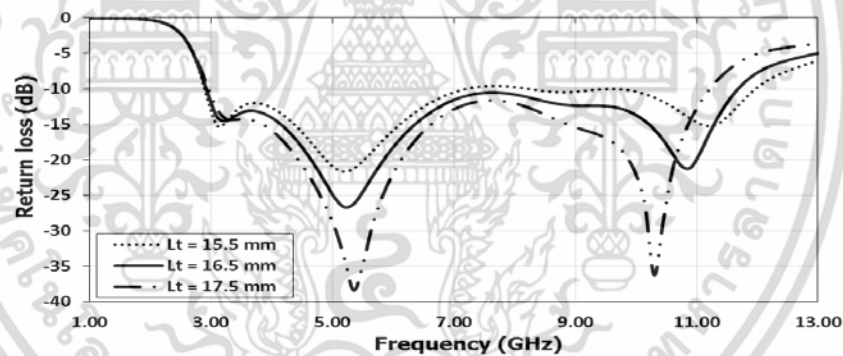
ผลการจำลองการปรับค่าพารามิเตอร์ L_c ตั้งแต่ 8 มม. ถึง 10 มม. แสดงดังรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าการปรับขนาดพารามิเตอร์ L_c มีผลต่อการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์และแบนด์วิดท์ โดยให้ผลการแมตซ์อิมพีแดนซ์สลับกันระหว่างย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ด้านความถี่ต่ำและด้านความถี่สูง ที่ย่านความถี่ต่ำสายอากาศที่มีขนาด L_c ยาวกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า ในขณะที่ย่านความถี่สูงสายอากาศที่มีขนาด L_c สั้นกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า และ ขนาด L_c ที่สั้นกว่าจะให้ อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศกว้างกว่า



รูปที่ 3.11 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ L_c

7. การจำลองปรับพารามิเตอร์สลับ L_t

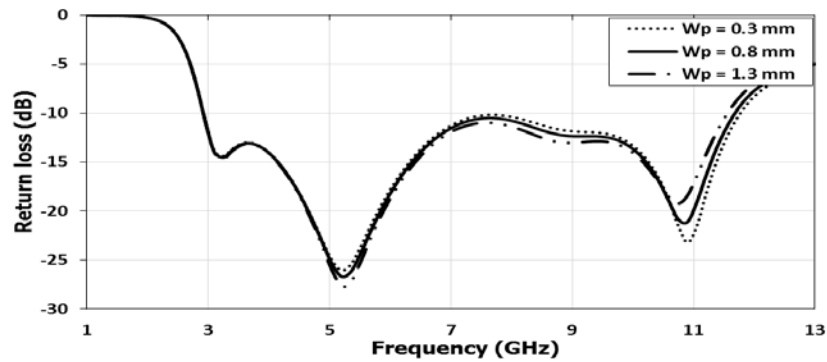
รูปที่ 3.12 แสดงการจำลองการปรับค่าพารามิเตอร์ L_t โดยทำการปรับขนาดพารามิเตอร์จาก 15.5 มม. ถึง 17.5 มม. จะเห็นว่าการปรับพารามิเตอร์ L_t มีผลต่อแมตซ์อิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ และตำแหน่งของความถี่โซแนนซ์ โดยเมื่อปรับขนาด L_t ให้ยาวขึ้นแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะดีขึ้น แต่มีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์แคบลง และความถี่โซแนนซ์ของความถี่อัลตราไวด์แบนด์ด้านต่ำเลื่อนไปทางความถี่สูง ในขณะที่ความถี่โซแนนซ์ของความถี่อัลตราไวด์แบนด์ด้านสูงเลื่อนไปทางความถี่ต่ำ



รูปที่ 3.12 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ L_t

8. การจำลองปรับพารามิเตอร์สลับ W_p

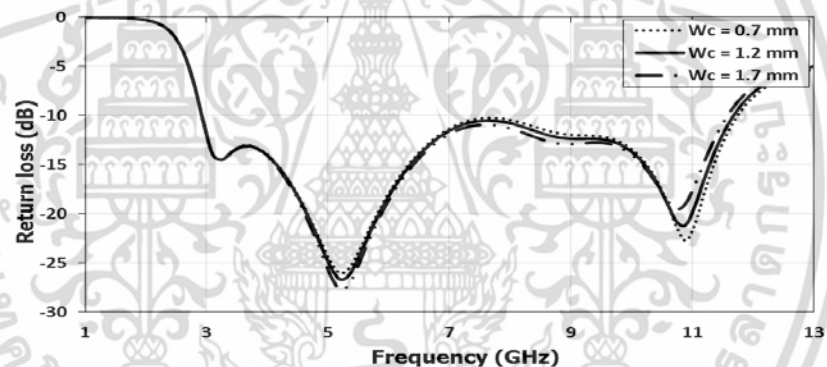
ผลการจำลองการปรับค่าพารามิเตอร์ W_p แสดงดังรูปที่ 3.13 โดยทำการปรับขนาด W_p จาก 0.3 มม. ถึง 1.3 มม. จะเห็นได้ว่าการปรับขนาดของพารามิเตอร์ W_p ให้ผลการจำลองคล้ายกับพารามิเตอร์ L_c นั่นคือการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_p ให้ผลการแมตซ์อิมพีแดนซ์สลับกันระหว่างย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ด้านความถี่ต่ำและด้านความถี่สูง ที่ด้านความถี่ต่ำสายอากาศที่มีขนาด W_p ยาวกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่าเล็กน้อย ในขณะที่ด้านความถี่สูงสายอากาศที่มีขนาด W_p สั้นกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า และ ขนาด W_p ที่สั้นกว่าจะให้อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์กว้างกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 3.13 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ W_p

9. การจำลองปรับพารามิเตอร์สลับ W_c

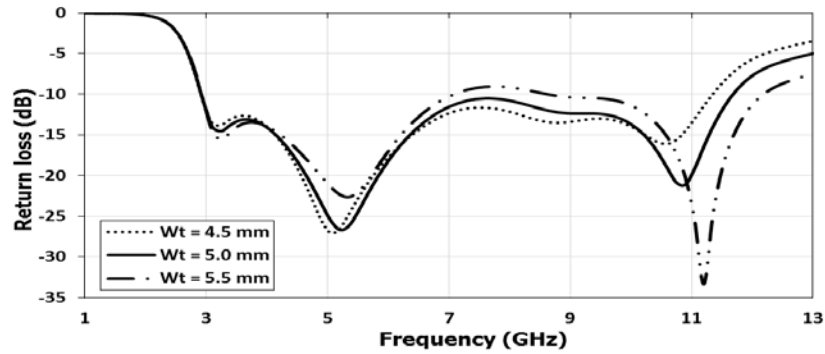
ผลการจำลองเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_c ตั้งแต่ 0.7 มม. ถึง 1.7 มม. แสดงดังรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าที่ย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ด้านความถี่ต่ำสายอากาศจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ด้านความถี่สูงสายอากาศที่มีขนาด W_c สั้นกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า และขนาด W_c ที่สั้นกว่าจะให้อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศกว้างกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 3.14 ผลการจำลองการ Return loss ของปรับขนาดพารามิเตอร์ W_c

10. การจำลองปรับพารามิเตอร์สลับ W_t

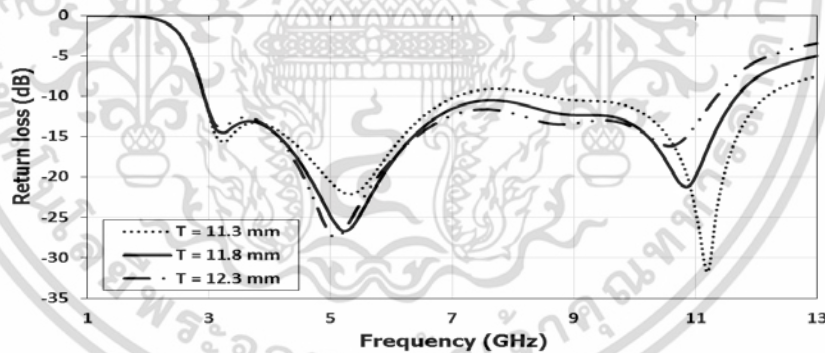
ผลการจำลองการปรับค่าพารามิเตอร์ W_t แสดงรูปที่ 3.15 โดยทำการปรับขนาดพารามิเตอร์จาก 4.5 มม. ถึง 5.5 มม. จะเห็นว่าการปรับพารามิเตอร์ W_t มีผลต่อแมตซ์อิมพีแดนซ์ตำแหน่งความถี่รีโซแนนซ์และอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ โดยเมื่อปรับ W_t ให้มีขนาดสั้นลง ที่ย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ด้านความถี่ต่ำสายอากาศจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า ในขณะที่ด้านความถี่สูงสายอากาศที่มีขนาด W_t ยาวกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า และเมื่อ W_t มีขนาดยาวขึ้นความถี่รีโซแนนซ์ของสายอากาศจะเลื่อนไปด้านความถี่สูงและสายอากาศมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์กว้างขึ้น



รูปที่ 3.15 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ Wt

11. การจำลองปรับความยาวของสายนำสัญญาณระนาบร่วม (T)

ความยาวของสายนำสัญญาณระนาบร่วม T มีความสัมพันธ์ขนาดของพารามิเตอร์ Wt นั่นคือเมื่อปรับขนาดพารามิเตอร์ Wt ให้ยาวขึ้นจะทำให้สายนำสัญญาณ T สั้นลง ผลการจำลองการปรับพารามิเตอร์ T แสดงดังรูปที่ 3.16 โดยทำการปรับขนาดพารามิเตอร์จาก 11.3 มม. ถึง 12.2 มม. และผลการจำลองที่ได้จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับการปรับ Wt นั่นคือ เมื่อปรับ T ให้มีขนาดยาวขึ้น ที่ย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ด้านความถี่ต่ำสายอากาศจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า ในขณะที่ด้านความถี่สูงสายอากาศที่มีขนาด Wt สั้นกว่าจะมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีกว่า และเมื่อพารามิเตอร์ T มีขนาดสั้นลงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศจะเลื่อนไปด้านความถี่สูงและสายอากาศมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้น

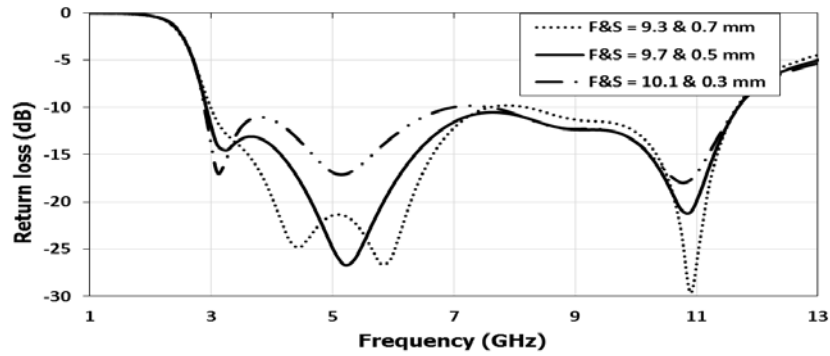


รูปที่ 3.16 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ T

12. การจำลองปรับขนาดแผ่นสตริป (F) และร่องระหว่างสตริปและกราวนด์ (S) ของสายนำสัญญาณ

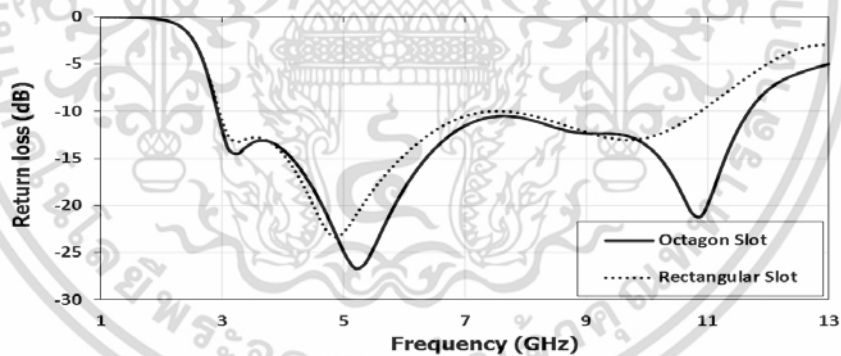
ผลการจำลองเพื่อหาขนาดของพารามิเตอร์ F และ S ที่เหมาะสมที่สุดแสดงดังรูปที่ 3.17 ซึ่งการปรับพารามิเตอร์ทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน คือ ถ้าเพิ่มระยะของพารามิเตอร์ F มากขึ้นจะทำให้ระยะของพารามิเตอร์ S ลดลง โดยในการจำลองได้ทำการปรับขนาดพารามิเตอร์ F ให้ลดครั้งละ 0.4 มม. จาก 10.1 มม. ถึง 9.3 มม. ในขณะที่พารามิเตอร์ S ปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.2 มม. จาก 0.3 มม. ถึง 0.7 มม. จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าขนาดของพารามิเตอร์ที่ทำให้สายอากาศมีแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุด คือ F เท่ากับ 9.7 มม. และ S เท่ากับ 0.5 มม. ซึ่งใกล้เคียงกับที่ได้คำนวณไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับขนาดพารามิเตอร์ F และ S

จากการวิเคราะห์ผลการปรับขนาดพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ จะได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ดีที่สุดแสดงดังตารางที่ 3.4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความยาวทั้งหมดของช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับความยาวคลื่นที่ได้คำนวณไว้จะเห็นว่าความยาวที่ใช้ในการสร้างจริงมีขนาด $L_{gs} = 4.2\lambda_g$ และรูปที่ 3.18 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม ซึ่งจะเห็นได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมมีแมตซ์อิมพีแดนซ์และอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ดีกว่าสายอากาศโครงสร้างเดิมอย่างชัดเจน โดยสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ระหว่าง 2.9–10.8 GHz ในขณะที่สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ระหว่าง 2.9–11.8 GHz



รูปที่ 3.18 ผลการจำลอง Return loss ระหว่างสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและแปดเหลี่ยม

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ ($f_c = 6.85$ GHz)

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W_s	10	L_s	25.3
W_{ss}	2.3	L_{ss}	19.3
W_t	5	L_t	16.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ ($f_c = 6.85$ GHz)

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
Wp	0.8	Lp	3
Wc	1.2	Lc	9
Wg	10.15	Lg	8.3
F	9.7	T	11.8
S	0.5		

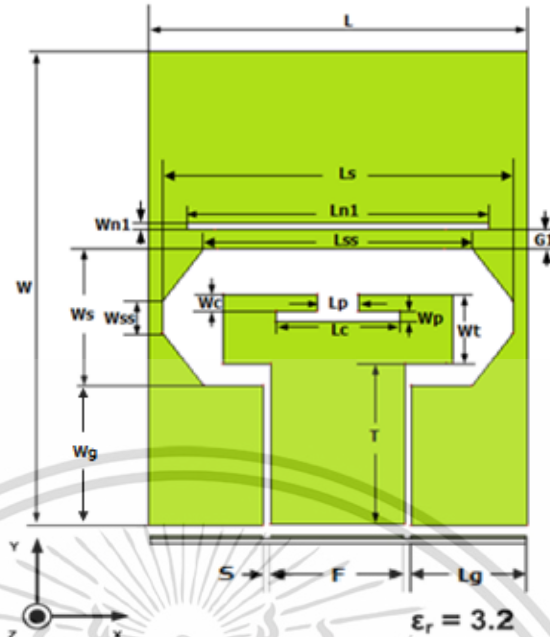
3.2.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ความถี่

ในหัวข้อนี้จึงทำการออกแบบการนอตซ์ความถี่ของสายอากาศในย่าน WLAN (5.1-5.8 GHz) และ WiMAX (3.3-3.7 GHz) เช่นเดียวกับการนอตซ์สายอากาศในหัวข้อ 3.1.2 ที่ผ่านมานอกจากนี้ยังได้ออกแบบการนอตซ์ย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบสื่อสารดาวเทียมสำหรับกิจการทหารคือ X-Band Downlink (7.25-7.75 GHz) ซึ่งการออกแบบการนอตซ์ความถี่จะแบ่งทำใน 3 ขั้นตอนได้แก่

1. การออกแบบการนอตซ์ความถี่ย่าน WLAN
2. การออกแบบการนอตซ์ความถี่ย่าน WiMAX
3. การออกแบบการนอตซ์ความถี่ย่าน X-Band Downlink

3.2.2.1 การออกแบบการนอตซ์ความถี่ย่าน WLAN

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ความถี่ย่าน WLAN ทำได้โดยการเจาะช่องเปิดแคบเพิ่มเข้าไปบริเวณที่มีการแพร่กระจายคลื่นเหนือตัวสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ โครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN แสดงดังรูปที่ 3.19 พารามิเตอร์ของช่องเปิดแคบที่เพิ่มเข้าไปได้แก่ $Ln1$ และ $Wn2$ โดยยังคงขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่ได้ทำการออกแบบก่อนหน้านี้ไว้



รูปที่ 3.19 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม สำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่นอตซ์ความถี่ WLAN

L_{n1} คือ ความยาวของช่องเปิดแคบที่นอตซ์ย่านความถี่ WLAN

W_{n1} คือ ความกว้างของช่องเปิดแคบที่นอตซ์ย่านความถี่ WLAN

$G1$ คือ ระยะระหว่างช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องเปิดแคบที่นอตซ์ย่านความถี่ WLAN

