

การออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่และ
สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่กว้างยิ่ง

DESIGN OF TRIPLE BAND PLANAR DIPOLE ANTENNA AND
ULTRA WIDEBAND RECTANGULAR SLOT ANTENNA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-D-081-177

การออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่และ
สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่กว้างยิ่ง

DESIGN OF TRIPLE BAND PLANAR DIPOLE ANTENNA AND
ULTRA WIDEBAND RECTANGULAR SLOT ANTENNA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMITL-2018-EN-D-081-177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF TRIPLE BAND PLANAR DIPOLE ANTENNA AND
ULTRA WIDEBAND RECTANGULAR SLOT ANTENNA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-D-081-177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่และสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่กว้างยิ่ง
ชื่อนักศึกษา	นาง เตือนใจ อาชีวะพนิช
รหัสประจำตัว	56601022
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. วันวิสา ชัชวงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศ. ดร. ประยุทธ์ อัครเอกพาลี

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการออกแบบสายอากาศสองรูปแบบ สายอากาศรูปแบบที่หนึ่งเป็นการออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่โดยใช้โครงสร้างดับเบิลอินเตอร์ดิจิทัล (double interdigital) สามารถควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกที่สองและความถี่ฮาร์โมนิกที่สามได้ตามต้องการ ออกแบบบนวัสดุโลหะ มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการสร้างและการพัฒนาโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอประกอบด้วยโครงสร้างอินเตอร์ดิจิทัลที่ฝังไปในด้านข้างทั้งสองของสายอากาศไดโพลทำให้เกิดค่าความจุภายในสามารถควบคุมย่านความถี่ได้ตามต้องการ สายอากาศทำงานได้ดีที่ความถี่พื้นฐานที่กำหนดไว้ที่ 1.8 GHz และย่านความถี่ฮาร์โมนิกที่สองและฮาร์โมนิกที่สามอยู่ที่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ รองรับการใช้งานในระบบ LTE และ WLAN ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สายอากาศรูปแบบที่สอง เป็นการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่ง (UWB) และพัฒนาให้มีการกรองแถบความถี่ไม่ผ่านหรือแบนด์นอตช์แบบสามแบนด์นอตช์ ที่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอประกอบด้วยร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีสายส่งสัญญาณแบบไมโคร สตรีปมีการเพิ่มสแต็ครูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ที่ปลายสายเพื่อทำหน้าที่ขยายแบนด์วิดท์ให้เป็นสายอากาศแบนด์กว้าง จากนั้นทำการปรับปรุงสายอากาศเพื่อขยายแบนด์วิดท์ให้ครอบคลุมย่าน UWB ด้วยการแทรกตัวนำรูปพัลส์ไปในร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ต่อมาผู้วิจัยได้พัฒนาสายอากาศเพื่อหลีกเลี่ยงการสอดแทรกของการสื่อสารไร้สาย WiMAX WLAN และ X-band โดยนำสายอากาศมาทำการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนระนาบกราวด์สองร่องและเจาะร่องบนระนาบการแพร่กระจายหนึ่งร่อง เพื่อให้ได้สามแบนด์นอตช์เพื่อกรองแถบความถี่ 3.5 GHz 5.5 GHz และ 7-8 GHz ตามลำดับออกไป จากผลการวัดสายอากาศทั้งสองรูปแบบเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองของสายอากาศ ได้ผลคุณลักษณะของสายอากาศที่ดีของการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) แบนด์วิดท์ (Bandwidth) และแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกล (Radiation pattern) สายอากาศที่นำเสนอทั้งสองแบบนี้สามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพ

Thesis Title	DESIGN OF TRIPLE BAND PLANAR DIPOLE ANTENNA AND ULTRA WIDEBAND RECTANGULAR SLOT ANTENNA
Student	Mrs. Tuanjai Archevapanich
Student ID.	5601022
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Vanvisa Chutchavong
Thesis Co-Advisor	Prof. Dr. Prayoot Akkaraekthalin

ABSTRACT

This thesis proposes the design of two antennas, the first antenna, a triple band planar dipole antenna has been designed on a brass plate with double interdigital structure design. The double interdigital structure can control the second harmonic frequency and the third harmonic frequency as desired. The proposed antenna can be appropriately employed for LTE and WLAN base stations. The second antenna is a rectangular slot antenna designed for using in the ultra-wideband (UWB) applications and also developed to filter the reject band or band notch. This structure is not complicated and it is easy to fabricate. The proposed antenna structure consists of a rectangular slot with a microstrip line and a rectangular stub added at the end to achieve the wide band. In following, the antenna was enhanced to cover the UWB by inserting a pulse-shaped conductor into the rectangular slot. The researcher has developed an antenna to avoid the interference of WiMAX, WLAN and X-band downlink wireless communications by introducing an antenna with two etched slots on the ground planes and a single slot on the radiation plane. The antenna achieves three band notches to filter at the 3.5 GHz, 5.5 GHz and 7-8 GHz band, respectively. The results of both antennas are compared to the simulation results of the antenna. As a result, the good antenna properties of return loss (S_{11}), voltage standing wave ratio (VSWR), bandwidth and radiation pattern are proposed. This proposed antenna can be used effectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีต้องขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. วันวิสา ชัชวงษ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศ. ดร. ประยุทธ์ อัครเอกฉมาลิน ที่คอยชี้แนะแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ให้คำปรึกษาให้ความช่วยเหลือ

I would like to express my deeply sincere thanks to Prof. Dr. Hisayuki Aoyama at The University of Electro-Communications (UEC), for very good support to me concerning about my experiment.

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. พงศธร ชมทอง ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการใช้โปรแกรม

ขอขอบคุณ ผศ. ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ และรศ. นภพินท์ อนันตรศิริชัย ที่ให้คำแนะนำ รวมถึงอาจารย์ที่มีพระคุณทุกท่านที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการการสื่อสารไร้สาย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการการสื่อสารไร้สาย ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ขอบคุณ Mr.Poch Peuv จาก Mampong Chheuteal Institute of Technology

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำที่ดีตลอดมา

ท้ายสุดนี้คุณค่า คุณประโยชน์ และคุณงามความดีใด ๆ อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดาและมารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งของข้าพเจ้า ขอขอบคุณครอบครัว ภูระหงษ์และครอบครัวอาชีวะพนิช ทุกท่านตลอดจนครูอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

เตือนใจ อาชีวะพนิช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่น่าเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	4
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2.1 สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna).....	6
2.2.2 เทคโนโลยี UWB.....	9
2.2.3 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna).....	6
2.2.4 สายอากาศไมโครสตริปแบบร่อง.....	13
2.2.5 โครงสร้างพื้นฐานของสายนำสัญญาณไมโครสตริป.....	14
2.2.6 ลักษณะการส่งผ่านคลื่นสัญญาณของสายส่งไมโครสตริป.....	20
2.2.7 การออกแบบสายนำสัญญาณและสายอากาศไมโครสตริป.....	21
2.2.8 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ.....	23
2.2.9 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	26
2.3 บทสรุป.....	30
บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบสามความถี่ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital.....	31
3.1 บทนำ.....	31
3.2 การออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบสามความถี่ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การศึกษาผลกระทบการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	35
3.3.1 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ (W_1).....	36
3.3.2 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับความกว้างของช่อง Interdigital (G).....	37
3.3.3 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับจำนวนฟิงเกอร์ (Number of finger).....	38
3.3.4 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับความกว้างของฟิงเกอร์ (Finger width).....	39
3.4.5 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับระยะระหว่างสายอากาศและ ตัวสะท้อนคลื่น (D).....	39
3.4.6 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับชนิดของวัสดุฐานรอง.....	41
3.4 ผลการจำลองสายอากาศ.....	42
3.4.1 การจำลองความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของ สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่.....	42
3.4.2 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศไดโพล ระนาบแบบสามความถี่.....	43
3.4.3 การจำลองอินพุตอิมพีแดนซ์.....	45
3.5 บทสรุป.....	46
บทที่ 4 การออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์.....	47
4.1 บทนำ	47
4.2 ทฤษฎีและการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบไมโครสติป.....	48
4.2.1 คุณสมบัติของวัสดุและสูตรการคำนวณสายอากาศ.....	49
4.2.2 ผลการจำลองสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณ แบบไมโครสติป.....	50
4.3 การปรับปรุงแบนด์วิดท์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB.....	52
4.4 การศึกษาผลกระทบการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	54
4.4.1 กรณีปรับความยาวขอบนอกด้านล่างของแพทช์รูปพัลส์ตาม แนวนอน (W_1).....	55
4.4.2 กรณีปรับความยาวขอบนอกด้านซ้ายและด้านขวาของแพทช์รูปพัลส์ ตามแนวนอน (W_2).....	56
4.4.3 กรณีปรับความยาวขอบนอกด้านบนซ้ายของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวนอน (W_3).....	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.4 กรณีปรับความกว้างขอบนอกด้านข้างของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวตั้ง (L_2).....	57
4.4.5 กรณีปรับความกว้างขอบนอกด้านบนของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวตั้ง (L_3).....	58
4.4.6 กรณีปรับความกว้างขอบในตรงกลางของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวตั้ง (L_4).....	58
4.4.7 กรณีระยะระหว่างขอบบนของแพทช์รูปพัลส์กับขอบร่อง (L_5).....	59
4.5 สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์.....	61
4.5.1 การออกแบบการนอตช์ความถี่ 3.5 GHz ในย่าน WiMAX.....	63
4.5.2 การออกแบบการนอตช์ความถี่ 5.5 GHz ในย่าน WLAN.....	65
4.5.3 การออกแบบการนอตช์ความถี่ 7.5 GHz ในย่าน X-band.....	68
4.6 ผลการจำลองสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ที่มีการกรองแถบความถี่ 3.5 GHz, 5.5 GHz และ 7.5 GHz.....	71
4.6.2 การจำลองความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์.....	72
4.6.3 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์.....	73
4.6.4 การจำลองอัตราขยายของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์.....	75
4.7 บทสรุป.....	75
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	77
5.1 บทนำ.....	77
5.2 การสร้างสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่.....	77
5.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไดโพลระนาบสามความถี่.....	79
5.3.1 การวัดการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ.....	79
5.3.2 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล.....	81
5.4 การสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band.....	83
5.5 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band.....	83
5.5.1 การวัดการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ.....	84
5.5.2 การวัดอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศ.....	85
5.5.3 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล.....	86
5.6 บทสรุป.....	88

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	89
6.1 บทนำ.....	89
6.2 สรุปผลการวิจัย.....	90
6.2.1 สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่.....	90
6.2.2 สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band.....	91
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	93
บรรณานุกรม.....	94
ภาคผนวก.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	101



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของสายอากาศแบบไมโครสติป.....	7
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ด้วย โครงสร้าง Double Interdigital.....	38
3.2 คุณสมบัติแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศ.....	45
4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วย สายนำสัญญาณไมโครสติป.....	51
4.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสตรูปสี่เหลี่ยม.....	53
4.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวนำรูปพัลส์.....	55
4.4 พารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบย่าน UWB.....	61
4.5 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ สำหรับการนอตซ์ที่ความถี่ 3.5	65
4.6 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ สำหรับการนอตซ์ที่ความถี่ 5.5	68
4.7 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์.....	70
4.8 พารามิเตอร์ต่างๆ ของร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	72
5.1 ผลการวัดผลและการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศไดโพลระนาบ แบบสามความถี่.....	81
5.2 ผลการวัดและการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ย่านความถี่ WIMAX, WLAN และ X-band.....	85
6.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่.....	90
6.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์.....	92

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สายอากาศไดโพล..... 7
2.2	จุดบ่อนสัญญาณ..... 7
2.3	ค่ากระแสและแรงดันบนสายอากาศไดโพลแบบ half-wavelength..... 8
2.4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลในแนวนอน..... 8
2.5	ค่าการแพร่กระจายกำลังงาน UWB ของ FCC สำหรับสัญญาณภายในและ ภายนอกอาคาร..... 9
2.6	ย่านความถี่การใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สาย..... 10
2.7	โครงสายอากาศไมโครสตริป..... 11
2.8	ระนาบกราวด์..... 12
2.9	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบร่อง..... 13
2.10	การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศไมโครสตริปแบบร่อง..... 14
2.11	โครงสร้างทางกายภาพของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป..... 15
2.12	สายส่งมีความยาวเป็นอนันต์..... 15
2.13	วงจรสมมูลของรูปที่ 2.12..... 16
2.14	สายส่งที่ต่อโหลดไว้ที่ปลายสาย..... 17
2.15	เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบตามขวางของสายไมโครสตริป..... 20
2.16	สายอากาศช่องเปิดที่บ่อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริป..... 20
2.17	สายอากาศส่งและลักษณะวงจรเสมือน..... 23
2.18	ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ..... 27
2.19	แบบรูปของสายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omni-directional)..... 27
2.20	แบบรูปหลักสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร (Horn Antenna)..... 28
2.21	การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ..... 29
3.1	โครงสร้างสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital..... 33
3.2	สายอากาศไดโพลระนาบด้วย (ก) ต้นแบบสายอากาศไดโพล (ข) ช่องว่าง double straight (ค) โครงสร้าง double interdigital..... 33
3.3	เปรียบเทียบการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) (ก) โครงสร้างสายอากาศไดโพล ระนาบ (ข) โครงสร้างช่องว่าง double straight (ค) โครงสร้าง double interdigital..... 35
3.4	เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีรับพารามิเตอร์ w_1 36
3.5	เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีรับพารามิเตอร์ G 37
3.6	เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีรับจำนวนฟิงเกอร์..... 38
3.7	เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีรับความกว้างของฟิงเกอร์..... 39
3.8	โครงสร้างของสายอากาศไดโพลระนาบสามความถี่ติดตั้งด้วยตัวรีแฟคเตอร์..... 40
3.9	เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} กรณีปรับค่า D 40
3.10	โครงสร้างตำแหน่งการเปลี่ยนวัสดุฐานรองแต่ละชนิด..... 41
3.11	เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับชนิดของวัสดุฐานรอง..... 42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่.....	43
3.13 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามแบนด์ที่ความถี่ 1.8 GHz, 2.45 GHz และ 5.2 GHz.....	44
3.14 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่.....	45
3.15 อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงกับจินตภาพและในรูปแผนภูมิสมิทของสายอากาศ.....	46
4.1 โครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป.....	51
4.2 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....	52
4.3 โครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปโดยการเพิ่มสตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	52
4.4 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปโดยการเพิ่มสตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	53
4.5 โครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมที่ปรับปรุงแบนด์วิดท์ด้วยการแทรกตัวนำรูปพัลส์	54
4.6 การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแทรกตัวนำแพทช์รูปสี่เหลี่ยม.....	55
4.7 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ W_1	56
4.8 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ W_2	56
4.9 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ W_3	57
4.10 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ L_2	58
4.11 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ L_3	58
4.12 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ L_4	59
4.13 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ L_5	59
4.14 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแทรกตัวนำรูปพัลส์	60
4.15 ผลการจำลองสายอากาศ (ก) การสูญเสียย้อนกลับ (ข) VSWR.....	60
4.16 โครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบสามแบนด์นอตซ์.....	61
4.17 โครงสร้างสายอากาศที่มีการนอตซ์ย่าน WiMAX บนระนาบกราวด์ของสายอากาศต้นแบบ.....	63
4.18 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความยาวของร่องตามแนวแกน y (L_{S1}) ที่ความถี่ 3.5 GHz.....	64
4.19 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างร่องของสองแบนด์นอตซ์ (W_{S1}) ที่ความถี่ 3.5 GHz.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 โครงสร้างสายอากาศที่มีการนอตซ์ย่าน WLAN บนระนาบกราวด์ของสายอากาศต้นแบบ.....	66
4.21 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความยาวของร่องตามแนวแกน y (L_{S2}) ที่ความถี่ 5.5 GHz.....	67
4.22 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างร่อง (W_{S2}) ที่ความถี่ 5.5 GHz.....	67
4.23 โครงสร้างสายอากาศที่มีการนอตซ์ย่าน X-band บนระนาบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ.....	68
4.24 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความยาวของร่องตามแนวแกน y (L_{S3}) ที่ความถี่ 7 GHz.....	69
4.25 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างร่องของสองแบนด์นอตซ์ (W_{S3}) ที่ความถี่ 7 GHz.....	70
4.26 โครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่องย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์.....	71
4.27 ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่องย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์.....	72
4.28 ความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่องย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์.....	73
4.29 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่องย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ ที่ความถี่ 4.0 GHz, 5.8 GHz และ 7 GHz.....	74
4.30 อัตราขยายของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่องย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์.....	75
5.1 ผังการวางตำแหน่งของสายโคแอกเซียล RG-142.....	78
5.2 ชิ้นส่วนงานสายอากาศก่อนการประกอบและหลังการประกอบ.....	78
5.3 สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่สร้างจริงแบบสมบูรณ์.....	79
5.4 สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่นำไปด้วยเครื่อง Agilent 8791ES network analyzer.....	79
5.5 สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่วัดคุณลักษณะของสายอากาศในห้อง anechoic chamber.....	80
5.6 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่.....	80
5.7 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายพลังงานระยะไกลของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่สำหรับ co และ cross polarization ในระนาบ XZ ที่ความถี่ 1.8 GHz (ข) 2.54 GHz (ค) 5.20 GHz.....	81
5.8 การเชื่อมต่อกับ SMA.....	83
5.9 ต้นแบบสายอากาศร่องย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์.....	83
5.10 การวัดสายอากาศที่สร้างจริง.....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์.....	84
5.12 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์.....	85
5.13 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ ในห้อง Anechoic chamber.....	86
5.14 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศในระนาบ (ก) XZ และ (ข) YZ.....	86
6.1 โครงสร้างสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่สร้างจริง.....	90
6.2 สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่สร้างจริง.....	91
6.3 ผลการวัดและการจำลองสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่.....	91
6.4 โครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์.....	91
6.5 สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ ที่สร้างจริง.....	92
6.6 ผลการวัดและการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์.....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการการใช้เทคโนโลยีเพื่อการสื่อสารมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กลายเป็นปัจจัยส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของประชากรเกือบทั่วโลกไม่ว่าจะเป็นด้านการศึกษา ด้านการทำงาน ด้านการแพทย์ ด้านการติดต่อระหว่างบุคคล และหน่วยงานกับหน่วยงาน ฉะนั้นเทคโนโลยีทางด้านการสื่อสารเป็นเสมือนเป็นสิ่งสำคัญในการดำรงชีวิต ทำให้ปริมาณความต้องการช่องสัญญาณการใช้งานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับเครื่องมือที่ใช้สำหรับการสื่อสารไร้สายมีความหลากหลาย เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile phone) คอมพิวเตอร์แบบพกพา (Notebook) แท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ (tablet) เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือเหล่านี้ล้วนต้องมีอุปกรณ์ไร้สายเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างกันนั่นคือ สายอากาศซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญของระบบสื่อสารไร้สายเพื่อใช้ในการรับและส่งข้อมูลโดยการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณ จึงต้องมีการพัฒนาให้มีความสอดคล้องกับอุปกรณ์และความต้องการของเทคโนโลยี สายอากาศมีความหลากหลายทั้งแบบไมโครสตริป หรือแผ่นโลหะ มีการบ่อนสัญญาณที่แตกต่างกันออกไป ในรูปของสายนำสัญญาณระนาบคู่ (Coplanar wave guide) ไมโคร สตริปไลน์ (Microstrip line) และสายโคแอกเซียลโพรบ (Coaxial probe) การออกแบบสายอากาศในปัจจุบันทั้งสายอากาศภายในและภายนอกอาคารเพื่อปรับปรุงอัตราขยายของสายอากาศ พบว่าการเลือกวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบสายอากาศ เพื่อรองรับกำลังงานและอัตราขยายที่สูงแต่อาจมีข้อด้อยบางประการ เช่น เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน มีขนาดใหญ่ และไม่รองรับการใช้งานหลายความถี่ การปรับปรุงอีกวิธีที่สามารถนำมาเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศด้วยการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น (Reflector) ดังนั้นเป็นความท้าทายในการออกแบบสายอากาศให้ตรงตามความต้องการ เช่น ขนาด ตอบสนองได้หลายช่องความถี่การใช้งาน มีอัตราการขยายสูง ต้นทุนต่ำ เป็นต้น ในการออกแบบสายอากาศที่มีอัตราขยายสูงเป็นสิ่งที่น่าสนใจด้วยเป็นคุณสมบัติที่ดีของสายอากาศเพื่อใช้เป็นสายอากาศภายในและภายนอกอาคารรวมทั้งการออกแบบสายอากาศที่รองรับได้หลายความถี่เพื่อรองรับกับเทคโนโลยีสื่อสารไร้สาย

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าความต้องการการใช้เทคโนโลยีที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณความต้องการช่องสัญญาณการใช้งานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงมีการเพิ่มช่องสัญญาณความถี่การใช้งานและเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2002 คณะกรรมาธิการการสื่อสารแห่งอเมริกา (Federal communications commission: FCC) [1] ได้กำหนดย่านความถี่ที่มีความกว้างของแบนด์วิดท์เท่ากับ 7.5 GHz ครอบคลุมย่านความถี่ ตั้งแต่ 3.1-10.6 GHz เรียกย่านการสื่อสารนี้ว่า การสื่อสารย่านความถี่กว้างยิ่ง (Ultra wideband) โดยใช้ตัวย่อ UWB ซึ่งการสื่อสารด้านนี้มีข้อเด่นคือมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง ถึง 480 Mbps ที่ระยะทาง 2 เมตร และความเร็ว 110 Mbps ที่ระยะทาง 10 เมตร มีแบนด์วิดท์ที่กว้าง ใช้กำลังงานในการส่งข้อมูลต่ำ และมีความสามารถในการใช้แถบความถี่ทับซ้อนกับระบบอื่นได้ เป็นต้น จากคุณลักษณะเด่นในด้านความสามารถใช้แถบความถี่ทับซ้อนกับระบบอื่นได้ ทำให้ระบบการสื่อสารที่ใช้สัญญาณ UWB สามารถทำงานทับซ้อนกับระบบสื่อสารแบบอื่นที่ใช้ความถี่แถบความถี่แคบได้ เนื่องจากระบบมีการรบกวนต่อสัญญาณระบบอื่นต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการออกแบบสายอากาศที่นำมาใช้ต้องรองรับกับเทคโนโลยีไร้สายของอุปกรณ์แต่ละชนิดตามมาตรฐานสากลที่นิยมใช้กัน เช่น ระบบแอลทีอี (Long-Term Evolution: LTE) ช่วงความถี่ใช้งาน 1.72-1.83 GHz ระบบไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access: WiMAX) ช่วงความถี่ใช้งาน 2.5-2.7 GHz, 3.4-3.69 GHz และ 5.47-5.825 GHz โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) มีความถี่ใช้งาน 2.4-2.484 GHz 5.150-5.350 GHz และ 5.725-5.825 GHz ตามลำดับ และการสื่อสารย่าน X-band มีความถี่ใช้งานอยู่ที่ 7.25-7.75 GHz [2]

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นเป็นแนวทางให้ผู้วิจัยศึกษาวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศสองรูปแบบ รูปแบบที่หนึ่ง เป็นการออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบหลายความถี่ที่มีอัตราการขยายสูงใช้งานย่าน LTE และ ย่าน WLAN บนวัสดุโลหะ ที่มีโครงสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อน สร้างง่าย และเลือกใช้วัสดุที่จัดหาได้ง่าย รูปแบบที่สองเป็นการออกแบบสายอากาศสำหรับย่านความถี่กว้างยิ่ง (UWB) และหลีกเลี่ยงการทับซ้อนกับความถี่ใช้งานย่าน WiMAX, WLAN และ X-band ภายในตัวสายอากาศเองบนวัสดุ FR4 โดยมีโครงสร้างของสายอากาศที่ง่ายและการทำแบนด์นอตซ์ทั้งสามย่านที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นที่มาของการนำเสนอวิทยานิพนธ์นี้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความมุ่งหมายเพื่อออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศสองรูปแบบ ดังนี้ **รูปแบบที่หนึ่ง** ออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ ด้วยเทคนิค Double interdigital ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการสร้าง ออกแบบบนโลหะทองเหลืองที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร ทนกำลังงานได้สูง ข้อเด่นของสายอากาศแบบนี้คือสามารถควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สอง และ ฮาร์โมนิกส์ที่สามได้ตามต้องการ เหมาะสำหรับใช้งานย่าน LTE และย่าน WLAN

รูปแบบที่สอง ออกแบบสายอากาศแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด และง่ายต่อการทำแมทซ์อิมพีแดนซ์ โดยเพิ่มตัวนำรูปพัลส์ (Pulses-Shaped-patch) เพื่อปรับปรุงแบนด์วิดท์สำหรับใช้งานย่านความถี่ UWB จากนั้นมีการพัฒนาสายอากาศให้มีสามแบนด์นอตซ์ โดยมีความมุ่งหมายเพื่อไม่ให้เกิดการทับซ้อนของสัญญาณ (Interference signal) ย่านความถี่ UWB กับย่านความถี่เครือข่ายไร้สาย (WLAN) ไวแมกซ์ (WiMAX) และย่าน X-band โดยใช้ร่องรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular-shaped) บนระนาบกราวด์ (Ground plane) และบนระนาบการแผ่กระจาย (Radiation patch plane)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่
2. เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่กว้างยิ่ง (UWB) แบบสามแบนด์นอตซ์
3. เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) และแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่สร้างจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรม CST-microwave studio

4. เพื่อเปรียบเทียบการวัดและการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ ที่สร้างจริงและจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST –microwave studio

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การเปรียบเทียบการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่สร้างจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรม CST –microwave studio มีความใกล้เคียงยอมรับได้
2. การเปรียบเทียบการวัดแบบรูปแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ของสายอากาศแบบไดโพลระนาบแบบสามความถี่ ที่สร้างจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรม CST –microwave studio มีความใกล้เคียงยอมรับได้
3. การเปรียบเทียบการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่กว้างยิ่ง (UWB) แบบสามแบนด์นอตช์ที่สร้างจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรม CST –microwave studio มีความใกล้เคียงยอมรับได้
4. การเปรียบเทียบการวัดค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ที่สร้างจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรม CST –microwave studio มีความใกล้เคียงยอมรับได้
5. การเปรียบเทียบการวัดแบบรูปแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ของสายอากาศแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่กว้างยิ่ง (UWB) แบบสามแบนด์นอตช์ ที่สร้างจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรม CST –microwave studio มีความใกล้เคียงยอมรับได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยแบ่งเป็นสองส่วน คือส่วนที่หนึ่งเป็นการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ โดยออกแบบความถี่หลักที่ 1.8 GHz บนวัสดุโลหะทองเหลืองที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร ด้วยการใช้โครงสร้าง double interdigital ฝั่งไปในด้านข้างทั้งสองของสายอากาศไดโพล เพื่อควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกที่สองและความถี่ฮาร์โมนิกที่สาม ย่านความถี่ที่สอง 2.45 GHz และย่านความถี่ที่สาม 5.2 GHz ได้ตามต้องการ สายอากาศที่ออกแบบตอบสนองการใช้งานได้หลายย่านความถี่ เช่น LTE และ WLAN โดยมีโครงสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถทนกำลังงานได้สูงสามารถใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ส่วนที่สองเพื่อออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ทแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ 50 โอห์ม โดยอาศัยการเพิ่มตัวนำรูปพัลส์ (Pulses - shaped) มาช่วยในการปรับปรุงแบนด์วิดท์ให้เกิดการรีโซแนนซ์ที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ระหว่าง 3.1-10.6 GHz อีกทั้งยังสามารถหลีกเลี่ยงการทับซ้อนของสัญญาณ (Interference signal) ย่านความถี่แบบ UWB กับย่านความถี่ไร้สาย (WLAN), ไวแมกซ์ (WiMAX) และย่าน X-band โดยอาศัยคุณสมบัติพื้นฐานของร่องรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular-slot shaped) มาออกแบบในการทำแบนด์นอตช์ โดยร่องรูปสี่เหลี่ยมถูกวางอยู่บนระนาบกราวด์เพื่อให้เกิดแบนด์นอตช์เดี่ยว จากนั้นทำการเจาะร่องที่สองตำแหน่งที่เจาะอยู่ด้านล่างของร่องที่หนึ่งบนระนาบกราวด์เพื่อให้เกิดสายอากาศแบบสองแบนด์นอตช์กรองช่วงความถี่ WiMAX (3.5 GHz) และ WLAN (5-6 GHz) ท้ายสุดของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นการพัฒนาสายอากาศด้วยการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมบนระนาบการแผ่กระจาย (Radiation patch) เพื่อให้เป็นสายอากาศแบบสามความถี่นอตซ์กรองช่วงความถี่ WiMAX (3.5 GHz), WLAN (5-6 GHz) และ X-band (7-8 GHz) ออกไป

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศสองแบบ สายอากาศแบบที่หนึ่ง เป็นการออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ออกแบบ บนวัสดุที่เป็นโลหะประเภททองเหลืองที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร ออกแบบที่ความถี่หลัก 1.8 GHz ใช้โครงสร้าง Double interdigital ที่สามารถควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกที่สองและความถี่ฮาร์โมนิกที่สามได้ จากนั้นทำการเพิ่มอัตราขยายด้วยการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีวัสดุฐานรองที่เป็นอากาศใช้วัสดุชนิด Polyoxymethylene (POM) ด้วยค่าไดอิเล็กตริกคงที่เท่ากับ 9.4 เป็นตัวรองรับติดตั้งระหว่างสายอากาศที่นำเสนอกับตัวสะท้อนคลื่น สายอากาศที่ได้ออกแบบสามารถตอบสนองการใช้งานได้หลายย่านความถี่ เช่น LTE และ WLAN โดยมีโครงสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนออกแบบที่ความถี่หลัก 1.8 GHz ย่านที่สองที่ความถี่ 2.45 GHz และย่านความถี่ที่สาม 5.2 GHz อีกทั้งยังสามารถทนกำลังงานได้สูง สายอากาศแบบที่สองเป็นการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมที่ใช้ตัวนำรูปพัลส์ (Pulses-Shaped) เพื่อปรับปรุงแบนด์วิธในช่วงที่มีค่าต่ำกว่า -10 เพื่อให้ได้ย่าน UWB จากนั้นทำการพัฒนาสายอากาศที่นำเสนอให้มีแบนด์นอตซ์เดี่ยว สองแบนด์นอตซ์ และสามความถี่นอตซ์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อไม่ให้เกิดการทับซ้อนของสัญญาณ ระหว่างย่าน UWB กับย่าน WLAN, WiMAX และย่าน X-band โดยอาศัยเทคนิคการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular slot) บนระนาบกราวด์ได้แบนด์นอตซ์เดี่ยว จากนั้นทำการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมร่องที่สองบนระนาบกราวด์ที่ตำแหน่งอยู่ด้านล่างของร่องรูปสี่เหลี่ยมช่องที่หนึ่งบนระนาบกราวด์ได้สายอากาศแบบสองแบนด์นอตซ์ ท้ายสุดเป็นการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมบน Radiation patch ได้สายอากาศแบบสามแบนด์นอตซ์ สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศที่ลดการเกิด Mutual coupling ระหว่างแต่ละแบนด์นอตซ์ อีกทั้งยังเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น (Radiation pattern) เป็นแบบสองทิศทาง (Bi-directional parttern) ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ดีของสายอากาศอันจะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อความต้องการจัดสร้างสายอากาศที่มีการแผ่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางเหมาะสมกับสภาพพื้นที่เป็นแบบโถงทางเดินแนวยาว เช่น โถงทางเดินของสนามบิน โถงทางเดินโรงพยาบาล โถงทางเดินในรถไฟ เป็นต้น สายอากาศแบบที่สองนี้สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร

1.6 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่
2. ออกแบบและสร้างสายอากาศแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์
3. เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่สร้างจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรม CST-microwave studio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เปรียบผลการวัดและการจำลองการสูญเสียย้อนกลับอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปแผ่พลังงานของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ ที่สร้างจริงและจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST –microwave studio

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ประกอบด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ ด้วยการใช้โปรแกรม CST-microwave studio มาช่วยในการจำลองผล โดยเริ่มออกแบบสายอากาศไดโพลด้วยโครงสร้าง Double Interdigital การศึกษาผลกระทบการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ด้วยโปรแกรม CST-microwave studio มาช่วยในการจำลองผล โดยเริ่มจากออกแบบสายอากาศวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศร่องที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป การปรับปรุงแบนด์วิดท์ของสายอากาศย่าน UWB การศึกษาผลกระทบการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ และการทำแบนด์นอตช์เดี่ยว สองแบนด์นอตช์ และสามแบนด์นอตช์

บทที่ 5 กล่าวถึงผลที่ได้จากการวัดคุณลักษณะของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ และสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ เพื่อนำผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง

บทที่ 6 กล่าวถึง สรุปผลการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในวิทยานิพนธ์ ด้วยสายอากาศเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการติดต่อสื่อสารไร้สายในปัจจุบันซึ่งสายอากาศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น มีหลายปัจจัยในการออกแบบเพื่อให้ตอบสนองต่อการใช้งานไม่ว่าจะเป็นด้านการออกแบบ การสร้างกำลังงานส่งของสายอากาศ รองรับการใช้งานได้หลายความถี่ เป็นต้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของสายอากาศไดโพล เทคโนโลยี UWB ไมโครสตริป สมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการวิเคราะห์สายอากาศ การป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณสัญญาณแบบไมโครสตริป (Microstrip line) ข้อดีของการป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณสัญญาณแบบไมโครสตริป คือเพื่อให้สอดคล้องกับรูปแบบสายอากาศที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการแก้ปัญหาและการวิจัย จากนั้นสรุปผลการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัย โดยรายละเอียดนำเสนอ ดังนี้

2.1 บทนำ

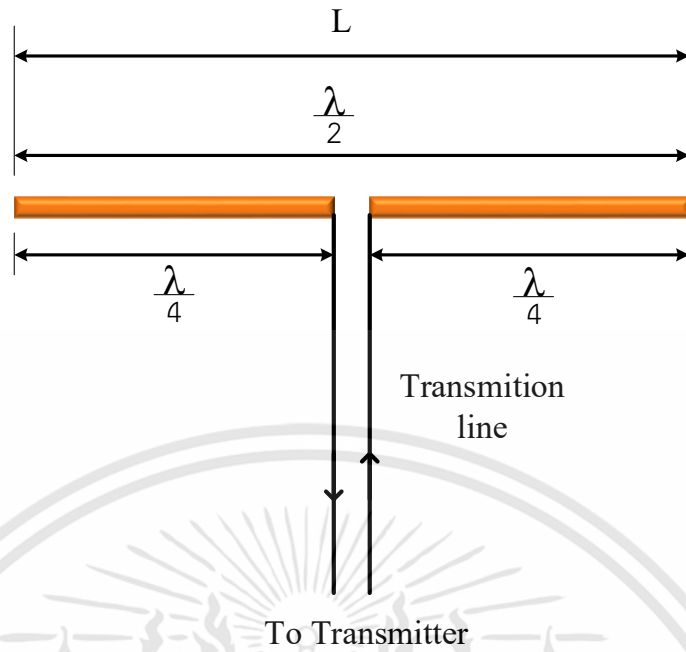
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.3 บทสรุป

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

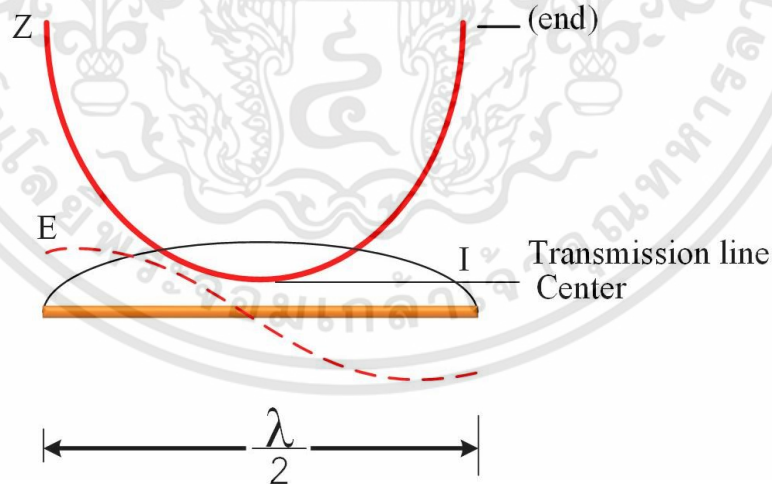
2.2.1 สายอากาศสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna)

สายอากาศ เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการรับและส่งสัญญาณไร้สาย เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในทางกลับกันสายอากาศทำหน้าที่เปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสายอากาศนั้นมีหลายรูปแบบแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและการออกแบบ ซึ่งในที่นี้ได้นำเสนอสายอากาศไดโพล หรือบางทีเรียกสายอากาศแบบเฮิร์ต (Hertz) เป็นสายอากาศที่รู้จักกันทั่วไป สายอากาศไดโพลนี้ถูกค้นพบโดยนาย Heinrich Rudolph Hertz เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1886 สายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศแบบสมดุล (Balance) ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่แพร่กระจายคลื่น 2 ส่วน โดยด้านปลายของทั้งสองนั้นจะมีกระแสไหลที่เท่ากันวางเป็นเส้นตรงทั้งสองส่วน แสดงดังรูปที่ 2.1 แต่ละส่วนจะมีความยาว $\frac{1}{4}$ ของความยาวคลื่น (Quarter-wavelength) เมื่อรวมทั้งสองข้างจะมีขนาดเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ของความยาวคลื่น (Half-wavelength)



