

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดสองโพลาไรซ์และสองความถี่
สำหรับการสื่อสารไร้สาย

DESIGN OF MICROSTRIP SLOT ANTENNA FOR DUAL CIRCULAR
POLARIZATION AND DUAL BAND IN WIRELESS COMMUNICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-D-018-111

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสองโพลาริซ์และสองความถี่
สำหรับการสื่อสารไร้สาย

DESIGN OF MICROSTRIP SLOT ANTENNA FOR DUAL CIRCULAR
POLARIZATION AND DUAL BAND IN WIRELESS COMMUNICATION



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 55298
วัน เดือน ปี 29 ต.ค. 2556

ที่ ma
b. 12557529
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกา KMITL-2013-EN-D-018-111 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF MICROSTRIP SLOT ANTENNA FOR DUAL CIRCULAR
POLARIZATION AND DUAL BAND IN WIRELESS COMMUNICATION



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารนี้มีความจำเป็น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2013
KMUTL-2013-EN-D-018-111



COPYRIGHT 2013

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
FACULTY OF ENGINEERING ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายประชาสัมพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสองโพลาไรซ์และสองความถี่
สำหรับการสื่อสารไร้สาย

Thesis Title Design of Microstrip Slot Antenna for Dual Circular Polarization and Dual Band in Wireless Communication

นักศึกษ นายอรรถพล ป้อมสถิตย์

รหัสประจำตัว 48060012

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-D-018-111

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์	
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์ หล้าสกุล	
รศ.ดร.กนก เจริญพงศ์เวช	
ผศ.ดร.พนารัตน์ เขียวถนอมวงศ์	
รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นงานการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงชื่อของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสอง
โพลาริซและสองความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สาย

นักศึกษา

นายอรรถพล ป้อมสถิตย์

รหัสนักศึกษา

48060012

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2556

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซแบบใหม่ ที่แต่ละย่านความถี่และแต่ละโพลาริซเป็นอิสระต่อกัน โดยมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน เทคนิคใหม่ที่น่าสนใจคือการจัดรูปแบบและขนาดของช่องเปิดรูปมูมฉากที่มีขนาดแตกต่างกันวางอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ความถี่แรกที่ออกแบบคือ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่รองรับการใช้งานใน WLAN ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g (2.4 GHz - 2.4835 GHz) ความถี่ที่สอง คือ 4.95 GHz โดยมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมการใช้งานใน WLAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 j/a (4.9 GHz - 5.1 GHz, 5.15 GHz - 5.35 GHz) การนำเสนอนี้จะแสดงให้เห็นว่าช่องเปิดรูปมูมฉากมีโพลาริซแบบเชิงเส้น และสามารถทำให้มีโพลาริซแบบวงกลม ณ ความถี่ใดความถี่หนึ่งได้ด้วยการใช้เทคนิคการจัดวางช่องเปิดที่มีขนาดเท่ากัน โพลาริซแบบวงกลมตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาสามารถเกิดขึ้นได้ขึ้นอยู่กับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นหรือก็คือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า สำหรับการออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปมูมฉากสองความถี่สองโพลาริซนี้จะใช้ช่องเปิดจำนวน 3 ช่องเปิด โดยที่หนึ่งช่องเปิดออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz มีโพลาริซแบบเชิงเส้นที่มีความชันเอียง +/- 45 องศา และช่องเปิดที่เหลืออีก 2 ช่องเปิด ออกแบบที่ความถี่ 4.95 GHz เพื่อทำให้เกิดโพลาริซแบบวงกลม สำหรับการสร้างจริงที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงจะใช้วัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 2.2 และมีความหนา 3.175 มิลลิเมตร ผลการวัดสายอากาศไมโครสตริปรูปมูมฉากแบบที่ 1 ที่ความถี่ 2.45 GHz มีโพลาริซแบบเชิงเส้น มีการสูญเสียย้อนกลับ -18.88 dB มีแบนด์วิดท์ประมาณ 130 MHz (2.36 GHz- 2.49 GHz) และที่ความถี่ 4.95 GHz มีโพลาริซแบบวงกลมในทิศตามเข็มนาฬิกา มีการสูญเสียย้อนกลับ -12.4 dB แบนด์วิดท์ 1,420 MHz (4.41 GHz - 5.83 GHz) และผลการวัดสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมฉากแบบที่ 2 ที่ความถี่ 2.45 GHz มีโพลาริซแบบเชิงเส้น และที่ความถี่ 4.95 GHz มีโพลาริซแบบวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา มีการสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดเท่ากับ -17.87 dB และ -10.53 dB โดยแบนด์วิดท์มีค่า 135 MHz (2.37 GHz - 2.51 GHz) และ 1,505 MHz (4.475 GHz - 5.98 GHz) ตามลำดับ สายอากาศที่ออกแบบนี้ถูกพัฒนาเพื่อรองรับกับระบบการสื่อสารไร้สาย เช่น WLAN และ WiMAX ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับอุปกรณ์หลายๆ อย่าง ได้แก่ คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ คอมพิวเตอร์แบบพกพา รวมทั้งติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์แอคเซสพอยต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Design of Microstrip Slot Antenna for Dual Circular Polarization and Dual Band in Wireless Communication
Student	Mr. Auttapon Pomsathit
Student ID.	48060012
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chawalit Benjangkprasert

ABSTRACT

This thesis presents a novel dual frequency and dual polarization microstrip-fed right angle slot antenna for independent frequency bands and polarization with simple structure. The new technique uses different slot sizes at different appropriate positions. The first frequency is designed at 2.45 GHz coverage WLAN applications standard of IEEE 802.11 b/g (2.4 GHz - 2.4835 GHz). And second frequency designed is 4.95 GHz which the bandwidth coverage WLAN applications standard of IEEE 802.11 j/a (4.9 GHz - 5.1 GHz, 5.15 GHz - 5.35 GHz). A right angle slot antenna is introduced to achieve linear polarization with slant $\pm 45^\circ$, which can achieve circular polarization at any frequency by using technique of two slots arrangement with the same size. Clockwise (right hand: RH) circular polarization and counterclockwise (left hand: LH) circular polarization can be achieved depend on the direction of wave propagation or the rotation of the electric-field vector. This right angle slot antenna for dual frequency and dual polarization is designed using three slots. One slot is designed at frequency 2.45 GHz for linear polarization, and two slots are designed at frequency 4.95 GHz to achieve circular polarization. The proposed antennas are fabricated on RT/duroid 5880 substrate with a dielectric constant of 2.2. and a thickness of 3.175 mm. The measured results of the first type right angle microstrip slot antenna at 2.45 GHz of linear polarization can obtain return loss of -18.88 dB, bandwidth of 130 MHz (2.36 GHz - 2.49 GHz) and at 4.95 GHz of RH circular polarization can obtain return losses of -12.4 dB, bandwidth of 1,420 MHz (4.41 GHz - 5.83 GHz). The second measured results at frequency 2.45 GHz of linear polarization and 4.95 GHz of LH circular polarization can obtain return loss of -17.87 dB and -10.53 dB with bandwidths of 135 MHz (2.37 GHz - 2.51 GHz) and 1,505 MHz (4.475 GHz - 5.98 GHz), respectively. The antennas were developed for used in wireless communication systems, such as WLAN and WiMAX which are applied in many devices, such as desktop computer, laptop computer, and in-building access point.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษาและประสิทธิประสาทวิชาความรู้ จากรองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต เบญจางคประเสริฐ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ นภพินท์ อนันตรศิริชัย ที่คอยช่วยเหลือให้ความรู้ คำปรึกษาและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าในด้านต่างๆ เสมอมา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง

I would like to express my deeply sincere thanks to Prof. Dr. Toshio Wakabayashi at Malaysia-Japan International Institute of Technology (MJIT) Universiti Teknologi Malaysia (UTM), for all advises and very good support to me concerning about my paper and thesis.

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จินตนา นาคะสุวรรณ อดีตหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม อาจารย์วิโรธ พิราจเนนชัย หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ และคณาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Lab.) ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับคำแนะนำและเครื่องมือในการทำวิจัยของข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ อรลภา แสงอรุณ ดร.วันวิสา ชัชวงษ์ และคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ และสร้างรอยยิ้มให้แก่ข้าพเจ้าอย่างดี
สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่สาว ของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อรรถพล ป้อมสถิตย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โครงสร้างของไมโครสตริป.....	5
2.2 คลื่นที่เกิดขึ้นบนไมโครสตริป.....	6
2.2.1 คลื่นอากาศ (space wave).....	6
2.2.2 คลื่นพื้นผิว (surface wave).....	6
2.2.3 คลื่นรั่วไหล (leaky wave).....	7
2.2.4 การเกิดคลื่นนำ (guide wave).....	8
2.3 โพลารไรซ์ของสายอากาศ.....	9
2.4 การลดทอนกำลังสัญญาณของไมโครสตริป.....	12
2.5 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....	14
2.5.1 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริป.....	14
2.5.2 การลดทอนกำลังสัญญาณของไมโครสตริป.....	18
2.5.3 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuities in microstrip).....	20
2.6 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด.....	24
2.6.1 โครงสร้างของสายอากาศ.....	24
2.6.2 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบช่องเปิด.....	25
2.6.3 การทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิด.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7 ระเบียบวิธีโมเมนต์ (The moment of method).....	28
2.8 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11.....	31
2.9 ทฤษฎีพื้นฐานและการนำไปใช้ในการจำลองสายอากาศของโปรแกรม IE3D Zeland.....	34
บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากหนึ่งความถี่บนวัสดุ ฐานรองชนิด FR-4.....	37
3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่ความถี่ 2.45 GHz รูปแบบโพลาริซเชิงเส้น.....	37
3.1.1 วัสดุฐานรอง.....	37
3.1.2 การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....	38
3.1.3 ช่องเปิดรูปมุมฉาก.....	40
3.1.4 รูปแบบการจัดวางช่องเปิดรูปมุมฉากของสายอากาศ.....	42
3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความ รูปแบบโพลาริซวงกลม.....	44
3.2.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบ โพลาริซวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	44
3.2.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบ โพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	52
บทที่ 4 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่ สองโพลาริซ.....	60
4.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสองความถี่.....	60
4.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่ สองโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	62
4.2.1 ผลการจำลองแบบ.....	64
4.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซ วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	70
4.3.1 ผลการจำลองแบบ.....	72
บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	78
5.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซ วงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา.....	78

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบ โพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	79
5.1.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบ โพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	83
5.2 สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซ วงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา.....	87
5.2.1 สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สอง โพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	87
5.2.2 สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สอง โพลาริซหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....	91
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	95
6.1 สรุปผลการออกแบบและวิเคราะห์.....	95
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	98
บรรณานุกรม.....	
ภาคผนวก.....	
ประวัติผู้เขียน.....	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองชนิดต่างๆ.....	5
2.2 การใช้งานวงจรและสายอากาศที่สัมพันธ์กับค่า ϵ_r	8
3.1 พารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	46
3.2 ผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	51
3.3 พารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	53
3.4 ผลการจำลองสายอากาศไมโครสตริปรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	59
4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	63
4.2 ผลที่ได้จากการจำลองแบบของอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	69
4.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....	71
4.4 ผลที่ได้จากการจำลองแบบของอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....	77
5.1 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz.....	82
5.2 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz.....	86
5.3 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	90
5.4 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....	93
6.1 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากที่ความถี่ต่างๆ.....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของไมโครสตริป.....5
2.2	point current source บนไมโครสตริป.....6
2.3	ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นอากาศ.....6
2.4	ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นพื้นผิว.....7
2.5	ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นรั่วไหล.....7
2.6	การเกิดคลื่นนำ.....8
2.7	ทิศทางและเวกเตอร์โพลาไรซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) โพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง (ข) โพลาไรซ์แบบวงรี และ (ค)โพลาไรซ์แบบวงกลม.....10
2.8	แบบรูปโพลาไรซ์ (polarize pattern).....11
2.9	การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป.....13
2.10	โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์.....14
2.11	เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....15
2.12	สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$17
2.13	สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \ll 1$17
2.14	ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ประสิทธิผล.....18
2.15	การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป.....19
2.16	สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบช่องต่อ.....21
2.17	สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบมุมฉาก.....22
2.18	สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบขั้น.....22
2.19	สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบรูปตัว T.....24
2.20	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด.....24
2.21	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบปิดวงจรร.....25
2.22	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบเปิดวงจรร.....25
2.23	การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น.....26
2.24	การกระจายคลื่นจากช่องเปิด.....27
2.25	วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ.....27
2.26	วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น.....27
2.27	วิธีการหมุนช่องเปิด.....28
2.28	เส้นลวดนำไฟฟ้าขนาดบางรักษาไว้ที่ศักย์คงตัว.....29
2.29	การแบ่งเส้นลวดออกเป็น N ส่วน.....29
2.30	สนามตกกระทบที่ถูกป้อนให้กับโครงสร้างโลหะ.....34
3.1	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก.....40
3.2	พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก.....40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	รูปแบบการจัดวางช่องเปิดมุมฉากของสายอากาศ.....42
3.4	เวกเตอร์สนามไฟฟ้าในระนาบของช่องเปิด.....43
3.5	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์ วงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....45
3.6	ผลการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่มี โพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา โดยมีความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz....47
3.7	VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่มีโพลาไรซ์แบบวงกลม หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz.....47
3.8	อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบ โพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา.....48
3.9	อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์แบบ วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา.....48
3.10	ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์ วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz.....49
3.11	Axial Ratio ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์ วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz.....49
3.12	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุม ฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา.....50
3.13	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุม ฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ.....51
3.14	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์ วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....52
3.15	การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบ โพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz.....54
3.16	VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่มีโพลาไรซ์วงกลมหมุน ทวนเข็มนาฬิกา.....55
3.17	อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบ โพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....55
3.18	อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์ วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....56
3.19	ประสิทธิภาพของสายอากาศของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากใน รูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20	Axial Ratio ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....57
3.21	การแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา..... 58
3.22	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ.....58
4.1	โครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์หมุนตามเข็มนาฬิกา.....62
4.2	การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ..... 64
4.3	VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ.....65
4.4	อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ.....65
4.5	อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ.....66
4.6	ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ.....66
4.7	Axial ratio ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์หมุนตามเข็มนาฬิกา.....67
4.8	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ 2 มิติ ที่ความถี่ 2.45 GHz.....67
4.9	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ 2 มิติ ที่ความถี่ 4.95 GHz.....68
4.10	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ ที่แถบความถี่ 2.45 GHz.....68
4.11	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ ที่แถบความถี่ 4.95 GHz..... 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซชันหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....70
4.13	การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซชันหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz.....72
4.14	VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซชันวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....72
4.15	อินพุตอิมพีแดนซ์ของไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซชันวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....73
4.16	อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซชันวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....73
4.17	ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซชันวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....74
4.18	Axial Ratio ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซชันหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....74
4.19	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 2.45 GHz.....75
4.20	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ 2 มิติ ที่ความถี่ 4.95 GHz.....75
4.21	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซชันวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ ที่แถบความถี่ 2.45 GHz.....76
4.22	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซชันวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ ที่แถบความถี่ 4.95 GHz.76
5.1	ด้านหน้าสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซชันวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....79
5.2	ด้านหลังสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซชันวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....79
5.3	ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S) ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซชันวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....80
5.4	VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซชันวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....80
5.5	การแผ่พลังงานระยะไกลในระนาบ XZ ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซชันวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....81
5.6	การแผ่พลังงานระยะไกลในระนาบ YZ ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซชันวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 ด้านหน้าสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบ โพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	83
5.8 ด้านหลังสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบ โพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	83
5.9 การสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับ หนึ่งความถี่แบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	84
5.10 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโ ลาไรเซชันวงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	84
5.11 การแผ่พลังงานระยะไกลในระนาบ XZ ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูป มุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	85
5.12 การแผ่พลังงานระยะไกลในระนาบ YZ ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูป มุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	85
5.13 ด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสอง ความถี่สองโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	87
5.14 ผลการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุม ฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	88
5.15 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สอง โพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	88
5.16 การแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ XZ และ YZ ของสายอากาศไมโครสตริป ช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz.....	89
5.17 การแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ XZ และ YZ ของสายอากาศไมโครสตริป ช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 4.95 GHz.....	89
5.18 ด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสอง ความถี่สองโพลาริซหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....	91
5.19 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ของอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุม ฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....	91
5.20 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สอง โพลาริซหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....	92
5.21 การแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ XZ และ YZ ของสายอากาศไมโครสตริป ช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.22	การแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ XZ และ YZ ของสายอากาศไมโครสตริป ช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซชันหมุนเวียนเข้มนาฬิกาที่ความถี่ 4.95 GHz.....	93
6.1	เปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดและการจำลองของสายอากาศ ไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซชันแบบวงกลมหมุนในทิศทางตาม เข้มนาฬิกาและทวนเข้มนาฬิกา.....	96
6.2	เปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดและการจำลองของสายอากาศ ไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซชันวงกลมหมุนในทิศทาง ตามเข้มนาฬิกาและทวนเข้มนาฬิกา.....	97



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอินเทอร์เน็ตและมัลติมีเดียได้รับความนิยมและแพร่หลายมาก จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระบบการสื่อสารไร้สายได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าอุปกรณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น โทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile) และ คอมพิวเตอร์แบบพกพา (notebook) จะต้องต่ออุปกรณ์ไร้สายที่สามารถใช้งานได้หลายๆ ระบบ โดยในแต่ละระบบก็จะมีควมถี่ที่ใช้งานแตกต่างกัน ในปัจจุบันได้มีการกำหนดมาตรฐานเพื่อรองรับ แลอบความถี่ที่ใช้งานในหลายๆ ระบบของการสื่อสารไร้สาย ตัวอย่างเช่น การสื่อสารท้องถิ่นไร้สาย หรือ ที่เรียกว่า WLAN (Wireless Local Area Network) และระบบ WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) เป็นต้น โดยแลอบความถี่ที่ใช้งานตามมาตรฐานต่างๆ คือ IEEE 802.11a/b/g/j/n สำหรับ WLAN และ IEEE 802.16-2004 สำหรับ WiMAX ถ้าเป็นมาตรฐาน IEEE 802.11b/g จะมีแลอบความถี่อยู่ในช่วง 2.4 GHz - 2.4835 GHz ส่วน IEEE 802.11a จะอยู่ในช่วง 5.15 GHz - 5.35 GHz และ IEEE 802.11n เป็นมาตรฐานรองรับสองแลอบความถี่ คือ แลอบความถี่ 2.4 GHz (2.4 GHz - 2.4835 GHz) และแลอบความถี่ 5 GHz (5.15 GHz - 5.35 GHz, 5.25 GHz - 5.35 GHz, 5.725 GHz - 5.825 GHz) สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11j จะถูกนำไปใช้ใน ประเทศญี่ปุ่นโดยจะมีแลอบความถี่อยู่ในช่วง 4.9 GHz - 5.091 GHz ส่วนระบบไวแมกซ์นั้นจะมีแลอบความถี่ที่ใช้งานคือ 2.5 GHz - 2.7 GHz, 3.4 GHz - 3.6 GHz และ 5.7 GHz - 5.9 GHz

เมื่อปี พ.ศ. 2555 ที่ผ่านมากลุ่มบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์รับส่งสัญญาณอินเทอร์เน็ตซึ่งจัดอยู่ใน มาตรฐาน Wi-Fi Alliance ได้พัฒนามาตรฐาน IEEE 802.11ac เป็นมาตรฐาน WLAN ใหม่ ที่ตั้ง เป้าหมายว่าจะมาแทน มาตรฐาน IEEE 802.11n ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน มาตรฐาน 11ac นั้นได้มีการปรับปรุงเรื่องของการเข้ารหัสใหม่ และมีการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามาใช้ ทำให้สามารถทำ ความเร็วต่ำสุดตามทฤษฎีต่อ 1 เสาได้ถึง 433 Mbps ซึ่งมีความเร็วใกล้เคียงกันกับ มาตรฐาน IEEE 802.11n ที่เป็นแบบ 3 เสา ซึ่งมีความเร็วอยู่ที่ 450 Mbps โดยมีแลอบความถี่อยู่ในช่วง 5 GHz และการใช้งานแบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้นเป็น 80 MHz หรือ 160 MHz ทำให้ความเร็วที่ได้ต่อ 1 เสาอยู่ที่ 433 Mbps ที่ 80 MHz และ 866 Mbps ที่ 160 MHz

เนื่องจากการใช้งานระบบสื่อสารต่างๆ เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการกำหนดมาตรฐานความถี่ ต่างๆ ขึ้นมารองรับดังที่กล่าวมา ซึ่งแต่ละประเทศหรือแต่ละพื้นที่ก็จะใช้มาตรฐานความถี่ที่ต่างกัน ออกไป ฉะนั้นการรับส่งข้อมูลต่างๆ ข้ามระบบไม่สามารถกระทำได้ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้น สายอากาศที่สามารถใช้งานได้สองแลอบความถี่ขึ้น อีกทั้งในอุปกรณ์สื่อสารปัจจุบันมีการรับส่งในสอง ลักษณะคือ 1. การส่งระหว่างแอคเซสพอยต์ (access point) ซึ่งอุปกรณ์แต่ละตัวถูกติดตั้งแยกพื้นที่ กัน นั้นหมายถึงจะมีสิ่งกีดขวาง อาทิ กำแพง กระจก ต้นไม้ อื่นๆ ดังนั้นการส่งสัญญาณในรูปแบบ โพลาริซวงกลมจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ที่อยู่ต่างพื้นที่กัน 2. การ ส่งระหว่างแอคเซสพอยต์กับคอมพิวเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์ตั้งอยู่ในพื้นที่บริเวณเดียวกันไม่จำเป็นต้อง ส่งสัญญาณผ่านสิ่งกีดขวางใดๆ การส่งสัญญาณในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นจึงมีความเหมาะสมที่จะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รองรับกับระบบการสื่อสารไร้สายต่างๆ โดยการใช้สายอากาศเพียงตัวเดียว ซึ่งจะเป็นการช่วยให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานอีกทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายอันเกิดจากการเพิ่มอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความมุ่งหมายเพื่อที่จะศึกษาสายอากาศสองความถี่สองโพลาริซที่มิได้โครงสร้างไม่ซับซ้อน ออกแบบง่าย และมีความถี่ใช้งาน (operating frequency) ที่อิสระต่อกัน สายอากาศสองความถี่ที่ออกแบบนี้จะสามารถควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ แบนด์วิดท์ (bandwidth) แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศ (far-field radiation pattern) และโพลาริซที่ต้องการได้ ซึ่งคุณสมบัติของสายอากาศลักษณะนี้จะกลายเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับการนำไปใช้ในระบบการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันและอนาคต ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซที่มีความถี่ใช้งานและรูปแบบโพลาริซที่ไม่อิสระต่อกัน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

นักวิจัยจำนวนมากทั้งในสถาบันการศึกษาและโรงงานอุตสาหกรรมได้แนะนำสายอากาศสองความถี่สองโพลาริซมาอย่างต่อเนื่อง เช่น สายอากาศแบบสองความถี่ [1-3] และสายอากาศแบบสองโพลาริซ [4-5] อย่างไรก็ตามสายอากาศเหล่านี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อน และออกแบบได้ยาก รวมทั้งยังทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ให้ได้ทุกความถี่ใช้งานยาก สำหรับสายอากาศไมโครสตริปแบบ CPW-ground-fed [6] จะเป็นสายอากาศแบบแถบกว้าง (wideband antenna) ที่สามารถครอบคลุมได้สองความถี่ แต่สายอากาศลักษณะแบบนี้ไม่สามารถควบคุมความถี่ทั้งสองให้มีความเป็นอิสระต่อกันได้ ทำให้เกิดปัญหาการรบกวนของคลื่นความถี่ที่ใกล้เคียงกันขึ้น นอกจากนี้ยังมีบทความวิจัยอื่นๆ ที่นำเสนอสายอากาศแบบสองความถี่สองโพลาริซ เช่น สายอากาศช่องเปิดที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป และรูปแบบ stack array [7-8,10] โดยสายอากาศนี้มีข้อดีคือ ขนาดเล็ก บาง น้ำหนักเบา และมีโครงสร้างที่ซับซ้อนในการออกแบบ และสร้างจริง ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้ในระบบการสื่อสารไร้สาย อย่างไรก็ตามสายอากาศนี้มีช่องเปิดรูปวงกลมซึ่งยากในการสร้างเพื่อใช้งานจริงและหากมีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่อการเกิดโพลาริซแบบวงกลม อีกทั้งไม่สามารถควบคุมแถบความถี่และการเกิดโพลาริซทั้งหมดให้มีความเป็นอิสระต่อกันได้ ดังนั้นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสองโพลาริซและสองความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สายในวิทยานิพนธ์นี้ จึงถูกนำเสนอโดยที่สายอากาศจะถูกออกแบบให้ช่องเปิดมีขนาดที่แตกต่างกันตามความถี่ และกำหนดให้ตำแหน่งในการวางช่องเปิดทุกตัวอยู่บนระนาบกราวด์เดียวกัน การออกแบบสายอากาศในลักษณะเช่นนี้มีข้อดีคือ ช่องเปิดรูปมูมฉากแต่ละช่องเปิดสามารถที่จะปรับความถี่ได้อย่างอิสระโดยไม่มีผลกระทบต่อกันของช่องเปิดอื่น อีกทั้งจำนวน และรูปแบบการจัดวางช่องเปิดเป็นการกำหนดรูปแบบการเกิดโพลาริซทั้งแบบเชิงเส้นและแบบวงกลม นั่นคือสายอากาศสามารถออกแบบ และสร้างให้เป็นอิสระต่อกันทั้งความถี่ และรูปแบบโพลาริซ นอกจากนี้ยังเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สร้างง่าย และสามารถนำไปใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สายได้เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์แบบใหม่ที่วางอยู่บนระนาบกราวด์และมีสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์เป็นตัวป้อนสัญญาณ ในเบื้องต้นจะเป็นการนำเสนอวิธีการออกแบบสายอากาศหนึ่งความถี่หนึ่งโพลาไรซ์ บนวัสดุฐานรองราคาถูก ที่ความถี่ 2.45 GHz จำนวน 2 แบบ คือ โพลาไรซ์เชิงเส้น (linear polarization: LP) ที่ประกอบด้วยหนึ่งช่องเปิดที่มีการจัดวางในลักษณะต่างๆ และโพลาไรซ์วงกลม ทั้งแบบตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาที่ประกอบด้วยช่องเปิดสองช่องเปิดที่มีขนาดเท่ากันและจัดวางในตำแหน่งที่ทำให้ได้โพลาไรซ์วงกลมตามเข็มนาฬิกาและโพลาไรซ์วงกลมทวนเข็มนาฬิกา สุดท้ายจะเป็นการออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปมุมฉากสองความถี่สองโพลาไรซ์บนวัสดุฐานรองที่มีคุณภาพสูง โดยกำหนดให้ช่องเปิดแรกถูกออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz มีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น และกำหนดให้ช่องเปิดจำนวนสองช่องเปิดที่มีขนาดเท่ากันถูกออกแบบที่ความถี่ 4.95 GHz มีโพลาไรซ์แบบวงกลม (circularly polarized: CP) โดยสามารถจัดวางให้มีโพลาไรซ์ในทิศตามเข็มนาฬิกา (clockwise: CW, right hand: RH) หรือทวนเข็มนาฬิกา (counter clock wise: CCW, left hand: LH) ได้ ทำให้สายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นสายอากาศสองความถี่สองโพลาไรซ์ที่มีลักษณะโครงสร้างไม่ซับซ้อน รวมทั้งช่องเปิดรูปมุมฉากของแต่ละความถี่สามารถที่จะปรับแต่งให้ใช้กับแถบความถี่ที่ต้องการอย่างเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอมีความถี่เรโซแนนซ์ตามที่ต้องการและมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมแถบความถี่ใช้งานตามมาตรฐาน WLAN และ WiMAX

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นสายอากาศแบบใหม่ ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ออกแบบง่าย มีความเป็นอิสระต่อการปรับความถี่และการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี โดยสายอากาศสองความถี่แบบนี้จะสามารถควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ได้สองแถบความถี่ในสายอากาศตัวเดียว และสามารถควบคุมรูปแบบของโพลาไรซ์ได้สองรูปแบบในสายอากาศตัวเดียวกัน คือ โพลาไรซ์เชิงเส้น แบบเอียง +/- 45 องศา และโพลาไรซ์วงกลมที่สามารถควบคุมทิศทางการหมุนได้อีกด้วย รวมถึงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศแบบรอบทิศทาง ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปใช้ในระบบการสื่อสารไร้สาย แต่ถ้าเปรียบเทียบกับสายอากาศสองความถี่สองโพลาไรซ์ในงานวิจัยอื่นๆ นั้น พบว่าสายอากาศเหล่านั้นมีการออกแบบที่ยุ่งยากเพราะมีโครงสร้างที่ซับซ้อน รวมทั้งยังไม่สามารถทำให้ความถี่ใช้งานทั้งสองแถบความถี่เป็นอิสระต่อกันได้

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอผลการจำลองสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่หนึ่งโพลาไรซ์ที่ความถี่ 2.45 GHz บนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองราคาถูก โดยสายอากาศหนึ่งความถี่หนึ่งโพลาไรซ์นี้จะใช้ช่องเปิดรูปมุมฉากจำนวนหนึ่งช่องเปิดสำหรับโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น และใช้สองช่องเปิดที่มีขนาดเท่ากันสำหรับโพลาไรซ์วงกลมที่สามารถจัดวางให้มีทิศทางการหมุนทั้งตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา ผลที่ได้จากการจำลองเป็นการแสดงให้เห็นว่าการจัดวางช่องเปิดตามขนาดของความถี่ที่ต้องการสามารถทำให้เป็นสายอากาศหนึ่งความถี่หนึ่งโพลาไรซ์ได้ จากนั้นจะนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดรูปมุมฉากไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉากสองความถี่สองโพลาไรซ์ ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz โดยใช้วัสดุฐานรองที่มีคุณภาพดี และมีความเที่ยงตรงสูง สายอากาศที่ออกแบบนี้จะใช้ช่องเปิดรูปมุมฉากรวมสามช่องเปิดเพื่อให้ได้โพลาไรซ์เชิงเส้นที่ความถี่ 2.45 GHz และโพลาไรซ์วงกลมที่ความถี่ 4.95 GHz ในกรณีโพลาไรซ์แบบวงกลมจะสามารถควบคุมทิศทางการหมุนของโพลาไรซ์ได้ นอกจากนี้จะมีการนำเสนอการปรับความถี่และการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยการปรับตำแหน่ง ขนาด และรูปแบบการวางช่องเปิดรูปมุมฉาก ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอนี้จะถูกออกแบบสำหรับนำไปใช้งานตามมาตรฐาน WLAN และ WiMAX ผลการทดสอบสายอากาศที่สร้างจริง จะถูกเปรียบเทียบกับผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IE3D Zeland ซึ่งใช้หลักการของวิธีการโมเมนต์

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 นำเสนอโครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป และทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด ทฤษฎีของโพลาไรซ์ มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11 และทฤษฎีพื้นฐานของโปรแกรม IE3D

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและจำลองผลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากหนึ่งความถี่บนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบและการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่สามารถจัดวางช่องเปิดของสายอากาศเพื่อให้ได้ 2 รูปแบบ คือ แบบโพลาไรซ์เชิงเส้น และแบบโพลาไรซ์วงกลม ซึ่งแบบโพลาไรซ์วงกลมสามารถทำให้เกิดโพลาไรซ์วงกลมในทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา (right-hand: RH) และเกิดโพลาไรซ์วงกลมในทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Left-Hand: LH) ได้ ขึ้นอยู่กับการจัดวางช่องเปิด และผลที่นำมาวิเคราะห์จะได้จากแบบจำลองโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IE3D Zeland

บทที่ 4 เป็นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์บนวัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 ที่มีคุณภาพดี มีความเที่ยงตรงสูง เหมาะสำหรับการใช้งานในความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งสายอากาศนี้จะถูกออกแบบให้สามารถใช้งานในแถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ผลที่นำมาวิเคราะห์จะได้มาจากแบบจำลองโครงสร้างของสายอากาศโดยใช้โปรแกรม IE3D Zeland

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการวัดสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากหนึ่งความถี่ที่มีโพลาไรซ์วงกลมทั้งตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา ที่ความถี่ 2.45 GHz และสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์ ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz สำหรับโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นและแบบวงกลม ตามลำดับ ซึ่งโพลาไรซ์แบบวงกลมจะมีทั้งหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา คุณสมบัติของสายอากาศที่ทำการวัด คือ การสูญเสียย้อนกลับ (return loss: S_{11}) แรงแดันคลื่นนิ่ง (voltage standing wave ratio: VSWR) แบนด์วิดท์ (bandwidth: BW) แบบรูปการแผ่พลังงานสนาม (radiation pattern) ผลการวัดสายอากาศที่สร้างจริงนั้นจะถูกเปรียบเทียบกับผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D Zeland

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

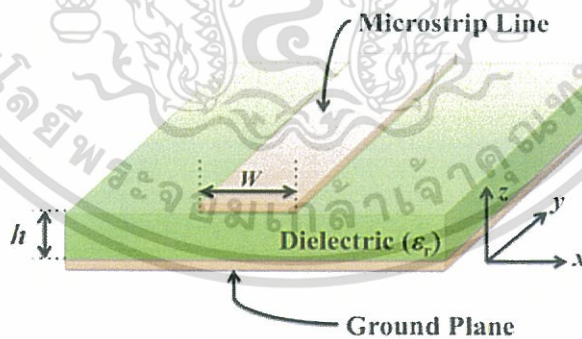
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการนำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์นี้ จะต้องใช้ทฤษฎีสายอากาศมาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยโครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป และทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด ทั้งนี้รวมไปถึงมาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11 นอกจากนี้ยังมีวิธีการวิเคราะห์สายอากาศและโปรแกรมจำลองการทำงานของสายอากาศ IE3D Zeland

2.1 โครงสร้างของไมโครสตริป

ไมโครสตริปที่ใช้งานอยู่ทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 กล่าวคือจะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบๆ อยู่บนวัสดุฐานรอง ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกและด้านล่างของวัสดุฐานรองเป็นผิวโลหะ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแคบๆ กับผิวโลหะด้านล่าง ความหนาของวัสดุฐานรองนั้นจะประมาณ 2 มิลลิเมตรหรือต่ำกว่าลงมา ความกว้างของสตริปนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ (characteristic impedance) ที่ต้องการ สำหรับความหนาของตัวสตริปนั้นจะมีค่าประมาณ 5 หรือ 10 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับการใช้เทคโนโลยีแบบฟิล์มบางหรือแบบฟิล์มหนาในการสร้างสตริปนั้น สำหรับวัสดุฐานรองที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปจะมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของวัสดุฐานรองชนิดต่างๆ และคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุฐานรอง ซึ่งได้แก่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ค่าคงตัวของความร้อน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไมโครสตริป

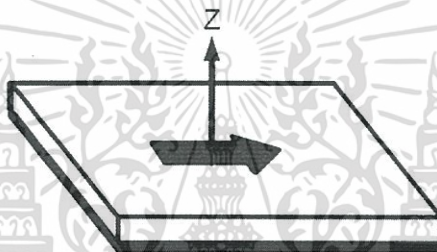
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองชนิดต่างๆ

วัสดุ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์	$\tan \delta$ ที่ความถี่ 10 GHz	ค่าคงตัวของความร้อนของการนำความร้อน $W/cm^2/^\circ C$	ความขรุขระของผิว (μm)	ความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า	
อะลูมินา	99.5%	10	2×10^{-4}	0.3	2-8	4×10^3

(alumina)	96%	9	6×10^{-4}	0.28	20	4×10^3
แซฟไฟร์ (sapphire)		9.4 และ 11.6 (ผลึกเดี่ยว)	1×10^{-4}	0.4	1	4×10^3
แก้ว		5	20×10^{-4}	0.01	1	-
ควอตซ์		3.8	1×10^{-4}	0.01	1	10×10^3
GaAs		13	6×10^{-4}	0.3	1	350

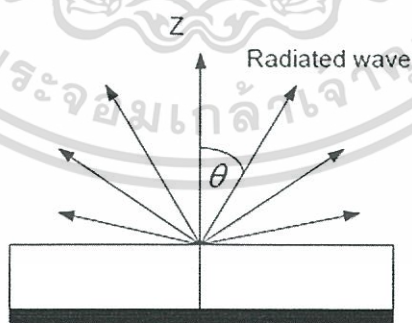
2.2 คลื่นที่เกิดขึ้นบนไมโครสตริป

หลักการส่งและแพร่กระจายคลื่นในไมโครสตริป สามารถเข้าใจได้โดยพิจารณา point current source (hertz dipole) ที่ตั้งอยู่บนด้านของกราวด์ - ไดอิเล็กทริกวัสดุฐานรอง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดนี้จะกำเนิดสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาขึ้นอยู่กับทิศทางพุ่งไป ซึ่งคลื่นส่งจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป



รูปที่ 2.2 point current source บนไมโครสตริป

2.2.1 คลื่นอากาศ (space wave) คลื่นจะถูกส่งพุ่งขึ้นไปด้วยมุม θ ระหว่าง 0 และ $\frac{\pi}{2}$ เคลื่อนที่สู่ช่องว่างเปิดด้านบนแสดงดังรูปที่ 2.3 คลื่นนี้คือคลื่นที่แพร่กระจายออกไปกับสนามความแรงและจะถูกลดลงตามระยะทาง (r) เป็นระยะทาง คลื่นอากาศเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับสายอากาศทุกชนิด

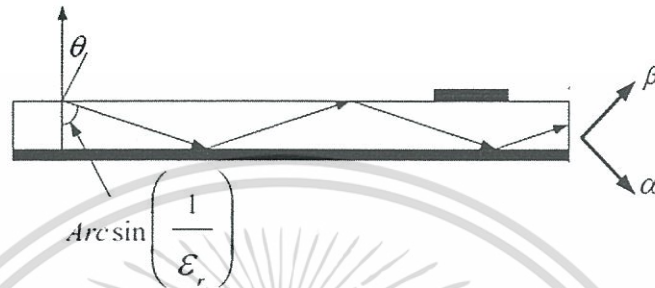


รูปที่ 2.3 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นอากาศ

2.2.2 คลื่นพื้นผิว (surface wave) คลื่นจะถูกส่งแบบเฉียงๆ ลงไปด้วยมุม θ ระหว่าง $\frac{\pi}{2}$ และ $\pi - \sin^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \right]$ จนถึงระนาบกราวด์ ซึ่งจะถูกระงับขึ้นมาถึงขอบเขตของไดอิเล็กทริกกับอากาศ ซึ่งจะสะท้อนคลื่น (สภาวะการสะท้อนรวม) สนามความแรงเพิ่มขึ้นสำหรับบางมุมจะนำไปสู่การเกิดของคลื่นพื้นผิวคล้ายกับการสะท้อนของคลื่นในท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

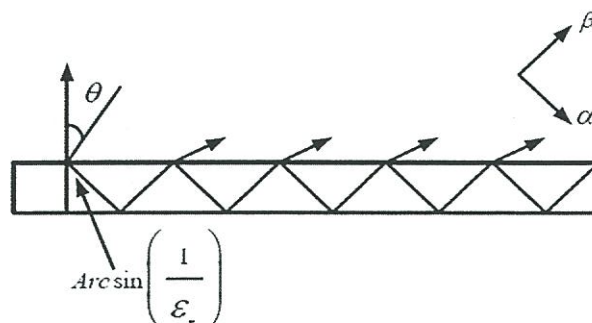
สนามยังคงเหลืออยู่ในไดอิเล็กทริกและเกิดสภาวะการจางลงที่จุดเหนือบริเวณจุดต่อดังรูปที่ 2.7 เวกเตอร์ α พุ่งขึ้นข้างบนแสดงทิศทางที่มีผลการลดทอนอย่างมาก และตามแนวนอน β จะซึมซาบในไดอิเล็กทริกคุณภาพดี ทิศทางทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน คลื่นนี้ไม่เป็นคลื่นระนาบที่มีรูปแบบคงที่ คลื่นพื้นผิวแผ่ขยายในรูปแบบทรงกระบอกรอบจุดกำเนิด ความแรงของสนามจะลดลงตามระยะทาง (r) เป็นระยะทาง $\frac{1}{r}$ ซึ่งจะช้ากว่าคลื่นอากาศ รูปแบบนี้จะคล้ายกับรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นในสายใยแก้วนำแสง



รูปที่ 2.4 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นพื้นผิว

คลื่นพื้นผิวจะทำให้ส่วนของพลังงานของสัญญาณไปได้ไม่ดี ดังนั้นความแรงของสัญญาณจะถูกลดลงและจะทำให้ค่าการลดทอนเพิ่มมากขึ้น หรือกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง คลื่นพื้นผิวจะไปรบกวนกับวงจรข้างเคียงและส่วนต่างๆ ของสายอากาศจะทำให้ประสิทธิภาพของวงจรรองความถี่ไมโครสตริปลดลงเพราะว่ามันจะไปเกิดการรบกวนเป็นแถบๆ ไปใน periodic phase array ขนาดใหญ่ ผลของคลื่นพื้นผิวจะมารบกวนแถวลำดับ (array) จนทำให้ไม่สามารถรับและส่งสัญญาณได้ เมื่อมันเป็นจุดเดียวกันกับจุดของทิศทาง (จุดบอด) มันคือปรากฏการณ์ของเรโซแนนซ์เมื่อคลื่นวัสดุฐานรอง (substrate wave) มาถึงขอบนอกของโครงสร้างเปิด คลื่นจะสะท้อนและแตกกระจายออกซึ่งมันคือการแพร่กระจาย และจะลดคุณภาพของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศลง โดยการลดวัสดุฐานรองและระดับคลื่นตัดขวาง (cross polarization surface wave) มีผลมากในทางลบสำหรับวงจรและสายอากาศ ดังนั้นควรป้องกันมันถ้าเป็นไปได้