การออกแบบเปิดช่องแคบเพื่อทำการนอตซ์ความถี่ในย่าน WLAN สามารถคำนวณขนาดของช่องเปิดแคบได้จากสมการพื้นฐาน คือ

$$f_{n1} = \frac{c}{\lambda_{gn1} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.12)$$

โดย f_{n1} คือ ความถี่กลางของย่านความถี่นอตซ์ย่าน WLAN เท่ากับ 5.5 GHz

λ_{gn1} คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่นอตซ์ในย่าน WLAN

จะได้ความยาวคลื่นของความถี่นอตซ์ $\lambda_{gn1} = 30.71$ มม. และความยาวคลื่น (λ_{gn1}) มีความสัมพันธ์กับขนาดของช่องเปิดแคบ นั่นคือ $\lambda_{gn1} = 2L_{gn1}$ ดังนั้น

$$f_{n1} = \frac{c}{2L_{gn1} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.13)$$

L_{gn1} คือ ความยาวของเส้นรอบรูปช่องเปิดแคบที่นอตซ์ความถี่ในย่าน WLAN

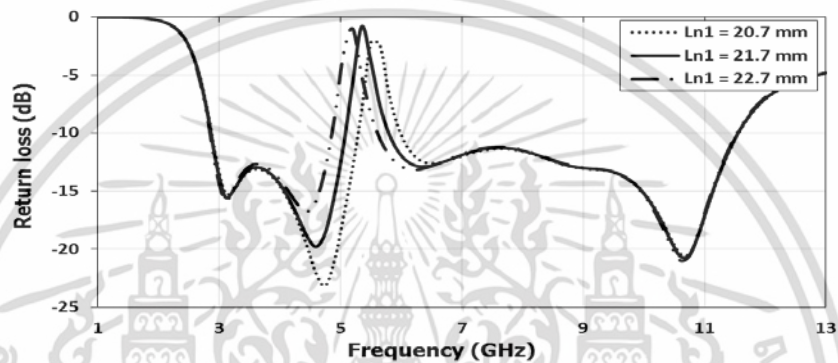
และขนาดของช่องเปิดแคบจะคำนวณเฉพาะด้านความยาว เนื่องจากช่องเปิดมีความกว้างน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการคำนวณขนาดของช่องเปิดแคบแล้ว เพื่อให้ได้ความถี่นอตช์ที่เหมาะสมที่สุดจึงทำการปรับขนาดของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องด้วยการจำลองโครงสร้างสายอากาศบนโปรแกรม IE3D โดยพารามิเตอร์ที่จะทำการปรับ ได้แก่ $Ln1$, $Wn1$ และ $G1$

1. การจำลองการปรับความยาวของช่องเปิดแคบ ($Ln1$)

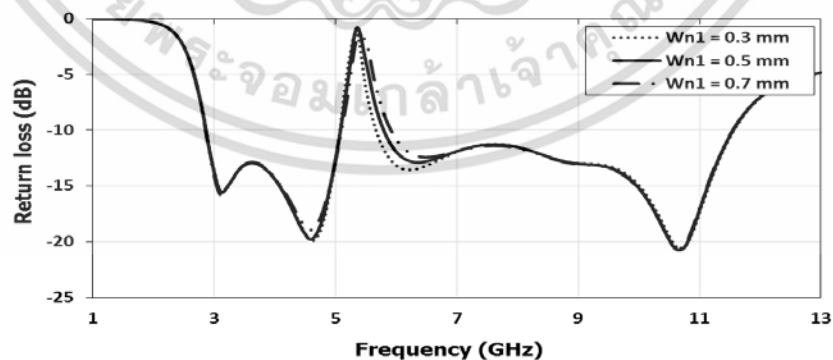
จากรูปที่ 3.20 แสดงผลการจำลอง Return loss ของการปรับค่าพารามิเตอร์ $Ln1$ จะเห็นได้ว่าขนาดของพารามิเตอร์ $Ln1$ มีผลต่อตำแหน่งของความถี่นอตช์ โดยเมื่อเพิ่มขนาด $Ln1$ จะทำให้ตำแหน่งความถี่นอตช์เลื่อนไปทางด้านความถี่ต่ำ และที่ $Ln1$ เท่ากับ 21.7 มม. ตำแหน่งของความถี่นอตช์จะประมาณ 5.5 GHz



รูปที่ 3.20 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับความยาวของช่องเปิดแคบ $Ln1$

2. การจำลองการปรับความกว้างของช่องเปิดแคบ ($Wn1$)

การปรับความกว้างของช่องเปิดแคบ $Wn1$ ไม่มีผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศมากนัก เนื่องจากช่องเปิดที่เจาะเข้าไปเป็นช่องแคบ ๆ จากรูปที่ 3.21 ซึ่งแสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อปรับพารามิเตอร์ $Wn1$ จาก 0.3 มม. ถึง 0.7 มม. พบว่าแบนด์วิดท์ของย่านความถี่นอตช์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยนั่นคือเมื่อเพิ่มขนาดของ $Wn1$ จะทำให้นอตช์แบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น

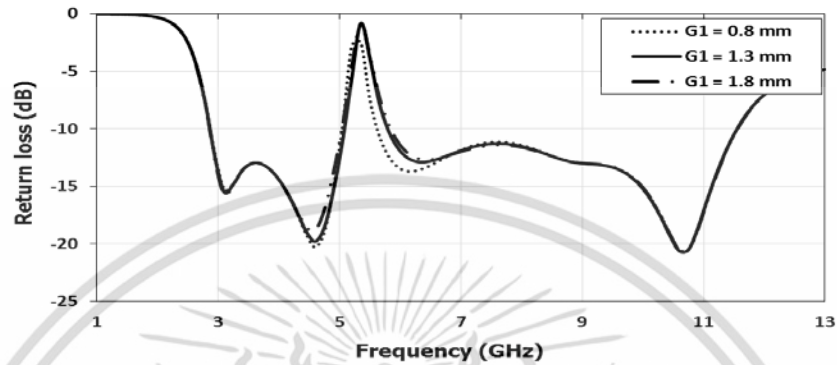


รูปที่ 3.21 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับความกว้างของช่องเปิดแคบ $Wn1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การจำลองการปรับระยะระหว่างสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องเปิดแคบ ($G1$)

รูปที่ 3.22 แสดงการจำลองการปรับระยะระหว่างสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องเปิดแคบ $G2$ ตั้งแต่ 0.8 มม. ถึง 1.8 มม. จะเห็นได้ว่าการปรับ $G2$ แทบจะไม่มีผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศ โดยเมื่อระยะ $G1$ เพิ่มมากขึ้นนอตช์แบนด์วิดท์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

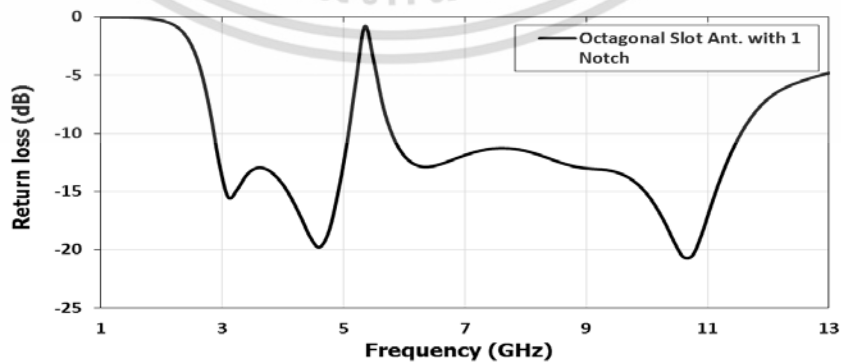


รูปที่ 3.22 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับระยะระหว่างสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องเปิดแคบ $G1$

จากการวิเคราะห์ผลการปรับขนาดพารามิเตอร์ต่างๆ ของช่องเปิดแคบ จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการนอตช์ความถี่ย่าน WLAN ที่ดีที่สุดแสดงดังตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.23 แสดงผลการจำลองสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ของช่องเปิดแคบสำหรับการนอตช์ย่านความถี่ WLAN ($f_{n1} = 5.5 \text{ GHz}$)

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
$Ln1$	21.7
$Wn1$	0.5
$G1$	1.3



รูปที่ 3.23 ผลการจำลองสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G_u คือ ระยะระหว่างขอบด้านนอกและด้านในของช่องเปิดตัวยู

G_2 คือ ระยะห่างระหว่างขอบของสายอากาศกับช่องเปิดตัวยู

การนอตซ์ความถี่ในย่าน WiMAX สามารถคำนวณขนาดของช่องเปิดรูปตัวยูได้จากสมการพื้นฐานที่ผ่านมา คือ

$$f_{n2} = \frac{c}{\lambda_{gn2} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.15)$$

โดย f_{n2} คือ ความถี่กลางของย่านความถี่นอตซ์ เท่ากับ 3.5 GHz

λ_{gn2} คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่นอตซ์ในย่าน WiMAX

จะได้ความยาวคลื่นของความถี่นอตซ์ $\lambda_{gn2} = 48.52$ มม. และความยาวคลื่น (λ_{gn2}) มีความสัมพันธ์กับขนาดของช่องเปิดตัวยู นั่นคือ $\lambda_{gn2} = 2L_{gn2}$ ดังนั้น

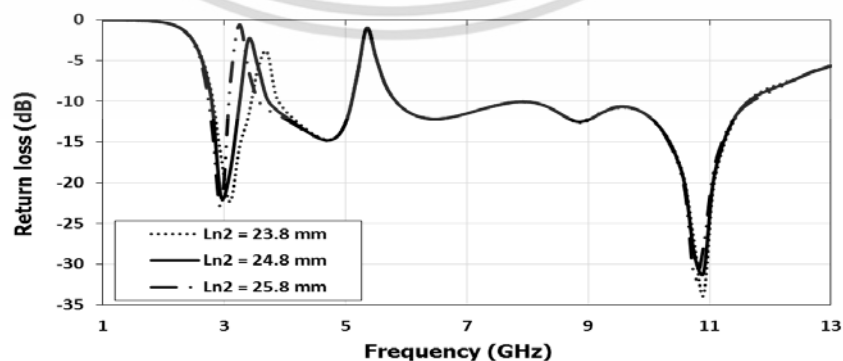
$$f_{n2} = \frac{c}{2L_{gn2} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.16)$$

L_{gn2} คือ ความยาวของเส้นรอบรูปช่องเปิดตัวยู ที่นอตซ์ความถี่ในย่าน WiMAX

เมื่อทำการคำนวณขนาดของช่องเปิดตัวยูแล้ว เพื่อให้เกิดการนอตซ์ความถี่ที่เหมาะสมที่สุดจะทำการปรับขนาดของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องด้วยการจำลองโครงสร้างสายอากาศบนโปรแกรม IE3D โดยพารามิเตอร์ที่ทำการปรับ ได้แก่ L_{n2} , W_{n2} , G_u , L_u และ G_2

1. การจำลองการปรับความยาวของช่องเปิดตัวยู (L_{n2})

จากรูปที่ 3.25 แสดงผลการจำลองการปรับค่าพารามิเตอร์ L_{n2} จะเห็นได้ว่าขนาดของพารามิเตอร์ L_{n2} มีผลต่อตำแหน่งของความถี่นอตซ์ โดยเมื่อเพิ่มขนาด L_{n2} จะทำให้ตำแหน่งความถี่นอตซ์เลื่อนไปทางด้านความถี่ต่ำ และที่ L_{n2} เท่ากับ 24.8 มม. ตำแหน่งของความถี่นอตซ์จะประมาณ 3.5 GHz

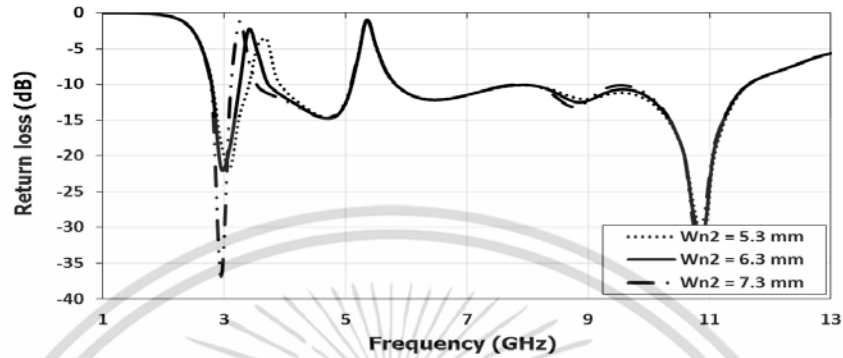


รูปที่ 3.25 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ L_{n2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การจำลองการปรับความกว้างของช่องเปิดด้วย ($Wn2$)

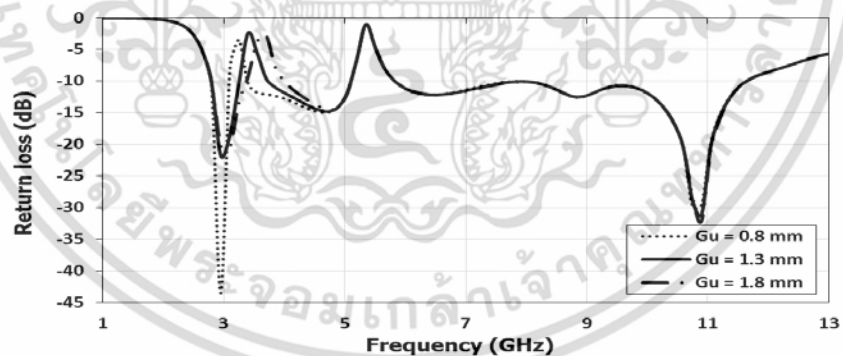
จากรูปที่ 3.26 แสดงผลการปรับพารามิเตอร์ $Wn2$ ซึ่งจะเห็นว่าขนาดของ $Wn2$ มีผลต่อตำแหน่งของความถี่นอตช์ โดยเมื่อเพิ่มขนาด $Wn2$ จะทำให้ตำแหน่งความถี่นอตช์เลื่อนไปทางด้านความถี่ต่ำ และที่ $Wn2$ เท่ากับ 6.3 มม. ตำแหน่งของความถี่นอตช์จะประมาณ 3.5 GHz



รูปที่ 3.26 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ $Wn2$

3. การจำลองการปรับระยะระหว่างขอบด้านนอกและด้านในของช่องเปิดด้วย (Gu)

จากรูปที่ 3.27 แสดงผลการปรับพารามิเตอร์ Gu ซึ่งจะเห็นว่าขนาดของ Gu มีผลต่อขนาดแบนด์วิดท์และตำแหน่งของความถี่นอตช์ โดยเมื่อเพิ่มขนาดของ Gu จะทำให้นอตช์แบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นและตำแหน่งความถี่นอตช์เลื่อนไปทางด้านความถี่สูง

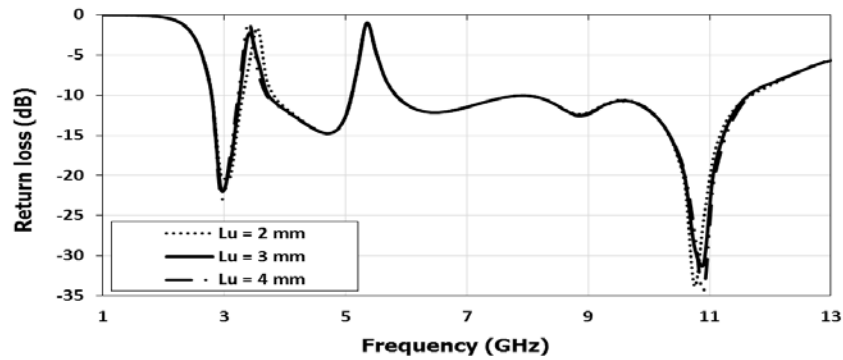


รูปที่ 3.27 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ Gu

4. การจำลองการปรับระยะความกว้างขาของช่องเปิดด้วย (Lu)

การปรับระยะขาของช่องเปิดด้วย Lu จะไม่มีผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศ ผลการปรับขนาดพารามิเตอร์ Lu แสดงดังรูปที่ 3.28 จะเห็นว่าตำแหน่งของการเกิดการนอตช์เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเมื่อเพิ่มระยะ Lu จะทำให้ตำแหน่งความถี่นอตช์เลื่อนไปทางด้านความถี่ต่ำ

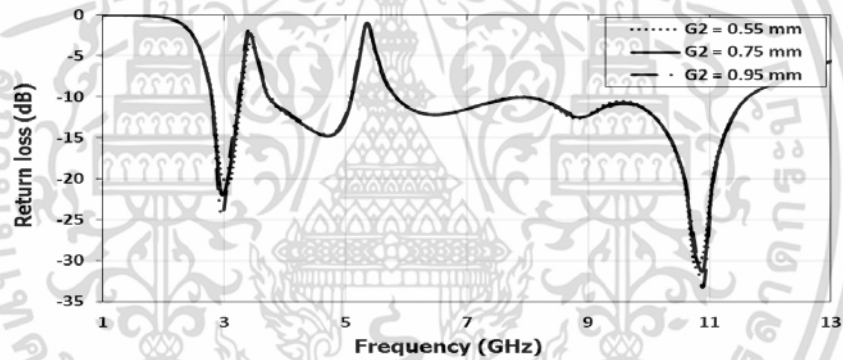
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ Lu

5. การจำลองการปรับระยะระหว่างขอบของสายอากาศกับช่องเปิดตัวยู ($G2$)