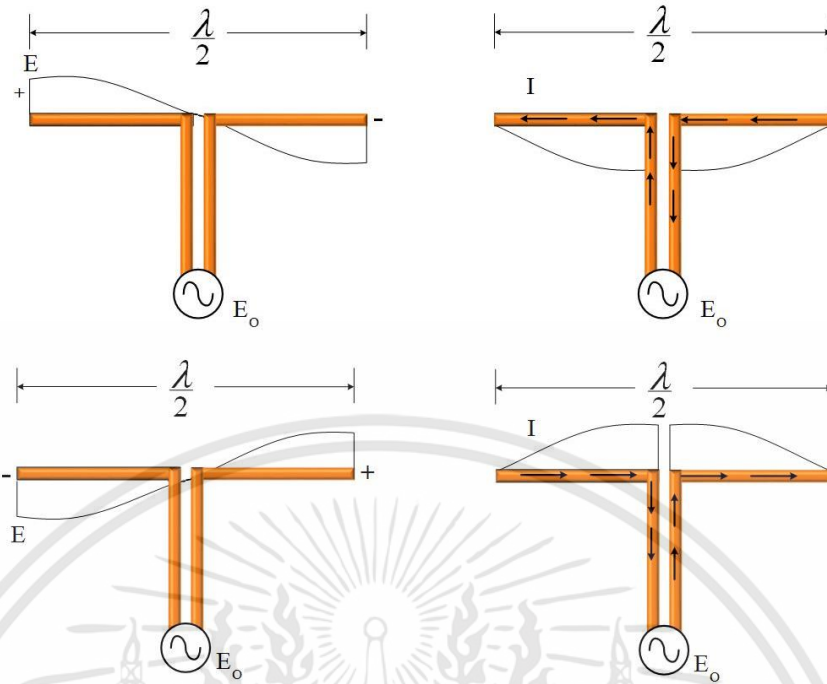
รูปที่ 2.1 สายอากาศไดโพล

สายอากาศไดโพลแบบ half-wavelength เป็นการป้อนกระแสที่จุดกึ่งกลาง กระแสของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจะไหลไปยังส่วนที่แพร่กระจายคลื่นส่วนที่หนึ่งของไดโพลและไหลกลับมายังส่วนแพร่กระจายคลื่นส่วนที่สองของไดโพล ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสไปยังส่วนแพร่กระจายคลื่นส่วนที่หนึ่ง



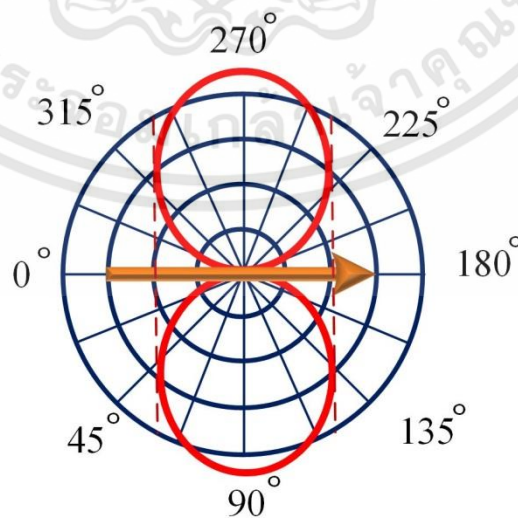
รูปที่ 2.2 จุดป้อนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ค่ากระแสและแรงดันบนสายอากาศไดโพลแบบ half-wavelength

จากรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 แสดงค่ากระแสและแรงดันบนสายอากาศไดโพลแบบ half-wavelength ตำแหน่งที่ป้อนจะมีแรงดัน (E) ต่ำสุด และมีกระแสไฟฟ้า (I) สูงสุด ตำแหน่งที่ป้อนกระแสไฟฟ้าจะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับสายนำสัญญาณ (Transmission line) เพื่อให้เกิดการส่งผ่านพลังงานได้ดีที่สุด (Maximum power transfer) ในกรณีที่สายนำสัญญาณมีค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกัน (Mismatch) พลังงานที่ส่งไปที่เครื่องส่งส่วนหนึ่งจะย้อนกลับมาเข้าเครื่องส่ง ซึ่งเรียกค่านี้ว่า คลื่นนิ่ง (Standing wave) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบ half-wavelength กรณีวางสายอากาศในแนวนอน แสดงในรูปที่ 2.4



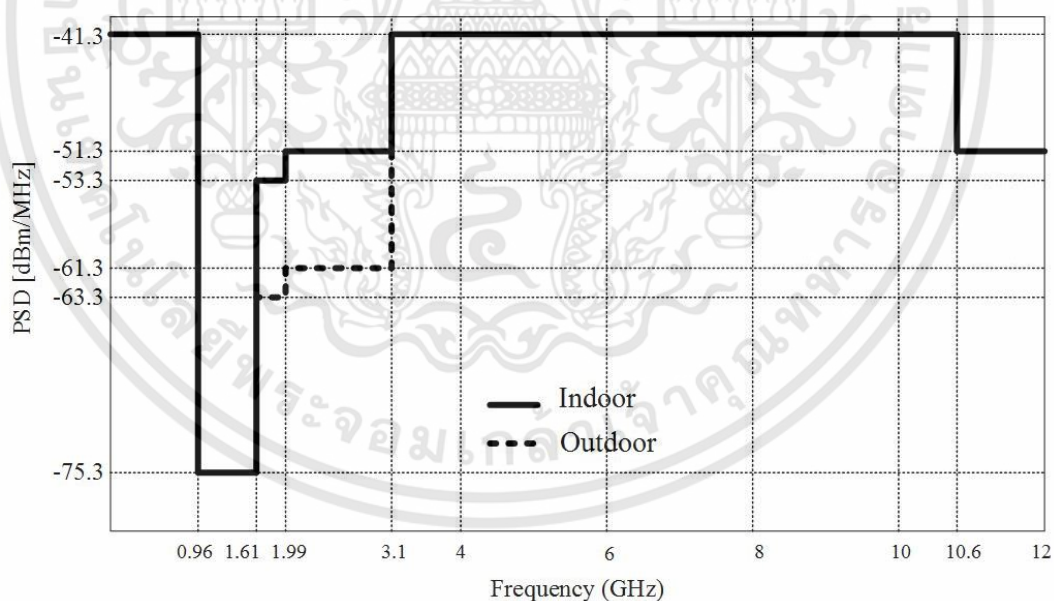
รูปที่ 2.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.4 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบ half-wavelength เป็นการแพร่กระจายคลื่นออกเป็นสองส่วน หรือเป็นสายอากาศแบบสองทิศทาง (Bi-directional) คลื่นจะแพร่กระจายออกทางด้านข้างของตัวนำ ทางด้านส่วนหัวและด้านส่วนหางจะไม่มีการแพร่กระจายคลื่นหรือถ้ามีการแพร่กระจายคลื่นก็จะน้อยมาก ในทางกลับกันหากวงสายอากาศในแนวตั้งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะออกมาในลักษณะคล้ายกับขนมโดนัท (doughnut) ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองแบบเป็นการแพร่กระจายคลื่นในสูญญากาศ หากใช้งานจริงอาจทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นผิดเพี้ยนไป

2.2.2 เทคโนโลยี UWB

เทคโนโลยี UWB เป็นเทคโนโลยีที่เป็นข้อกำหนดขององค์การกิจการโทรคมนาคม (Federal Communications Commission: FCC) ซึ่งเป็นหน่วยงานของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดความถี่ในช่วง 3.1 -10.6 GHz และมีแถบความถี่ในการส่งสัญญาณมากกว่า 500 MHz หรือมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ของค่าความถี่กลาง มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังในการส่งสัญญาณแต่ละแถบความถี่ไม่เกิน 41.3 dBm มีผลบังคับใช้เฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกาเท่านั้น และในระหว่างปี ค.ศ. 2002 ถึง ค.ศ. 2007 ได้มีการกำหนดกรอบการใช้เทคโนโลยี UWB ในยุโรปและเอเชียบางส่วน ซึ่งข้อกำหนดที่ได้รับความสนใจได้แก่ ด้านการกำหนดค่ามาตรฐานการแพร่กระจายกำลังงาน (Spectral mask) และองค์ประกอบอื่นของระบบเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทับซ้อนหรือไปรบกวนสัญญาณของระบบสื่อสารเดิมที่สัมปทานไปแล้ว

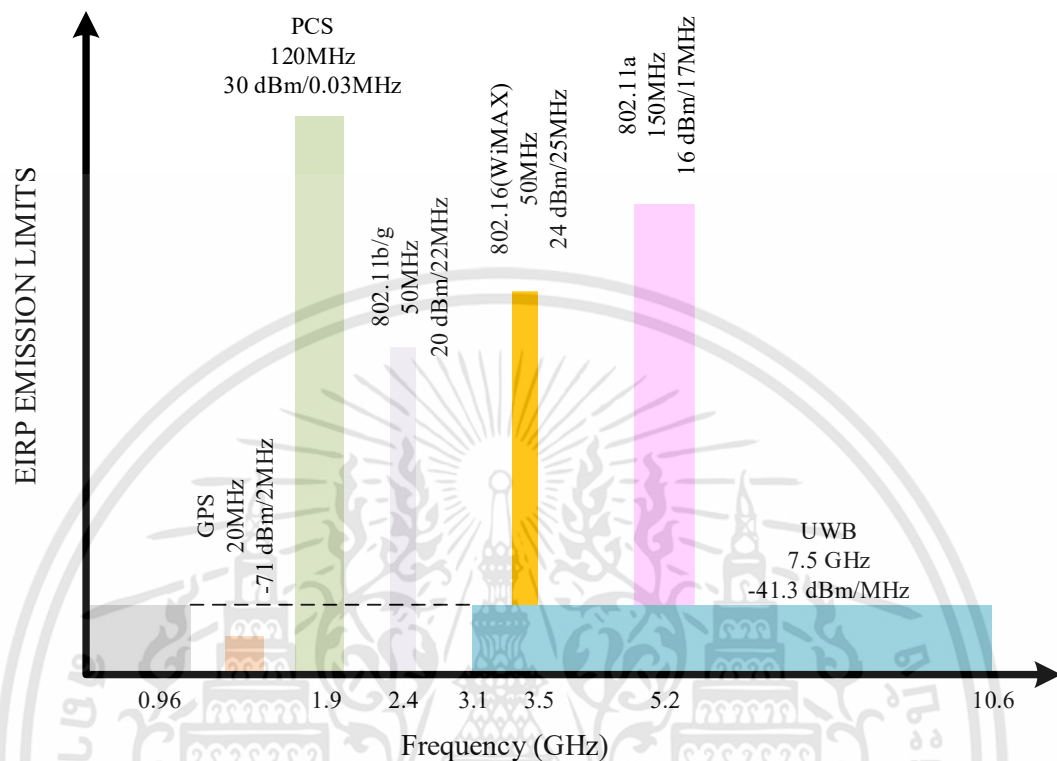


รูปที่ 2.5 ค่าการแพร่กระจายกำลังงาน UWB ของ FCC สำหรับสัญญาณภายในและภายนอกอาคาร

ด้วยระบบเทคโนโลยี UWB มีกำลังงานในการส่งข้อมูลต่ำ ดังนั้นสัญญาณ UWB จึงถูกมองว่าเป็นสัญญาณที่ไปรบกวนในระบบสื่อสารแถบความถี่แคบที่มีกำลังส่งสัญญาณสูง จากรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นว่า ระบบสื่อสารไร้สาย (wireless Local Area Network: WLAN) ตามมาตรฐาน IEEE 802.11a มีการใช้งานย่านความถี่ร่วมกับระบบ UWB มากที่สุด

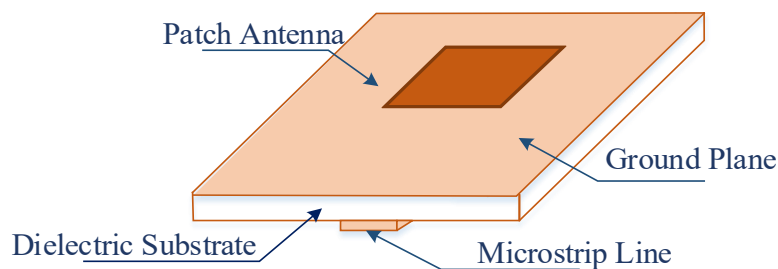


รูปที่ 2.6 ย่านความถี่การใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สาย

2.2.3 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna)

2.2.3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการด้วยกันคือ เป็นสายอากาศขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก สามารถใช้งานได้ทั้งบนผิวที่เป็นระนาบ (Planar) และไม่ใช่นระนาบ (Non-Planar) สร้างง่ายและสามารถนำไปใช้งานร่วมกับวงจรรีเลย์หรือทรานซิสเตอร์ซึ่งเป็นที่ยอมรับของนักวิจัยเพื่อออกแบบและนำมาพัฒนา สายอากาศไมโครสตริปถูกนำไปใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน 3 ส่วนคือ แผ่นตัวนำ ซึ่งแผ่นตัวนำอาจเป็นแบบแผ่น (Patch) หรือทำการเจาะให้เป็นช่อง (slot) ชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate) ระนาบกราวด์ (Ground plane) และสายนำสัญญาณสัญญาณ (Transmission line) โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.7 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสายอากาศแบบไมโครสตริป

ข้อดี	ข้อด้อย
1. ขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา	1. แบนด์วิดท์แคบ (Narrow band)
2. สามารถดัดแปลงรูปร่างให้เกิดความสมดุล	2. มีการสูญเสียมาก มีผลต่ออัตราขยาย (gain) ต่ำ
3. สร้างง่าย และราคาถูก	3. ส่วนใหญ่มีการแพร่กระจายคลื่นเพียงครึ่ง ระบาย
4. ใช้กับวัสดุแบบบางได้	4. มีอัตราขยายสูงสุด ไม่เกิน 20 dB
5. สามารถดัดแปลงใช้ในการนำวิถีจรวดหรือ ดาวเทียมได้	
6. การแพร่กระจายคลื่นได้ทั้งแบบเส้นตรงและวงกลม	
7. อื่นๆ	

2.2.3.2 แผ่นตัวนำสายอากาศ (Conductor)

แผ่นตัวนำสายอากาศเป็นแผ่นโลหะแบบบางทำจากทองแดง ทองคำ หรือ อลูมิเนียม สามารถยึดติดกับผิวของชั้นวัสดุฐานรองทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงาน ทนต่อสภาวะแวดล้อมและมีค่าความต้านทานต่ำ แผ่นตัวนำสามารถนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศให้มีความหลากหลาย เช่น สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม วงรี เป็นต้น วัสดุที่ใช้ทำแผ่นตัวนำสายอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ และความซับซ้อนในการผลิต นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของสายอากาศแบบแผ่นตัวนำยังเป็นปัจจัยสำคัญต่อการกำหนดความถี่ใช้งาน รูปแบบการแผ่พลังงาน และอิมพีแดนซ์ขาเข้า ทั้งยังขึ้นกับการออกแบบสายอากาศให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ

2.2.3.3 วัสดุฐานรอง (Dielectric)

วัสดุฐานรองของสายอากาศเป็นวัสดุที่นำมาใช้เป็นฐานรองของแผ่นตัวนำ ชนิดและขนาดของวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบสายอากาศ และเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริป การแผ่พลังงานของสายอากาศจะลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความหนาของชั้นวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ การแผ่พลังงานของสายอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นจนกว่าความหนาของชั้นวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานรองต่อความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.05 (1 ต่อ 20) การแผ่พลังงานจะมีปริมาณลดลง การเลือกวัสดุเพื่อนำใช้เป็นวัสดุฐานรองนอกจากต้องคำนึงถึงสมบัติทางกลและทางเคมี ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง ความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ความเรียบของผิวซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดติดกับโลหะ และสามารถผลิตเป็นชั้นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศได้นอกจากนี้สมบัติทางไฟฟ้ายังเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกวัสดุ โดยมีค่าปัจจัยที่ต้องคำนึงดังต่อไปนี้

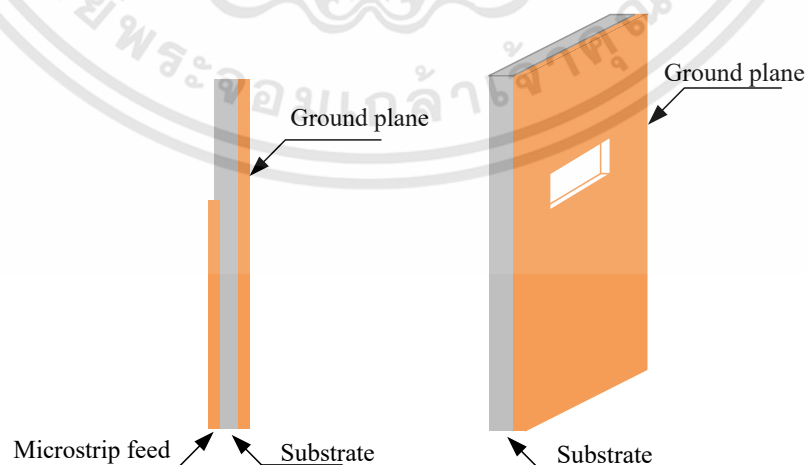
- ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Dielectric Constants: ϵ_r) วัสดุที่ใช้ควรเป็นวัสดุเนื้อเดียวเพื่อให้ค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกบ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริก โดยเทียบกับอากาศ ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ควรมีค่าต่ำ เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพที่ดีและมีความผิดพลาดน้อย

- ค่า Loss tangent ($\tan \delta$) คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสแอสพิลเพลซเมนต์ โดยเมื่อนำสารไดอิเล็กตริกไปคั่นกลางระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งค่านี้แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสมากน้อยเพียงใด โดยค่านี้ควรมีค่าที่ต่ำ เพื่อลดพลังงานการสูญเสียเนื่องจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริกทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศสูงขึ้น

- ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal Conductivity) แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใดซึ่งค่านี้ยิ่งสูงก็ยิ่งดี

2.2.3.4 ระนาบกราวด์ (Ground Plane)

ระนาบกราวด์เป็นแผ่นโลหะขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำสายอากาศ โดยส่วนใหญ่ทำจากโลหะชนิดเดียวกันกับแผ่นตัวนำสายอากาศ โดยขนาดของระนาบกราวด์ส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น เนื่องจากคลื่นเลี้ยวเบนที่บริเวณขอบของระนาบกราวด์ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศอีกด้วย เนื่องจากการวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่มีการตั้งสมมติฐานว่าแผ่นระนาบกราวด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำสายอากาศมาก ๆ จนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์ โดยขนาดที่จำกัดของระนาบกราวด์มีผลต่อลำคลื่นหลัก (Main Lobe) น้อยมาก แต่จะทำให้เกิดลำคลื่นด้านหลังของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระนาบกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

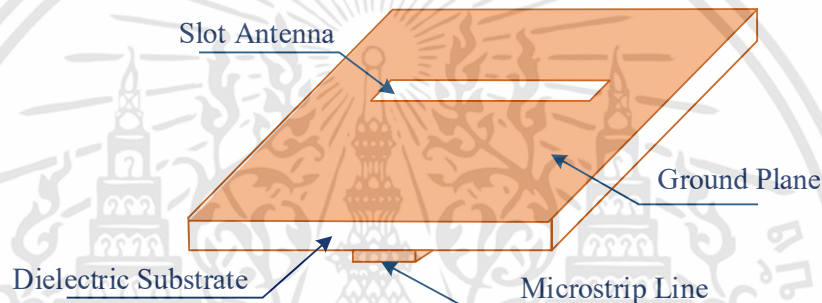
2.2.3.5 สายนำสัญญาณ (Transmission Line)

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ใช้สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป หรือไมโครสตริปไลน์ เพื่อการออกแบบสายอากาศด้วยเป็นสายที่ได้รับความนิยมนำมาใช้กับความถี่ในย่านไมโครเวฟ

2.2.4 สายอากาศไมโครสตริปแบบร่อง

2.2.4.1 โครงสร้างของสายอากาศ

ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบร่องประกอบด้วย สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป และสายอากาศแบบร่องวางตั้งฉากกับไมโครสตริป โดยร่องอยู่บนระนาบกราวด์ มีวัสดุฐานรองเป็นตัวกั้นกลางระหว่างสัญญาณแบบไมโครสตริป กับสายอากาศแบบร่อง แสดงดัง รูปที่ 2.9

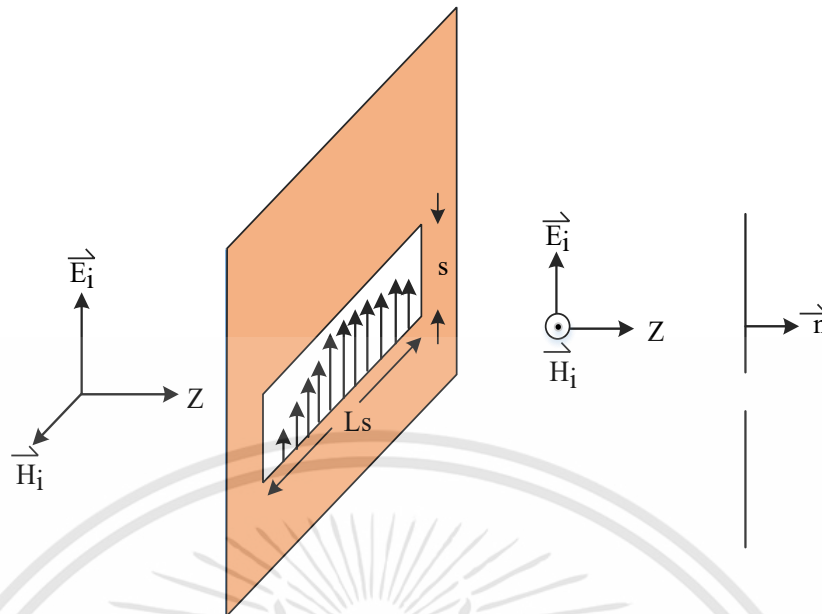


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบร่อง

2.2.4.2 การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศร่อง

การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศแบบร่อง เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะแผ่นตัวนำสมบูรณ์แบบร่องแคบ โดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศตั้งฉากกับแนวของร่อง เห็นได้ว่าตรงร่องจะมีสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงมากเกิดขึ้น ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นออกไปยังบริเวณที่อยู่ก้นด้านหนึ่งในกรณีที่ร่องแคบมาก ๆ กระแสไฟฟ้าสมมูลคือ $\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}'$ จะมีขนาดจำกัด และเมื่อคิดว่าความกว้างของร่องซึ่งอ้างอิงจากรูปคือ S เข้าหาศูนย์ กระแสไฟฟ้าสมมูลส่วนนี้ สามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากมีขนาดเล็ก แต่ส่วนที่เป็นกระแสแม่เหล็กสมมูลคือ $\vec{M} = -\vec{n} \times \vec{E}'$ นั้นไม่สามารถตัดทิ้งได้ เพราะเมื่อ S เข้าหาศูนย์สนามแม่เหล็กที่ร่องก็จะเข้าหานั้นตั้งจึงไม่สามารถตัดทิ้งได้

ถ้าให้ E_s เป็นสนามไฟฟ้าที่ร่อง และร่องยาว L_s เนื่องจากปลายทั้งสองของร่องสนามไฟฟ้าต้องเป็นศูนย์ ดังนั้นการกระจายของสนามไฟฟ้าบนร่องจะเขียนได้ดังรูปที่ 2.4 กระแสแม่เหล็กสมมูลที่เกิดขึ้นนี้เนื่องจากแผ่นตัวนำมีความหนาจำกัด จะเกิดขึ้นที่ทางด้านหน้าและด้านหลังโดยมีขนาดเท่ากัน



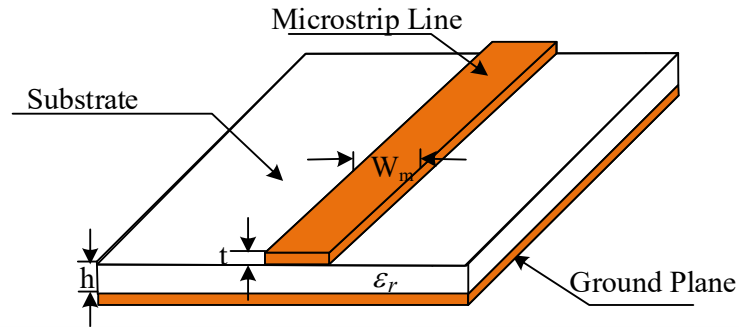
รูปที่ 2.10 การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศไมโครสตริปแบบร่อง

2.2.4.3 รูปแบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปแบบร่อง

สายนำสัญญาณทำหน้าที่ในการจ่ายกำลังงานความถี่วิทยุ (RF Power) ให้แก่สายอากาศไมโครสตริป สายนำสัญญาณเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของสายอากาศ โดยเฉพาะสายอากาศไมโครสตริป อันเนื่องจากการจัดวางสายนำสัญญาณพลังงานที่สูญเสียไปในสายนำสัญญาณ การผิดเพี้ยนของกระแสจากภาคส่งและการสูญเสียร่วมระหว่างสายนำสัญญาณกับแผ่นตัวนำ สาเหตุเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติของสายอากาศไม่ว่าจะเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โพลาริเซชัน และประสิทธิภาพของสายอากาศ

2.2.5 โครงสร้างพื้นฐานของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

สายนำสัญญาณไมโครสตริปนิยมนำมาใช้กับความถี่ในย่านไมโครเวฟ เนื่องจากง่ายต่อการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์และการสร้าง โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปมีรูปร่างเป็นแถบตัวนำแคบ ๆ วางอยู่บนชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate) ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของวัสดุฐานรองเป็นระนาบกราวด์ (Ground plane) เป็นโลหะ แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.11 พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองในบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำแคบ ๆ กับผิวโลหะของระนาบกราวด์ด้านล่าง การที่แถบตัวนำของสายนำสัญญาณไมโครสตริปมีด้านบนสัมผัสกับอากาศและด้านล่างสัมผัสกับสารไดอิเล็กตริก ทำให้การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกแยกไปในอากาศส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือผ่านไปในสารไดอิเล็กตริก แถบตัวนำสายนำสัญญาณมีความกว้าง (w) ความหนา (t) ถูกวางบนวัสดุฐานรองโดยที่ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ต้องการ ความหนาของตัวนำบนวัสดุมีค่าประมาณ 0.017 มิลลิเมตร



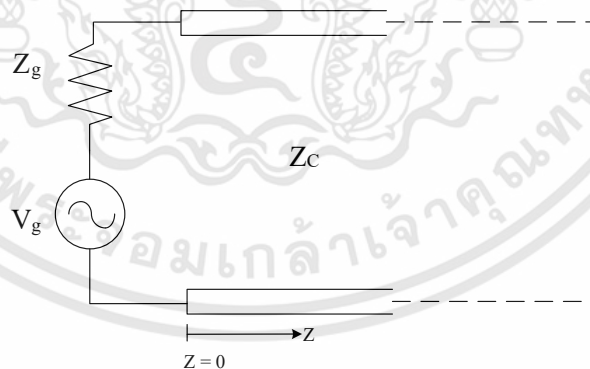
รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางกายภาพของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

2.2.5.1 ลักษณะคลื่นบนสายนำสัญญาณไมโครสตริป

กล่าวถึงการส่งผ่านของคลื่นจากแหล่งกำเนิดสัญญาณต้นทางไปตามสายนำสัญญาณ ในกรณีสายยาวเป็นอนันต์ กรณีที่สายมีความยาวจำกัดและมีโหลดต่ออยู่ ซึ่งเป็นกรณีที่มีคลื่นสะท้อนเกิดขึ้น รวมทั้งการเกิดคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ

2.2.5.1.1 คลื่นจร (Traveling Wave)

สายส่งหรือสายนำสัญญาณที่มีความยาวเป็นอนันต์และถูกป้อนด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณ V_g ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ภายในเป็น Z_g ดังในรูปที่ 2.12 การที่สายยาวอนันต์ หมายถึง $Z = \infty$ การส่งผ่านคลื่นไปในทิศทาง $+Z$ ถือว่าเป็นทิศทางปกติหรือมีการส่งผ่านไปด้านหน้า คลื่นที่ส่งผ่านไปในทิศทาง $-Z$ ถือว่าเป็นคลื่นสะท้อน ในกรณีที่สายนำสัญญาณยาวอนันต์และคลื่นที่ถูกป้อนจากต้นทางสามารถส่งผ่านไปในทิศทาง $+Z$ ตามโครงสร้างของสายนำสัญญาณโดยไม่มีการสะท้อนหรือสะท้อนกลับ คลื่นที่ส่งผ่านในสภาพนี้เรียกว่าคลื่นจร (Traveling Wave)

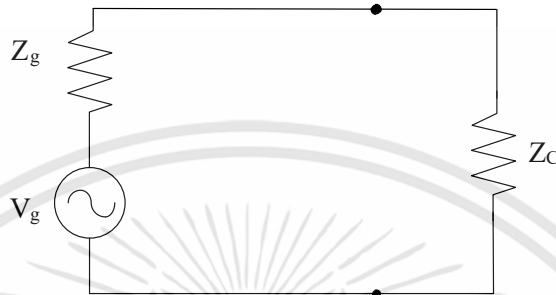


รูปที่ 2.12 สายนำสัญญาณมีความยาวเป็นอนันต์

การคำนวณหาค่าขนาดของคลื่นจรสามารถใช่วงจรสมมูลในรูปที่ 2.13 ประกอบและคิดในรูปของเฟสเซอร์ของสัญญาณตามรูปเนื่องจากที่ตำแหน่ง $Z = 0$ อิมพีแดนซ์ที่มองเข้าไปทางสายนำสัญญาณเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณคือ Z_c ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนมี

อิมพีแดนซ์ Z_c มาต่ออยู่ดังวงจรสมมูลตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 จากวงจรสมมูลนี้สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม Z_c ได้ดังนี้

$$V_i = \frac{Z_c}{Z_g + Z_c} V_g \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของรูปที่ 2.12

ผลที่ได้ตามสมการเป็นขนาดของคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่ง $Z = 0$ ซึ่งส่งผ่านไปตามสายนำสัญญาณ เนื่องจากตามหลักการของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่า Z_g และ Z_c ต้องมีความสัมพันธ์กันในรูปที่ 2.7 ตัวแปร Z_g มีค่าเท่ากับ Z_c แต่เนื่องจาก Z_c เป็นค่าจริง ดังนั้น Z_g เป็นค่าจริงและมีค่าเท่ากับ Z_c ซึ่งในภาคปฏิบัติต้องสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณหรือเครื่องส่งให้มีอิมพีแดนซ์ภายในเท่ากับค่า Z_c ตัวอย่างเช่น หากนำไปใช้กับสายโคแอกเซียลที่มีอิมพีแดนซ์แบบ 50 โอห์ม อิมพีแดนซ์ภายในของเครื่องกำเนิดสัญญาณก็ต้องเท่ากับ 50 โอห์มด้วย เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้เรียกว่ามีการแมทช์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ที่ต้นทางและขนาดของแรงดันต้นทางมีค่าเป็นดังนี้

$$V_i = \frac{V_g}{2} \quad (2.2)$$

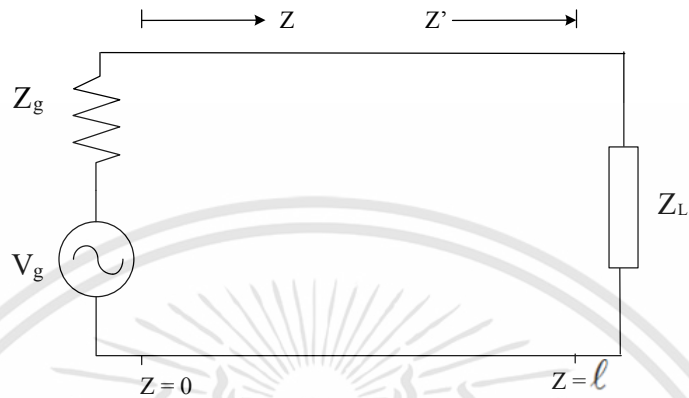
2.2.5.1.2 การสะท้อนของคลื่น

กรณีที่สายนำสัญญาณไม่ได้ยาวอนันต์หรือมีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะไม่สม่ำเสมอตามแนวแกน Z ดังนั้นคลื่นจรที่ส่งผ่านไปจะได้รับผลกระทบจากสภาพนั้น ๆ เช่น ถ้าสายนำสัญญาณมีความยาวจำกัดโดยที่ปลายสายต่อไว้ด้วยโหลดที่มีค่าเป็น Z_L ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ผลที่ได้คือกำลังงานจะถูกแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมาตามสาย อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่โหลดกลายเป็นความร้อน ในส่วนกำลังงานจะมีปริมาณมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ (Voltage reflection coefficient)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ
 V_r คือ แรงดันสะท้อนกลับ
 V_i คือ แรงดันตกกระทบ



รูปที่ 2.14 สายนำสัญญาณที่ต่อโหลดไว้ที่ปลายสาย

จากสมการที่ (2.3) หากสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับมีค่าเป็นบวก แสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน (in phase) แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบแสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกันข้าม (out of phase) การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของคลื่นแรงดันสะท้อนกลับหาได้ ดังนี้

$$\% \text{ แรงดันสะท้อนกลับ} = \Gamma \times 100 \quad (2.4)$$

กำลังงานหาได้จากแรงดันยกกำลังสองหารด้วยอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_c

$$P = \frac{V^2}{Z_c} \quad (2.5)$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์กำลังงานสะท้อนกลับ (Power reflection coefficient) จะมีค่าเท่ากับกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ

$$\Gamma^2 = \frac{P_r}{P_i} \quad (2.6)$$

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ
 P_r คือ กำลังงานสะท้อนกลับ
 P_i คือ กำลังงานตกกระทบ

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% \text{ แรงแดันสะท้อนกลับ} = \Gamma^2 \times 100 \quad (2.7)$$

นอกจากนี้สัมประสิทธิ์แรงแดันสะท้อนกลับยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างและผลรวมระหว่างโหนดกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (2.8)$$

2.2.5.1.3 คลื่นนิ่ง (Standing Wave)

กรณีปลายสายนำสัญญาณต่อไว้ด้วยโหลดทั่วไปที่ไม่ใช่แมทซ์ซึ่ง โหลด สัญญาณคลื่นส่วนหนึ่งถูกดูดกลืนหรือสั้นเปลืองที่โหลดคือตัวต้านทาน อีกส่วนหนึ่งที่เหลือจะสะท้อนกลับไปตามสาย และเนื่องจากค่าแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับแปรเปลี่ยนตามเวลา คลื่นรวมหรือคลื่นผลลัพธ์ได้มาจากการรวมแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า คลื่นนิ่ง

คลื่นนิ่งเกิดจากการรวมหรือบวกกันของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับ โดยมีจุดโหนดอยู่กับที่ระหว่างจุดโหนดทั้งหลาย ลูกคลื่นจะเปลี่ยนขึ้นไปถึงจุดสูงสุดและลดลงจนถึงจุดต่ำสุดและคลื่นนิ่งจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ความถี่ของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับมีค่าเท่ากันเท่านั้น

ค่าแรงแดันสูงสุด V_{\max} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกัน

$$V_{\max}(V) = V_i + V_r \quad (2.9)$$

ค่าแรงแดันต่ำสุด V_{\min} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงข้ามกัน

$$V_{\min}(V) = V_i - V_r \quad (2.10)$$

อัตราส่วนของแรงแดันสูงสุดต่อแรงแดันต่ำเรียกว่า อัตราส่วนแรงแดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR)

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (2.11)$$

อัตราส่วนแรงแดันคลื่นนิ่ง หรือ VSWR แสดงในหน่วย dB จะมีชื่อเรียกว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR)

$$SWR (dB) = 20 \log VSWR \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง VSWR และสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับของแรงดัน โดยจะเริ่มคำนวณจากสมการที่ (2.11) แทนค่าด้วยสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r} \quad (2.13)$$

ทำการหารเศษและส่วนด้วย V_i และแทนค่าด้วยสมการที่ (2.3) จะได้เป็น

$$VSWR = \frac{1 + V_r/V_i}{1 - V_r/V_i} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.14)$$

ดังนั้นจะได้ค่า Γ เป็น

$$\Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (2.15)$$

2.2.5.1.4 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเป็นการแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหลด เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณและสายอากาศไม่แมทซ์กัน ค่าการสูญเสียย้อนกลับเป็นการแสดงการแมทซ์กันระหว่างสายนำสัญญาณกับสายอากาศ โดยค่าการสูญเสียย้อนกลับสามารถหาได้จากสมการที่ 2.16

$$S_{11} = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (\text{dB}) \quad (2.16)$$

การแมทซ์กันที่สมบูรณ์ระหว่างสายนำสัญญาณและสายอากาศ เมื่อ $\Gamma = 0$ ค่าการสูญเสียย้อนกลับจะเป็นค่าอนันต์ ซึ่งแสดงว่าไม่มีกำลังงานที่สะท้อนกลับ ในทำนองเดียวกันเมื่อ $\Gamma = 1$ ค่าการสูญเสียย้อนกลับจะเป็น 0 dB แสดงว่ากำลังงานสะท้อนกลับหมด สำหรับการนำไปใช้งานที่แสดงถึงประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้นั้น VSWR ไม่ควรมีค่าเกิน 2 ซึ่งที่ตำแหน่งนี้ค่าของ การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) จะมีค่า -9.54 dB โดยประมาณ

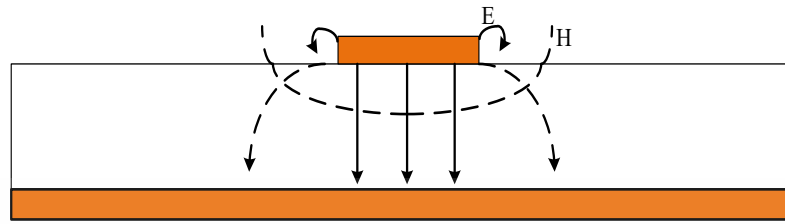
2.2.5.1.5 การส่งผ่านคลื่นในสายไมโครสตริป

การส่งผ่านคลื่นในสายไมโครสตริปนั้นจะใกล้เคียงกับโหมด TEM แต่จะไม่ใช้โหมด TEM เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วย จึงนิยมเรียกโหมดดังกล่าวว่า โหมดกึ่ง TEM (quasi-TEM mode) รูปที่ 2.9 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ในระนาบตามขวางของสายไมโครสตริป การที่มีสนามในแนวแกนอยู่นั้นเป็นเพราะโครงสร้างที่มีสารไดอิเล็กตริก และอากาศอยู่ในระนาบเดียวกัน และในสภาพที่มีสนามในแนวแกนเกิดขึ้นนี้ โหมดที่ส่งผ่านอยู่นั้นก็จะเป็นไฮบริดโหมด

การที่คลื่นส่งผ่านในโหมดกึ่ง TEM ซึ่งพออนุโลมให้เป็นโหมด TEM นี้ ทำให้สามารถใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของไมโครสตริปได้ โดยวิธีการหาค่าคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