2.2.3 คลื่นรั่วไหล (leaky wave) คือ คลื่นที่พุ่งตรงลงมาด้วยมุม θ ระหว่าง $\pi - \sin^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \right]$ และ π ซึ่งจะถูกสะท้อนโดยระนาบกราวด์ แต่จะมีบางส่วนพุ่งออกไปจากส่วนของไดอิเล็กทริกสู่อากาศเรียกมันว่า การรั่วไหลออกจากวัสดุฐานรองสู่อากาศ แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยมีชื่อว่า คลื่นรั่วไหลและในที่สุดมันแพร่กระจายคลื่นต่อไป



รูปที่ 2.5 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นรั่วไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นร้าวไหลเป็นคลื่นที่มีรูปแบบไม่สม่ำเสมออีกชนิดหนึ่ง ซึ่งการลดทอนในทิศทางของการพุ่งลงความแรงของคลื่นจะเพิ่มขึ้น เมื่อพุ่งออกจากพื้นผิวของไดอิเล็กตริก ซึ่งจะเข้าใจได้ง่ายเมื่อดูจากรูปสนามความแรงเพิ่มขึ้นเหมือนเคลื่อนจากวัสดุฐานรอง เพราะว่าคลื่นแพร่กระจายจากจุดเมื่อความแรงของสัญญาณมีขนาดใหญ่ในโครงสร้างที่สลับซับซ้อนที่มีไดอิเล็กตริกหลายๆ ชั้นที่แตกต่างกันหลายชนิด คลื่นร้าวไหลสามารถใช้เพื่อเพิ่มขนาดของสายอากาศและเพิ่มอัตราขยายที่เกิดขึ้น การเกิดขึ้นนี้จะเกิดเมื่อมีการจัดวางและคำนวณอย่างเหมาะสม ในทางตรงข้ามคลื่นร้าวไหลจะไม่เกิดในโครงสร้างชนิดมัลติเลเยอร์ (multi - layer)

2.2.4 การเกิดคลื่นนำ (guide wave) เมื่อแผ่นวงจรพิมพ์ถูกออกแบบมาที่มีลายวงจรรอยด้านบนจะทำให้เพิ่มการสะท้อนของคลื่นสู่ไดอิเล็กตริกด้านล่างและสะท้อนขึ้นลงไปเรื่อยๆ คล้ายกับท่อนำคลื่นแบบแผ่นขนานนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดคลื่นนำ

คลื่นนำจะเกิดเป็นปกติในสายนำสัญญาณและวงจรรวม ซึ่งจะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้มข้นภายในปริมาตรของไดอิเล็กตริก ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการสำหรับสายอากาศชนิดแผ่นโดยจะเป็นตัวกำหนดแบนด์วิดธ์ของสายอากาศ

ความต้องการของวงจรรายอากาศจะมีโครงสร้างของไมโครสตริปสามารถทำให้เป็นสายนำสัญญาณสายอากาศและส่งคลื่นพื้นผิว ในขณะที่คลื่นพื้นผิว สามารถให้สัญญาณคู่ระหว่างส่วนย่อย ซึ่งสัญญาณเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำ สัญญาณหรือวงจรรวมมีความเข้มข้นในตัวนำใกล้เคียง ดังนั้นคลื่นนำที่มีอยู่ในนั้นวงจรรวมที่อยู่บนวัสดุฐานรองแบบบาง (เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น) ของวัสดุสภาพยอมไดอิเล็กตริก (dielectric permittivity) ที่มีค่ามากจะทำให้คลื่นนำเกิดขึ้นมาในการออกแบบสายอากาศ คลื่นการแพร่กระจายและรูปทรงเรขาคณิตจะเป็นตัวป้องกันคลื่นนำภายในแผ่นแพร่กระจายคลื่น (patch radiated wave) จะมีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้วัสดุฐานรองแบบหนา (เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น) และมีสภาพยอมทางไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ โฟมจะทำให้ค่ายอมทางไฟฟ้ามีค่าต่ำมากซึ่งใกล้เคียงกับค่าของอากาศคลื่นพื้นผิวจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับวัสดุฐานรองชนิดหนาและค่ายอมทางไฟฟ้ามาก ในการใช้งานส่วนมากคลื่นพื้นผิวไม่เป็นที่ต้องการ ดังนั้นจึงไม่ควรใช้วัสดุฐานรองที่มีค่ายอมทางไฟฟ้ามากและเป็นชนิดหนา การเลือกใช้แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การใช้งานวงจรรวมและสายอากาศที่สัมพันธ์กับค่า ϵ_r

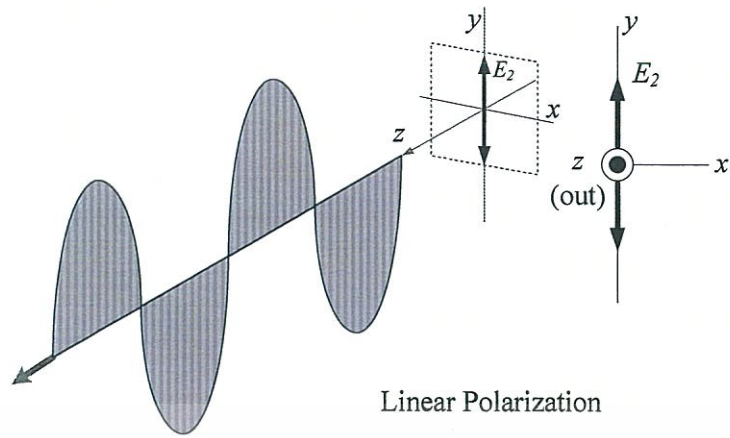
ค่ายอมทางไฟฟ้า ϵ_r	วัสดุฐานรองชนิดแผ่นหนา	วัสดุฐานรองชนิดแผ่นบาง
น้อย	-	สายอากาศ
มาก	วงจรรวมไมโครเวฟและสายส่งสัญญาณ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะของหน่วยงานที่มอบหมายให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกรค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

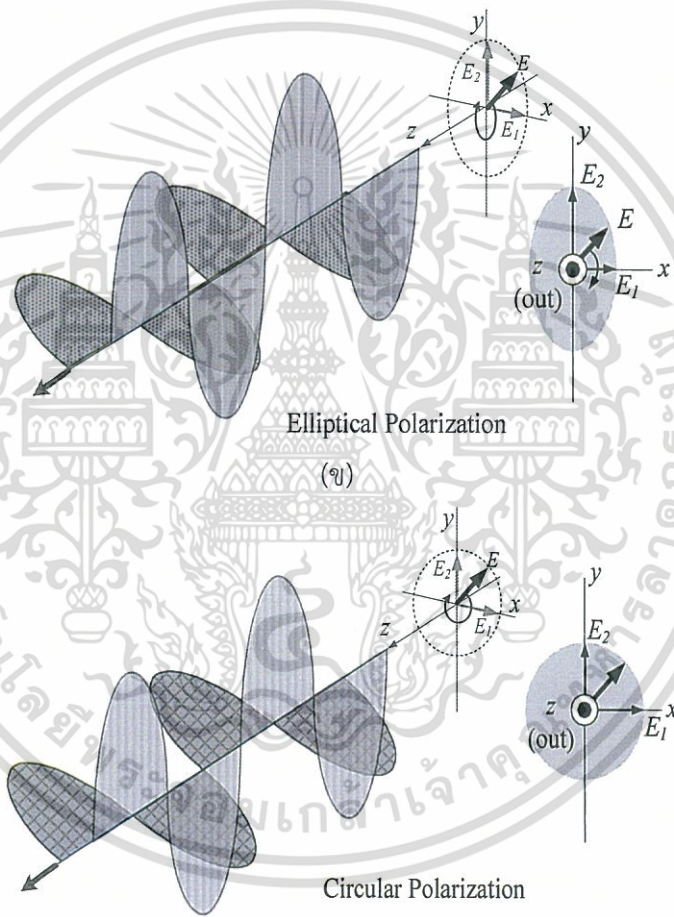
ดังนั้นที่สรุปในตารางที่ 2.2 เป็นที่น่าสังเกตว่าความต้องการของวงจรและสายอากาศขัดแย้งกัน เพราะเป็นไปได้เลยที่จะใช้วงจรทั้งสองบนแผ่นวัสดุฐานรองเดียวกันมันจะทำให้สายอากาศไม่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีบนแผ่นวงจรไมโครสตริป เมื่อรวมทั้งสองส่วนไว้ในที่เดียวกัน เมื่อหาค่าเฉลี่ยของส่วนทั้งสองผลที่ได้จึงไม่เป็นที่พอใจเท่าใดนัก คุณสมบัตินี้เป็นปัญหาในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแถวลำดับ เพราะสายป้อนสัญญาณจำเป็นต้องอยู่บนวัสดุฐานรองชนิดเดียวกันกับ patch ดังนั้นจึงทำให้เกิดคลื่นพื้นผิวซึ่งมีผลต่อระบบ จึงเป็นข้อควรระวังในการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับ

2.3 โพลาริซชันของสายอากาศ

โพลาริซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นการแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกไป โดยโพลาริซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปจะพิจารณาจากเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา ซึ่งจะผู้สังเกตการณ์จะต้องมองตามหลังคลื่นที่เคลื่อนที่ออกไปสามารถแบ่งชนิดได้เป็นโพลาริซชันแบบเชิงเส้น (linear polarization) โพลาริซชันแบบวงรี (elliptical polarization) และโพลาริซชันแบบวงกลม (circular polarization) ดังรูปที่ 2.7 [11] โดยพิจารณาจากการเคลื่อนที่หมุนของยอดเวกเตอร์สนามไฟฟ้า โดยยอดเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ที่แปรผันตามเวลาในอากาศมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงเสมอ จะเรียกว่า โพลาริซชันแบบเชิงเส้น แต่ถ้ามีการหมุนเป็นภาพวงรี หรือวงกลม จะเรียกว่า โพลาริซชันแบบวงรีและโพลาริซชันแบบวงกลมตามลำดับ โดยตามมาตรฐานการพิจารณาโพลาริซชันแบบเชิงเส้นจะอ้างอิงกับพื้นโลก ถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ส่งออกไปขนานกับพื้นโลกจะถูกนิยามว่าเป็นโพลาริซชันแบบแนวนอน (horizontal polarization) และถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับพื้นโลกจะเป็นโพลาริซชันแบบแนวตั้ง (vertical polarization) ในการพิจารณาโพลาริซชันจะพิจารณาคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางแกน z (ทิศทางพุ่งออกจากกระดาษ) จากรูปที่ 2.7 (ก) มีสนามไฟฟ้าอยู่ในทิศทางแกน y ตลอดช่วงเวลา โดยสามารถบอกได้ว่าคลื่นระนาบนี้มีแบบรูป โพลาริซชันแบบเชิงเส้นในแนวขนานกับพื้นโลก ซึ่งสามารถเขียนสมการสนามไฟฟ้าที่อยู่ในภาพของเวลาและระยะทางในสมการที่ (2.1) โดยทั่วไปสนามไฟฟ้าของคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ในทิศทางแกน z จะมีองค์ประกอบทั้งสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และแนวแกน y ดังรูปที่ 2.7 (ข) เป็นโพลาริซชันที่เกิดขึ้นมากซึ่งมีเฟสของสนามไฟฟ้าต่างกัน δ ระหว่าง 2 แกน สามารถเรียกคลื่นนี้ได้ว่ามีการโพลาริซชันแบบวงรีโดยปกติส่วนมากการเกิดโพลาริซชันแบบวงรีอาจจะมีด้วยกันอยู่หลายแบบ เช่น รูปที่ 2.7 (ข) เป็นอีกกรณีของการเกิดโพลาริซชันแบบวงรี ซึ่งจะแสดงอยู่ในภาพของการโพลาริซชันแบบเชิงเส้น 2 แกน โดยแกนหนึ่งในทิศทางแกน x และอีกแกนอยู่ในทิศทางแกน y



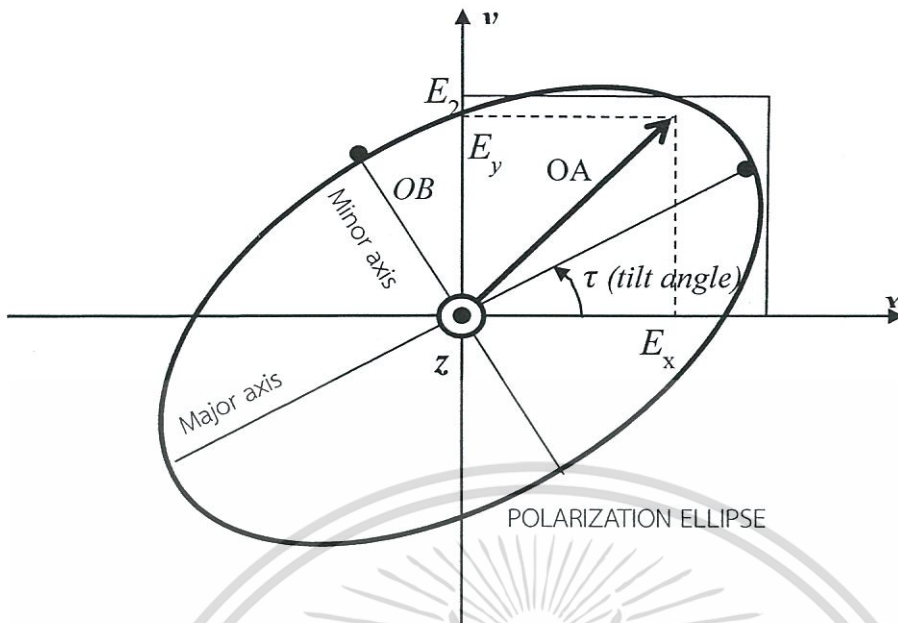
(ก)



(ค)

รูปที่ 2.7 ทิศทางและเวกเตอร์โพลาไรซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) โพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง (ข) โพลาไรซ์แบบวงรี และ (ค)โพลาไรซ์แบบวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แบบรูปโพลาไรซ์ (polarize pattern)

ถ้าคลื่นสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปแนวทิศทาง $+z$ ซึ่งสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และแนวแกน y ได้ดังนี้

$$E_x = E_1 \sin(\omega t - \beta z) \quad (2.1)$$

$$E_y = E_2 \sin(\omega t - \beta z + \delta) \quad (2.2)$$

เมื่อ E_1 และ E_2 เป็นแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ δ คือ ความต่างเฟสทางเวลาของคลื่นสนามไฟฟ้าโดยที่ E_y นำหน้า E_x ผลรวมของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าเกิดจาก E_x และ E_y จากสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) แทนในสมการที่ (2.3) จะได้

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{a}_x E_x + \vec{a}_y E_y \\ &= \vec{a}_x E_1 \sin(\omega t - \beta z) + \vec{a}_y E_2 \sin(\omega t - \beta z + \delta) \end{aligned} \quad (2.3)$$

เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าที่อยู่ในระนาบ xy ที่ระยะ $z = 0$ จะได้ $E_x = E_1 \sin(\omega t)$ และ $E_y = E_2 \sin(\omega t + \delta)$ สามารถนำ E_y เขียนอยู่ในรูปใหม่จะได้สมการที่ (2.4)

$$E_y = E_2 [\sin(\omega t) \cos(\delta) + \sin(\delta) \cos(\omega t)] \quad (2.4)$$

จากความสัมพันธ์ของ E_x จะได้ $\sin(\omega t) = E_x / E_1$ และ $\cos(\omega t) = \sqrt{1 - (E_x / E_1)^2}$ แล้วนำมาแทนในสมการที่ (2.4) จะได้สมการที่ (2.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{E_y}{E_2}\right)^2 - 2\left(\frac{E_y}{E_2}\right)\left(\frac{E_x}{E_1}\right)\cos(\delta) = \sin^2(\delta) \quad (2.5)$$

สมการที่ (2.5) เป็นสมการวงรีของโพลาริซแบบวงรี ซึ่งสมการนี้แสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า คือ แบบรูปโพลาริซการที่จะพิจารณาว่าเป็นโพลาริซแบบใดจะบอกได้จากพารามิเตอร์ที่เรียกว่าค่าอัตราส่วนตามแกนหลัก (Major-axis) ต่อแกนรอง (Minor-axis) ของแบบรูปโพลาริซดังสมการที่ (2.6)

$$AR = \frac{\text{Major-axis}}{\text{Minor-axis}} \quad 1 \leq AR \leq \infty \quad (2.6)$$

จากรูปที่ 2.8 มีเส้นตรง OA เป็นส่วนหนึ่งของแกนหลักและเส้นตรง OB เป็นส่วนหนึ่งของแกนรอง เพราะฉะนั้น $AR = OA/OB$ เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วย ซึ่งสามารถทำให้อยู่ในหน่วยเดซิเบล (dB) โดย $AR \text{ (dB)} = 10\log AR$ สำหรับคลื่นในรูปที่ 2.1 (ข) $AR = E_2 / E_1$ ซึ่งจะเป็นโพลาริซแบบวงรี ส่วนอีก 2 กรณี คือ โพลาริซแบบวงกลม ดังรูปที่ 2.1 (ค) ($E_1 = E_2$) และโพลาริซแบบเชิงเส้นดังรูปที่ 2.7 (ก) สำหรับค่าอัตราส่วนตามแกนของโพลาริซของทั้ง 2 แบบ เท่ากับ 1 (0 dB) และ ∞ ตามลำดับ

2.4 การลดทอนกำลังสัญญาณของไมโครสตริป

เนื่องจากไมโครสตริปทำด้วยโลหะที่ไม่สมบูรณ์ และมีสารไดอิเล็กตริกคั่นในบริเวณที่คลื่นส่งผ่าน ดังนั้นการลดทอนสัญญาณจึงเกิดขึ้นจากทั้งสองสาเหตุนี้ เมื่อพิจารณาว่าไมโครสตริปส่งผ่านคลื่นในโหมด TEM (Transverse Electro Magnetic) [11] จะสามารถเขียนค่าคงที่ที่อยู่ของการลดทอนสัญญาณได้ในรูปต่อไปนี้

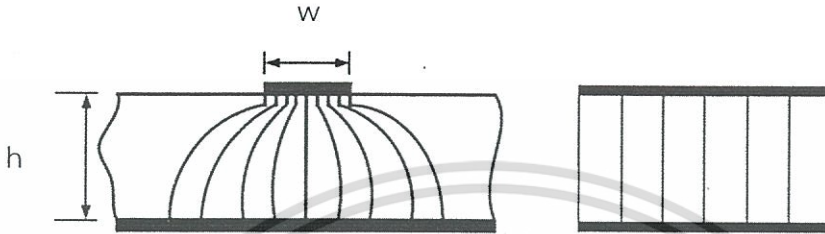
$$\alpha = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2} = \alpha_m + \alpha_d \quad (2.7)$$

โดย α_m และ α_d เป็นค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากโลหะและสารไดอิเล็กตริกตามลำดับ การหาค่า α_m โดยการวิเคราะห์ให้ละเอียดตามทฤษฎีจะทำได้ยากมากเพราะการกระจายของสนามแม่เหล็กบนผิวโลหะมีความสลับซับซ้อนมากเช่นเดียวกันกับการกระจายของสนามไฟฟ้า และจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า w/h (w = ความกว้างของตัวนำ, h = ความหนาของวัสดุฐานรอง) และมีความหนาของแถบสตริป t อีกด้วย ในทางปฏิบัตินั้นจึงมักใช้วิธีคิดที่ง่ายขึ้นโดยสมมติให้คลื่น TEM ส่งผ่านอยู่ภายในบริเวณข้างใต้แถบสตริปเท่านั้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 เสร็จแล้วคำนวณการสูญเสียในเนื้อโลหะในสภาพดังกล่าวแล้วจึงนำผลที่ได้นั้นไปคูณกับค่าคงที่ค่าหนึ่งเพื่อทำการชดเชยให้มีความถูกต้องมากขึ้น เมื่อให้ค่าคงที่ดังกล่าวเป็น K จะได้ α_m ในรูปต่อไปนี้

$$\alpha_m = \frac{KR}{2Z_c} = \frac{KR_s}{wZ_c} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \sqrt{\frac{K}{wZ_c}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2 \times 5.8 \times 10^7 \sigma_r}} \cdot \frac{K}{wZ_c} \text{ Nep/m} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ σ_r คือค่าคงตัวของการนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (relative conductivity) ที่เปรียบกับทองแดงซึ่งมี $\sigma = 5.8 \times 10^7$ ค่า k นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า w/h และความถี่โดยที่ในกรณีที่ค่า w/h มีค่าใหญ่มาากๆ ซึ่งหมายถึงคลื่น TEM จะเข้าใกล้แบบอุดมคติที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 ค่า k ก็จะลู่เข้าหา 1 ในกรณีกลับกันคือ $w/h \ll 1$ ค่า k ก็จะลู่เข้าหา 0.5 ในทางปฏิบัตินั้นพบว่ากรณีที่ออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติเป็น 50Ω โดยที่ $\epsilon_r = 10$ จะได้ค่า $k \cong 0.63$



รูปที่ 2.9 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริบ

สำหรับการหาค่า α_d ก็จะต้องอาศัยหลักการคิดค่า ϵ_{eff} ขึ้นมาใหม่ ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$\alpha_d = \frac{GZ_c}{2} = \frac{Z_c}{2} (\omega C \tan \delta_{eff}) = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{2c} (\omega C \tan \delta_{eff}) = \frac{\pi f \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \tan \delta_{eff} \text{ Nep/m} \quad (2.9)$$

โดยที่ค่า $\tan \delta_{eff}$ นั้นเปรียบเหมือนค่า $\tan \delta$ ประสิทธิภาพ ซึ่งจะสัมพันธ์กับ $\tan \delta$ ในรูปต่อไปนี้

$$\frac{\tan \delta_{eff}}{\tan \delta} = \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{(1/\epsilon_r)} \quad (2.10)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการ (2.10) นี้เป็นสิ่งที่สมเหตุสมผลเพราะเมื่อแทนค่า ϵ_{eff} ด้วย 1 ซึ่งหมายถึงตัวกลางเป็นอากาศค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ 0

เมื่อนำค่า α_m และ α_d ในสมการ (2.8) และสมการ (2.9) แทนกลับเข้าไปในสมการ (2.7) ก็จะได้ค่า α ผลรวมออกมาและเนื่องจากนิยมเขียนค่า α ให้มีหน่วยเป็น dB/m กำหนดความถี่ที่ใช้ทำงานให้มีหน่วยเป็น GHz และความกว้างของแถบสตริบให้มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังนั้น α จะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

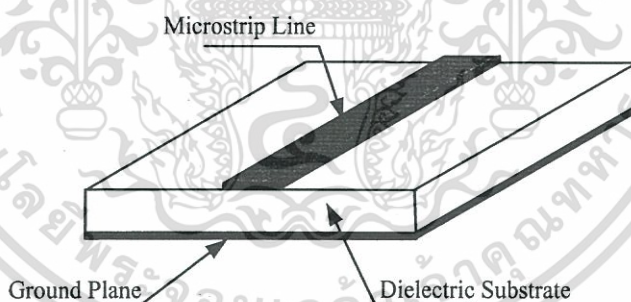
$$\alpha = \frac{72K}{\tan \delta} \sqrt{\frac{f}{\sigma_r}} + 91f \sqrt{\epsilon_{eff}} \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{(1/\epsilon_r)} \tan \delta \text{ dB/m} \quad (2.11)$$

จากผลที่ได้นี้จะเห็นได้ว่า α_m แปรตาม \sqrt{f} ในขณะที่ α_d แปรตาม f ซึ่งทำให้ดูเหมือนว่า α_d จะมีค่าสูงกว่า α_m อย่างไรก็ตามในระยะหลังนี้ได้มีการพัฒนาวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติดีขึ้นคือมีค่า $\tan \delta$ ต่ำมากทำให้ในช่วงความถี่ที่ $f < 10 \text{ GHz}$ ค่า α_m จะมีค่ามากกว่าค่า α_d และเป็นค่าสูญเสียหลักของไมโครสตริบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ (microstrip line) ที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 กล่าวคือ จะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบๆ อยู่บนวัสดุฐานรองซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบกราวด์ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแคบกับระนาบกราวด์ ความหนาของวัสดุฐานรองและความกว้างของสตริปนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับวัสดุฐานรองที่ใช้งานทั่วไปจะมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน และคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุฐานรองที่นำมาใช้ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริก โดยเทียบกับอากาศว่า ค่านี้จะส่งผลทำให้คุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปมีเปลี่ยนแปลงค่า loss tangent ($\tan\delta$) ที่ความถี่ 10 GHz คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสแอสติสเพลซเมนต์ ซึ่งค่านี้จะแสดงให้รู้ว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใด โดยที่มีค่ายิ่งต่ำก็ยิ่งดี ค่าคงตัวของการนำความร้อน (thermal conductivity) เป็นค่าที่แสดงให้รู้ว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ค่านี้ยิ่งสูงก็ยิ่งดี สุดท้ายค่าความขรุขระของผิวและความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength) ซึ่งความขรุขระของผิวนั้นจัดว่ามีความสำคัญมากเช่นเดียวกัน เพราะจะมีผลกระทบต่อ การส่งผ่านของคลื่นไปตามไมโครสตริป เพราะฉะนั้นความขรุขระน้อยจะดีกว่า สำหรับความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นจะบอกถึงความสามารถในการรับกำลังคลื่นด้วย ดังนั้นค่าสูงจะดีกว่าค่าต่ำ

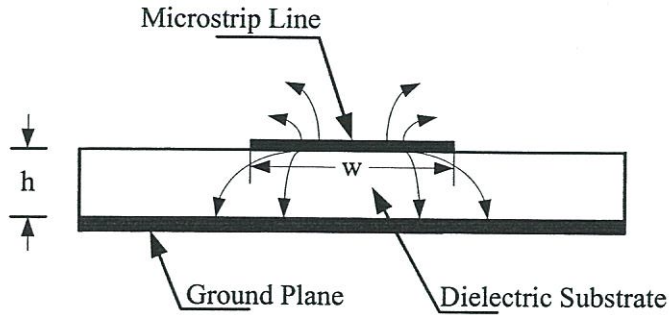


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

2.5.1 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริป

ถึงแม้สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะมีโครงสร้างง่ายๆ แต่การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปโดยละเอียดทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมาก ทั้งนี้เป็นเพราะเงื่อนไขขอบเขตของระบบค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเทียบกับท่อนำคลื่นหรือสายนำสัญญาณชนิดอื่น อย่างไรก็ตาม ได้มีผู้ทำการศึกษาทางทฤษฎีและพบว่า คลื่นที่ส่งผ่านไปตามไมโครสตริปนั้นจะใกล้เคียงกับโหมด TEM มาก แต่จะไม่ใช่มอด TEM เสียทีเดียว จึงเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่าโหมดกึ่ง TEM (quasi-TEM mode) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11 โดยแสดงถึงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สัญญาณแบบไมโครสตริปที่คลื่นส่งผ่านในโหมดกึ่ง TEM ซึ่งพออนุโลมให้เป็นโหมด TEM นี้สามารถใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปได้ กล่าวคือ ถ้าสามารถหาค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ ก็จะนำค่าทั้งสองนี้ไปคำนวณค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ได้ อย่างไรก็ตามการหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะยุ่งยากกว่าของสายคู่ขนานหรือสายโคแอกเชียล เพราะสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปมีทั้งสารไดอิเล็กตริกและอากาศอยู่ในบริเวณที่พลังงานของคลื่นส่งผ่าน สำหรับการหาค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั้นจะไม่ถูกรบกวนจากการมีสารไดอิเล็กตริก

ถึงแม้การหาค่าคาปาซิแตนซ์จะยุ่งยากกว่าปกติ แต่ก็มีวิธีที่ทำให้ง่ายขึ้น โดยใช้วิธีหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (effective dielectric constant, ϵ_{eff}) ของระบบ ซึ่งจะรวมผลของสารไดอิเล็กตริกและอากาศเข้าด้วยกัน และเนื่องจากสารไดอิเล็กตริกทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ดังนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่หาได้ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไปด้วย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองของผู้เชี่ยวชาญพบว่า ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 2 GHz ลงมา ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากกรณีของไฟฟ้าสถิตน้อยมาก จึงสามารถอนุโลมให้ใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของไฟฟ้าสถิตได้ สำหรับในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 2 GHz ก็ต้องคำนึงถึงการปรับแต่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลให้เหมาะสมกับความถี่ที่ใช้งาน

ในการหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของกรณีไฟฟ้าสถิตนั้น จะใช้แนวคิดของวงจรกระจายดังต่อไปนี้ คือ เมื่อคลื่นที่ส่งผ่านไปไมโครสตริปเป็นโหมด TEM คุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ (Z_c) ของสายส่งสัญญาณจะเขียนในรูปของค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (L) และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (C) ได้ในรูปแบบต่อไปนี้

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.12)$$

ในขณะที่เดียวกันความเร็วเฟส V_p จะเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.12) นี้ทำให้เขียน Z_c ในรูปของ V_p กับ L หรือ C ได้ดังนี้

$$Z_c = V_p L \quad (2.14)$$

ในขั้นต่อไปจะพิจารณากรณีที่วัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กทริกถูกเอาออกไปเหลือแต่
อากาศเพียงอย่างเดียวที่โอบล้อมสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปอยู่ในสภาพเช่นนี้ค่าความเร็วเฟส
ของคลื่น TEM ที่ส่งผ่านจะเท่ากับความเร็วแสง และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะ
เปลี่ยนไป โดยที่ค่าอินดักแตนซ์ไม่ถูกกระทบ ถ้าให้ค่าคาปาซิแตนซ์ที่เปลี่ยนไปนี้มีค่าเป็น C_0 จะได้
ความสัมพันธ์ระหว่าง C_0 กับความเร็วเฟสในรูปแบบต่อไปนี้

$$C = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \quad (2.15)$$

ในขณะเดียวกันค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ (Z_0) ก็เขียนได้ดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.16)$$

เมื่อนำสมการ (2.15) มาร่วมสมการ (2.16) จะได้ผลดังนี้

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 \quad (2.17)$$

ตามนิยามทั่วไปค่าของ C/C_0 คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของสาร
ไดอิเล็กทริกที่โอบล้อมระบบเก็บประจุอยู่ ค่านี้จะเปรียบเหมือนค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์
ประสิทธิผลของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรองเป็นสารไดอิเล็กทริกและ ด้านบน
เป็นอากาศอยู่ นั่นคือ

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 \quad (2.18)$$

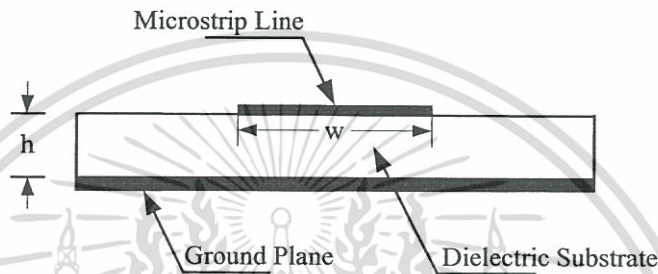
จากสมการ (2.15) ถึงสมการ (2.18) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Z_c , Z_0 และ ϵ_{eff} ได้
ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

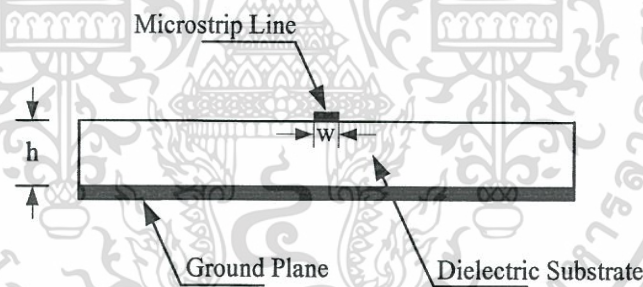
$$Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{2.19}$$

$$Z_0 = Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}} \tag{2.20}$$

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{c}{v_p} \right)^2 \tag{2.21}$$



รูปที่ 2.12 สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$



รูปที่ 2.13 สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \ll 1$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้น ถ้าสามารถรู้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลได้ ก็จะทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติอื่นตามมาได้ อย่างไรก็ตามค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงตามความกว้างของไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของวัสดุฐานรอง ซึ่งพิจารณาได้ 2 กรณี ดังต่อไปนี้ กรณีแรกคือกรณีที่ $w/h \gg 1$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ในกรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่างบริเวณที่มีแถบสตริปกับระนาบกราวด์ สภาพดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ค่า ϵ_r ของวัสดุฐานรองสำหรับกรณีที่สองคือกรณีที่ $w/h \ll 1$ แสดงดังรูปที่ 2.13 ในกรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าจะผ่านวัสดุฐานรองครึ่งหนึ่งและผ่านอากาศครึ่งหนึ่งซึ่งจะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ $(\epsilon_r + 1/2)$ จากที่อธิบายมานี้จะเห็นได้ว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงตามค่า w/h ดังนั้นจึงได้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่สามารถออกแบบได้ดังสมการที่ (2.22)

$$\frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r \quad (2.22)$$

และเพื่อความสะดวกในการคำนวณและการออกแบบต่อไป ได้มีการเขียนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลในรูปต่อไปนี้

$$\epsilon_{eff} = 1 + q(\epsilon_r - 1); \quad \frac{1}{2} \leq q \leq 1 \quad (2.23)$$

ค่า q ในสมการ (2.23) นี้ ถูกเรียกว่าฟิลลิงแฟกเตอร์ (filling factor) ซึ่งหมายถึงตัวประกอบ ที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อโครงสร้างไมโครสตริปนั้นมากน้อยแค่ไหน เมื่อเขียนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลตามสมการ (2.23) ค่า q ก็จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่า w/h

ในกรณีที่ความถี่ใช้งานสูงขึ้นกว่า 2 GHz จะใ้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปความเร็วเฟสก็จะเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งทำให้ได้ดังสมการ

$$\epsilon_{eff}(f) = \left(\frac{c}{v_p(f)} \right)^2 \quad (2.24)$$

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลตามสมการที่ (2.24) นี้ จะพบว่า ในช่วงความถี่ต่ำนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะลู่เข้าหาค่าของไฟฟ้าสถิตและเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นเข้าหาค่าอนันต์ จะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลลู่เข้าสู่ ϵ_r ของวัสดุฐานรอง เพราะความเร็วเฟสจะลู่เข้าสู่ความเร็วของแสงในสารไดอิเล็กตริกที่เป็นวัสดุฐานรอง ดังนั้นโดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลตามความถี่จะเป็นไป ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลนั้นจะสูงขึ้นตามความถี่



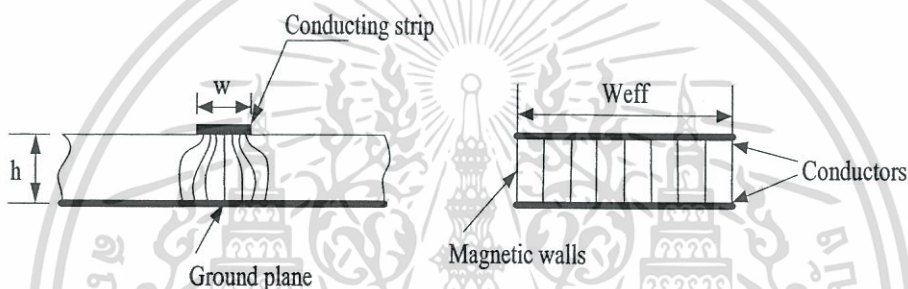
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

2.5.2 การลดทอนกำลังสัญญาณของไมโครสตริป

เนื่องจากไมโครสตริปทำด้วยโลหะที่ไม่สมบูรณ์แบบและมีสารไดอิเล็กตริกคั่นในบริเวณที่คลื่นส่งผ่าน ดังนั้นการลดทอนสัญญาณจึงเกิดจากทั้งสองสาเหตุนี้ เมื่อพิจารณาว่าไมโครสตริปส่งผ่านเอกคลื่นในโหมด TEM จะสามารถเขียนค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณได้ในรูปต่อไปนี้ ซึ่งประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2} = \alpha_m + \alpha_d \quad (2.25)$$

โดยที่ α_m และ α_d เป็นค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากโลหะและสารไดอิเล็กตริกตามลำดับ การหาค่า α_m โดยการวิเคราะห์ที่ให้ละเอียดตามทฤษฎีจะทำได้ยากมากเพราะการกระจายของสนามแม่เหล็กบนผิวโลหะมีความสลับซับซ้อนมากเช่นเดียวกับการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า w/h และความหนาของแถบสตริป t อีกด้วย ในทางปฏิบัตินั้นจึงมักใช้วิธีคิดที่ง่ายขึ้น โดยสมมติให้คลื่น TEM ส่งผ่านอยู่ภายในบริเวณข้างใต้แถบสตริปเท่านั้น ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 เสร็จแล้วคำนวณการสูญเสียในเนื้อโลหะในสภาพดังกล่าวแล้วจึงนำผลที่ได้นั้นไปคูณกับค่าคงที่ค่าหนึ่งเพื่อทำการชดเชยให้มีความถูกต้องมากขึ้นเมื่อให้ค่าคงที่ดังกล่าวเป็น K จะได้ α_m ในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.15 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป

$$\alpha_m = \frac{KR}{2Z_c} = \frac{KR_s}{wZ_c} = \sqrt{\frac{\omega\mu_u}{2\sigma}} \sqrt{\frac{K}{wZ_c}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_u}{2 \times 5.8 \times 10^7 \sigma_r}} \cdot \frac{K}{wZ_c} \text{ Nep/m} \quad (2.26)$$

โดยที่ σ_r คือค่าคงตัวของการนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ที่เทียบกับทองแดงซึ่งมี $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m ค่า K นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า w/h และความถี่ โดยที่ในกรณีที่ค่า w/h มีค่า ใหญ่หลายๆ ซึ่งหมายถึงคลื่น TEM จะเข้าใกล้แบบอุดมคติ ค่า K ก็จะลู่เข้าหา 1 ในกรณีสลับกัน คือ $w/h \ll 1$ ค่า K ก็จะลู่เข้าหา 0.5 ในทางปฏิบัตินั้นพบว่ากรณีที่ออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติเป็น 50 Ω โดยที่ $\epsilon_r = 10$ จะได้ค่า $K = 0.63$ สำหรับการหาค่า α_d ก็จะอาศัยหลักการคิดค่า ϵ_{eff} ขึ้นมาใหม่ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$\alpha_d = \frac{GZ_c}{2} = \frac{Z_c}{2} (\omega C \tan \delta_{eff}) = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{2cC} (\omega C \tan \delta_{eff}) \quad (2.27)$$

$$= \frac{\pi f \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \tan \delta_{eff} \text{ Nep/m} \quad (2.28)$$

โดยที่ค่า $\tan \delta_{eff}$ นั้นเปรียบเหมือนค่า $\tan \delta$ ประสิทธิภาพซึ่งจะสัมพันธ์กับ $\tan \delta$ ในรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\tan \delta_{eff}}{\tan \delta} = \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \quad (2.29)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการ (2.29) นี้เป็นสิ่งที่สมเหตุสมผล เพราะเมื่อแทนค่า ϵ_{eff} ด้วย 1 ซึ่งหมายถึงตัวกลางเป็นอากาศ ค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ 0 และเมื่อแทนค่า $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$ ซึ่งหมายถึงตัวกลางจะเป็นสารไดอิเล็กตริกทั้งหมด ค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ $\tan \delta$

เมื่อนำค่า α_m และ α_d ในสมการ (2.26) และสมการ (2.27) แทนกลับไปในสมการ (2.25) ก็จะได้ค่า α ผลรวมออกมา และเนื่องจากนิยามเขียนค่า α ให้อยู่ในหน่วย dB/m เขียนความถี่ที่ใช้งานให้มีหน่วยเป็น GHz และเขียนความกว้างของแถบสตริปให้มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังนั้น α จะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{72K}{wZ_c} \sqrt{\frac{f}{\sigma_r}} + 91f \sqrt{\epsilon_{eff}} \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \tan \delta \quad \text{dB/m} \quad (2.30)$$

จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า α_m แปรตาม \sqrt{f} ในขณะที่ α_d แปรตาม f ซึ่งทำให้ดูเหมือนว่า α_d จะมีค่าสูงกว่า α_m อย่างไรก็ตามในระยะหลังนี้ได้มีการพัฒนาวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติดีขึ้น คือมีค่า $\tan \delta$ ต่ำมาก ทำให้ในช่วงความถี่ที่ $f < 10$ GHz ค่า α_m จะใหญ่กว่าค่า α_d และเป็นค่าสูญเสียหลักของไมโครสตริป

2.5.3 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuities in microstrip)