การปรับระยะระหว่างขอบของสายอากาศกับช่องเปิดตัวยู ให้ผลการจำลองคล้ายกับการปรับพารามิเตอร์ Lu นั่นคือการปรับพารามิเตอร์ $G2$ แทบจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศ โดยผลการปรับขนาดพารามิเตอร์ $G2$ แสดงดังรูปที่ 3.29 จะเห็นว่าตำแหน่งของการเกิดการนอตซ์ความถี่แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.29 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ $G2$

จากการวิเคราะห์ผลการปรับขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องเปิดตัวยู จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการนอตซ์ความถี่ย่าน WiMAX ที่เหมาะสมที่สุดแสดงดังตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.30 แสดงผลการจำลองสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX

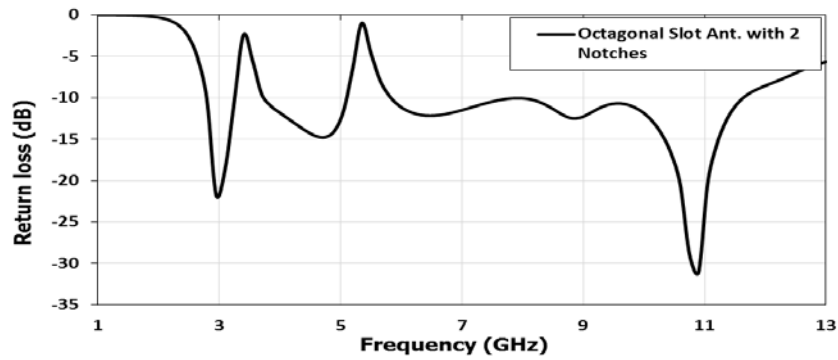
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ของช่องเปิดตัวยู สำหรับการนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX

$$(f_{n2} = 3.5 \text{ GHz})$$

พารามิเตอร์	ระยะ (มิลลิเมตร)
$Ln2$	24.8
Lu	3
$Wn2$	6.3
Gu	1.3
$G2$	0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

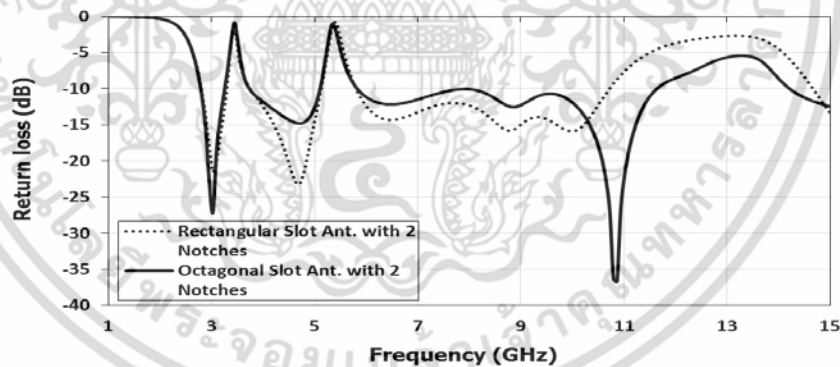


รูปที่ 3.30 ผลการจำลอง Return loss ของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX และ WLAN

จากผลการจำลองเพื่อหาขนาดช่องเปิดตัวยูที่เหมาะสมที่สุดในการนอตช์ความถี่ในย่าน WiMAX พบว่าขนาดพารามิเตอร์ของช่องเปิดที่มีผลต่อการนอตช์ความถี่ได้แก่ L_{n1} , W_{n1} และ G_u และสามารถเขียนสมการความถี่นอตช์ได้ดังสมการที่ (3.17)

$$f_{n2} = \frac{c}{(0.33(2L_{gn2} \sqrt{\epsilon_{eff}}))} \quad (3.17)$$

โดย L_{gn2} คือความยาวทั้งหมดของช่องเปิดตัวยู เท่ากับ $2L_{n2} + 4W_{n2} - 2G_u$ และความยาวช่องเปิดตัวยูที่ใช้สร้างจริงมีขนาด $L_{gn2} = 1.515\lambda_{gn2}$



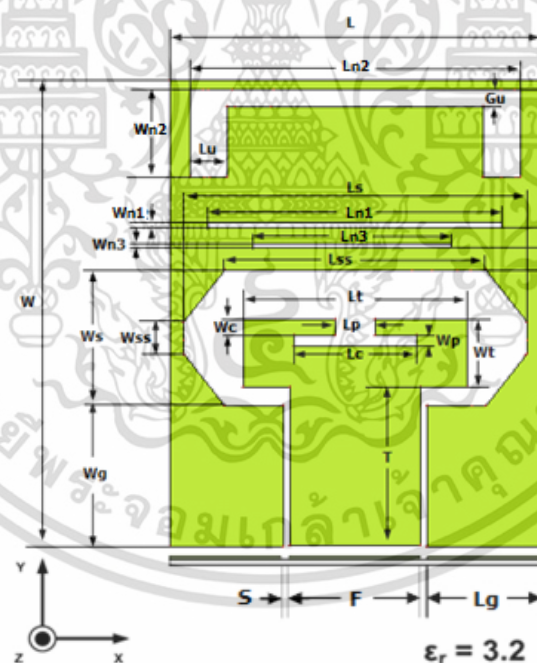
รูปที่ 3.31 เปรียบเทียบผลการจำลอง Return loss ระหว่างสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมกับแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX และ WLAN

รูปที่ 3.31 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมกับแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX และ WLAN จะเห็นได้ว่าสายอากาศทั้ง 2 แบบมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ครอบคลุมตลอดทั้งย่านอัลตราไวด์แบนด์และสามารถนอตช์ย่านความถี่ได้ตรงกันทั้ง 2 ย่าน แต่สายอากาศที่มีส่วนแพร่กระจายคลื่นแบบช่องเปิดแปด

เหลี่ยมจะมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ดีกว่า โดยมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 8.8 GHz (2.8-11.6 GHz) ในขณะที่สายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.8 GHz (2.8-10.6 GHz)

3.2.2.3 การออกแบบการนอตซ์ความถี่ย่าน X-Band Downlink

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนอตซ์ความถี่ในระบบสื่อสารดาวเทียมซึ่งมีการใช้งานความถี่ซ้ำซ้อนกับย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ นั่นคือการสื่อสารดาวเทียมสำหรับกิจการทหารย่าน X-Band (8/7 GHz) ซึ่งมีความถี่ในย่าน X-Band Downlink เท่ากับ 7.25-7.75 GHz และสำหรับการนอตซ์ความถี่ในย่านนี้จะเลือกทำเฉพาะสายอากาศที่มีโครงสร้างส่วนแพร่กระจายคลื่นแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม เนื่องจากหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า สายอากาศทั้ง 2 โครงสร้างสามารถนอตซ์ย่านความถี่ได้ใกล้เคียงกันแต่สายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ดีกว่า โดยการนอตซ์ย่านความถี่ X-Band Downlink จะทำโดยการกรีดช่องแคบ ๆ เพิ่มเข้าไปบนโครงสร้างเดิมระหว่างช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องเปิดแคบ โดยขยับช่องเปิดแคบขึ้นไปด้านบน จะได้โครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band Downlink แสดงดังรูปที่ 3.32 พารามิเตอร์ของช่องแคบที่กรีดเพิ่มเข้าไปได้แก่ $Ln3$ และ $Wn3$ โดยยังคงขนาดของพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ได้ทำการออกแบบก่อนหน้านี้ไว้ ยกเว้นระยะระหว่างช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องเปิดแคบ ($G1$)



รูปที่ 3.32 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่นอตซ์ความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink

- $Ln3$ คือ ความยาวของช่องแคบ ที่ย่านความถี่ X-band Downlink
- $Wn3$ คือ ความกว้างของช่องแคบ ที่ย่านความถี่ X-band Downlink
- $G3$ คือ ระยะห่างระหว่างขอบของช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องแคบ ที่ย่านความถี่ X-band Downlink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณขนาดของช่องแคบเพื่อทำการนอตซ์ความถี่ในย่าน X-Band Downlink สามารถทำได้ตามสมการที่ (3.18)

$$f_{n3} = \frac{c}{\lambda_{gn3} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.18)$$

โดย f_{n3} คือ ความถี่กลางของความถี่นอตซ์ย่าน X-Band Downlink เท่ากับ 7.5 GHz
 λ_{gn3} คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่นอตซ์ในย่าน X-Band Downlink

จะได้ความยาวคลื่นของความถี่นอตซ์ $\lambda_{gn3} = 22.5$ มม. และความยาวคลื่น (λ_{gn3}) มีความสัมพันธ์กับขนาดของช่องแคบ นั่นคือ $\lambda_{gn3} = 2L_{gn3}$ ดังนั้น

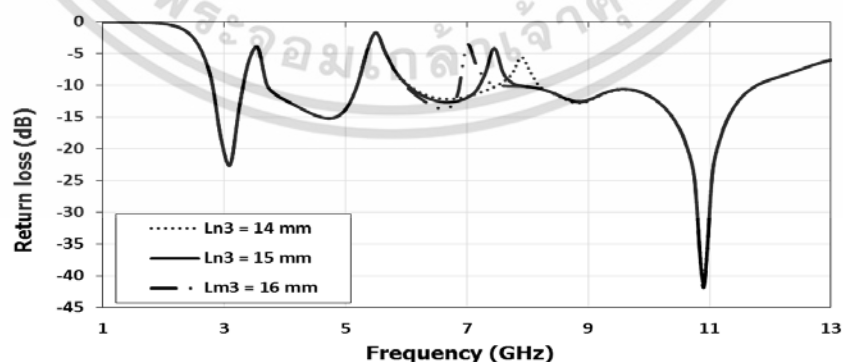
$$f_{n3} = \frac{c}{2L_{gn3} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.19)$$

L_{gn3} คือ ความยาวของร่องที่นอตซ์ความถี่ในย่าน X-Band Downlink

เมื่อทำการคำนวณขนาดของร่องแล้ว จะทำการปรับขนาดของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องด้วยการจำลองโครงสร้างสายอากาศบนโปรแกรม IE3D เพื่อให้ได้ความถี่นอตซ์ที่ดีที่สุด โดยพารามิเตอร์ที่จะทำการปรับ ได้แก่ L_{n3} , W_{n3} , $G1$ และ $G2$

1. การจำลองการปรับความยาวช่องแคบ (L_{n3})

ผลการจำลองการปรับค่าพารามิเตอร์ L_{n3} แสดงดังรูปที่ 3.33 จะเห็นได้ว่าการปรับขนาดของพารามิเตอร์ L_{n3} มีผลต่อตำแหน่งของความถี่นอตซ์ โดยเมื่อเพิ่มขนาด L_{n3} จะทำให้ตำแหน่งความถี่นอตซ์เลื่อนไปทางด้านความถี่ต่ำ และที่ L_{n3} เท่ากับ 15 มม. ตำแหน่งของความถี่นอตซ์จะประมาณ 5.5 GHz

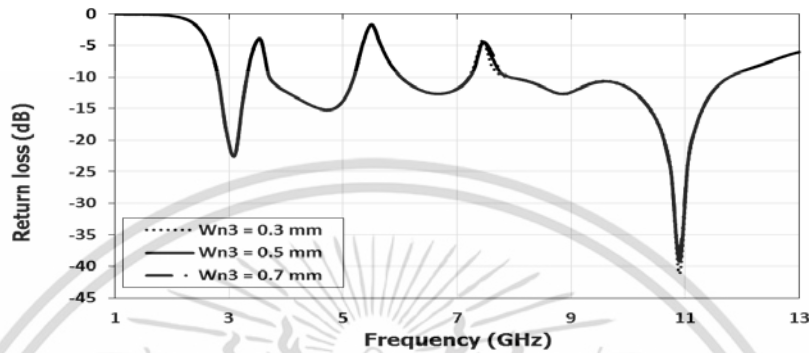


รูปที่ 3.33 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ L_{n3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การจำลองการปรับความกว้างของช่องแคบ ($Wn3$)

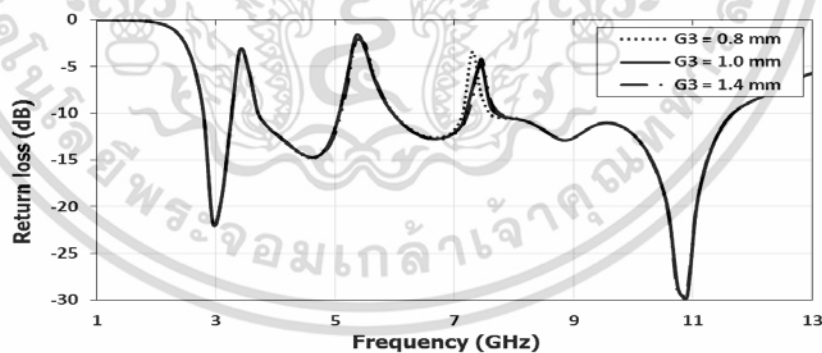
การปรับความกว้างของพารามิเตอร์ $Wn3$ แทบจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศ เนื่องจากช่องที่กรีดมีขนาดแคบมาก ๆ เมื่อพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อปรับพารามิเตอร์ $Wn3$ จาก 0.3 มม. ถึง 0.7 มม. ตามรูปที่ 3.34 จะเห็นว่าคุณลักษณะของสายอากาศแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.34 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ $Wn3$

3. การจำลองการปรับพารามิเตอร์ ($G3$)

ผลการจำลองการปรับระยะห่างระหว่างขอบของช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องแคบ ($G3$) แสดงดังรูปที่ 3.35 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างมีขนาด 1 มม. และ 1.4 มม. คุณลักษณะของสายอากาศแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ระยะแคบ 0.8 มม. สายอากาศมีความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนมาทางด้านต่ำ

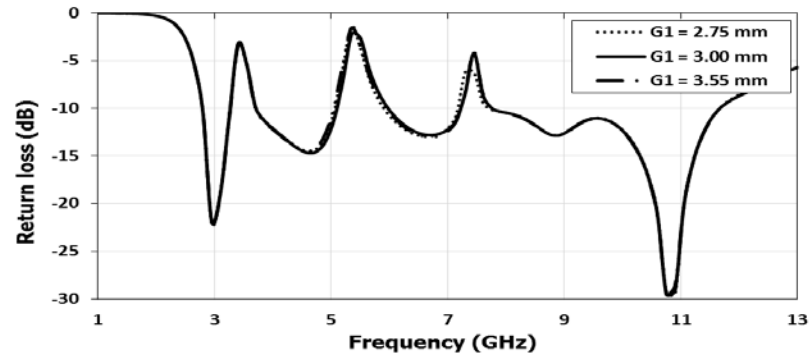


รูปที่ 3.35 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ $G3$

4. การจำลองการปรับพารามิเตอร์ ($G1$)

ผลการจำลองการปรับระยะห่างระหว่างขอบของช่องเปิดแปดเหลี่ยมกับช่องเปิดแคบ ($G1$) เมื่อมีการกรีดช่องแคบ ๆ แทรกระหว่างช่องเปิดทั้งสอง แสดงดังรูปที่ 3.36 จะเห็นได้ว่าการปรับระยะ $G1$ แทบจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศ โดยที่ระยะ 2.75 มม. สายอากาศจะมีความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนมาทางด้านต่ำเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

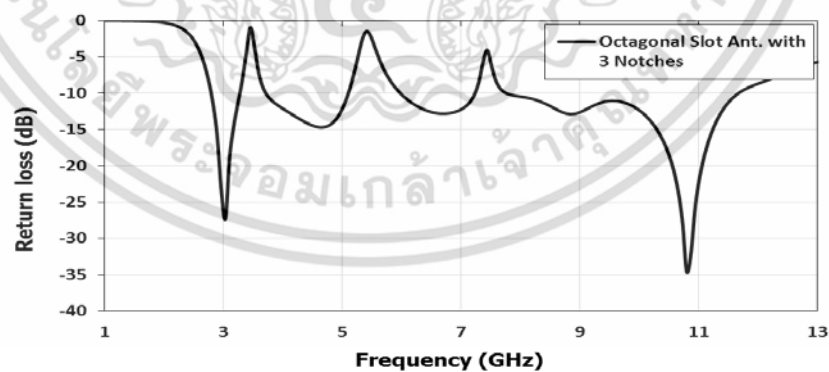


รูปที่ 3.36 ผลการจำลอง Return loss ของการปรับพารามิเตอร์ $G1$

จากการวิเคราะห์ผลการปรับขนาดพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อทำการกรีดช่องแคบ ๆ จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการนอตซ์ความถี่ย่าน X-Band Downlink ที่ให้ผลการจำลองที่ดีที่สุด แสดงดังตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.37 แสดงผลการจำลองสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ของช่องแคบ สำหรับการนอตซ์ย่านความถี่ X-Band Downlink ($f_{res} = 7.5 \text{ GHz}$)

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
$Ln3$	15
$Wn3$	0.3
$G1$	3
$G3$	1.4



รูปที่ 3.37 ผลการจำลอง Return loss ของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink

จากผลการจำลองเพื่อหาขนาดของช่องแคบที่เหมาะสมที่สุดในการนอตซ์ความถี่ในย่าน X-Band Downlink พบว่าขนาดพารามิเตอร์ของช่องแคบที่มีผลต่อการนอตซ์ความถี่ ได้แก่ L_{n3} และสามารถเขียนสมการความถี่นอตซ์ได้ ดังสมการที่ (3.20)

$$f_{n3} = \frac{c}{(0.75(2L_{gn3}\sqrt{\epsilon_{eff}}))} \quad (3.20)$$

โดย L_{gn3} คือความยาวของช่องแคบ L_{n3} และความยาวช่องแคบที่ใช้สร้างจริงมีขนาด $L_{gn3} = 0.67\lambda_{gn3}$

จากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของสายอากาศแสดงดัง ตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์ ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W_s	10	L_s	25.3
W_{ss}	2.3	L_{ss}	19.3
W_t	5	L_t	16.5
W_p	0.8	L_p	3
W_c	1.2	L_c	9
W_g	10.15	L_g	8.3
F	9.7	T	11.8
S	0.5	L_{n1}	0.5
W_{n1}	0.5	L_{n2}	24.8
W_{n2}	6.3	L_{n3}	15
W_{n3}	0.3	L_u	3
G_1	3	G_u	1.3
G_2	0.75	G_3	1.4

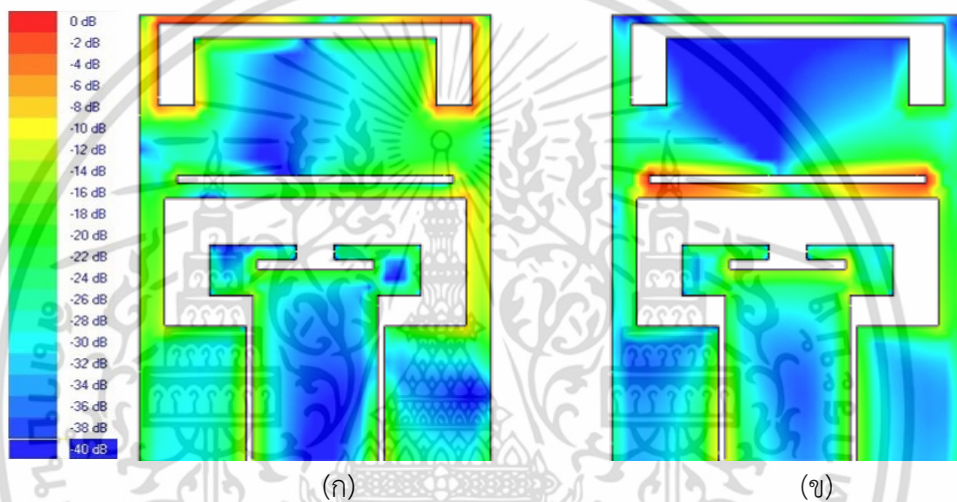
3.3 การวิเคราะห์การจำลองการแพร่กระจายกระแส (Current Distribution)

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเจาะช่องเปิดบนส่วนแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้ออกแบบ ด้วยพารามิเตอร์การแพร่กระจายกระแสซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของกระแสนำสัญญาณและสายอากาศ โดยจะทำการวิเคราะห์การแพร่กระจายกระแสของสายอากาศที่ความถี่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz สำหรับสายอากาศที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX และวิเคราะห์ที่ความถี่ 3.5 GHz, 5.5 GHz และ 7.5 GHz สำหรับสายอากาศที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink

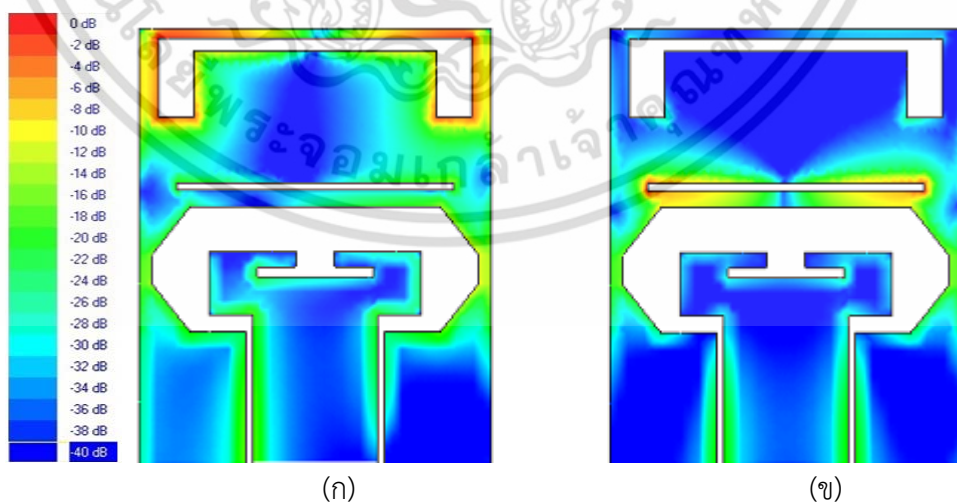
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลต้าไวต์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX

ผลการจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ทั้งแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยม แสดงดังรูปที่ 3.38 และ 3.39 จะเห็นได้ว่าสายอากาศทั้ง 2 โครงสร้างมีการแพร่กระจายกระแสในลักษณะเดียวกัน นั่นคือเมื่อพิจารณาที่ความถี่ 3.5 GHz ตามรูปที่ 3.38 (ก) และ 3.39 (ก) เวกเตอร์กระแสจะมีการแพร่กระจายอย่างหนาแน่นบริเวณช่องเปิดด้วย ในขณะที่บริเวณอื่นมีการแพร่กระจายกระแสค่อนข้างต่ำ และเมื่อพิจารณาที่ความถี่ 5.5 GHz ดังรูปที่ 3.38 (ข) และ 3.39 (ข) เวกเตอร์กระแสจะมีความหนาแน่นบริเวณช่องเปิดแคบ ในขณะที่บริเวณช่องเปิดที่เหลือมีการแพร่กระจายเวกเตอร์กระแสต่ำ



รูปที่ 3.38 ผลการจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX พิจารณาที่ความถี่ (ก) 3.5 GHz (ข) 5.5 GHz

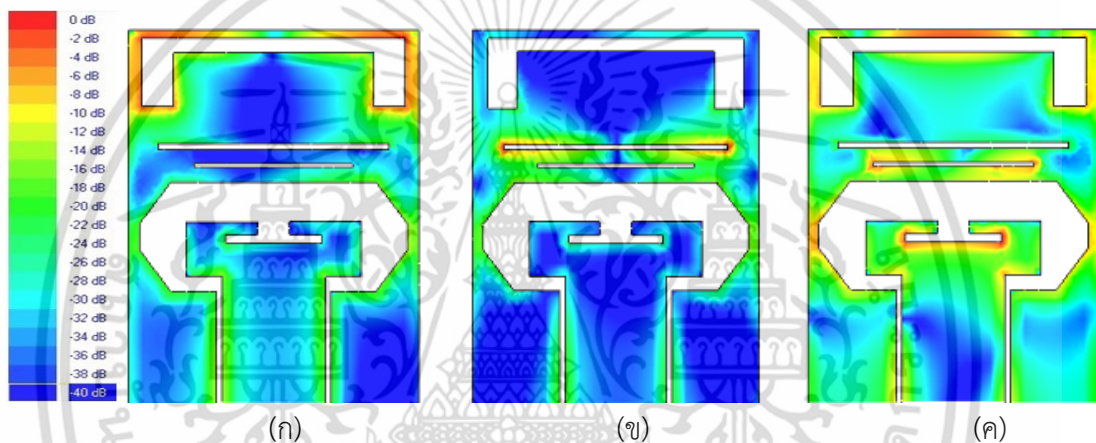


รูปที่ 3.39 ผลการจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX พิจารณาที่ความถี่ (ก) 3.5 GHz (ข) 5.5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink

ผลการจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวต์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink แสดงดังรูปที่ 3.40 เมื่อพิจารณาการแพร่กระจายกระแสที่ความถี่ 3.5 GHz ตามรูปที่ 3.40 (ก) จะเห็นว่าเวกเตอร์กระแสมีการแพร่กระจายอย่างหนาแน่นบริเวณช่องเปิดตัวยู และเมื่อพิจารณาที่ความถี่ 5.5 GHz ดังรูป 3.40 (ข) บริเวณช่องเปิดแคบจะมีการแพร่กระจายของเวกเตอร์กระแสอย่างหนาแน่น ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 7.5 GHz ดังรูปที่ 3.40 (ค) เวกเตอร์กระแสจะมีการแพร่กระจายอย่างหนาแน่นบริเวณช่องแคบ โดยมีการแพร่กระจายกระแสบางส่วนที่บริเวณช่องเปิดแปดเหลี่ยมและขอบของช่องเปิดตัวยูรวมด้วย



รูปที่ 3.40 ผลการจำลองการแพร่กระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink เมื่อพิจารณาที่ความถี่ (ก) 3.5 GHz (ข) 5.5 GHz (ค) 7.5 GHz

3.4 การวิเคราะห์การจำลองคุณลักษณะอื่น ๆ ของสายอากาศ

จากการออกแบบสายอากาศในหัวข้อที่ผ่านมาโดยใช้การพิจารณาจากค่าความสูญเสียย้อนกลับ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วิเคราะห์การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ทำให้ได้สายอากาศที่มีขนาดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ นั่นคือ สายอากาศมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ครอบคลุมย่านความถี่อัลตราไวต์แบนด์ และสามารถนอตซ์ย่านความถี่ที่ไม่ต้องการให้มีการแพร่กระจายคลื่นได้ ก่อนที่จะนำสายอากาศจำลองไปสร้างจริง ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์ผลการจำลองคุณลักษณะที่สำคัญอื่น ๆ นั่นคือค่าอัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล สำหรับการวิเคราะห์ค่าอัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลนั้นจะเลือกแสดงเฉพาะสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX และ WLAN และสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่จะนำไปสร้างจริง

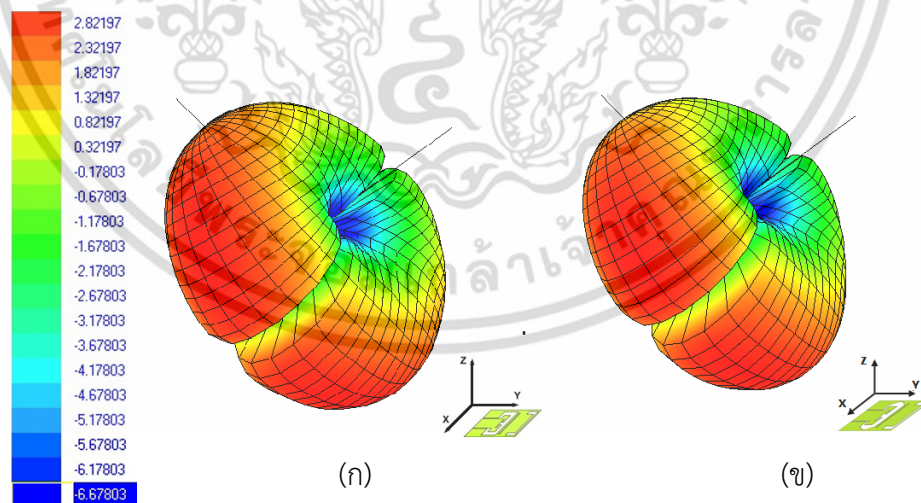
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 การวิเคราะห์การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล (Radiation Pattern)

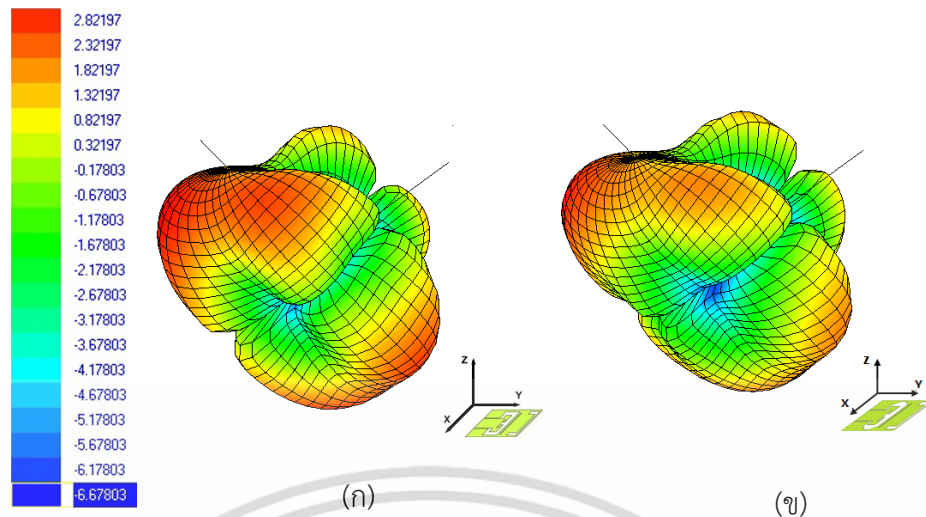
แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล เป็นคุณลักษณะของสายอากาศที่แสดงคุณสมบัติการแผ่กระจายพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศว่าง ในหัวข้อนี้จะแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในลักษณะ 3 มิติ และพิจารณาการจำลองแบบรูปที่ความถี่ 4.5 GHz, 7 GHz และ 10 GHz สำหรับสายอากาศที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX และ WLAN และสำหรับสายอากาศที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink จะพิจารณาแบบรูปการแผ่สนามระยะไกลที่ความถี่ 4.5 GHz และ 10 GHz

3.4.1.1 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX

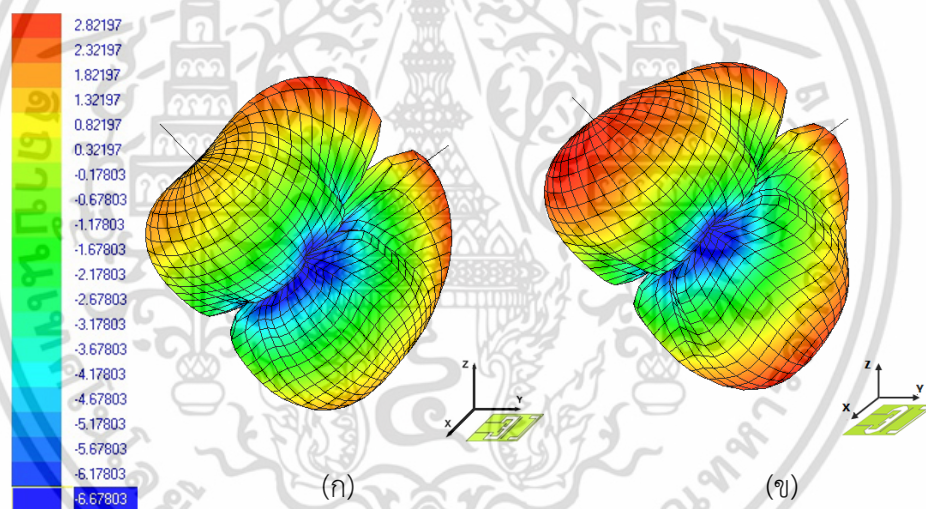
ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ทั้งแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยม แสดงดังรูปที่ 3.41 ถึง 3.43 โดยรูปที่ 3.41 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล เมื่อพิจารณาที่ความถี่รีโซแนนซ์เท่ากับ 4.5 GHz จะเห็นได้ว่าสายอากาศทั้ง 2 โครงสร้างมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional) ในระนาบ XZ (ระนาบ E) และแบบสองทิศทาง (Bi-directional) ในระนาบ YZ (ระนาบ H) รูปที่ 3.42 และ 3.43 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลเมื่อพิจารณาที่ความถี่รีโซแนนซ์ 7 GHz และ 10 GHz ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสายอากาศทั้ง 2 โครงสร้างมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทาง (Bi-directional) ทั้งในระนาบ XZ (ระนาบ E) และระนาบ YZ (ระนาบ H)



รูปที่ 3.41 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยม (ข) แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX เมื่อพิจารณาที่ความถี่รีโซแนนซ์ 4.5 GHz



รูปที่ 3.42 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ (ก) แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยม (ข) แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX เมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์ 7 GHz



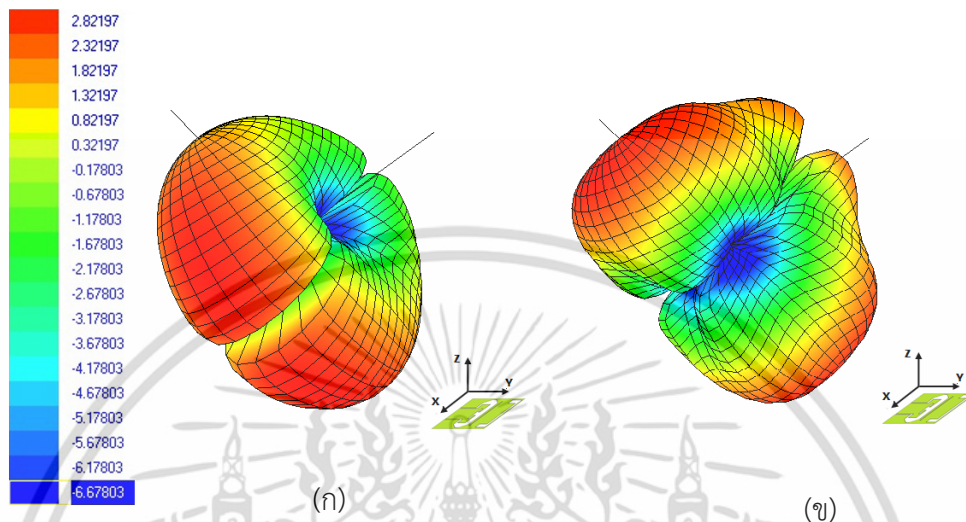
รูปที่ 3.43 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ (ก) แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยม (ข) แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX เมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์ 10 GHz