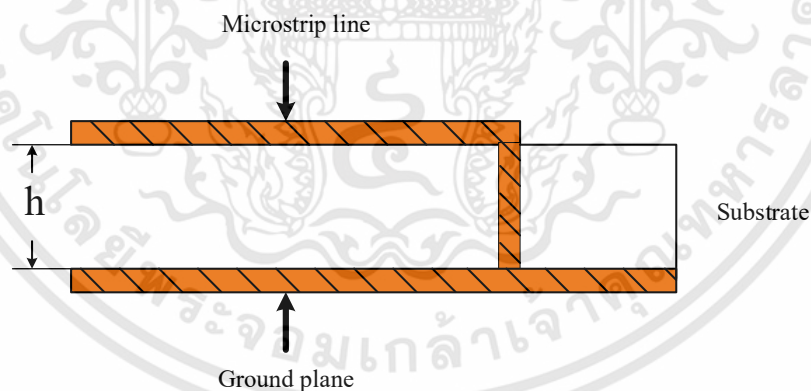
ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant: ϵ_{eff}) ของระบบ ซึ่งจะรวมผลของสารไดอิเล็กทริก และอากาศเข้าด้วยกัน



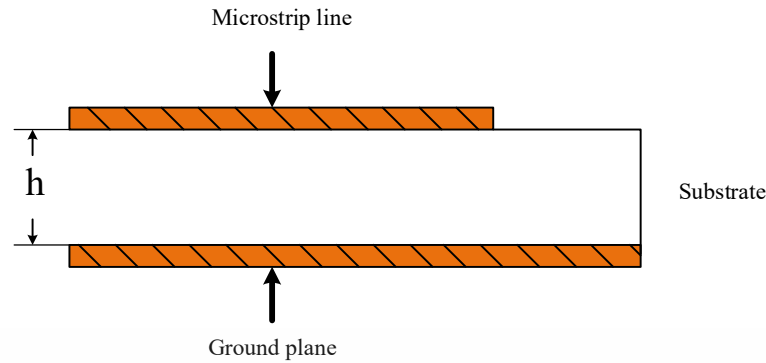
รูปที่ 2.15 เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบตามขวางของสายไมโครสตริป

2.2.6 ลักษณะการส่งผ่านคลื่นสัญญาณของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

โครงสร้างของสายอากาศร่องที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณสัญญาณไมโครสตริปประกอบด้วยสายอากาศแบบร่องที่อยู่บนแผ่นตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์และสายไมโครสตริปที่อยู่บนระนาบตรงกันข้าม สำหรับลักษณะการส่งผ่านคลื่นสัญญาณนี้จะมีหลักการรูปแบบพื้นฐานอยู่ 2 รูปแบบ คือ การต่อแบบปิดวงจร (Microstrip Terminated Short Circuit) ซึ่งการต่อแบบปิดวงจรนี้จะไม่นิยมนำมาออกแบบเนื่องจากมีรูปแบบที่ยากต่อการนำไปสร้างในเทคโนโลยีวงจรรพิมพ์ ดังรูปที่ 2.16 (ก) และการต่อแบบเปิดวงจร (Microstrip Terminated Open Circuit) แสดงดังรูปที่ 2.16 (ข) ซึ่งความยาวที่เหมาะสมของสายไมโครสตริปในกรณีนี้ จะมีความยาวประมาณเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น



(ก) การต่อแบบปิดวงจร



(ข) การต่อแบบเปิดวงจร

รูปที่ 2.16 สายอากาศร่องที่ป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปแบบร่องที่ป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Fed Slot Antenna) ตามรูปที่ 2.16 (ข) นั้น จะมีการจัดวางสายอากาศร่องให้อยู่ตรงกลางระหว่างด้านซ้ายและขวาบนระนาบกราวด์ และวางตำแหน่งของสายนำสัญญาณไมโครสตริปไว้บนระนาบตรงข้ามบริเวณกึ่งกลางกับร่อง โดยมีการป้อนสัญญาณเข้าที่ปลายของสายนำสัญญาณไมโครสตริป การจัดวางในลักษณะแบบนี้ทำให้เกิดความต้านทานในการแพร่กระจายสูง ดังนั้นจึงได้มีการทำวิจัยเพื่อให้มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดี โดยวิธีพื้นฐานที่สำคัญในการทำแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีอยู่หลายวิธีดังนี้

1. วิธีการปรับความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริป ความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปนั้นมีผลโดยตรงกับการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ใช้งาน ดังนั้นในการออกแบบควรให้ความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปยาวประมาณเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นสัมพันธ์ โดยอาจจะมากหรือน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสายอากาศด้วย
2. วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของร่องออกจากจุดกึ่งกลางของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

2.2.7 การออกแบบสายนำสัญญาณและสายอากาศไมโครสตริป

สายนำสัญญาณไมโครสตริปที่นำมาใช้นั้นอยู่ในรูปแบบแบบเปิดวงจร โดยมีลักษณะเป็นแถบโลหะแคบ (แผ่นโลหะยาว) ความกว้างของแถบโลหะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่ต้องการออกแบบเพื่อให้แมตช์กับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณที่จะนำมาต่อเข้าที่ปลายสายนำสัญญาณไมโครสตริป ส่วนความยาวเป็นตัวช่วยในการปรับแต่งให้มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเกิดน้อยที่สุด ถ้ากำหนดให้ W_m เป็นความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป h เป็นความสูงของวัสดุฐานรอง (Substrate) ที่มีความหนาของชั้นโลหะน้อยมาก และ Z_0 เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียล สมการในการคำนวณหาค่าความกว้าง W_m มีดังนี้

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[\frac{W_m}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_m}{h} + 1.4440 \right) \right]} \quad (2.17)$$

จะได้

$$W_m = \frac{7.48 \times h}{e^{\frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_r + 1.41}}{87}}} - 1.25 \times t \quad (2.18)$$

การคำนวณขนาดของสายอากาศและขนาดของกราวด์มีความสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ตามสมการดังนี้

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (2.19)$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$\Delta L = (0.412) \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W_m}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W_m}{h} + 0.8 \right)} h \quad (2.21)$$

กรณี $\frac{W_m}{h} > 1$ จะได้

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

โดยที่

W_m คือ ความกว้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป

W คือ ความกว้างของสายอากาศ

L คือ ความยาวของสายอากาศ

c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective dielectric constant)

f_r คือ ความถี่ที่ต้องการออกแบบสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.8 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

พารามิเตอร์ของสายอากาศเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นสำหรับการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศ พารามิเตอร์บางตัวจะสัมพันธ์กันและในบางพารามิเตอร์ก็ต้องเจาะจงลงไปเพื่อเป็นการบอกถึงประสิทธิภาพของสายอากาศนั้น ในที่นี้กล่าวถึงเฉพาะพารามิเตอร์ที่จำเป็นที่ใช้ในการออกแบบและ วิเคราะห์สายอากาศที่ได้จัดทำในวิทยานิพนธ์นี้เท่านั้น

2.2.8.1 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance)

อิมพีแดนซ์ขาเข้า คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วต่อของสายอากาศ หรือก็คืออัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อกระแสของบริเวณขั้วต่อ หรืออีกนัยหนึ่งคืออัตราส่วนของส่วนประกอบที่เหมาะสมของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดนั้น ในที่นี้จะกำหนดให้อิมพีแดนซ์ขาเข้าที่ขั้วต่อสายอากาศเป็น $a - b$ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.17 และให้อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ไม่มีการต่อโหลดใดๆ ดังนั้นจะหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ ดังนี้

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.25)$$

โดยที่

Z_A = อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่บริเวณขั้วต่อ $a - b$ (ohms)

R_A = ความต้านทานของสายอากาศบริเวณขั้วต่อ $a - b$ (ohms)

X_A = ค่าความต้านทานเชิงจินตภาพบริเวณขั้วต่อ $a - b$ (ohms)

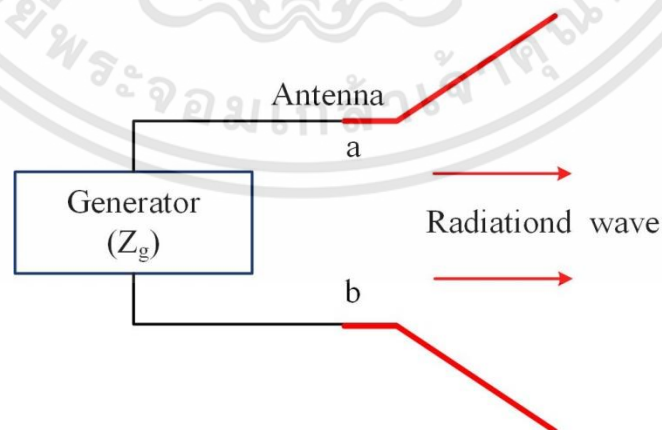
โดยทั่วไปค่าความต้านทานจาก (2.25) ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบดังนี้

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.26)$$

ขณะที่

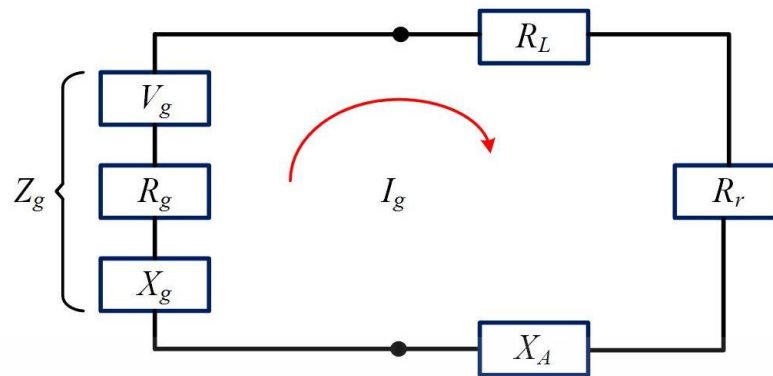
R_r คือ ค่าความต้านทานในการแผ่คลื่นออกไปของสายอากาศ

R_L คือ ค่าความต้านทานจากการสูญเสียของสายอากาศ



(ก) สายอากาศในรูปแบบการส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) วงจรสมมูลเทวินินของสายอากาศในรูปแบบการส่ง

รูปที่ 2.17 สายอากาศส่งและลักษณะวงจรเสมือน

2.2.8.2 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ อินพุตอิมพีแดนซ์ แบบรูป ปีมวิทท์ โพลาริเซชัน ระดับของไซด์โลบ อัตราขยาย ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ สำหรับสายอากาศแบนด์กว้าง มักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ ด้านสูงต่อความถี่ใช้งานด้านต่ำ ยกตัวอย่างเช่น แบนด์วิดท์ 10 : 1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานในด้านสูง มีค่ามากกว่าความถี่ใช้งานด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบนด์แคบ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น เช่น แบนด์วิดท์ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศเป็น 5% ของความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

$$BW(\%) = \frac{f_u - f_l}{f_0} \times 100 \quad (2.27)$$

เมื่อ BW คือ ค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศ
 f_u คือ ขอบเขตความถี่สูงของย่านความถี่
 f_l คือ ขอบเขตความถี่ต่ำของย่านความถี่
 f_0 คือ ความถี่กลางของย่านความถี่

เนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ ได้แก่ อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราขยาย รูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกล โพลาริเซชัน ฯลฯ ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงแต่อย่างเดียวได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่างไป ปกติแล้วคุณสมบัติของแพทเทิร์นกับอิมพีแดนซ์แบนด์กับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์จึงมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.8.3 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศนั้นเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากไดเรกทิวิตีโดยรวม ประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วยในขณะที่ไดเรกทิวิตีแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น การคิดค่าอัตราขยายของสายอากาศจะวัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิงโดยอัตราขยายของสายอากาศ คือกำลังของอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด เมื่อเทียบกับความเข้มสนามที่สูงสุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง หรืออาจแสดงในรูปของอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการส่งของสายอากาศทั้งสองเพื่อให้เกิดความเข้มของสนามขนาดเท่ากัน ณ จุดเดียวกันในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดหรืออัตราขยายของสายอากาศรับคืออัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพลขนาด $\lambda/2$ หรือแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศในปริมาณที่เท่ากัน

อัตราขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้นั้นมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากหัวต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่กำหนดทิศทางไว้ โดยทั่วไปแล้วจะคิดเพาเวอร์เกนในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด

$$Gain = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.28)$$

โดยทั่วไปแล้วอัตราขยายสัมพันธ์เป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่นๆ ซึ่งสามารถคำนวณอัตราขยายได้ง่าย หรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็น Isotropic point source ที่ไม่มีการสูญเสียดังนั้นจะได้สมการดังนี้

$$G_s = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.29)$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับ Isotropic point source ที่ไม่มีการสูญเสีย

กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_{in}) ดังสมการที่ (2.30)

$$P_{rad} = e_t P_{in} \quad (2.30)$$

เมื่อ e_t คือประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ทำให้สมการที่ (2.29) และ (2.30) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_g(\theta, \phi) = \frac{[4\pi U(\theta, \phi)]}{P_{rad}} \quad (2.31)$$

และมีความสัมพันธ์กับอัตราขยายไดเรกทิฟ คือ

$$G_g(\theta, \phi) = e_t D_g(\theta, \phi) \quad (2.32)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตี คือ

$$\begin{aligned} G_0 &= G_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} \\ &= e_t D_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} \\ &= e_t D_0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

ดังนั้นค่าประมาณของอัตราขยายจะมีค่าเป็น

$$G_0 \cong \frac{30,000}{\theta_{1d} \theta_{2d}} \quad (2.34)$$

ในทางปฏิบัติแล้วเมื่อก้าวถึงอัตราขยายจะหมายถึง อัตราขยายกำลังที่มีค่าสูงสุดแสดงดังนี้

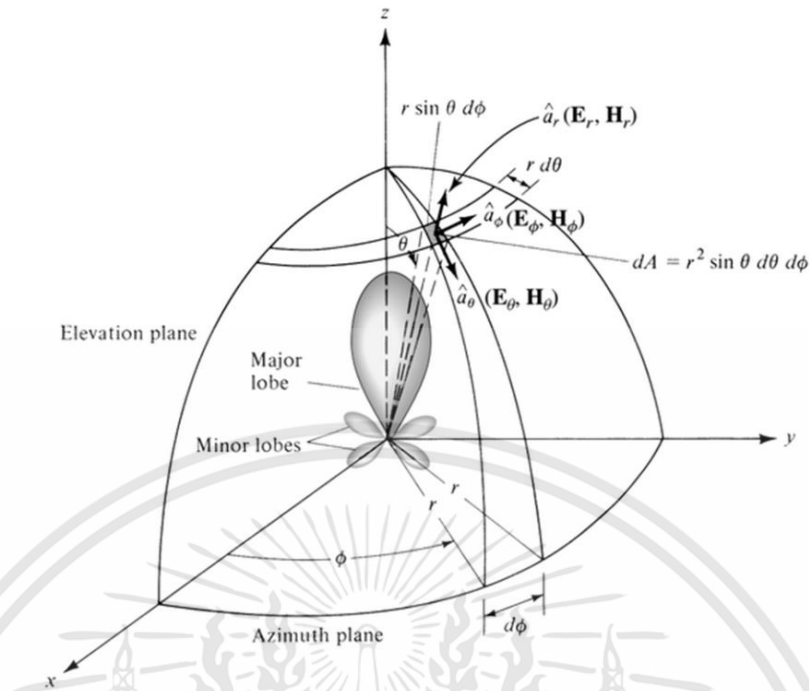
$$G_0(\text{dB}) = 10 \log_{10} [e_t D_0] \quad (2.35)$$

2.2.9 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดในอากาศ (Space Coordinate) โดยส่วนใหญ่แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นนี้มักจะพิจารณาในบริเวณสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือโพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงรูปแบบของพลังงานที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่มีรัศมีคงที่

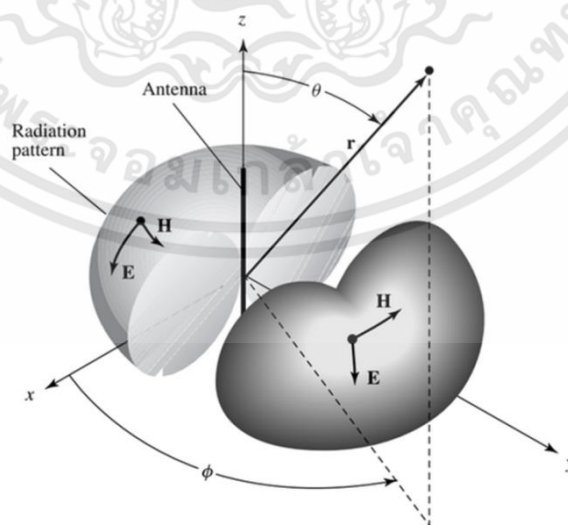
รูปที่ 2.18 แสดงระบบพิกัด ที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น สำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่มีชื่อเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่ เรียกว่าแบบรูปสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



รูปที่ 2.18 ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

2.2.9.1 แบบรูปแบบเตีบโตเท่ากันทุกทิศทาง(Isotropic) แบบระบุทิศทาง (Directional) และแบบรอบทิศทาง (Omni-directional)

ตัวแผ่กระจายคลื่น Isotropic คือสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทางด้วยความเข้มสนามเท่ากัน โดยจะเป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างจริงได้ แต่มักใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติแสดงทิศทางของสายอากาศ



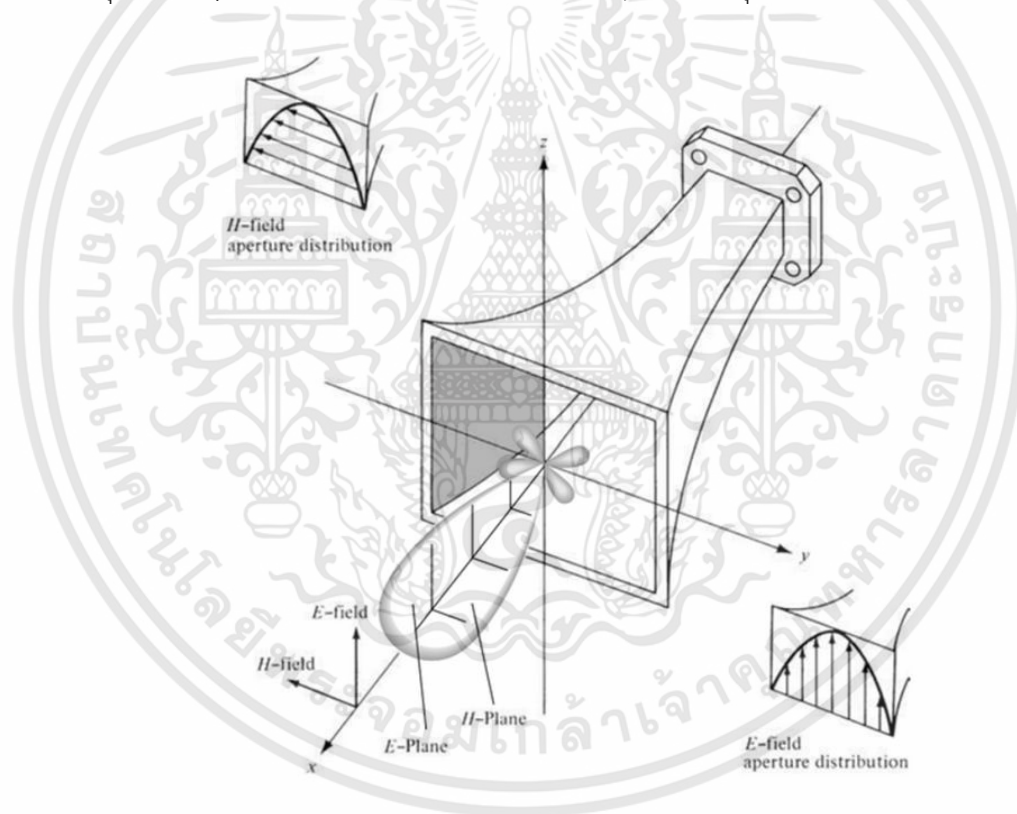
รูปที่ 2.19 แบบรูปของสายอากาศแบบรอบทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบรอบทิศทางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 ส่วนสายอากาศระบุทิศทาง คือสายอากาศที่มีทิศทางในการรับหรือส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในทิศทางที่กำหนดไว้เท่านั้น จากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายแบบนี้ไม่มีทิศทางในระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) [$f(\phi), \theta = \text{ค่าคงที่}$] แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบมุมยก (Elevation Plane) [$g(\theta), \phi = \text{ค่าคงที่}$]

2.2.9.2 แบบรูปหลัก (Principle Pattern)

โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแบบรูปหลัก (Principle Pattern) ของสนามไฟฟ้า (Electric Field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) สำหรับสายอากาศแบบโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarization) แบบรูปในระนาบ E เป็นระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปในระนาบ H จะเป็นระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปของการแผ่กระจายคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.14 โดยมีระนาบ xz (ระนาบมุมกวาด, $\phi = 0$) เป็นระนาบ E และมีระนาบ xy (ระนาบมุมยก, $\theta = \pi/2$) เป็นระนาบ H



รูปที่ 2.20 แบบรูปหลักสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร

2.2.9.3 บริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปแล้วมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (reactive-Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating-Near Field) และสนามระยะไกล ดังแสดงในรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

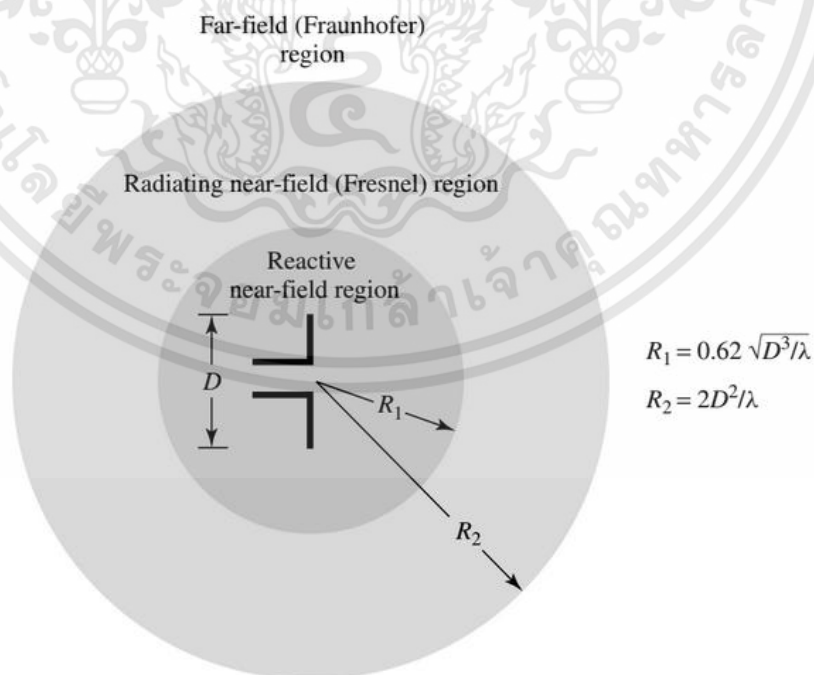
บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และเป็นสนามชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่เป็นการกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ ที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากสายอากาศ ถ้าขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นเมื่อเปรียบเทียบกับ สนามในบริเวณนี้อาจจะไม่เกิดขึ้น

ดังนั้นบริเวณขอบภายในของสนามนี้จะอยู่ที่ระยะทาง $R \geq 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ และขอบนอกอยู่ที่ระยะ $R < \frac{2D^2}{\lambda}$ โดยที่ D เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ นั่นคือ $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R < \frac{2D^2}{\lambda}$

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแผ่กระจายของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะห่างจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง $R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$ ห่างจากสายอากาศ ในบริเวณนี้

ส่วนประกอบสนามโดยพื้นฐานจะมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแผ่กระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ จะไม่ขึ้นอยู่กับระยะรัศมีที่วัดได้ ขอบในของบริเวณดังกล่าวจะกลายเป็นระยะรัศมี คือ $R = \frac{2D^2}{\lambda}$ และขอบนอกมีค่าเป็นอนันต์ ซึ่งบริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 บทสรุป

ในบทนี้ เป็นการนำเสนอทฤษฎีสายอากาศไคโพล ระบบความถี่กว้างยิ่ง (UWB) ไมโครสตริป สายอากาศไมโครสตริปร่องที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณสัญญาณไมโครสตริป พารามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญของสายอากาศ รวมทั้งการออกแบบสายนำสัญญาณสัญญาณไมโครสตริป ซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศร่องที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณสัญญาณไมโครสตริป สำหรับใช้งานย่าน UWB โดยเริ่มจากการออกแบบความถี่เรโซแนนซ์ ความกว้างของสายนำสัญญาณสัญญาณและการปรับปรุงการขยายแบนด์วิดท์ให้สามารถรองรับการสื่อสารย่าน UWB และใช้คุณสมบัติดังกล่าวไปในการปรับใช้ในการทำแบนด์นอตซ์ ซึ่งในรายละเอียดในการออกแบบสายอากาศจะกล่าวในบทถัดไป



บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital

3.1 บทนำ

การออกแบบสายอากาศส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างไดโพล และโมโนโพล (monopole) ที่มีรูปแบบแบบรอบทิศทาง ซึ่งระดับสัญญาณส่งและการรับสัญญาณมีความเหมือนกันทั่วสายอากาศ อย่างไรก็ตามโครงสร้างสายอากาศแบบนี้ได้รับการออกแบบและใช้สำหรับการใช้งานทั้งในร่มและกลางแจ้ง ตัวอย่างเช่นสายอากาศใน [3], [4] ได้รับการออกแบบโดยใช้โครงสร้างแบบโมโนโพลที่มีรูปแบบการแผ่พลังงานรอบทิศทางเพื่อใช้สำหรับระบบกระจายสัญญาณภายในอาคาร (MS-IDAS) นอกจากนี้ loop-loaded dipole ยังได้รับการพัฒนาให้เป็นสายอากาศแบบบรอดแบนด์สำหรับสัญญาณคุณภาพสูงและใช้สำหรับ MS-IDAS [5] อย่างไรก็ตามสายอากาศที่ออกแบบมาเหล่านี้มีข้อเสียของโครงสร้างที่ซับซ้อนมีขนาดใหญ่และมีอัตราการขยายที่ต่ำ

สำหรับการใช้งานบางตัวจำเป็นต้องใช้สายอากาศรับสัญญาณสูงโดยเฉพาะสถานีฐานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพอัตราการขยายของสายอากาศ โครงสร้างอาร์เรย์ส่วนใหญ่ใช้ แต่การใช้วัสดุที่เป็นเรื่องที่สำคัญมากที่จะต้องพิจารณา ดังนั้นสายอากาศแผ่นโลหะในอาคารใน [6], [7] ถูกนำเสนอสำหรับความเสถียรของรูปแบบการแผ่พลังงานและการเพิ่มอัตราการขยาย อย่างไรก็ตามอัตราการขยายของสายอากาศที่เสนอเหล่านี้ยังคงต่ำอยู่และโครงสร้างมีความซับซ้อนในการสร้างขึ้นงาน จากนั้นสายอากาศไดโพลแมกเนตริก (magnetolectric dipole) ได้ถูกออกแบบโดยใช้เครื่องสะท้อนแสงแบบโพรง (cavity-shaped reflector) เพื่อเพิ่มอัตราการขยายและแบนด์วิดท์ [8] แม้ว่าสายอากาศนี้จะมีค่าอัตราการขยายประมาณ 8.6 dBi และมีรายละเอียดต่ำ แต่โครงสร้างยังคงมีความซับซ้อนมากในการสร้าง สายอากาศ base station ใน [9-10] ได้รับการพัฒนาโดยการใช้วัสดุจากโลหะทำให้ได้รับการจัดการพลังงานสูงและมีอัตราการขยายสูง 17 dB โครงสร้างสายอากาศเหล่านี้ยังคงมีความซับซ้อนมากและมีขนาดใหญ่เกินไป สรุปได้ว่าสายอากาศข้างต้นทั้งหมดมีโครงสร้างที่ซับซ้อนยากที่จะออกแบบและใช้งานทำให้มีต้นทุนสูง อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่ไม่สามารถรองรับการใช้งานที่หลายความถี่ได้ อีกเทคนิคหนึ่งที่ได้รับการปรับปรุงโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นเป็นที่นิยมมาก เทคนิคนี้ใช้สำหรับสายอากาศใน [11-13] ตัวสะท้อนคลื่นเป็นส่วนสำคัญในการลดการรบกวนระหว่างโลบด้านหลังและโลบด้านข้าง สายอากาศ magnetolectric dipole สองชั้นใช้ตัวสะท้อนคลื่นแบบ horned เพื่อปรับปรุงแบนด์วิดท์และมีเสถียรภาพอัตราการขยายเพิ่มขึ้น [14] อย่างไรก็ตามโครงสร้างของสายอากาศยังซับซ้อนและยากต่อการสร้าง

มีการเสนอเทคนิคหลายอย่างในการออกแบบสายอากาศหลายย่านการใช้งานรวมถึงการใช้ตัวกระจายคลื่นหลายตัว โครงสร้างสายอากาศแบนด์กว้างและรูปทรงเรขาคณิต (Fractal) สายอากาศที่นำเสนอใน [15-17] ใช้เทคนิคแฟร็กทัลสำหรับการใช้งานหลายความถี่ แต่มีขนาดใหญ่ มีอัตราการขยายที่ต่ำและยากในการควบคุมย่านความถี่และรูปแบบการแพร่กระจาย นอกจากนี้ยังมีสายอากาศแบนด์กว้างสำหรับการตอบสนองหลายความถี่ [18-21] อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้เป็นเรื่องยากมากที่จะออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้อัตราการขยายสูงและใช้พลังงานสูง ความท้าทาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการออกแบบสายอากาศสำหรับหลายย่านความถี่ที่สามารถควบคุมความถี่ในแถบทั้งหมดได้ [22], [23] พบว่าความถี่ฮาร์โมนิกส์สามารถควบคุมได้โดยการเพิ่มหรือลดความจุของโครงสร้าง interdigital เช่นการเปลี่ยนแปลงความยาวความกว้างและจำนวน fingers อย่างไรก็ตาม สายอากาศใน [22] มีอัตราการขยายต่ำและสายอากาศใน [23] สามารถสร้างได้เพียงสองแถบความถี่ นอกจากนี้นักวิจัยหลายคนพยายามที่จะปรับปรุงสายอากาศโดยใช้วัสดุ metamaterials [24], [25] โครงสร้างสายอากาศแบบใหม่โดยใช้วัสดุฐานรอง integrated waveguide หรือ SIW [28] และอาร์เรย์ของ dual-element folded dipole [29] อย่างไรก็ตามสายอากาศทั้งหมดนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและยังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสายอากาศสถานีฐานเนื่องจากมีอัตราการขยายและการจัดการพลังงานต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีปัญหาในการควบคุมแถบความถี่เมื่อต้องใช้งานหลายย่านความถี่ นอกจากนี้นักวิจัยจำนวนมากยังได้ใส่ตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอล (interdigital capacitor) เข้าไปในรูปร่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศ ไดโพลที่มีช่องว่าง interdigital ถูกเสนอเพื่อสร้าง reflectarray ส่งผลให้ช่วงเฟสขยายสำหรับการทำงานย่านความถี่เดียว [28] นอกจากนี้ตัวเก็บประจุแบบ interdigital ถูกใช้สำหรับการจับคู่ระหว่างสายอากาศไดโพลทำให้เกิดการใช้งานแบนด์วิดท์แบบกว้าง [29] นอกจากนี้ตัวเก็บประจุ interdigital ถูกแทรกลงใน printed crossed dipoles สำหรับเพิ่มย่านการใช้งาน แต่ย่านเหล่านี้จะต้องใกล้เคียงย่านการทำงานของความถี่ของสายอากาศไดโพล [30]

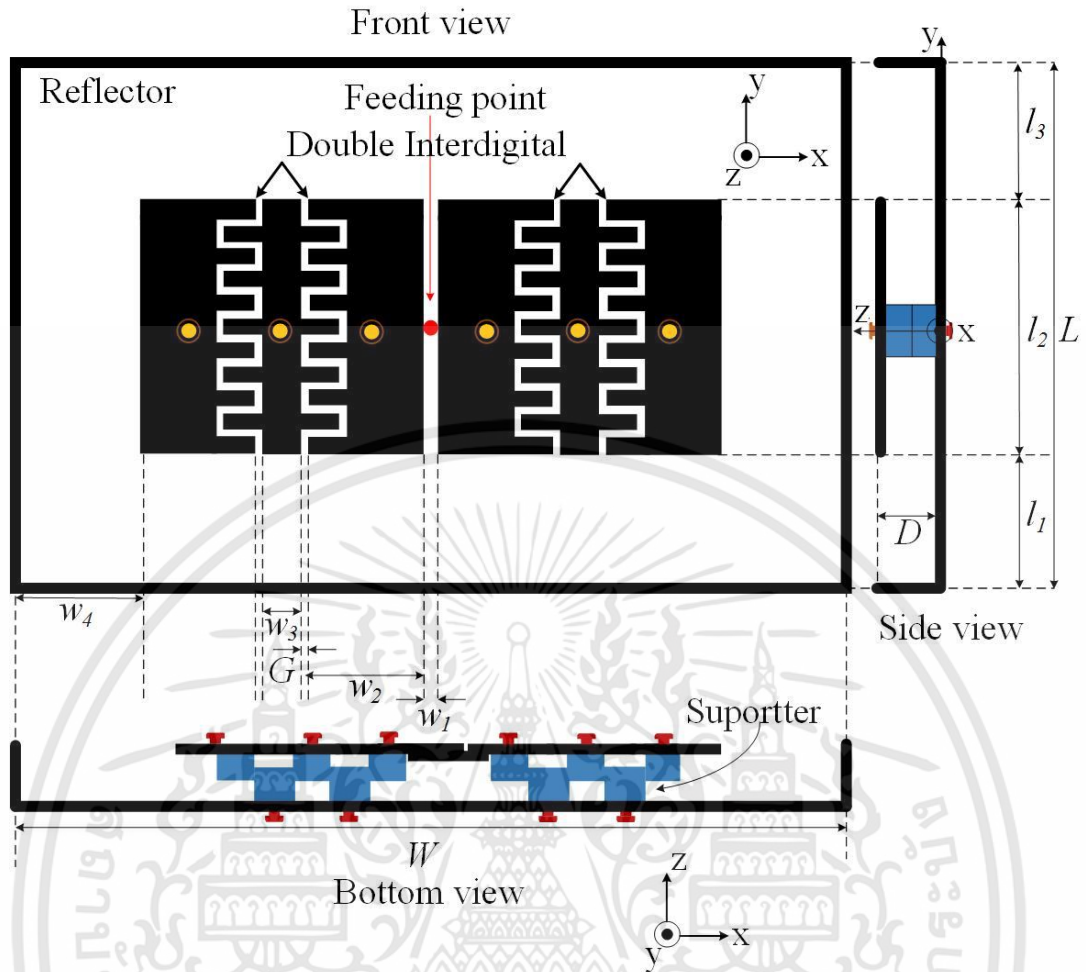
ในบทนี้ กล่าวถึงการออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศในอาคารแบบหลายย่านความถี่โดยใช้เทคนิค interdigital capacitor ตามโครงสร้างไดโพล ด้วยโครงสร้างนี้ได้รับการตอบสนองแบบสามความถี่ในขณะที่แถบความถี่ฮาร์โมนิกที่สองและสามสามารถควบคุมได้ตามต้องการ สายอากาศที่นำเสนอสามารถทำงานได้ที่ความถี่พื้นฐานที่กำหนดไว้ที่ 1.8 GHz และย่านฮาร์โมนิกที่สองและสามอยู่ที่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz สำหรับย่านการใช้งาน LTE และ WLAN ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในเป็นหัวข้อนำเสนอ ดังนี้

- 3.1 บทนำ
- 3.2 การออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital
- 3.3 การศึกษาผลกระทบการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ
- 3.4 ผลการจำลองสายอากาศ
- 3.5 บทสรุป

3.2 การออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital

การออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital บนวัสดุทองเหลืองมีความหนา 1.5 มิลลิเมตร มีวัสดุฐานรองที่เป็นอากาศใช้วัสดุชนิด polyoxymethylene (POM) ด้วยค่าไดอิเล็กทริกคงที่เท่ากับ 9.4 เป็นตัวรองรับติดตั้งระหว่างสายอากาศที่นำเสนอกับตัวสะท้อนคลื่น สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital แสดงในรูปที่ 3.1 ด้วยโครงสร้างนี้ง่ายต่อการออกแบบและปรับค่าการประจุของโครงสร้าง interdigital สามารถควบคุมฮาร์โมนิกที่สองและที่สามได้ตามต้องการ สายอากาศมีโครงสร้างน้ำหนักเบา การจัดการพลังงานที่สูง มีอัตราการขยายสูงและมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



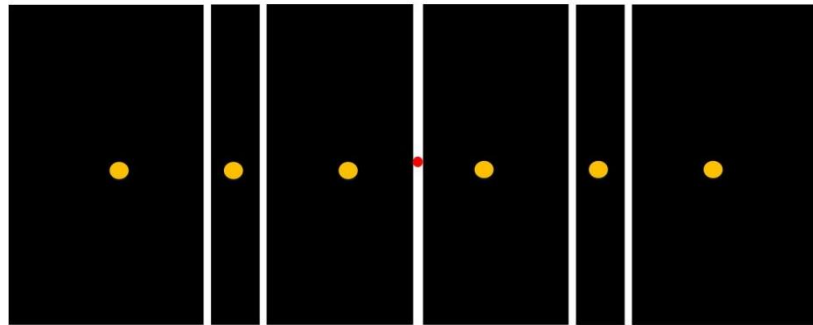
รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital

จากรูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital ทั้งด้านบน ด้านล่างและด้านข้าง สำหรับขั้นตอนการออกแบบสายอากาศมีรายละเอียดเป็นดังรูปที่ 3.2

