สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5.8 GHz

PRINTED DIAMOND SLOT ANTENNA FED BY BENT MICROSTRIP LINE RADIATING CIRCULAR POLARIZATION FOR 5.8 GHz RFID READER

T123054

เรวัฒน์ เสนาทอง
REWAT SENATHONG

วพ.
ร768ส
2555
เลขหมู่ 123054
เลขทะเบียน
วัน,เดือน,ปี 18 ต.ค. 2555
b 12470067
i

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2555
KMITL-2012-EN-M-010-053

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRINTED DIAMOND SLOT ANTENNA FED BY BENT MICROSTRIP LINE RADIATING CIRCULAR POLARIZATION FOR 5.8 GHz RFID READER

REWAT SENATHONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012

KMITL-2012-EN-M-010-053

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2012
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5.8 GHz

Thesis Title Printed Diamond Slot Antenna Fed by Bent Microstrip Line Radiating Circular Polarization for 5.8 GHz RFID Reader

นักศึกษา นายเรวัฒน์ เสนาทอง

รหัสประจำตัว 52611227

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-010-053

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.โมไนย	ไกรฤกษ์	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาคีพงษ์	
ศ.ดร.ประยุทธ	อัครเอกฒาลิน	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
รศ.ดร.ชูวงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5.8 GHz
นักศึกษา	นายเรวัฒน์ เสนาทอง
รหัสประจำตัว	52611227
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับเครื่องอ่านระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สายอากาศที่นำเสนอประกอบโครงสร้างสองชั้น คือ ตัวแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมเจาะร่องรูปเพชร และตัวสะท้อนคลื่น สายอากาศป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ จากผลการทดสอบพบว่าที่ความถี่กลางมี $|S_{11}|$ เท่ากับ -30 dB ซึ่งมีช่วงกว้างความถี่ 12.58% ครอบคลุมย่านความถี่ 5.45 GHz ถึง 6.18 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว มีอัตราขยายตลอดย่านความถี่ใช้งานมาก 7 dBic มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ *xz* เท่ากับ 42.3 องศา และระนาบ *yz* เท่ากับ 37.1 องศา มีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังเท่ากับ 40 dB มีอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB คิดเป็น 9.8% ครอบคลุมย่านความถี่ 5.43 GHz ถึง 6 GHz มีอัตราส่วนแกนที่ทิศทางด้านหน้าของสายอากาศเท่ากับ 1.54 dB ดังนั้นสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Printed Diamond Slot Antenna Fed by Bent Microstrip Line Radiating Circular Polarization for 5.8 GHz RFID Reader
Student	Mr. Rewat Senathong
Student ID.	52611227
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This thesis presents the design of printed diamond slot antenna fed by bent microstrip line radiating circular polarization for 5.8 GHz RFID reader. The antenna consists of 2 layers i.e., the radiating printed diamond slot and a reflector that is fed by bent microstrip line. From the measured result, the $|S_{11}|$ at the center frequency is -30 dB. This antenna can operate from 5.45 GHz to 6.18 GHz. A uni-directional pattern with the gain of 7 dBic can be achieved by the proposed antenna. The half-power beamwidth in the *xz* plane and *yz* plane are 42.3 degrees and 37.1 degrees, respectively. The front-to-back ratio is 40 dB. The axial ratio bandwidth is 9.8% that covers 5.43 GHz to 6 GHz. The axial ratio is 1.54 dB in the boresight direction. Therefore, the proposed antenna is suitable for the microwave band of 5.8 GHz RFID applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากรองศาสตราจารย์ ดร. ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ เป็นผู้ให้โอกาสในด้านการศึกษา เคี่ยวเข็ญอบรมสั่งสอน ทั้งในเวลาและนอกเวลาราชการ นอกจากนี้ยังให้หลักการการดำเนินชีวิตได้อย่างมีความสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมผล โกศัลวิตร์ ที่ได้ช่วยในด้านวิชาความรู้ แนะนำ ตรวจสอบ ที่มีประโยชน์ในงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ทุก ๆ ท่าน ตลอดช่วงชีวิตการศึกษาของข้าพเจ้าที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ สมาชิกห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกท่านสำหรับคำแนะนำ กำลังใจ และข้อคิดดีๆ ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา ขอขอบคุณ คุณธัชชัย พุ่มพวง ผู้ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์และทดสอบ ขอขอบคุณ คุณสิทธิชัย เด่นตรี คุณประชา โอษคลัง คุณบัญชา เหลือแดง คุณเบญจพร ศรีเจริญ สำหรับกำลังใจที่ดี ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัย จงดลบันดาลให้ครอบครัวของข้าพเจ้ามี มารดา บิดา พี่ๆ และน้อง ที่เป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุนในทุกสิ่ง ตลอดจนคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ได้มีความสุขพิพัฒนมงคล สมบูรณ์พูนผล ตลอดกาลนานเทอญ