3.4.1.2 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink

ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม สำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink แสดงดังรูปที่ 3.44 โดยรูปที่ 3.44 (ก) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลเมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 4.5 GHz จะเห็นได้ว่าในระนาบ XZ (ระนาบ E) สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional) และ ในระนาบ YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย ผู้ที่ฝ่าฝืนจะถูกลงโทษตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ระนาบ H) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเป็นแบบสองทิศทาง (Bi-directional) และรูปที่ 3.44 (ข) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลเมื่อพิจารณาที่ความถี่รีโซแนนซ์เท่ากับ 10 GHz จะเห็นว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง (Bi-Directional) ทั้งในระนาบ XZ (ระนาบ E) และระนาบ YZ (ระนาบ H)



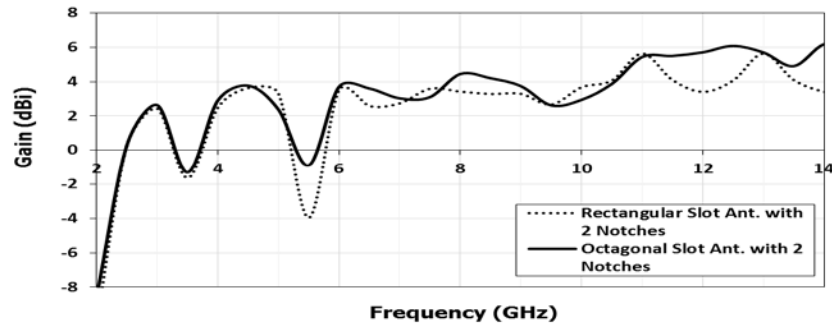
รูปที่ 3.44 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริปแบบแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink เมื่อพิจารณาที่ความถี่รีโซแนนซ์ (ก) 4.5 GHz (ข) 10 GHz

3.4.2 การวิเคราะห์การจำลองอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

อัตราขยายเป็นคุณลักษณะหนึ่งที่ใช้แสดงประสิทธิภาพของสายอากาศ และวัดคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยค่าอัตราขยายของสายอากาศแบบอัลตราไวด์แบนด์จะมีค่าไม่สูงนักเมื่อเทียบกับสายอากาศประเภทอื่น

3.4.2.1 การจำลองอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX

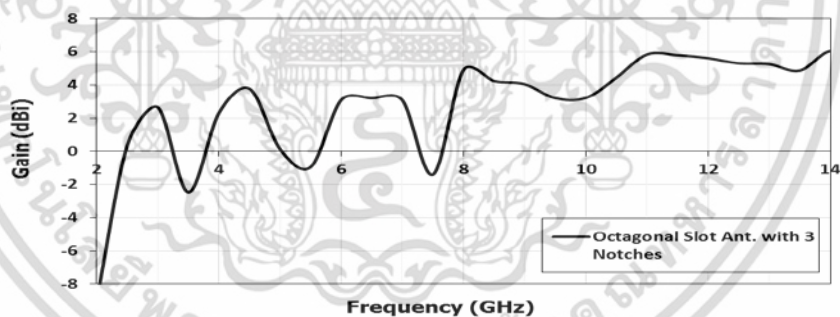
ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX และ WLAN แสดงดังรูปที่ 3.45 จากกราฟจะเห็นว่าอัตราขยายของสายอากาศทั้งสองโครงสร้างมีลักษณะใกล้เคียงกัน คือ มีอัตราขยายค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ยกเว้นบริเวณที่มีการนอตช์ย่านความถี่จะมีค่าอัตราขยายตกลงอย่างเห็นได้ชัด โดยสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีอัตราขยายประมาณ 2.8 dBi และสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมมีอัตราขยายประมาณ 3.2 dBi และ ณ ตำแหน่งความถี่นอตช์ WiMAX และ WLAN สายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยมมีอัตราขยายใกล้เคียงกัน นั่นคือมีค่าประมาณ -1.2 dBi และ -2.5 dBi ตามลำดับ



รูปที่ 3.45 ผลการจำลองอัตราขยายสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX และ WLAN

3.4.2.2 การจำลองอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink

ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink แสดงดังรูปที่ 3.46 จากกราฟจะเห็นได้ว่าสายอากาศมีอัตราขยายตลอดทั้งย่านอัลตราไวด์แบนด์เฉลี่ยประมาณ 3.35 dBi ยกเว้นบริเวณที่มีการนอตช์ความถี่จะมีค่าอัตราขยายตกลงอย่างเห็นได้ชัด โดย ณ ตำแหน่งความถี่นอตช์ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink สายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ -2.5 dBi, -1.75 dBi และ -1.1 dBi ตามลำดับ



รูปที่ 3.46 ผลการจำลองอัตราขยายสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink

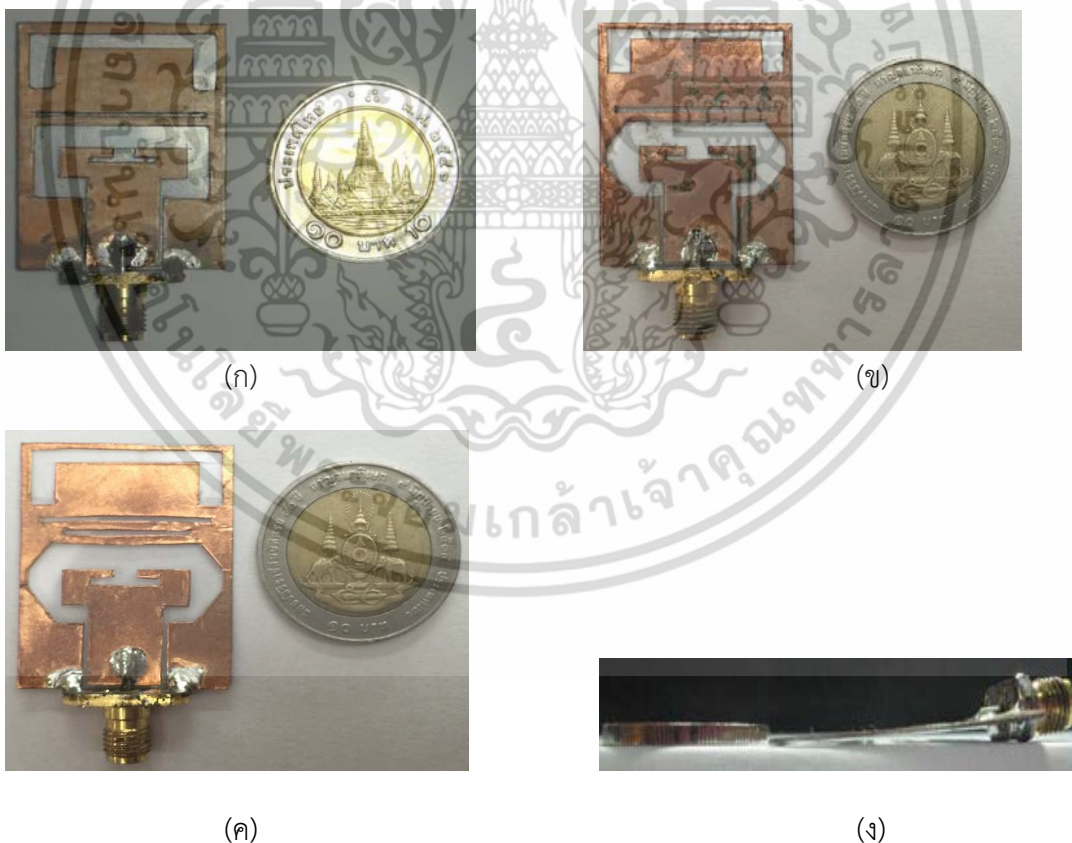
จากการวิเคราะห์ผลการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้ พบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ตลอดทั้งย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ยกเว้นบริเวณที่มีการนอตช์ย่านความถี่ และมีค่าอัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงานตามคุณลักษณะของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่ดี และเมื่อได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ขั้นตอนต่อไปจะทำการสร้างและทดสอบสายอากาศ โดยได้เลือกสร้างสายอากาศใน 3 โครงสร้าง คือ สายอากาศอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมกับแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่มีโครงสร้างการแพร่กระจายคลื่นต่างกัน และสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีผลการจำลองอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ดีที่สุด

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการสร้างและวัดค่าคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริป สำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ของโครงข่าย WiMAX และ WLAN และสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink โดยค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำการวัด ได้แก่ ค่าความสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage standing wave ratio: VSWR) ค่าอัตราการขยาย (Gain) ค่าการประวิงเวลากลุ่ม (Group delay) และแบบรูปการแพร่กระจายพลังงานของสายอากาศ ทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) รุ่น E8363B

4.1 การสร้างสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ความถี่ในย่าน WiMAX และ WLAN



รูปที่ 4.1 สายอากาศที่สร้างจริงแบบ (ก) ช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ 2 ความถี่ (ข) ช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ 2 ความถี่ (ค) ช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ 3 ความถี่

(ง) ภาพด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ และไม่รบกวนการทำงานของโครงข่ายสื่อสารเดิมในบทย่านที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้จะทำการสร้างสายอากาศจริงโดยเลือกใช้แผ่นไมลาร์ฟิล์ม ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นและสามารถใช้งานในย่านความถี่สูงได้มาเป็นวัสดุฐานรอง สายอากาศต้นแบบที่ได้จะมีขนาดเล็ก บาง น้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นและมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน โดยได้สร้างสายอากาศทั้งหมด 3 โครงสร้าง แต่ละโครงสร้างมีขนาดเท่ากันและใช้วัสดุชนิดเดียวกัน คือ สายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ของโครงข่าย WiMAX และ WLAN แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยม และสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink สายอากาศที่สร้างจริงแสดงดังรูปที่ 4.1

4.2 การวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะแสดงการวิเคราะห์ผลการวัดค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่สร้างจริงเปรียบเทียบกับค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D ซึ่งการทดสอบเพื่อหาค่าคุณลักษณะและประสิทธิภาพของสายอากาศที่สร้างจริงนั้น จะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA Network Analyzers รุ่น E8363B ในการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) แบบรูปการแผ่พลังงาน ค่าอัตราขยาย (Gain) และค่าการประวิงเวลากลุ่ม ซึ่งการทดสอบจะทำโดยการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายมีลักษณะตามรูปที่ 4.2



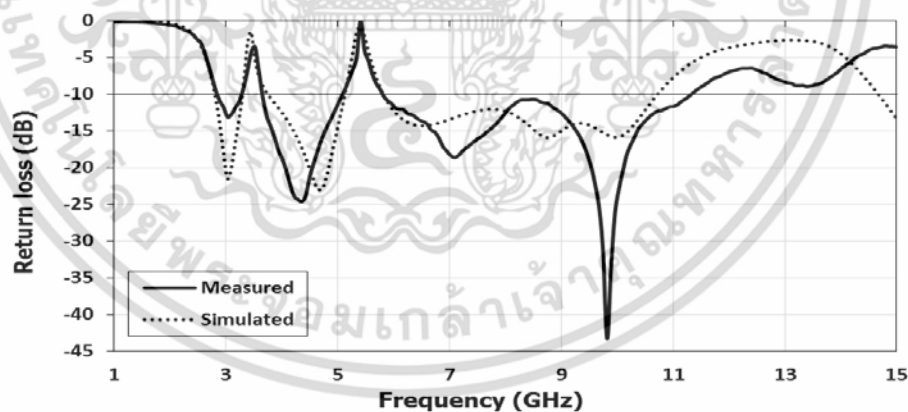
รูปที่ 4.2 การวัดสายอากาศที่สร้างจริง

4.2.1 การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) และอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR)

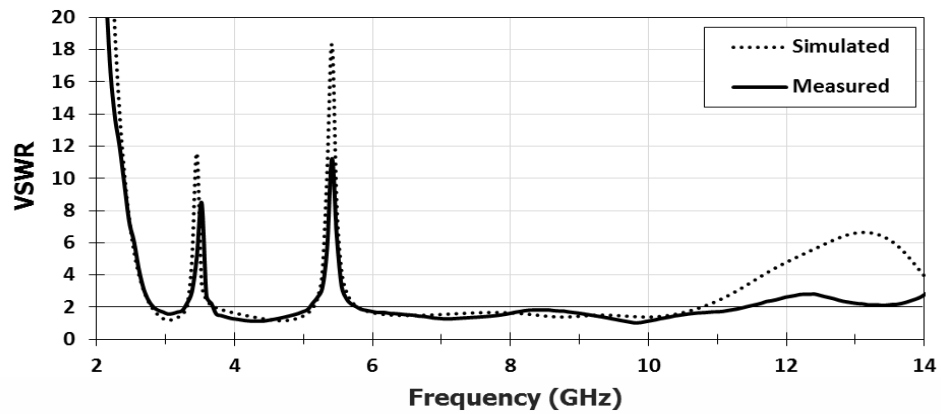
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการวัดค่าคุณลักษณะในการแมตซ์อิมพีแดนซ์ นั่นคือค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง โดยแบ่งผลการวัดเป็น 2 ส่วน คือ ผลการวัดสายอากาศที่มีการนอตช์ 2 ย่านความถี่คือ WLAN และ WiMAX และผลการวัดสายอากาศที่มีการนอตช์ 3 ย่านความถี่ คือ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.1 สายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ของโครงข่าย WiMAX และ WLAN แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยม

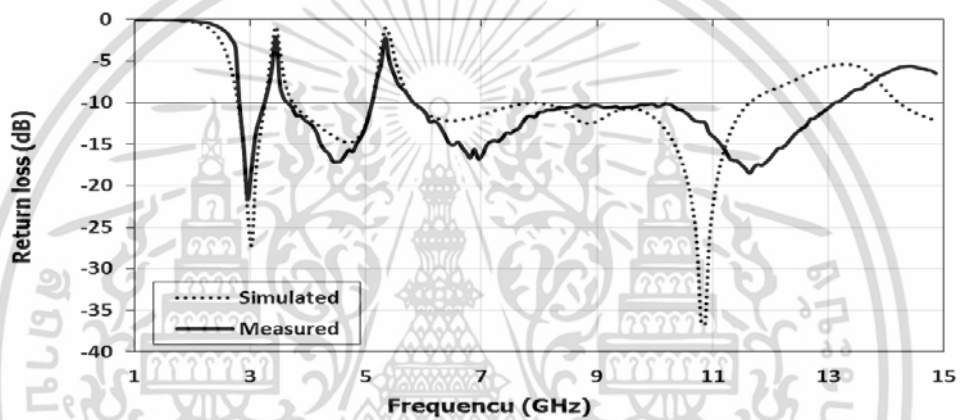
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX โดยรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX และเช่นเดียวกันรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ซึ่งจะเห็นได้ว่าสายอากาศที่สร้างจริงทั้ง 2 โครงสร้างนั้นมีผลการวัดไปในทิศทางเดียวกัน โดยสายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB และมีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งไม่เกิน 2 ที่ความถี่ตั้งแต่ 2.9 GHz-11.3 GHz สำหรับโครงสร้างช่องเปิดสี่เหลี่ยมและความถี่ตั้งแต่ 2.8-13 GHz สำหรับช่องเปิดแปดเหลี่ยม นั่นคือสายอากาศทั้ง 2 โครงสร้างมีการแมตช์อิมพีแดนซ์ครอบคลุมย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์และมีค่าสัดส่วนแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณมากกว่า 0.2 เท่าของความถี่กลาง ยกเว้นบริเวณย่านความถี่ WiMAX และ WLAN สายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับสูงกว่า -10 dB และมีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งสูงกว่า 2 ซึ่งแสดงว่าช่วงความถี่ทั้งสองนี้เกิดการไม่แมตช์อิมพีแดนซ์ นอกจากนี้ผลการวัดจริงยังสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการจำลอง โดยรายละเอียดของค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ณ ตำแหน่งความถี่นอตช์ของสายอากาศระหว่างค่าที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าจากการจำลองแสดงดังตารางที่ 4.1



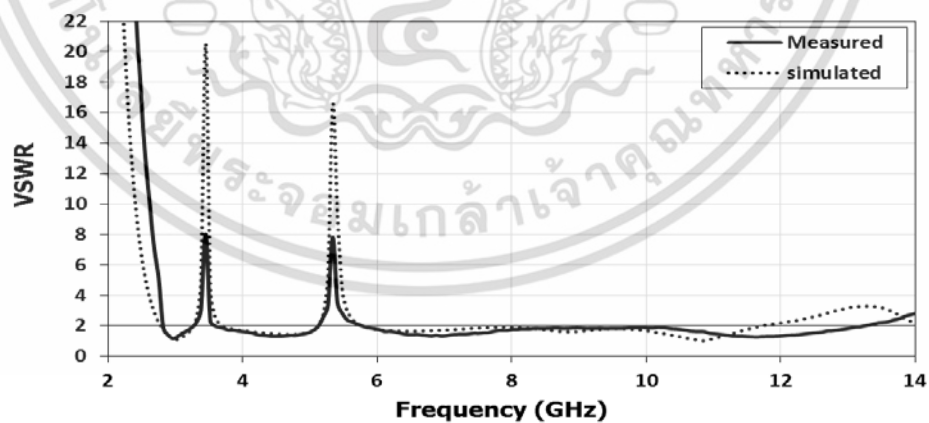
รูปที่ 4.3 ผลการวัดค่า Return loss ของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง