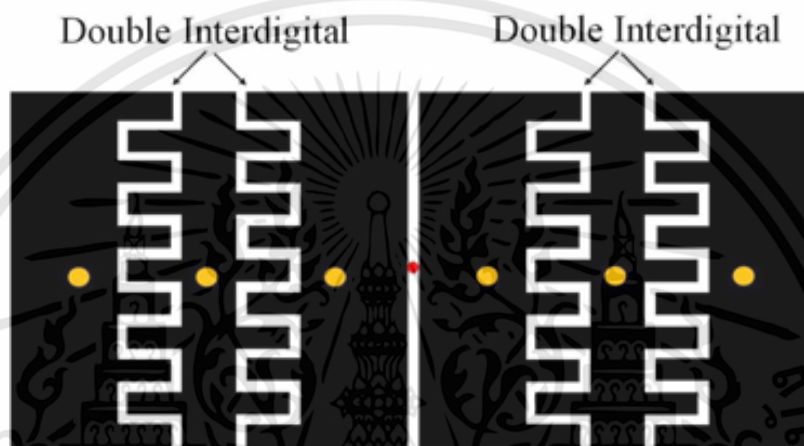


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



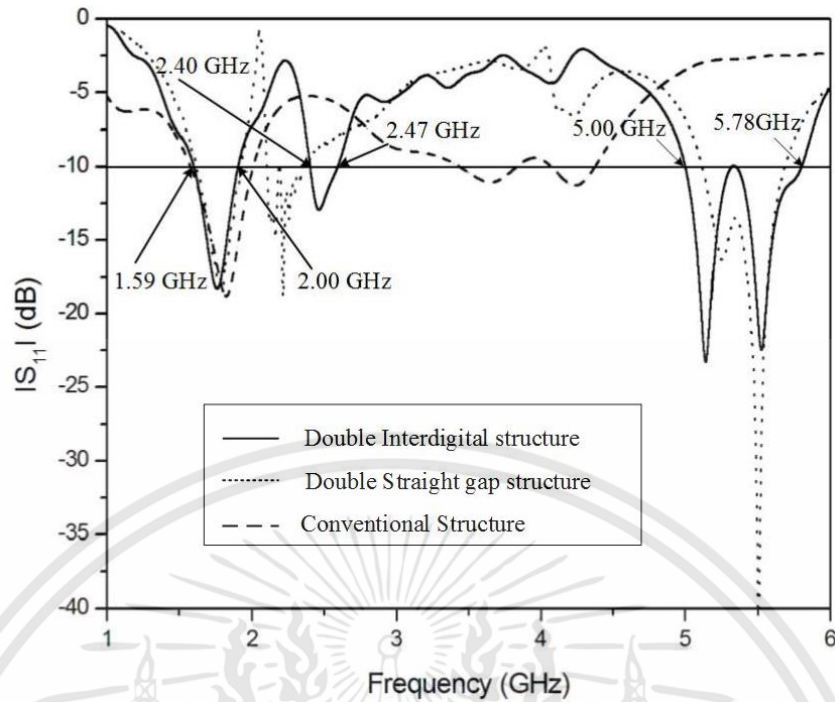
(ข)



(ค)

รูปที่ 3.2 สายอากาศไดโพลระนาบด้วย (ก) ต้นแบบสายอากาศไดโพล (ข) ช่องว่าง double straight (ค) โครงสร้าง double interdigital

จากรูปที่ 3.2 (ก) แสดงโครงสร้างสายอากาศไดโพลพื้นฐานออกแบบที่ความถี่หลัก 1.8 GHz ความยาวคลื่น 166.67 มิลลิเมตร รองรับการใช้งานย่าน LTE โดยมีขนาด 69×64 มิลลิเมตร ($0.13\lambda_g \times 0.128\lambda_g$) ในแต่ละข้างของไดโพล จากนั้นนำช่องว่างเส้นตรงคู่ (double straight gap) ฝังไปในด้านข้างทั้งสองของสายอากาศไดโพลแสดงดังรูปที่ 3.2 (ข) ทำให้เกิดค่าความจุภายใน ทำให้อ่านความถี่รีโซแนนซ์สามารถควบคุมได้ เมื่อเพิ่มความจุในช่องว่างเส้นตรงคู่ถูกปรับเปลี่ยนให้เป็นโครงสร้าง double interdigital ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ค) และรูปที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลต้นแบบ สายอากาศช่องว่างเส้นตรงคู่ และสายอากาศไดโพลด้วยโครงสร้าง double interdigital



รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) (ก) โครงสร้างสายอากาศไดโพลระนาบ (ข) โครงสร้างช่องว่าง double straight (ค) โครงสร้าง double interdigital

จากรูปที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลระนาบต้นแบบ (Conventional Structure) ออกแบบที่ความถี่ 1.8 GHz พบว่าเกิดการรีโซแนนซ์ความถี่ที่ได้ออกแบบและมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ต่อมาปรับโครงสร้างด้วยการเพิ่มช่องว่างเส้นตรงคู่ จากกราฟพบว่าเกิดฮาร์โมนิกที่สอง ณ ความถี่ 2.2 GHz และฮาร์โมนิกที่สาม ณ ความถี่ 5.3 GHz ซึ่งมีแนวโน้มที่จะควบคุมฮาร์โมนิกเหล่านี้ได้ ท้ายสุดได้พัฒนาโครงสร้างด้วยเทคนิคดับเบิ้ลอินเตอร์ดิจิตอล (double interdigital structure) จากผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับพบว่าสามารถควบคุมฮาร์โมนิกที่สองและฮาร์โมนิกที่สามได้ตามต้องการ ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะเป็นการกล่าวถึงการศึกษาผลกระทบจากการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ

3.3 การศึกษาผลกระทบการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการทำการศึกษาคำวิเคราะห์ถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital จากโครงสร้างสายอากาศดังรูปที่ 3.1 กำหนดพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

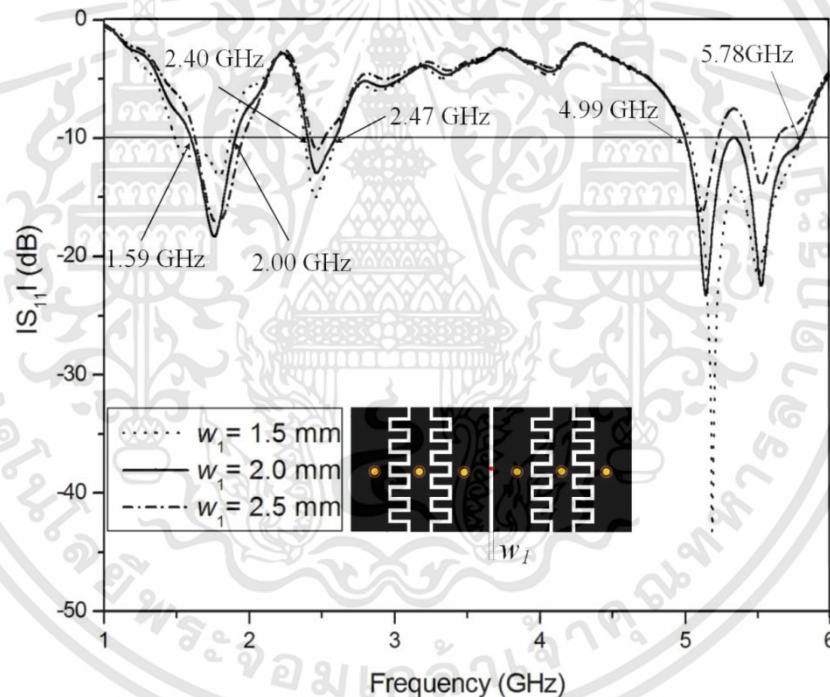
- w_1 คือ ระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ
- w_2 คือ ระยะห่างระหว่างอินเตอร์ดิจิตอลกับขอบของไดโพล
- w_3 คือ ระยะห่างระหว่างอินเตอร์ดิจิตอล
- G คือ ความกว้างของช่องอินเตอร์ดิจิตอล
- d คือ ความหนาของแผ่นทองเหลือง

- l_1 คือ ระยะระหว่างขอบด้านล่างของตัวรีเฟคเตอร์และขอบด้านล่างของไดโพล
- l_2 คือ ความกว้างของไดโพล
- l_3 คือ ระยะระหว่างขอบด้านบนของไดโพลและขอบด้านบนของตัวรีเฟคเตอร์

พารามิเตอร์ข้างต้นถูกใช้ในการศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ (w_1)

การศึกษาผลกระทบจากการปรับระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณ (w_1) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ ดังนี้ $w_2 = 29.0$ mm, $w_3 = 9.0$ mm, $G = 1.0$ mm, $d = 1.5$ mm, $l_1 = 36.1$ mm, $l_2 = 64.0$ mm และ $l_3 = 35.9$ mm จากนั้นได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ w_1 เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร, 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งผลกระทบจากการปรับพารามิเตอร์ w_1 เป็นไปดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ w_1

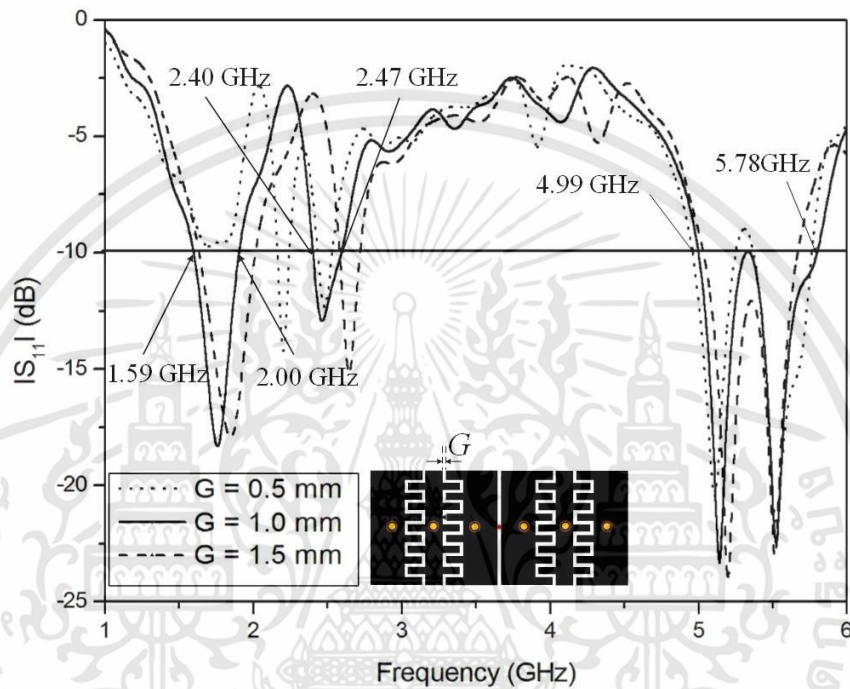
จากรูปที่ 3.4 แสดงผลการเปรียบเทียบการจำลองการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ w_1 พบว่ามีผลต่อฮาร์โมนิกส์เล็กน้อย อย่างไรก็ตามจากผลการจำลองยังแสดงให้เห็นได้ว่าขนาดความกว้างของแบนด์วิดท์ที่ความถี่หลักอยู่ระหว่าง 1.59-2.00 GHz (410 MHz) ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองอยู่ระหว่าง 2.40-2.47 GHz (70 MHz) และความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สามอยู่ระหว่าง 4.99-5.78 GHz (790 MHz) ดังนั้นค่า w_1 ที่เหมาะสมต่อการนำไปศึกษาและวิเคราะห์ต่อไปคือมีค่าเท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับความกว้างของช่อง Interdigital

(G)

การศึกษามูลกระทบจากการปรับความกว้างของช่อง Interdigital (G) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ จากนั้นได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ G จำนวน 3 ค่าดังนี้ G เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร, 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งผลกระทบจากการปรับพารามิเตอร์ G เป็นไปดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ G

จากรูปที่ 3.5 แสดงผลการเปรียบเทียบการจำลองการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ G พบว่าที่ความถี่หลักและความถี่ฮาร์โมนิกที่สามมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย เมื่อพารามิเตอร์ G ลดลงเป็น 0.5 มิลลิเมตร ค่าความจจะสูงขึ้นเป็นผลให้ความถี่ฮาร์โมนิกที่สองเลื่อนเข้าใกล้ไปทางด้านความถี่หลัก ในทางกลับกันเมื่อพารามิเตอร์ G เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 มิลลิเมตร ความถี่ฮาร์โมนิกที่สองเลื่อนไปทางด้านความถี่สูงขึ้นเนื่องจากค่าความจุต่ำ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ G ที่เหมาะสมมีค่า 2.5 มิลลิเมตร ให้ความถี่ฮาร์โมนิกที่สองและฮาร์โมนิกที่สามอยู่ที่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz ด้วยแบนด์วิดท์ระหว่าง 2.40 -2.47 GHz และ 4.99-5.78 GHz ตามลำดับ

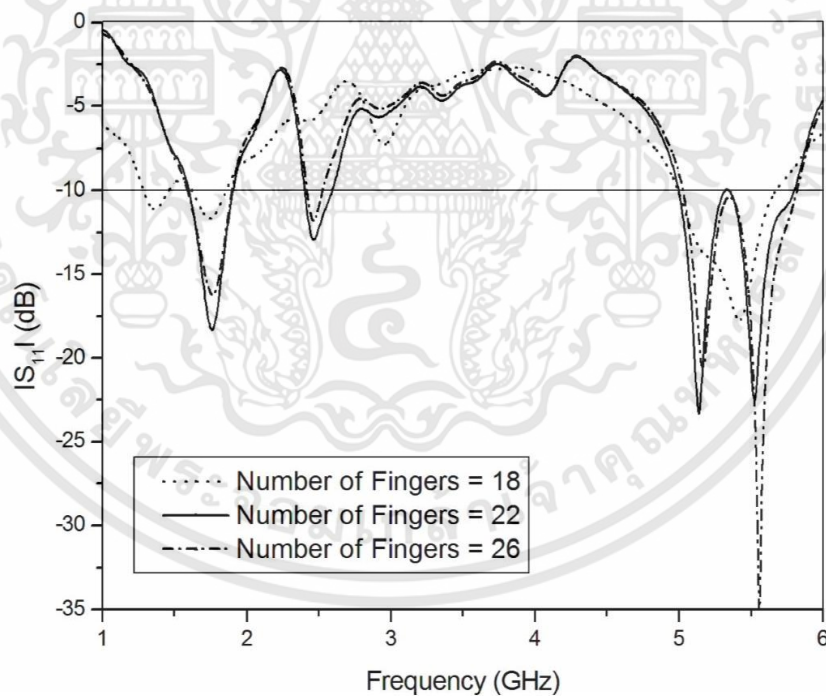
พารามิเตอร์ที่สำคัญที่เหมาะสมที่สุดของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ด้วยโครงสร้าง Double Interdigital สามารถดูได้จากตารางที่ 3.1 ซึ่งเห็นได้ว่าสายอากาศมีแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ดีโดยค่าการสูญเสียย้อนกลับ ต่ำกว่า -10 dB สำหรับทุกย่านความถี่

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ด้วย
โครงสร้าง Double Interdigital

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
w_1	02.0
w_2	29.0
w_3	09.0
G	01.0
d	01.5
l_1	36.1
l_2	64.0
l_3	35.9

3.3.3 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับจำนวนฟิงเกอร์ (Number of finger)

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับจำนวนฟิงเกอร์โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของสายอากาศคงที่ จากนั้นทำการปรับจำนวนฟิงเกอร์จำนวน 3 ค่าคือ 18, 22 และ 26 ฟิงเกอร์ ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 3.5

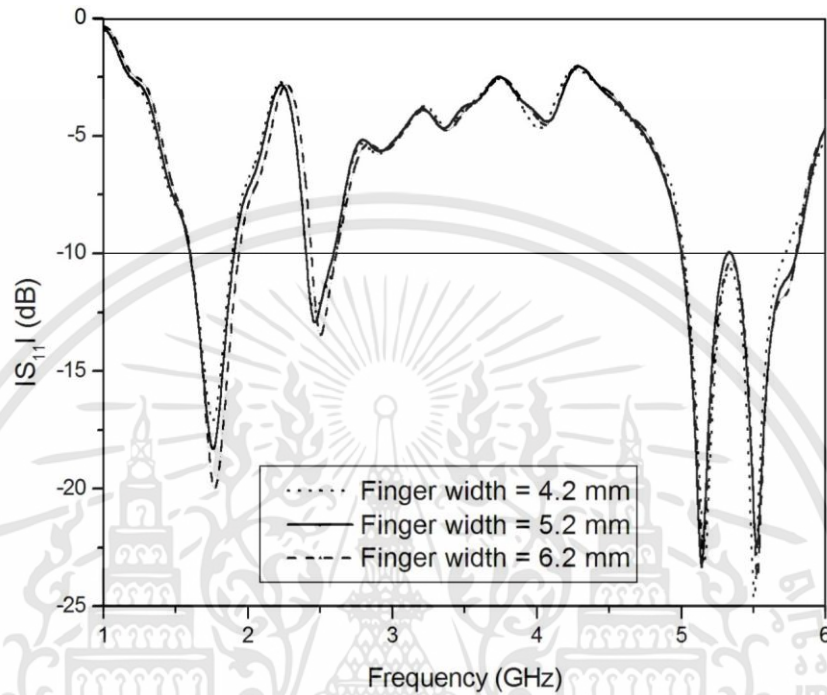


รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับจำนวนฟิงเกอร์

จากรูปที่ 3.6 แสดงผลการเปรียบเทียบการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับจำนวนฟิงเกอร์ พบว่าผลกระทบของจำนวนฟิงเกอร์มีเพียงเล็กน้อยต่อแบนด์วิดท์ของความถี่ ฮาร์โมนิกส์ที่สองและฮาร์โมนิกส์ที่สาม จำนวนฟิงเกอร์ของสายอากาศที่เหมาะสมอยู่ที่ 22 ฟิงเกอร์ ที่ทำให้แมทชิ่งอิมพีแดนซ์ดีทุกย่านความถี่ ดังนั้นจำนวนฟิงเกอร์นี้นำไปศึกษาและวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับความกว้างของฟิงเกอร์ (Finger width)

ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับความกว้างของฟิงเกอร์ โดยกำหนดพารามิเตอร์ตัวอื่นคงที่ จำนวนฟิงเกอร์กำหนดให้อยู่ที่ 22 ฟิงเกอร์ ทำการปรับความกว้างของฟิงเกอร์ตั้งนี้ ความกว้างฟิงเกอร์เท่ากับ 4.2 มิลลิเมตร 5.2 มิลลิเมตร และ 6.2 มิลลิเมตร ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.6



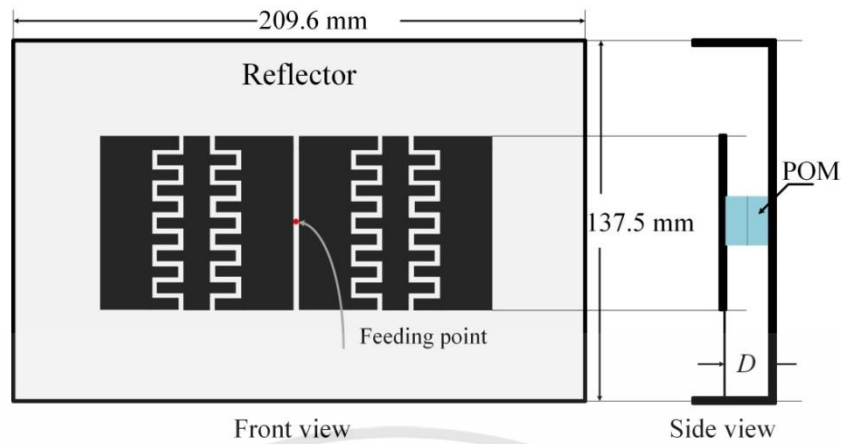
รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างของฟิงเกอร์

จากรูปที่ 3.7 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างของฟิงเกอร์ เมื่อความกว้างของฟิงเกอร์เพิ่มขึ้น พบว่าความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองมีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยที่แบนด์วิดท์ของความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองและฮาร์โมนิกส์ที่สามยังคงครอบคลุมย่านความถี่ของ LTE (2.40-2.47 GHz) และย่านความถี่ WLAN (4.99-5.78 GHz) ตามลำดับ ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของความกว้างฟิงเกอร์อยู่ที่ 5.2 มิลลิเมตร

นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้าง double interdigital สามารถควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองและฮาร์โมนิกส์ที่สามได้ดีโดยไม่มีผลต่อการตอบสนองต่อความถี่หลัก

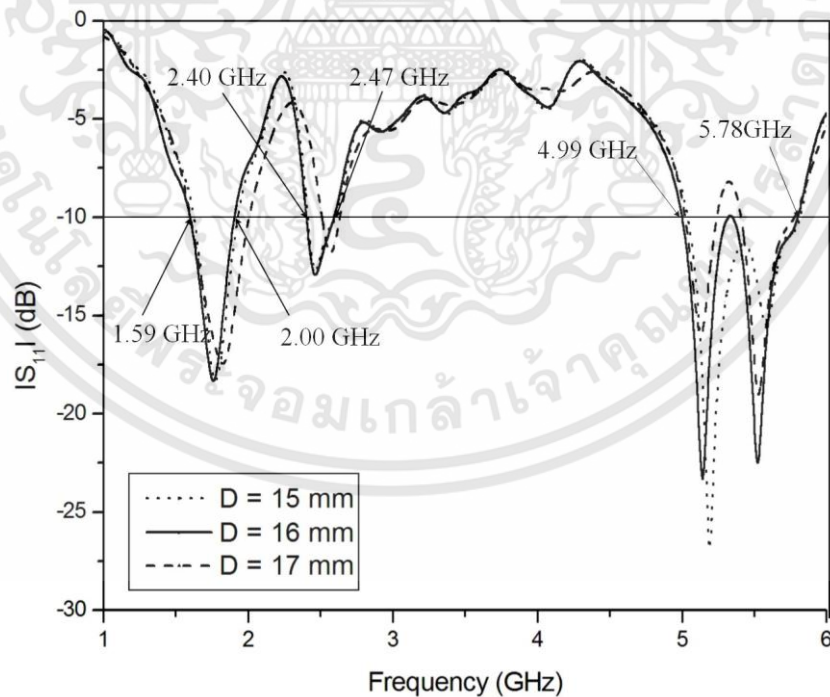
3.3.5 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับระยะระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนคลื่น (D)

ในหัวข้อนี้ เป็นการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับระยะระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนคลื่น หลังจากที่ได้โครงสร้างสายอากาศไดโพลที่ใช้โครงสร้าง Double Interdigital ที่ปรับพารามิเตอร์ให้รองรับการใช้งาน LTE และ WLAN เรียบร้อยแล้วนั้น ได้นำโครงสร้างสายอากาศมาติดตั้งตัวตัวสะท้อนคลื่นขนาด 209.6 มิลลิเมตร×137.5 มิลลิเมตร×45 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลระนาบสามความถี่ติดตั้งด้วยตัวตัวสะท้อนคลื่น

จากรูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างสายอากาศไดโพลระนาบสามความถี่ติดตั้งด้วยตัวสะท้อนคลื่น โดยใช้ POM เป็นตัวรองรับระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนคลื่นระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวตัวสะท้อนคลื่น (D) อยู่ที่ประมาณ $\lambda/4$ แต่ได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยจากโครงสร้าง double interdigital structure บนสายอากาศไดโพล ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลกระทบจากการปรับระยะห่าง จำนวน 3 ค่า ดังนี้ D เท่ากับ 15 มิลลิเมตร, 16 มิลลิเมตร และ 17 มิลลิเมตร



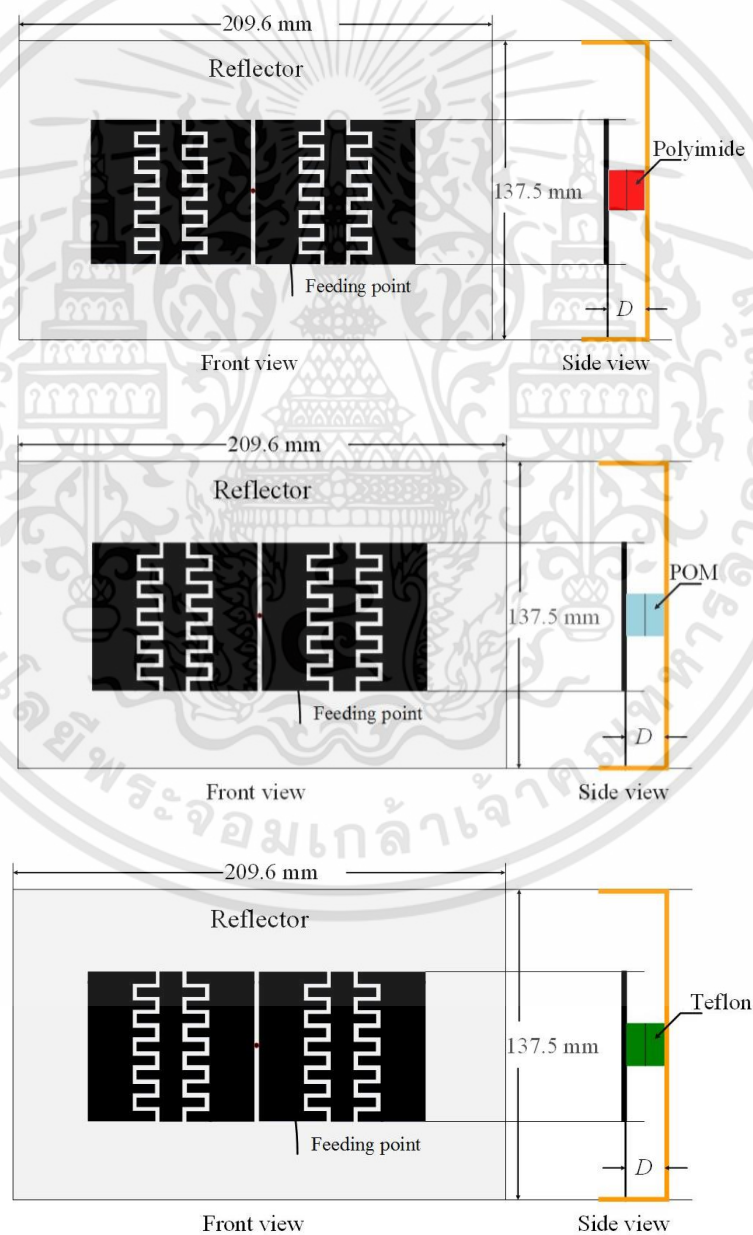
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} กรณีปรับค่า D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.9 เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับค่า D พบว่าระยะ D มีผลกระทบต่อความถี่หลักและความถี่ฮาร์โมนิกส์ ดังนั้นระยะที่เหมาะสมกับสายอากาศไดโพลอยู่ที่ 16 มิลลิเมตร ผลของแมทซ์อิงพีแดนซ์น้อยกว่า -10 dB ค่าแบนด์วิธอยู่ที่ 1.59-2.00 GHz, 2.40-2.47 GHz และ 4.99-5.78 GHz ณ ความถี่หลัก, ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองและความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สาม ตามลำดับ

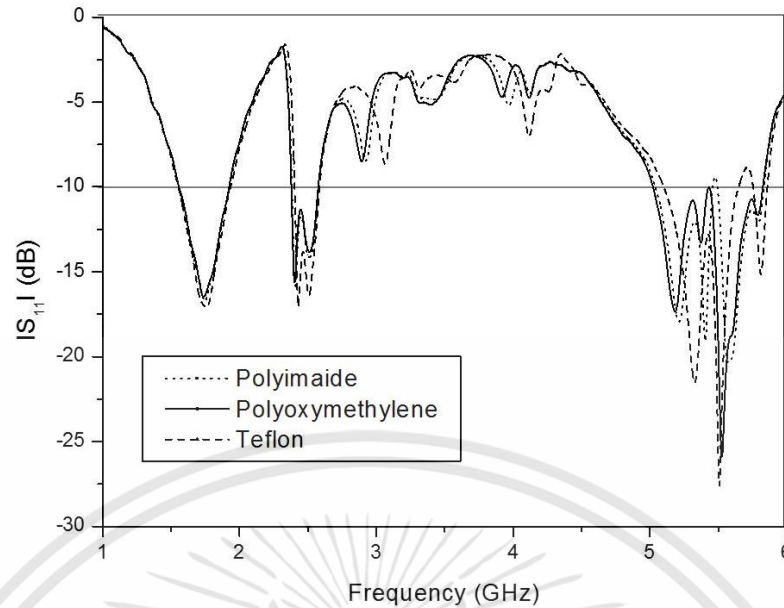
3.3.6 ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับชนิดของวัสดุฐานรอง

ในหัวข้อนี้ เป็นการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับชนิดของวัสดุฐานรองที่มีผลต่อสายอากาศ จำนวน 3 ชนิด ดังนี้ ชนิดที่หนึ่งคือ Polyimide ชนิดที่สองคือ Polyoxymethylene และชนิดที่สามคือ Teflon แสดงดังรูปที่ 3.10 และผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 โครงสร้างตำแหน่งการเปลี่ยนวัสดุฐานรองแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



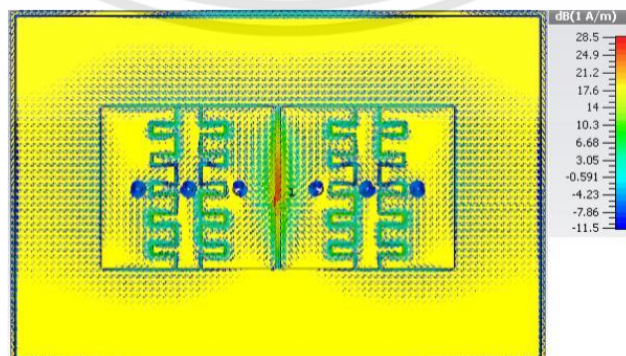
รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับชนิดของวัสดุฐานรอง

จากรูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างตำแหน่งการเปลี่ยนวัสดุฐานรองแต่ละชนิด และรูปที่ 3.12 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับชนิดของวัสดุฐานรองจำนวนสามชนิด คือชนิดที่หนึ่งคือ Polyimide ชนิดที่สองคือ Polyoxymethylene และชนิดที่สามคือ Teflon พบว่าที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สามมีผลต่ออิมพีแดนซ์แมทซ์ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปทางด้านความถี่สูงส่วนความถี่หลักและฮาร์โมนิกส์ที่สองยังคงครอบคลุมย่านความถี่ของ LTE และย่านความถี่ WLAN ตามลำดับ ดังนั้นชนิดของวัสดุฐานรองที่เหมาะสมคือ Polyoxymethylene

3.4 ผลการจำลองสายอากาศ

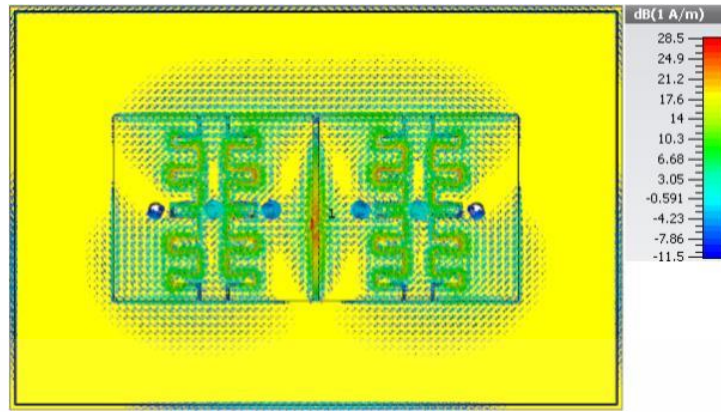
ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลการจำลองของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่จำลองผลด้วยโปรแกรม CST-microwave studio โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 การจำลองความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

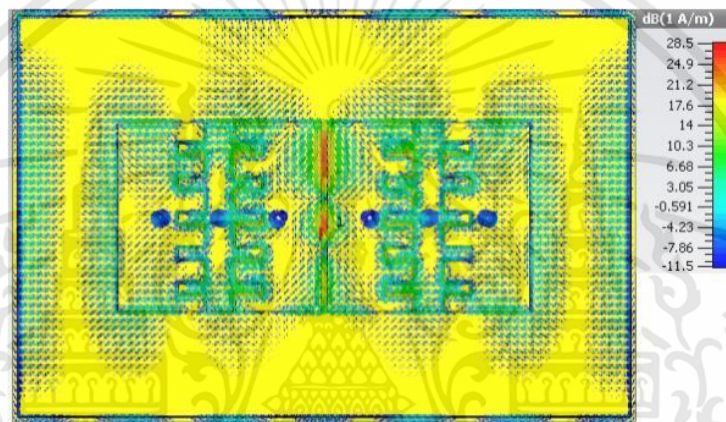


(ก) ที่ความถี่ 1.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ที่ความถี่ 2.45 GHz



ที่ความถี่ 5.2 GHz

รูปที่ 3.12 ความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

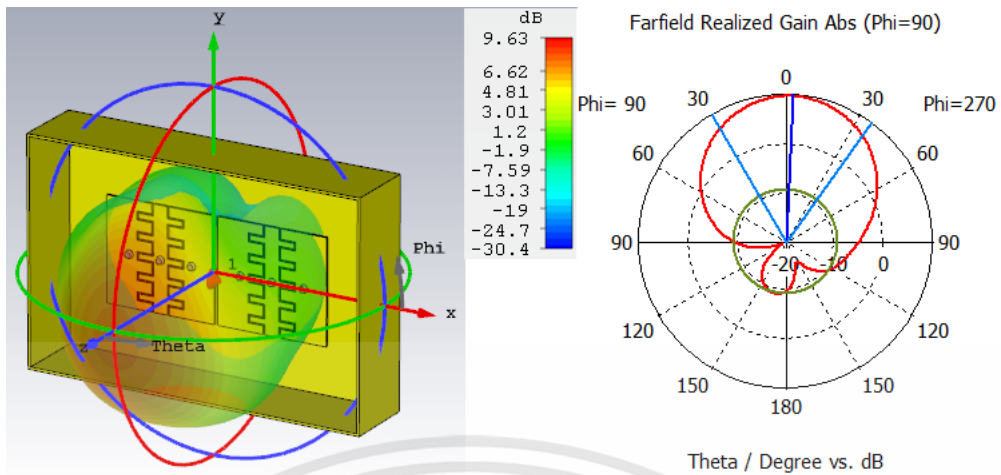
จากรูปที่ 3.12 แสดงความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ พบว่ารูปที่ 3.12 (ก) ที่ความถี่หลักมีความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนแผ่นพื้นผิว และ interdigital line อย่างไรก็ตามที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิว มีความหนาแน่นมากกว่าบริเวณโครงสร้าง interdigital ซึ่งหมายความว่าพารามิเตอร์ต่างๆ โครงสร้าง interdigital มีผลกระทบอย่างมากต่อย่านความถี่แสดงดังรูปที่ 3.12 (ข) และในรูปที่ 3.12 (ค) พบว่ามีผลกระทบคล้ายกันกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สาม

ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าสายอากาศไดโพลที่นำเสนอด้วยโครงสร้าง double interdigital นี้ สามารถควบคุมย่านความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองและย่านความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สามได้ตามต้องการ

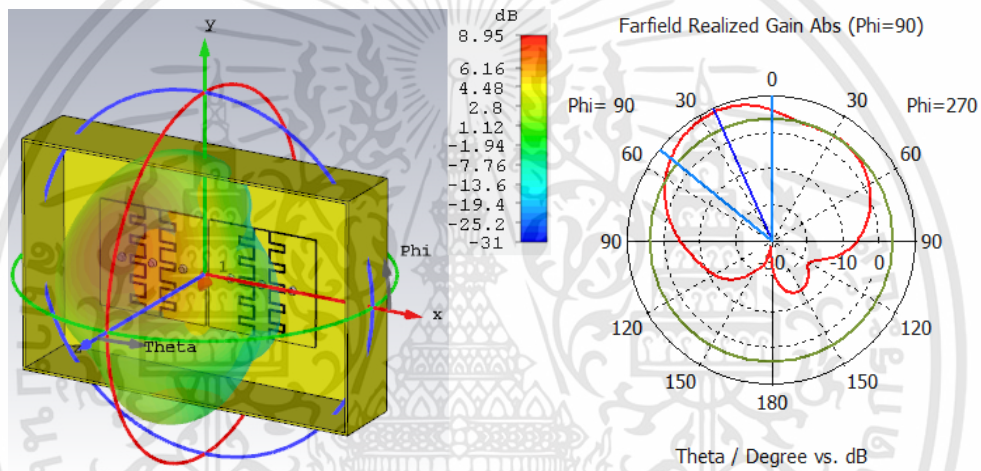
3.4.2 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ แสดงดังรูปที่ 3.12

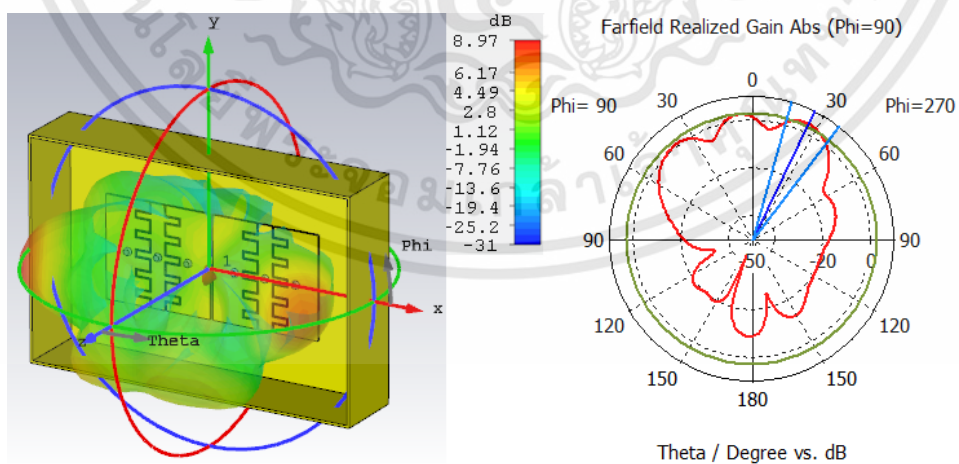
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ที่ความถี่ 1.8 GHz



(ข) ที่ความถี่ 2.45 GHz



(ค) ที่ความถี่ 5.2 GHz

รูปที่ 3.13 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามแบนด์ที่ความถี่ 1.8 GHz 2.45 GHz และ 5.2 GHz

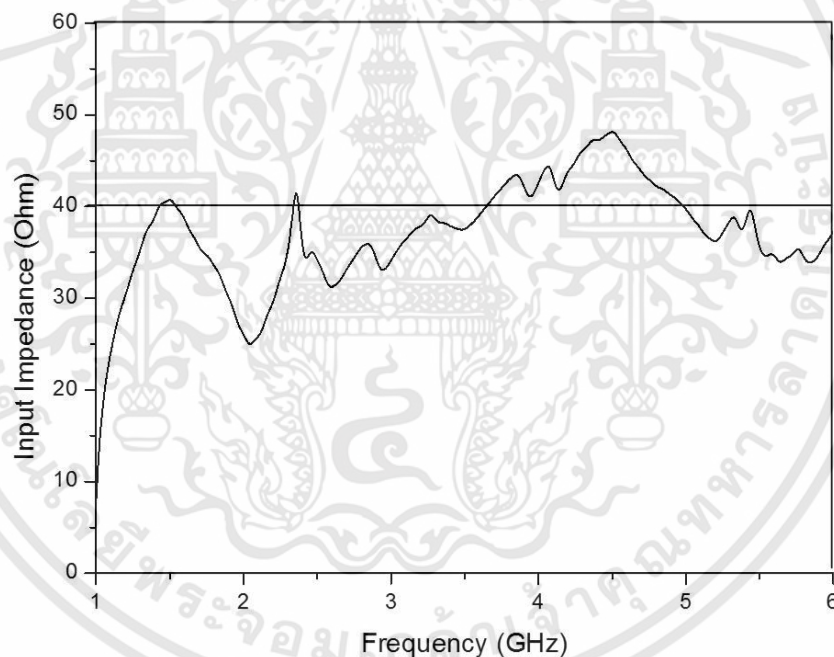
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.13 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามแบนด์ที่ความถี่ 1.8 GHz, 2.45 GHz และ 5.2 GHz ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของสายอากาศสรุปในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศ

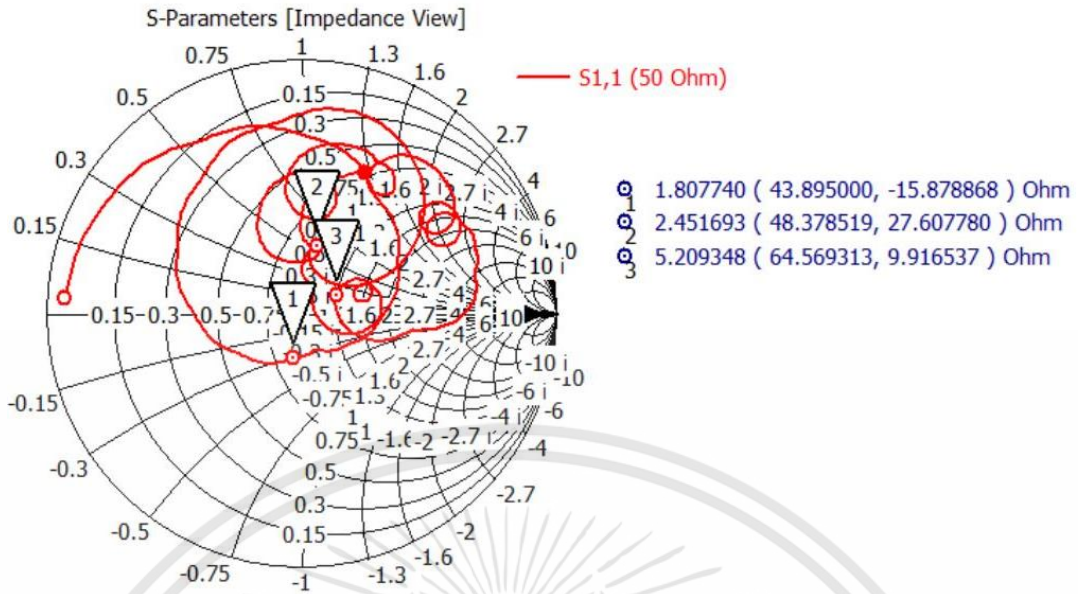
คุณลักษณะของสายอากาศ	ความถี่ (GHz)		
	1.80	2.45	5.20
Angular bandwidth (degree)	9.6	10.4	5.9
Back lobe (dB)	65.8	50.7	21.0
Side lobe (dB)	-17.6	-6.0	-0.8
Gain (dBi)	9.63	8.95	8.97

3.4.3 การจำลองอินพุตอิมพีแดนซ์



รูปที่ 3.14 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

จากรูปที่ 3.14 แสดงผลการจำลองอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ พบว่า ช่วงความถี่ 1.59-2.00 GHz 2.40-2.47 GHz และ 4.99-5.78 GHz ที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียง 50 โอห์ม



รูปที่ 3.15 อินพุตอิมพีแดนซ์ในเทอมค่าจริงกับจินตภาพและในรูปแผนภูมิสมิทของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.15 แสดงอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในเทอมค่าจริงกับจินตภาพและในรูปแผนภูมิสมิทของสายอากาศ พบว่าที่ความถี่หลัก 1.8 GHz อินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าประมาณ 43.8 โอห์ม และที่ฮาร์โมนิกส์ที่สองและสามค่าอินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าประมาณ 48.4 และ 64.56 โอห์ม ตามลำดับนั้นยังพบว่า Double Interdigital มีผลต่อค่า Capacitive ที่ทำให้สามารถควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองและสามได้ตามต้องการ

3.5 บทสรุป

ในบทนี้ เป็นการนำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่ใช้โครงสร้าง double interdigital ในการควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองและความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สาม โดยจำลองผลด้วยโปรแกรม CST-Microwave studio โดยเริ่มวิเคราะห์สายอากาศด้วยการออกแบบสายอากาศไดโพลที่ความถี่หลัก 1.8 GHz ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ ณ ความถี่หลักต่ำกว่า -10 dB จากนั้นนำช่องว่างเส้นตรงคู่ ฝั่งไปในด้านข้างทั้งสองของสายอากาศไดโพล ทำให้เกิดค่าความจุภายในทำให้ย่านความถี่รีโซแนนซ์สามารถควบคุมได้เมื่อเพิ่มความจุในช่องว่าง ท้ายสุดพัฒนาสายอากาศจากเส้นตรงช่องว่างคู่ถูกปรับเปลี่ยนให้เป็นโครงสร้าง double interdigital สามารถควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองและฮาร์โมนิกส์ที่สามได้ตามต้องการ ผลการจำลองความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ พบว่าสายอากาศไดโพลที่นำเสนอด้วยโครงสร้าง double interdigital นี้ สามารถควบคุมย่านความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองและย่านความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สามได้ตามต้องการ นอกจากนี้สายอากาศที่นำเสนอมีผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลแสดงให้เห็นว่า เป็นสายอากาศอัตรการขยายสูง ด้วยค่าอัตรการขยาย 9.63, 8.95, 8.97 ณ ความถี่ 1.8 GHz, 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ จากที่กล่าวมาข้างต้น สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานกับการสื่อสารระบบ LTE และ WLAN ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์

4.1 บทนำ

จากการศึกษารวบรวมงานวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าหลากหลายวิธีที่นักวิชาการและนักวิจัยหลีกเลี่ยงการทับซ้อนของสัญญาณด้วยการสร้างนอตช์ (Notch) โดยการเจาะร่องบนระนาบการแพร่กระจาย [31]-[36] หรือการเจาะร่องบนระนาบกราวด์ [37] หรือแม้แต่การใช้พาราซิติกส์ในสายอากาศ [38] ซึ่งก็มีรูปร่างของร่องและพาราซิติกส์ที่แตกต่างกันไป เช่น รูปร่างตัวยู (U-shaped) [39] รูปร่างตัวซี (C-shaped) [40]-[41] รูปร่างตัวยูหัก (broken Γ -shaped) [42] รูปร่างตัวเอช (H-shape) [43] รูปร่างตัวเอส (S-shape) [44] รูปร่างตัวแอล (L-shaped) [45] และรูปร่างตัวที (T-shaped) [46] เป็นต้น การสร้างแบนด์นอตช์บนระนาบการแพร่กระจายและแบนด์นอตช์บนระนาบกราวด์เป็นที่น่าสนใจด้วยข้อเด่นคือง่ายต่อการควบคุมแบนด์นอตช์โดยการปรับพารามิเตอร์ [47] สายอากาศแบบสองแบนด์นอตช์ที่สร้างบนระนาบการแพร่กระจายเพื่อหลีกเลี่ยงการทับซ้อนที่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz [48] การสร้างสามแบนด์นอตช์ด้วยสตรูปตัวที (T-shaped) บนระนาบการแพร่กระจายกับสองพาราซิติกส์รูปตัวซี (C-shaped) และคู่ของสี่เหลี่ยมตัดเป็นวงบนเรโซเนเตอร์ได้สามแบนด์นอตช์ที่ความถี่ 3.3-3.6 GHz, 5.05-5.90 GHz และ 7.25-7.75 GHz [49] แต่มีความยุ่งยากต่อการปรับพารามิเตอร์ของร่องสองช่องที่สมมาตรกัน และเนื่องจากสายอากาศไมโครสตรูปแบบร่องมีคุณสมบัติที่ดีคือ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และสามารถสร้างได้ง่าย โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตรูปแบบร่องประกอบด้วยสายส่งสัญญาณแบบ ไมโครสตรูปวางอยู่ระนาบล่างและสายอากาศร่องอยู่ระนาบกราวด์วางระนาบบน มีวัสดุฐานรอง เป็นฉนวนกัน สายอากาศชนิดนี้ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการพัฒนาสายอากาศ UWB เพื่อให้ แบนด์วิดท์ของสายอากาศกว้างครอบคลุมมาตรฐานความถี่ของ UWB และสามารถหลีกเลี่ยง การทับซ้อนของสัญญาณ WiMAX WLAN และ X-band ได้

ในบทนี้ เป็นการกล่าวถึงการออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตรูปแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแทรกตัวนำรูปพัลส์หรือแพทช์รูปพัลส์ ถูกปรับปรุง แบนด์วิดท์ให้ครอบคลุมย่าน UWB มีการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศด้วยวิธีจำลองผลด้วยโปรแกรม CST-Microwave studio ผู้วิจัยได้ดำเนินการ เริ่มจากการศึกษาโครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตรูปเพื่อให้ครอบคลุมย่าน UWB หลังจากนั้นทำการแทรกตัวนำรูปพัลส์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงแบนด์วิดท์ให้ครอบคลุมและเหมาะสมเพิ่มขึ้นกว่าเดิมรองรับ การสื่อสารดังกล่าว ในการออกแบบสายอากาศผู้วิจัยทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ และท้ายสุดเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของสายอากาศ ด้วยการทำนอตช์ ในส่วนนี้เป็นการศึกษาการทำนอตช์แบบสามแบนด์นอตช์ภายในสายอากาศ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในเป็นหัวข้อนำเสนอดังนี้

4.1 บทนำ

4.2 ทฤษฎีและการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบไมโครสตรูป

4.3 การปรับปรุงแบนด์วิดท์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.4 การศึกษาผลกระทบการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ
 4.5 สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์
 4.6 ผลการจำลองสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบสามแบนด์นอตช์ที่มีการกรองแถบความถี่ย่าน 3.5 GHz, 5.5 GHz และ 7.5 GHz
 4.7 บทสรุป

4.2 ทฤษฎีและการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบไมโครสตริป

การออกแบบสายอากาศแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป มีองค์ประกอบสำคัญเพื่อใช้สำหรับการออกแบบสายอากาศ คือ การเลือกชนิดของวัสดุฐานรอง ทั้งนี้เพื่อนำคุณสมบัติของวัสดุฐานรอง มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) และความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบสายอากาศ การออกแบบสายอากาศและวิเคราะห์ผลการจำลองสายอากาศในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ใช้โปรแกรม CST- Microwave studio โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 คุณสมบัติของวัสดุและสูตรการคำนวณสายอากาศ

การเลือกใช้วัสดุฐานรอง ในการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นแบบ FR4 ซึ่งมีค่าคุณสมบัติดังนี้

- ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 4.3
- ค่า Loss tangent ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.02
- ความหนาของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร
- ค่าความนำของวัสดุตัวนำของทองแดง (σ) เท่ากับ 5.8×10^7 s/m
- ค่าความหนาของวัสดุตัวนำ t เท่ากับ 0.015 มิลลิเมตร

การออกแบบสายอากาศร่องในบัพที่มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศร่องให้ครอบคลุม WIMAX WLAN X-band และย่าน UWB โดยที่ความยาวรอบของร่องเป็นพารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ของการออกแบบสายอากาศแบบร่องที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป โดยเริ่มจากการออกแบบความกว้างของไมโครสตริป (W_m) โดยอ้างอิงกับความถี่ที่ต้องการออกแบบ ซึ่งความถี่ที่ออกแบบคือ 3.1 GHz สมการในการหาค่าความกว้างของไมโครสตริปแสดงดังสมการที่ (4.1)

$$\text{จาก } Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[\frac{W_m}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_m}{h} + 1.4440 \right) \right]} \quad (4.1)$$

จะได้

$$W_m = \frac{7.48 \times h}{e^{(Z_0 \sqrt{\epsilon_r + 1.41}) / 87}} - 1.25 \times t \quad (4.2)$$

$$= 1.496 \cong 1.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ W_m คือ ความกว้างของไมโครสตริป
 h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง
 ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
 Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณโคแอกเซียล คือ 50 โอห์ม

นำค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุฐานรองแทนลงไปในสมการที่ (4.1) ความกว้างของไมโครสตริป (W_m) มีค่าประมาณ 1.5 มิลลิเมตร นำค่าที่คำนวณได้ไปใช้ในการกำหนดความกว้างของไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ในการคำนวณโครงสร้างสายอากาศกำหนดความถี่ต่ำของย่าน UWB คือ f_r มีค่าเท่ากับ 3.1 GHz และใช้วัสดุฐานรองเป็น FR 4 นำคุณสมบัติมาใช้ในการ

ออกแบบสายอากาศตามสมการที่ (4.3) - (4.6)

1. คำนวณความกว้างของสายอากาศ

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4.3)$$

แทนค่าในสมการ (4.3) จะได้

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3.1^9} \sqrt{\frac{2}{4.3 + 1}} \cong 29.79 \text{ มิลลิเมตร}$$

2. คำนวณความยาวของสายอากาศ

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (4.4)$$

โดยที่

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_m} \right]^{-1/2} \quad (4.5)$$

$$= \frac{4.3 + 1}{2} + \frac{4.3 - 1}{2} \left(1 + \frac{12(0.8)}{1.5} \right)^{-1/2} = 3.27$$

และ

$$\Delta L = (0.412) \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W_m}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W_m}{h} + 0.8 \right)} h \quad (4.6)$$

$$= (0.412) \frac{(3.27 + 0.3) \left(\frac{1.5}{0.8} + 0.264 \right)}{(3.27 - 0.258) \left(\frac{1.5}{0.8} + 0.8 \right)} (0.8)$$

$$= 0.49 \text{ มิลลิเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าที่ได้แทนค่าใน (4.4) จะได้

$$\begin{aligned} L &= \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3.1 \times 10^9 \sqrt{3.27}} - 2 \times 0.49 \\ &= 26.77 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

เมื่อ

f_r คือ ความถี่ที่ต้องการออกแบบ

ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุฐานรอง

c คือ ความเร็วของแสงในอากาศ ประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของวัสดุฐานรอง

3. คำนวณขนาดร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากสมการพื้นฐาน ดังนี้

$$f_c = \frac{c}{\lambda_g \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4.7)$$

เมื่อ

f_c คือ ความถี่กลางของย่าน UWB

คำนวณหา f_c ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} f_c &= \frac{f_h + f_l}{2} \\ &= \frac{10.6 + 3.1}{2} = 6.85 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.7) สามารถคำนวณหาความยาวคลื่นสัมพัทธ์ (λ_g) ของสายอากาศร่องนี้ได้ดังนี้

$$\lambda_g = \frac{3 \times 10^8}{6.85 \times 10^9 \times \sqrt{3.27}} = 24.21 \text{ มิลลิเมตร}$$

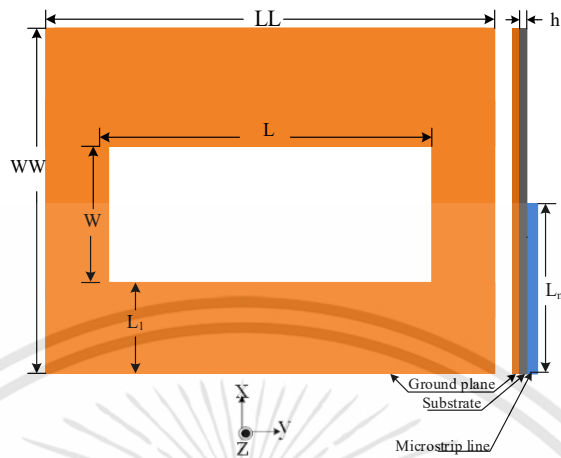
โดยค่าที่คำนวณได้ถูกนำมาใช้เป็นแนวทางในการปรับพารามิเตอร์ เพื่อให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ตลอดย่านความถี่ โดยใช้โปรแกรม CST-microwave studio เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

4.2.2 ผลการจำลองสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

การออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป เป็นการศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศ จากการคำนวณเบื้องต้นและทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในการออกแบบที่ความถี่ 3.1 GHz สำหรับโครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้ประกอบด้วยร่องกว้างรูปสี่เหลี่ยมบนระนาบกราวด์และในระนาบตรงข้ามเป็นสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่แมทซ์อิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม โครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

จากรูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

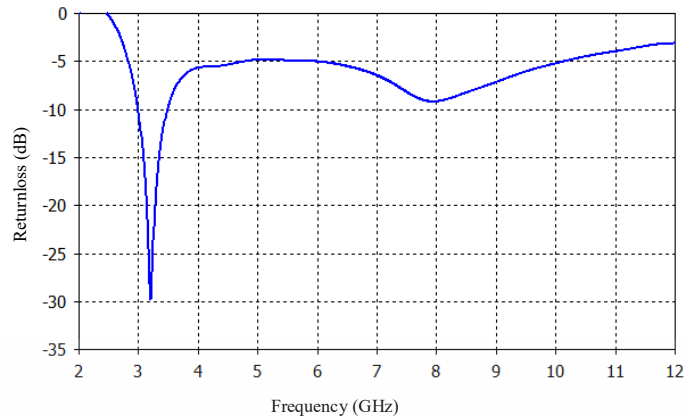
- L คือ ความยาวของร่อง
- W คือ ความกว้างของร่อง
- L_m คือ ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป
- W_m คือ ความกว้างสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป
- h คือ ค่าความหนาของวัสดุฐานรอง

การออกแบบสายอากาศร่องที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ในหัวข้อนี้เริ่มด้วยการออกแบบสายอากาศร่องที่ความถี่ 3.1 GHz จากการคำนวณเบื้องต้นและทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ผลการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ 3.1 GHz จากนั้นทำการปรับพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ค่าของพารามิเตอร์ที่ให้ผลที่ดีที่สุดของสายอากาศ แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริป

พารามิเตอร์	ขนาดสายอากาศแบบร่อง (มิลลิเมตร)	พารามิเตอร์	ขนาดสายอากาศแบบร่อง (มิลลิเมตร)
WW	27.00	L_m	07.70
LL	31.00	W_m	01.50
W	10.80	h	00.80
L	23.80	ϵ_r	04.30
L_1	07.10		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



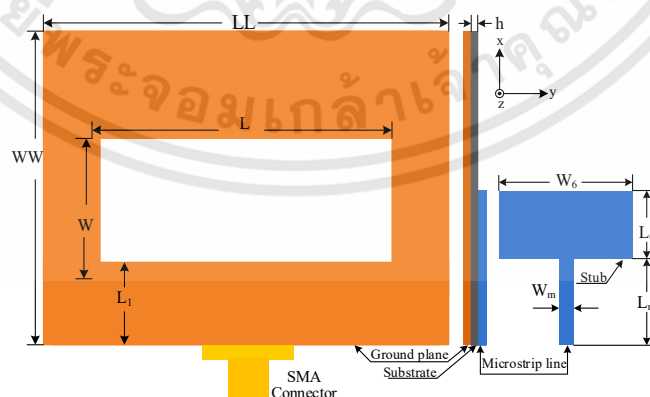
รูปที่ 4.2 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ -29.25 dB ที่ความถี่ 3.1 GHz มีค่าแบนด์วิดท์ เท่ากับ 0.402 GHz (2.912-3.314 GHz) จากคุณลักษณะของสายอากาศทำให้ทราบได้ว่า การปรับความกว้าง (L) และความยาว (W) ของร่องมีผลต่อการกำหนดความถี่ ส่วนการปรับความยาวของสายส่งสัญญาณ (L_m) มีผลต่อการปรับแมทซิ่ง ณ ความถี่ที่ต้องการ

จากผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ได้ออกแบบนั้น ผู้วิจัยได้นำผลและข้อมูลในเบื้องต้น มาพัฒนาเพื่อให้ได้สายอากาศย่าน UWB ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.3 การปรับปรุงแบนด์วิดท์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB

จากการศึกษารวบรวม พบว่าการออกแบบสายอากาศในย่านความถี่สูงเพื่อให้เป็นสายอากาศไมโครสตริปย่าน UWB นั้น การขยายแบนด์วิดท์สามารถทำได้โดยด้วยการเพิ่มสแต็บที่ปลายของไมโครสตริปซึ่งในหัวข้อนี้ผู้วิจัยใช้สแต็บรูปสี่เหลี่ยมเพิ่มบริเวณปลายของไมโครสตริป การแมทซิ่งอิมพีแดนซ์ที่ย่านความถี่สูงทำได้โดยการปรับความกว้างและความยาวของสแต็บ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปโดยการเพิ่มสแต็บสี่เหลี่ยมผืนผ้า

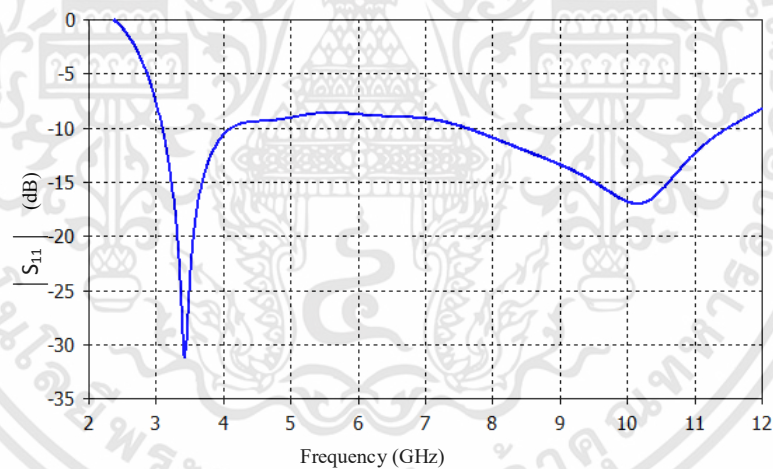
จากรูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริบโดยการเพิ่มสตัปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยกำหนดพารามิเตอร์ส่วนของสตัปดังต่อไปนี้

- L_m คือ ความยาวของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง
- L_6 คือ ความกว้างของสตัปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular stub) ตามแนวตั้ง
- W_m คือ ความกว้างขอบนอกของสายท่อนสั้น (Stub) ตามแนวตั้ง
- W_6 คือ ความยาวของสตัปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular stub) ตามแนวนอน

พารามิเตอร์ของสตัปรูปสี่เหลี่ยมจะถูกใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศ โดยมีค่าแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสตัปรูปสี่เหลี่ยม

พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)
L_m	07.70
L_6	05.35
W_m	01.50
W_6	10.70



รูปที่ 4.4 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริบโดยการเพิ่มสตัปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

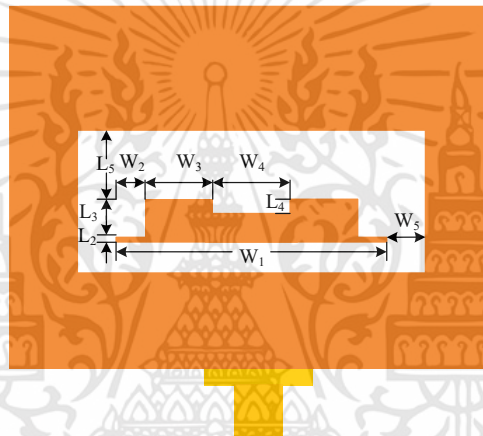
จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริบโดยการเพิ่มสตัปรูปสี่เหลี่ยม พบว่ามี 3 ช่วงความถี่ คือ ความถี่ที่หนึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 3.1 GHz ถึง 4.0884 GHz เป็นช่วงความถี่ที่แบนด์วิดท์มีค่า S_{11} ต่ำกว่า -10 dB (pass band) ช่วงความถี่ที่สอง ความถี่ตั้งแต่ 4.0884 GHz ถึง 7.6225 GHz โดยมีแบนด์วิดท์อยู่ที่ 3.5341 MHz มีค่า S_{11} สูงกว่า -10 dB (stop band) และช่วงที่สาม ความถี่ตั้งแต่ 7.6225 GHz ถึง 11.491 GHz เป็นช่วงความถี่ที่แบนด์วิดท์มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ ต่ำกว่า -10 dB (pass band)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับดังกล่าวทำให้ทราบว่าสายอากาศมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการพัฒนาสายอากาศสองแบนด์ให้เป็นสายอากาศย่าน UWB ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและพัฒนาสายอากาศเพื่อทำการปรับปรุงแบนด์วิดท์ของสายอากาศในช่วงดังกล่าวให้มีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ด้วยการเพิ่มตัวนำรูปพัลส์ พารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวนำรูปพัลส์ แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.4 การศึกษาผลกระทบการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการพัฒนาสายอากาศแบบสองแบนด์ให้เป็นสายอากาศย่าน UWB ด้วยการเพิ่มตัวนำรูปพัลส์ ไปในร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากนั้นทำการศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสายอากาศ โดยสายอากาศต่อไปนี้เรียกว่า สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 โครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปรับปรุงแบนด์วิดท์ด้วยการแทรกตัวนำรูปพัลส์

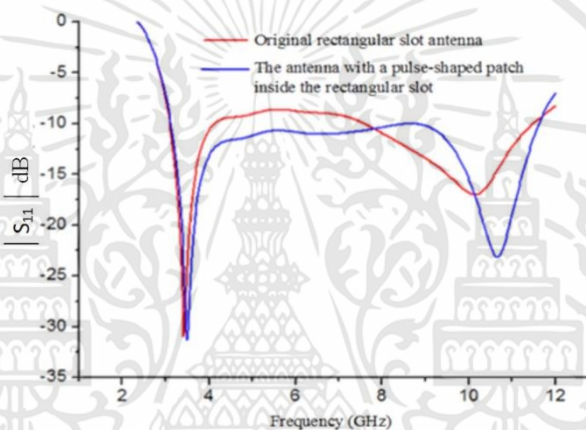
จากรูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปรับปรุงแบนด์วิดท์ด้วยการแทรกตัวนำรูปพัลส์ที่สมมาตร โดยกำหนดพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- W_1 คือ ความยาวขอบนอกด้านล่างของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวนอน
- W_2 คือ ความยาวขอบนอกด้านซ้ายและด้านขวาของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวนอน
- W_3 คือ ความยาวขอบนอกด้านบนซ้ายของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวนอน
- W_4 คือ ความยาวขอบนอกตรงกลางของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวนอน
- W_5 คือ ระยะระหว่างขอบด้านข้างของแพทช์รูปพัลส์กับขอบของร่อง
- L_2 คือ ความกว้างขอบนอกด้านล่างของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวตั้ง
- L_3 คือ ความกว้างขอบนอกด้านบนของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวตั้ง
- L_4 คือ ความกว้างขอบในตรงกลางของแพทช์รูปพัลส์
- L_5 คือ ระยะระหว่างขอบบนของแพทช์รูปพัลส์กับขอบร่อง

พารามิเตอร์ข้างต้นถูกใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำรูปพัลส์เพื่อปรับปรุงแบนด์วิดท์ของสายอากาศที่นำเสนอ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวนำรูปพัลส์

พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)	พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)
W_1	18.40	L1	07.10
W_2	02.40	L2	00.50
W_3	04.40	L3	03.10
W_4	05.60	L4	01.30
W_5	02.35	L5	04.90



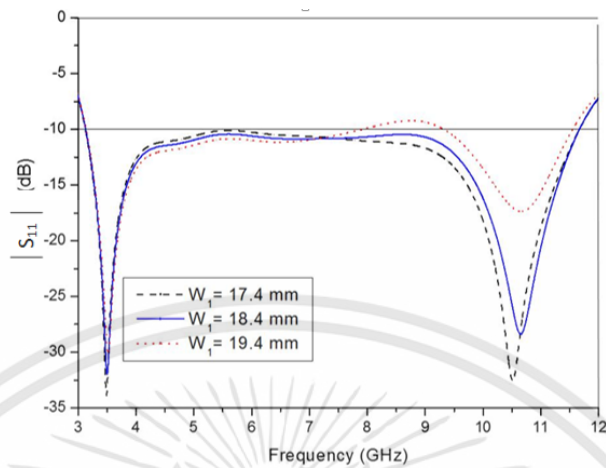
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแทรกตัวนำแพทช์รูปพัลส์

รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแทรกตัวนำแพทช์รูปพัลส์ย่าน UWB (The antenna with a pulses-shaped patch inside the rectangular slot) กับสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Original rectangular slot) จากผลการจำลองพบว่าในช่วงความถี่ 4.2 GHz ถึง 7.3 GHz ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่ามากกว่า -10 dB ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงแบนด์วิดท์ในช่วงความถี่ดังกล่าวด้วยการเพิ่มตัวนำแพทช์รูปพัลส์ในร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพบว่า สามารถปรับปรุงแบนด์วิดท์ให้ช่วงความถี่ดังกล่าวมีค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ดังรูป ดังนั้นเพื่อศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ จึงได้ทำการศึกษาการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรายละเอียดหัวข้อต่อไปนี้

4.4.1 กรณีปรับความยาวขอบนอกด้านล่างของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวนอน (W_1)

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศร่องที่มีการแทรกตัวนำรูปพัลส์ในกรณีแรกเป็นการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศโดยการปรับความยาวขอบนอกด้านล่างของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวนอน (W_1) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นในเบื้องต้นให้คงที่ตามตารางที่

4.3 โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_1 เท่ากับ 18.4 มิลลิเมตร 18.6 มิลลิเมตร และ 18.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองการปรับค่าจำนวน 3 ค่าแสดงดังรูปที่ 4.7

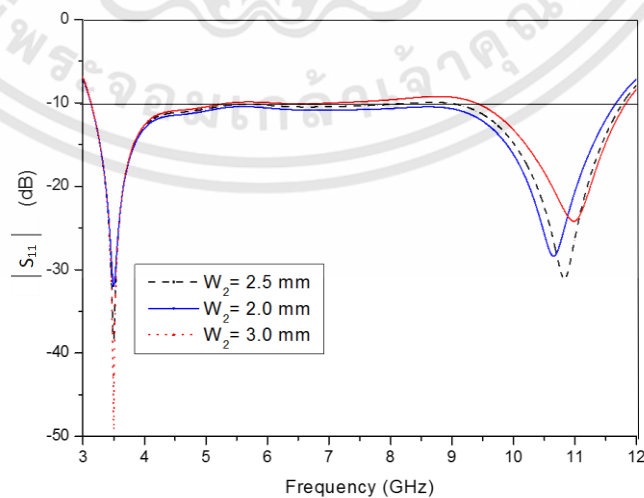


รูปที่ 4.7 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ W_1

จากรูปที่ 4.7 แสดงการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ W_1 พบว่ามีผลต่อแมทซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์ที่ความถี่สูง จากกราฟผลที่เหมาะสมที่สุดคือ W_1 เท่ากับ 18.4 มิลลิเมตร นำค่าที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

4.4.2 กรณีปรับความยาวขอบนอกด้านซ้ายและด้านขวาของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวนอน (W_2)

กรณีปรับความยาวขอบนอกด้านซ้ายและด้านขวาของแพทช์รูปพัลส์ ตามแนวนอน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นให้มีค่าคงที่ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_2 เท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร 2.5 มิลลิเมตร และ 3.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองในการปรับค่าความยาวขอบนอกด้านซ้ายและด้านขวาของแพทช์รูปพัลส์ ตามแนวนอน (W_2) แสดงดังรูปที่ 4.8



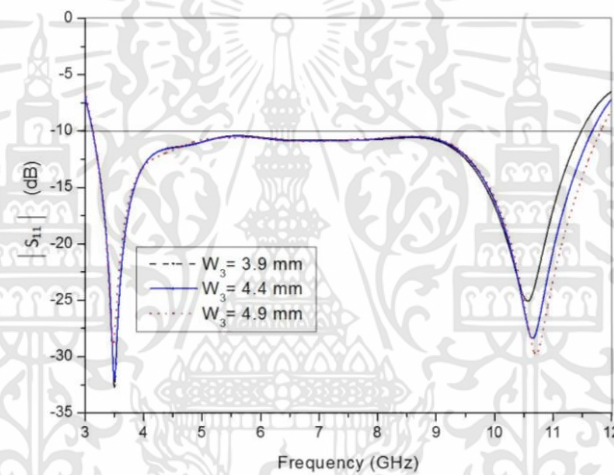
รูปที่ 4.8 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ W_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงการสูญเสียย้อนกลับในกรณีปรับพารามิเตอร์ W_2 จากผลการจำลองจากการปรับค่าความยาวขอบนอกด้านซ้ายและด้านขวาของแพทช์รูปสี่เหลี่ยม ตามแนวนอน พบว่ามีผลต่อแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ย่านความถี่ต่ำและทางด้านความถี่สูง ดังนั้น จึงนำค่าความยาวขอบนอกด้านซ้ายและด้านขวาของแพทช์รูปสี่เหลี่ยม ตามแนวนอน ที่มีผลที่เหมาะสมที่สุดคือ W_2 เท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร ไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

4.4.3 กรณีปรับความยาวขอบนอกด้านบนซ้ายของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมตามแนวนอน (W_3)

ในหัวข้อนี้ทำการศึกษาการปรับความยาวขอบนอกด้านบนซ้ายของแพทช์รูปสี่เหลี่ยม ตามแนวนอน (W_3) โดยนำค่าพารามิเตอร์ W_2 เท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร มาใช้ในการวิเคราะห์ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตาราง 3.3 มีค่าคงที่ ในกรณีนี้ จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_3 โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3.9 มิลลิเมตร 4.4 มิลลิเมตร และ 4.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ W_3

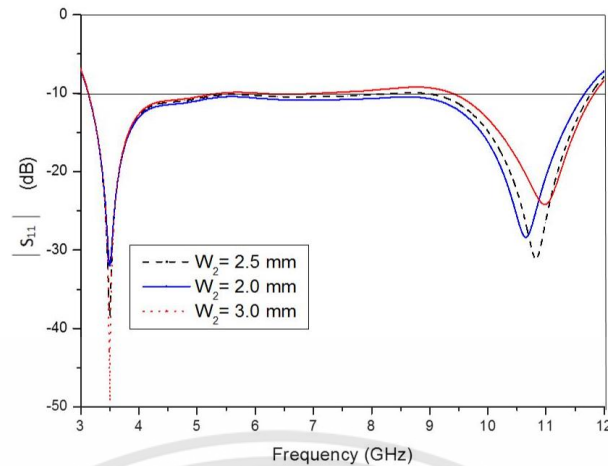
จากรูปที่ 4.9 แสดงการสูญเสียย้อนกลับกรณีการปรับความยาวปรับความยาวขอบนอกด้านบนซ้ายของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมตามแนวนอน (W_3) พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 4.4 มิลลิเมตร ดังนั้นนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.4.4 กรณีปรับความกว้างขอบนอกด้านล่างของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมตามแนวตั้ง (L_2)

การปรับความกว้างขอบนอกด้านล่างของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมตามแนวตั้ง (L_2) โดยนำผลของค่าพารามิเตอร์ W_1 , W_2 และ W_3 ซึ่งได้จากการจำลองที่ผ่านมา มาใช้วิเคราะห์โดยให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ในตารางที่ 3.3 คงที่ และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_2 เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร และ 0.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.10

จากรูปที่ 4.10 แสดงการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับปรับความกว้างขอบนอกด้านล่างของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมตามแนวตั้ง (L_2) พบว่าการปรับความกว้างของพารามิเตอร์ L_2 มีผลต่อแมตซ์ซึ่งทางด้านความถี่สูง ค่าที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นค่าที่สะดวกต่อการนำไปสร้างจริง ดังนั้นจึงนำค่านี้ไปใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์ในหัวข้อต่อไป

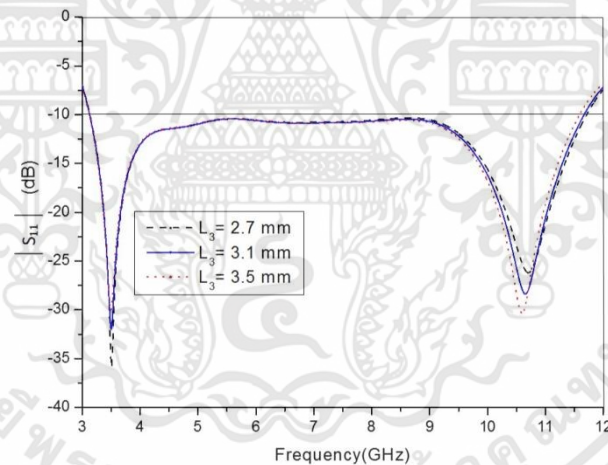
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ L_2

4.4.5 กรณีปรับความกว้างขอบนอกด้านบนของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวตั้ง (L_3)

การศึกษากรณีปรับความกว้างขอบนอกด้านบนของแพทช์รูปพัลส์ ตามแนวตั้ง (L_3) กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ในตารางที่ 4.3 คงที่และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_3 เท่ากับ 2.7 มิลลิเมตร 3.1 มิลลิเมตร และ 3.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลที่ได้จากการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ L_3

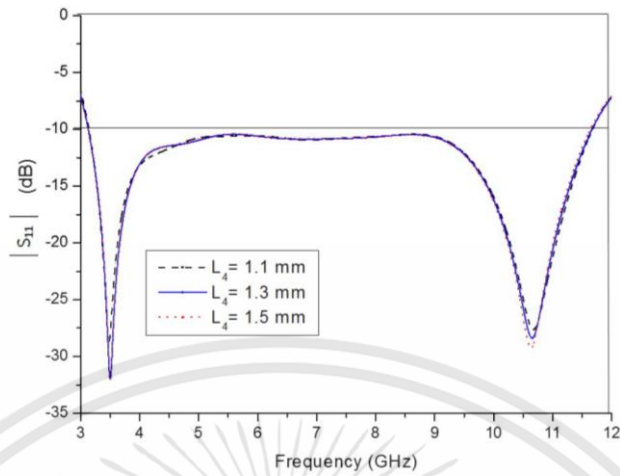
รูปที่ 4.11 แสดงการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างขอบในของสายท่อนสั้นความกว้างขอบนอกด้านบนของแพทช์รูปพัลส์ ตามแนวตั้ง (L_3) จากผลการจำลองพบว่าการปรับความกว้างขอบนอกด้านบนของแพทช์รูปพัลส์ ตามแนวตั้ง (L_3) มีผลการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ค่าที่พารามิเตอร์ L_3 ที่ดีที่สุดคือ 3.1 มิลลิเมตร ซึ่งจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

4.4.6 กรณีปรับความกว้างขอบในตรงกลางของแพทช์รูปพัลส์ตามแนวตั้ง (L_4)

การศึกษาปรับความกว้างขอบในตรงกลางของแพทช์รูปพัลส์ ตามแนวตั้ง (L_4) โดยนำผลของค่าพารามิเตอร์ จากการจำลองที่ผ่านมาและทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_4 เท่ากับ 1.1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแสดงในรูปที่ 4.12