แบบช่องต่อ (series gap) คุณลักษณะของความไม่ต่อเนื่องแบบช่องต่อในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปนั้นถูกมองในลักษณะของค่าคาปาซิแตนซ์ โดยรูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปแบบช่องต่อ ในการแปลงเป็นวงจรสมมูลที่บริเวณช่องต่อจะทำการแปลงเป็นวงจรข่ายแบบ π ที่มีแต่ละองค์ประกอบของวงจรเป็นตัวเก็บประจุซึ่งสามารถหาค่าของแต่ละองค์ประกอบในวงจรสมมูลได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_1 = \frac{1}{2} C_\epsilon \quad (2.31)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} C_0 - \frac{1}{4} C_\epsilon \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$C_0 = w \left(\frac{\epsilon_r}{9.6} \right)^{0.8} \left(\frac{g}{w} \right)^{m_0} e^{K_0} \times 10^{-2} \quad (2.33)$$

$$C_\epsilon = w \left(\frac{\epsilon_r}{9.6} \right)^{0.8} \left(\frac{g}{w} \right)^{m_0} e^{K_0} \times 10^{-12} \quad (2.34)$$

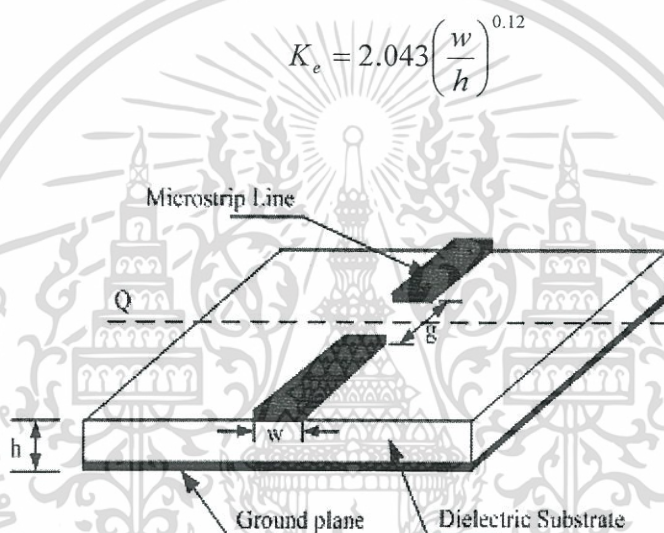
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_0 = \frac{w}{h} \left(0.619 \log \frac{w}{h} - 0.3853 \right) \tag{2.35}$$

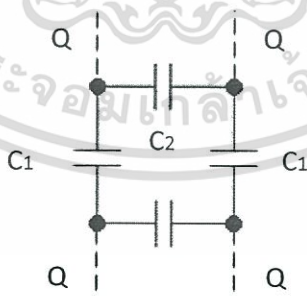
$$m_e = \begin{cases} 0.8675 & ; \text{for } \frac{g}{w} < 0.3 \\ \left(\frac{w}{h} \right)^{0.16} - 1 & ; \text{for } \frac{g}{w} < 0.3 \end{cases} \tag{2.36}$$

$$K_0 = 4.26 - 1.453 \log \frac{w}{h} \tag{2.37}$$

$$K_e = 2.043 \left(\frac{w}{h} \right)^{0.12} \tag{2.38}$$



(ก) โครงสร้าง



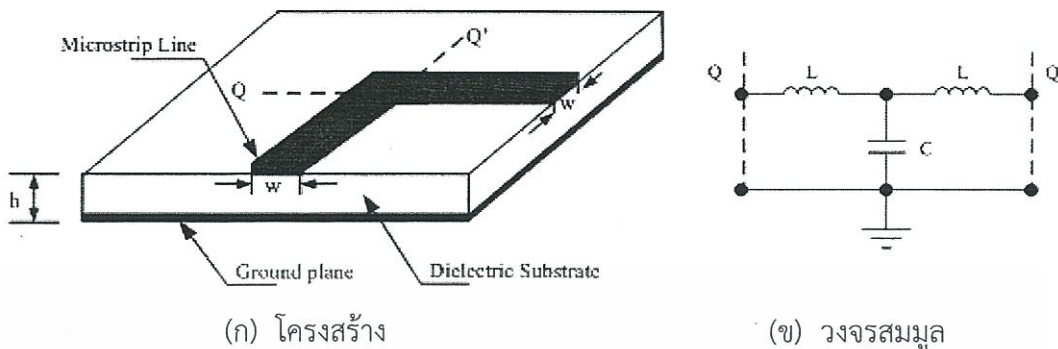
(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 2.16 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบช่องต่อ

แบบมุมฉาก (right-angled) การเปลี่ยนลักษณะของสายส่งไมโครสตริปจากเส้นตรง ให้กลายเป็นมุมแบบมุมฉากนั้นทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องบนสายส่งไมโครสตริป โดยที่การเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างในลักษณะนี้ ส่วนใหญ่เกิดจากการส่งผ่านสัญญาณหรือการกรองสัญญาณ จากรูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบมุมฉาก

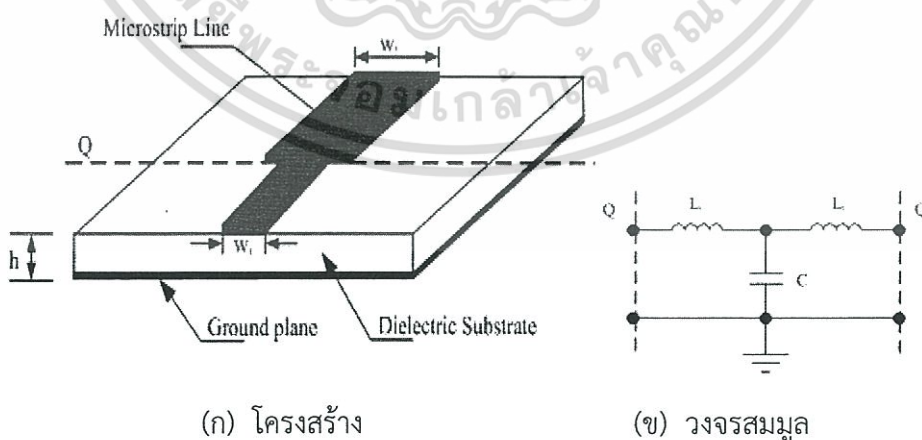


รูปที่ 2.17 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบมุมฉาก

ในการแปลงวงจรสมมูลที่บริเวณมุมฉากนั้น จะทำการแปลงเป็นวงจรข่ายแบบ T โดยจะมีตัวเหนี่ยวนำสองตัวต่อกัน และมีตัวเก็บประจุต่อขนาน ซึ่งสามารถหาค่าของอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ของแต่ละองค์ประกอบได้ดังสมการ [12]

$$m_e = \begin{cases} w \left[\frac{(14\epsilon_r + 1)(w/h) - (1.83\epsilon_r - 2.25)}{\sqrt{w/h}} + \frac{0.02\epsilon_r}{w/h} \right] & ; \text{for } \frac{w}{h} < 1 \\ w[(9.5\epsilon_r + 1.25)(w/h) + 5.2\epsilon_r + 7] \times 10^{-12} & ; \text{for } \frac{w}{h} > 1 \end{cases} \quad (2.39)$$

$$L = 100h \left(4 \sqrt{\frac{w}{h}} - 4.21 \right) \times 10^{-9} \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.18 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบขั้น

แบบขั้น (microstrip step) การที่เปลี่ยนขนาดความกว้างของแผ่นไมโครสตริปจะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่งสัญญาณขึ้น โดยการออกแบบให้แผ่นไมโครสตริป ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดความไม่ต่อเนื่องแบบเป็นขั้นนี้ ส่วนใหญ่จะทำเมื่อต้องการทำจับคู่ตัวแปลงสัญญาณ ตัวเชื่อมต่อสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณ และการส่งผ่านสัญญาณ จากรูปที่ 2.18 จะพบว่า การหาค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์สามารถพิจารณาได้จากค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลในเทอมของอินดักแตนซ์กับคาปาซิแตนซ์ ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.41)

$$L_1 = \frac{L_{w1}}{L_{w1} + L_{w2}} L \quad (2.41)$$

$$L_2 = \frac{L_{w2}}{L_{w1} + L_{w2}} L \quad (2.42)$$

$$L = h \left[40.5 \left(\frac{w_1}{w_2} - 1 \right) - 75 \left(\frac{w_1}{w_2} \right) + 0.2 \left(\frac{w_1}{w_2} - 1 \right)^2 \right] \times 10^{-9} \quad (2.43)$$

เมื่อ L_{w1} และ L_{w2} เป็นตัวเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาวของสายไมโครสตริปที่มีความกว้างเป็น w_1 และ w_2 ตามลำดับ

$$c = \sqrt{w_1 w_2} \left[(10.1 \log \epsilon_r + 2.33) \frac{w_1}{w_2} - 12.6 \log \epsilon_r - 3.17 \right] \quad (2.44)$$

แบบรูปตัว T (microstrip T-junction) สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบรูปตัว T มีโครงสร้างและวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.19 จากโครงสร้างและวงจรสมมูลจะเห็นว่าแบบรูปตัว T นั้น จะมีลักษณะคล้ายรูปมุมฉาก การออกแบบให้สายส่งสายอากาศไมโครสตริปเกิดความไม่ต่อเนื่องแบบเป็นขั้นนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในวงจรไมโครเวฟ เช่น เพื่อต้องการเพิ่มพอร์ทในการส่งสัญญาณ ตัวเชื่อมต่อสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณ การทำแมตซ์เพื่อเชื่อมต่อกับวงจรหรือนำไปใช้ออกแบบป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป จากวงจรสมมูลจะพบว่า การหาค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์นั้นสามารถที่จะพิจารณาในเทอมของอินดักแตนซ์กับคาปาซิแตนซ์ โดยกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำที่อยู่พอร์ท Q'' มีค่าเป็น L_1 ส่วนตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ทางด้านพอร์ท Q และพอร์ท Q' มีค่าอินดักแตนซ์เป็น L_2 และมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ซึ่งค่าของแต่ละองค์ประกอบสามารถหาได้จากสมการดังนี้

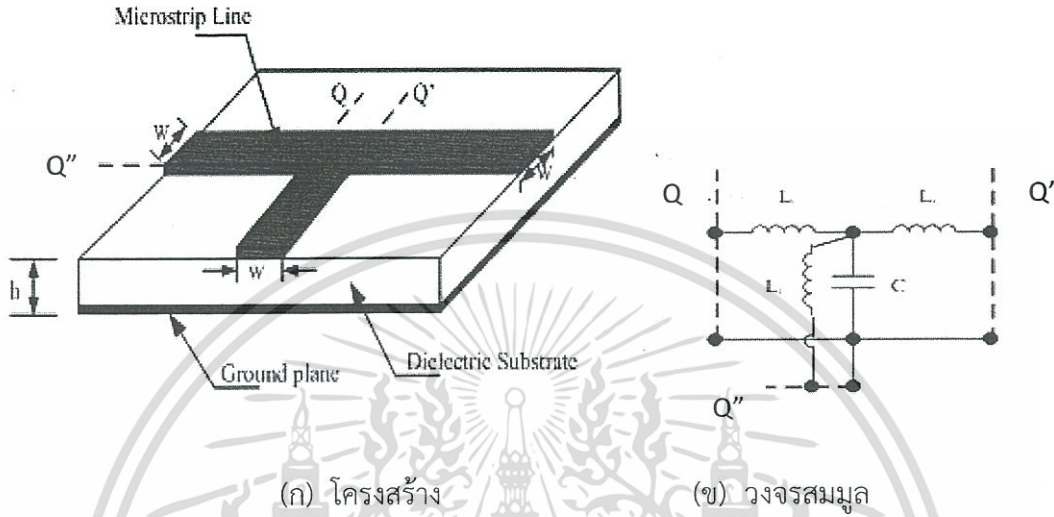
$$L_1 = hL_w \left[\left(0.12 \frac{w}{h} - 0.47 \right) \frac{w}{h} + 0.195 \frac{w}{h} - 0.357 + 0.0283 \sin \left(\pi \frac{w}{h} - 0.75\pi \right) \right] \quad (2.45)$$

$$L_2 = -wL_w \left[\frac{w}{h} \left(-0.016 \frac{w}{h} + 0.064 \right) + \frac{0.016}{w/h} \right] \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ L_w เป็นค่าอินดักแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของสายส่งไมโครสตริปที่มีความกว้างเป็น w

$$C = w \left[\frac{100}{\tanh(0.0072Z_0)} + 0.64Z_0 - 261 \right] \times 10^{-12} \quad (2.47)$$

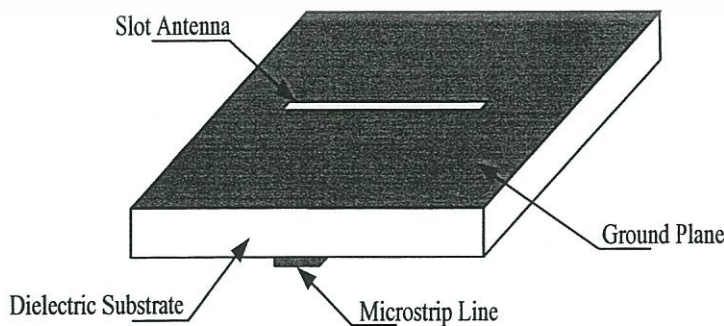


(ก) โครงสร้าง (ข) วงจรสมมูล
รูปที่ 2.19 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบรูปตัว T

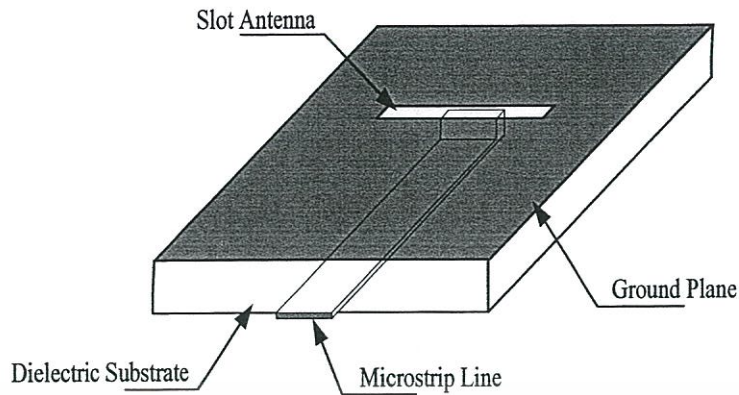
2.6 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด

2.6.1 โครงสร้างของสายอากาศ

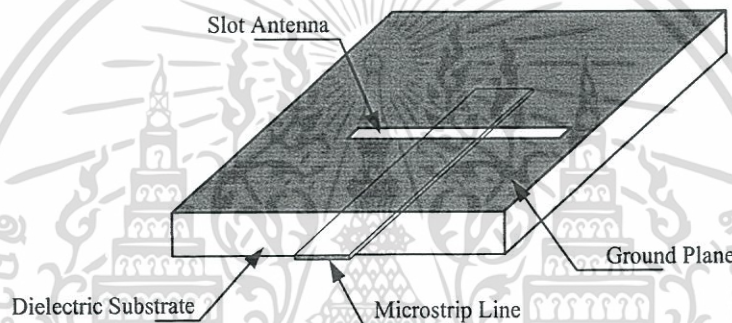
ลักษณะของโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดจะประกอบด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์และสายอากาศแบบช่องเปิดวางตั้งฉากกับไมโครสตริปไลน์อยู่บนระนาบกราวด์ โดยมีวัสดุฐานรองเป็นตัวกั้นกลางระหว่างสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์กับสายอากาศแบบช่องเปิด โดยลักษณะของการส่งผ่านสัญญาณของคลื่นนั้นจะมีอยู่ 2 แบบหลักๆ คือ แบบปิดวงจรซึ่งจะเป็นการต่อตัวนำจากสายส่งสัญญาณผ่านวัสดุฐานรองไปปิดวงจรที่ขอบของช่องเปิด (microstrip terminated in a short circuit) ดังรูปที่ 2.20 และอีกวิธีคือ แบบเปิดวงจร (microstrip terminated in an open circuit) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบปิดวงจร



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบเปิดวงจร

2.6.2 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบช่องเปิด

สายอากาศแบบช่องเปิดนั้นจะมีการกระจายคลื่นผ่านหลายตัวกลาง ซึ่งเกิดเนื่องจากแหล่งกำเนิดคลื่นนั้นอยู่ที่บริเวณหนึ่ง ส่วนคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศจะกระจายไปในอีกบริเวณหนึ่งซึ่งมีตัวกลางที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 จากภาพการเดินทางของคลื่นจากตัวกลางที่ 1 ไปยังตัวกลางที่ 2 โดยที่ตัวกลางที่ 1 ถูกปิดล้อมด้วยผิวปิด S' ถ้าตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 มีค่าคงที่ของตัวกลางไม่เหมือนกันหรือมีค่าอินทริกสิกิมพีแดนซ์ (intrinsic impedance) ไม่เหมือนกัน คลื่นที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นเมื่อกระทบกับผิวขอบเขตจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นเข้าสู่ตัวกลางที่ 1 ส่วนหนึ่ง และส่งผ่านคลื่นเข้าไปในตัวกลางที่ 2 อีกส่วนหนึ่ง ดังนั้นถ้าให้ \vec{E}' และ \vec{H}' เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่น โดยที่ \vec{E}' และ \vec{H}' เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการสะท้อนที่ผิวขอบเขต ส่วน \vec{E}'' และ \vec{H}'' เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 ดังนั้นในตัวกลางที่ 1 คลื่นที่ปรากฏอยู่ก็คือผลบวกระหว่างคลื่นตกกระทบกับคลื่นสะท้อนรวมกัน ส่วนในตัวกลางที่ 2 นั้นก็จะมีเพียงคลื่นที่ส่งผ่าน โดยสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\vec{E}_i + \vec{E}_r = \vec{E}_t \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{H}_t^i + \vec{H}_t^r = \vec{H}_t^i \quad (2.49)$$

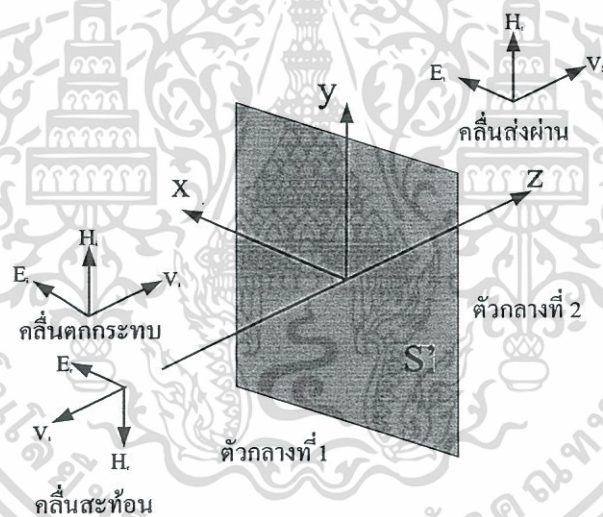
โดยที่ตัวห้อย t หมายถึง ส่วนประกอบของสนามในแนวขนานกับผิวขอบเขต

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นตรงผิวขอบเขตนั้น สามารถคิดได้ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสมมูล และกระแสแม่เหล็กสมมูลที่กระจายอยู่บนขอบเขตในรูปสมการต่อไปนี้

$$\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}_t^i \quad (2.50)$$

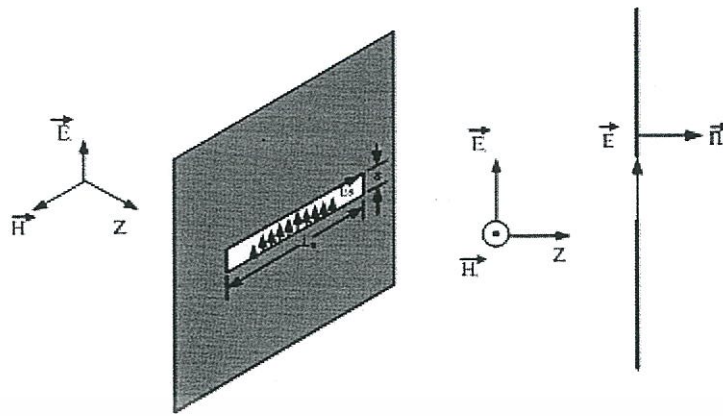
$$\vec{M} = \vec{n} \times \vec{E}_t^i \quad (2.51)$$

โดยที่ \vec{J} คือ กระแสไฟฟ้าสมมูล
 \vec{M} คือ กระแสแม่เหล็กสมมูล
 \vec{n} คือ เวกเตอร์หน่วยที่ผิวขอบเขต



รูปที่ 2.23 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น

เมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ากระทบแผ่นตัวนำสมบูรณ์แบบที่มีช่องเปิดแคบๆ ดังรูปที่ 2.23 โดยมีทิศของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแนวของช่องเปิด และถ้าให้ความกว้างของช่องเปิด (S) มีค่าน้อยๆ นั้นหมายความว่าช่องเปิดแคบมากๆ กระแสไฟฟ้าสมมูล ($\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}^i$) จะมีขนาดจำกัดและเมื่อให้ S เข้าใกล้ศูนย์ กระแสไฟฟ้าสมมูลที่ว่านี้อาจตัดทิ้งได้เพราะเนื่องจากมีขนาดเล็กมาก แต่ส่วนที่เป็นกระแสแม่เหล็กสมมูล ($\vec{M} = \vec{n} \times \vec{E}^i$) นั้นไม่สามารถที่จะตัดทิ้งได้เพราะเมื่อ S เข้าใกล้ศูนย์ สนามไฟฟ้าที่ช่องเปิดจะลู่เข้าหาอนันต์จึงไม่สามารถตัดทิ้งได้

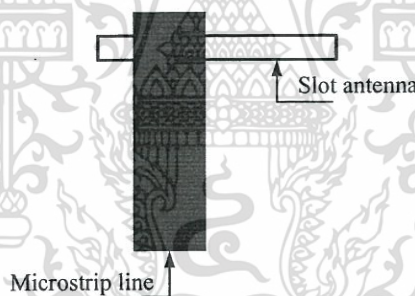


รูปที่ 2.24 การกระจายคลื่นจากช่องเปิด

2.6.3 การทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิด

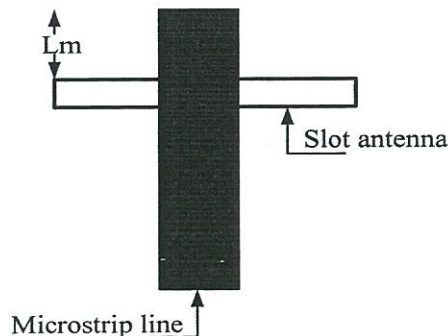
วิธีการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดนั้น โดยพื้นฐาน จะมีด้วยกัน 3 วิธี คือ

1) วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ (offset microstrip feeding) เป็นวิธีเลื่อนหรือเปลี่ยนตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริบไลน์ โดยเลื่อนไปทางซ้ายหรือทางขวาเท่านั้นดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ

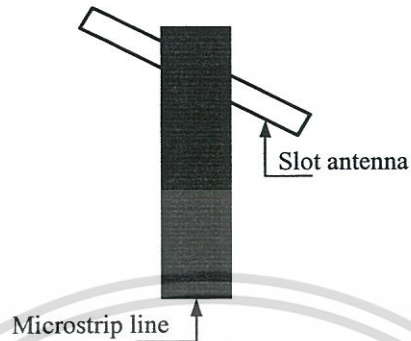
2) วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น (stub-tuning) โดยวิธีนี้จะเป็นการเปลี่ยนขนาดความยาวของสายส่งสัญญาณ จากรูปที่ 2.26 กำหนดให้ L_m เป็นความยาวของท่อนสั้นวัดเทียบจากขอบของช่องเปิดจนถึงปลายสายส่งสัญญาณ การทำแมตซ์อิมพีแดนซ์วิธีนี้จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ด้วย



รูปที่ 2.26 วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) วิธีการหมุนช่องเปิด (center-fed but inclined microstripline feed) วิธีการนี้คือการทำให้ช่องเปิดไม่ตั้งฉากกับสายส่งสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.27 ซึ่งการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์วิธีนี้ จะมีความยุ่งยากและไม่ค่อยได้รับความนิยม



รูปที่ 2.27 วิธีการหมุนช่องเปิด

2.7 ระเบียบวิธีโมเมนต์ (The moment of method) [12]

ระเบียบวิธีโมเมนต์มีประโยชน์ในเรื่องแนวคิดอย่างง่าย ระเบียบวิธีโมเมนต์จะนำมาใช้กับการแก้สมการเชิงอินทิกรัล ยกตัวอย่างเช่น สมมติต้องการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์เพื่อแก้สมการของปัวซงส์ ผลเฉลยเชิงอินทิกรัลในสมการของปัวซงส์คือ

$$V = \int \frac{\rho_v dv}{4\pi\epsilon_r} \quad (2.52)$$

สมการที่ (2.52) ได้มาจากกฎของคูลอมบ์และการกระจายประจุที่กำหนดมาให้คือ $\rho_v(x, y, z)$ จะทำให้สามารถหาค่าศักย์ $V(x, y, z)$ สนามไฟฟ้า $E(x, y, z)$ และประจรรวมได้ และอีกนัยหนึ่งถ้าทราบค่าศักย์แต่ไม่ทราบการกระจายประจุ จะหา ρ_v จากสมการที่ (2.52) อย่างไรในสถานการณ์นั้นสมการที่ (2.52) จะกลายเป็นสมการที่ถูกเรียกว่า สมการอินทิกรัล (integral equation) ซึ่งโดยทั่วไปสมการ kernel integral เป็นสมการหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันไม่รู้ค่าภายในเครื่องหมายอินทิกรัลซึ่งมีรูปแบบทั่วไปคือ

$$V(x) = \int_a^b K(x,t)\rho(t)dt \quad (2.53)$$

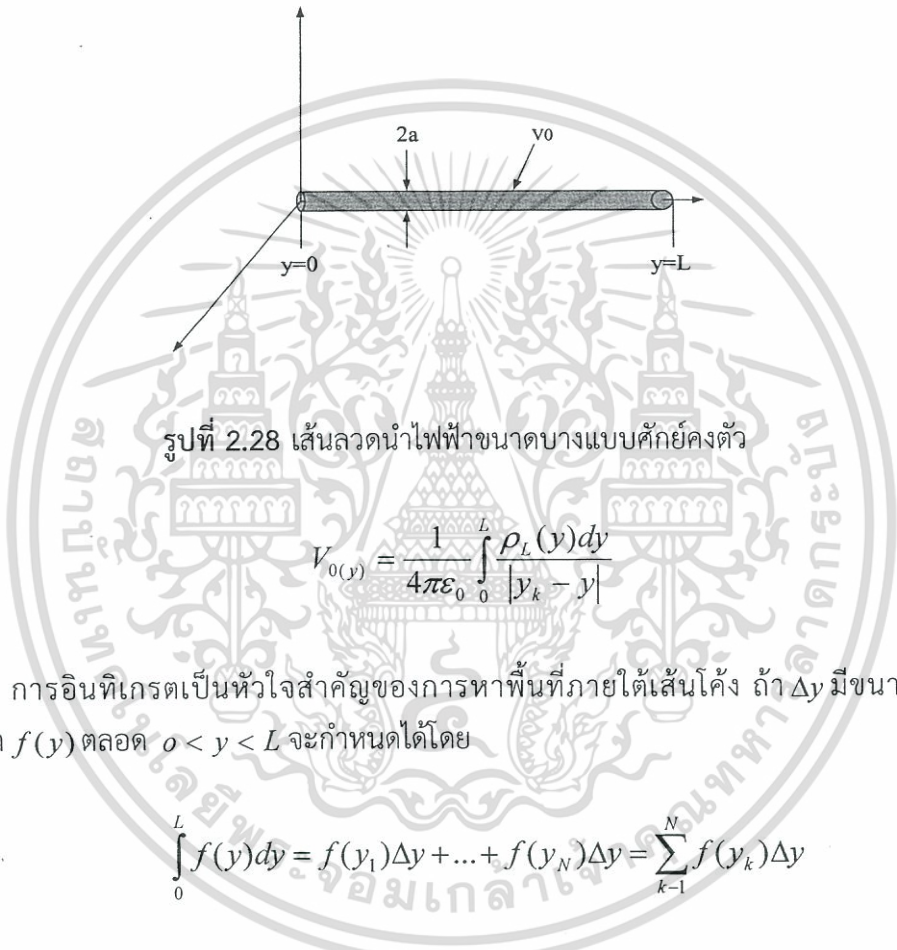
เมื่อทราบค่าฟังก์ชัน $K(x,t)$ ฟังก์ชัน $V(t)$ และลิมิต a และ b ก็หาค่าฟังก์ชันตัวไม่รู้ค่า $\rho(t)$ ได้ ซึ่งฟังก์ชัน $K(x,t)$ จะถูกเรียกว่า ส่วนประกอบหลัก (kernel) ของสมการ ระเบียบวิธีโมเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขระเบียบวิธีหนึ่งที่ใช้แก้สมการเชิงอินทิกรัลดังเช่นสมการที่ 2.53 ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่อธิบายได้ดีที่สุดเป็นตัวอย่าง

พิจารณาเส้นลวดนำไฟฟ้าขนาดบางที่มีรัศมี a ความยาว $L(L_1a)$ อยู่ที่ตำแหน่งในอากาศ เอกสว้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.28 โดยกำหนดให้เส้นลวดถูกบำรุงรักษาที่ศักย์ V_0 เป้าหมายคือหาความไม่วางครณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นประจุ ตามเส้นลวดโดยใช้ระเบียบวิธีโวลุ่มเมนต์ เมื่อหา ρ_L ได้แล้ว ก็หาความสัมพันธ์ปริมาณสนามได้ ซึ่ง ณ จุดใดๆ บนเส้นลวด สมการที่ (2.54) จะลดลงเป็นสมการเชิงอินทิกรัลที่มีรูปแบบเป็น

$$V_0 = \int_0^L \frac{\rho_L dl}{4\pi\epsilon_0 r} \tag{2.54}$$

เนื่องจากสมการที่ (2.54) ประยุกต์ใช้กับจุดสังเกตทุกๆ ที่บนเส้นลวด ซึ่งที่จุดตายตัว y_k จะรู้จักกันในนาม จุดเข้าคู่ (match point)

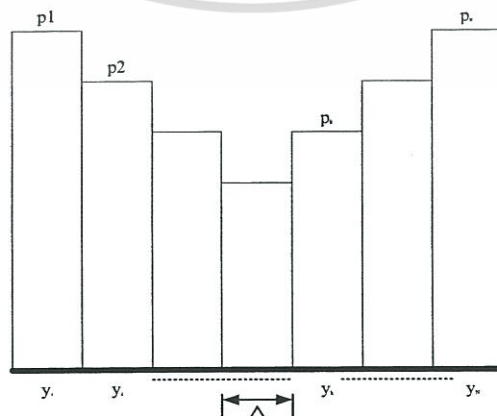


รูปที่ 2.28 เส้นลวดนำไฟฟ้าขนาดบางแบบค้ำยัค้งตัว

$$V_{0(y)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^L \frac{\rho_L(y) dy}{|y_k - y|} \tag{2.55}$$

การอินทิเกรตเป็นหัวใจสำคัญของการหาพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง ถ้า Δy มีขนาดเล็กการอินทิเกรต $f(y)$ ตลอด $0 < y < L$ จะกำหนดได้โดย

$$\int_0^L f(y) dy = f(y_1)\Delta y + \dots + f(y_N)\Delta y = \sum_{k=1}^N f(y_k)\Delta y \tag{2.56}$$



รูปที่ 2.29 การแบ่งเส้นลวดออกเป็น N ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่เฉพาะเจาะจงเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อช่วง L ถูกแบ่งออกเป็น N หน่วย ซึ่งแต่ละหน่วยมีความยาว Δy สำหรับเส้นลวดที่ถูกแบ่งออกเป็น N ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนยาวเท่ากับ Δ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.29 จะทำให้สมการที่ (2.57) กลายเป็น

$$4\pi\epsilon_0 V_0 \cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_k - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_k - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_k - y_N|} \quad (2.57)$$

เมื่อ $\Delta = L/N = \Delta y$ การสมมติในสมการที่ (2.57) คือความหนาแน่นตัวไม่รู้ค่า ρ_k บนส่วนที่ k ให้เป็นค่าคงตัว ดังนั้นในสมการที่ (2.57) มีค่าคงตัวตัวไม่รู้ค่า $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ เนื่องจากสมการที่ (2.57) ต้องใช้ได้กับทุกจุดบนเส้นลวดจึงได้รับ N คล้ายกับสมการโดยเลือกจุดเข้าคู่ N ที่ $y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_n$ บนเส้นลวดดังนั้นจะได้

$$4\pi\epsilon_0 V_0 \cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_1 - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_1 - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_1 - y_N|} \quad (2.58a)$$

$$\cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_k - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_k - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_k - y_N|} \quad (2.58b)$$

$$\therefore 4\pi\epsilon_0 V_0 \cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_N - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_N - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_N - y_N|} \quad (2.58c)$$

ความคิดเรื่องการนำด้านซ้ายมือเข้าคู่กับด้านขวามือของสมการที่ (2.58) ที่จุดเข้าคู่จะคล้ายกับแนวคิดการกำหนดโมเมนต์ในทางกล ซึ่งเป็นการวางเหตุผลว่าทำให้วิธีการนี้จึงถูกเรียกว่าระเบียบวิธีโมเมนต์ จะเห็นได้จากรูปที่ 2.30 ว่าจุดเข้าคู่ $y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_n$ ได้ถูกวางไว้ที่จุดศูนย์กลางของแต่ละส่วนซึ่งสมการที่ (2.57) สามารถนำมาใส่ไว้ในรูปแบบเมตริกซ์ได้เป็น

$$[B] = [A][\rho] \quad (2.59)$$

เมื่อ

$$[B] = 4\pi\epsilon_0 V_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2N} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ A_{mn} & & & \cdot \\ A_{N1} & A_{N2} & \dots & A_{NN} \end{bmatrix} \quad (2.61a)$$

$$A_{mn} = \frac{\Delta}{[y_m - y_n]} mn \quad (2.61b)$$

$$[\rho] = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \rho_N \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

ในสมการที่ (2.59) มี $[\rho]$ เป็นเมตริกซ์ที่ยังไม่รู้ค่าสมาชิก (element) สามารถหา $[\rho]$ จากสมการที่ (2.59) โดยใช้หลักเกณฑ์คราเมอร์ (Cramer's rule) โดยการใช้การผกผันของเมตริกซ์ (matrix inversion) หรือโดยใช่วิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian elimination) ซึ่งสำหรับการใช้การผกผันเมตริกซ์ คือ

$$[\rho] = [A]^{-1}[B] \quad (2.63)$$

เมื่อ $[A]^{-1}$ เป็นตัวผกผันของเมตริกซ์ $[A]$ ในสมการที่ (2.61) หรือ (2.62)

2.8 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11 [13-14]

ในการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงสุด 54 Mbps (เมกะบิตต่อวินาที) โดยใช้คลื่นวิทยุ แถบเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2540 โดยสถาบัน IEEE (The Institute of Electronics and Electrical Engineers) ซึ่งมีข้อกำหนดระบุไว้ว่า ผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายในส่วนของ PHY Layer นั้นมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลที่ความเร็ว 1, 2, 5.5, 11 และ 54 Mbps โดยมีสี่น่านสัญญาณ 3 ประเภทให้เลือกใช้งานอันได้แก่ คลื่นวิทยุแถบความถี่ 2.4 GHz, 2.5 GHz และคลื่นอินฟราเรด ส่วนในระดับชั้น MAC Layer นั้น ได้กำหนดกลไกของการทำงานแบบ CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ CSMA/CD (Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 อีเทอร์เน็ตซึ่งนิยมใช้งานบนระบบเครือข่ายแลนไร้สาย โดยมีกลไกในการเข้ารหัสข้อมูลก่อนแพร่กระจายสัญญาณ

ออกสู่ภายนอก พร้อมกับมีการตรวจสอบผู้ใช้งานอีกด้วยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน IEEE 802.11 ในยุคเริ่มแรกนั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ค่อนข้างต่ำ ทั้งไม่มีการรับรองคุณภาพของการให้บริการที่เรียกว่า QoS (Quality of Service) ซึ่งมีความสำคัญในสภาพแวดล้อมที่มีโปรแกรมประยุกต์หลากหลายประเภทให้ใช้งาน นอกจากนี้กลไกในเรื่องการรักษาความปลอดภัยที่นำมาใช้ก็ยังมีช่องโหว่จำนวนมาก IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกัน เพื่อทำการพัฒนาและปรับปรุงมาตรฐานให้มีศักยภาพเพิ่มสูงขึ้น

2.8.1 IEEE 802.11a เป็นมาตรฐานที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่เมื่อปี พ.ศ. 2542 โดยใช้เทคโนโลยี OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อพัฒนาให้ผลิตภัณฑ์ไร้สายมีความสามารถความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นแถบความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้งานโดยทั่วไปในประเทศไทย เนื่องจากสงวนไว้สำหรับกิจการทางด้านดาวเทียม ข้อเสียของผลิตภัณฑ์มาตรฐาน IEEE 802.11a ก็คือ มีรัศมีการใช้งานในระยะสั้นและมีราคาแพง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11a จึงได้รับความนิยมน้อย

2.8.2 IEEE 802.11b เป็นมาตรฐานที่ถูกตีพิมพ์และเผยแพร่ออกมาพร้อมกับมาตรฐาน IEEE 802.11a เมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและได้รับความนิยมในการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมาให้รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ร่วมกับเทคโนโลยี DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps โดยใช้คลื่นสัญญาณวิทยุแถบความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นแถบความถี่ที่อนุญาตให้ใช้งานในแบบสาธารณะทางด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้ความถี่แถบนี้มีหลายชนิดทั้งผลิตภัณฑ์ที่รองรับเทคโนโลยี bluetooth โทรศัพท์ไร้สายและเตาไมโครเวฟ จึงทำให้การใช้งานนั้นมีปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ข้อดีของมาตรฐาน IEEE 802.11b ก็คือสนับสนุนการใช้งานเป็นบริเวณกว้างกว่ามาตรฐาน IEEE 802.11a ผลิตภัณฑ์มาตรฐาน IEEE 802.11b เป็นที่รู้จักในเครื่องหมายการค้า Wi-Fi ซึ่งกำหนดขึ้นโดย WECA (Wireless Ethernet Comparability Alliance) โดยผลิตภัณฑ์ที่รองรับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้ผ่านการตรวจสอบและรับรองว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกันกับผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตรายอื่นๆ ได้

2.8.3 IEEE 802.11g เป็นมาตรฐานที่นิยมใช้งานกันมากในปัจจุบันและได้เข้ามาทดแทนผลิตภัณฑ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b เนื่องจากสนับสนุนอัตราความเร็วของการรับส่งข้อมูลในระดับ 54 Mbps โดยใช้เทคโนโลยี OFDM บนคลื่นสัญญาณวิทยุแถบความถี่ 2.4 GHz และให้รัศมีการทำงานที่มากกว่า IEEE 802.11a พร้อมความสามารถในการใช้งานร่วมกันกับมาตรฐาน IEEE 802.11b ได้ (backward-compatible)

2.8.4 IEEE 802.11e เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับการใช้งานโปรแกรมประยุกต์ทางด้านมัลติมีเดียอย่าง VoIP (Voice over IP) เพื่อควบคุมและรับประกันคุณภาพของการใช้งานตามหลักการ QoS โดยการปรับปรุง MAC Layer ให้มีคุณสมบัติในการรับรองการใช้งานให้มีประสิทธิภาพ

2.8.5 IEEE 802.11f มาตรฐานนี้เป็นที่รู้จักกันในนาม IAPP (Inter Access Point เอกสาร Protocol) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับจัดการกับผู้ใช้งานที่เคลื่อนที่ข้ามเขตการให้บริการ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแอสเซสพอยต์ตัวหนึ่งไปยังแอสเซสพอยต์อีกตัวหนึ่งเพื่อให้บริการในแบบโรมมิ่งสัญญาณระหว่างกัน

2.8.6 IEEE 802.11h มาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่ใช้งานแถบความถี่ 5 GHz ให้ทำงานถูกต้องตามข้อกำหนดการใช้ความถี่ของประเทศในยุโรป

2.8.7 IEEE 802.1i เป็นมาตรฐานในด้านการรักษาความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สาย โดยการปรับปรุง MAC Layer เนื่องจากระบบเครือข่ายไร้สายมีช่องโหว่มากมายในการใช้งาน โดยเฉพาะฟังก์ชันการเข้ารหัสแบบ WEP 64/128 bit ซึ่งใช้คีย์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับสภาพการใช้งานที่ต้องการความมั่นใจในการรักษาความปลอดภัยของการสื่อสารระดับสูง มาตรฐาน IEEE 802.11i จึงกำหนดเทคนิคการเข้ารหัสที่ใช้คีย์ชั่วคราวด้วย WPA WPA2 และการเข้ารหัสแบบ AES (Advanced Encryption Standard) ซึ่งมีความน่าเชื่อถือสูง

2.8.8 IEEE 802.11k เป็นมาตรฐานที่ใช้จัดการการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย ทั้งจัดการการใช้งานคลื่นวิทยุให้มีประสิทธิภาพ มีฟังก์ชันการเลือกช่องสัญญาณ การโรมมิ่งและการควบคุมกำลังส่งนอกจากนั้นยังมีการร้องขอและปรับแต่งค่าให้เหมาะสมกับการทำงาน การหาระยะการใช้งานสำหรับเครื่องเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ระบบการจัดการสามารถทำงานจากศูนย์กลางได้

2.8.9 IEEE 802.11n เป็นมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่คาดหมายกันว่า จะเข้ามาแทนที่มาตรฐาน IEEE 802.11a, IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน โดยให้อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลในระดับ 100 Mbps