รูปที่ 4.4 ผลการวัดค่า VSWR ของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง



รูปที่ 4.5 ผลการวัดค่า Return loss ของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง



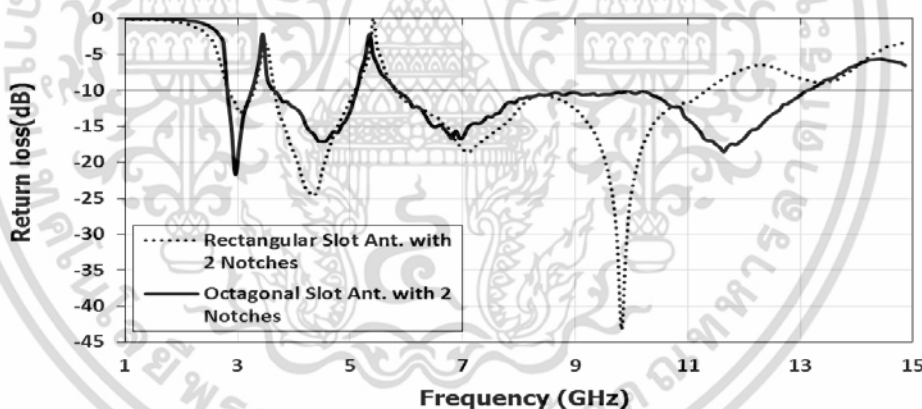
รูปที่ 4.6 ผลการวัดค่า VSWR ของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่า S11 และ VSWR ของสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยม เมื่อพิจารณา ณ ค่ากลางของความถี่ของสายอากาศที่สร้างจริงและจากการจำลอง

โครงข่าย	ความถี่ นอตช์ (GHz)	สายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยม				สายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยม			
		ค่า S11 สูงสุด (dB)		ค่า VSWR สูงสุด		ค่า S11 สูงสุด (dB)		ค่า VSWR สูงสุด	
		จำลอง	วัดจริง	จำลอง	วัดจริง	จำลอง	วัดจริง	จำลอง	วัดจริง
WiMAX	3.5	-1.84	-2.75	11.6	8.27	-1.03	-2.05	20.52	8.02
WLAN	5.5	-0.8	-0.8	18.3	11.23	-1.05	-2.15	16.53	7.82

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวัดจริงระหว่างสายอากาศทั้ง 2 โครงสร้าง โดยพิจารณาจากค่าการสูญเสียย้อนกลับ จะได้ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าสายอากาศทั้ง 2 โครงสร้างสามารถนอตช์ย่านความถี่ได้ใกล้เคียงกัน แต่สายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมมีแมตซ์อิมพีแดนซ์มากกว่าสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมอย่างชัดเจน โดยสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมมีแบนด์วิดท์ 2.8-13 GHz มีค่าสัดส่วนแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณเท่ากับ 1.29 เท่าของความถี่กลาง ในขณะที่สายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีแบนด์วิดท์ 2.9-11.3 GHz และมีค่าสัดส่วนแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณเท่ากับ 1.18 เท่าของความถี่กลาง นั่นคือสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่ได้ทำการปรับปรุงจากสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมเดิมมีแบนด์วิดท์มากขึ้น 22.4%

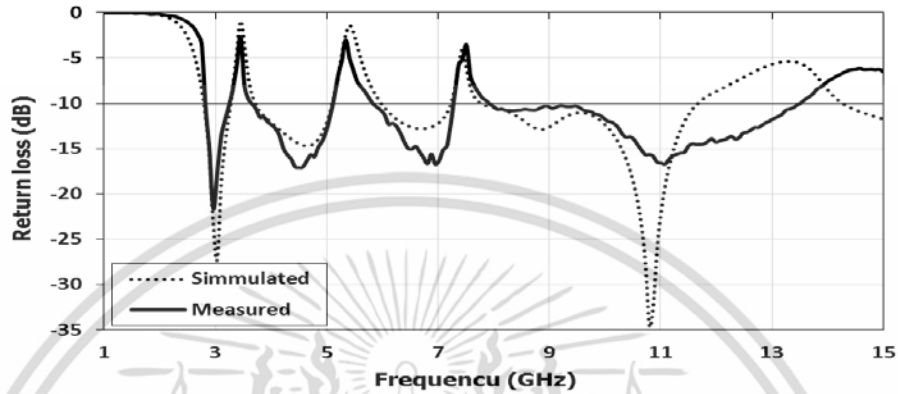


รูปที่ 4.7 ผลการวัดค่า Return loss ระหว่างสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ที่สร้างจริง

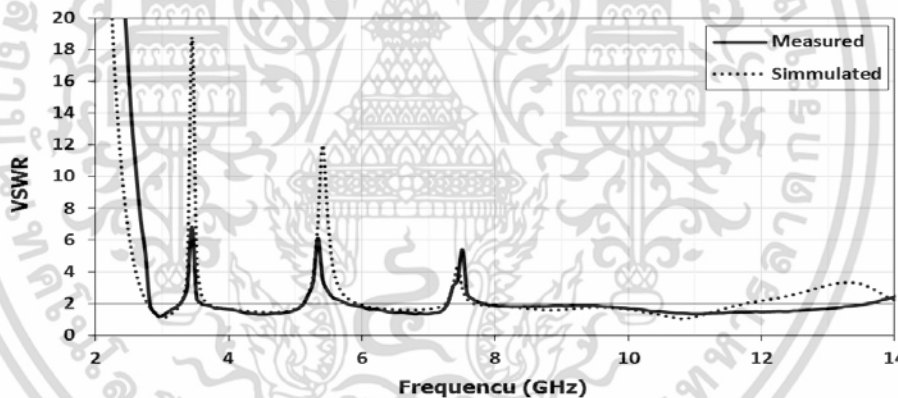
4.2.1.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ของโครงข่าย WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink

ค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการวัดจริงสอดคล้องกับผลการจำลอง โดยผลการวัดแสดงว่าสายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB และมีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งไม่เกิน 2 ที่ความถี่ตั้งแต่ 2.8-13.5 GHz นั่นคือสายอากาศมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแมตช์อิมพีแดนซ์ครอบคลุมย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์และมีค่าสัดส่วนแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณเท่ากับ 1.32 เท่าของความถี่กลาง ยกเว้นบริเวณย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink สายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับสูงกว่า -10 dB และมีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งสูงกว่า 2 รายละเอียดของค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ณ ตำแหน่งความถี่นอตช์ของสายอากาศระหว่างค่าที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าจากการจำลองแสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.8 ผลการวัดค่า Return loss ของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง



รูปที่ 4.9 ผลการวัดค่า VSWR ของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง

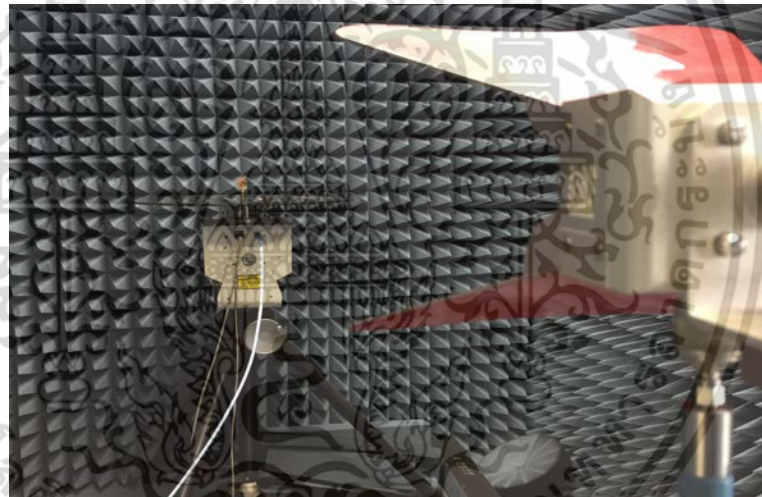
ตารางที่ 4.2 ค่า S11 และ VSWR ของสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม เมื่อพิจารณา ณ ค่ากลางของความถี่นอตช์ของสายอากาศที่สร้างจริงและจากการจำลอง

โครงข่าย	ความถี่นอตช์ (GHz)	ค่า S11 สูงสุด (dB)		ค่า VSWR สูงสุด	
		จำลอง	วัดจริง	จำลอง	วัดจริง
WiMAX	3.5	-0.93	-2.68	18.79	6.54
WLAN	5.5	-1.45	-3.03	11.99	5.78
X-Band Downlink	7.5	-4.08	-3.65	4.3	5

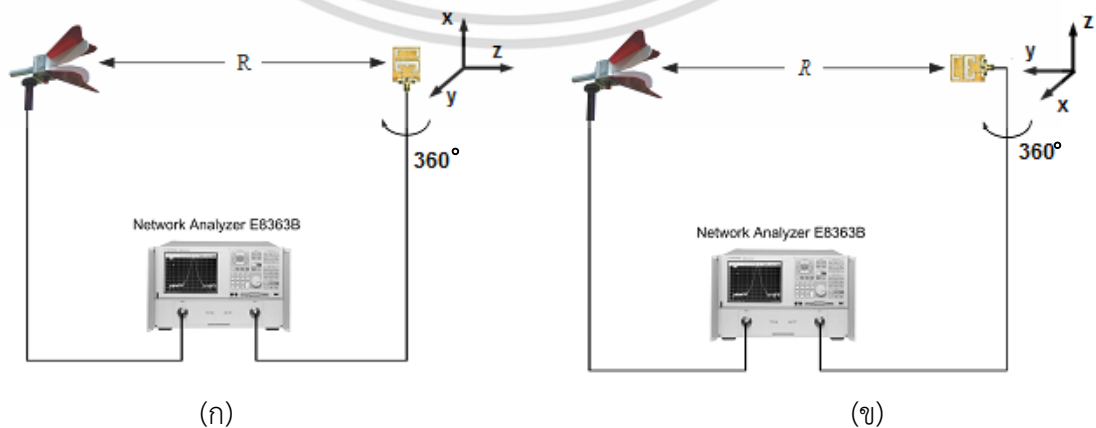
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การวัดค่าแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล (Radiation Pattern)

สำหรับการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E8363B ร่วมกับโปรแกรมแสดงค่าการแผ่พลังงาน ทำการทดสอบสายอากาศที่สร้าง โดยใช้สายอากาศมาตรฐานฮอร์น (Horn antenna) เป็นสายอากาศส่ง กำหนดระยะระหว่างสายอากาศ ตามความสัมพันธ์ $R \geq 2D^2/\lambda$ โดยที่ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับที่ทำการทดสอบที่ความถี่สูงสุด D คือ ขนาดของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 120.84 มม. และ λ คือความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้คำนวณ โดยในการวัดได้เลือกอ้างอิงที่ความถี่กลาง 6.85 GHz ดังนั้นจะได้ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งกับสายอากาศตัวรับไม่น้อยกว่า 0.67 ม. ซึ่งในการทดสอบได้ทำในห้องปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไร้คลื่นสะท้อน (Anechoic chamber) โดยสายอากาศรับและสายอากาศส่งมีโพลาริซที่เหมือนกัน มีระดับความสูงของสายอากาศเท่ากัน วางห่างกัน 2 ม. และจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยจะทำการหมุนสายอากาศเพื่อรับคลื่นจาก 0 องศา จนถึง 360 องศา การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.10 และลักษณะการหมุนสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 4.11



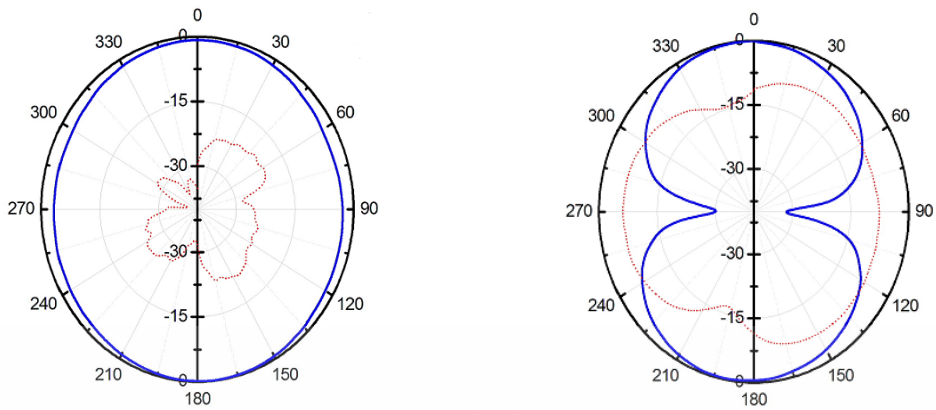
รูปที่ 4.10 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศในห้อง Anechoic chamber



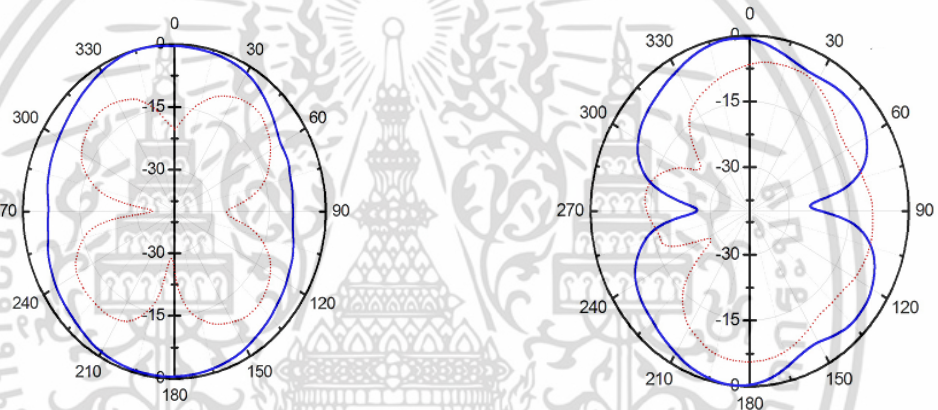
รูปที่ 4.11 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศในระนาบ (ก) XZ และ (ข) YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

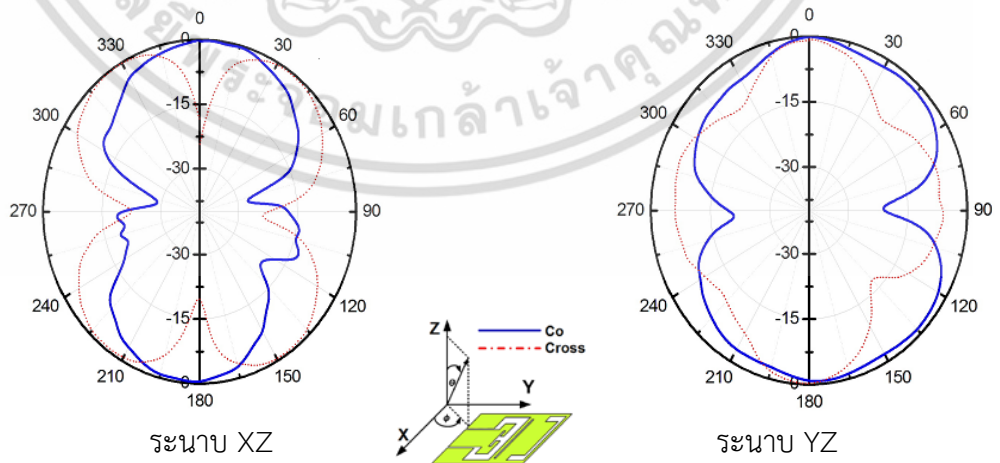
ความถี่ 4.5 GHz



ความถี่ 7.0 GHz



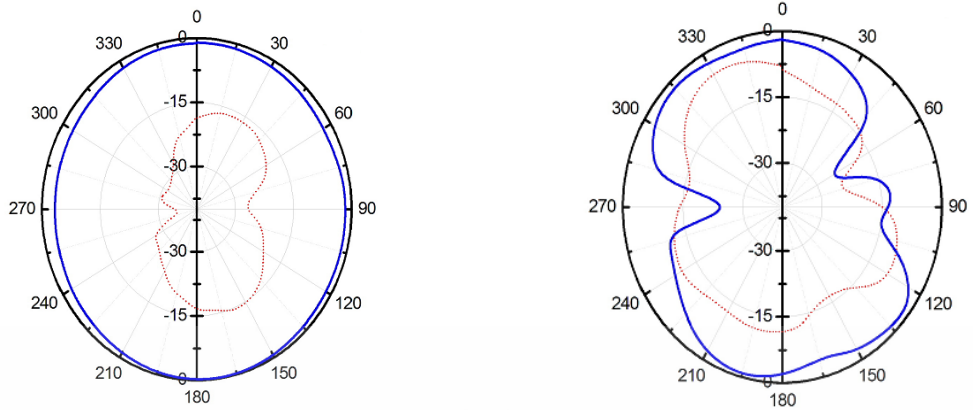
ความถี่ 10.0 GHz



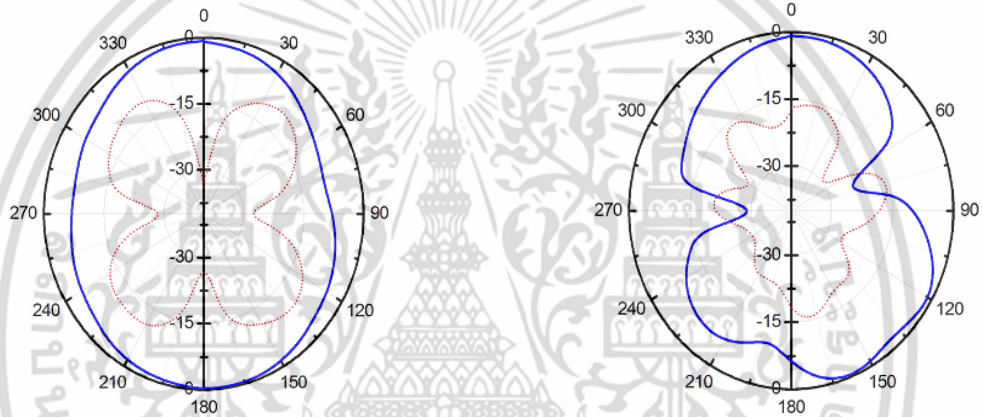
รูปที่ 4.12 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ณ ความถี่ต่าง ๆ ในระนาบ XZ และ ระนาบ YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