เรวัฒน์ เสนาทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญรูปภาพ VII
สารบัญตาราง XI
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย 1
1.2 ความสำคัญของงานวิจัย 3
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์ 4
1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ 6
2.1 บทนำ 6
2.3 รูปแบบการแพร่กระจาย [Radiation Pattern] 11
2.3.1 Omni-Directional 12
2.3.2 Bi-Direxional 12
2.4 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 13
2.4.1 แท็ก 15
2.4.2 เครื่องอ่านข้อมูล 15
2.5 งานวิจัยที่มีมาก่อน 16
2.5.1 สายอากาศไมโครสตริปของ J.Y. Jan และ J.W. Su [8] 16
2.5.2 สายอากาศไมโครสตริปของ J.Y. Sze และ K.L. Wong [9] 17
2.5.3 สายอากาศไมโครสตริปของ J.S. Row และ S.W. Wu [10] 18
2.5.4 สายอากาศไมโครสตริปของ W.L. Chen, G.M. Wang และ C.X. Zhang [11] 19
2.5.5 สายอากาศไมโครสตริปของ G. Beigmohammadi, C. Ghobadi, J. Nourinia และ M. Ojaroudi [12] 20
2.5.6 สายอากาศไมโครสตริปของ X. Bao และ M.J. Ammarn [13] 21
2.5.7 สายอากาศไมโครสตริปของ J.Y. Sze และ C.C. Chang [14] 21
2.5.8 สายอากาศไมโครสตริปของ Y.J. Sung [15] 22
2.5.9 สายอากาศไมโครสตริปของ S.H. Yeung, K.F.Man และ W.S. Chan [16] 23
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป 24
2.6.1 การออกแบบเส้นไมโครสตริปและสายอากาศไมโครสตริป 24
2.6.2 ลักษณะการป้อนสัญญาณ 26
2.7 สรุป 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การวิเคราะห์สายอากาศ 28
3.1 บทนำ 28
3.2 สายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป 28
3.2.1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 28
3.2.2 การปรับอิมพีแดนซ์ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน 29
3.2.2.1 เมื่อปรับความยาวเส้นไมโครสตริป (L_f) 31
3.2.2.2 ปรับความกว้างร่องสี่เหลี่ยมจตุรัสแผ่นพิมพ์ (W_s) และความยาวร่องสี่เหลี่ยมจตุรัสแผ่นพิมพ์ (L_s) ของร่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนระนาบกราวนด์ 32
3.2.2.3 ปรับมุมหมุนร่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนระนาบกราวนด์ (α) 34
3.2.2.4 ปรับระยะตัดมุมของร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์ (L_c) 35
3.2.2.5 ปรับมุมหมุนเส้นไมโครสตริป (β) 40
3.2.2.6 ปรับความกว้างและความยาวของตัวสะท้อน (W_r, L_r) 44
3.2.2.7 ปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (h_d) 49
3.2.2.7 การปรับโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายให้เป็นแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา 54
3.3.2 อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ 54
3.3.3 อัตราขยายของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ 55
3.3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป 56
3.4 บทสรุป 57
บทที่ 4 การทดสอบสายอากาศ 58
4.1 บทนำ 58
4.2 สายอากาศต้นแบบ 58
4.3 การทดสอบสายอากาศ 59
4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ 61
4.4.1 ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป 62
4.4.2 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป 62
4.4.3 การทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ 66
4.4.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอด้วยการใช้การหมุนสายอากาศไดโพล 68
4.4.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ 68
4.5 บทสรุป 70
บทที่ 5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ 71
5.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม 71
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา 72
เอกสารอ้างอิง 73
ประวัติผู้เขียน 75
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 วิธีสื่อสารข้อมูลระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก
(ก) วิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในย่านความถี่ LF และ HF
(ข) วิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในย่านความถี่ UHF และ Microwave 3

2.1 การหมุนของคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าและวงรีของการโพลาไรซ์ที่ z=0
(ก) การหมุนของคลื่น และ (ข) วงรีของการโพลาไรซ์ 6

2.2 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง 7

2.3 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน 7

2.4 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนขวา (Right-Handed CP) 8

2.5 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนซ้าย (Left-Handed CP) 8

2.6 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนขวา (Right-Handed EP) 9

2.7 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนซ้าย (Left-Handed EP) 10

2.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (ก) ระนาบ *xz* (ก) ระนาบ *yz* 12

2.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (ก) ระนาบ *xz* (ก) ระนาบ *yz* 12

2.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (ก) ระนาบ *xz* (ก) ระนาบ *yz* 13

2.11 โครงสร้างทั่วไปของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 14

2.12 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล 15

2:13 โครงสร้างของการขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศด้วยการหมุนร่องกว้างสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ 16

2.14 การขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศด้วยการป้อนด้วยไมโครสตริปบนร่องกว้างสี่เหลี่ยม
แผ่นพิมพ์ 17

2.15 โครงสร้างสายอากาศร่องกว้างโหลดด้วยแผ่นระนาบปรสิตวงกลมแบบโพลาไรซ์วงกลม 18

2.16 การขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศด้วยการป้อนด้วยไมโครสตริป บนร่องกว้างแฟร็กทัลแผ่น
พิมพ์ 19