2.8.10 IEEE 802.1x เป็นมาตรฐานที่ใช้งานกับระบบรักษาความปลอดภัย ซึ่งก่อนเข้าใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายจะต้องตรวจสอบสิทธิ์ในการใช้งานก่อน โดย IEEE 802.1x จะใช้โพรโทคอลอย่าง LEAP, PEAP, EAP-TLS และ EAP-FAST ซึ่งรองรับการตรวจสอบผ่านเซิร์ฟเวอร์ เช่น RADIUS, Kerberos เป็นต้น

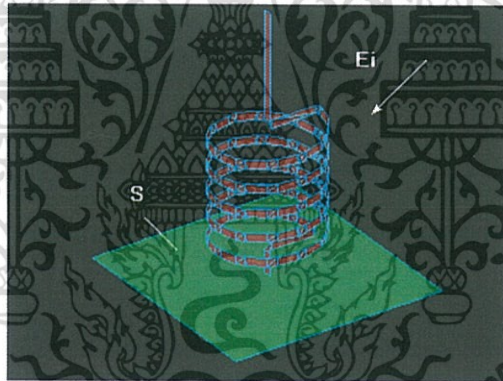
2.8.11 IEEE 802.11ac เป็นมาตรฐาน WLAN ใหม่ที่ใช้ความถี่ในการรับส่งสัญญาณที่ 5 GHz ที่ตั้งเป้าว่าจะมาแทนมาตรฐาน IEEE 802.11n ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน โดยการใช้งานแบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้นเป็น 80 MHz หรือ 160 MHz ทำให้ความเร็วที่ได้ต่อ 1 เสาอยู่ที่ 433 Mbps ที่ 80 MHz และ 866 Mbps ที่ 160 MHz

มาตรฐาน IEEE 802.11ac นั้นได้มีการปรับปรุงเรื่องของการเข้ารหัสใหม่ และมีการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามาใช้ ทำให้สามารถทำความเร็วต่ำสุดตามทฤษฎีต่อ 1 เสาได้ถึง 433 Mbps ซึ่งมีความเร็วใกล้เคียงกันกับมาตรฐาน IEEE 802.11n ที่เป็นแบบ 3 เสา ซึ่งมีความเร็วอยู่ที่ 450 Mbps การที่ IEEE 802.11ac นั้นออกแบบมาโดยคำนึงถึงอุปกรณ์พกพาต่างๆ เช่น สมาร์ทโฟน แท็บเล็ต หรือเน็ตบุ๊กที่มีความบางมากๆ เป็นสำคัญด้วย เพราะว่าการใช้งานอุปกรณ์เหล่านี้ในปัจจุบันนั้นเน้นการเชื่อมต่อแบบไร้สายกันมากขึ้น เช่น การสตรีมไฟล์มีเดียผ่าน DLNA การโอนถ่ายไฟล์ผ่าน Wi-Fi Direct เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ทฤษฎีพื้นฐานและการนำไปใช้ในการจำลองสายอากาศของโปรแกรม IE3D Zeland [15]

การจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ทำให้ความแน่นอนถูกต้องแม่นยำสูง ในการวิเคราะห์และออกแบบสิ่งที่ยุ่งยากซับซ้อน เช่น วงจรไมโครเวฟและวงจรพิมพ์ทางความถี่วิทยุ สายอากาศ วงจรดิจิทัลความเร็วสูง และส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เป็นต้น โปรแกรม IE3D Zeland เป็นโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นสมบูรณ์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศไมโครสตริปและวงจรความถี่สูงที่ใช้แผ่นพิมพ์วงจรและวงจรดิจิทัลในรูปแบบสามมิติ เช่น วงจรรวมไมโครเวฟและมิลลิเมตรเวฟ (MMICs) เป็นต้น โปรแกรม IE3D Zeland ได้ถูกนำมาใช้เหมือนเป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมในการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามมิติ ซึ่งงานส่วนใหญ่ที่ต้องการปรับปรุงให้ดีขึ้นจะใช้ IE3D Zeland มาช่วย ดังนั้น IE3D Zeland จึงกลายเป็นเครื่องมือจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทำได้หลายอย่างและใช้ง่าย มีประสิทธิภาพและความถูกต้องแม่นยำ ทฤษฎีพื้นฐานและการนำไปใช้งานของโปรแกรม IE3D Zeland นั้น ใช้สมการเบื้องต้น คือ สมการอินทิกรัล ที่หาได้จากฟังก์ชันของกรีน ใน IE3D Zeland สามารถสร้างแบบรูปร่างได้ทั้งกระแสไฟฟ้าบนโครงสร้างโลหะและกระแสแม่เหล็กที่แทนด้วยสนามที่แพร่กระจายบนช่องโลหะ โดยทั่วไปแล้วปัญหาที่เกิดจากการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ถูกสมมติจากโครงสร้างตัวนำในสิ่งแวดล้อมที่เป็นฉนวนที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 สนามตกกระทบที่ถูกป้อนให้กับโครงสร้างโลหะ

จากรูปที่ 2.30 แสดงถึงสนามตกกระทบที่ถูกส่งไปยังโครงสร้างที่เป็นแบบร่างโลหะตัวอย่าง ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสให้กระจายไปบนโครงสร้างนี้ กระแสที่เหนี่ยวนำไปสร้างสนามที่สองให้เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตบนโครงสร้างโลหะ สำหรับโครงสร้างตัวนำที่ใช้เป็นตัวแบบนี้มีกระแสเหนี่ยวนำถูกกระจายไปในผิวตัวนำและทำให้เกิดเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

$$E(r) = Zs(r)J(r), r \in S \quad (2.64)$$

ขณะที่

S เป็นพื้นผิวตัวนำ
 $E(r)$ เป็นสนามสัมผัสทั้งหมดบนพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$J(r)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่กระจายอยู่บนพื้นผิว
 $Zs(r)$ คือ อิมพีแดนซ์บนพื้นผิวดำน้ำ

เมื่อโครงสร้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นชั้นฉนวน สามารถเขียนสนามรวมได้ดังนี้

$$E(r) = Ei(r) + \int SG(r|r') \cdot J(r') ds' \quad (2.65)$$

สำหรับสิ่งแวดล้อมที่เป็นฉนวน $G(r | r')$ เป็นผลรวมเลขคู่ที่เป็นฟังก์ชันของกรีน (Green's function) ซึ่ง $Ei(r)$ คือ สนามที่ตกกระทบบนพื้นผิวดำน้ำ โดยที่ $G(r | r')$ เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตของฉนวนยกเว้นเงื่อนไขขอบเขตบนพื้นผิวดำน้ำ S แทนสมการ 2.64 ลงในสมการ 2.65 โดยจะได้ผลลัพธ์ในรูปของอินทิกรัลดังนี้

$$Zs(r)J(r) = Ei(r) + \int sg(r|r') \cdot J(r') ds' \quad (2.66)$$

เมื่อรู้สนามที่ตกกระทบและค่าอิมพีแดนซ์บนพื้นผิว ทำให้สามารถหาค่าฟังก์ชันของกรีนได้ แต่สิ่งที่ยังไม่รู้คือค่าของกระแสที่กระจาย $J(r)$ โดยการสมมติว่ากระแสที่กระจายถูกแทนด้วยกลุ่มของฟังก์ชันพื้นฐานที่สมบูรณ์ คือ

$$J(r) = \sum n InBn(r), n=1,2,\dots \quad (2.67)$$

เมื่อแทน สมการ (2.66) ลงในสมการ (2.67) ได้ว่า

$$Zs(r) \sum n InBn(r) = Ei(r) + \sum n In \int SG(r|r') \cdot Bn(r') ds' \quad (2.68)$$

โดยการใช้ ลำดับชั้นตอนของ Galerkin สามารถแปลงสมการที่ (2.68) ให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์ดังนี้

$$\int Sds Ei(r) \cdot Bn(r) = Sn In \{ \int Sds Zs(r) Bm(r) \cdot Bn(r) - \int Sds \int Sds' Bm(r) \cdot G(r|r') \cdot Bn(r') \} \quad (2.69)$$

ขั้นตอนข้างต้นที่กล่าวมานี้ ทำให้สมการที่ (2.64) มีความน่าเชื่อถือ พร้อมกับทำให้กลุ่มของฟังก์ชันทดสอบมีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และฟังก์ชันทดสอบนี้จะเหมือนกันกับฟังก์ชันพื้นฐานซึ่งกลุ่มของฟังก์ชันพื้นฐานที่สมบูรณ์แบบประกอบด้วยจำนวนของเทอมที่มีมากไม่สิ้นสุด เป็นอนันต์ (infinite) ฉะนั้นสมการที่ (2.64) จึงเป็นปัญหาทางมิติที่เป็นอนันต์ และสามารถใช้เพียงคำตอบที่เป็นตัวเลขโดยประมาณได้ การประมาณคือการทำให้อนุกรมที่ต่อกันเป็นอนันต์หดสั้นลงให้อยู่ในเทอมที่จำกัด ในทางคณิตศาสตร์การทำให้หดสั้นลงเป็นกระบวนการที่แสดงให้เห็นค่าโดยประมาณได้ โดยพุ่งประเด็นการแก้ปัญหาที่แท้จริงในมิติที่เป็นอนันต์ไปเป็นมิติจำกัด ถ้าเลือกมิติ

จำกัดก็เพื่อให้ส่วนประกอบหลักของคำตอบที่แท้จริงอยู่ในมิติจำกัดทั้งหมด ดังนั้นจึงควรที่จะสามารถหาค่าประมาณที่ดีมากออกมา หลังจากที่ได้ย้่ววิธีการที่กล่าวมาแล้วนี้ สมการที่ (2.69) กลายเป็นสมการเมตริกซ์ ดังนี้

$$[Zmn][Im] = [Vm] \quad (2.70)$$

ซึ่ง

$$Zmn = \int Sds Zs(r) Bm(r) \cdot Bn(r) - \int Sds \int Sds' Bm(r) \cdot G(r|r') \cdot Bn(r') \quad (2.71)$$

$$Vm = \int Sds Ei(r) \cdot Bn(r) \quad (2.72)$$

โดยจะได้วิธีการโมเมนต์ที่อยู่ในรูปแบบของสมการที่ (2.70) ถึง (2.72) ไม่ใช่สิ่งที่ง่ายนัก หรือก็มีความซับซ้อน ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นอยู่ที่การเลือกใช้ฟังก์ชันพื้นฐานและฟังก์ชันของกรีน ยังมีทางเลือกอีกมากมายสำหรับนำมาใช้กับฟังก์ชันพื้นฐานและฟังก์ชันของกรีนที่เป็นผลรวมเลขคู่ การพิจารณาบนฟังก์ชันพื้นฐานและบนฟังก์ชันของกรีนที่เป็นผลรวมของเลขคู่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการประเมินประสิทธิภาพและความถูกต้องแม่นยำของการอินทิกรัลสองชั้นของพื้นผิวดังที่แสดงในสมการที่ (2.72)



บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด รูปมุมฉากหนึ่งความถี่บนวัสดุฐานรองชนิด FR-4

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบและการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่ความถี่ 2.45 GHz บนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองที่มีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย สำหรับโครงสร้างของสายอากาศที่ออกแบบนี้จะมีรูปแบบที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถจัดวางช่องเปิดของสายอากาศเพื่อให้ได้ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบโพลาริซเชิงเส้น และรูปแบบโพลาริซวงกลม ซึ่งรูปแบบโพลาริซวงกลมสามารถทำให้มีทิศหมุนตามเข็มนาฬิกา (right-hand: RH) และมีทิศหมุนทวนเข็มนาฬิกา (left-hand: LH) ได้ ขึ้นอยู่กับการจัดวางช่องเปิดจำนวน 2 ช่องเปิดที่มีขนาดเท่ากัน สายอากาศที่นำเสนอนี้จะมีคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่ดี เช่น การแมตซ์อิมพีแดนซ์ แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลแบบรอบทิศทาง เป็นต้น ขั้นตอนของการออกแบบและการวิเคราะห์สายอากาศจะใช้การจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IE3D Zeland ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เชื่อถือได้และเป็นที่ยอมรับทั่วไป สำหรับวัสดุฐานรองที่นำมาใช้ก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อการออกแบบและการสร้างสายอากาศมาก เพราะจะมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของตัวสายอากาศ ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุฐานรองจึงมีความจำเป็นเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาอย่างละเอียด ขั้นตอนของการออกแบบและวิเคราะห์ผล มีดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่ความถี่ 2.45 GHz รูปแบบโพลาริซเชิงเส้น

ช่องเปิดรูปมุมฉากเป็นช่องเปิดรูปร่างไม่ซับซ้อนง่ายต่อการนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศเพื่อใช้งานในแถบความถี่ต่างๆ สายอากาศโดยทั่วไปมักจะมีโพลาริซแบบเชิงเส้น ซึ่งสายอากาศแบบช่องเปิดรูปมุมฉากก็เช่นเดียวกัน ดังนั้นการใช้ช่องเปิดรูปมุมฉากหนึ่งช่องเปิดจะได้รูปแบบโพลาริซเชิงเส้น ในงานวิจัยนี้จะใช้ช่องเปิดรูปมุมฉากเป็นพื้นฐานในการออกแบบสายอากาศสำหรับการออกแบบสายอากาศหนึ่งความถี่ที่ 2.45 GHz บนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่จะกล่าวถึงนี้ จะมีการนำคุณสมบัติของวัสดุฐานรองมาใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศรวมทั้งจะกล่าวถึงการออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป การหาขนาดของช่องเปิดที่ใช้เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นหรือรับคลื่น (สายอากาศ) การทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ และการจัดวางช่องเปิด โดยคำนึงถึงคุณลักษณะของสายอากาศที่ดี

3.1.1 วัสดุฐานรอง

ในการออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากนั้น สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอย่างหนึ่ง คือ การเลือกใช้วัสดุฐานรองที่มีประสิทธิภาพสูงที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยมีค่าพารามิเตอร์ตามที่ต้องการ แต่เนื่องจากในบทนี้จะเป็นการแสดงขั้นตอนการจำลองการออกแบบสายอากาศหนึ่งความถี่หนึ่งโพลาริซ ที่เป็นโพลาริซเชิงเส้น และโพลาริซวงกลม เพื่อนำไปสู่การออกแบบสายอากาศสองความถี่สองโพลาริซที่จะนำไปสร้างใช้งานจริง ดังนั้นในเบื้องต้นนี้จะขอทดลองนำวัสดุฐานรองราคาถูก คือ FR-4 มาใช้ในการออกแบบสายอากาศ หลังจากนั้นจะนำวัสดุเอกสารเป็นเอกสารที่สแกนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานรองที่มีคุณภาพสูงเพื่อนำไปสร้างสายอากาศสำหรับนำไปใช้งานจริง วัสดุฐานรองชนิด FR-4 มีคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการใช้งานดังต่อไปนี้

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r)	=	4.5	
ความหนาของแผ่นวัสดุฐานรอง	=	1.6	มิลลิเมตร
ค่าความนำของทองแดง	=	5.8×10^7	S/m
ค่าความหนาของทองแดง	=	0.035	มิลลิเมตร
ค่าไดอิเล็กตริกทอสแทนเจนต์ ($\tan \delta$)	=	0.02	

3.1.2 การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก จำเป็นจะต้องให้มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์กับสายส่งสัญญาณแบบโคแอกเซียล 50Ω (Z_0) เพื่อประสิทธิภาพในการเหนี่ยวนำสัญญาณส่งผ่านไปยังสายอากาศ การทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ขึ้นอยู่กับความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ส่วนความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป จะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของสายอากาศ และเนื่องจากถ้าสายอากาศยังมีความยาวเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้มีพื้นที่ที่ไม่ถูกใช้ในการแพร่กระจายคลื่นเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้มีการลดทอนของสัญญาณมากขึ้นด้วย จึงทำให้การรับส่งสัญญาณของสายอากาศนั้นมีประสิทธิภาพลดน้อยลง โดยสามารถคำนวณหาความกว้างของสายส่งสัญญาณ (W) จากสมการที่ (3.1) [14] ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) และความหนาหรือความสูงของวัสดุฐานรอง

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} [\ln(B - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \quad (3.1)$$

โดยที่

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.2)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{50\sqrt{4.5}}$$

$$B = 5.58$$

นำค่าของ B แทนที่ลงในสมการที่ (3.1) จะได้

$$\frac{W}{1.6} = \frac{2}{\pi} \left\{ 5.58 - 1 - \ln(11.16 - 1) + \frac{4.5 - 1}{9} [\ln(5.58 - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{4.5} \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{W}{1.6} = \frac{2}{\pi} \{5.58 - 1 - 2.318458 + 0.591772 + 0.39 - 0.135556\}$$

$$\frac{W}{1.6} = \frac{2}{\pi} \times 3.107758$$

$$\frac{W}{1.6} = 1.97846$$

$$W = 3.16 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ความยาวช่องเปิดจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นสัมพันธ์ โดยที่ความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) จะหาได้จาก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ ความเร็วแสงในอากาศ และความถี่ ออกแบบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} ; \frac{W}{h} > 1 \quad (3.3)$$

$$= \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{1.6}{3.16} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$= 2.75 + 1.75 [1 + 6.08]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\epsilon_{eff} = 3.41$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.4)$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9 \sqrt{3.41}}$$

$$\lambda_g = 66.31 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

โดยที่

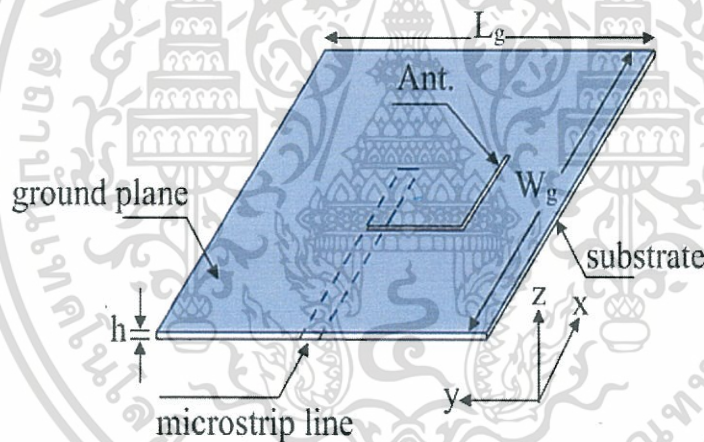
- c = ความเร็วแสง (ประมาณ 3×10^8 เมตร / นาที)
- f = ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบ (2.45 GHz)
- ϵ_{eff} = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์
- ϵ_r = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (4.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

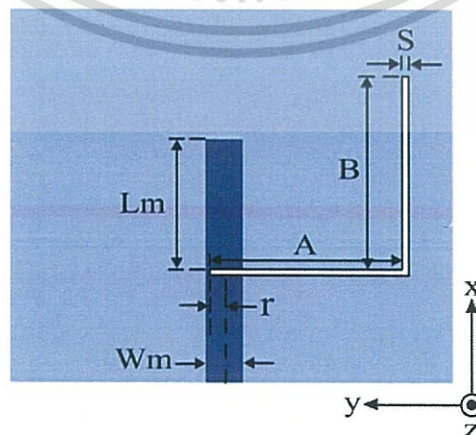
ดังนั้นจะได้ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป (w) = 3.16 มิลลิเมตร และจะได้ความยาวของสายส่งแบบไมโครสตริป (λ_g) = 66.31 มิลลิเมตร เนื่องจากในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวสามารถนำไปใช้ได้วัสดุฐานรอง FR-4 และความถี่ที่ต้องการใช้งานนั้นคือ 2.45 GHz สำหรับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

3.1.3 ช่องเปิดรูปมุมฉาก

ช่องเปิดรูปมุมฉากของสายอากาศที่นำเสนอนี้ จะวางอยู่บนระนาบกราวด์ขณะที่ระนาบตรงข้ามเป็นระนาบที่มีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์วางอยู่ที่กึ่งกลางเป็นแนวยาวขนานกับขอบข้างของแผ่นสายอากาศ โดยที่ปลายของไมโครสตริปไลน์ด้านที่อยู่ติดขอบของแผ่นสายอากาศจะต่อกับหัวเชื่อมต่อนำสัญญาณ (SMA connector) ซึ่งมีระยะห่างจากขอบช่องเปิดรูปมุมฉากไม่ต่ำกว่า ($\lambda_g / 4$) ปลายของช่องเปิดรูปมุมฉากจะอยู่ในแนวแกนของไมโครสตริปไลน์ ทำให้การเหนี่ยวนำของสัญญาณจากสายส่งไมโครสตริปไลน์สามารถผ่านไปถึงช่องเปิดรูปมุมฉากที่อยู่บนระนาบกราวด์ได้ เนื่องจากขนาดของช่องเปิดมีผลต่อความถี่ ดังนั้นจะต้องกำหนดขนาดช่องเปิดให้เหมาะสมตามความถี่ออกแบบที่ต้องการ โครงสร้างและพารามิเตอร์ทางขนาดพร้อมระยะการจัดวางแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก



รูปที่ 3.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

- A คือ ความยาวด้านแนวแกนนอนด้านในของช่องเปิด
- B คือ ความยาวด้านแนวแกนตั้งด้านในของช่องเปิด
- S คือ ความกว้างของช่องเปิด
- Wm คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์
- Lm คือ ระยะจากขอบปลายทางด้านบนของไมโครสตริปไลน์ถึงขอบช่องเปิดในแนวแกนนอน
- r คือ ระยะห่างระหว่างแกนกลางของสายไมโครสตริปไลน์กับปลายช่องเปิด

การออกแบบช่องเปิดรูปมุมฉากจะต้องคำนวณหาความยาวคลื่นสัมพันธ์โดยต้องกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ ความยาวคลื่นสัมพันธ์ถูกนำไปใช้ในการกำหนดความยาวในแนวแกนนอน (A) และความยาวในแนวแกนตั้ง (B) โดยที่ความยาวรวมทั้งสองด้านของช่องเปิดซึ่งได้แก่ความยาวในแนวแกนตั้งและความยาวในแนวแกนนอนรวมกันประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวสัมพันธ์ และความยาวของช่องเปิดทั้งสองด้านต้องมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน นั่นคือความยาวของช่องเปิดแต่ละด้านจะเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวสัมพันธ์ ($\lambda_g / 4$)

$$A = B \approx 0.25\lambda_g$$

แทนค่าของ λ_g จะได้

$$A = B \approx 0.25 \times 66.31$$

$$A = B \approx 16.57 \text{ มิลลิเมตร}$$

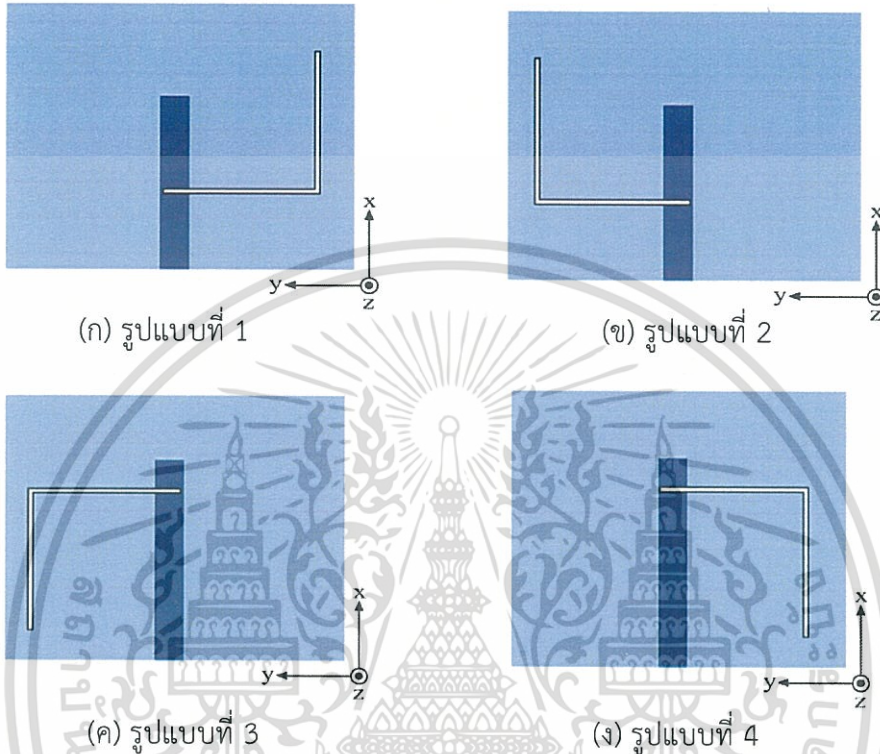
สามารถคำนวณหาแบนด์วิดท์จากช่วงความถี่ของค่า VSWR ที่ตำแหน่ง VSWR=2 หรือคำนวณหาแบนด์วิดท์จากช่วงความถี่ของการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ตำแหน่ง $S_{11} = -10$ dB นอกจากนี้การหาเปอร์เซ็นต์ของแบนด์วิดท์จะใช้สมการที่ (3.5)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ แบนด์วิดท์} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_r} \times 100\% \quad (3.5)$$

- เมื่อ f_r ค่าความถี่กึ่งกลางของแบนด์วิดท์
- f_{\max} ค่าความถี่ด้านสูงสุดของแบนด์วิดท์
- f_{\min} ค่าความถี่ด้านต่ำสุดของแบนด์วิดท์

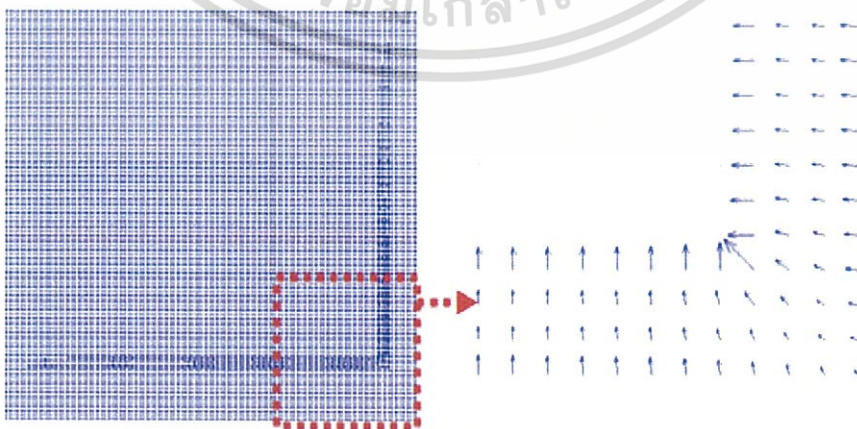
3.1.4 รูปแบบการจัดวางช่องเปิดมุมฉากของสายอากาศ

รูปแบบการจัดวางช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่ที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้นมี 4 รูปแบบ ดังรูปที่ 3.3 โดยสามารถวางช่องเปิดไว้ด้านขวาและด้านซ้ายของไม้โครสทริปไลน์ ทั้งวางหงายและวางคว่ำ



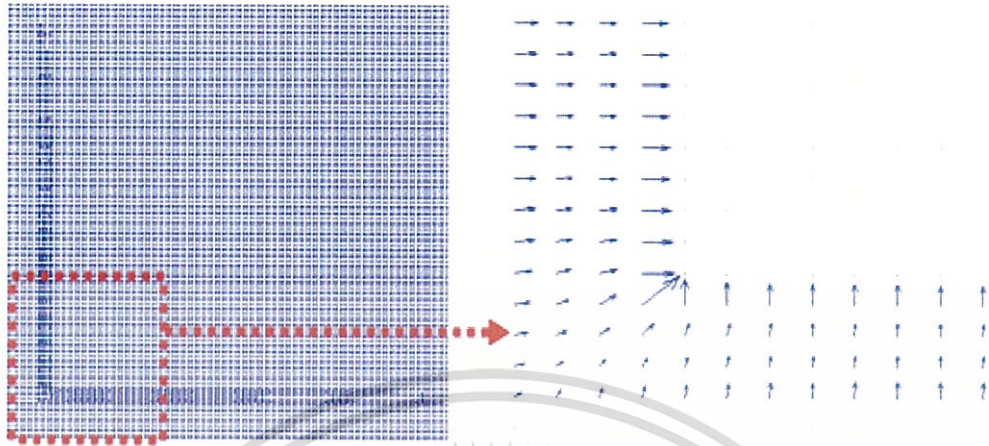
รูปที่ 3.3 รูปแบบการจัดวางช่องเปิดมุมฉากของสายอากาศ

รูปที่ 3.3 แสดงรูปแบบการจัดวางช่องเปิดมุมฉากของสายอากาศ ซึ่งมีทั้งหมด 4 รูปแบบ สามารถนำผลการจำลองเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายภายในช่องเปิดมาแสดงได้ ดังรูปที่ 3.4

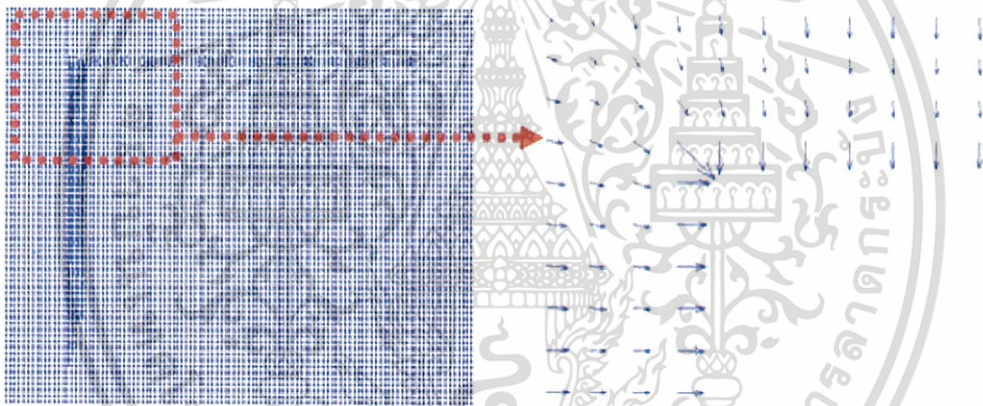


(ก) รูปแบบที่ 1

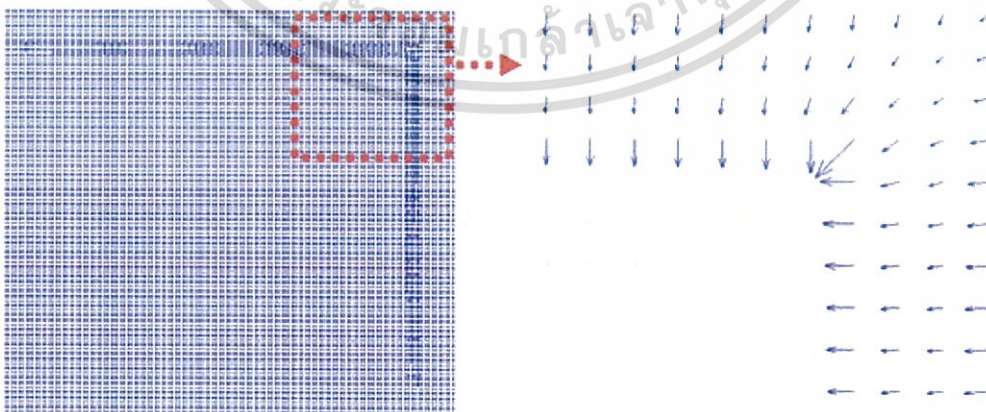
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) รูปแบบที่ 2



(ค) รูปแบบที่ 3



(ง) รูปแบบที่ 4

รูปที่ 3.4 เวกเตอร์สนามไฟฟ้าในระนาบของช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

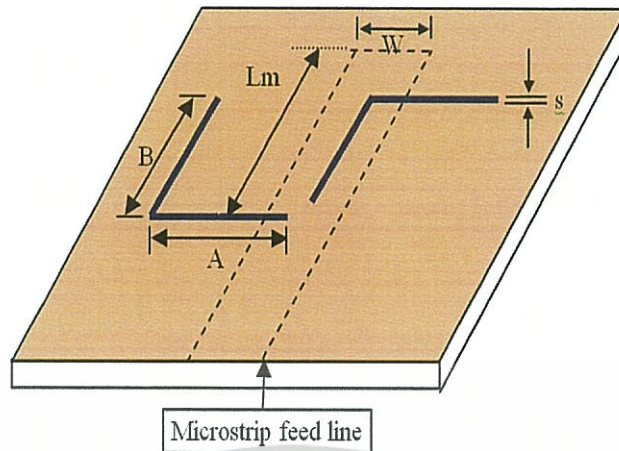
จากรูปที่ 3.4 แสดงเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าในระนาบของช่องเปิด ซึ่งเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีขนาดมากที่สุด ณ บริเวณมุมฉากของช่องเปิด และมีเวกเตอร์เอียง 45 องศา สำหรับช่องเปิดรูปแบบที่ 1 กับ รูปแบบที่ 3 จะมีเวกเตอร์ทิศทางเดียวกัน เช่นเดียวกับรูปแบบที่ 2 กับ รูปแบบที่ 4 ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่าสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากเป็นโพลาริซ์เชิงเส้นแบบเอียง ± 45 องศา ขึ้นอยู่กับการจัดวางรูปแบบของช่องเปิด ดังรูปแบบที่ 1 กับรูปแบบที่ 3 จะเป็นโพลาริซ์เชิงเส้นแบบเอียง -45 องศา และรูปแบบที่ 2 กับรูปแบบที่ 4 จะเป็นโพลาริซ์เชิงเส้นแบบเอียง $+45$ องศา จากคุณสมบัติดังที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแขนหรือด้านทั้งสองเท่ากันที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปไลน์นั้น มีความเหมาะสมสำหรับนำไปออกแบบสายอากาศสองความถี่สองโพลาริซ์ ดังที่จะกล่าวในบทถัดไป

3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่รูปแบบโพลาริซ์วงกลม

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากหนึ่งความถี่ที่ใช้ช่องเปิด 1 ช่องเปิดจะได้โพลาริซ์แบบเชิงเส้น แต่ถ้านำเอาช่องเปิดรูปมุมฉากที่มีแขนหรือด้านเท่ากันจำนวน 2 ช่องเปิด โดยมีขนาดเท่ากันที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งมาทำการจัดเรียงให้เหมาะสมก็จะทำให้ได้การกระจายคลื่นที่มีโพลาริซ์วงกลม ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่ความถี่ 2.45 GHz บนวัสดุฐานรองชนิด FR4 โดยมีโพลาริซ์แบบวงกลม โครงสร้างและการหาค่าพารามิเตอร์ทางขนาดจะเหมือนกับสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่ใช้ช่องเปิดเพียงช่องเปิดเดียว และมีสายส่งแบบไมโครสตริปที่มีขนาดความกว้างและความยาวของสายส่งเดียวกันด้วย

3.2.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซ์วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา

เมื่อนำช่องเปิดรูปมุมฉากสองช่องเปิดมาจัดเรียงบนระนาบกราวต์ในรูปแบบของสายอากาศรอบทิศทางที่มีลักษณะรูปแบบเป็นโพลาริซ์วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา จะทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นออกจากตัวสายอากาศมีทิศทางหมุนรอบแกนในลักษณะแบบวงกลมตามเข็มนาฬิกาซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าบริเวณมุมฉากของทั้งสองช่องเปิดที่ตั้งฉากกัน และคลื่นที่เดินทางจะมีลักษณะหมุนตามคลื่นที่อยู่ในสนามที่ตั้งฉากกันทำมุม 90 องศาการออกแบบของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากรูปแบบโพลาริซ์วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา จะมีโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากเดี่ยวที่มีรูปแบบเป็นโพลาริซ์เชิงเส้น แต่แตกต่างกันที่รูปแบบการวางตำแหน่งของช่องเปิดทั้งสองช่องเปิด สำหรับพารามิเตอร์ทางขนาดของช่องเปิดทั้งสองจะเหมือนกันเพราะมีขนาดเท่ากัน ยกเว้นเฉพาะระยะ r และ L_m เท่านั้น ซึ่งจะถูกกำหนดด้วยหมายเลขที่แสดงถึงช่องเปิดแต่ละช่องเปิด



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลม หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลม หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา จะใช้สายไมโครสตริปไลน์ขนาดเดียวกันกับสายอากาศไมโครสตริปแบบ ช่องเปิดรูปมุมฉากเดี่ยว เพราะออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์เดียวกันและบนวัสดุฐานรองชนิดเดียวกัน

จากผลการคำนวณได้ค่าความยาวแกนนอนและแกนตั้งเท่ากับ 16.57 มิลลิเมตร ต่อจากนั้น จึงนำมาจำลองแบบ และต้องมีการปรับค่าความยาวแกนนอนและแกนตั้งเพื่อให้เกิดแมตซ์อิมพีแดนซ์ ที่ดี จากการจำลองแบบพบว่าการปรับค่าความยาวของช่องเปิดของสายอากาศจะแปรผกผันกับความถี่ เรโซแนนซ์ ความยาวของช่องเปิดทั้งสองที่ความถี่ 2.45 GHz ในแนวแกนนอน และในแนวแกนตั้งจะมีค่าเท่ากัน โดยมีค่าดังนี้

$$A = B = 20.45 \text{ มิลลิเมตร} = 0.30839 \lambda_g$$

ความกว้างของช่องเปิดของสายอากาศไมโครสตริป (S) จะแปรผกผันกับความยาวคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์ ในขณะเดียวกันความกว้างของช่องเปิดของสายอากาศไมโครสตริปนั้นจะมีความสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ กล่าวคือเมื่อความกว้างของช่องเปิดของสายอากาศไมโครสตริปมีขนาดกว้างขึ้นก็จะทำให้แบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริปกว้างขึ้นแต่จะทำให้อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปลดลง ในทางกลับกันถ้าความกว้างของช่องเปิดของสายอากาศไมโครสตริปแคบลงก็จะทำให้แบนด์วิดท์ของสายอากาศแคบลง และจะทำให้อัตราขยายของสายอากาศนั้นเพิ่มขึ้น ดังนั้นความกว้างที่เหมาะสมของช่องเปิดทั้งสองที่ได้จากการจำลองแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดนี้จะเป็นดังนี้

$$S = 2.45 \text{ มิลลิเมตร} = 0.03694 \lambda_g$$

ระยะจากขอบปลายด้านบนของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปถึงตำแหน่งที่วางของช่องเปิดในแนวแกนนอน จะสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ คือ เมื่อระยะ L_m มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจะ

ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะ L_m ลดลงจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ลดลงตามไปด้วย ซึ่งระยะ L_m ที่เหมาะสมจากการจำลองแบบสายอากาศทั้งสอง มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} L_{m_1} &= 31.78 \text{ มิลลิเมตร} = 0.475926 \lambda_g \\ L_{m_2} &= 31.83 \text{ มิลลิเมตร} = 0.48001 \lambda_g \end{aligned}$$

ระยะ r คือระยะห่างระหว่างปลายขอบช่องเปิดที่อยู่ในแนวแกนสายส่งแบบไมโครสตริปไลน์กับแนวแกนกลางของสายส่งแบบไมโครสตริปไลน์ ซึ่งระยะ r จะสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ คือเมื่อระยะ r มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะ r ลดลงจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ลดลงตามไปด้วย จากการจำลองผลพบว่าระยะ r จะอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง 2 มิลลิเมตร ซึ่งระยะ r_1 และ r_2 จะไม่เท่ากัน

ในตารางที่ 3.1 เป็นการแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ ปรับตำแหน่ง และขนาดของช่องเปิด ในการจำลองแบบโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา โดยใช้โปรแกรม IE3D Zeland เพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติของสายอากาศตอบสนองการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายที่ความถี่ออกแบบ 2.45 GHz

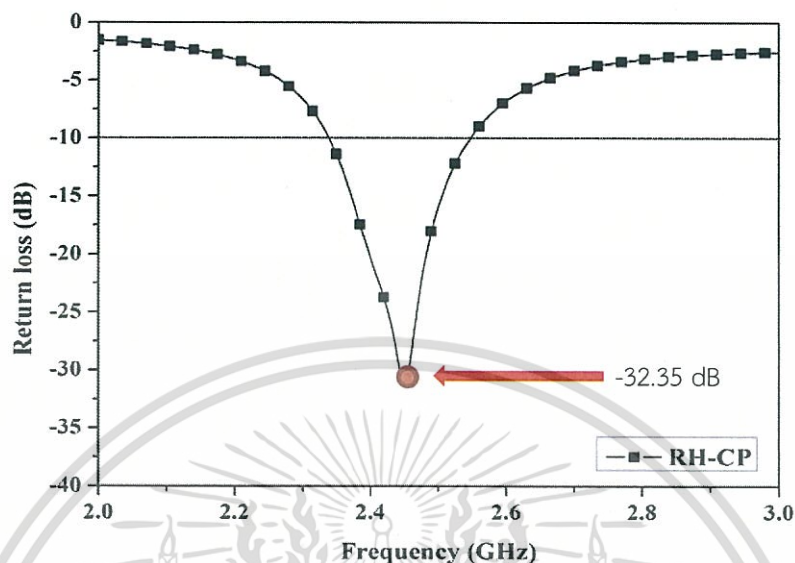
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ผลการจำลองที่ความถี่ 2.45 GHz
W (มิลลิเมตร)	3.16
A (มิลลิเมตร)	20.45(0.30839 λ_g)
B (มิลลิเมตร)	20.45(0.30839 λ_g)
S (มิลลิเมตร)	2.45(0.03694 λ_g)
L_{m_1} (มิลลิเมตร)	8.64(0.13029 λ_g)
L_{m_2} (มิลลิเมตร)	31.83(0.48001 λ_g)
r_1 (มิลลิเมตร)	0.440(0.00663 λ_g)
r_2 (มิลลิเมตร)	1.08(0.01628 λ_g)