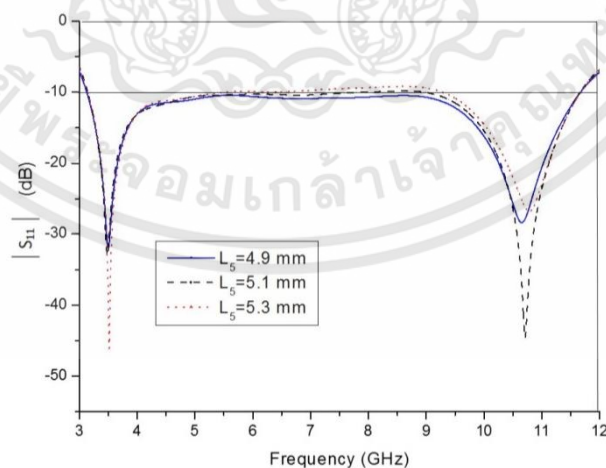


รูปที่ 4.12 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ L_4

รูปที่ 4.12 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) กรณีปรับพารามิเตอร์ L_4 โดยทำการปรับทีละ 0.2 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 1.1 มิลลิเมตร ถึง 1.5 มิลลิเมตร จากผลการจำลองเมื่อปรับพารามิเตอร์ L_4 พบว่ามีผลต่อการแมทซ์อิมพีแดนซ์ย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงเพียงเล็กน้อย ซึ่งค่าเหมาะสมของพารามิเตอร์ L_4 คือ 1.3 มิลลิเมตร เพื่อนำไปจำลองพารามิเตอร์ในหัวข้อต่อไป

4.4.7 กรณีระยะระหว่างขอบบนของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมกับขอบร่อง (L_5)

การศึกษาการปรับระยะระหว่างขอบบนของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมกับขอบร่อง (L_5) โดยนำผลค่าพารามิเตอร์ที่ได้การจำลองจากข้างต้นและทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_5 เท่ากับ 4.9 มิลลิเมตร 5.1 มิลลิเมตร และ 5.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแสดงในรูปที่ 4.13

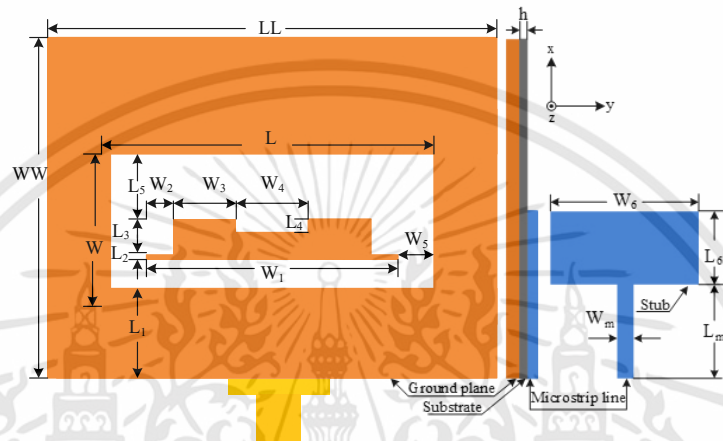


รูปที่ 4.13 การสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ L_5

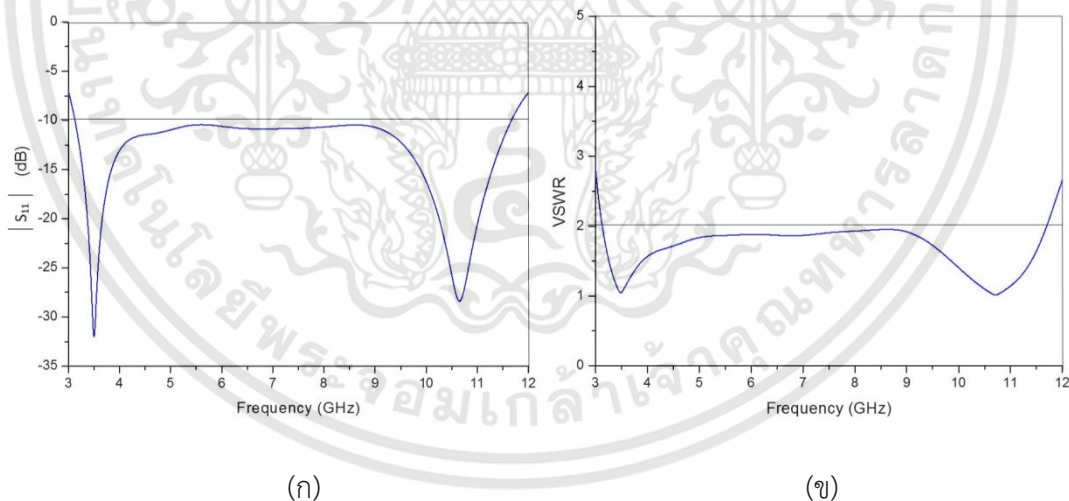
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับพบวาระยะระหว่างขอบบนของแพทช์รูปพัลส์กับขอบร่อง (L_5) มีผลต่อการทำแมทซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ดังนั้นค่า L_5 ที่เหมาะสมที่สุดมีค่า 4.9 มิลลิเมตร

ต่อมาผู้วิจัยได้นำผลการจำลองพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของสายอากาศ มาทำการปรับให้ได้ผลที่ดี เพื่อรองรับย่าน UWB และนำผลที่ได้ไปทำการพัฒนาเป็นสายอากาศต้นแบบเพื่อนำไปใช้งานในการออกแบบเป็นสายอากาศสามแบนด์นอตช์ ดังแสดงดังรูปที่ 4.14 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ได้ตามตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.14 โครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแทรกตัวนำรูปพัลส์



รูปที่ 4.15 ผลการจำลองสายอากาศ (ก) การสูญเสียย้อนกลับ (ข) VSWR

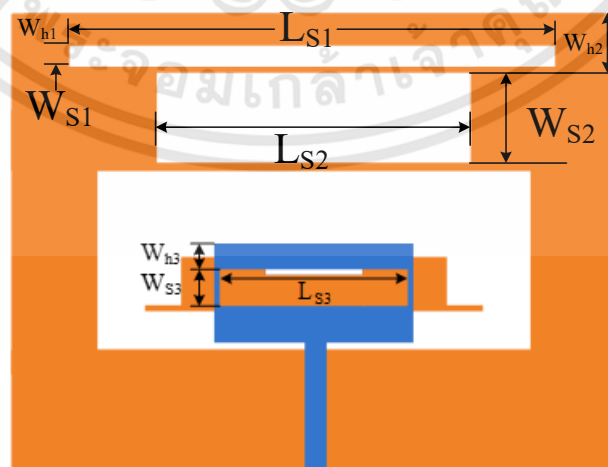
จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการจำลองของสายอากาศ (ก) ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปรับปรุงแบนด์วิดท์ด้วยการเพิ่มตัวนำรูปพัลส์ที่สมมาตร จากผลการจำลองเห็นได้ว่าสายอากาศมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 8.72 GHz ครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 3.10 – 11.82 GHz ทำให้สายอากาศที่นำเสนอมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมย่าน UWB (ข) ผลอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศ ดังนั้นสายอากาศนี้สามารถนำไปใช้งานสำหรับการสื่อสารย่าน UWB เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบย่าน UWB

พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)	พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)
WW	27.00	W_1	18.40
LL	31.00	W_2	02.00
W	10.80	W_3	04.40
L	23.80	W_4	05.60
L_1	07.10	W_5	02.35
L_m	07.70	L_2	00.50
h	00.80	L_3	03.10
L_6	05.35	L_4	01.30
W_m	01.50	L_5	04.90
W_6	10.70		

4.5 สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์

ในหัวข้อนี้ ดำเนินการนอตช์ความถี่ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ประกอบด้วยร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวนสองร่องบนระนาบกราวด์และร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เจาะบนระนาบการแพร่กระจายคลื่น โดยร่องด้านบนเป็นการเจาะเพื่อวัตถุประสงค์ให้เกิดแบนด์นอตช์ความถี่ที่ 3.5 GHz, ร่องที่สองเป็นการเจาะเพื่อวัตถุประสงค์ให้เกิดแบนด์นอตช์ที่ความถี่ 5.5 GHz และร่องที่สามเป็นการเจาะเพื่อวัตถุประสงค์ให้เกิดแบนด์นอตช์ที่ความถี่ 7.5 GHz ซึ่งในส่วนนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการความถี่แบนด์นอตช์และคุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบสามแบนด์นอตช์ดังแสดงโครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 โครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบสามแบนด์นอตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 แสดงโครงสร้างสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามแบนด์นอตช์ ทำการเจาะรูรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองร่องบนระนาบกราวด์ โดยร่องที่หนึ่งอยู่บริเวณด้านบนบนสุดของระนาบกราวด์ส่วนร่องที่สองอยู่ถัดลงมาจากร่องที่หนึ่งและร่องที่สามทำการเจาะบนระนาบการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งการเจาะร่องทั้งสามร่องนี้มีรูปแบบลักษณะทางโครงสร้างที่คล้ายกันแตกต่างกันเพียงขนาดความกว้างและความยาวเท่านั้น โดยกำหนดพารามิเตอร์ดังนี้

L_{L1} คือ ความยาวจากขอบร่องของแบนด์นอตช์เดี่ยวด้านขวาถึงขอบของระนาบกราวด์ด้านขวา

L_{S1} คือ ความยาวของร่องตามแนวแกน y ที่นอตช์ย่านความถี่ WiMAX

L_{S2} คือ ความยาวของร่องตามแนวแกน y ที่นอตช์ย่านความถี่ WLAN

L_{S3} คือ ความยาวของร่องตามแนวแกน y ที่นอตช์ย่านความถี่ X-band

W_{S1} คือ ความกว้างร่องที่นอตช์ย่านความถี่ WiMAX

W_{S2} คือ ความกว้างร่องที่นอตช์ย่านความถี่ WLAN

W_{S3} คือ ความกว้างร่องที่นอตช์ย่านความถี่ X-band

W_{h1} คือ ความกว้างจากขอบร่องที่นอตช์ย่านความถี่ WiMAX ด้านบนถึงขอบของระนาบกราวด์ด้านบนสุด

W_{h2} คือ ความกว้างจากขอบร่องที่นอตช์ย่านความถี่ WLAN ด้านบนถึงขอบของระนาบกราวด์ด้านบนสุด

W_{h3} คือ ความกว้างจากขอบร่องที่นอตช์ย่านความถี่ X-band ด้านบนถึงขอบของระนาบการแพร่กระจายคลื่นด้านบนสุด

การคำนวณออกแบบสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ คำนวณได้จากสมการพื้นฐาน คือ

$$f_n = \frac{c}{\lambda_{gn} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4.3)$$

เมื่อ f_n คือ ความถี่กลางของย่านความถี่นอตช์ สำหรับย่าน WiMAX เท่ากับ 3.5 GHz
ย่าน WLAN เท่ากับ 5.5 GHz และ ย่าน X-band เท่ากับ 7.5 GHz

λ_{gn} คือ ความยาวคลื่นของความถี่นอตช์

ดังนั้น

ที่ความถี่ 3.5 GHz ย่าน WiMAX

จะได้ความยาวคลื่นของความถี่นอตช์ $\lambda_{gn-3.5}$ เท่ากับ 47.43 มิลลิเมตร

ที่ความถี่ 5.5 GHz ย่าน WLAN

จะได้ความยาวคลื่นของความถี่นอตช์ $\lambda_{gn-5.5}$ เท่ากับ 30.18 มิลลิเมตร

ที่ความถี่ 7.5 GHz ย่าน WLAN

จะได้ความยาวคลื่นของความถี่นอตช์ $\lambda_{gn-7.5}$ เท่ากับ 22.13 มิลลิเมตร

และเนื่องจากความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กับขนาดของช่องเปิดของย่านความถี่นอตช์

นั่นคือ $\lambda_{gn} = 2L_{gn}$ ดังนั้นจะได้ว่า

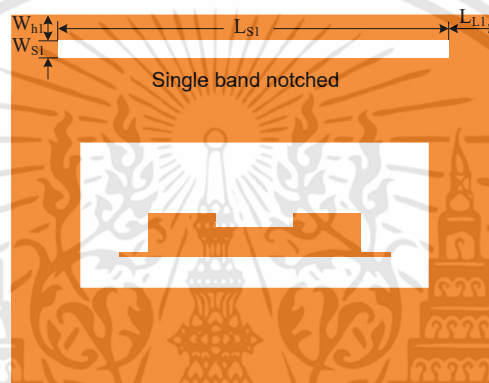
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_n = \frac{c}{2 L_{gn} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4.4)$$

- เมื่อ $L_{gn-3.5}$ คือ ความยาวของร่องที่ notch ความถี่ในย่าน WiMAX
 $L_{gn-5.5}$ คือ ความยาวของร่องที่ notch ความถี่ในย่าน WLAN
 $L_{gn-7.5}$ คือ ความยาวของร่องที่ notch ความถี่ในย่าน X-band

4.5.1 การออกแบบการ notch ความถี่ 3.5 GHz ในย่าน WiMAX

การออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB ที่มีการ notch ย่านความถี่ WiMAX โดยการเจาะร่องบนระนาบกราวด์ โครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 โครงสร้างสายอากาศที่มีการ notch ย่าน WiMAX บนระนาบกราวด์ของสายอากาศต้นแบบ

การออกแบบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อการ notch ในย่าน WiMAX สามารถคำนวณขนาดของร่องได้จากสมการ

$$f_{n-3.5} = \frac{c}{\lambda_{gn-3.5} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

- เมื่อ $f_{n-3.5}$ คือ ความถี่กลางของย่านความถี่ notch สำหรับย่าน WiMAX เท่ากับ 3.5 GHz
 $\lambda_{gn-3.5}$ คือ ความยาวคลื่นของความถี่ notch สำหรับย่าน WiMAX

ดังนั้น จะได้ความยาวคลื่นของความถี่ notch $\lambda_{gn-3.5}$ เท่ากับ 47.43 มิลลิเมตร และความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับขนาดของร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั่นคือ $\lambda_{gn-3.5} = 2L_{gn-3.5}$ ดังนี้

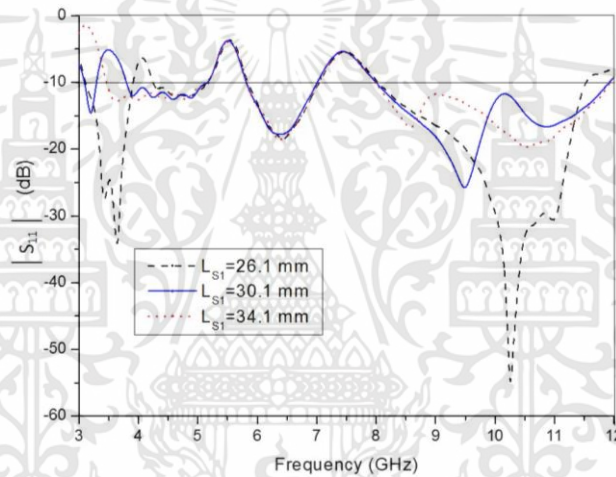
$$f_{n-3.5} = \frac{c}{2 L_{gn-3.5} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

- เมื่อ $L_{gn-3.5}$ คือ ความยาวของเส้นรอบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ notch ความถี่สำหรับย่าน WiMAX

จากการคำนวณหาขนาดร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียบร้อย จึงทำการปรับขนาดของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ความถี่นอตช์ที่เหมาะสมที่สุด ด้วยการจำลองโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรมดังนี้

4.5.1.1 ผลกระทบจากการปรับความยาวของร่องตามแนวแกน y (L_{S1}) สามแบนด์นอตช์ ที่ 3.5 GHz

การศึกษาผลกระทบจากการปรับความยาวของร่อง (L_{S1}) ที่ความถี่ 3.5 GHz บนโครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามแบนด์นอตช์โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ ดังนี้ W_{h3} มีค่าเท่ากับ 1.25 มิลลิเมตร, W_{h2} มีค่าเท่ากับ 1.25 มิลลิเมตร, W_{h1} มีค่าเท่ากับ 2.40 มิลลิเมตร, W_{S1} มีค่าเท่ากับ 4.20 มิลลิเมตร, พารามิเตอร์ L_{S2} มีค่าเท่ากับ 17.50 มิลลิเมตร และพารามิเตอร์ W_{S2} มีค่าเท่ากับ 4.80 มิลลิเมตร จากนั้นทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_{S1} จำนวน 3 ค่าดังนี้ L_{S1} เท่ากับ 26.10 มิลลิเมตร, 30.10 มิลลิเมตร และ 34.10 มิลลิเมตรตามลำดับ ผลกระทบจากการปรับพารามิเตอร์ L_{S1} เป็นไปดังรูปที่ 4.17



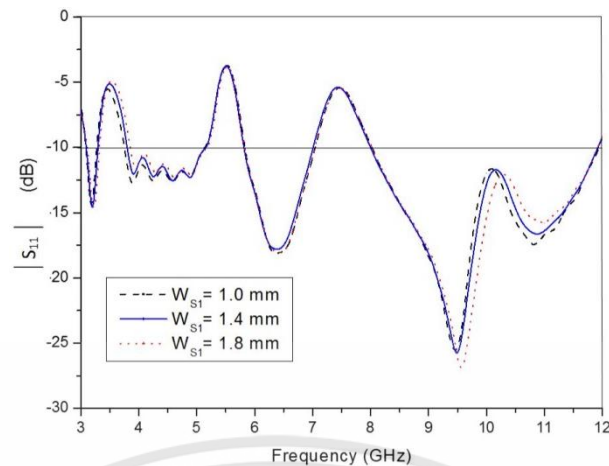
รูปที่ 4.18 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความยาวของร่องตามแนวแกน y (L_{S1}) ที่ความถี่ 3.5 GHz

จากรูปที่ 4.18 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับพารามิเตอร์ L_{S1} ที่ความถี่ 3.5 GHz ของสายอากาศแบบสามแบนด์นอตช์พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ L_{S1} เพิ่มความยาวมากขึ้นมีผลต่อการเลื่อนความถี่นอตช์ไปทางด้านความถี่สูง ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ L_{S1} ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 30.1 มิลลิเมตร ซึ่งจะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ห้วงข้อถัดไป

4.5.1.2 ผลกระทบจากการปรับความกว้างร่องของสามแบนด์นอตช์ (W_{S1}) ที่ความถี่ 3.5 GHz

การปรับความกว้างของร่องสามแบนด์นอตช์ (W_{S1}) ที่ความถี่ 3.5 GHz บนโครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามแบนด์นอตช์โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ จากนั้นทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_{S1} จำนวน 3 ค่าดังนี้ W_{S1} เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร, 1.4 มิลลิเมตร และ 1.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลกระทบจากการปรับพารามิเตอร์ W_{S1} เป็นไปดังรูปที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างร่องของสามแบนด์นอตช์ (W_{S1}) ที่ความถี่ 3.5 GHz

จากรูปที่ 4.19 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างร่องของสามแบนด์นอตช์ (W_{S1}) ที่ความถี่ 3.5 GHz พบว่าเมื่อพารามิเตอร์มีค่าสูงเพิ่มมากขึ้นทำให้แบนด์วิดท์ของนอตช์เพิ่มขึ้น และค่าความกว้างร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เหมาะสมคือ 1.4 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ สำหรับการนอตช์ ที่ความถี่ 3.5 GHz

พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)
W_{h1}	02.40
L_{S1}	30.00
W_{S1}	01.40

จากผลการจำลองเพื่อหาขนาดร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เหมาะสมที่สุดในการนอตช์ความถี่สำหรับย่าน WiMAX พบว่าขนาดพารามิเตอร์จากการปรับความยาวร่องมีผลต่อการทำนอตช์ความถี่มากที่สุด คือความยาวของร่อง L_{S1} ดังนั้นสามารถเขียนสมการความถี่นอตช์ได้ดังนี้

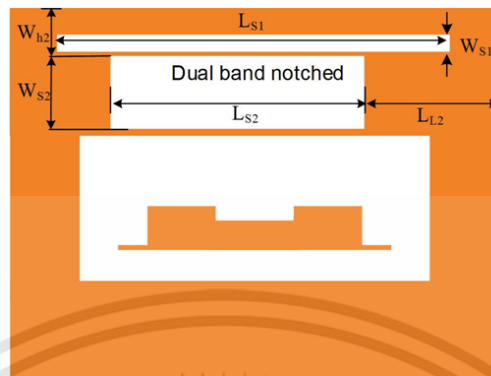
$$f_{n-3.5} = \frac{c}{(0.76(2 L_{gn-3.5}) \sqrt{\epsilon_{eff}})}$$

โดยที่ $L_{gn-3.5}$ คือ ความยาวของเส้นรอบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า L_{S1} และความยาวร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใช้สร้างจริงมีขนาด $L_{gn-3.5} = 0.66 L_{S1}$

4.5.2 การออกแบบการนอตช์ความถี่ 5.5 GHz ในย่าน WLAN

ในหัวข้อนี้ กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ WLAN โดยการเจาะร่องเพิ่มบนระนาบกราวด์ถัดลงมาจากร่องด้านบน ด้วยโครงสร้างเดิม โครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่มีการนอตช์ย่าน WiMAX และ WLAN แสดงดังรูปที่ 4.20

พารามิเตอร์ของร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เพิ่มได้แก่พารามิเตอร์ L_{S2} พารามิเตอร์ W_{S2} พารามิเตอร์ W_{h2} และพารามิเตอร์ L_{L2} โดยยังคงขนาดพารามิเตอร์เดิมที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อก่อนหน้าไว้



รูปที่ 4.20 โครงสร้างสายอากาศที่มีการนอตช์ย่าน WLAN บนระนาบกราวด์ของสายอากาศต้นแบบ

การออกแบบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อการนอตช์ในย่าน WLAN สามารถคำนวณขนาดของร่องได้จากสมการ

$$f_{n-5.5} = \frac{c}{\lambda_{gn-5.5} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

เมื่อ $f_{n-5.5}$ คือ ความถี่กลางของย่านความถี่นอตช์ สำหรับย่าน WLAN เท่ากับ 5.5 GHz
 $\lambda_{gn-5.5}$ คือ ความยาวคลื่นของความถี่นอตช์ สำหรับย่าน WLAN

ดังนั้น จะได้ความยาวคลื่นของความถี่นอตช์ $\lambda_{gn-5.5}$ เท่ากับ 30.18 มิลลิเมตร และความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับขนาดของร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั่นคือ $\lambda_{gn-5.5} = 2L_{gn-5.5}$ ดังนี้

$$f_{n-5.5} = \frac{c}{2 L_{gn-5.5} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

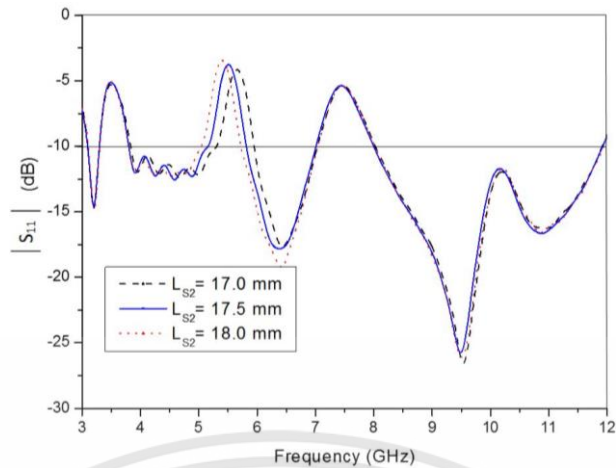
เมื่อ $L_{gn-5.5}$ คือ ความยาวของเส้นรอบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่นอตช์ความถี่สำหรับย่าน WLAN

จากการคำนวณหาขนาดร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียบร้อยแล้ว จึงทำการปรับขนาดของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ความถี่นอตช์ที่เหมาะสมที่สุด ด้วยการจำลองโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรมดังนี้

4.5.2.1 ผลกระทบจากการปรับความยาวของร่องตามแนวแกน y (L_{S2}) สามแบนด์นอตช์ ที่ความถี่ 5.5 GHz

การศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์จากสายอากาศสามแบนด์นอตช์ กรณีปรับความยาวของร่อง (L_{S2}) ที่ความถี่ 5.5 GHz โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ ปรับค่าพารามิเตอร์ L_{S2} จำนวน 3 ค่าดังนี้ L_{S2} เท่ากับ 17.0 มิลลิเมตร, 17.5 มิลลิเมตร และ 18.0 มิลลิเมตรตามลำดับ ผลจากการปรับพารามิเตอร์ L_{S2} เป็นไปตามรูปที่ 4.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

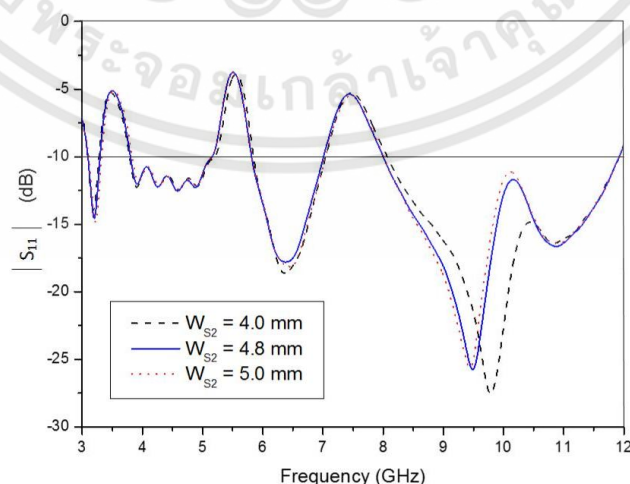


รูปที่ 4.21 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความยาวของร่องตามแนวแกน y (L_{S2}) ที่ความถี่ 5.5 GHz

จากรูปที่ 4.21 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความยาวของร่องตามแนวแกน y (L_{S2}) ที่ความถี่ 5.5 GHz จากผลการจำลองเมื่อปรับขนาดความยาวให้เพิ่มมากขึ้นนั้น มีผลต่อการเลื่อนความถี่เรโซแนนซ์ จากรูปเมื่อเพิ่มความยาวเพิ่มขึ้นความถี่เรโซแนนซ์จะเลื่อนไปทางด้านความถี่สูง จากผลการจำลองในครั้งนี้ ค่าพารามิเตอร์ L_{S2} ที่เหมาะสมกับสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองแบนด์นอตซ์อยู่ที่ 17.5 มิลลิเมตร เพื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ใช้ในหัวข้อถัดไป

4.5.2.2 ผลกระทบจากการปรับความกว้างร่องของสามแบนด์นอตซ์ (W_{S2}) ที่ความถี่ 5.5 GHz

การปรับความกว้างของร่องสองแบนด์นอตซ์ (W_{S2}) ที่ความถี่ 5.5 GHz บนโครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองแบนด์นอตซ์โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ จากนั้นทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_{S2} จำนวน 3 ค่าดังนี้ W_{S2} เท่ากับ 4.0 มิลลิเมตร, 4.5 มิลลิเมตร และ 4.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลกระทบจากการปรับพารามิเตอร์ W_{S2} เป็นไปดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.22 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างร่อง (W_{S2}) ที่ความถี่ 5.5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างร่องของสามแบนด์นอตช์ (W_{S2}) ที่ความถี่ 5.5 GHz พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ W_{S2} มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้น ดังนั้นค่าที่เหมาะสมคือ 4.8 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ สำหรับการนอตช์ ที่ความถี่ 5.5 GHz

พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)
W_{h2}	04.20
L_{S2}	17.50
W_{S2}	04.80

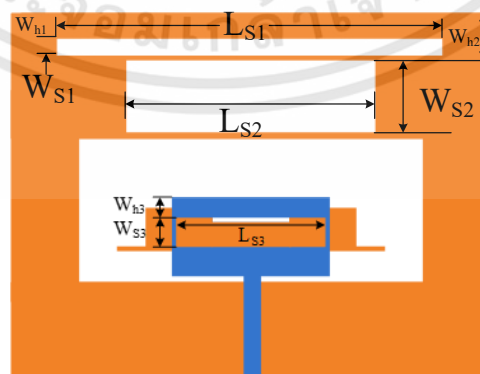
จากผลการจำลองเพื่อหาขนาดร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เหมาะสมที่สุดในการนอตช์ความถี่สำหรับย่าน WLAN พบว่าพารามิเตอร์จากการปรับที่มีผลต่อการทำนอตช์ความถี่ คือพารามิเตอร์ L_{S2} และ W_{S2} ดังนั้นสามารถเขียนสมการความถี่นอตช์ได้ดังนี้

$$f_{n-5.5} = \frac{c}{(0.68(2 L_{gn-5.5}) \sqrt{\epsilon_{eff}})}$$

โดยที่ $L_{gn-5.5}$ คือ ความยาวของเส้นรอบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า L_{S1} และความยาวร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใช้สร้างจริงมีขนาด $L_{gn-5.5} = 0.74 L_{gn-5.5}$

4.5.3 การออกแบบการนอตช์ความถี่ 7.5 GHz ในย่าน X-band

หัวข้อนี้ กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB ที่มีการนอตช์ย่านความถี่ X-band ซึ่งเป็นระบบการสื่อสารดาวเทียมสำหรับกิจการทหาร โดยการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพิ่มบนระนาบการแพร่กระจายคลื่น ด้วยโครงสร้างเดิม โครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่มีการนอตช์ย่าน WiMAX ย่าน WLAN และย่าน X-band แสดงดังรูปที่ 4.23 พารามิเตอร์ของร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เพิ่มได้แก่พารามิเตอร์ L_{S3} พารามิเตอร์ W_{S3} และพารามิเตอร์ W_{h3} โดยยังคงขนาดพารามิเตอร์เดิมที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อก่อนหน้าไว้



รูปที่ 4.23 โครงสร้างสายอากาศที่มีการนอตช์ย่าน X-band บนระนาบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อการนอตซีในย่าน X-band สามารถคำนวณขนาดของร่องได้จากสมการ

$$f_{n-7.5} = \frac{c}{\lambda_{gn-7.5} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

เมื่อ $f_{n-7.5}$ คือ ความถี่กลางของย่านความถี่นอตซี สำหรับย่าน X-band เท่ากับ 7.5 GHz
 $\lambda_{gn-7.5}$ คือ ความยาวคลื่นของความถี่นอตซี สำหรับย่าน X-band

ดังนั้น จะได้ความยาวคลื่นของความถี่นอตซี $\lambda_{gn-7.5}$ เท่ากับ 22.13 มิลลิเมตร และความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับขนาดของร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั่นคือ $\lambda_{gn-7.5} = 2L_{gn-7.5}$ ดังนี้

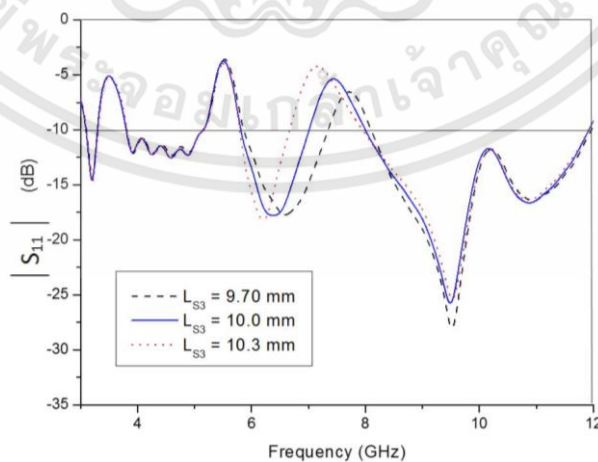
$$f_{n-7.5} = \frac{c}{2 L_{gn-7.5} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

เมื่อ $L_{gn-7.5}$ คือ ความยาวของเส้นรอบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่นอตซีความถี่สำหรับย่าน X-band

จากการคำนวณหาขนาดร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียบร้อยแล้ว จึงทำการปรับขนาดของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ความถี่นอตซีที่เหมาะสมที่สุด ด้วยการจำลองโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรมดังนี้

4.5.3.1 ผลกระทบจากการปรับความยาวของร่องตามแนวแกน y (L_{S3}) สามแบนด์นอตซี ที่ความถี่ 7.5 GHz

การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์จากสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามแบนด์นอตซีกรณีจากการปรับความยาวของร่อง (L_{S3}) ที่ความถี่ 7 GHz โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ จากนั้นทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_{S2} จำนวน 3 ค่าดังนี้ L_{S3} เท่ากับ 9.7 มิลลิเมตร, 10.0 มิลลิเมตร และ 10.3 มิลลิเมตรตามลำดับ ผลกระทบจากการปรับพารามิเตอร์ L_{S2} เป็นไปดังรูปที่ 4.24



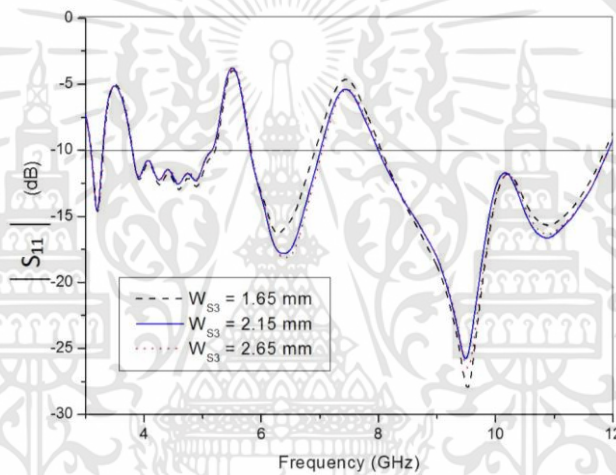
รูปที่ 4.24 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความยาวของร่องตามแนวแกน y (L_{S3}) ที่ความถี่ 7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.24 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความยาวของร่องตามแนวแกน y (L_{S3}) ที่ความถี่ 7 GHz จากผลการจำลองเมื่อปรับขนาดความยาวของร่องบนระนาบการแพร่กระจายคลื่นให้เพิ่มมากขึ้น มีผลต่อการเลื่อนความถี่นอตซ์ไปทางด้านความถี่ต่ำ จากผลการจำลองในครั้งนี้ ค่าพารามิเตอร์ L_{S3} ที่เหมาะสมอยู่ที่ 10.0 มิลลิเมตร

4.5.3.2 ผลกระทบจากการปรับความกว้างร่องของสามแบนด์นอตซ์ (W_{S3}) ที่ความถี่ 7 GHz

การปรับความกว้างของร่องสามแบนด์นอตซ์ (W_{S3}) ที่ความถี่ 7 GHz บนโครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามแบนด์นอตซ์โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ จากนั้นทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_{S3} จำนวน 3 ค่าดังนี้ W_{S3} เท่ากับ 1.65 มิลลิเมตร, 2.15 มิลลิเมตร และ 2.65 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลกระทบจากการปรับพารามิเตอร์ W_{S3} เป็นไปดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 การจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างร่องของสามแบนด์นอตซ์ (W_{S3}) ที่ความถี่ 7.5 GHz

จากรูปที่ 4.25 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับกรณีปรับความกว้างร่องของสามแบนด์นอตซ์ (W_{S3}) ที่ความถี่ 7 GHz พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ W_{S3} มีการเปลี่ยนแปลงโดยลดความกว้างลง จะทำให้แบนด์วิธกว้างขึ้น ดังนั้นค่าที่เหมาะสมคือ 2.15 มิลลิเมตร

ดังนั้นการทำนอตซ์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ที่ความถี่ 7.5 GHz มีพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์

พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)
W_{h3}	01.25
L_{S3}	10.00
W_{S3}	02.15

จากผลการจำลองเพื่อหาขนาดร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เหมาะสมที่สุดในการนอตซ์ความถี่สำหรับย่าน X-band พบว่าพารามิเตอร์จากการปรับที่มีผลต่อการทำงานนอตซ์ความถี่ คือพารามิเตอร์ L_{S3} และ W_{S3} ดังนั้นสามารถเขียนสมการความถี่นอตซ์ได้ดังนี้

$$f_{n-7.5} = \frac{c}{(0.91(2 L_{gn-7.5}) \sqrt{\epsilon_{eff}})}$$

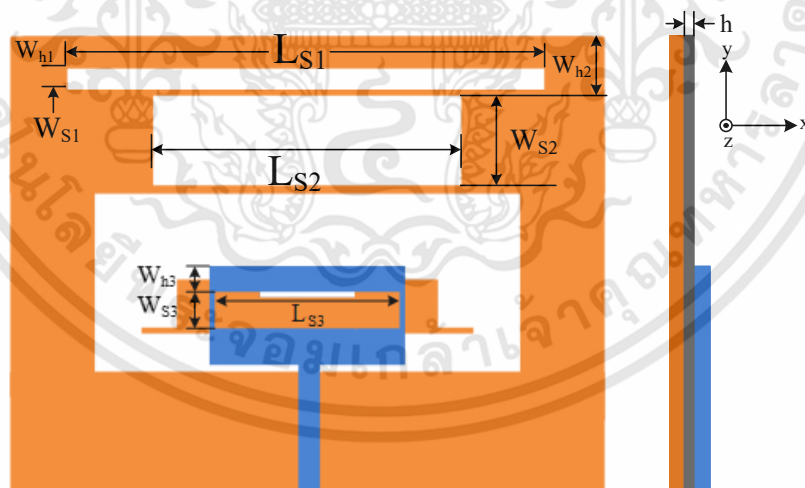
โดยที่ $L_{gn-7.5}$ คือ ความยาวของเส้นรอบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า L_{S3} และความยาวร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใช้สร้างจริงมีขนาด $L_{gn-7.5} = 0.55 L_{S3}$

4.6 ผลการจำลองสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ที่มีการกรองแถบความถี่ 3.5 GHz, 5.5 GHz และ 7.5 GHz

หัวข้อนี้เป็นการแสดงผลการจำลองของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ที่มีการกรองแถบความถี่ที่ 3.5 GHz 5.5 GHz และ 7.5 GHz ในเครือข่ายไร้สาย WiMAX WLAN และ X-band ตามลำดับ รวมถึงการจำลองในลักษณะอื่นๆ ดังจะเสนอในหัวข้อต่อไป

4.6.1 คุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์

การออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการสอดแทรกของสัญญาณระหว่างย่าน WLAN WiMAX และ X-band กับย่าน UWB โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.26