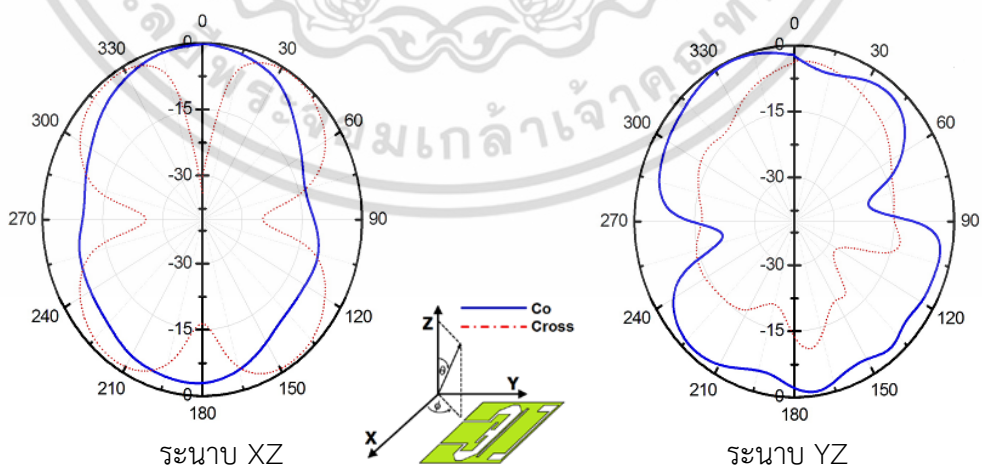
ความถี่ 4.5 GHz



ความถี่ 7.0 GHz



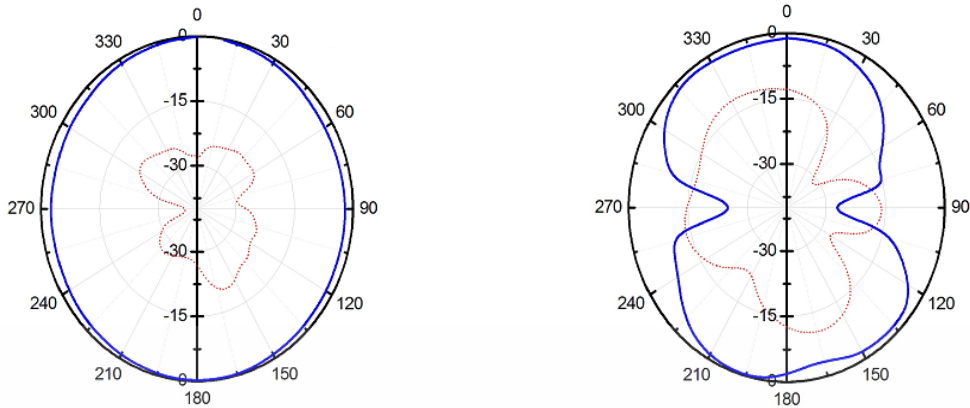
ความถี่ 10.0 GHz



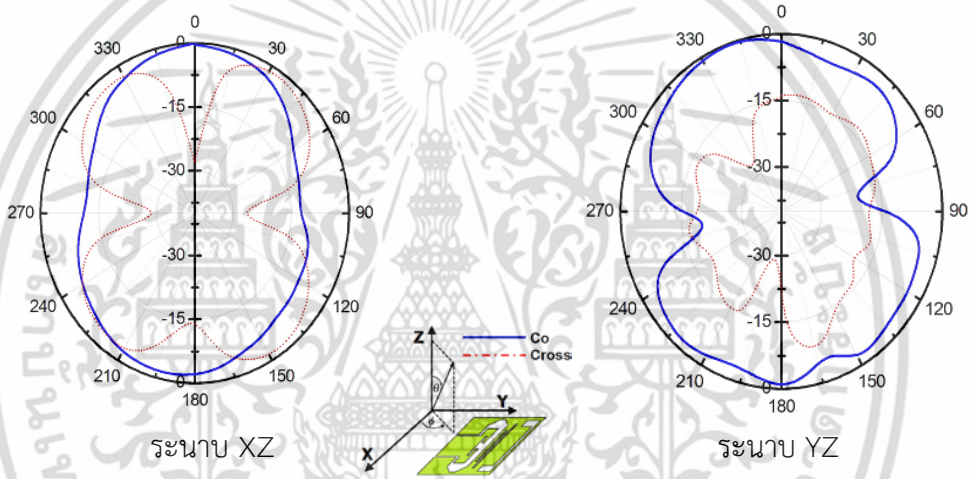
รูปที่ 4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ณ ความถี่ต่าง ๆ ในระนาบ XZ และ ระนาบ YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 4.5 GHz



ความถี่ 10.0 GHz



รูปที่ 4.14 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตชยันความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ณ ความถี่ต่าง ๆ ในระนาบ XZ และระนาบ YZ

รูปที่ 4.12-4.14 แสดงผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่สร้างจริง โดยรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงาน ณ ความถี่ 4.5 GHz, 7.0 GHz และ 10.0 GHz ของสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตชยันความถี่ WLAN และ WiMAX และสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตชยันความถี่ WLAN และ WiMAX ตามลำดับ จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีการแผ่พลังงานบนระนาบ XZ (E-plane) ในช่วงความถี่ 4.5 GHz และ 7 GHz เป็นแบบรอบทิศทาง (Omni directional) ในขณะที่ช่วงความถี่ 10.0 GHz แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเป็นแบบสองทิศทาง (Bidirectional) และรูปที่ 4.13 สายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมมีแบบรูปการแผ่พลังงานบนระนาบ XZ (E-plane) ทั้ง 3 ช่วงความถี่เป็นแบบรอบทิศทาง (Omni directional) และสายอากาศทั้ง 2 โครงสร้างมีการแผ่พลังงานบนระนาบ YZ (H-plane) แบบสองทิศทาง (Bidirectional) ทั้ง 3 ช่วงความถี่ และรูปที่ 4.14 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตชยันความถี่ WLAN, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

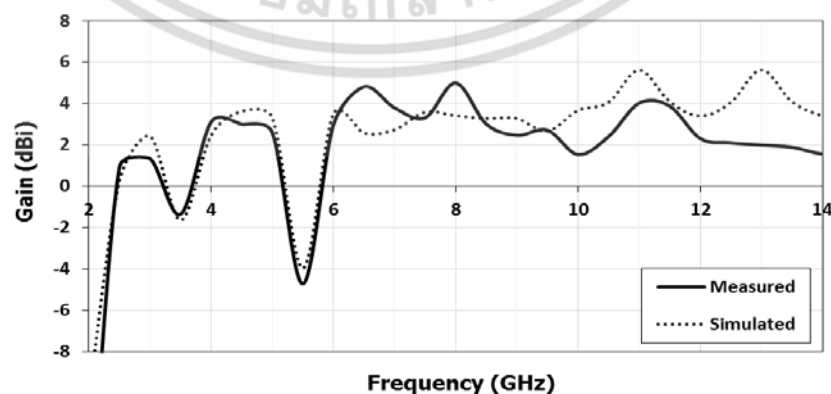
WiMAX และ X-Band Downlink ที่ความถี่ 4.5 GHz และ 10.0 GHz ผลการวัดเมื่อทำการวัดในระนาบ XZ พบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางทั้ง 2 ช่วงความถี่ และในระนาบ YZ ทั้ง 2 ช่วงความถี่สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้ง 3 โครงสร้างมีลักษณะสอดคล้องกัน

4.2.3 การวัดค่าอัตราขยาย

การวัดอัตราขยายของสายอากาศในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ใช้เทคนิควิธีการวัดอัตราขยายส่งผ่านโดยใช้สายอากาศมาตรฐานฮอร์นเป็นตัวส่งสัญญาณ และสายอากาศที่ออกแบบเป็นตัวรับสัญญาณ โดยแบ่งผลการวัดเป็น 2 ส่วน คือ ผลการวัดสายอากาศที่มีการนอตซ์ 2 ย่านความถี่คือ WLAN และ WiMAX และผลการวัดสายอากาศที่มีการนอตซ์ 3 ย่านความถี่ คือ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink

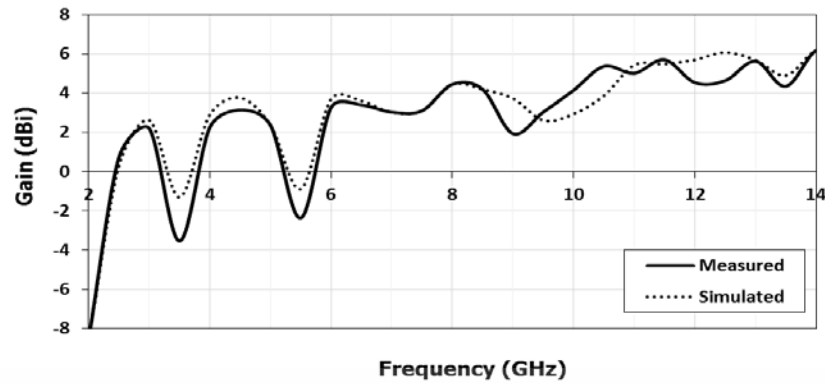
4.2.3.1 สายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ของโครงข่าย WiMAX และ WLAN แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยม

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX โดยรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงค่าอัตราขยายของผลการวัดจริงกับผลการจำลองของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX และสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ตามลำดับ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายของสายอากาศทั้ง 2 โครงสร้างมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันและสอดคล้องกับผลการจำลอง นั่นคือสายอากาศมีค่าอัตราขยายบริเวณที่มีการนอตซ์ความถี่ลดลงต่ำกว่า 0 dBi ในขณะที่อัตราขยายในช่วงความถี่ที่เหลือมีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 2 dBi และค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ และเมื่อเปรียบเทียบผลการวัดจริงของสายอากาศทั้ง 2 โครงสร้าง ดังรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าสายอากาศทั้งสองสามารถนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ได้ใกล้เคียงกัน แต่สายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมจะมีค่าอัตราขยายเฉลี่ยสูงกว่าเล็กน้อย โดยสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีค่าอัตราขยายเฉลี่ยประมาณ 3 dBi และ 3.65 dBi สำหรับสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยม

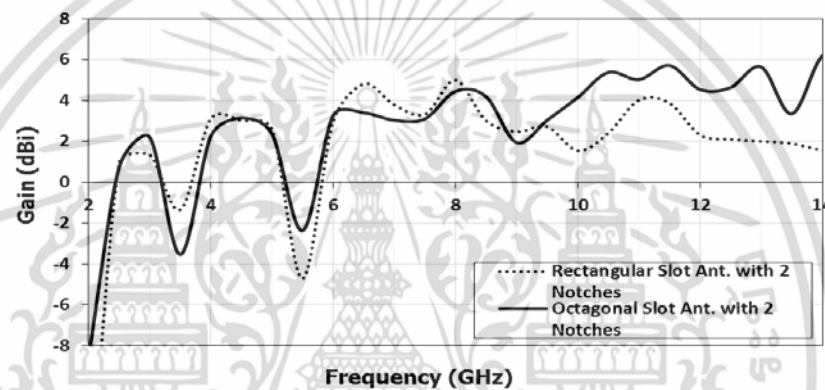


รูปที่ 4.15 ผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่หวังกำไรใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



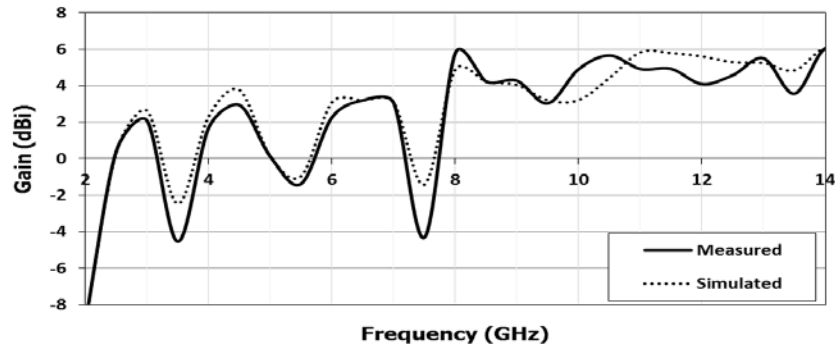
รูปที่ 4.16 ผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง



รูปที่ 4.17 ผลการวัดค่าอัตราขยายระหว่างสายอากาศช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ที่สร้างจริง

4.2.3.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ของโครงข่าย WiMAX, WLAN และ X-Band Downlink

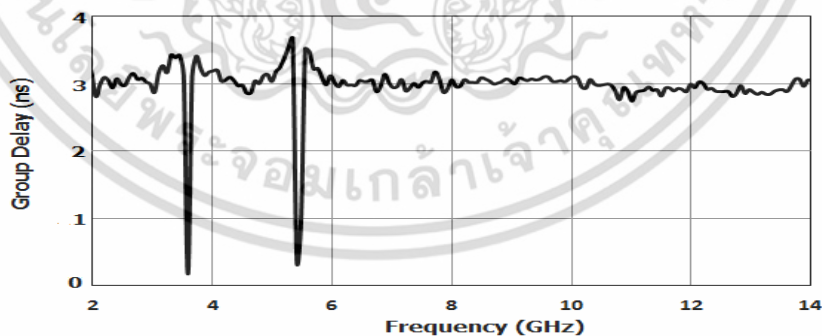
ค่าอัตราขยายของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ที่สร้างจริงเปรียบเทียบกับผลการแสดงดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายของสายอากาศที่วัดจริงมีลักษณะสอดคล้องกับผลการจำลอง นั่นคือสายอากาศที่วัดได้มีค่าอัตราขยายบริเวณที่มีการนอตช์ความถี่ลดลงต่ำกว่า 0 dBi ในขณะที่อัตราขยายในช่วงความถี่ที่เหลือมีค่าเฉลี่ย 3.6 dBi และค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์



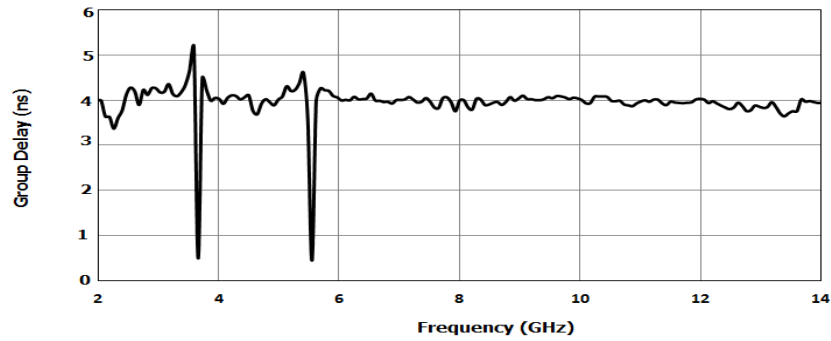
รูปที่ 4.18 ผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ระหว่างสายอากาศที่สร้างจริงกับการจำลอง

4.2.4 การวัดค่าประวิงเวลากลุ่ม (Group delay)

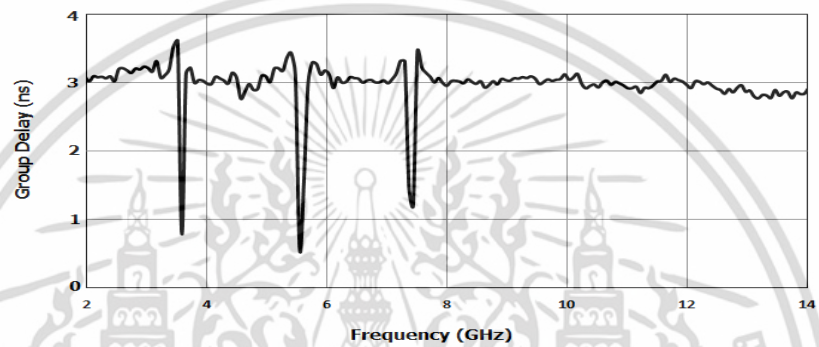
Group delay หรือค่าการเปลี่ยนแปลงเฟส เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการแสดงคุณลักษณะความผิดเพี้ยนของสัญญาณพัลส์ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ โดยการส่งสัญญาณในระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่ดีจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงเฟสน้อยที่สุด นั่นคือการประวิงเวลากลุ่มควรจะมีลักษณะราบเรียบใกล้เคียงเส้นตรงมากที่สุด ซึ่งการวัดค่าประวิงเวลากลุ่มที่ยอมรับจะอยู่ในช่วงนาโนวินาที ผลการวัดค่าประวิงเวลากลุ่มของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX แบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.19 และแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 แสดงผลการวัดค่าประวิงเวลากลุ่มของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink จะเห็นได้ว่าสายอากาศที่สร้างจริงทั้ง 3 โครงสร้างมีค่าประวิงเวลากลุ่มสอดคล้องกัน คือ ค่าประวิงเวลากลุ่มค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.5 นาโนวินาที ยกเว้นที่ความถี่นอตซ์ 3.5 GHz, 5.5 GHz และ 7.5 GHz