1) การสูญเสียย้อนกลับ

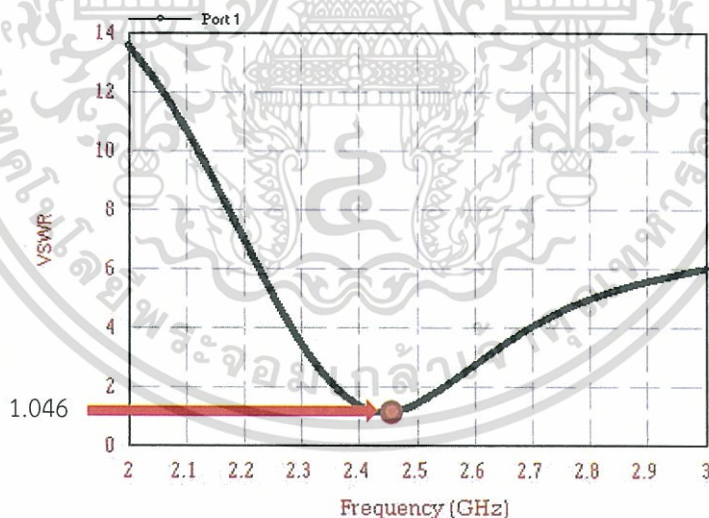
ค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} (dB) ในรูปที่ 3.6 เป็นผลจากการจำลองที่แสดงให้เห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า S_{11} ประมาณ -32.35 dB ซึ่งเป็นค่าน้อย แสดงว่ามีการสูญเสียย้อนกลับของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ตัวสายอากาศน้อย เนื่องจากได้ทำการออกแบบการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีและจากรูปของผลการจำลองข้างต้นสามารถนำมาใช้หาค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศได้โดยจะคิดจากช่วง

ความถี่ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ที่ตำแหน่ง -10 dB มีค่าเท่ากับ 186 MHz (2.36 GHz – 2.54 GHz)



รูปที่ 3.6 ผลการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมจากที่มีโพลาริไรซ์แบบวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา โดยมีความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz

2) VSWR (อัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่ง)

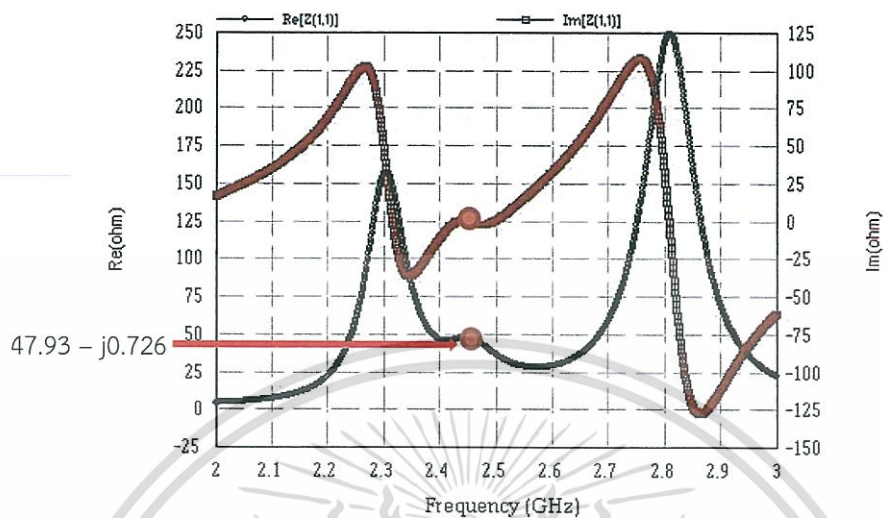


รูปที่ 3.7 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมจากที่มีโพลาริไรซ์แบบวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz

VSWR ในรูปที่ 3.7 เป็นผลการจำลองที่แสดงให้เห็นได้ว่า ที่แถบความถี่ 2.45 GHz มีค่า VSWR ประมาณ 1.046 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก แสดงว่ามีอัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่งที่น้อยมาก เนื่องจากสายอากาศได้ทำการออกแบบให้มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี และจากรูปของผลการจำลองข้างต้นสามารถนำมาใช้ในการหาค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศได้ โดยคิดจากช่วงความถี่ที่มีค่า VSWR ประมาณ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

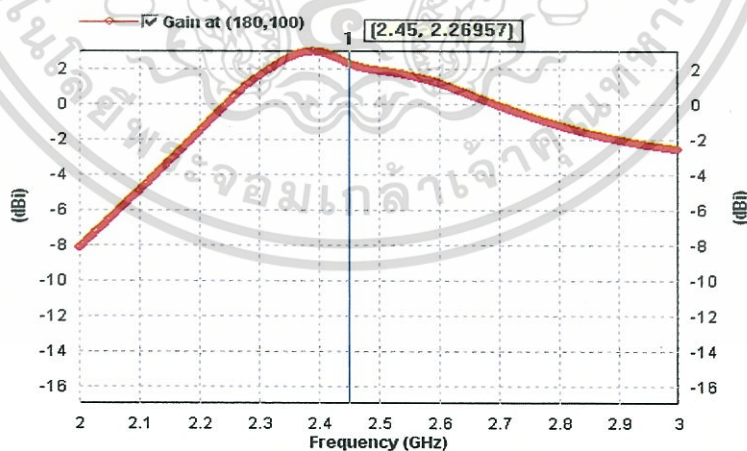
3) อินพุตอิมพีแดนซ์



รูปที่ 3.8 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซ์วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา

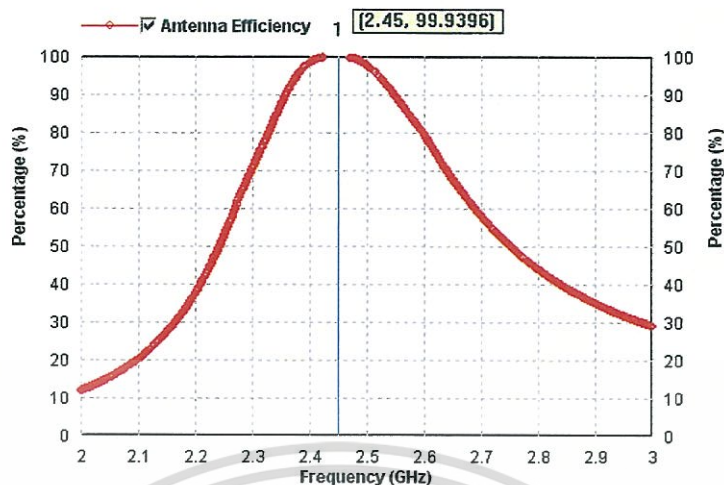
ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จากรูปที่ 3.8 จะแสดงค่าจริง (real) และค่าจินตภาพ (imaginary) ซึ่งได้ค่าเท่ากับ $47.93 - j0.726 \Omega$ แสดงว่ามีคุณสมบัติเป็นคาปาซิแตนซ์ซึ่งใกล้เคียง 50Ω ซึ่งหมายความว่าโหลดที่ทำการออกแบบไว้้นั้นมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่แมตซ์กับแหล่งจ่ายที่มาจากสายส่งแบบไมโครสตริป

4) อัตราขยาย



รูปที่ 3.9 อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซ์แบบวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา

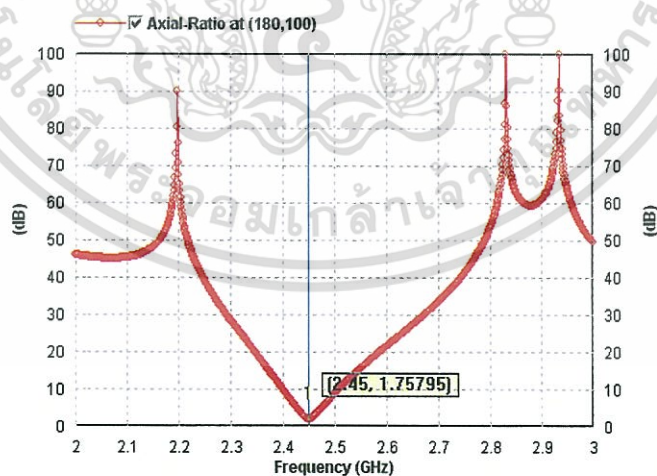
รูปที่ 3.9 เป็นการแสดงผลการจำลองแบบอัตราขยายโดยมีค่าจากการสูญเสียเกิดขึ้นที่สายอากาศบ้างเล็กน้อย ซึ่งที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 2.26957 dB_i เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 3.10 แสดงค่าประสิทธิภาพของสายอากาศคือค่าประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งคิดในเชิงของการแพร่กระจายคลื่น โดยมีองค์ประกอบของค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าประสิทธิภาพของคลื่นนำ และค่าประสิทธิภาพไดโอดเล็กตริก ซึ่งจะค้ำึงถึงส่วนของการสูญเสียที่แถบความถี่ 2.45 GHz จากรูปผลการจำลองจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าประสิทธิภาพของสายอากาศเท่ากับ 99.9396% ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพการรับ และส่งสัญญาณโดยรวมของสายอากาศอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก

5) Axial Ratio



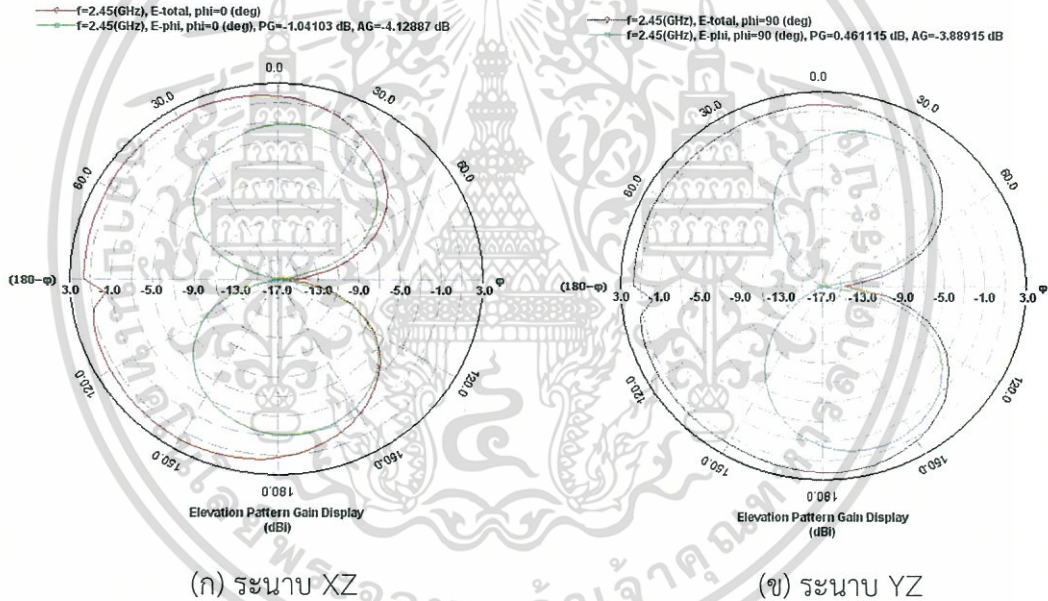
รูปที่ 3.11 Axial Ratio ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz

อัตราส่วนแกนคือค่า Axial Ratio จากรูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นได้ว่า ในการรับส่งข้อมูลรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมตามเข็มนาฬิกาเกิดขึ้นได้จริง และในกรณีที่ค่า Axial Ratio มีค่าเข้าใกล้ 0° เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นใบแจ้งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเป็นตัวบ่งบอกได้ว่ามีประสิทธิภาพในการเป็นโพลาริซแบบวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาได้เป็นอย่างดี โดยตำแหน่งและการจัดวางของช่องเปิดมีผลต่อค่าของ Axial Ratio โดยที่มีค่า Axial Ratio ที่มีมสูงสุดของอัตราขยายแบบวงกลมมีค่าเท่ากับ 1.75795

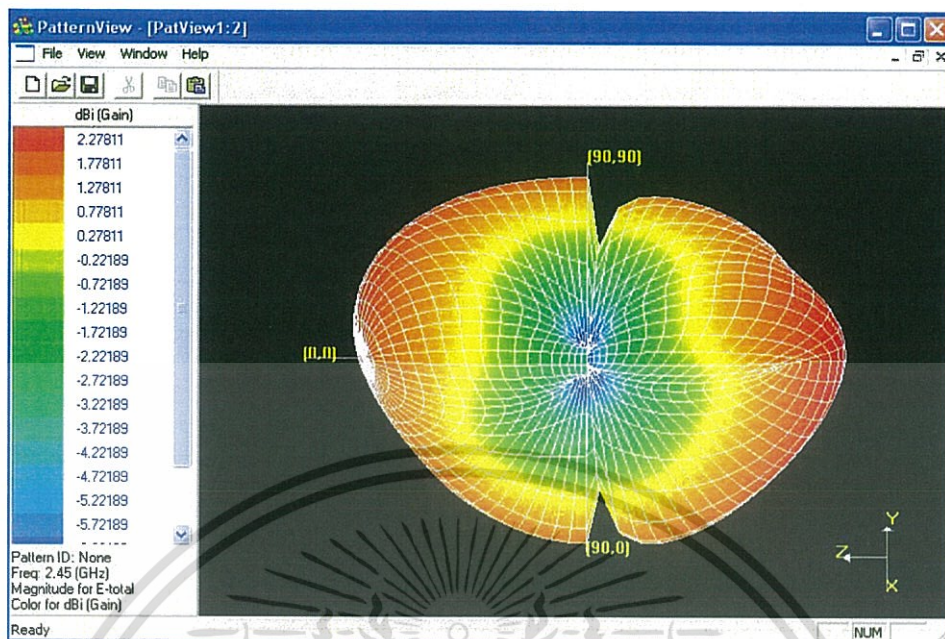
6) การแผ่พลังงานสนามระยะไกล

รูปที่ 3.12 เป็นการแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz ในระนาบต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยระนาบ XZ (ก) ซึ่งมีความแรงสูงสุดของสัญญาณในทิศทางของมุม 0 องศา และ 180 องศา แต่ความแรงของสัญญาณในระนาบ YZ (ข) จะมีความแรงมากกว่าสังเกตที่ความแรงสูงสุดของสัญญาณอยู่ในทิศทางของมุม 0 องศา และ 180 องศา เนื่องจากที่มุม 0 องศาเป็นมุมที่อยู่ตามโครงสร้างของด้านช่องเปิด และที่มุม 180 องศา จะเป็นมุมของด้านไมโครสตริปไลน์ทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด



รูปที่ 3.12 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา

รูปที่ 3.13 เป็นแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz ในระนาบ 3 มิติ จะเห็นว่าการแพร่กระจายคลื่นได้ดีในที่มุม 0 องศา และมุม 180 องศา ซึ่งจากรูปของผลการจำลองแบบจะเห็นว่าที่มุม 0 องศา จะมีความแรงของสัญญาณน้อยกว่าที่มุม 180 องศา โดยสังเกตได้จากระดับความเข้มของสี แต่ลักษณะของบีมที่มุม 0 องศา จะกว้างกว่าที่มุม 180 องศา เนื่องจากเป็นคลื่นที่แพร่กระจายออกจากทางด้านช่องเปิด ส่วนที่มุม 180 องศาจะเป็นคลื่นที่แพร่กระจายออกจากไมโครสตริปไลน์ จึงทำให้มีความแรงมากกว่าแต่บีมจะแคบ



รูปที่ 3.13 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาร์ในช่วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ

ตารางที่ 3.2 ผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาร์ในช่วงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา

พารามิเตอร์	การจำลอง
S_{11} (dB)	-32.35
VSWR	1.046
อัตราขยาย (dBi)	2.26957
อินพุตอิมพีแดนซ์ (Ω)	47.93 - j0.726
ประสิทธิภาพของสายอากาศ (%)	99.9396
แบนด์วิดท์ (MHz)	186 (2.36 GHz - 2.546 GHz)
Axial Ratio	1.757

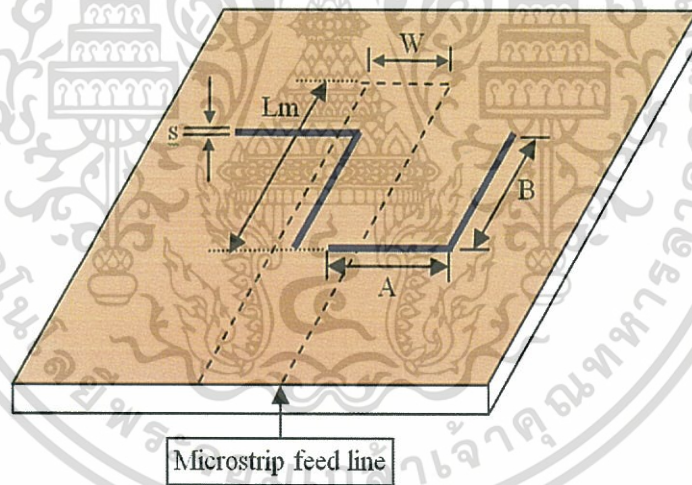
ผลจากการจำลองที่แสดงในตารางที่ 3.2 จะได้ค่า S_{11} เท่ากับ -32.35 dB ซึ่งถือว่าการสะท้อนกลับของสัญญาณน้อยและมีค่า VSWR เท่ากับ 1.046 แสดงว่ามีอัตราส่วนของ VSWR ซึ่งย่อมาจาก Voltage Standing Wave Ratio (แรงดันคลื่นนิ่ง) ที่มากกว่าค่า 1 เล็กน้อย และมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 47.93 - j0.726 Ω ซึ่งใกล้เคียง 50 Ω ถือว่ามีการสูญเสียที่น้อยและมีแบนด์วิดท์ที่กว้างครอบคลุมตั้งแต่ 2.36 GHz - 2.546 GHz (186 MHz) เป็นผลให้มีอัตราขยายที่สูงประมาณ 2.269 dBi ทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศเท่ากับ 99.93%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่มีโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา จะมีการแพร่กระจายของการเดินทางของคลื่นออกจากตัวสายอากาศในทิศทางหมุนรอบแกน ในลักษณะวงกลมทวนเข็มนาฬิกาที่มีสนามที่เกิดจากช่องเปิดทั้งสองตั้งฉากกัน และคลื่นที่เดินทางจะมีลักษณะหมุนตามคลื่นที่อยู่ในสนามที่ตั้งฉากกันทำมุม 90 องศา โดยที่คลื่นที่เดินทางจะบิดตามคลื่นที่ตั้งฉากกันเป็นไปในลักษณะวงกลมทวนเข็มนาฬิกา สายอากาศที่มีโพลาริซวงกลมจะมีลักษณะเด่นคือการรับส่งผ่านจากตัวของสายอากาศไมโครสตริปจะมีประสิทธิภาพที่ดีในลักษณะจากตัวส่งถึงตัวรับได้หลายทิศทางที่มีการเดินทางเป็นแบบวงกลมมากกว่าการเดินทางแบบเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว

สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา จะมีโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่มีโพลาริซวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาตามที่ได้กล่าวมาแล้ว เพียงแต่จะมีการจัดวางที่มีรูปแบบกลับด้านกัน เพื่อให้เวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มุมฉากมีทิศกลับกันกับโพลาริซวงกลมในทิศตามเข็มนาฬิกา โดยมีสายส่งแบบไมโครสตริปที่มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากัน และมีขนาดช่องเปิดที่เท่ากันด้วย



รูปที่ 3.14 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกานั้น จะใช้ความกว้างช่องเปิดและสายส่งแบบไมโครสตริปไลน์ขนาดเดียวกันกับสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาได้ แต่ความยาวในแนวแกนนอนและแกนตั้งของช่องเปิด คือ A และ B รวมทั้งระยะห่างระหว่างขอบปลายช่องเปิดกับแนวแกนกลางของสายส่ง (r) และระยะระหว่างปลายของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปถึงตำแหน่งที่วางของช่องเปิดในแนวแกนนอน (L_m) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผล ความยาวของช่องเปิดรูปมุมฉากที่ความถี่ 2.45 GHz ที่มีโพลาริซวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกาจะมีความยาวในแนวแกนตั้ง (A) และความยาวในแนวแกนนอน (B) ดังนี้

$$A=B = 20.45 \text{ มิลลิเมตร} = 0.30839 \lambda_g$$

ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ ความยาวของช่องเปิดรูปมุมฉากของสายอากาศที่มีโพลาริซวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกา

ส่วนความกว้างช่องเปิดจะใช้ค่าเดียวกับช่องเปิดของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา นั่นคือ

$$S = 2.45 \text{ มิลลิเมตร} = 0.03694 \lambda_g$$

ส่วนระยะจากขอบปลายด้านบนของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปถึงตำแหน่งที่วางช่องเปิดในแนวแกนนอน (L_m) จะมีค่า ดังนี้

$$L_{m_1} = 31.53 \text{ มิลลิเมตร} = 0.47549 \lambda_g$$

$$L_{m_2} = 31.885 \text{ มิลลิเมตร} = 0.48084 \lambda_g$$

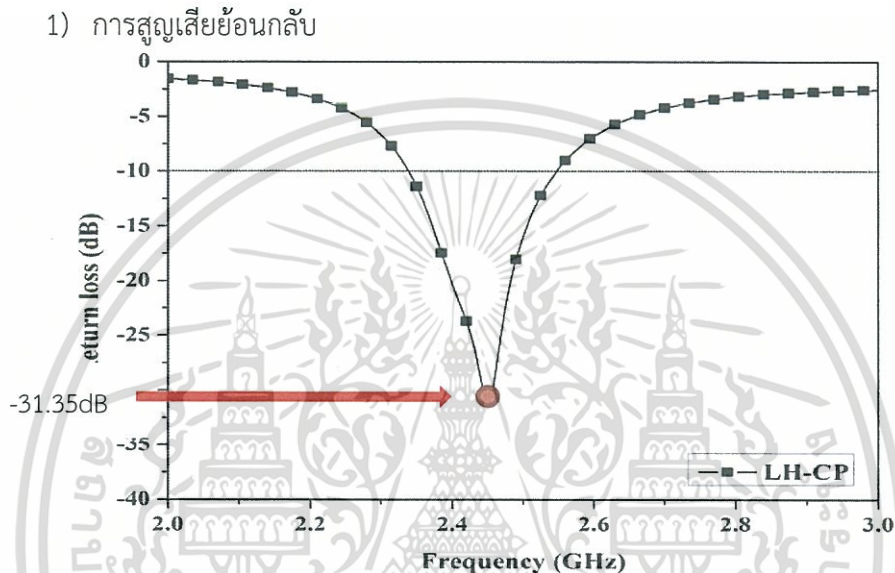
ระยะ r คือระยะห่างระหว่างส่วนมุมด้านในของช่องเปิดในแนวแกนตั้งกับจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป จะอยู่ในช่วง 0 มิลลิเมตร ถึง 2 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ผลการจำลองที่ความถี่ 2.45 GHz
W (mm)	3.16
A (mm)	20.45(0.30839 λ_g)
B (mm)	20.45(0.30839 λ_g)
S (mm)	2.45(0.03694 λ_g)
L_{m_1} (มิลลิเมตร)	7.24(0.10918 λ_g)
L_{m_2} (มิลลิเมตร)	33.23(0.48001 λ_g)
r_1 (mm)	1.100(0.50113 λ_g)
r_2 (mm)	0.190(0.00286 λ_g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาจะเห็นว่าบางพารามิเตอร์มีค่าต่างจากค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาเนื่องจากการปรับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ส่วนผลของการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาจะกล่าวถึงไว้ในลำดับต่อไป

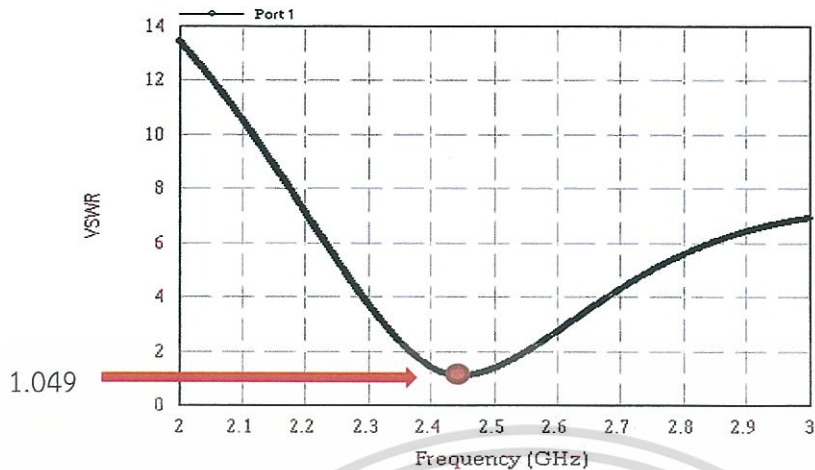


รูปที่ 3.15 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz

การสูญเสียย้อนกลับ S_{11} (dB) ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz ตามที่แสดงในรูปที่ 3.15 เป็นการแสดงถึงการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ส่งออกไปจากแหล่งกำเนิดสัญญาณไปยังสายอากาศซึ่งทำหน้าที่เป็นโหลด กรณีสายอากาศที่ออกแบบมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ไม่ดี ค่า S_{11} จะมีค่าสูง ซึ่งหมายถึงสายอากาศมีการสูญเสียของสัญญาณเกิดขึ้นมากส่งผลทำให้คุณสมบัตินั้นๆ ของสายอากาศด้อยลงทำให้สายอากาศที่ออกแบบนี้ไม่สามารถใช้งานได้ จากผลการจำลองที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า S_{11} ประมาณ -31.35 dB แสดงว่ามีการสะท้อนกลับของสัญญาณที่เกิดขึ้นน้อย เพราะมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี และจากรูปของผลการจำลองข้างต้นสามารถนำมาใช้หาค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศได้โดยจะคิดจากช่วงความถี่ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ที่ตำแหน่ง -10 dB

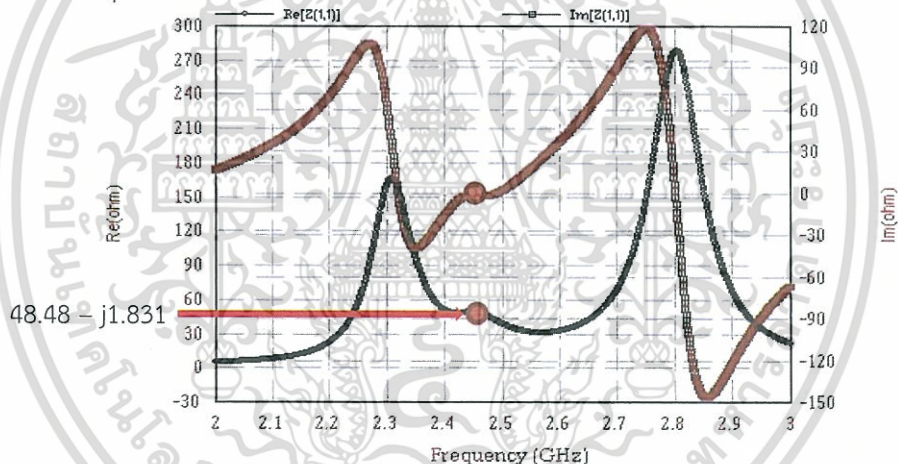
2) อัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่ง

VSWR จากรูปที่ 3.16 เป็นของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz ค่า VSWR คือค่าที่บอกถึงอัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่ง (V_{max} / V_{min}) ซึ่งจากการจำลองแบบจะเห็นว่าที่แถบความถี่ 2.45 GHz มีค่า VSWR ประมาณ 1.049 แสดงว่าสายอากาศได้ทำการออกแบบให้มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี



รูปที่ 3.16 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่มีโพลาริซวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา

3) อินพุตอิมพีแดนซ์



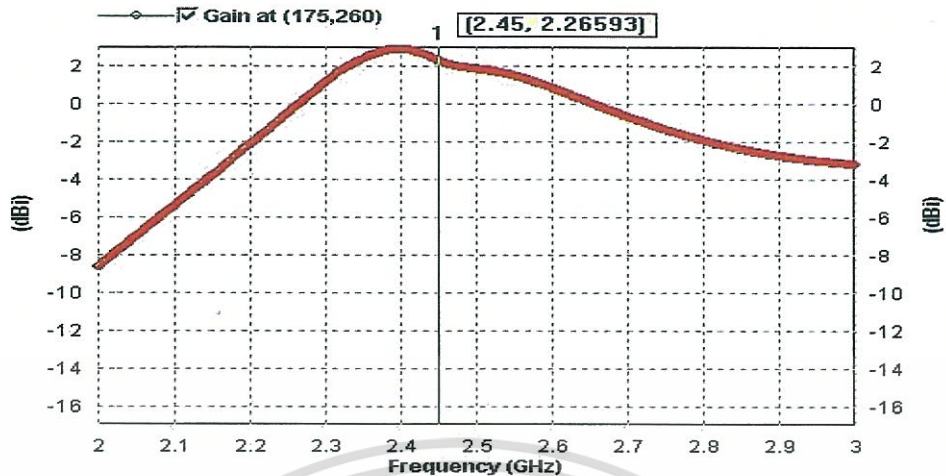
รูปที่ 3.17 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จากรูปที่ 3.17 จะแสดงค่าจริง (real) และค่าจินตภาพ (imaginary) ซึ่งได้ค่าเท่ากับ $48.48 - j1.831 \Omega$ มีคุณสมบัติเป็นคาปาซิแตนซ์ ซึ่งใกล้เคียง 50Ω จะมีประสิทธิภาพที่ดีมาก ซึ่งแสดงถึงว่าโหลดที่ทำการออกแบบไว้นั้นมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่แมตช์กันกับแหล่งจ่ายจากสายส่งไมโครสตริปได้พอดีกัน

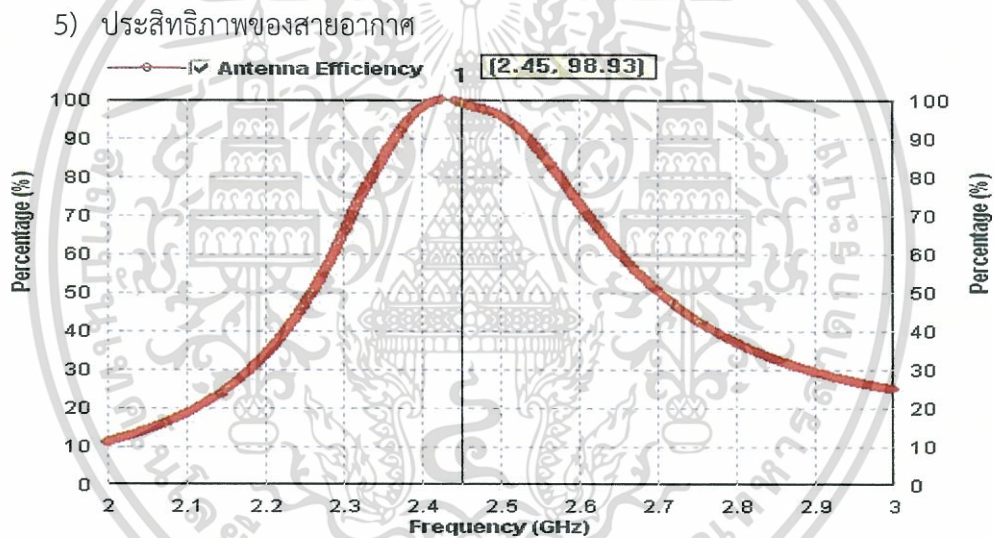
4) อัตราขยาย

จากรูปที่ 3.18 เป็นการแสดงอัตราขยายที่ได้จากผลการจำลอง จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 2.26593 dBi ซึ่งค่าอัตราขยายนี้ถ้ายังมีค่ามากก็จะต้องขึ้นที่ความสามารถในการรับส่งสัญญาณได้ไกลขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา



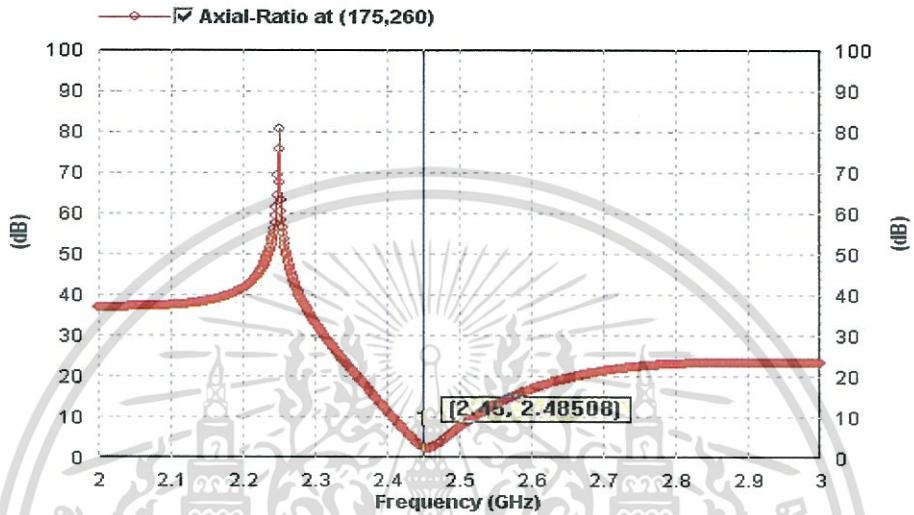
รูปที่ 3.19 ประสิทธิภาพของสายอากาศของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 3.19 แสดงค่าประสิทธิภาพของสายอากาศของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz โดยที่ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศจากรูปผลการจำลองแบบ เท่ากับ 98.93% ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

6) อัตราส่วนแกน (axial ratio)

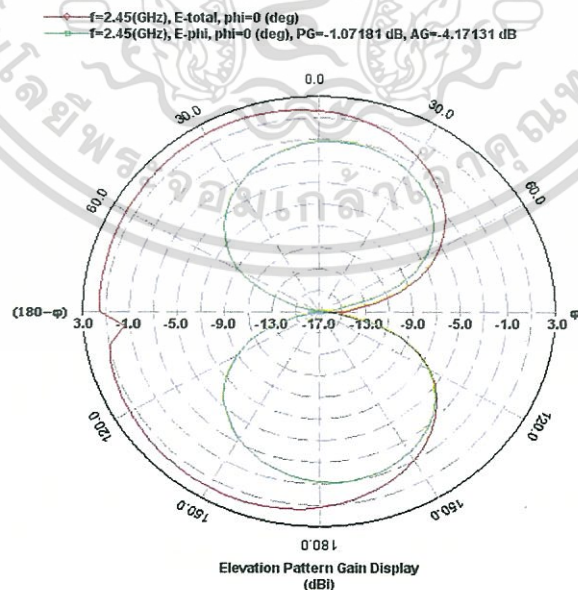
Axial Ratio หรืออัตราส่วนแกนตามที่แสดงในรูปที่ 3.20 คือค่าประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมทวนเข็มนาฬิกาที่มีการแพร่กระจายคลื่นของการเดินทางของคลื่นไปในทิศทางหมุนตามแนวแกน เมื่อมีการส่งสัญญาณออกจากเครื่องส่งที่ป้อนสัญญาณจะทำให้เกิดการเอกสาร์เน็เป็นเอกสาร์ที่สวนงวไ้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นูญเอาใ้หน้าไปใ้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใ้

เหนี่ยวนำให้เกิดการเดินทางของคลื่น โดยสิ่งที่จะเป็นตัวบ่งบอกว่าการเดินทางของคลื่นว่ามีประสิทธิภาพคือกำลังงานที่เดินทางที่มีการลดทอนหน่วยเป็น dB ในกรณีที่ค่า Axial Ratio มีค่าเข้าใกล้ 0 อันเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการเป็นโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาได้ดี โดยตำแหน่งและการจัดวางของช่องเปิดมีผลต่อค่าของ Axial Ratio โดยที่มีค่า Axial Ratio ที่มุมสูงสุดของอัตราขยายแบบวงกลมมีค่าเท่ากับ 2.48508



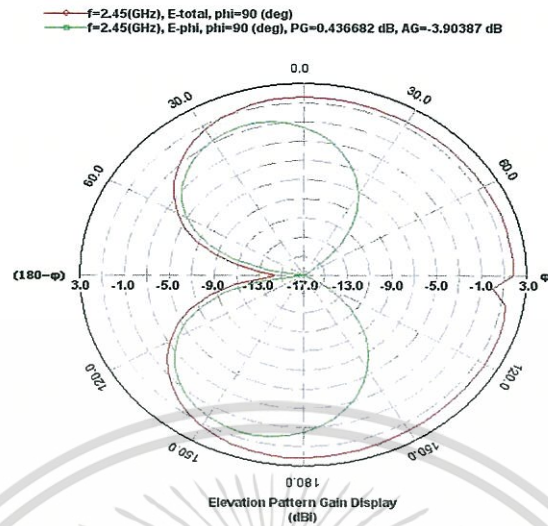
รูปที่ 3.20 Axial Ratio ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

7) การแผ่พลังงานสนามระยะไกล

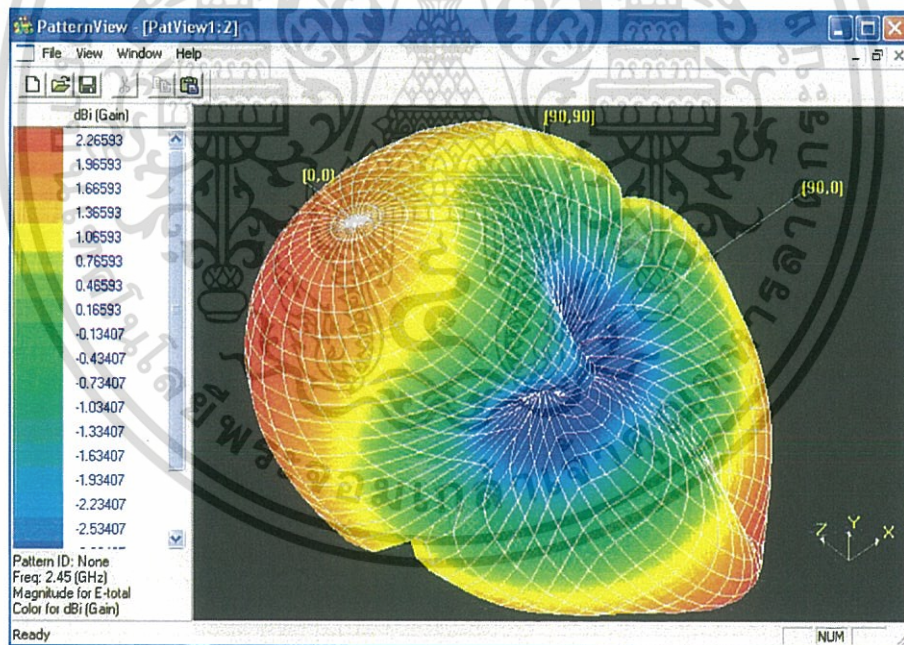


(ก) ระนาบ XZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.22 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ

รูปที่ 3.21 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz ในระนาบต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยระนาบ XZ จะเป็นระนาบที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในลักษณะมุมก้มเงย (elevation) ซึ่งจะมีความแรงสูงสุดของสัญญาณในทิศทางของมุม 0 องศา และ 180 องศา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และระนาบ YZ จะเป็นระนาบที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในลักษณะมุมกัมเงยซึ่งมีความแรงสูงสุดของสัญญาณในทิศทางของมุม 0 องศา และ 180 องศา เช่นเดียวกับระนาบ XZ แต่ความแรงของสัญญาณในระนาบ YZ จะมีความแรงมากกว่าสังเกตที่ความแรงสูงสุดของสัญญาณอยู่ในทิศทางของมุม 0 องศา และ 180 องศา ก็เนื่องจากที่มุม 0 องศาเป็นมุมที่อยู่ตามโครงสร้างของด้านช่องเปิด และที่มุม 180 องศา จะเป็นมุมของด้านไมโครสตริปไลน์ทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด

รูปที่ 3.22 เป็นแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz ในระนาบ 3 มิติ จะเห็นว่าการแพร่กระจายคลื่นได้ดีในที่มุม 0 องศา และมุม 180 องศา ซึ่งจากรูปของผลการจำลองจะเห็นว่าที่มุม 0 องศา จะมีความแรงของสัญญาณน้อยกว่าที่มุม 180 องศาโดยสังเกตได้จากระดับความเข้มของสี แต่ลักษณะของบีมที่มุม 0 องศา จะกว้างกว่าที่มุม 180 องศา เนื่องจากเป็นคลื่นที่แพร่กระจายออกจากทางด้านช่องเปิด ส่วนที่มุม 180 องศาจะเป็นคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายส่งแบบไมโครสตริปจึงทำให้มีความแรงมากกว่าแต่บีมจะแคบ

ตารางที่ 3.4 ผลการจำลองสายอากาศไมโครสตริปรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

พารามิเตอร์	การจำลอง
S_{11} (dB)	-31.35
VSWR	1.049
อัตราขยาย (dBi)	2.26593
อินพุตอิมพีแดนซ์ (Ω)	48.48 - j1.831
ประสิทธิภาพของสายอากาศ (%)	98.93
แบนด์วิดท์ (MHz)	180 (2.369 GHz - 2.55GHz)