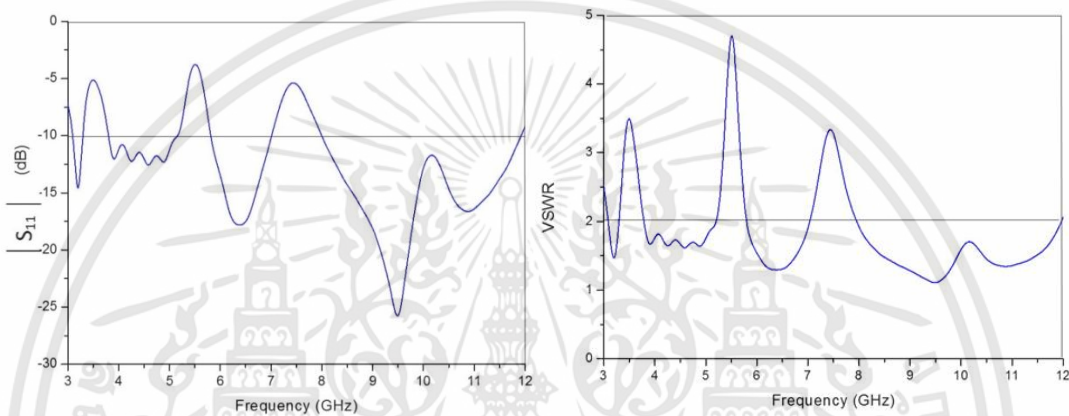
รูปที่ 4.26 โครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่องย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์

จากรูปที่ 4.26 แสดงโครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ที่ทำการเจาะร่องบนระนาบกราวด์จำนวนสองร่องและทำการเจาะร่องบนระนาบการแพร่กระจายหนึ่งร่องโดยมีขนาดพารามิเตอร์ร่องต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ต่างๆ ของร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)
L_{S1}	30.00
W_{S1}	01.40
L_{S2}	17.50
W_{S2}	04.80
L_{S3}	10.00
W_{S3}	02.15



(ก) S11

(ข) VSWR

รูปที่ 4.27 ผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์

จากรูปที่ 4.27 แสดงผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับ และ VSWR ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ จากผลการจำลองเห็นได้ว่าสายอากาศที่นำเสนอสามารถรองรับความถี่ที่ 3.29-3.80 GHz ช่วงความถี่ 5.15-5.81 GHz และช่วงความถี่ 7.01-8.00 GHz ได้ตามต้องการ ดังนั้นการเจาะร่องทั้งสองระนาบนี้สามารถกั้นความถี่เพื่อไม่ให้เกิดการสอดแทรกของสัญญาณการสื่อสารเครือข่ายไร้สายย่าน WIMAX, WLAN และ X-band กับการสื่อสารไร้สายย่าน UWB ได้

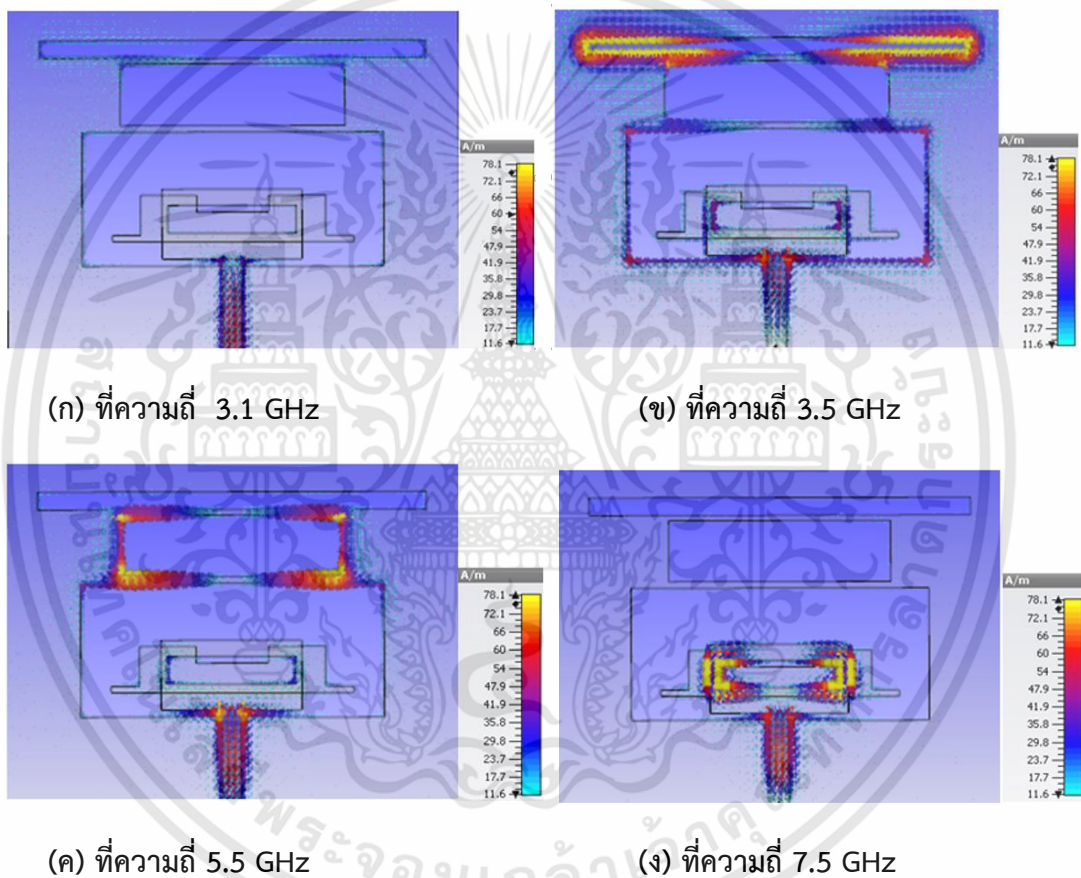
4.6.2 การจำลองความหนาแน่นกระแสเฉื่อยบนพื้นผิวของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์

จากรูปที่ 4.28 แสดงความหนาแน่นกระแสเฉื่อยบนพื้นผิวของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ที่ความถี่ 3.5 GHz, 5.5 GHz และ 7.5 GHz จากผลการจำลองในรูป (ข) จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 3.5 GHz มีความหนาแน่นปรากฏบริเวณร่องด้านบนบนระนาบกราวด์โดยไม่มีการแพร่กระจายกระแสเฉื่อยพื้นผิวไปร่องอื่นๆ และในทำนองเดียวกันกับรูป (ค) การจำลองความหนาแน่นกระแสเฉื่อยที่ความถี่ 5.5 GHz จะมีความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสเฉลี่ยปรากฏที่บริเวณร่องที่สองบนระนาบกราวด์โดยไม่มีการแพร่กระจายกระแสเฉลี่ยไปร่องข้างเคียง ทำยสุดในรูป (ง) เป็นการแสดงการจำลองความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยพื้นผิวของร่องที่สามบนระนาบการแพร่กระจายที่ความถี่ 7.5 GHz พบว่ามีความหนาแน่นปรากฏบริเวณร่องบนระนาบการแพร่กระจายเท่านั้นไม่มีการแพร่กระจายไปร่องข้างเคียง กรณีนี้ทำให้อิมพีแดนซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าสูงมากส่งผลทำให้ไม่เกิดการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่แบนด์นอตซ์ ดังนั้นทำให้อิมพีแดนซ์แบนด์นอตซ์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพและอัตราขยายลดลง

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นข้อเด่นของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB ที่ออกแบบให้เป็นสามแบนด์นอตซ์ที่ไม่เกิดสภาวะ Mutual couple

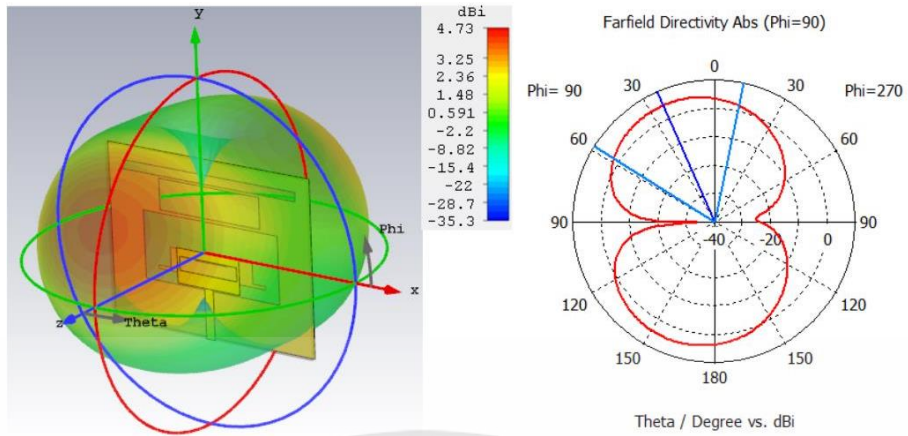


รูปที่ 4.28 ความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยบนพื้นผิวของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์

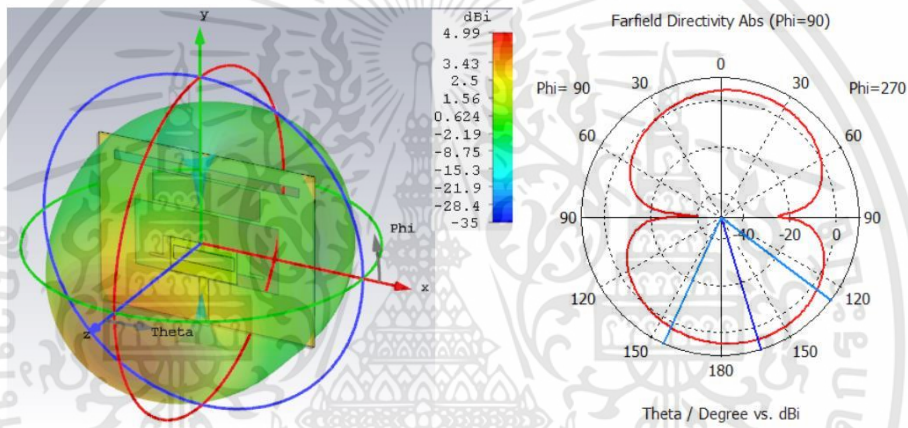
4.6.3 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์

การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ที่ย่านความถี่เครือข่ายไร้สาย WLAN, WiMAX และ X-band แสดงดังรูปที่ 4.29

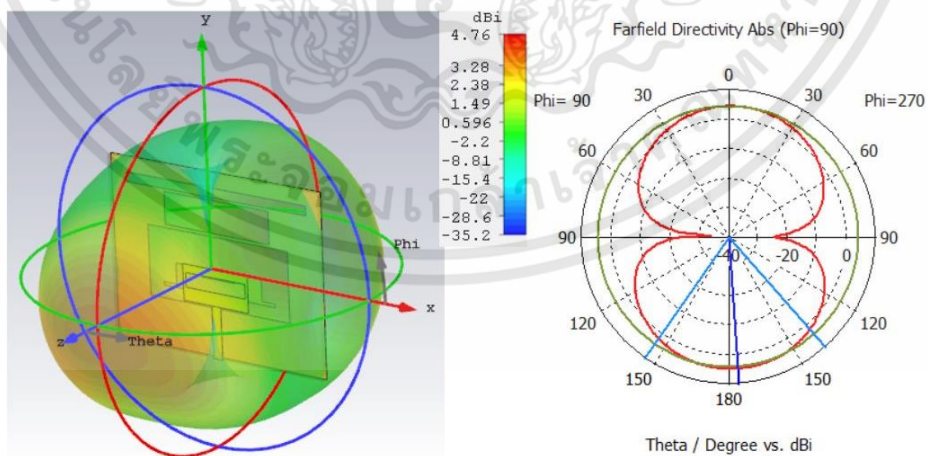
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ที่ความถี่ 4.0 GHz



(ข) ที่ความถี่ 5.8 GHz



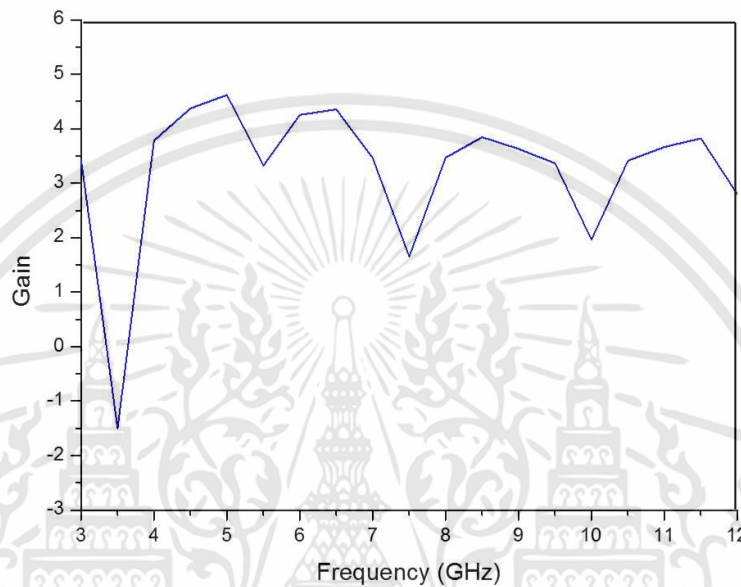
(ค) ที่ความถี่ 7 GHz

รูปที่ 4.29 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน
UWB แบบสามแบนด์นอตช์ ที่ความถี่ 4.0 GHz, 5.8 GHz และ 7.0 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.29 แสดงผลการผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ที่ความถี่ 4.0 GHz, 5.8 GHz และ 7.0 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง

4.6.4 การจำลองอัตราขยายของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์



รูปที่ 4.30 อัตราขยายของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์

จากรูปที่ 4.30 แสดงอัตราขยายสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ จากกราฟพบว่าที่แถบความถี่ 3.2-3.7 GHz 5.1-5.84 GHz และ 7-8 GHz อัตราขยายมีการลดต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าช่วงความถี่ดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้

4.7 บทสรุป

ในบทนี้ได้เสนอการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแทรกตัวนำรูปพัลส์เพื่อปรับปรุงแบนด์วิดท์ให้ครอบคลุมย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ โดยจำลองผลด้วยโปรแกรม CST- Microwave studio เป็นการนำเสนอรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบและผลการจำลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศ โดยเริ่มวิเคราะห์จากสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแทรกตัวนำรูปพัลส์ เพื่อปรับปรุงแบนด์วิดท์ของสายอากาศให้ครอบคลุมย่าน UWB ซึ่งผลการจำลองของสายอากาศมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 8.72 GHz ครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 3.10 – 11.82 GHz รองรับการสื่อสารย่าน UWB จากนั้นนำสายอากาศต้นแบบมาทำการพัฒนาต่อเป็นสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบนด์นอตช์เดี่ยว สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองแบนด์นอตช์และสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามแบนด์นอตช์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ให้เกิดการสอดแทรกของสัญญาณช่วงความถี่ที่กำหนดทั้งสามแบนด์นอตช์ โดยการใช้ร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยแบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอตช์เดี่ยวทำการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าช่องที่หนึ่งบริเวณด้านบนบนระนาบกราวด์เพื่อให้เกิดแบนด์นอตช์เดี่ยวที่ความถี่ 5.1-5.84 GHz (WiMAX) ต่อมาทำการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าช่องที่สองบริเวณด้านล่างของร่องที่หนึ่งบนระนาบกราวด์เพื่อให้ได้แบนด์นอตช์ที่สองที่ความถี่ 3.2-3.7 GHz (WLAN) และสุดท้ายทำการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนระนาบการแพร่กระจายเพื่อให้ได้แบนด์นอตช์ที่สามที่ความถี่ 7-8 GHz (X-band) นอกจากนี้สายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศที่ไม่เกิดสภาวะ mutual coupling สายอากาศที่นำเสนอยังเป็นสายอากาศที่มีรูปการแพร่กระจายเป็นแบบสองทิศทางที่มีรูปแบบการแพร่กระจายไปในทิศทางด้านหน้ากับด้านหลัง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีในสภาวะพื้นที่เป็นแบบโคงทางเดินเช่น โคงทางเดินบนสนามบิน รถไฟ โรงพยาบาล เป็นต้น ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้น สายอากาศที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานกับการสื่อสารแบบ UWB ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

จากบทที่ 3 เป็นการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่พัฒนาสายอากาศด้วยการใช้โครงสร้างของ double interdigital เพื่อควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกที่สองและความถี่ฮาร์โมนิกที่สามตามต้องการ และเป็นสายอากาศที่มีอัตราขยายสูงสามารถนำไปใช้งานได้ในระบบ LTE และ WLAN และบทที่ 4 เป็นการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แทรกตัวนำรูปพัลซ์เพื่อปรับปรุงแบนด์วิดท์ให้ครอบคลุมย่าน UWB อยู่ในช่วงความถี่ 3.1 -10.6 GHz จากนั้นนำสายอากาศที่ได้มาพัฒนาต่อด้วยการทำนอตช์แบบสามแบนด์นอตช์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกันความถี่ไม่ให้เกิดการสอดแทรกของสัญญาณย่านเครือข่ายไร้สาย WLAN, WiMAX และ X-band ด้วยการเจาะร่องบนระนาบกราวด์และบนระนาบสแต็ปไมโครสติป ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น

ในบทนี้ เป็นการกล่าวถึงผลการสร้างและการวัดคุณลักษณะของสายอากาศทั้งสองรูปแบบรูปแบบที่หนึ่ง คุณลักษณะของสายอากาศที่ทำการวัดได้แก่การสูญเสียย้อนกลับ และแบบรูปการแพร่กระจายพลังงานระยะไกลของสายอากาศ

รูปแบบที่สอง คุณลักษณะของสายอากาศที่ทำการวัดได้แก่การสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแพร่กระจายพลังงานระยะไกลของสายอากาศ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดเป็นหัวข้อนำเสนอ ดังนี้

5.1 บทนำ

5.2 การสร้างสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

5.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

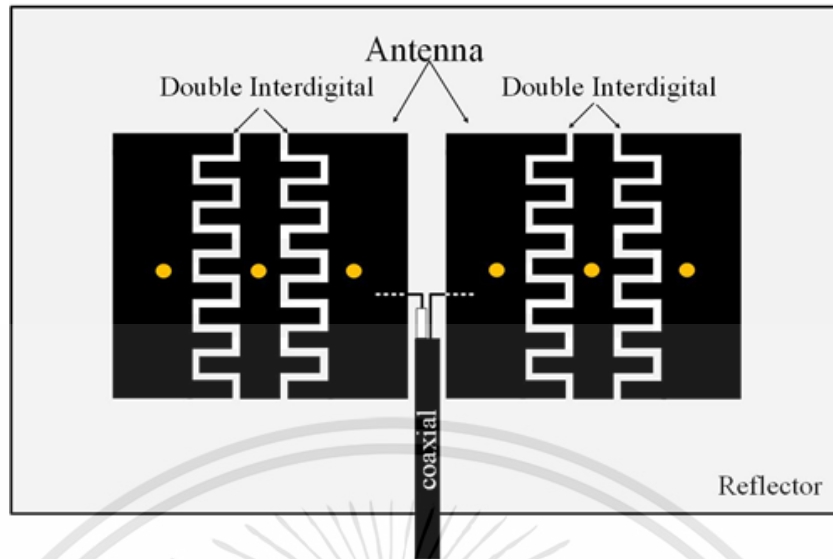
5.4 การสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band

5.5 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์

5.6 บทสรุป

5.2 การสร้างสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

จากการออกแบบสายอากาศและจำลองด้วยโปรแกรม CST-microwave studio ทำให้ได้ต้นแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ จากนั้นนำไปสร้างจริงและทำการเชื่อมต่อกับสายโคแอกเชียล RG-142 ดังรูปที่ 5.1 และ รูปที่ 5.2



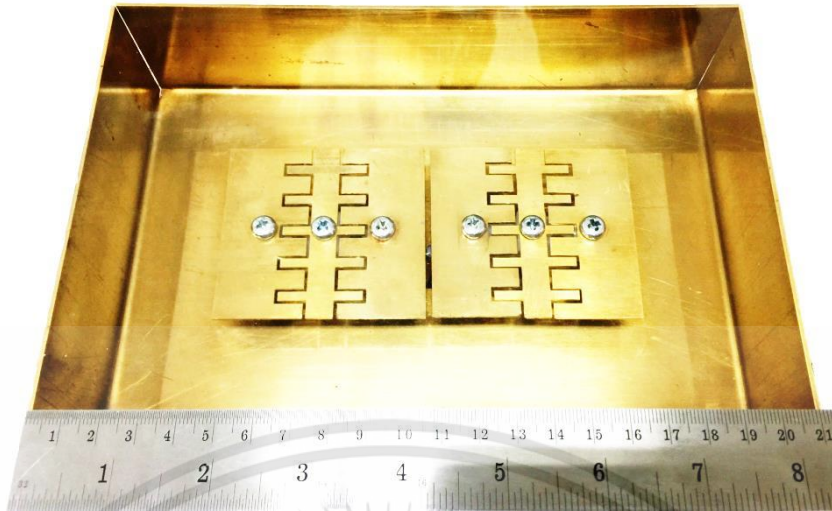
รูปที่ 5.1 ผังการวางตำแหน่งของสายโคแอกเซียล RG-142

จากรูปที่ 5.1 แสดงผังการวางตำแหน่งของสายโคแอกเซียล RG-142 ด้วยคุณลักษณะความต้านทานที่ 50 โอห์ม โดยที่ปลายสายเชื่อมต่อกับหัวต่อ SMA-51



รูปที่ 5.2 ชิ้นส่วนงานสายอากาศก่อนการประกอบและหลังการประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

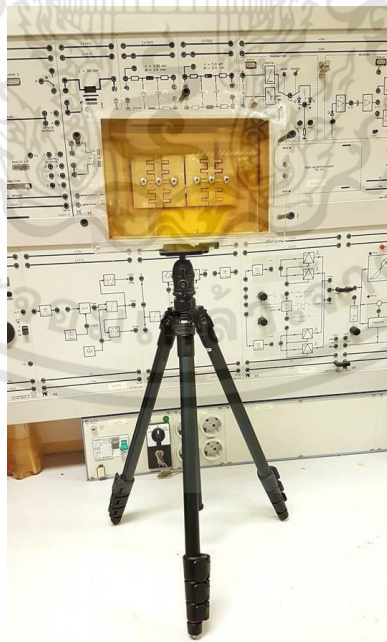


รูปที่ 5.3 สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่สร้างจริงแบบสมบูรณ์

5.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไดโพลระนาบสามความถี่

5.3.1 การวัดการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

นำสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่สร้างเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 5.2 มาดำเนินการประกอบดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง Agilent 8791ES network analyzer และวัดในห้อง anechoic chamber การวัดค่าคุณลักษณะในการแมตซ์อิมพีแดนซ์เป็นการวัดหาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ แสดงผลได้ดังรูปที่ 5.6

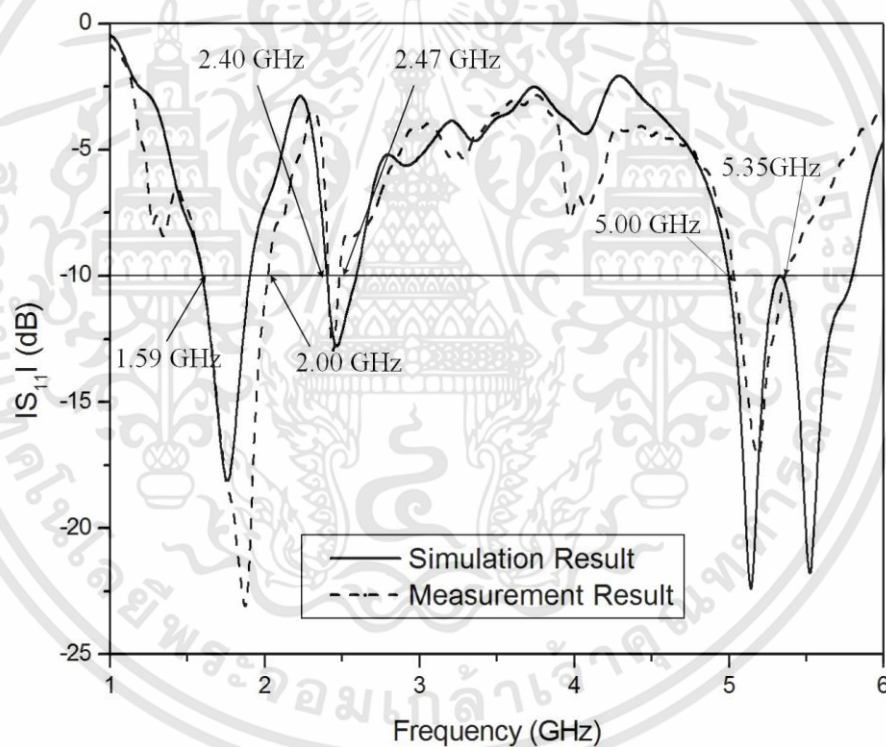


รูปที่ 5.4 สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่นำวัดไปด้วยเครื่อง Agilent 8791ES network analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่วัดคุณลักษณะของสายอากาศในห้อง anechoic chamber



รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

จากรูปที่ 5.6 แสดงผลการเปรียบเทียบการวัดและการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่พบว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบผลช่วงความถี่ที่ต้องการกรองสัญญาณความถี่ 3.5 GHz, 5.5 GHz และ 7 GHz ผลที่ได้จากการวัดใกล้เคียงกับผลการจำลองโดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

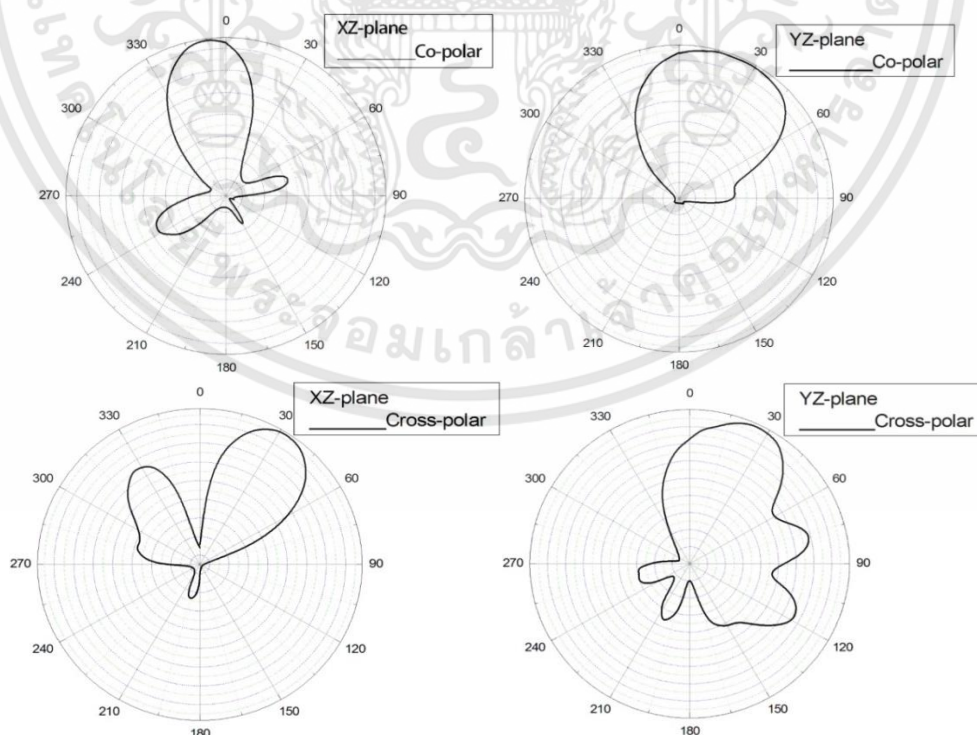
ตารางที่ 5.1 ผลการวัดผลและการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

โครงข่าย	ความถี่ (GHz)	การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})			
		ผลจากวัด		ผลจากการจำลอง	
		ช่วงความถี่ (GHz)	แบนด์วิดท์ (BW)	ช่วงความถี่ (GHz)	แบนด์วิดท์ (BW)
LTE	1.8	1.59-2.00	410 MHz	1.59 – 1.92	330 MHz
WLAN	2.45	2.40-2.47	70 MHz	2.40 – 2.52	120 MHz
	5.2	5.00-5.35	350 MHz	4.99-5.78	790 MHz

จากตารางที่ 5.1 แสดงถึงรายละเอียดคุณลักษณะของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ จากผลการวัดสายอากาศสามารถรองรับการทำงานย่าน LTE และ ย่าน WLAN ในช่วงความถี่ 1.59-2.00 GHz 2.40-2.47 GHz และ 5.00-5.35 GHz มีแบนด์วิดท์อยู่ที่ 410 MHz 70 MHz และ 350 MHz ตามลำดับ ดังนั้นสายอากาศที่ได้ออกแบบสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ

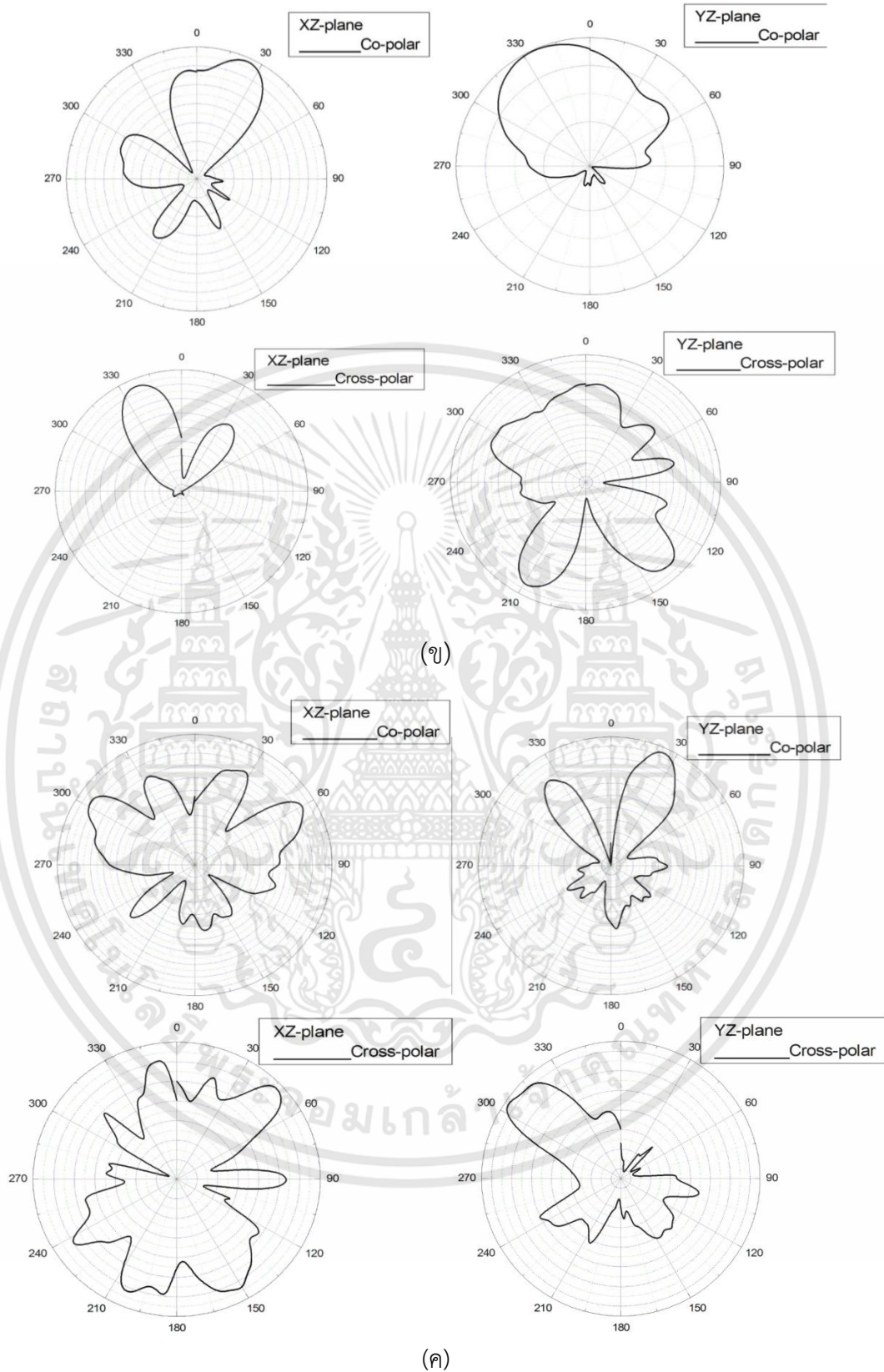
5.3.2 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล

การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการทดสอบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 5.7



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายพลังงานระยะไกลของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่สำหรับ co และ cross polarization ในระนาบ XZ ที่ความถี่ (ก) 1.80 GHz (ข) 2.54 GHz (ค) 5.20 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band

นำสายอากาศที่ได้ออกแบบไปสร้างจริงและทำการเชื่อมต่อกับ SMA ดังรูปที่ 5.8 สำหรับสายอากาศที่สร้างจริงที่เชื่อมต่อกับ SMA แสดงดังในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 การเชื่อมต่อกับ SMA

จากรูปที่ 5.8 แสดงการเชื่อมต่อสายอากาศกับ SMA จากรูปจะเห็นว่ามี การสร้างสายอากาศจำนวนหลายชิ้นและมีการเชื่อมต่อกับ SMA หลายอัน เนื่องมาจากการสร้างและการเชื่อมต่ออาจมีข้อผิดพลาดบางประการที่ทำให้การวัดผลและการจำลองอาจมีความคลาดเคลื่อนจากการสร้างจึงจำเป็นต้องมีการสำรองชิ้นงานเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกันระหว่างผลที่ได้จากการวัดและการจำลองผิดพลาดน้อยที่สุด



(ก) สายอากาศที่สร้างจริงด้านหน้า



(ข) สายอากาศที่สร้างจริงด้านหลัง

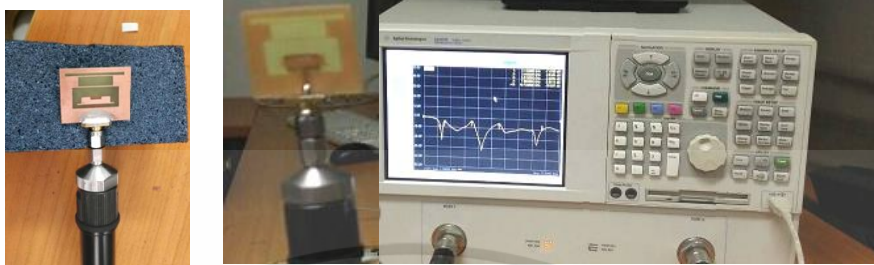
รูปที่ 5.9 ต้นแบบสายอากาศร่องย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์

จากรูปที่ 5.9 แสดงต้นแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band รูปที่ 5.9 (ก) เป็นการแสดงสายอากาศที่สร้างจริงด้านหน้าและ รูปที่ 5.9 (ข) เป็นการแสดงสายอากาศที่สร้างจริงด้านหลัง จากนั้นนำสายอากาศที่สร้างจริงไปทำการวัดเพื่อหาคุณลักษณะของสายอากาศต่อไป

5.5 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band

หัวข้อนี้ นำเสนอผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN WiMAX และ X-band ที่สร้างจริงบนวัสดุฐานรองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด FR4 เปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST microwave studio ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย Agilent PNA network Analysers รุ่น E8363B ในการวัดการสูญเสียย้อนกลับ อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง และแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.10

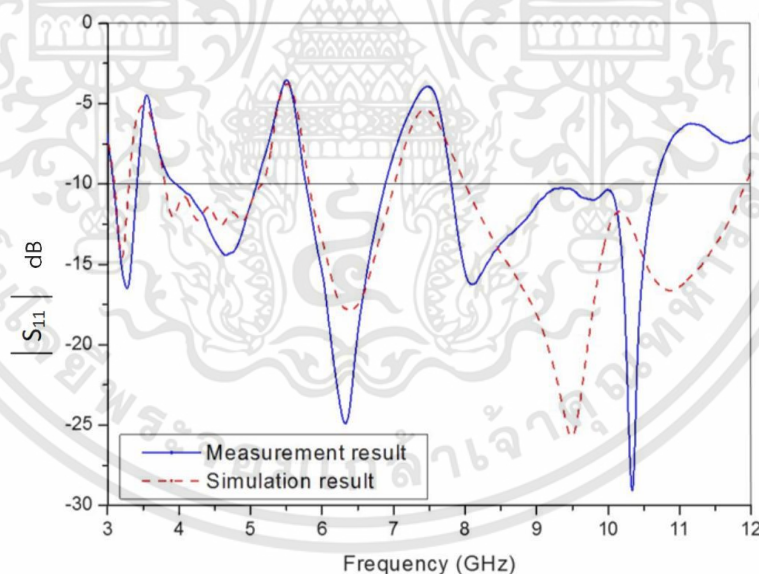


รูปที่ 5.10 การวัดสายอากาศที่สร้างจริง

จากรูปที่ 5.10 เป็นการแสดงการทดลองวัดสายอากาศที่สร้างจริงด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA network Analysers รุ่น E8363B

5.5.1 การวัดการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

การวัดค่าคุณลักษณะในการแมตซ์อิมพีแดนซ์เป็นการวัดหาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ แสดงผลได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์

จากรูปที่ 5.11 เป็นการแสดงผลการเปรียบเทียบการวัดและการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band พบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบผลช่วงความถี่ที่ต้องการกรองสัญญาณความถี่ 3.5 GHz, 5.5 GHz และ 7 GHz ผลที่ได้จากการวัดใกล้เคียงกับผลการจำลองโดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

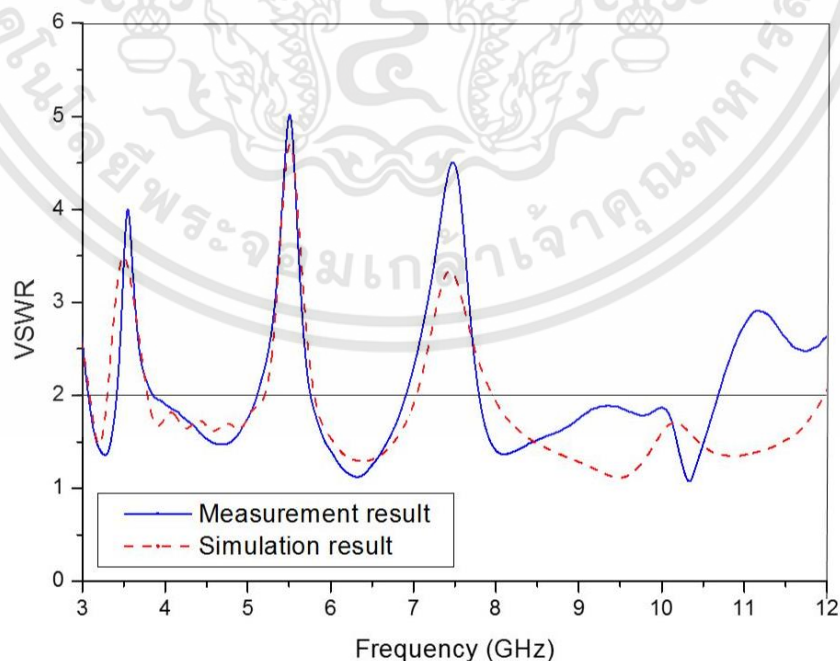
ตารางที่ 5.2 ผลการวัดผลและการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WiMAX, WLAN และ X-band