รูปที่ 4.19 ค่าประวิงเวลากลุ่มของสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตซ์ความถี่ในย่าน WLAN และ WiMAX



รูปที่ 4.20 ค่าประวิงเวลากลุ่มของสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ความถี่ในย่าน WLAN และ WiMAX



รูปที่ 4.21 ค่าประวิงเวลากลุ่มของสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตซ์ความถี่ในย่าน WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink

จากการสร้างและวัดทดสอบค่าคุณลักษณะของสายอากาศเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม IE3D จะเห็นว่าผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสายอากาศที่สร้างจริงทั้ง 3 โครงสร้างมีคุณลักษณะของสายอากาศในระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่ดี มีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น และสามารถนอตซ์ย่านความถี่ที่ไม่ต้องการได้

สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปการวิจัยของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX โดยมีโครงสร้างส่วนการแพร่กระจายคลื่นทั้งแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมและช่องเปิดแปดเหลี่ยม และสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์แบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink ที่ได้ทำการศึกษา ออกแบบ สร้างและวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติทางพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศจากบทที่ผ่านมา

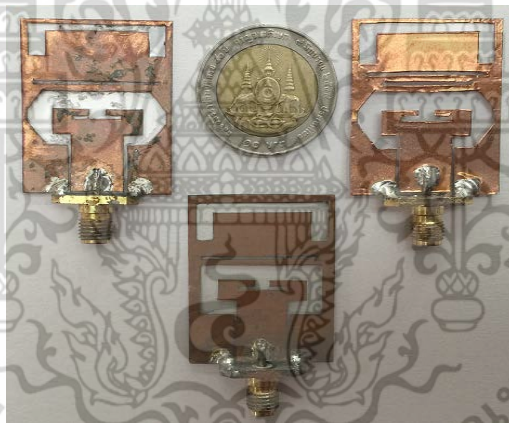
5.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษ ออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ของโครงข่ายระบบสื่อสาร โดยในขั้นตอนแรกได้ทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX จากนั้นจึงได้พัฒนาประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยการปรับปรุงโครงสร้างให้สามารถทำงานบนย่านความถี่ที่กว้างขึ้น ด้วยการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX และจากการเปรียบเทียบผลการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศทั้ง 2 แบบ พบว่าสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์และค่าอัตราขยายดีกว่าสายอากาศเดิมอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ยังคงสามารถนอตช์ย่านความถี่และมีแบบรูปการแผ่พลังงานเช่นเดียวกับสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยม และขั้นตอนสุดท้ายได้ออกแบบการนอตช์ย่านความถี่ X-Band Downlink เพิ่มเข้าไปบนสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX เดิมอยู่แล้ว ต่อจากนั้นจึงได้ทำการสร้างและวัดผลทดสอบค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่สร้างจริงทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าสายอากาศแบบที่ 1 คือสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX มีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 8.4 GHz (2.9-11.3 GHz) มีอัตราส่วนแบนด์วิดท์ 118.3% สายอากาศมีความกว้างของย่านความถี่นอตช์ WLAN เท่ากับ 700 MHz (5.1-5.8 GHz) และย่านความถี่นอตช์ WiMAX กว้างเท่ากับ 430 MHz (3.3-3.73 GHz) โดยมีแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลแบบรอบทิศทางที่ความถี่ต่ำ (4.5 GHz) และแบบสองทิศทางที่ความถี่สูง (7 GHz และ 10 GHz) และมีค่าอัตราขยายของสายอากาศประมาณ 3 dBi ในย่านความถี่ใช้งานแต่ในช่วงความถี่นอตช์จะต่ำกว่า 0 dBi สายอากาศแบบที่ 2 คือสายอากาศแบบช่องเปิดแปดเหลี่ยมที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN และ WiMAX ซึ่งสายอากาศจะมีความกว้างของอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 10.2 GHz (2.8-13 GHz) อัตราส่วนแบนด์วิดท์ 129% สายอากาศมีความกว้างของย่านความถี่นอตช์ WLAN เท่ากับ 700 MHz (5.10-5.80 GHz) และย่านความถี่นอตช์ WiMAX เท่ากับ 430 MHz (3.3-3.73 GHz) และมีแบบรูปการแผ่พลังงานสนามแบบรอบทิศทางเมื่อพิจารณาที่ความถี่ต่ำ (4.5 GHz) และแบบสองทิศทางเมื่อพิจารณาที่ความถี่สูง (7 GHz และ 10 GHz) โดยมีค่าอัตราขยายของสายอากาศประมาณ 3.65 dBi ในย่านความถี่ใช้งานและต่ำกว่า 0 dBi ในช่วงความถี่นอตช์ และสายอากาศแบบสุดท้าย คือ สายอากาศแบบช่องเปิดแปด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลี่ยมที่มีการนอตช่ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-Band Downlink จะมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ทั้งหมดเท่ากับ 10.7 GHz (2.8-13.5 GHz) ซึ่งมีอัตราส่วนแบนด์วิดท์ 132 % สายอากาศมีความกว้างของย่านความถี่นอตช่ WLAN เท่ากับ 750 MHz (5.10-5.85 GHz) ความกว้างของย่านความถี่นอตช่ WiMAX เท่ากับ 400 MHz (3.30-3.7 GHz) และย่านความถี่นอตช่ X-Band Downlink กว้างเท่ากับ 600 MHz (7.2-7.8 GHz) สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศเป็นแบบรอบทิศทางเมื่อพิจารณาที่ความถี่ต่ำ (4.5 GHz) และแบบสองทิศทางเมื่อพิจารณาที่ความถี่สูง (10 GHz) โดยสายอากาศมีค่าอัตราขยายประมาณ 3.6 dBi ในย่านความถี่ใช้งานและต่ำกว่า 0 dBi ในช่วงความถี่นอตช่ และเมื่อเปรียบเทียบผลการวัดสายอากาศที่สร้างจริงกับผลการจำลองจะเห็นว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างด้วยไมล้าฟิล์มสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ที่มีการนอตช่ย่านความถี่ทั้ง 3 รูปแบบแสดงดังรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของสายอากาศที่ออกแบบสามารถสร้างได้ง่าย วัสดุมีราคาถูก มีขนาดเล็ก บาง น้ำหนักเบาและมีความยืดหยุ่นกว่าวัสดุแบบอื่น เช่น FR4 โดยสายอากาศยังมีคุณลักษณะของสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่ดี และสามารถหลีกเลี่ยงการแทรกสอดสัญญาณกับโครงข่ายระบบสื่อสารเดิมด้วยการนอตช่ย่านความถี่ที่ไม่ต้องการได้ ดังนั้นสายอากาศทั้ง 3 แบบนี้จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ระบบอัลตราไวด์แบนด์ขนาดพกพาแบบต่าง ๆ



รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบสายอากาศที่สร้างจริงทั้ง 3 รูปแบบ

5.2 ปัญหาและข้อเสนอนแนะ

ในการสร้างสายอากาศที่ได้ออกแบบนั้น ส่วนที่สำคัญคือวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้าง ได้แก่ แผ่นทองแดงและเครื่องมือในการช่วยสร้าง เนื่องจากสายอากาศที่ออกแบบมีขนาดเล็กและบาง ดังนั้นการเซาะร่องบนแผ่นทองแดงโดยใช้เครื่องเซาะร่อง จึงทำไม่ได้เนื่องจากจะทำให้แผ่นทองแดงฉีกขาดได้ ในการแก้ปัญหานี้อาจทำได้โดยการใช้มีดกรีดช่องเปิด แต่ปัญหาคือใช้เวลาในการสร้างค่อนข้างนานและขนาดของสายอากาศที่ได้ในแต่ละชั้นมีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับความชำนาญผู้กรีดและความคมของอุปกรณ์ที่ใช้ และอีกวิธีหนึ่งคือใช้เลเซอร์กรีด ซึ่งใช้เวลาไม่นานและได้สายอากาศที่มีขนาดแน่นอนในแต่ละชั้น แต่ข้อเสียคือมีราคาแพง สำหรับผู้วิจัยได้ใช้วิธีกรีดช่องเปิดสายอากาศโดยใช้มีด ซึ่งให้ผลการสร้างและการทดสอบใกล้เคียงกับการออกแบบ และมีราคาถูกแม้ว่า

จะมีข้อจำกัดในการสร้างอยู่บ้างก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 แนวทางการพัฒนา

จากการสร้างและทดสอบสายอากาศอัลตราไวด์แบนด์ที่ได้ออกแบบนี้ พบว่าการสร้างสายอากาศจำนวนมากค่อนข้างทำได้ยาก ดังนั้นจึงอาจจะทำโดยการทดสอบสายอากาศบนวัสดุฐานรองชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันแต่สามารถสร้างจำนวนมากได้ง่ายกว่า และจากการทดสอบสายอากาศในบทที่ 4 จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ต่ำค่อนข้างแตกต่างกับความถี่สูง ดังนั้นจึงควรปรับปรุงให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่มีเสถียรภาพในทุกย่านความถี่ และพัฒนางจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ เพื่อใช้ร่วมกับสายอากาศที่ได้ออกแบบ และนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่น ๆ เช่น การเกษตรหรือการแพทย์ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y.L. Zhao, Y.C. Jiao, G. Zhao, L. Zhang, Y. Song and Z.B. Wong, “Compact Planar UWB Antenna with Band-Notched Characteristics,” **Microw. Opt. Technol. Lett.**, Vol. 50, 2008, pp. 2656-2658.
- [2] Z.A. Zheng and Q.X. Chu, “Compact CPW-Fed UWB Antenna with Dual Band-Notched Characteristics,” **Progress in Electromagnetics Research Letters.**, Vol. 11, 2009, pp. 83-91.
- [3] P. Rakluea and J. Nakasuwan, “Planar UWB Antenna with Single Band-Notched Characteristic,” **Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems**, 2010, pp. 1978-1981.
- [4] J.R. Ad. Panda, A.S.R. Saladi and S.K. Rakesh, “A Compact 3.4/5.5 GHz Dual Band-Notched UWB Monopole Antenna with Nested U-Shaped Slots,” **Proceedings of International Conference on Computing Communication and Networking Technologies**, 2010, pp.1-6.
- [5] S.S. Thwin, “Compact Printed Monopole Antenna with Dual Band-Notched Characteristics for UWB Applications,” **International Journal of Computer Theory and Engineering**, Vol. 3, 2011, pp. 720-722.
- [6] S.J. Kim, H.S. Lee and Y.S. Kim, “A CPW-Fed Staircase Monopole UWB Antenna with Band-Notched Frequency in the WLAN Band,” **Microw. Opt. Technol. Lett.**, Vol. 49, 2007, pp. 2545-2547.
- [7] S.H. Lee, J.W. Baik and Y.S. Kim, “A Coplanar Waveguide Fed Monopole Ultra-Wideband Antenna Having Band-Notched Frequency by Two Folded-Striplines,” **Microw. Opt. Technol. Lett.**, Vol. 49, 2007, pp. 2474-2750.
- [8] S. Soltani, M. Azarmanesh, P. Lotfi and G. Dadashzadeh, “Two Novel Very Small Monopole Antennas Having Frequency Band Notch Function Using DGS for UWB Application,” **AEUE Int. J. Electron. Commun. Sci. Direct Elsevier**, Vol. 65, 2010, pp. 87-94.
- [9] S.T. Van and C.D. Ngoc, “Dual Band-Notched UWB Antenna Based on Electromagnetic Band Gap Structures,” **REV Journal on Electronics and Communications**, Vol. 1, 2011, pp. 130-136.
- [10] D. Zhou, S. Gao, F. Zhu, R.A. Abd-Alhameed and J.D. Xu, “A Simple and Compact Planar Ultra Wideband Antenna with Single or Dual Band-Notched Characteristics,” **Proceedings of Progress in Electromagnetics Research**, Vol. 123, 2012, pp. 47-65.
- [11] H.J. Lee, Y.H. Jang, J.P. Kim and J.H. Choi, “Wideband Monopole Antenna with WLAN (2.4 GHz/5 GHz) Dual Band-Stop Function,” **Microw. Opt. Technol. Lett.**, Vol. 50, 2008, pp. 1646-1649.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ซึ่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] W.X. Liu and Y.Z. Yin, "Dual Band-Notched Antenna with the Parasitic Strip for UWB," **Progress in Electromagnetics Research Letters**, Vol. 25, 2011, pp. 21-30.
- [13] M. Ghavami, L.B. Michael and R. Kohno, **Ultra Wideband Signals and System in Communication Engineering**, 2nd ED. West Sussex : John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [14] Federal Communications Commission, "Federal Communications Commission Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission System from 3.1 to 10.6 GHz," **Washington DC: ET-Docket, FCC.**, 2002, pp. 98-153.
- [15] C.A. Balanis, **Antenna Theory Analysis and Design**, New York : John Wiley & Sons, 1997.
- [16] C.P. Wen, "Coplanar Waveguide: A Surface Strip Transmission Line Suitable for Nonreciprocal Gyromagnetic Device Applications," **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Vol. MTT-17, No. 12, Dec. 1969, pp. 1087-1090.
- [17] C. Veyres and V.F. Hanna, "Extension of the Application of Conformal Mapping Techniques to Coplanar Lines with Finite Dimensions," **International Journal of Electronics**, Vol. 48, No. 1, 1980, pp. 47-56.
- [18] W. Hilberg, "From Approximations to Exact Relations for Characteristic Impedances," **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, Vol. MTT-17, 1969, pp. 259-265.
- [19] B.C. Wadell, **Transmission Lines Design Handbook**, Boston : Artech House, 1991.
- [20] E.G. Lim, Z. Wang, C. Lei, Y. Wang and K.L. Man, "Ultra Wideband Antenna-Past and Present," **IAENG International Journal of Computer Science**, Vol. 37, No. 3, 2010.
- [21] J. William and R. Nakkeeran, "A Compact CPW-Fed Slot Antenna with Cross Tuning Stub," **Progress in Electromagnetics Research C**, Vol. 13, 2010, pp. 159-170.
- [22] Y.S. Li, X.D. Yang, C.Y. Liu and T. Jiang, "Compact CPW-Fed Ultra-Wideband Antenna with Dual Band-Notched Characteristics," **Electronic Letters**, Vol. 46, No. 14, 2010, pp. 967-968.
- [23] C. Luo, J. Hong and H. Xiong, "Tri-Band-Notched UWB Antenna with Low Mutual Coupling Between the band-Notched Structures," **RadioEngineering**, Vol. 22, No. 4, Dec. 2013.
- [24] J.D. Krous, **Antenna**, 2nd ED. Singapore : McGraw-Hill, 1988.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] K.C. Gupta, R. Garg, I. Bahl and P. Bhartia, **Microstrip Lines and Slotlines**, 2nd ED. Boston : Artech House, 1996.
- [26] K.S. Ryu and A.A. Kishk, “UWB Antenna with Single or Dual Band-Notches for Lower WLAN Band and Upper WLAN Band,” **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol 57, No. 12, Dec. 2009, pp. 3942-3950.
- [27] M. Zhang, Y.Y.L. Wen, W. Xiao and Y. Wang, “A Slot Antenna with Band-Notched Coupling Strips for UWB Application,” **Proceedings of International Conference on Signals System and Electronics**, Vol. 1, 2010, pp. 1-4.
- [28] A. Subbarao and S. Raghavan, “A Compact CPW-Fed Arrow Shaped Monopole Antenna for UWB Applications,” **Proceedings of International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies**, 2010, pp. 1-4.
- [29] Gabriela Quintero D’AZ DE LE’ “Analysis and Design of Ultra-Wideband Antennas in the Spectral and Temporal Domains,” Ph.D. Thesis, E’Cole Polytechnique FE’ DE’ Rale De Lausanne. 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] M. Tangjitjetsada, B. Kumkhet, P. Rakkuea and C. Benjangkprasert, “A Novel Thin-Film UWB Antennas with Single or Dual Band-Notched Performance,” **Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation**, Jeju, Kora, 2011.
- [2] M. Tangjitjetsada, P. Rakkuea and C. Benjangkprasert, “Study of Compact Thin-Film UWB Antenna with Dual Band-Notched Characteristics,” **Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium**, Kuala Lumpur, Malaysia, 2012, pp. 529-533.
- [3] M. Tangjitjetsada, P. Rakkuea, N. Anantrasirichai, C. Benjangkprasert and T. Wakabayashi, “CPW-Fed Compact Thin-Film UWB Antenna with Dual Band-Notched Characteristics,” **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, Vol.9, No. 4, 2014, pp. 421-426.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวมาลียา ตั้งจิตเจษฎา
 วัน เดือน ปีเกิด 26 กรกฎาคม 2515 ที่นครราชสีมา
 ที่อยู่ 2/78 เฉลิมพระเกียรติพาวิลเลียน ถ. บางศรีเมือง-วัดโบสถ์ ต.บางศรีเมือง
 อ. เมือง จ. นนทบุรี 11000

ประวัติการศึกษา 2540 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 2547 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ระบบสื่อสารไร้สาย
 2.) การออกแบบสายอากาศ

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย
 พ.ศ.2547-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้