จากผลการจำลองแบบตามตารางที่ 3.4 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่ความถี่ 2.45 GHz ในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้น และโพลาไรซ์วงกลมด้วยโปรแกรม IE3D Zeland โดยใช้วัสดุฐานรองชนิด FR4 ได้ผลการจำลองตามคุณลักษณะที่ต้องการ ดังนั้นในบทต่อไปจะทำการจำลองผลด้วยการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสองความถี่สองโพลาไรซ์ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์วงกลมตามลำดับ

บทที่ 4

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก สำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์

การออกแบบสายอากาศด้วยการจำลองผลโดยโปรแกรม IE3D ที่ให้ผลตามความต้องการ จะถูกนำไปสร้างจริงและนำไปวัดผลเพื่อเป็นการยืนยันว่าสายอากาศที่ออกแบบนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง ดังนั้นจึงต้องทำการเลือกใช้วัสดุฐานรองที่ดีความเที่ยงตรงสูง และสามารถตอบสนองการทำงานของสายอากาศในแถบความถี่สูงได้ดี ในงานวิจัยนี้จึงได้เปลี่ยนไปใช้วัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 แทนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ตามที่ได้จำลองผลในบทที่ 3 ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่ 2 ความถี่ คือ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้น และโพลาไรซ์วงกลมตามลำดับ โดยใช้วัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880

4.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสองความถี่

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz สำหรับโพลาไรซ์เชิงเส้น และที่ 4.95 GHz สำหรับโพลาไรซ์วงกลมบนวัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 นั้น จะมีพารามิเตอร์ร่วมกันที่ต้องนำมาใช้ในการออกแบบ ดังนี้

1) คุณสมบัติของวัสดุฐานรอง

วัสดุฐานรองชนิด RT/Duroid 5880 ที่นำมาใช้ในการออกแบบและสร้างชิ้นงาน มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r)	=	2.2	
ความหนาของแผ่นวัสดุฐานรอง	=	3.175	มิลลิเมตร
ค่าความนำของทองแดง	=	4.9×10^7	S/m
ค่าความหนาของทองแดง	=	0.017	มิลลิเมตร
ค่าไดอิเล็กตริกทอสแทนเจนต์ ($\tan\delta$)	=	0.009	

2) สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์และความยาวคลื่นสัมพัทธ์

สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปหรือเรียกว่าไมโครสตริปไลน์เป็นสายส่งสัญญาณที่ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก โดยใช้วิธีการเหนี่ยวนำสัญญาณไปยังสายอากาศช่องเปิด ความกว้างของไมโครสตริปไลน์จะเป็นตัวกำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์ของไมโครสตริปไลน์แมตช์กับอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณแบบโคแอกเซียล ที่ 50Ω ขณะที่ความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพหรือก็คือการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ดังนั้นในการออกแบบครั้งแรกจึงต้องทำให้ไมโครสตริปไลน์แมตช์กับอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณแบบ

โคแอกเซียลที่ 50 Ω ด้วยการคำนวณหาค่าความกว้างของไมโครสตริปไลน์ (W) จากสมการที่ (4.1) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) และความหนาหรือความสูงของวัสดุฐานรอง (h)

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} [\ln(B - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \quad (4.1)$$

เมื่อ

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.2)$$

แทนค่า ϵ_r ของวัสดุฐานรองเท่ากับ 4.4 และค่าอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเซียล $Z_0 = 50 \Omega$ แทนลงในสมการที่ (4.2) จะได้

$$B = \frac{60\pi^2}{50\sqrt{2.2}} = 7.98$$

$$B = 7.98$$

นำค่า B แทนที่ลงในสมการที่ (4.1) จะได้

$$\frac{W}{3.175} = \frac{2}{\pi} \left\{ 7.98 - 1 - \ln(15.96 - 1) + \frac{2.2 - 1}{4.4} [\ln(7.98 - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{2.2} \right\}$$

$$W = 9.75 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

3) ความยาวคลื่นสัมพันธ์

ความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) จะถูกใช้ในการกำหนดขนาดความยาวของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์ โดยนำค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ของวัสดุฐานรอง RT/Duroid 5880 และความถี่ใช้งานที่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ในสมการที่ (3.3) และ (3.4) ซึ่งจะได้ค่าดังนี้

$$\lambda_g \text{ ที่ ความถี่ } 2.45 \text{ GHz} = 96.80 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\lambda_g \text{ ที่ ความถี่ } 4.95 \text{ GHz} = 47.91 \text{ มิลลิเมตร}$$

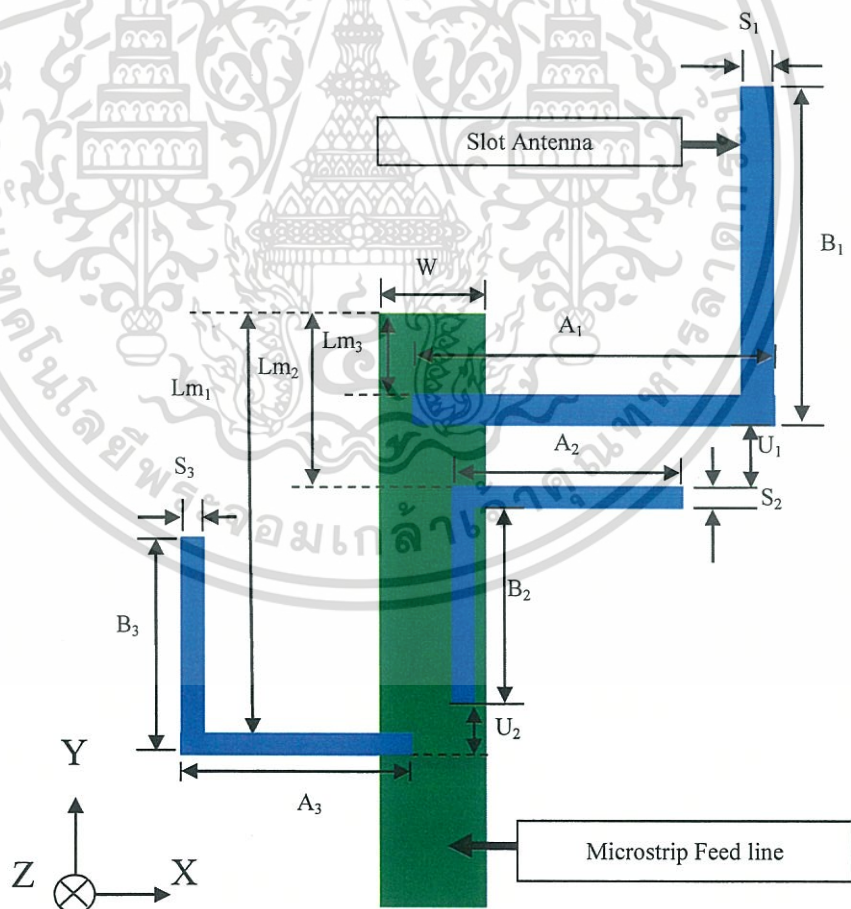
4) การออกแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก

การออกแบบความยาวด้านแกนนอน (A) และความยาวด้านแกนตั้ง (B) ของช่องเปิดที่มีการต่อไมโครสตริปไลน์แบบเปิดวงจรมุมฉาก ส่วนที่สำคัญที่สุดคือ พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวกำหนดให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ นั่นคือความยาวรวมทั้งสองด้านของช่องเปิด ซึ่งได้แก่ ความยาวในแนวแกนนอน และความยาวด้านแกนตั้ง โดยที่ความยาวทั้งสองด้านจะมีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียง

กัน โดยทั่วไปการทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุด ควรกำหนดให้ความยาวรวมของสายอากาศ (A+B) ประมาณ $0.5\lambda_g$ ดังนั้นความยาวช่องเปิด A และช่องเปิด B ซึ่งเท่ากันควรมีค่าประมาณ $0.25\lambda_g$ แต่ในเชิงปฏิบัติแล้วความยาวรวมของ A และ B จะประมาณ $0.5\lambda_g$ นั่นคือ $(A+B) \approx 0.5\lambda_g$ ส่วนความกว้างของช่องเปิดจะกำหนดให้มีขนาดเล็กแคบประมาณ $1/20$ เท่าของความยาวสายอากาศ (A+B) ขึ้นอยู่กับความต้องการในด้านแบนด์วิดท์

ดังนั้น ช่องเปิดออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz จะประกอบด้วยช่องเปิดรูปมุมฉาก 1 ช่องเปิด จะได้รูปแบบโพลาริเซชันเชิงเส้น มีด้าน $A = B = 23.3$ มิลลิเมตร ($0.2407\lambda_g$) และมีความกว้างช่องเปิด (s) = 2 มิลลิเมตร และช่องเปิดออกแบบที่ความถี่ 4.95 GHz จะประกอบด้วยช่องเปิดรูปมุมฉาก 2 ช่องเปิด จะได้รูปแบบโพลาริเซชันวงกลม มีด้าน $A = B = 11.5$ มิลลิเมตร ($0.2505\lambda_g$) และมีความกว้างช่องเปิด (s) = 1 มิลลิเมตร

4.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริเซชันหมุนตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 4.1 โครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริเซชันหมุนตามเข็มนาฬิกา

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสองความถี่สองโพลาริซ จะมี โครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุม ฉากหนึ่งความถี่หนึ่งโพลาริซ โดยจะนำช่องเปิดรูปมุมฉาก 3 ช่องเปิด มาจัดวางแบบแถวลำดับ โดย ให้ช่องเปิดรูปมุมฉากแรกสำหรับความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz และอีก 2 ช่องเปิดสำหรับความถี่เร- โซแนนซ์ที่ 4.95 GHz ทั้ง 3 ช่องเปิดจะวางกลับด้านกัน บนวัสดุฐานรองเดียวกันและใช้ตัวป้อน สัญญาณเดียวกันด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ดังรูปที่ 4.1

ในตารางที่ 4.1 เป็นการแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ ปรับตำแหน่ง และขนาด ของช่องเปิด ในการจำลองแบบโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับ สองความถี่สองโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกา โดยใช้โปรแกรม IE3D Zeland เพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติ ของสายอากาศตอบสนองการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายที่ความถี่ออกแบบ 2.45 GHz และ 4.95 GHz

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สอง โพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกา

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ผลการจำลอง
W (มิลลิเมตร)	9.75(0.2035 λ_g)
A1 (มิลลิเมตร)	23.3(0.2407 λ_g)
A2 (มิลลิเมตร)	11.5(0.2500 λ_g)
A3 (มิลลิเมตร)	11.5(0.2500 λ_g)
B1 (มิลลิเมตร)	23.3(0.2407 λ_g)
B2 (มิลลิเมตร)	11.5(0.2500 λ_g)
B3 (มิลลิเมตร)	11.5(0.2500 λ_g)
S1 (มิลลิเมตร)	2(0.0206 λ_g)
S2 (มิลลิเมตร)	1(0.00208 λ_g)
S3 (มิลลิเมตร)	1(0.00208 λ_g)
Lm ₁ (มิลลิเมตร)	6.715(0.0692 λ_g)
Lm ₂ (มิลลิเมตร)	13.4(0.2796 λ_g)
Lm ₃ (มิลลิเมตร)	20(0.417 λ_g)
U ₁ (มิลลิเมตร)	1.9(0.0396 λ_g)
U ₂ (มิลลิเมตร)	0

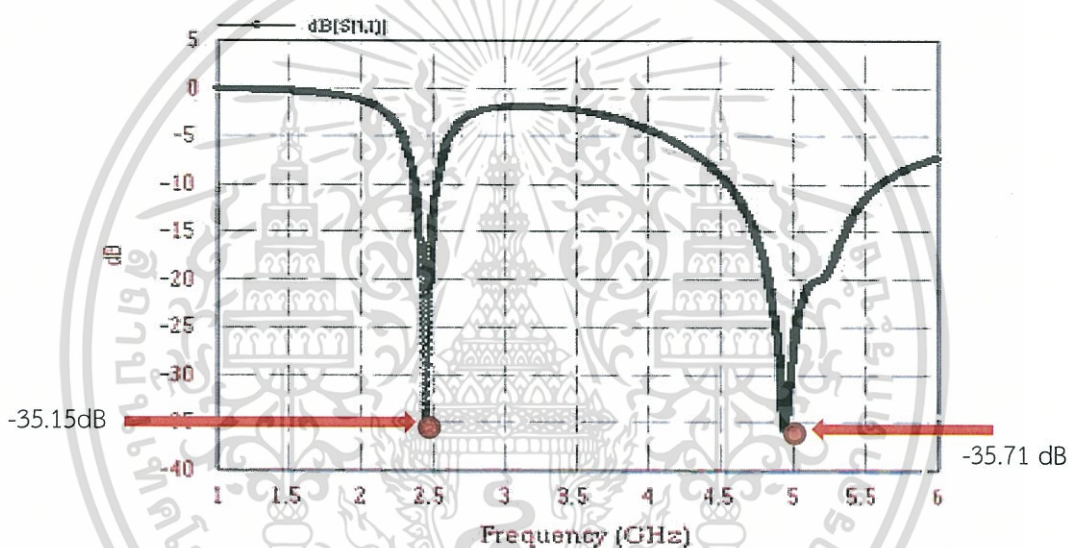
4.2.1 ผลการจำลองแบบ

ในการออกแบบและสร้างสายอากาศนั้นต้องทำการวิเคราะห์การจذبเรียงช่องเปิดรูปมุมฉากว่า ควรจัดเรียงแบบใดจึงจะเหมาะสมที่จะทำให้ได้คุณลักษณะและประสิทธิภาพของสายอากาศที่ดีตามความต้องการนำไปใช้งาน โดยจะต้องคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องใช้ในออกแบบสายอากาศ เพื่อนำจากผลการคำนวณและการจำลองผลจะได้ค่าพารามิเตอร์ทางขนาดดังนี้

ที่ความถี่ 4.95 GHz รูปแบบโพลาริซวงกลมตามเข็มนาฬิกา มีด้าน $A = B = 11.50$ (0.24 λ_g) และมีความกว้างช่องเปิด (s) = 1 มิลลิเมตร

ซึ่งผลการจำลองที่ได้จากสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซวงกลมตามเข็มนาฬิกามีดังนี้

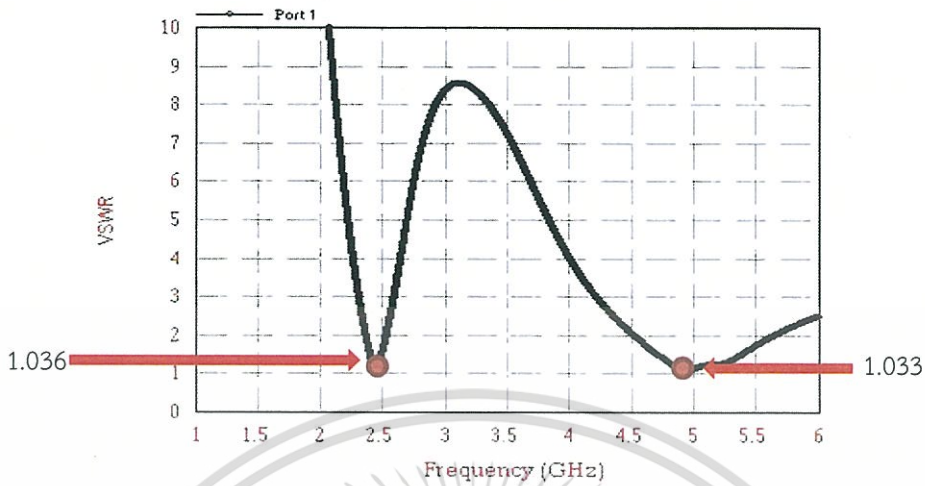
1) การสูญเสียย้อนกลับ



รูปที่ 4.2 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมและโพลาริซวงกลมตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ

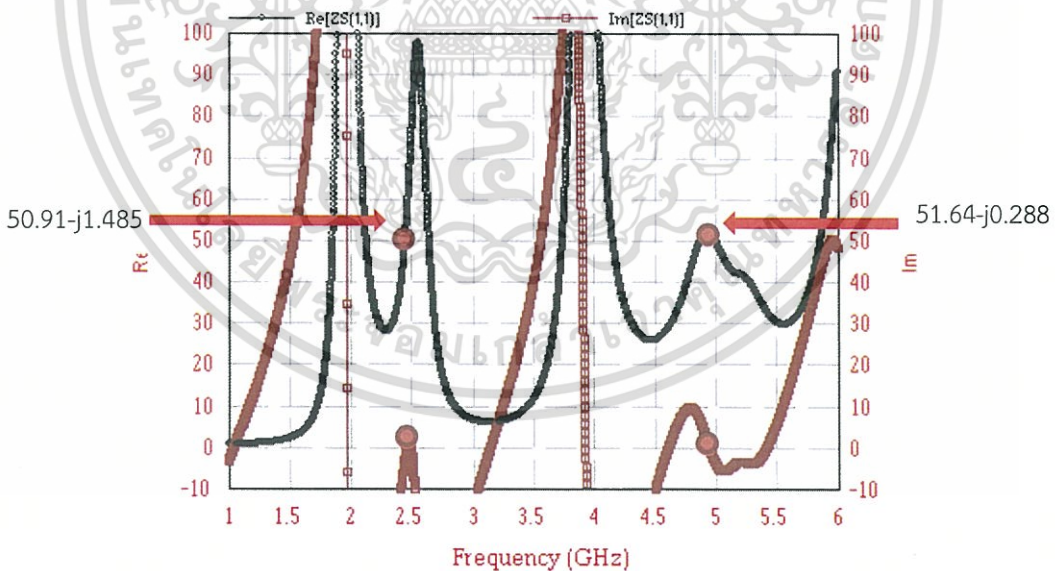
ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} (dB) ในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า S_{11} ประมาณ -35.15 dB และที่ความถี่ 4.95 GHz มีค่า S_{11} ประมาณ -35.71 dB ซึ่งเป็นค่าที่น้อยแสดงว่ามีการย้อนกลับของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ตัวสายอากาศน้อย เนื่องจากได้ทำการออกแบบให้มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี และแบนด์วิดท์ของสายอากาศสามารถหาได้ โดยจะประมาณค่าจากช่วงความถี่ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ระดับ -10 dB

2) อัตราส่วน VSWR



รูปที่ 4.3 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ

จากการจำลองแบบดังรูปที่ 4.3 ที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ค่า VSWR = 1.036 และที่ความถี่ 4.95 GHz ได้ค่า VSWR = 1.033

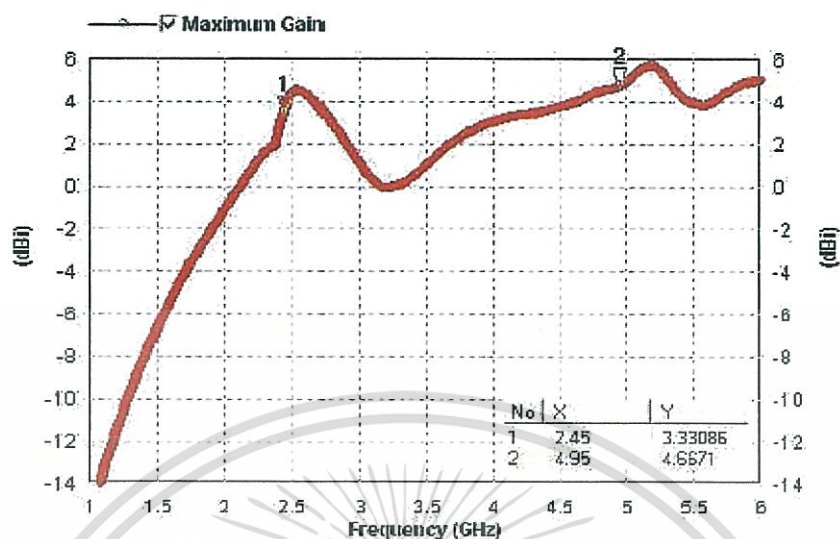
3) อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in})

รูปที่ 4.4 อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ = 50.91-j1.485Ω และที่ความถี่ 4.95 GHz ได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ = 51.64-j0.288Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

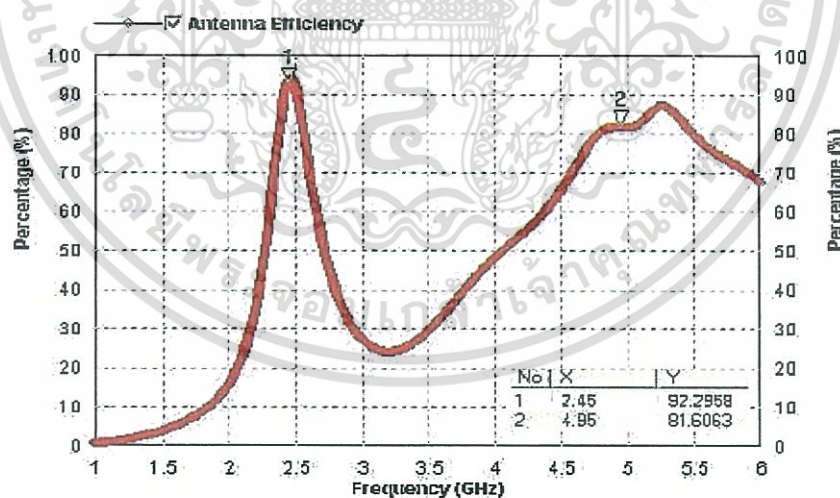
4) อัตราขยาย



รูปที่ 4.5 อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz อัตราขยายเท่ากับ 3.3 dBi และที่ความถี่ 4.95 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 4.66 dBi

5) ประสิทธิภาพของสายอากาศ

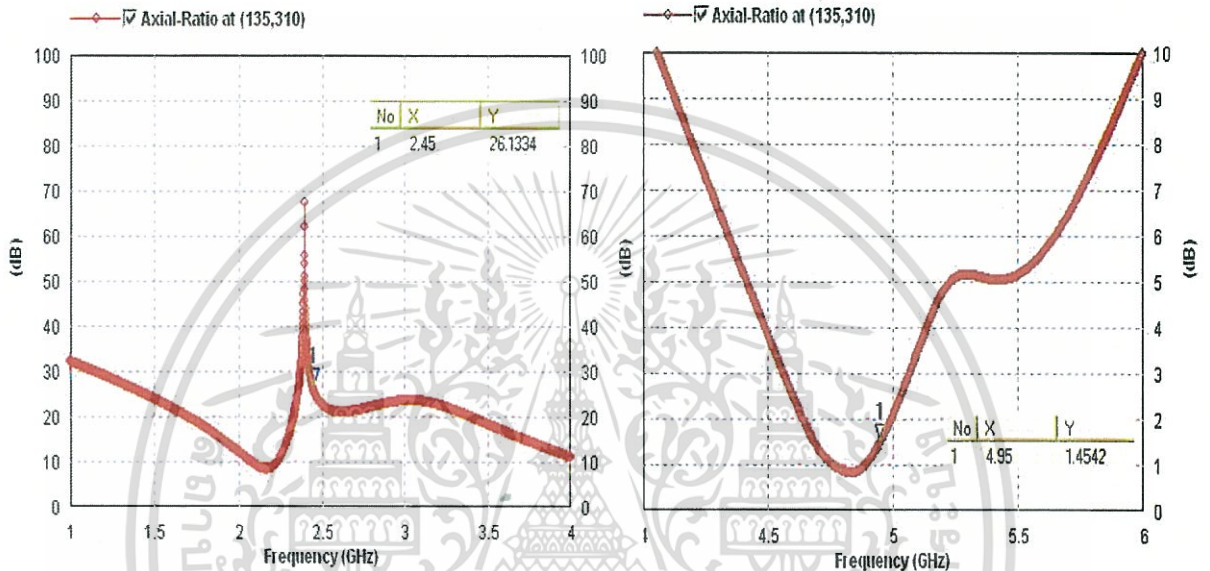


รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz ค่าประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งคิดในเชิงของการแพร่กระจายคลื่น = 92.29% และที่ความถี่ 4.95 GHz ประสิทธิภาพของสายอากาศ = 81.61%

6) Axial Ratio

Axial Ratio แสดงอยู่ในรูปที่ 4.7 ซึ่ง Axial Ratio คือ อัตราส่วนระหว่างแกนการหมุนของคลื่นที่ยาวที่สุดต่อแกนการหมุนของคลื่นที่สั้นที่สุด ค่าที่ได้นี้จะเป็นการแสดงว่าสายอากาศที่ออกแบบมีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยที่ Axial Ratio = ∞ หรือแบบวงกลมตามเข็มนาฬิกา โดยมี Axial Ratio = 1 ซึ่งโพลาไรซ์แบบวงกลมจะมีการแพร่กระจายคลื่นเดินทางในลักษณะหมุนเป็นวงกลมรอบแนวแกน โดยที่กำลังงานที่เดินทางจะมีการลดทอนหน่วยเป็น dB ผลการจำลองพบว่า Axial Ratio ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 26.1334 และที่ความถี่ 4.95 GHz มีค่าเท่ากับ 1.4542

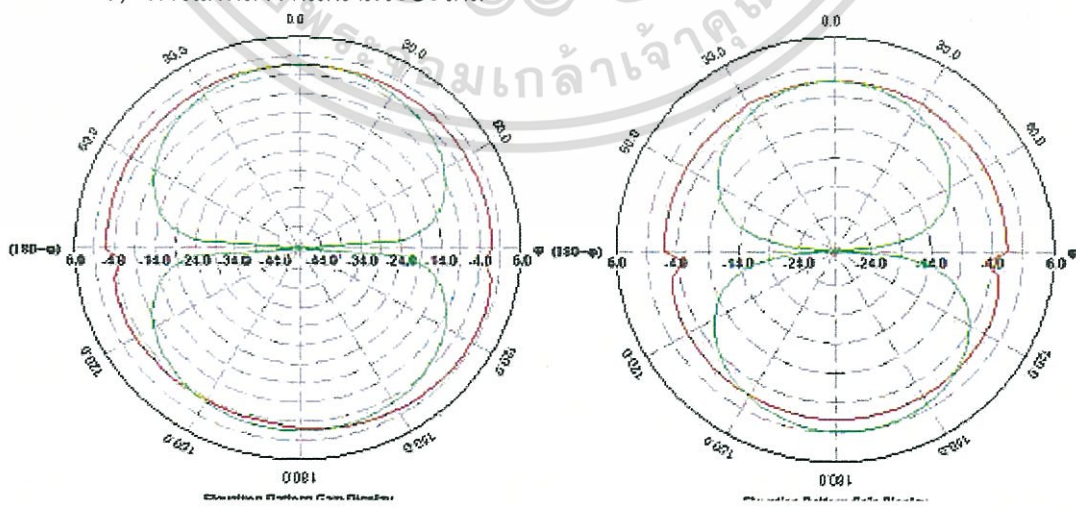


(ก) 2.45 GHz

(ข) 4.95 GHz

รูปที่ 4.7 Axial ratio ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์หมุนตามเข็มนาฬิกา

7) การแผ่พลังงานสนามระยะไกล



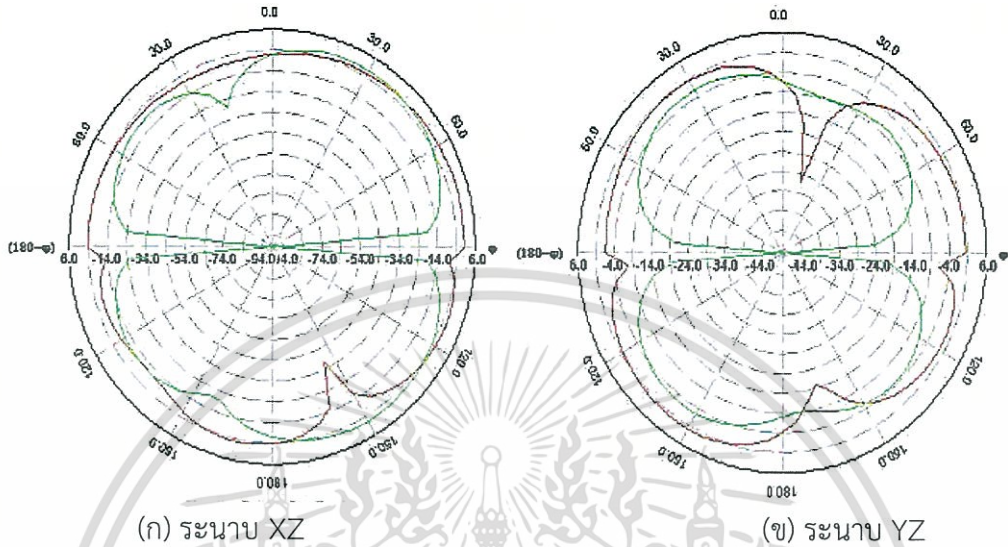
(ก) ระนาบ XZ

(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ 2 มิติ ที่ความถี่ 2.45 GHz

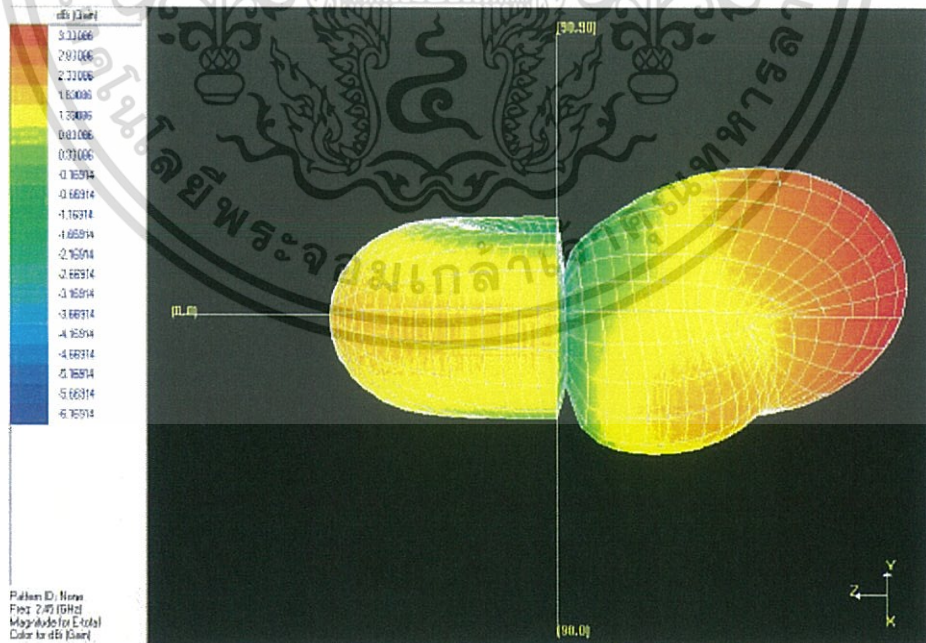
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 ระนาบ XZ มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 180 องศา ที่แกนแนวตั้ง และที่แกนแนวนอนมีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 180 องศา ส่วนระนาบ YZ มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 270 องศา ที่แกนแนวตั้ง ที่แนวแกนนอน มีการกระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 180 องศา



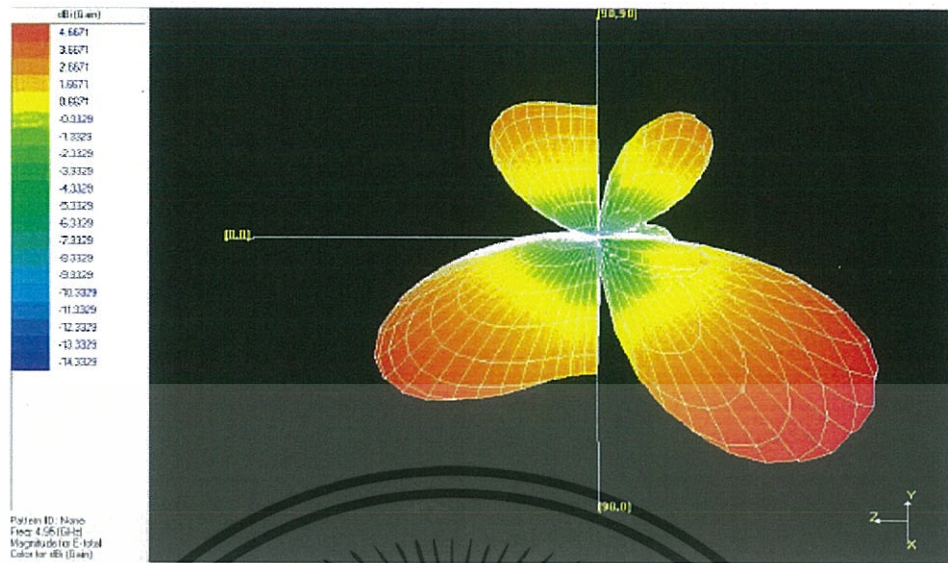
รูปที่ 4.9 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ 2 มิติ ที่ความถี่ 4.95 GHz

จากรูปที่ 4.9 ระนาบ XZ มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 200 องศา ที่แกนแนวตั้ง และที่แกนแนวนอนมีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 30 องศา ส่วนระนาบ YZ มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 210 องศา ที่แกนแนวตั้งส่วนที่แนวแกนนอนมีการกระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 330 องศา



รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก ในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ ที่แถบความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ ที่แถบความถี่ 4.95 GHz

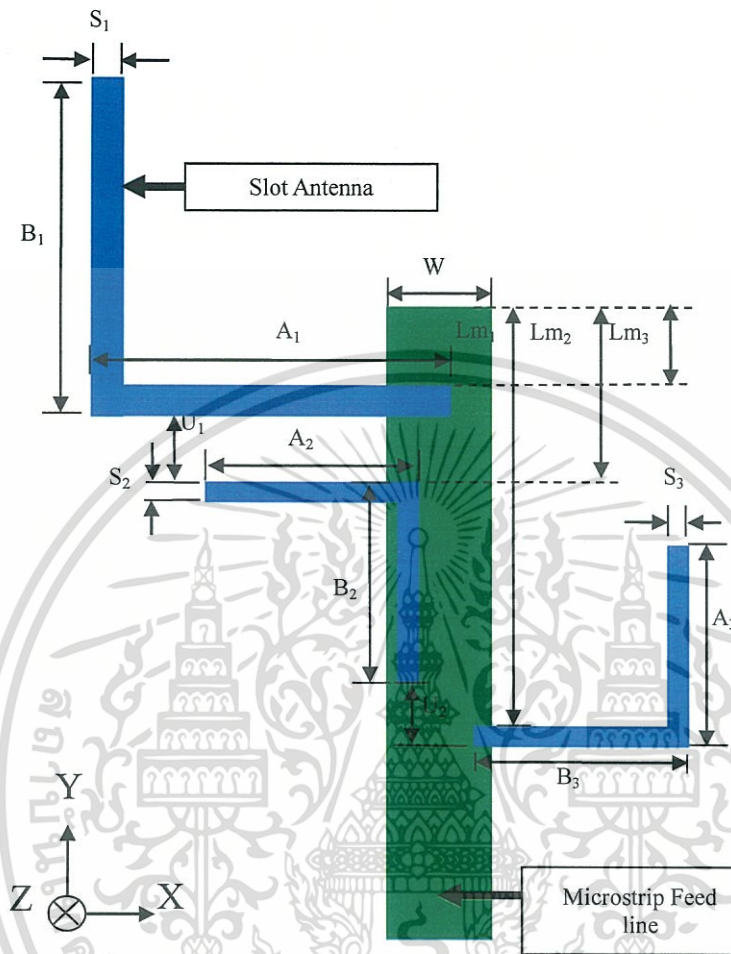
จากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 เป็นแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาในรูปแบบรอบทิศทางที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ ในระนาบ 3 มิติ โดยลักษณะของบีมที่มุม 0 องศา จะกว้างกว่าที่มุม 180 องศา เนื่องจากเป็นคลื่นที่แพร่กระจายออกจากทางด้านช่องเปิด ส่วนที่มุม 180 องศาจะเป็นคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายส่งแบบไมโครสตริปจึงทำให้มีความแรงมากกว่าแต่บีมจะแคบ ซึ่งมีรูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกลสอดคล้องกับรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ทั้งระนาบ XZ และ YZ

ตารางที่ 4.2 ผลที่ได้จากการจำลองแบบของอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมฉากในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกา

พารามิเตอร์	ผลที่ได้จากการจำลองแบบ	
	ความถี่ 2.45 GHz	ความถี่ 4.95 GHz
S_{11} (dB)	-35.15	-35.71
VSWR	1.036	1.033
อินพุตอิมพีแดนซ์ (Ω)	50.91-j1.485	51.64-j0.228
อัตราขยาย (dBi)	3.33	4.66
ประสิทธิภาพของสายอากาศ (%)	92.29	81.61
แบนด์วิดท์ (MHz)	158 (2.373 GHz - 2.531 GHz)	1080 (4.511GHz - 5.591GHz)
Axial Ratio	26.13	1.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 4.12 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์หมุนทวนเข็มนาฬิกา

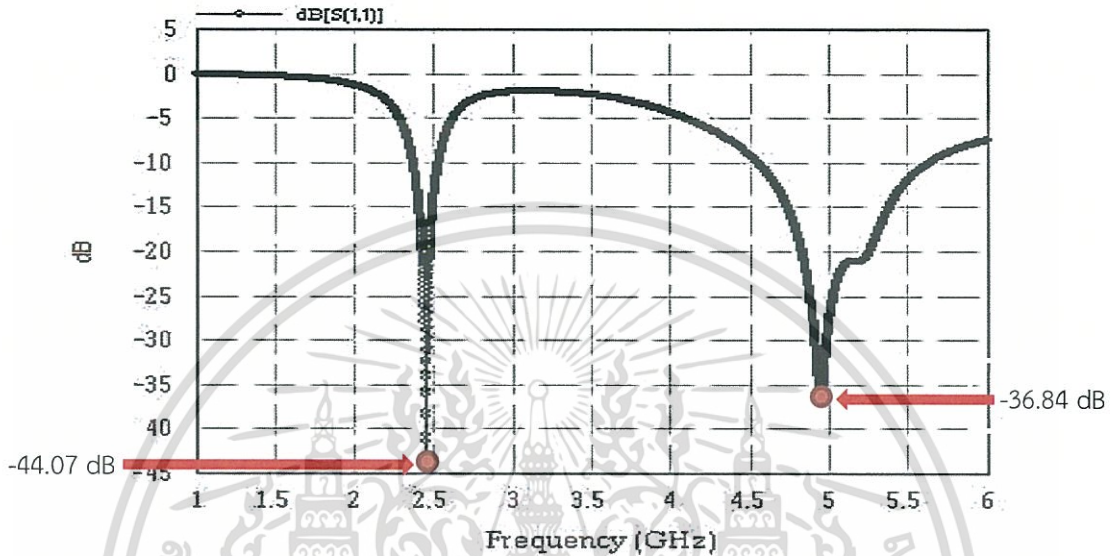
การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสองความถี่สองโพลาไรซ์ที่มีทิศทางการแพร่ของโพลาไรซ์วงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา สามารถทำได้โดยใช้หลักการแพร่กระจายคลื่นที่มีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่มาจากช่องเปิดทั้งสองช่องเปิดให้มีทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยให้ช่องเปิดทั้งสองเท่ากันและวางกลับกัน ซึ่งจะต่างจากการจัดวางช่องเปิดที่ทำให้ได้โพลาไรซ์วงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกา นอกจากนี้จะมีการจัดวางช่องเปิดรูปมุมฉากของความถี่ 2.45 GHz ใหม่ เพื่อผลการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ให้ผลดีที่สุดของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสองความถี่สองโพลาไรซ์ ที่ต้องการ

ส่วนความถี่ 4.95 GHz เป็นความถี่ที่ออกแบบให้มีโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา ผลการจำลองพบว่า จะมีด้าน $A = B = 11.55$ ($0.241 \lambda_g$) และมีความกว้างช่องเปิด (s) = 1 มิลลิเมตร

4.3.1 ผลการจำลองแบบ

การจำลองผลของสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์หมุนทวนเข็มนาฬิกา ในรูปแบบตามที่แสดงในรูปที่ 4.12 มีดังนี้

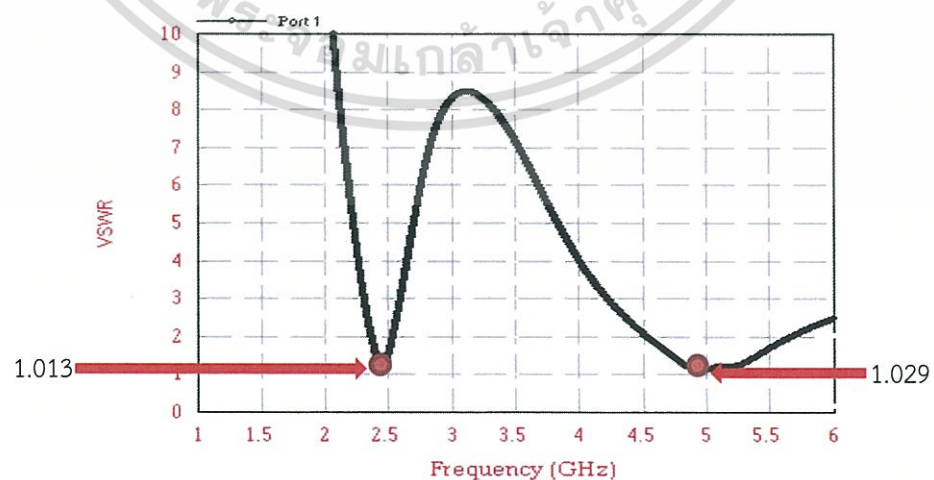
1) การสูญเสียย้อนกลับ



รูปที่ 4.13 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์หมุนทวนเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz

ผลการจำลองที่แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} (dB) ในรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz ค่า S_{11} ประมาณ -44.07 dB และที่ความถี่ 4.95 GHz ค่า S_{11} ประมาณ -36.84 dB