โครงข่าย	ความถี่ที่กรอง (GHz)	การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})			
		ผลจากวัด		ผลจากการจำลอง	
		ช่วงความถี่ที่ถูกกรอง (Band-notched) (GHz)	แบนด์วิดท์ (BW)	ช่วงความถี่ที่ถูกกรอง (Band-notched) (GHz)	แบนด์วิดท์ (BW)
WiMAX	3.5	3.42 - 3.81	0.39	3.29 - 3.80	0.51
WLAN	5.5	5.14 - 5.74	0.60	5.15 - 5.81	0.66
X-band	7.0	6.91 - 7.79	0.88	7.01 - 8.00	0.99

จากตารางที่ 5.2 แสดงรายละเอียดคุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band จากผลการวัดสายอากาศสามารถกรองย่าน WLAN ในช่วงความถี่ 3.42 - 3.81 GHz มีแบนด์วิดท์อยู่ที่ 0.39 ต่อมาในย่าน WiMAX สามารถกรองความถี่ในช่วงความถี่ 5.14 - 5.74 GHz มีแบนด์วิดท์อยู่ที่ 0.60 และท้ายสุดในย่าน X-band down link สามารถกรองความถี่ในช่วง 6.91 - 7.79 GHz มีแบนด์วิดท์อยู่ที่ 0.88 ดังนั้นสายอากาศที่ได้ออกแบบสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากการไม่มีการสอดแทรกของย่านความถี่ทั้งสามดังกล่าว

5.5.2 การวัดอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศ

การวัดค่าคุณลักษณะในการไม่แมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ณ ความถี่ที่กรองในย่าน WLAN, WiMAX และ X-band ผลการวัดอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 5.12



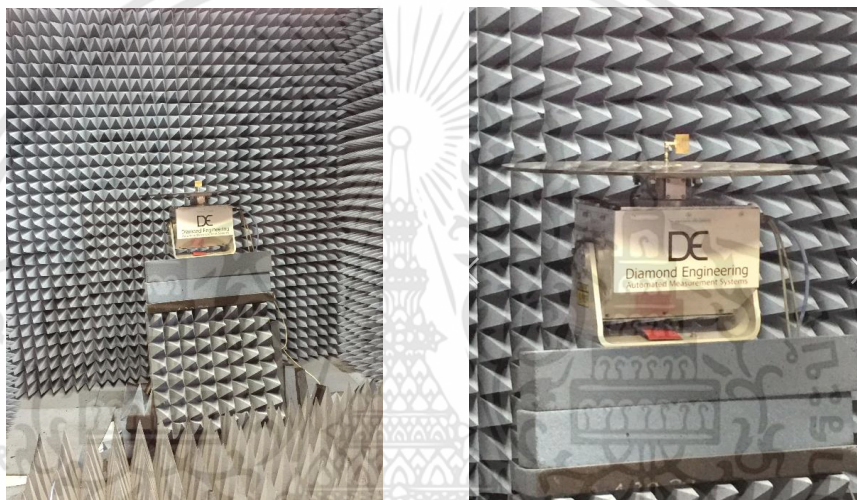
รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

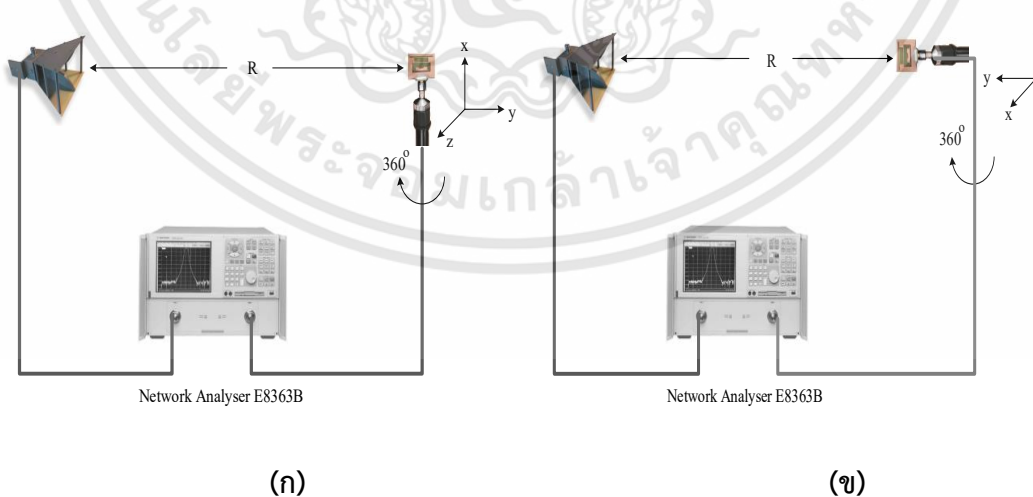
จากรูปที่ 5.12 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ย่านความถี่ WLAN WiMAX และ X-band พบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบผลอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งสูงกว่า 2 ในช่วงความถี่ที่ต้องการการกรองสัญญาณความถี่ 3.5 GHz, 5.5 GHz และ 7.5 GHz

5.5.3 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล

การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการทดสอบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band แสดงดังรูปที่ 5.13 ลักษณะการหมุนของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 5.14 และผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 5.15

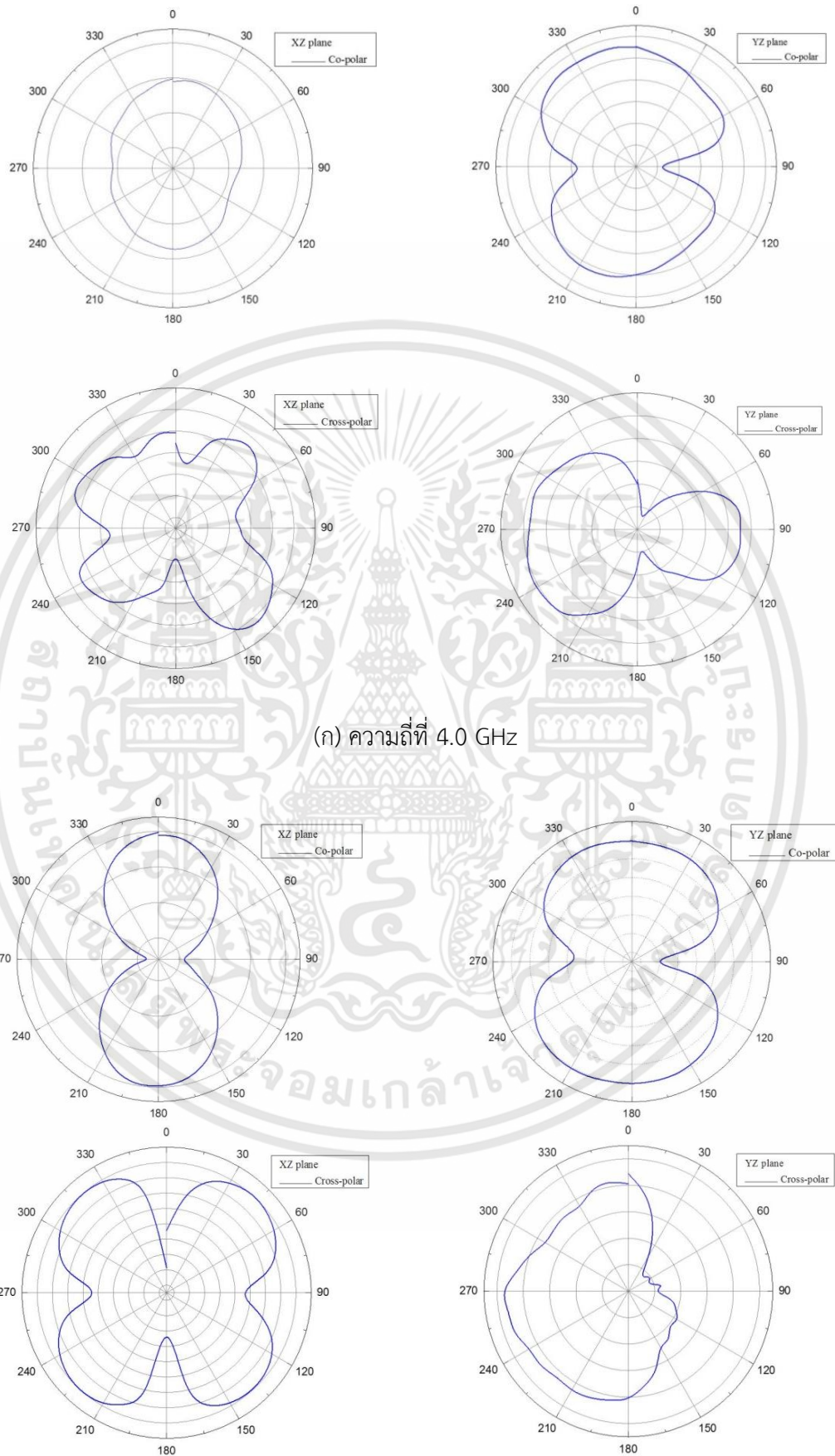


รูปที่ 5.13 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ ในห้อง Anechoic chamber



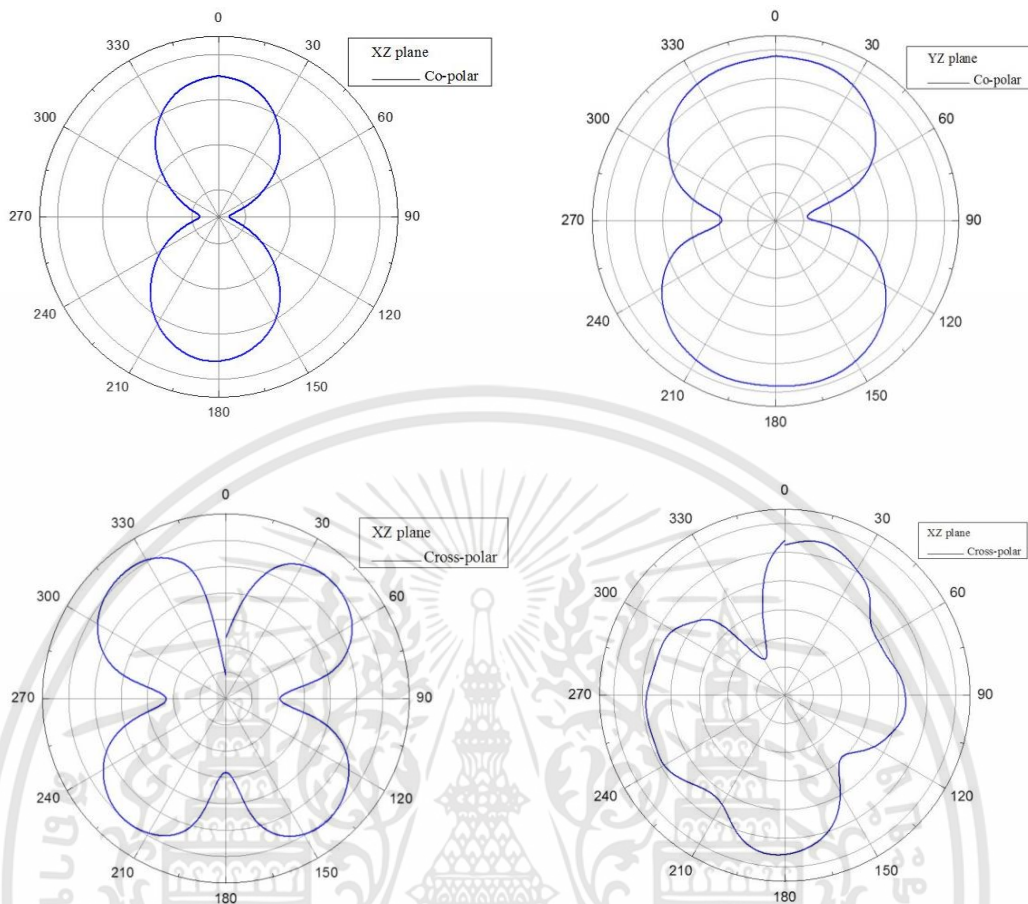
รูปที่ 5.14 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศในระนาบ (ก) XZ และ (ข) YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ความถี่ที่ 5.8 GHz



(ค) ความถี่ที่ 7.0 GHz

รูปที่ 5.15 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ (ก) ที่ 4 GHz (ข) ที่ 5.8 GHz (ค) ที่ 7 GHz ในระนาบ xz และระนาบ yz

จากรูปที่ 5.15 แสดงผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกวัดรูปแบบแผ่พลังงานเฉพาะที่ความถี่ 4 GHz, 5.8 GHz และ 7 GHz ตามลำดับพบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ XZ และระนาบ YZ เป็นแบบสองทิศทาง

5.6 บทสรุป

ในบทนี้ เป็นการนำเสนอคุณลักษณะของสายอากาศสองรูปแบบที่ทำการวัดและการจำลองด้วยโปรแกรม CST microwave studio ได้แก่ การสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง และแบบรูปการแพร่กระจายพลังงานระยะไกลของสายอากาศ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายผลการเปรียบเทียบจากการวัดและการจำลองของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN WiMAX และ X-band และสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามแบนด์มีผลใกล้เคียงกันและอยู่ในมาตรฐานการใช้งาน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและศึกษาสายอากาศสองรูปแบบดังนี้

รูปแบบที่หนึ่ง การออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ เป็นการออกแบบสายอากาศที่ใช้โครงสร้าง double interdigital ในการควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองและความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สาม เริ่มจากออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบที่ความถี่หลัก 1.8 GHz ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ ณ ความถี่หลักต่ำกว่า -10 dB จากนั้นพัฒนาสายอากาศด้วยการนำช่องว่างเส้นตรงคู่ฝังไปในด้านข้างทั้งสองของสายอากาศไดโพลเกิดค่าความจุภายในทำให้ย่านความถี่รีโซแนนซ์สามารถควบคุมได้เมื่อเพิ่มค่าความจุในช่องว่าง ท้ายสุดพัฒนาสายอากาศด้วยโครงสร้าง double interdigital สามารถควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองและความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สามได้ตามต้องการ และเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศด้วยติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น โดยใช้วัสดุ polyoxymethylene ติดตั้งระหว่างสายอากาศกับตัวสะท้อนคลื่น สายอากาศรูปแบบที่หนึ่งนี้ออกแบบบนวัสดุทองเหลืองที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร ด้วยข้อเด่น หาซื้อง่าย ทนกำลังงานได้สูง สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานกับการสื่อสารระบบ LTE และ WLAN ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รูปแบบที่สอง การออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบสามแบนด์นอตซ์เป็นการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปและทำการปรับปรุงสายอากาศให้สามารถขยายแบนด์วิธครอบคลุมย่านความถี่ UWB ด้วยการเพิ่มตัวนำรูปพัลส์ภายในร่องของสายอากาศ จากนั้นทำการพัฒนาสายอากาศให้มีแบนด์นอตซ์เพื่อลดการสอดแทรกของสัญญาณระหว่างการสื่อสารไร้สาย WLAN WiMAX และ X-band กับการสื่อสารย่าน UWB โดยการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนระนาบกราวด์สองร่องและเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนระนาบการแพร่กระจาย เพื่อช่วยกรองสัญญาณย่านความถี่ 3.5 GHz 5.5 GHz และ 7.5 GHz ตามลำดับ โดยในการออกแบบสายอากาศรูปแบบที่สองในดัชนีฉบับนี้ ได้เลือกใช้วัสดุฐานรองชนิด FR4 มาทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ ด้วยข้อเด่นของวัสดุฐานรอง FR4 นั้นหาซื้อได้ง่าย ราคาถูกและน้ำหนักเบา ผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST-microwave studio เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด เห็นได้ว่ามีผลที่ได้ใกล้เคียงกัน อาจมีความคลาดเคลื่อนไปบ้างอันมีผลจากการเชื่อมต่อ SMA connector และวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีคุณภาพต่ำ ทั้งนี้สายอากาศที่ออกแบบสามารถใช้งานกับย่านความถี่ UWB และสามารถกรองความถี่ที่ทับซ้อนได้ตามที่ได้ออกแบบ รายละเอียดการสรุปผลการวิจัยทั้งสองแบบ สรุปเป็นหัวข้อดังนี้

6.1 บทนำ

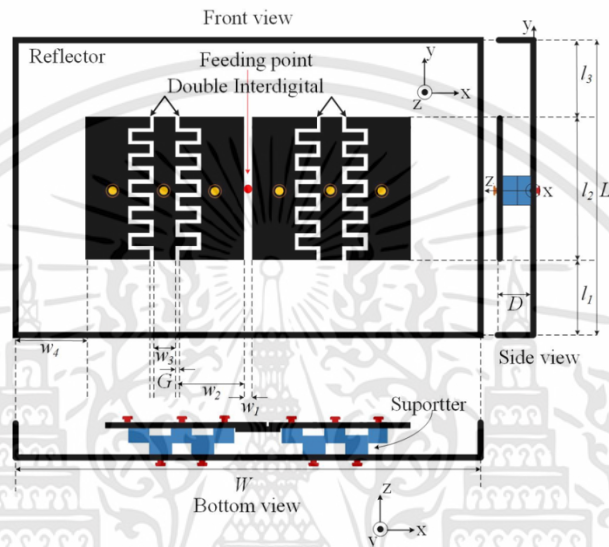
6.2 สรุปผลการวิจัย

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

6.2 สรุปผลการวิจัย

6.2.1 สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

การออกแบบสายอากาศระนาบแบบสามความถี่สำหรับการใช้งาน LTE และ WLAN มีโครงสร้างที่สร้างง่าย วัสดุหาได้ตามท้องตลาดและประหยัด แสดงดังรูปที่ 6.1 สำหรับสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่นำไปสร้างจริงแสดงดังรูปที่ 6.2 ผลการวัดและการจำลองสายอากาศแสดงดังรูปที่ 6.3 และค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ออกแบบแสดงดังตารางที่ 6.1



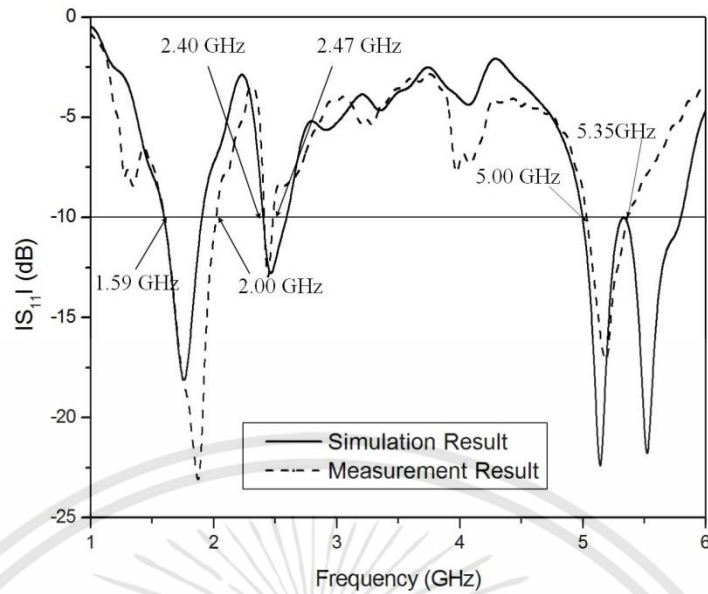
รูปที่ 6.1 โครงสร้างสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่สร้างจริง



รูปที่ 6.2 สายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่ที่สร้างจริง

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (mm)	พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (mm)
w_1	02.0	d	01.5
w_2	29.0	l_1	36.1
w_3	09.0	l_2	64.0
G	01.0	l_3	35.9

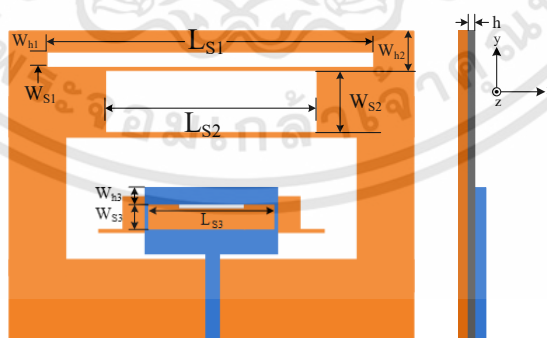


รูปที่ 6.3 ผลการวัดและการจำลองสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่

จากรูปที่ 6.3 แสดงผลการเปรียบเทียบการวัดและการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามแบนด์ พบว่ามีความใกล้เคียงกันและแบนด์วิดท์อยู่ในช่วงความถี่ที่กำหนดของ LTE และ WLAN

6.2.2 สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band

ในการออกแบบสายอากาศสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN WiMAX และ X-band มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการนำไปสร้าง แสดงโครงสร้างสายอากาศดังรูปที่ 6.4 สำหรับสายอากาศที่ได้นำไปสร้างจริงแสดงได้ดังรูปที่ 6.5 และค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ออกแบบสามารถกำหนดได้ดังตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.4 โครงสร้างของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์

จากรูปที่ 6.4 แสดงโครงสร้างสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN WiMAX และ X-band สร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร หาซื้อได้ง่าย น้ำหนักเบาและราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



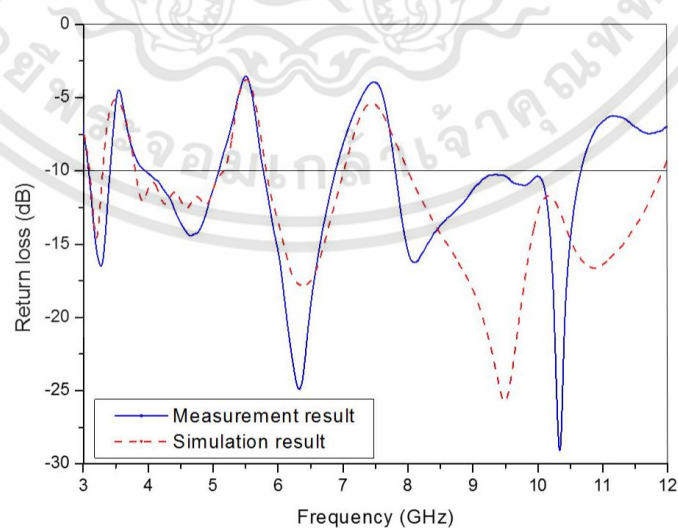
รูปที่ 6.5 สายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ ที่สร้างจริง

จากรูปที่ 6.5 แสดงสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ ย่านความถี่ WLAN WiMAX และ X-band ที่สร้างจริงด้วยวัสดุฐานรองชนิด FR4 เชื่อมต่อด้วยหัวต่อ SMA ที่ใช้กับความถี่สูง

ตารางที่ 6.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์ย่านความถี่ WLAN, WiMAX และ X-band

ตารางที่ 6.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์

พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)	พารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)
W_{h1}	02.40	W_{h3}	01.25
L_{s1}	30.00	L_{s3}	10.00
W_{s1}	01.40	W_{s3}	02.15
W_{h2}	04.20	W_m	01.50
L_{s2}	17.50	ϵ_r	04.30
W_{s2}	04.80	h	00.80



รูปที่ 6.6 ผลการวัดและการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศรูป

รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.6 แสดงผลการวัดและการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ย่านความถี่ WLAN WiMAX และ X-band

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการจำลองเห็นได้ว่า สายอากาศทั้งสองแบบที่ออกแบบสามารถนำไปใช้งานกับการสื่อสารย่านความถี่ที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากทำการออกแบบและสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบแล้วนำไปวัดผลจริง ผลที่ได้จากการวัดจริงมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการจำลอง แต่มีอุปสรรคบางประการ เช่น การเชื่อมต่อ (Connector: SMA Port) ด้วยการบัดกรีตั้งแต่การเลือกใช้ตะกั่วหรือน้ำยาประสาน เทคนิคการบัดกรี การใช้หัวแร้งอีกทั้งการเลือกวัสดุฐานรองที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่นรวมทั้งจากการสร้างสายอากาศต้นแบบเอง เป็นต้น สิ่งเหล่านี้อาจเป็นสาเหตุให้ผลจากการวัดจริงมีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลอง นอกจากนี้ในการสร้างสายอากาศนั้นจำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญ และเครื่องมือที่มีความเที่ยงตรงสูงมาช่วยในการสร้าง แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศที่ออกแบบและสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบที่สามารถนำไปใช้งานกับการสื่อสารย่านความถี่ที่กำหนดได้

แนวทางในการพัฒนาสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ สำหรับรูปแบบที่หนึ่ง เป็นการออกแบบสายอากาศไดโพลระนาบแบบสามความถี่มีอัตราขยายที่สูงหากต้องการพัฒนาให้มีอัตราขยายที่สูงเพิ่มขึ้น สามารถนำสายอากาศต้นแบบมาออกแบบให้เป็นสายอากาศแบบอเวอเรียเหมาะสำหรับเป็นสถานีส่งสัญญาณทั้งภายในและภายนอกอาคารได้ และสำหรับรูปแบบที่สอง ด้วยการออกแบบสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่าน UWB แบบสามแบนด์นอตซ์ย่านความถี่ WLAN WiMAX และ X-band ที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทาง เหมาะสำหรับการประยุกต์งานเป็นตัวรับและส่งสัญญาณตามโถงทางเดิน เช่น โถงโรงพยาบาล สนามบิน เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถนำสายอากาศที่สร้างนี้ไปประยุกต์ใช้งานกับงานทางด้านอื่นๆ ที่มีความต้องการใช้ช่องสัญญาณความถี่ครอบคลุมย่าน UWB เช่นทางด้านการแพทย์ ทางด้านเกษตร ได้อีกด้วย

บรรณานุกรม

- [1] Federal Communications Commission. "First Report and Order, Revision of of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission System from." **FCC.**, 2002.
- [2] W. T. Li, X. W. Shi, and Y. Q. Hei. "Novel planar UWB monopole antenna with Triple band-notched characteristics." **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.**, vol. 8, 2009. pp. 1094-1098
- [3] G. Feng, L. Zhou, Z. Yan, S. Runhong, Q. Yihong, and H. Yang. "Influence of Cable Routing for Indoor Multi-System Omnidirectional Antenna Horizontal Pattern Ripple Measurement." **IEEE Interantional Symposium on Electromagnetic Compatibility**, 2014.
- [4] L. Zhou, Y. Jiao, Y. Qi, and Z. Weng, and L. Lu. "Wideband Ceiling-Mount Omnidirectional Antenna for Indoor Distributed Antenna Systems." **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.**, Vol.13, 2014. pp.836-839
- [5] Q. Wu, X. Ding, and A. Chen. "A Broadband Dipole Antenna for Multiservice Indoor Distribution Antenna System (MSIDAS)." **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.**, Vol.14, 2015. pp.839-842
- [6] B. Q. Wu and K. M. Luk. "A Wideband, Low-Profile, Conical-Beam Antenna with Horizontal Polarization for Indoor Wireless Communications." **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.**, Vol.8, 2009. pp. 634-636
- [7] Y. Zhao. "Dual-wideband Microstrip Antenna for LTE Indoor Base Stations." **Electronics Letters.**, Vol.52, No.8, 2016. pp. 576-578
- [8] L. Ge and K. M. Luke. "A Low-Profile Magneto-Electric Dipole Antenna." **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol.60, No.4, 2012. pp.1684-1689
- [9] M. K. Nayan, M.F. Jamlos, M. A. Jamlos, and H. Lago. "MIMO 2x2 RHCP Array Antenna for Point-to Point Communication." **IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA).**, 2014. pp.121-124
- [10] D. Guan, C. Ding, Z. Qian, Y. Zhang, W. Cao, and E. Dutkiewicz. "An SIW-Based Large-Scale Corporate-Feed Array Antenna." **IEEE Transactions on Antennas and Propagation.**, Vol.63, No.7, 2015. pp. 2969–2976
- [11] L. Wei, Q. Jinghui, and S. Ying. "Design and Simulation of Novel Ultra Wideband Planar Reflector Antenna." **International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology.**, 2007.
- [12] K. Agarwal, Nasimuddin, and A. Alphones. "Wideband Circularly Polarized AMC Reflector Backed Aperture Antenna." **IEEE Transactions on Antenna and Propagation**, Vol.61, No.3, 2013. pp.1456-1461

- [13] D-Z Kim, H-S Tae, K-S Oh, M-Q Lee, and J-W Yu . “Helical Reflector Antenna with a Wideband CP for RFID Reader.” **Asia Pacific Microwave Conference.**, 2009. pp.1032-1035
- [14] B. Feng, W. Hong, S. Li, W. An, and S. Yin. “A Dual-Wideband Double-Layer Magnetolectric Dipole Antenna with a Modified Horned Reflector for 2G/3G/LTE Applications.” **International Journal of Antennas and Propagation.**, Vol.2013, 2013.
- [15] N. Kingsley, D.E. Anagnostou, M. Tentzeris, and J. Papapolymerou. “RF MEMS Sequentially Reconfigurable Sierpinski Antenna on a Flexible Organic Substrate with Novel DC-Biasing Technique.” **Journal of Microelectromechanical Systems**, Vol.16, No.5, 2007. pp.1185-1192
- [16] D.H. Werner and S. Ganguly . “An Overview of Fractal Antenna Engineering Research.” **IEEE Antennas and Propagation Magazine.**, Vol.45, No.1, 2003. pp.38-57
- [17] P. Maraghechi and A.Y. Elezzabi. “Fractal Structures for THz Radiation Emitters.” **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics.**, Vol.19, No.1, , 2013. 10 pages
- [18] P. and G. Thomas K. “Performance Analysis of a Compact Directional Monopole Antenna.” **IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC).**, 2011.
- [19] H-Y Liang, H.-C. Yang, and J. Zhang. “A Cylindrical Conformal Directional Monopole Antenna for Borehole Radar Application.” **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.**, Vol.11, 2012. pp.1525-1528
- [20] R.A. Moody and S.K. Sharma. “Ultrawide Bandwidth (UWB) Planar Monopole Antenna Backed by Novel Pyramidal Shaped Cavity Providing Directional Radiation Patterns.” **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.**, Vol.10, 2011. pp. 1469-1472
- [21] A. Singh, D. Sarkar, K. Saurav and K. V. Srivastava. “Triple Band Circularly Polarized Printed Crossed Dipole Antenna Employing Interdigital Capacitors.” **2015 IEEE UP Section Conference on Electrical Computer and Electronics (UPCON).**, 2015.
- [22] P. Chomtong and P. Akkaraekthalin. “A multiband slot CPW antenna using capacitive feed and interdigital capacitor for GSM, WiMAX and WLAN systems.” **The 20th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2014).**, 2014. pp. 446-449
- [23] P. Chomtong, P. Akkaraekthalin. “Dual Band Square Planar Dipole Antennas with Interdigital Capacitors for Base Stations.” **Radioengineering**, Vol.26, No.3, 2017. pp.755-764

- [24] D. Li, Z. Szabo, X. Qing, E. P. Li and Z. N. Chen. "A High Gain Antenna With an Optimized Metamaterial Inspired Superstrate." **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 60, No. 12, 2012. pp. 6018-6023
- [25] L. Sang, X. Li, T. Chen and G. Lv. "Analysis and Design of Tapered Slot Antenna with High Gain for Ultra-wideband Based on Optimisation of the Metamaterial Unit Layout." **IET Microwaves, Antennas & Propagation.**, Vol.11, No.6, 2017. pp.907-914
- [26] J. Huang, F. Qiu, W. Lin, Z. Tang, D. Lei, M. Yao, Q-X. Chu, and Y.J. Guo. "A New Compact and High Gain Circularly-Polarized Slot Antenna Array for Ku-Band Mobile Satellite TV Reception." **IEEE Access.**, Vol.5, 2017. pp.6707-6714
- [27] Z. Wang, G. x. Zhang, Y. Yin, and J. Wu. "Design of a Dual-Band High-Gain Antenna Array for WLAN and WiMAX Base Station." **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.**, Vol.13, 2014. pp. 1721-1724
- [28] Jianfeng Li, Shiwei Qu, Qiang Chen, Qiaowei Yuan, and Kunio Sawaya. "Reflectarray design based on interdigital gap loading element." **IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems.**, 2010.
- [29] Chao Lyu, Shiwen Yang, Hangyu Zhang, and Zaiping Nie. "A new type of tilted tightly coupled dipole arrays with two -dimensional scanning property." **2015 IEEE International Conference on Communication Problem-Solving (ICCP).**, 2015. pp.51-53
- [30] Aditya Singh, Debdeep Sarkar, Kushmanda Saurav, and Kumar Vaibhav Srivastava. "Triple Band Circularly Polarized Printed Crossed Dipole Antenna Employing Interdigital Capacitors." **2015 IEEE UP Section Conference on Electrical Computer and Electronics (UPCON).**, 2015.
- [31] S. Mohammadi, J. Nourinia, C. Ghobadi, and M. Majidzadeh. "Compact CPW-fed rotated square-shaped patch slot antenna with band-notched function for UWB applications." **Electronics Letters.**, vol. 47, no. 24, 2011. pp. 1307-1308
- [32] Y. Zhang, W. Hong, C. Yu, Z. Q. Kuai, Y. D. Don, and J. Y. Zhou . "Planar ultrawideband antennas with multiple notched bands based on etched slots on the patch and/or split ring resonators on the feed line." **IEEE Trans. on Antennas and Propagation.**, vol. 56, no. 9, 2008. pp. 3063-3068
- [33] M. Sarka, S. Dwari, and A.Daniel. "Compact printed monopole antenna for ultra-wideband application with dual band notched characteristic." **Microwave and Optical Technology Letter.**, vol. 55, no. 11, 2013. pp.2595-600
- [34] M. N. Moghadasi, G. R. DadashZadeh, A. A. Kalteh, and B. B. Virdee. "Design of a novel band notched slot patch antenna for UWB communication systems." **Microwave Optical Technology Letter.**, vol.52, no.7, 2010. pp. 1599-1603

- [35] M. Sharma, Y. K. Awasthi, H. Singh, R. Kumar, and S. Kumari. "Compact printed high rejection triple band-notch UWB antenna with multiple wireless applications." **Engineering Science and Technology, an International Journal**, vol. 19, 2016. pp. 1626-1634
- [36] K. F. Lee, K. M. Luk, K. M. Mak, and S. L. S. Yang. "On the Use of U-Slots in the Design of Dual-and Triple-Band Patch Antennas." in **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, vol. 53, no. 3, 2011. pp. 60-74
- [37] P. S Bakariya, S. Dwari, and M. Sarkar. "Triple band notch UWB printed monopole antenna with enhanced bandwidth." **AEU International Journal of Electronics and Communications**, vol. 69, 2015. pp. 26-30
- [38] P. S Bakariya, S. Dwari, and M. Sarkar. "Triple band notch UWB printed monopole antenna with enhanced bandwidth." **AEU International Journal of Electronics and Communications**, vol. 69, 2015. pp. 26-30
- [39] A. A. Kalteh, G. R. Dadashzadeh, M. Naser-Moghadasi and B. S. Virdee. "Ultra-wideband circular slot antenna with reconfigurable notch band function." **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, vol. 6, 2012. pp. 108-112
- [40] H. M. Zamel, A. M. Attiya, and E. A. Hashish. "Design of a Compact UWB Planar Antenna with Band-Notch Characterization." **National Radio Science Conference**, 2007. pp. 1-8
- [41] F. Yu, and C. H Wang. "A CPW-fed novel planar ultra-wideband antenna with a band-notch characteristic." **Radio engineering**, vol. 18, no. 4, 2009. pp.551-555
- [42] C. Wang, Z. H. Yan, P. Xu, and B. Li. "A triple band-notched UWB printed antenna with various slots." **Microwave Optical Technology Letter**, vol.54, no.9, 2012. pp.2088-2091
- [43] P. Lotfi, S. Soltani, and M. Azarmanesh. "Triple band-notched UWB CPW and microstrip line fed monopole antenna using broken η -shaped slot." **AEU International Journal of Electronics and Communications**, vol. 65, 2011. pp.734-741
- [44] J. Y. Deng, Y. Z. Yin, S. G. Zhou, and Q. Z. Liu. "Compact ultrawideband antenna with tri-band notched characteristic." **Electronics Letter**, vol. 44, 2008. pp. 1231-1233
- [45] H. J. Zhou, B. H. Sun, Q. Z. Liu and J. Y. Deng. "Implementation and investigation of U-shaped aperture UWB antenna with dual band-notched characteristics." **Electronics Letters**, vol. 44, no. 24, 2008. pp. 1387-1388
- [46] N. Ojaroudi, M. Ojaroudi, and H. Ebarhimian. "Band-notched UWB microstrip slot antenna with enhanced bandwidth by using a pair of c-shaped slots." **Microwave Optical Technology Letter**, vol.54, no.2, 2012. pp.515-518
- [47] R. Azim, M. T. Islam and A. T. Mobashsher. "Design of a dual band-notch

- UWB slot antenna by means of simple parasitic slits.” **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, vol. 12, 2013. pp. 1412-1415
- [48] J. B. Jiang, Y. Sng, Z. H. Yan, X. Zhang, and W. Wu, “Band-notched UWB printed antenna with an inverted-L-Slotted ground.” **Microwave Optical Technology Letter.**, vol. 51, no. 1, 2009. pp. 260–263
- [49] C. Y. Huang, S. A. Huang and C. F. Yang . “Band-notched ultra-wideband circular slot antenna with inverted c-shaped parasitic strip.” **Electronics Letters**, vol. 44, no.15, pp. 891-892 (2008 July)





ภาคผนวก
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

- [1] T. Archevapanich, M. Lertwatechakul, P. Rakluea, N. Anantrasirichai, and V. Chutchavong. “Ultra-Wideband Slot Antenna on Flexible Substrate for WLAN/WiMAX/UWB Applications.” **The 14th Asia Simulation Conference & The 33rd JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology.**, Kitakyushu, Japan, October 26–31, 2014
- [2] T. Archevapanich, P. Rakluea, N. Anantrasirichai, B. Purahong, and V. Chutchavong. “Rectangular Slot Antenna with Asymmetrical Conductor Strip for Bandwidth Enhancement Coverage UWB Standard.” **The 14th Asia Simulation Conference & The 33rd JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology.**, Kitakyushu, Japan October 26–31, 2014
- [3] T. Archevapanich, P. Chomtong, V. Chutchavong and P. Akkaraekthalin. “A triple-band high-gain planar dipole with double interdigital structure for indoor LTE and WLAN base stations.” **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering.**, vol. 14 no.2 , 2 October 2018

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางเตือนใจ อาชีวะพนิช
วัน เดือน ปีเกิด	10 กุมภาพันธ์ 2513 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	2525/22 ซอยกรุงเทพนนทบุรี 52 ถนนกรุงเทพนนทบุรี แขวงบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2537 ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2543 ครุศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ. 2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ตำแหน่งงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้