2) อัตราส่วน VSWR



รูปที่ 4.14 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตารางที่ 4.3 เป็นการแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ ปรับตำแหน่ง และขนาดของช่องเปิด ในการจำลองแบบโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซชันหมุนวนเข็มนาฬิกา โดยใช้โปรแกรม IE3D Zeland เพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติของสายอากาศตอบสนองการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายที่ความถี่ออกแบบ 2.45 GHz และ 4.95 GHz

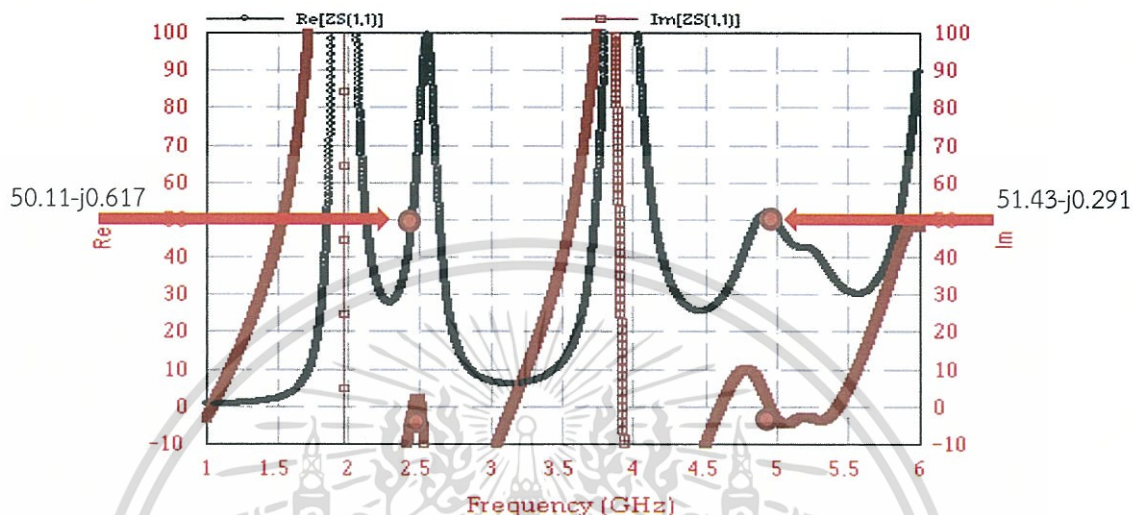
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซชันหมุนวนเข็มนาฬิกา

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ผลการจำลอง
W (มิลลิเมตร)	9.75(0.2035 λ_g)
A1 (มิลลิเมตร)	23.3(0.2407 λ_g)
A2 (มิลลิเมตร)	11.5(0.2500 λ_g)
A3 (มิลลิเมตร)	11.5(0.2500 λ_g)
B1 (มิลลิเมตร)	23.3(0.2407 λ_g)
B2 (มิลลิเมตร)	11.5(0.2500 λ_g)
B3 (มิลลิเมตร)	11.5(0.2500 λ_g)
S1 (มิลลิเมตร)	2(0.0206 λ_g)
S2 (มิลลิเมตร)	1(0.00208 λ_g)
S3 (มิลลิเมตร)	1(0.00208 λ_g)
Lm ₁ (มิลลิเมตร)	7.975(0.0823 λ_g)
Lm ₂ (มิลลิเมตร)	11.5(0.2400 λ_g)
Lm ₃ (มิลลิเมตร)	24(0.500 λ_g)
U ₁ (มิลลิเมตร)	1.5(0.0313 λ_g)
U ₂ (มิลลิเมตร)	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz ค่า VSWR = 1.013 และที่ความถี่ 4.95 GHz ค่า VSWR = 1.029

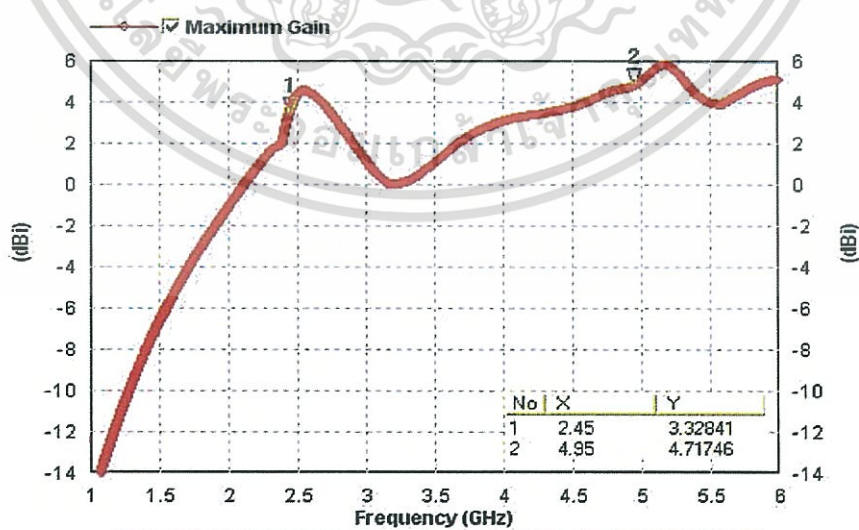
3) อินพุตอิมพีแดนซ์



รูปที่ 4.15 อินพุตอิมพีแดนซ์ของไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz อินพุตอิมพีแดนซ์ = $50.11-j0.617\Omega$ และที่ความถี่ 4.95 GHz อินพุตอิมพีแดนซ์ = $51.43-j0.291\Omega$

4) อัตราขยาย

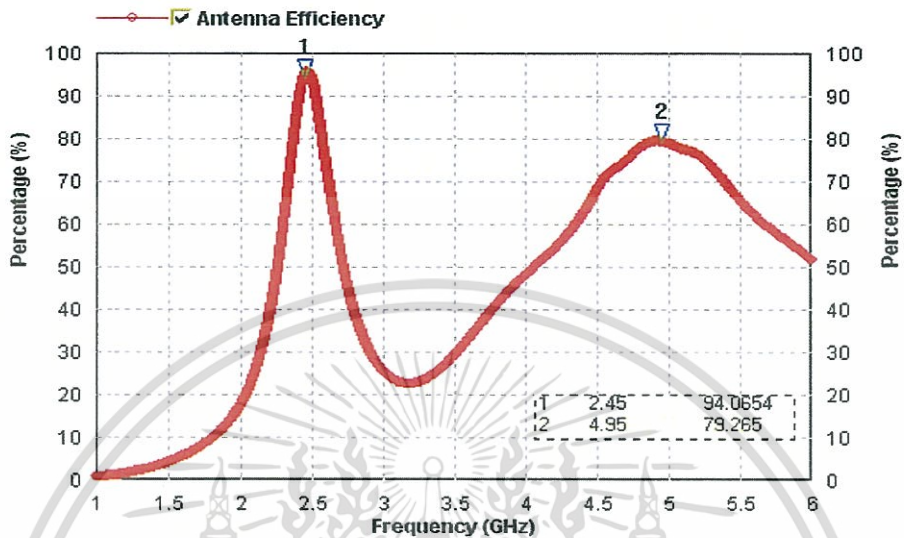


รูปที่ 4.16 อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz อัตราขยายเท่ากับ 3.32 dBi และที่ความถี่ 4.95 GHz อัตราขยายเท่ากับ 4.71 dBi

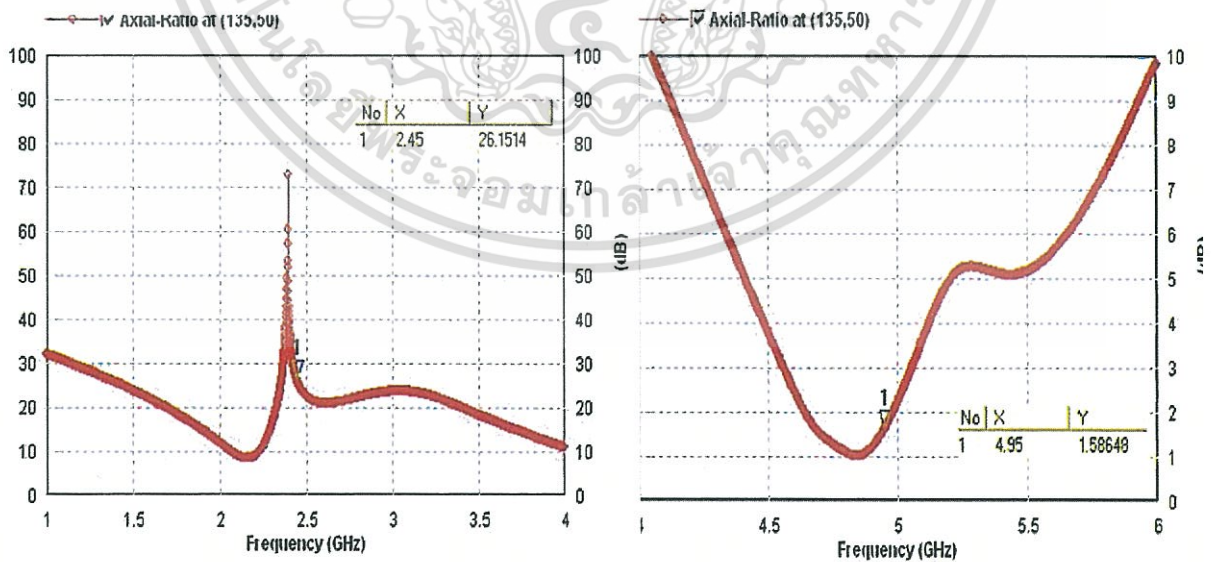
5) ประสิทธิภาพของสายอากาศ



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz ประสิทธิภาพของสายอากาศ = 94.06% และที่ความถี่ 4.95 GHz ประสิทธิภาพของสายอากาศ = 79.26%

6) Axial Ratio



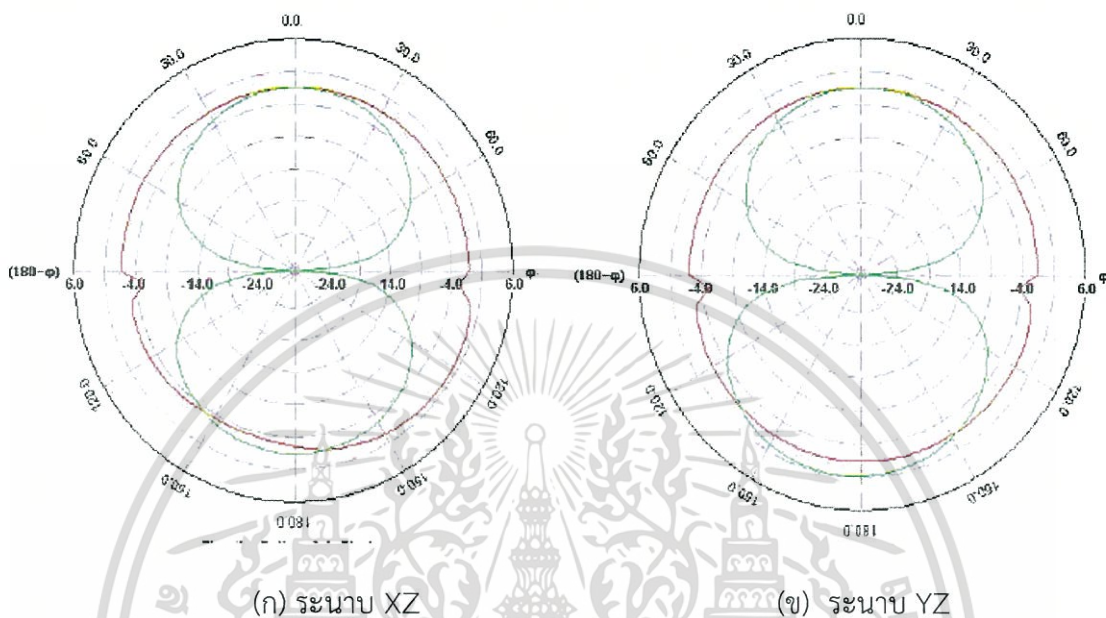
(ก) 2.45 GHz

(ข) 4.95 GHz

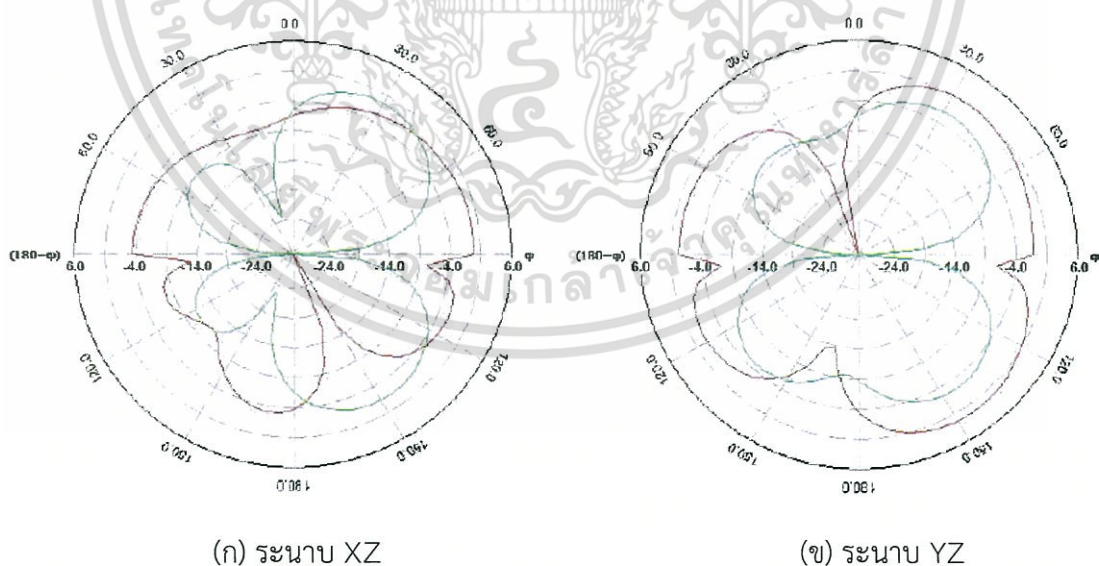
รูปที่ 4.18 Axial Ratio ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์หมุนทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Axial Ratio แสดงอยู่ในรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz ค่า Axial Ratio = 26.15 dB แสดงได้ว่าสายอากาศสายอากาศมีรูปแบบโพลาริเซชันชนิดวงกลม และที่ความถี่ 4.95 GHz ค่า Axial Ratio = 1.58 แสดงได้ว่าสายอากาศสายอากาศมีรูปแบบโพลาริเซชันชนิดเชิงเส้น



รูปที่ 4.19 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลแบบ 2 มิติ ที่ความถี่ 2.45 GHz



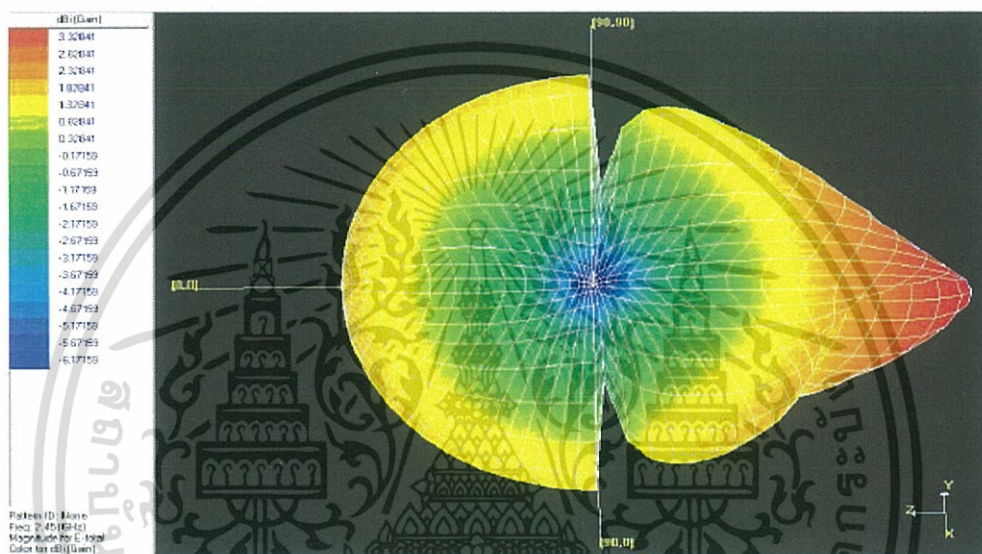
รูปที่ 4.20 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ 2 มิติ ที่ความถี่ 4.95 GHz

จากรูปที่ 4.19 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยระนาบ XZ มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 130 องศา ในแนวแกนแนวตั้ง ส่วนแกนแนวนอนมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

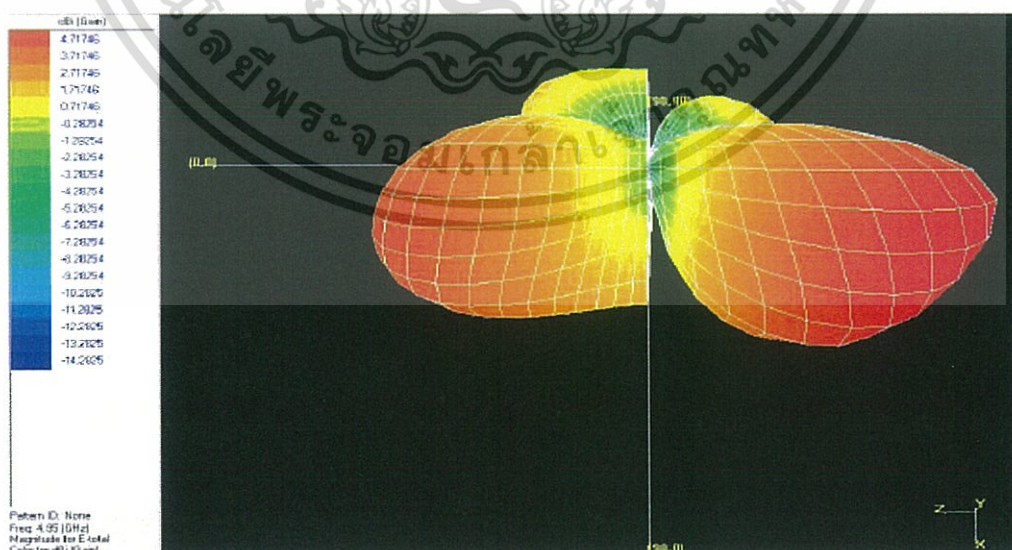
การแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 180 องศา ส่วนที่ระนาบ YZ มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 0 องศา ที่แกนแนวตั้ง และที่แนวแกนนอนมีการกระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 180 องศา

จากรูปที่ 4.20 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล ที่ความถี่ 4.95 GHz โดยระนาบ XZ มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 190 องศา ที่แกนแนวตั้ง ที่แกนแนวนอนมีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 30 องศา ระนาบ YZ มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 150 องศา ที่แกนแนวตั้งส่วนที่แนวแกนนอนมีการกระจายคลื่นสูงสุดที่มุม 150 องศา

7) การแผ่พลังงานสนามระยะไกล



รูปที่ 4.21 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก ในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ ที่แถบความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 4.22 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก ในรูปแบบโพลาริซวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกาในระนาบ 3 มิติ ที่แถบความถี่ 4.95 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 เป็นแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในระนาบ 3 มิติ สำหรับสองความถี่สองโพลาริเซชันหมุนวนเข็มนาฬิกาในรูปแบบรอบทิศทางที่แถบความถี่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าลักษณะของบีมที่มุม 0 องศา จะกว้างกว่าที่มุม 180 องศา เนื่องจากเป็นคลื่นที่แพร่กระจายออกจากทางด้านช่องเปิด ส่วนที่มุม 180 องศาจะเป็นคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายส่งแบบไมโครสตริบจึงทำให้มีความแรงมากกว่าแต่บีมจะแคบกว่า ซึ่งมีรูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกลสอดคล้องกับรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ทั้งระนาบ XZ และ YZ

จากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.4 เป็นสรุปผลการจำลองแบบสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริเซชันวงกลมหมุนวนเข็มนาฬิกา และตามเข็มนาฬิกา ซึ่งในบทที่ 5 จะเป็นการนำค่าพารามิเตอร์จากการจำลองแบบไปสร้าง และทดลองจริงตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศไมโครสตริบแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริเซชันวงกลมหมุนวนเข็มนาฬิกา

พารามิเตอร์	ผลที่ได้จากการจำลองแบบ	
	ความถี่ 2.45 GHz	ความถี่ 4.95 GHz
S_{11} (dB)	-44.07	-36.84
VSWR	1.031	1.029
อินพุตอิมพีแดนซ์ (Ω)	50.11-j0.617	51.43-j0.291
อัตราขยาย (dBi)	3.32	4.71
ประสิทธิภาพของสายอากาศ (%)	94.06	79.26
แบนด์วิดท์ (MHz)	160 (2.421GHz - 2.581 GHz)	1095 (4.506 GHz - 5.601 GHz)
Axial Ratio	26.15	1.58

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

สำหรับการทดสอบและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นทั้งสองรูปแบบ ประกอบด้วย การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา และสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา แต่ละแบบจะมีการทดสอบประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศ คือ การทดสอบวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง อัตราขยายและอินพุตอิมพีแดนซ์ รวมถึงการทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศ ซึ่งผลการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบของสายอากาศทั้ง 2 ชนิด จากบทที่ 3 และบทที่ 4

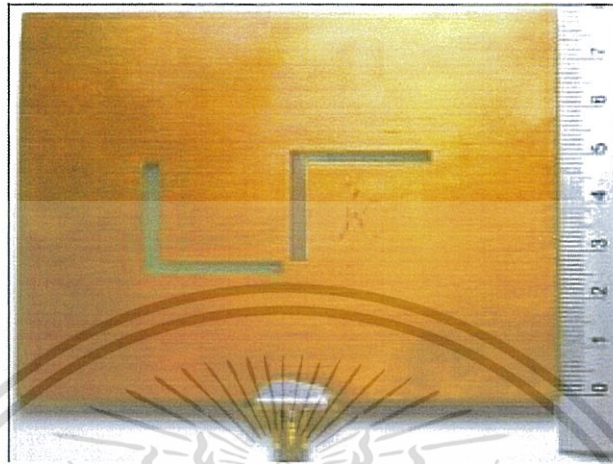
5.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา

สายอากาศที่ทำการออกแบบและจำลองแบบมาแล้วจะนำมาสร้างจริงบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ซึ่งมีคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการใช้งานดังต่อไปนี้

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r)	=	4.5
ความหนาของแผ่นวัสดุฐานรอง	=	1.6 มิลลิเมตร
ค่าความนำของทองแดง	=	5.8×10^7 S/m
ค่าความหนาของทองแดง	=	0.035 มิลลิเมตร
ค่าไดอิเล็กตริกทอสแทนเจนต์ ($\tan \delta$)	=	0.02

และนำสายอากาศดังกล่าวมาวัดคุณลักษณะที่จำเป็นของสายอากาศซึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศจะประกอบด้วย การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ค่าอัตราขยาย ค่า Axial Ratio และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในสนามระยะไกล

5.1.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลม หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.1 ด้านหน้าสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลม หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา



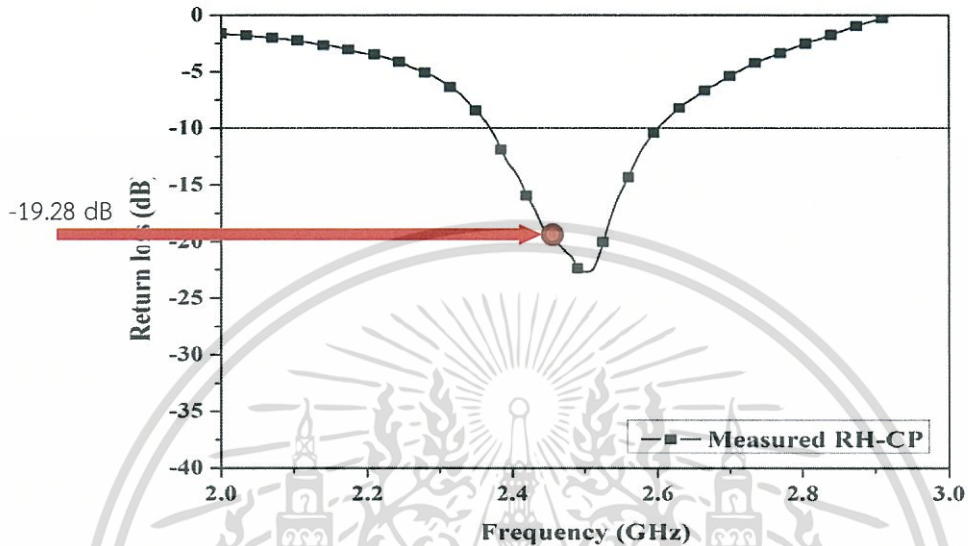
รูปที่ 5.2 ด้านหลังสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลม หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลม หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ประกอบด้วย

1) ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ

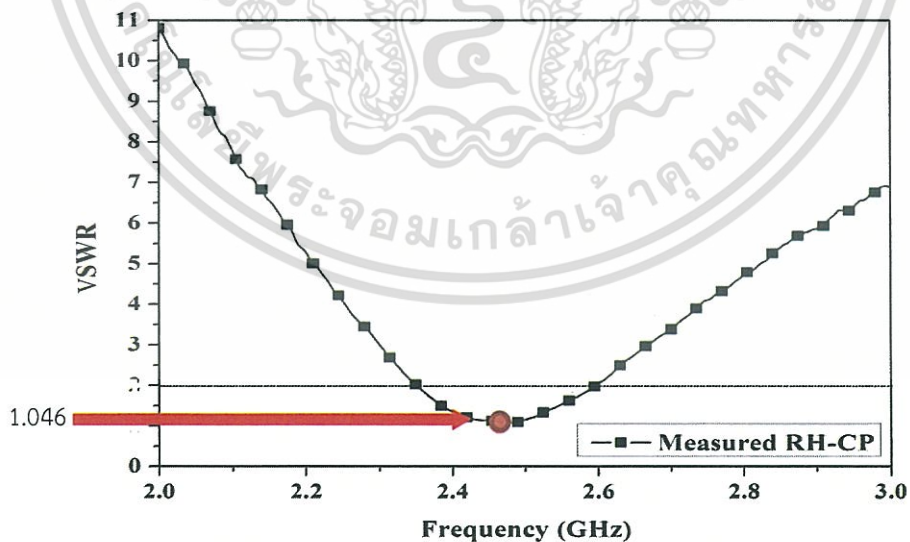
ค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} (dB) ในรูปที่ 5.3 เป็นผลจากการทดสอบสายอากาศที่แสดงให้เห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า S_{11} ประมาณ -19.28 dB ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุด แสดงว่ามีการสะท้อนกลับของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ตัวสายอากาศน้อย เนื่องจากได้ทำการออกแบบการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีและจาก

รูปของผลการทดสอบข้างต้นสามารถนำมาใช้หาค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศได้โดยจะคิดจากช่วงความถี่ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ตำแหน่ง -10 dB มีค่าเท่ากับ 246 MHz



รูปที่ 5.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

2) ผลการทดสอบอัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่ง

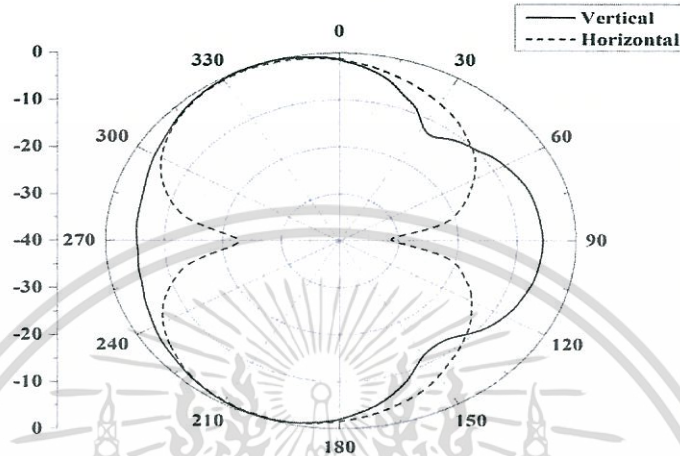


รูปที่ 5.4 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

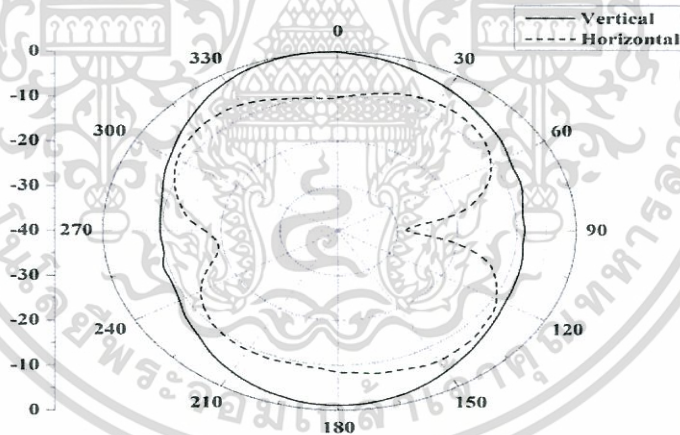
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VSWR ในรูปที่ 5.4 เป็นผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นได้ว่าที่แถบความถี่ 2.45 GHz มีค่าประมาณ 1.046 ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการสูญเสียย้อนกลับในรูปที่ 5.3

3) ผลการทดสอบค่าการแผ่พลังงานระยะไกล



รูปที่ 5.5 การแผ่พลังงานระยะไกลในระนาบ XZ ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก สำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.6 การแผ่พลังงานระยะไกลในระนาบ YZ ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก สำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

รูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 เป็นการแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งประกอบด้วยระนาบ XZ ซึ่งมีความแรงสูงสุดของสัญญาณในทิศทางไกลเฉียงมุม 340 องศา และไกลเฉียง 200 องศา แต่ความแรงของสัญญาณในระนาบ YZ จะมีความแรงมากกว่าสังเกตที่ความแรงสูงสุดของสัญญาณอยู่ในทิศทางของมุม 0 องศา และ 180 องศา เนื่องจากที่มุม

0 องศาเป็นมุมที่อยู่ตามโครงสร้างของด้านช่องเปิด และที่มุม 180 องศา จะเป็นมุมของด้านไมโครสตริปไลน์ทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก สำหรับหนึ่งความถี่แบบ โพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz

พารามิเตอร์	จากการจำลอง	จากการทดสอบ
ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	2.45	2.45
S_{11} (dB)	-32.35	-19.28
VSWR	1.046	1.0558
อินพุตอิมพีแดนซ์ (Ω)	47.93-j0.726	49.26-j4.92
อัตราขยาย (dBi)	2.26	2.48
Axial Ratio	1.757	1.876
แบนด์วิดท์ (MHz)	186 (2.36 GHz – 2.546 GHz)	246 (2.338 GHz – 2.584 GHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลม หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.7 ด้านหน้าสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลม หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.8 ด้านหลังสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลม หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

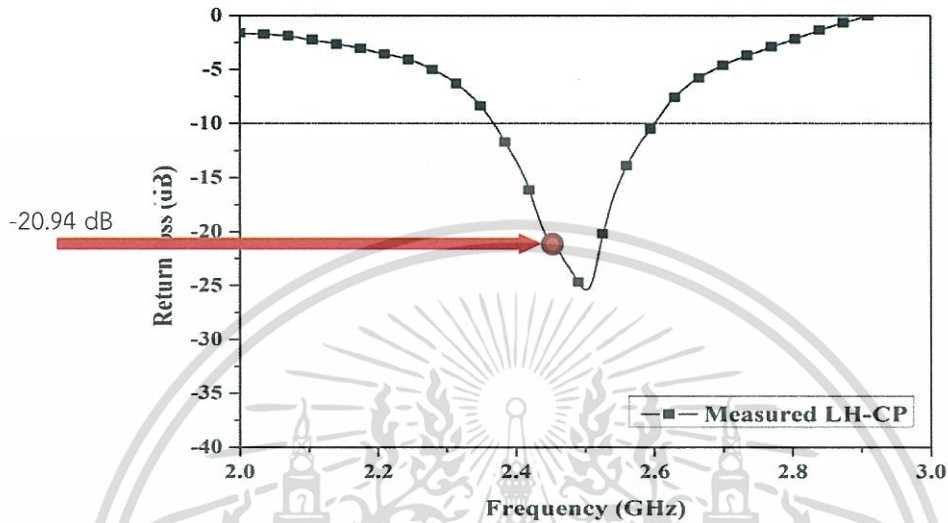
ผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลม หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ประกอบด้วย

1) ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ

ค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} (dB) ในรูปที่ 5.9 เป็นผลจากการทดสอบสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า S_{11} ประมาณ -20.94 dB ซึ่งเนื่องจากได้ทำการออกแบบการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีและจากรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

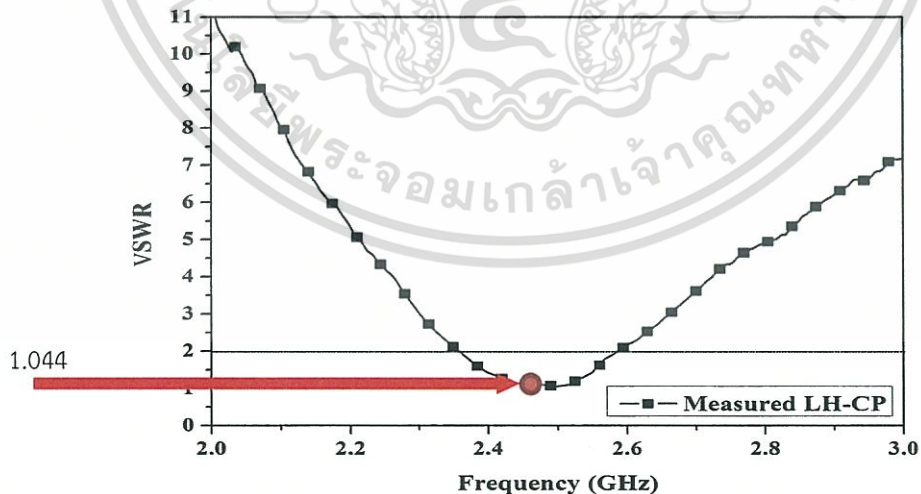
ของผลการทดสอบข้างต้นสามารถนำมาใช้หาค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศได้โดยจะคิดจากช่วงความถี่ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ตำแหน่ง -10 dB มีค่าเท่ากับ 240 MHz



รูปที่ 5.9 การสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

2) ผลการทดสอบอัตราส่วนของแรงดันคลื่นนิ่ง

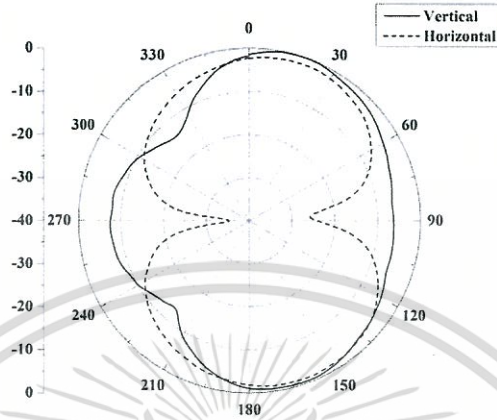
ในรูปที่ 5.5 เป็นผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นได้ว่าที่แถบความถี่ 2.45 GHz มีค่า VSWR ประมาณ 1.044 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมากและใกล้เคียงกับผลการจำลองแบบ



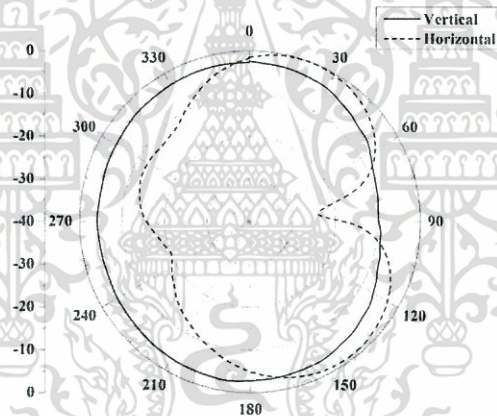
รูปที่ 5.10 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ผลการทดสอบค่าการแผ่พลังงานระยะไกล



รูปที่ 5.11 การแผ่พลังงานระยะไกลในระนาบ XZ ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมฉาก สำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.12 การแผ่พลังงานระยะไกลในระนาบ YZ ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมฉาก สำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

รูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 เป็นการแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz ในระนาบ XZ ซึ่งมีความแรงสูงสุดของสัญญาณในทิศทางใกล้เคียงมุม 20 องศา และใกล้เคียง 160 องศา แต่ในระนาบ YZ จะมีทิศทางการแผ่พลังงานสนามระยะไกลเหมือนของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมูมฉากสำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดยมีความแรงสูงสุดของสัญญาณอยู่ในทิศทางของมุม 0 องศา และ 180 องศา เนื่องจากที่มุม 0 องศาเป็นมุมที่อยู่ตามโครงสร้างของด้านช่องเปิด และที่มุม 180 องศา จะเป็นมุมของด้านไมโครสตริปไลน์ทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉาก สำหรับหนึ่งความถี่แบบโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz

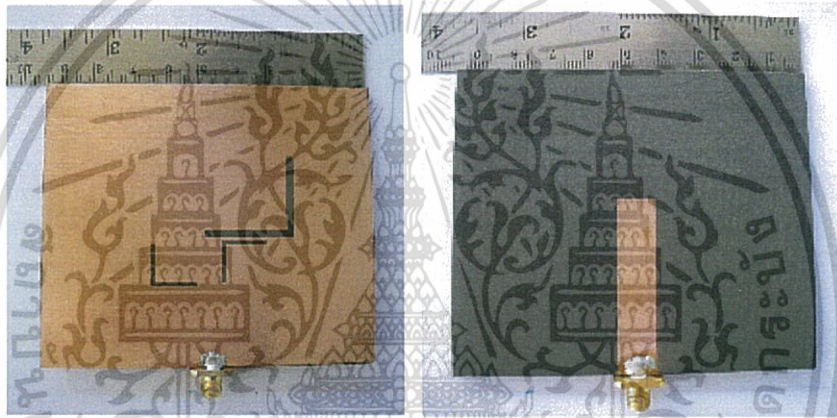
พารามิเตอร์	จากการจำลอง	จากการทดสอบ
ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	2.45	2.45
S_{11} (dB)	-31.35	-20.94
VSWR	1.049	1.0447
อินพุตอิมพีแดนซ์ (Ω)	48.48-j1.831	48.29-j4.56
อัตราขยาย (dBi)	2.26	2.48
Axial Ratio	2.485	2.012
แบนด์วิดท์ (MHz)	181 (2.369 GHz - 2.55 GHz)	240 (2.359 GHz - 2.599 GHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา

สายอากาศที่ทำการออกแบบและจำลองแบบมาแล้ว จะนำมาสร้างจริงบนวัสดุฐานรองชนิด RT /duroid เบอร์ 5880 และทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศจะประกอบด้วย การสูญเสียย้อนกลับ S_{11} อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ค่าอัตราขยาย ค่า Axial Ratio และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในสนามระยะไกล

5.2.1 สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกา

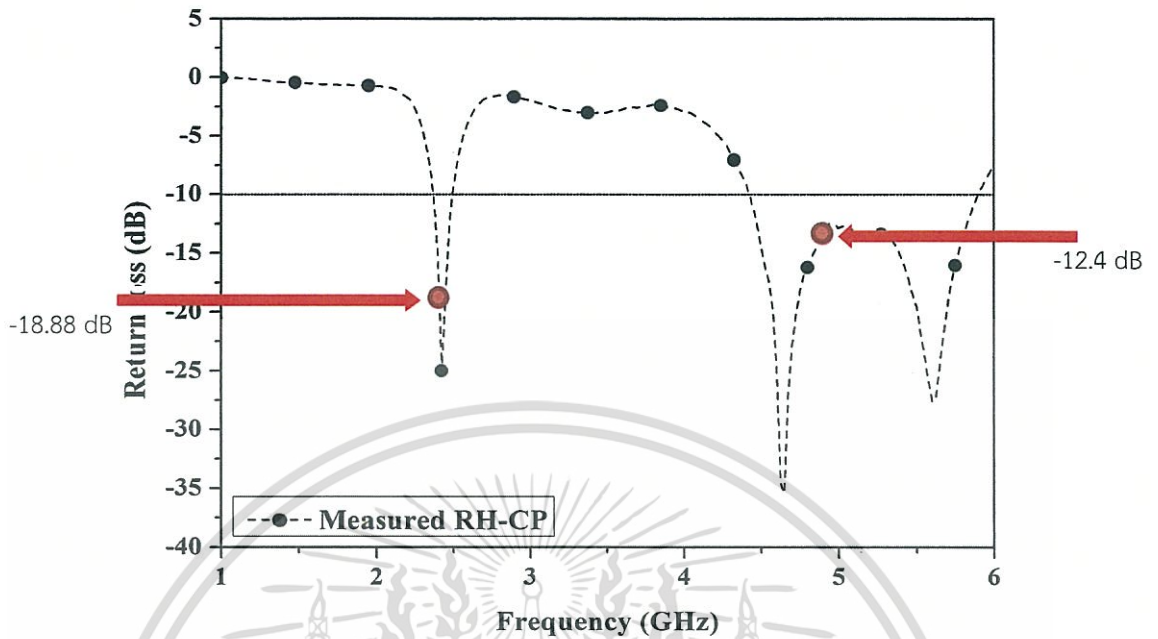


รูปที่ 5.13 ด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 5.13 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกาที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์ผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศดังกล่าว มีดังต่อไปนี้

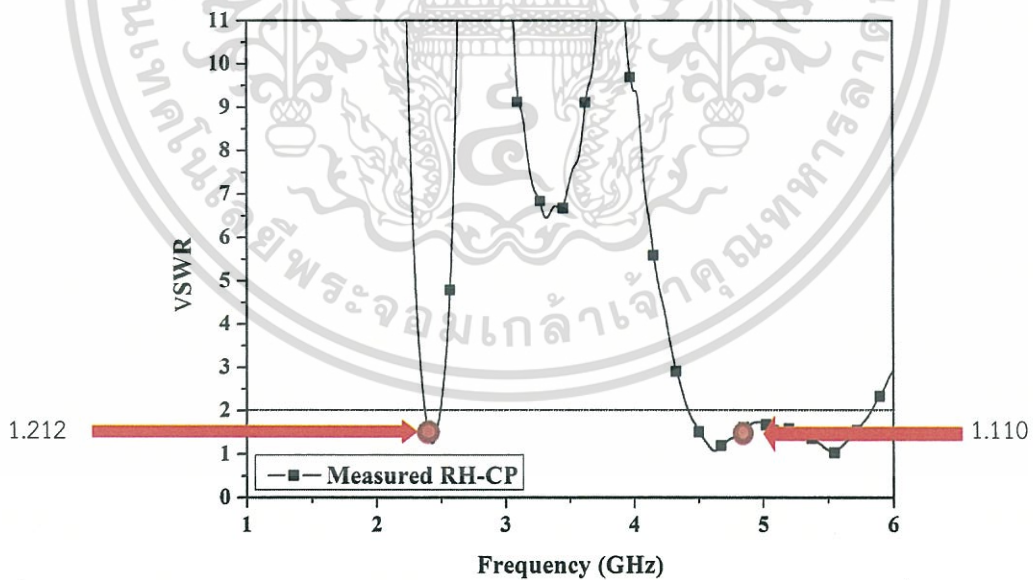
1) ผลการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับ

ค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} (dB) ในรูปที่ 5.14 เป็นผลจากการทดสอบสายอากาศที่แสดงให้เห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า S_{11} ประมาณ -18.88 dB และที่ความถี่ 4.95 GHz มีค่า S_{11} ประมาณ -12.4 dB จากช่วงความถี่ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ตำแหน่ง -10 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz มีแบนด์วิดท์ประมาณ 130 MHz และที่ความถี่ 4.95 GHz มีแบนด์วิดท์ประมาณ 1420 MHz



รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉาก สำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์หมุนตามเข็มนาฬิกา

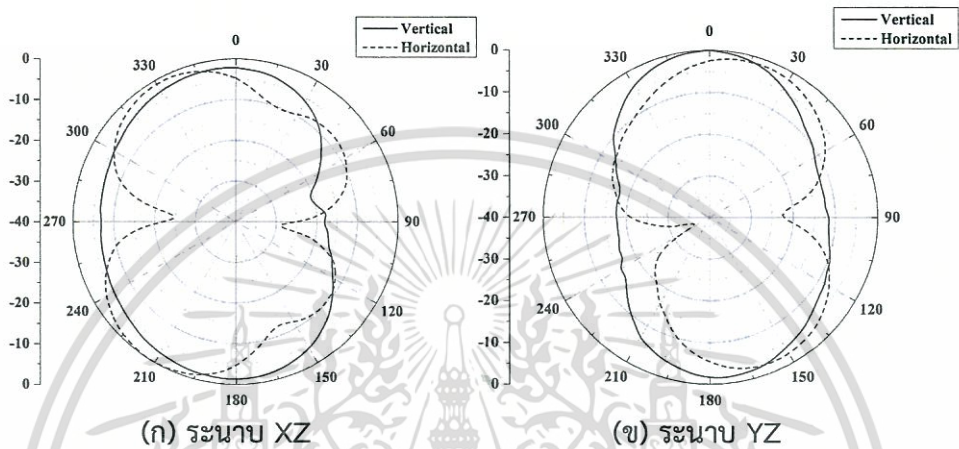
2) ผลการทดสอบ VSWR



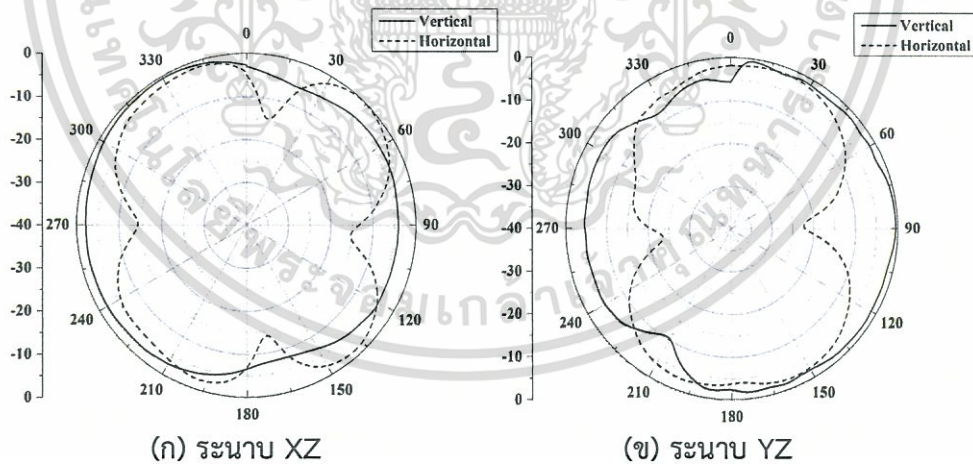
รูปที่ 5.15 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์หมุนตามเข็มนาฬิกา

ในรูปที่ 5.15 เป็นผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า VSWR ประมาณ 1.212 และที่ความถี่ 4.95 GHz มีค่า VSWR ประมาณ 1.110 ซึ่งเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสูญเสียย้อนกลับในรูปที่ 5.14

3) ผลการทดสอบการแผ่พลังงานสนามระยะไกล



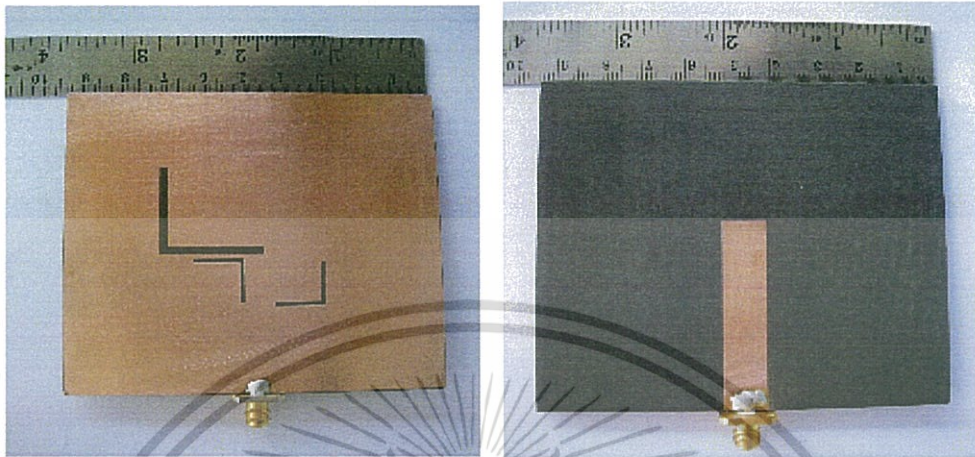
รูปที่ 5.16 การแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ XZ และ YZ ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริเซชันตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 5.17 การแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ XZ และ YZ ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริเซชันตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 4.95 GHz

รูปที่ 5.16 และรูปที่ 5.17 เป็นการแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริเซชันตามเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz และที่ความถี่ 4.95 GHz โดยมีความแรงสูงสุดของสัญญาณทั้งสองความถี่อยู่ในทิศทางของมุม 0 องศา

5.2.2 สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซเมชันแนฬิกา



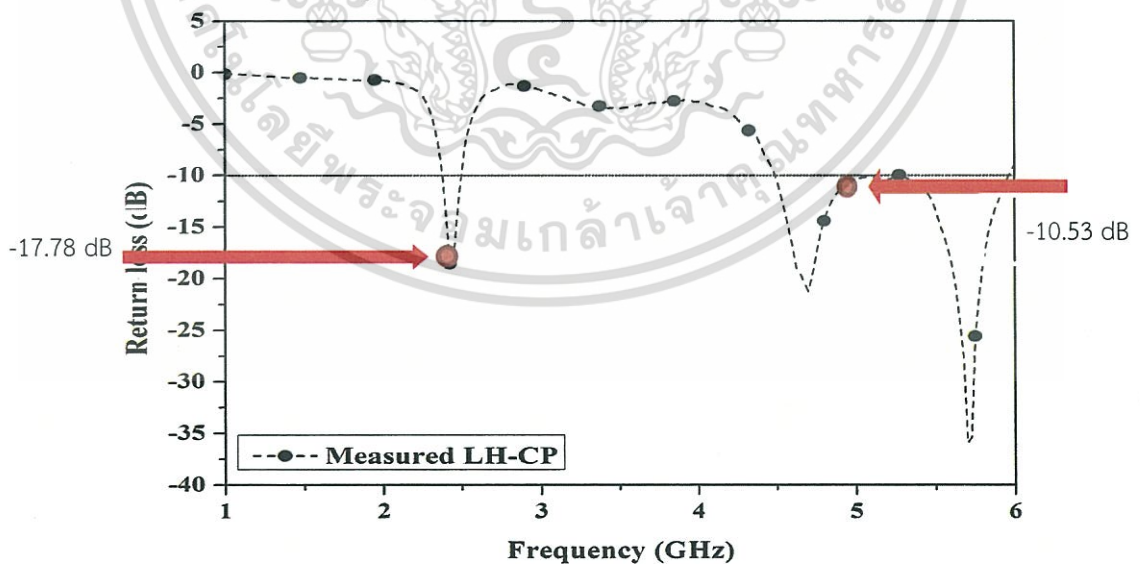
(ก)

(ข)

รูปที่ 5.18 ด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซเมชันแนฬิกา

จากรูปที่ 5.18 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซเมชันแนฬิกาที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์ผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศดังกล่าว มีดังต่อไปนี้

1) ผลการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับ



รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ของอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซเมชันแนฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 180 องศา เนื่องจากที่มุม 0 องศาเป็นมุมที่อยู่ตามโครงสร้างของด้านช่องเปิด และที่มุม 180 องศาจะเป็นมุมของด้านไมโครสตริปไลน์ทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด

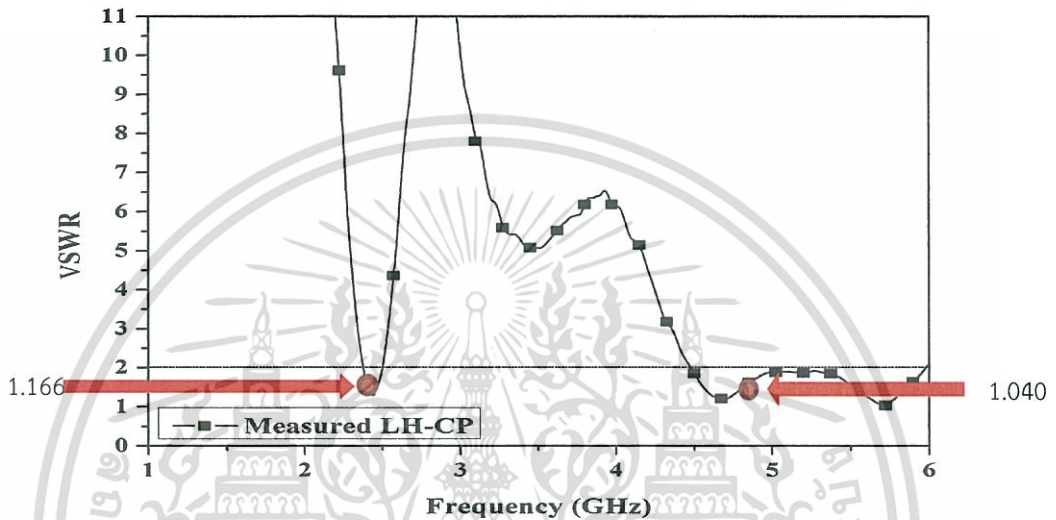
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉาก สำหรับสองความถี่สองโพลาริซชันตามเข็มนาฬิกา

พารามิเตอร์	จากการจำลอง		จากการทดสอบ	
	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	2.45	4.95	2.45
S_{11} (dB)	-35.15	-35.71	-18.88	-12.4
VSWR	1.036	1.033	1.212	1.110
แบนด์วิดท์ (MHz)	158 (2.373 GHz- 2.531GHz)	1080 (4.511 GHz- 5.591 GHz)	130 (2.36 GHz - 2.49 GHz)	1420 (4.41 GHz- 5.83 GHz)
อินพุตอิมพีแดนซ์ (Ω)	50.91-j1.485	51.64-j0.288	46.77-j10.31	31.23-j6.18
อัตราขยาย (dBi)	3.33	4.66	3.4	4.91
Axial Ratio	26.13	1.45	30.51	2.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.19 เป็นผลการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับจากการทดสอบสายอากาศแสดงที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า S_{11} ประมาณ -17.78 dB และที่ความถี่ 4.95 GHz มีค่า S_{11} ประมาณ -10.53 dB จากช่วงความถี่ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ตำแหน่ง -10 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz มีแบนด์วิดท์ประมาณ 135 MHz และที่ความถี่ 4.95 GHz มีแบนด์วิดท์ประมาณ 1505 MHz

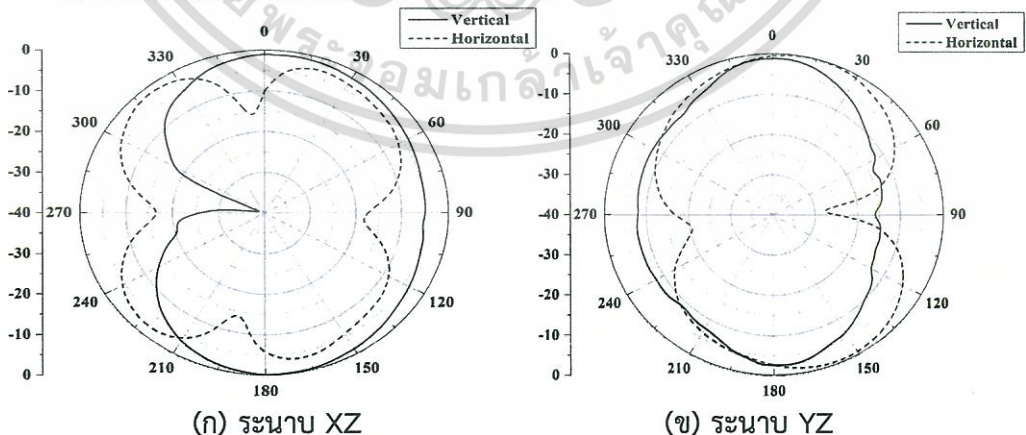
2) ผลการทดสอบ VSWR



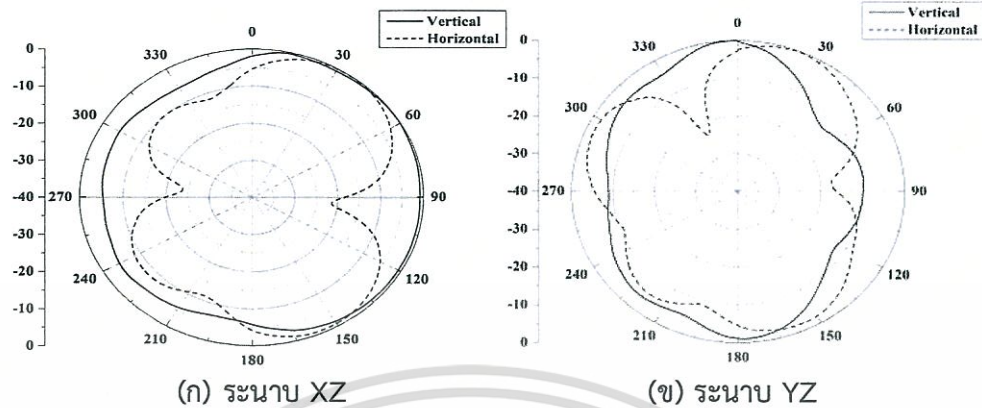
รูปที่ 5.20 VSWR ของสายอากาศไมโครสตริบช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์หมุนทวนเข็มนาฬิกา

ในรูปที่ 5.20 เป็นผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า VSWR ประมาณ 1.166 และที่ความถี่ 4.95 GHz มีค่า VSWR ประมาณ 1.040 ซึ่งเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสูญเสียย้อนกลับในรูปที่ 5.19

3) ผลการทดสอบค่าการแผ่พลังงานระยะไกล



รูปที่ 5.21 การแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ XZ และ YZ ของสายอากาศไมโครสตริบช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาไรซ์หมุนทวนเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 5.22 การแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ XZ และ YZ ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซชันหมุนวนเข็มนาฬิกาที่ความถี่ 4.95 GHz

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซชันหมุนวนเข็มนาฬิกา

พารามิเตอร์	การจำลอง		การทดสอบ	
ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	2.45	4.95	2.45	4.95
S_{11} (dB)	-44.07	-36.84	-17.87	-10.53
VSWR	1.013	1.029	1.166	1.040
แบนด์วิดท์ (MHz)	160 (2.421 GHz - 2.581GHz)	1095 (4.506 GHz - 5.601 GHz)	135 (2.375 GHz - 2.51GHz)	1505 (4.475 GHz - 5.98GHz)
อินพุตอิมพีแดนซ์ (Ω)	50.11-j0.617	51.43-j0.291	38.41-j7.23	30.93+j19.66
อัตราขยาย (dBi)	3.32	4.71	3.4	4.91
Axial Ratio	26.15	1.58	39.76	1.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซ ประกอบด้วยความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz และ 4.95 GHz และมีโพลาไรซ์สองแบบคือ โพลาริซแบบเชิงเส้นและโพลาริซแบบวงกลม โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz จะมีการแพร่กระจายโพลาริซแบบเส้นตรงและที่ความถี่เรโซแนนซ์ 4.95 GHz โพลาริซแบบวงกลมสามารถแบ่งสายอากาศออกเป็นสองแบบชนิดในทิศทางการหมุนของโพลาริซ คือ การแพร่กระจายแบบโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกา และการแพร่กระจายแบบโพลาริซหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ซึ่งจากผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกาได้ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.45 GHz และ 4.95 GHz และมีแบนด์วิดท์ของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอยู่ในช่วง 2.36 GHz - 2.49 GHz ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -18.88 dB และแบนด์วิดท์ของสายอากาศที่ความถี่ 4.95 GHz มีค่าอยู่ในช่วง 4.41GHz - 5.83 GHz ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -12.4 dB ส่วนสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซหมุนทวนเข็มนาฬิกาได้ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.45 GHz และ 4.95 GHz และมีแบนด์วิดท์ของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอยู่ในช่วง 2.375 GHz - 2.51 GHz ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -17.87 dB และแบนด์วิดท์ของสายอากาศที่ความถี่ 4.95 GHz มีค่าอยู่ในช่วง 4.475 GHz - 5.98 GHz ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -10.53 dB ดังนั้นจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซมีเรโซแนนซ์ที่ครอบคลุมแถบความถี่ใช้งานการสื่อสารไร้สาย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉาก โดยจะประกอบไปด้วยสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากหนึ่งความถี่ที่มีรูปแบบโพลาริซวงกลม และสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซ ในส่วนของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากหนึ่งความถี่ที่มีรูปแบบโพลาริซวงกลมในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกา มีจุดเด่นคือ มีรูปร่าง และโครงสร้างไม่ซับซ้อน โดยสายอากาศจะถูกออกแบบให้สามารถครอบคลุมการใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายที่ความถี่ 2.45 GHz ส่วนรูปแบบการเกิดโพลาริซทั้งทิศทางตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกาจะใช้การปรับเปลี่ยนทิศทางการจัดวางช่องเปิด ทั้ง 2 ช่องเปิด ในการปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์จะใช้การปรับขนาด และตำแหน่งของช่องเปิด อยู่บนระนาบกราวด์เดียวกันกับวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 4.5 และมีความหนา 1.6 มิลลิเมตร ส่วนสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซได้เพิ่มช่องเปิด 1 ช่องเปิด วางอยู่บนระนาบกราวด์เดียวกัน โดยเปลี่ยนวัสดุฐานเป็น RT/duroid 5880 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 2.2 และมีความหนา 1.575 มิลลิเมตร เนื่องจากสายอากาศดังกล่าวจะถูกออกแบบให้ใช้งานในแถบความถี่ที่สูงมากขึ้น จึงต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติในการใช้งานที่ความถี่สูงได้ดีกว่า โดยสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซ จะออกแบบให้ใช้งานได้ 2 แถบความถี่ ได้แก่ 2.45 GHz และ 4.95 GHz ซึ่งที่ความถี่ 2.45 จะใช้ช่องเปิดจำนวน 1 ช่องเปิด ทำให้เกิดรูปแบบโพลาริซแบบเชิงเส้นที่มีความชันเอียง +/- 45 องศา และที่ความถี่ 4.95 GHz จะใช้ช่องเปิดจำนวน 2 ช่องเปิด ทำให้เกิดรูปแบบโพลาริซแบบวงกลม อีกทั้งยังสามารถกำหนดทิศทางการหมุนได้ 2 รูปแบบ กล่าวคือโพลาริซแบบวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และโพลาริซแบบวงกลมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งช่องเปิดทั้ง 3 ช่องเปิดของสายอากาศชนิดนี้จะวางอยู่บนระนาบกราวด์เดียวกัน จุดเด่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซคือ มีรูปร่าง และโครงสร้างไม่ซับซ้อน และสามารถออกแบบให้สามารถตอบสนองความถี่ และรูปแบบโพลาริซได้เป็นอิสระต่อกันทั้งหมด ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอทั้ง 2 ชนิด นั้นสามารถออกแบบ จำลองแบบโดยใช้หลักการของวิธีโมเมนต์ สร้ง และทดสอบผลได้ความถี่ที่ต้องการและมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมกับแถบความถี่ใช้งานตามมาตรฐาน WLAN และ WIMAX

6.1 สรุปผลการออกแบบและวิเคราะห์

สำหรับการออกแบบสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้เน้นการออกแบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สายในแถบความถี่ 2.45 GHz ถึง 4.95 GHz พารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดให้ได้มาซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ที่ต้องการ คือ ความยาวรวมของ A+B โดยจะต้องออกแบบให้มีความยาวประมาณ $0.5 \lambda_g$ ของความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ รวมทั้งกำหนดให้ขนาดความยาวของ A = B เช่นกัน โดยที่พารามิเตอร์ A และ B จะสอดคล้องกับสมการในการออกแบบหาความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศดังสมการที่ 6.1

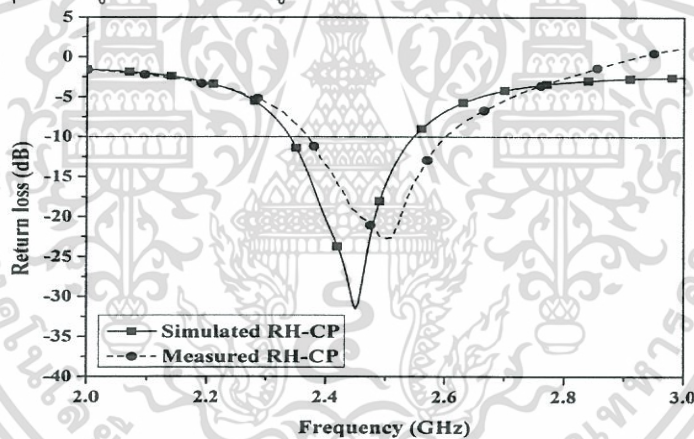
$$f_r = \frac{0.5c}{(A+B)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (6.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

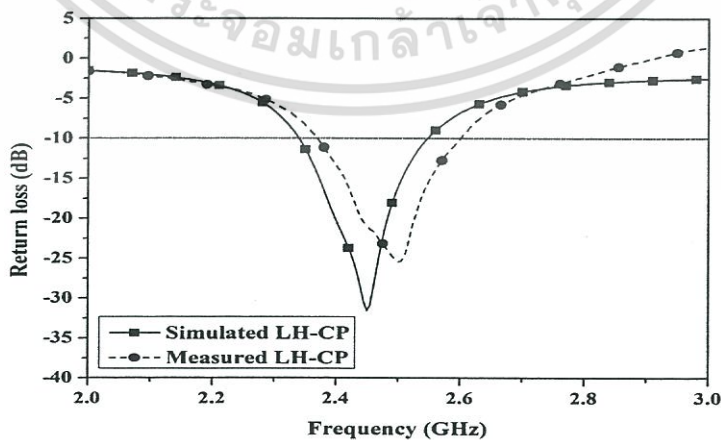
ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีความถี่ต่างๆ

ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	ความกว้าง S (λ_g)	ระยะ r (mm.)	ระยะ Lm (λ_g)
2.4-2.4835	0.008-0.012	2-3	0.2 - 0.4
2.5-2.7	0.2-0.35	2-4.5	
3.4-3.6	0.02-0.025	1.5-2.5	0.1 - 0.2
4.9-5.1	0.005-0.02	2-3	
5.15-5.35	0.01-0.025	0.5-2.5	

จากตารางที่ 6.1 เป็นการประมาณค่าเริ่มต้นในการหาความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก ซึ่งสามารถทำให้การออกแบบสายอากาศง่ายขึ้น สำหรับพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ได้้นำค่าที่เหมาะสมมาจากการวิเคราะห์และจำลองด้วยวิธีการโมเมนต์ ในการศึกษานี้จะกำหนดให้ช่องเปิดมุมฉาก ถูกออกแบบให้อยู่บนระนาบกราวด์ที่มีขนาดอนันต์



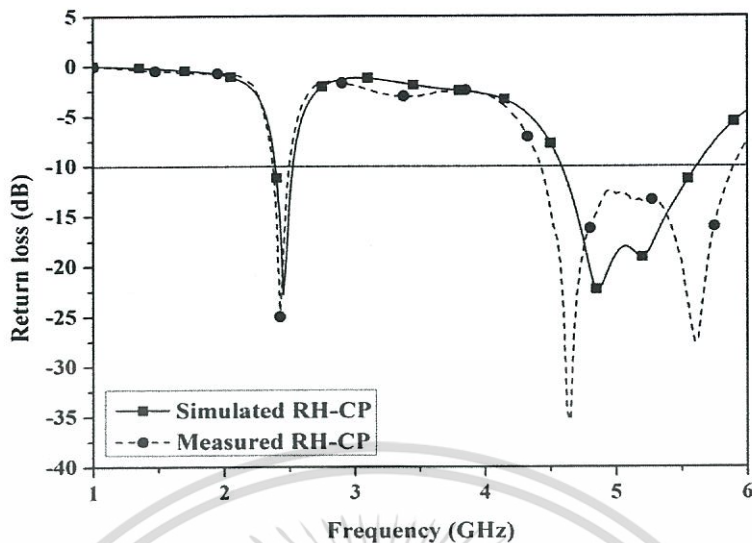
(ก) ทิศทางตามเข็มนาฬิกา



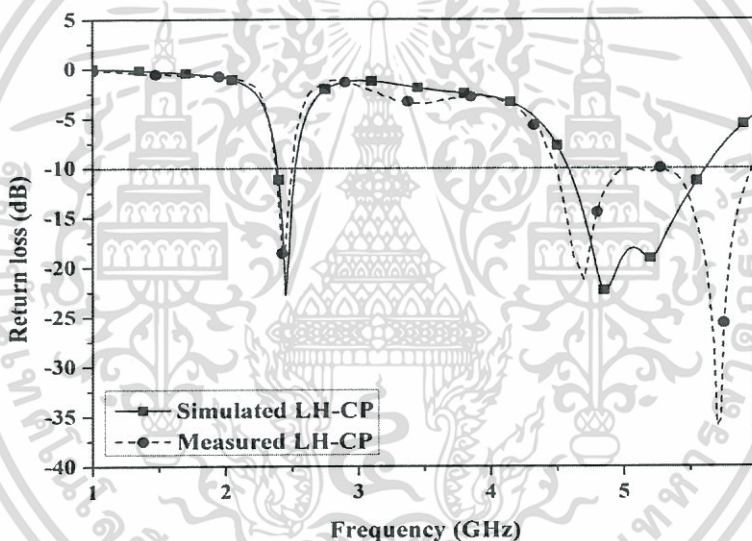
(ข) ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดและการจำลองของสายอากาศไมโคร

สตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาไรซ์แบบวงกลม ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ทิศทางตามเข็มนาฬิกา



(ข) ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดและการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดและการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปมุมฉากในรูปแบบโพลาริซแบบวงกลมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกา และจากรูปที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดและการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซ จากผลการวัดด้วยการทดสอบสายอากาศจากโครงสร้างจริงนั้นพิสูจน์ให้เห็นได้ว่ามีลักษณะ

ใกล้เคียงกับผลการจำลองสายอากาศ ผลการวัดของทั้งสองรูปจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ และมีแบนด์วิดท์ที่ครอบคลุมแถบความถี่ WLAN และ WiMAX

สำหรับการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับสองความถี่สองโพลาริซจะมีลักษณะในการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง รวมทั้งสายอากาศสามารถที่จะแผ่พลังงานได้ทั้งโพลาริซแบบแนวตั้ง (E_θ) และโพลาริซแบบแนวนอน (E_ϕ) ทั้งระนาบ E และระนาบ H สายอากาศแบบนี้มีการแผ่พลังสูงสุดที่มุม 0 องศา และ มุม 180 องศา ซึ่งเป็นมุมของช่องเปิดและมุมของสายส่งไมโครสตริป ตามลำดับ รวมทั้งมีอัตราขยายในแต่ละความถี่ที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารไร้สาย

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากการนำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสองโพลาริซและสองความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สายในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถนำไปประยุกต์สำหรับการออกแบบสายอากาศสองความถี่ในแถบความถี่อื่นๆ และยังสามารถออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้รูปแบบโพลาริซแบบเชิงเส้น และรูปแบบโพลาริซวงกลมทิศทางตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกาอย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกันได้ รวมทั้งสามารถพัฒนาวิธีการสร้างสายอากาศ โดยเพิ่มความแม่นยำในการกำหนดขนาดของช่องเปิด และจุดเชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณ เพื่อปรับปรุงแมตซ์อิมพีแดนซ์ให้ดีขึ้น จะทำให้คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] A. G. Alhaddad, R. A. Abd-Alhameed, D. Zhou¹, C. H. See, E. A. Elkhazmi, and P. S. Excell, "Compact Dual-band Balanced Handset Antenna for WLAN Application," *Piers Online*, vol. 6, no. 1, pp.11-15, 2010.
- [2] M.Y. M. Yousef, A. E. Gaafar, and A. A. A. Elaziz, "Dual Band Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna for Wi-Fi Applications," 2010 Fourth International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies., vol. 54, no.11, pp. 3367-3373, November. 2010.
- [3] H. Zhang, Y. Q. Li, X. Chen, Y.Q. Fu, and N.C. Yuan, "Design of Circular/Dual Frequency Linear Polarization Antennas Based on the Anisotropic Complementary Split Ring Resonator," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 10, pp.3352-3355, October 2009.
- [4] M. Le, V. Chandrasekar, S. Lim, "Microphysical Retrievals of Dual Polarization and Dual Frequency Ground Radar for GPM Ground Validation," *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* , pp. 2349 – 2352, January 2010.
- [5] Y. Li, Z. Zhang, W. Chen, Z. Feng, and M. F. Iskander, "A Dual-Polarization Slot Antenna Using a Compact CPW Feeding Structure," *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 191- 194, 2010.
- [6] A. Falahati, R. M. Edwards, and M. N. Jahromi, "Dual Band-Notch CPW-Ground-Fed UWB Antenna By Fractal Binary Tree Slot," *Fifth International Conference on Wireless and Mobile Communications*, pp. 385-390, 2009.
- [7] X. Bao and M. J. Ammann, "Dual-Frequency Dual-Sense Circularly-Polarized Slot Antenna Fed by Microstrip Line," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 3, pp. 645-649, March 2008.
- [8] D. H. Lee, J. H. Jang, Y. T. Im, W. S. Park, "Suspended Stripline over Mushroom-Like Shorted Metallic Patches and Its Application to The Dual-Frequency Dual-Polarization Antenna," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* , pp. 3001 – 3004, 2006.
- [9] Y. Yoshimura, "A Microstrip Line Slot Antenna," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques.*, vol. MTT-20, pp. 760-762, 1972.
- [10] A. M. Abdin, "Design of Dual-polarization Stacked Arrays for Wireless Communications," *PIERS Online*, vol.4, no. 4, 2008.
- [11] C.A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design," 3rd ed. New York, JohnWiley&Sons. 2008.

- [12] J.D. Kraus, and R.J. Marhefka, "Antenna for All Applications." 3rd ed. United States of America, Mcgraw-Hill Higher Edu., 2001.
- [13] J.S. King, "An IEEE 802.11 Wireless LAN Security White Paper," University of California. 2001
- [14] Blackbox Network Service, "Whitepaper Wireless Networking," October 2011.
- [15] Zeland Software, Inc., IE3D, NewYork.
- [16] A. Pomsathit, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichai, V. Chutchavong, T.Wakabayashi, "Circularly Polarized Right Angle Slot Antennas for WLAN of IEEE 802.11b/g" International Symposium on Communications and Information Technologies, Vientiane, Lao PDR, 21-23 October 2008.
- [17] A. Pomsathit, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichai, Paitoon Raklua and T. Wakabayashi, "Design of Right Angle Slot Antenna for Dual Band and Dual Polarized with Wireless Network" International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeonggi-do, Korea, October 27-30, 2010.
- [18] ไพฑูรย์ รักเหลือ. "การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดโดยวิธี FDTD." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [19] กฤตพล นาคเจริญ. "การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสองความถี่." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [20] P. Raklua, N. Anantrasirichai, K. Janchitrapongveg, and T. Wakabayashi, "Analysis of Right Angle Microstrip Slot Antenna," Trends and Developments in Converging Technology, Melbourne, Australia, November 21-24, 2005.
- [21] P. Raklua, V. Pirajanchai, N. Anantrasirichai, K. Janchitrapongveg, and T. Wakabayashi, "Characteristics of Right Angle Microstrip Slot Antenna For Dual Frequency," The International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, Hongkong, China, December 13-16, 2005.
- [22] P. Raklua, J. Nakasuwan, N. Anantrasirichai, K. Janchitrapongveg, and T. Wakabayashi, "Right Angle Microstrip Slot Antenna for X-band," ECTI-CON 2006, Ubon Ratchathani, Thailand, May 10-13, 2006.
- [23] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, Microstrip Antenna Design Handbook, London, Altech House Inc, 2001.
- [24] P. Raklua, N. Anantrasirichai, K. Janchitrapongveg, and T. Wakabayashi, "Multiband Microstrip-Fed Right Angle Slot Antenna Design for Wireless Communication Systems," ETRI Journal., vol.31, no. 3, pp. 271-281, June 2009.



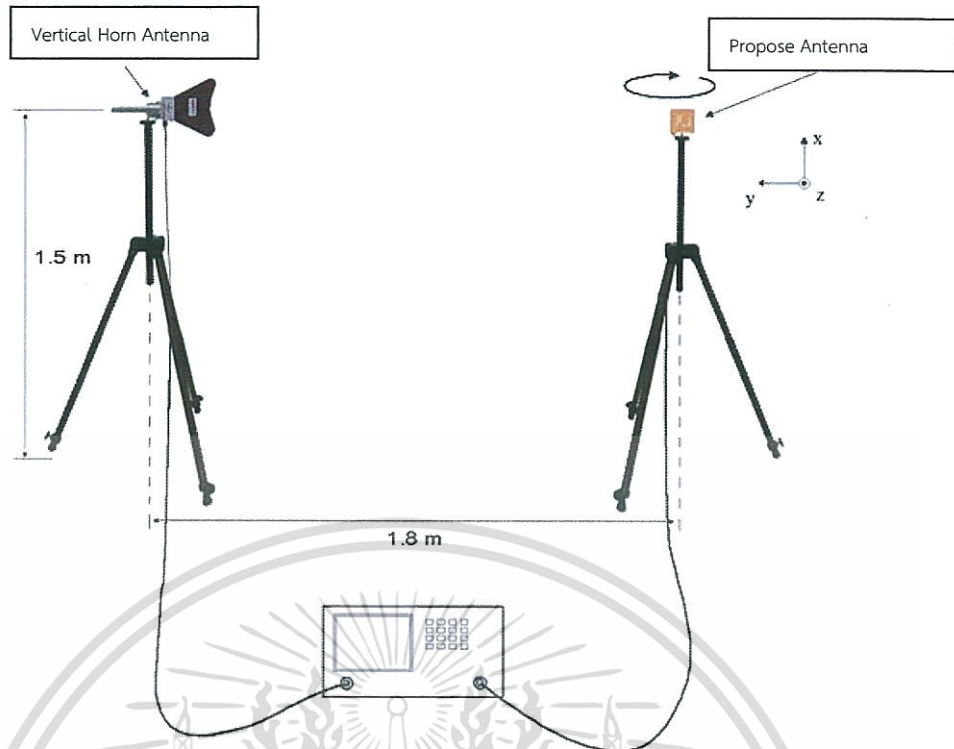
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

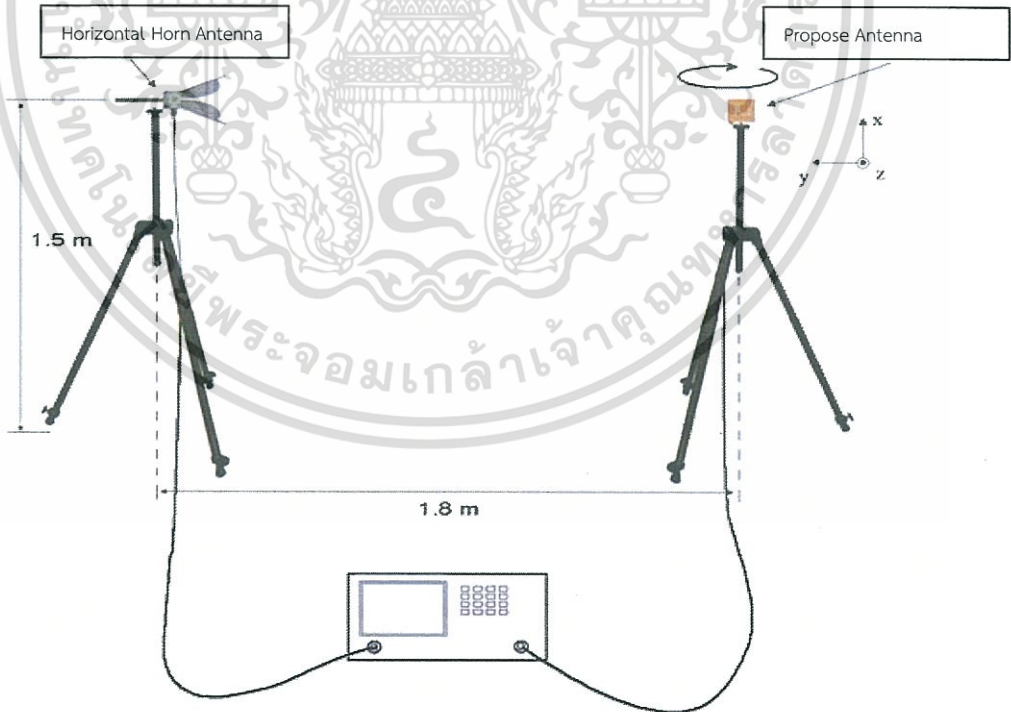


ภาคผนวก ก.
การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบ
มุมฉากสำหรับสองโพลาริซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่มี โพลาริซแบบแนวตั้ง (E_{θ})



รูปที่ ก.2 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของสายอากาศที่มี โพลาริซแบบแนวนอน (E_{ϕ})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลในระนาบ xz (ระนาบ E)



รูปที่ ก.4 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลในระนาบ yz (ระนาบ H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [1] A. Pomsathit, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichai, V. Chutchavong, T.Wakabayashi, "Circularly Polarized Right Angle Slot Antennas for WLAN of IEEE 802.11b/g" International Symposium on Communications and Information Technologies, ISCIT, Vientiane, Lao PDR, 21-23 October. 2008.
- [2] A. Pomsathit, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichai, P. Rakluea and T. Wakabayashi, "Design of Right Angle Slot Antenna for Dual Band and Dual Polarized with Wireless Network" International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeonggi-do, Korea, October. 27-30, 2010.
- [3] A. Pomsathit, P. Rakluea, N. Anantrasirichai, C. Benjangkprasert, and T. Wakabayashi, "The Design of Linear and Circular Polarization for Dual Band Microstrip Slot Antenna," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Japan, vol.2, no. 9, March, 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอรรถพล ป้อมสถิตย์
วัน เดือน ปีเกิด	24 มกราคม พ.ศ. 2521
ที่อยู่	69/307 หมู่ 12 ถนนพุทธมณฑล สาย 3 แขวงศาลาธรรมสพน์ เขตทวีวัฒนา กรุงเทพฯ 10170
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2543
ปริญญาโท	วศ. ม. สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2548
ประสบการณ์การทำงาน	รับราชการ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ตำแหน่งอาจารย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้