2.17 สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับ WLAN/WiMAX 20

2.18 สายอากาศร่องป้อนด้วยไมโครสตริปแบบสองโพลาไรซ์สองความถี่ 21

2.19 สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมด้วยเส้นบางรูปตัวแอลคู่ที่มีโพลาไรซ์แบบวงกลม 22

2.20 สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปรูปตัววายไม่สมมาตรที่มี
โพลาไรซ์วงกลม 23

2.21 การปรับปรุงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศแบบร่องหลายส่วนประกอบที่มีรูปร่างกลมที่มีโพลาไรซ์
วงกลม 24

2.22 โครงสร้างไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 25

3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริป (ข) ชั้นระนาบกราวนด์
และ (ค) ภาพด้านล่าง 29

3.2 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริป และ (ข) ชั้นระนาบกราวนด์ 32

3.3 แสดงค่า $|S_{11}|$ และค่าอัตราส่วนแกน เมื่อปรับค่าความยาวเส้นไมโครสตริป (L_f) 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.4 โครงสร้างของสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมจตุรัสแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริป และ (ข) ชั้นระนาบกราวนด์ 33

3.5 แสดงค่า $|S_{11}|$ และค่าอัตราส่วนแกน เมื่อปรับค่าความกว้างของร่องรูปสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ (W_s) และความยาวของร่องรูปสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ (L_s) 34

3.6 โครงสร้างของสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริป และ (ข) ชั้นระนาบกราวนด์ 36

3.7 แสดงค่า $|S_{11}|$ และค่าอัตราส่วนแกน เมื่อปรับมุมหมุนร่องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบน 36

3.8 แสดงโครงสร้างของสายอากาศสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริป และ (ข) ชั้นระนาบกราวนด์ 37

3.9 แสดงค่า $|S_{11}|$ และค่าอัตราส่วนแกน เมื่อปรับค่าระยะตัดมุมของร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์ (L_c) 38

3.10 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศ ร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่เวลา (t) ต่างๆ (ก) $t=0$ (ข) $t=\frac{T}{8}$ (ค) $t=\frac{T}{4}$ และ (ง) $t=\frac{3T}{8}$ 39

3.10 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศ ร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่เวลา (t) ต่างๆ (จ) $t=\frac{T}{2}$ (ฉ) $t=\frac{5T}{8}$ (ช) $t=\frac{3T}{4}$ และ (ซ) $t=\frac{7T}{8}$ (ต่อ) 40

3.11 แสดงโครงสร้างของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริป และ (ข) ชั้นระนาบกราวนด์ 42

3.12 แสดงค่า $|S_{11}|$ และค่าอัตราส่วนแกน เมื่อปรับมุมหมุนเส้นไมโครสตริป (α_{slit}) 42

3.13 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศ ร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่เวลา (t) ต่าง ๆ (ก) $t=0$ (ข) $t=\frac{T}{8}$ (ค) $t=\frac{T}{4}$ และ (ง) $t=\frac{3T}{8}$ 43

3.13 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศ ร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่เวลา (t) ต่างๆ (จ) $t=\frac{T}{2}$ (ฉ) $t=\frac{5T}{8}$ (ช) $t=\frac{3T}{4}$ และ (ซ) $t=\frac{7T}{8}$ (ต่อ) 44

3.14 แสดงโครงสร้างสายอากาศสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (ก) ด้านหน้า และ (ข) ด้านล่าง 47

3.15 แสดงค่า $|S_{11}|$ และค่าอัตราส่วนแกน เมื่อปรับความกว้างและความยาวของตัวสะท้อน (W_r, L_r) 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.16 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นวงกลมที่เวลา (t) ต่าง ๆ (ก) $t=0$ (ข) $t=\frac{T}{8}$ (ค) $t=\frac{T}{4}$ และ (ง) $t=\frac{3T}{8}$ 48

3.16 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นวงกลมที่เวลา (t) ต่าง ๆ (จ) $t=\frac{T}{2}$ (ฉ) $t=\frac{5T}{8}$ (ช) $t=\frac{3T}{4}$ และ (ซ) $t=\frac{7T}{8}$ (ต่อ) 49

3.17 แสดงค่า $|S_{11}|$ และ อัตราส่วนแกน ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (h_d) 51

3.18 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเวลา (t) ต่าง ๆ (ก) $t=0$ (ข) $t=\frac{T}{8}$ (ค) $t=\frac{T}{4}$ และ (ง) $t=\frac{3T}{8}$ 52

3.18 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเวลา (t) ต่าง ๆ (จ) $t=\frac{T}{2}$ (ฉ) $t=\frac{5T}{8}$ (ช) $t=\frac{3T}{4}$ และ (ซ) $t=\frac{7T}{8}$ (ต่อ).....53

3.19 ค่าอัตราส่วนแกนและค่า $|S_{11}|$ ของการจำลองสายอากาศสายอากาศ ร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป 55

3.20 ค่าอัตราขยายของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป 55

3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่ความ (ก) ระนาบ xz และ (ข) ระนาบ yz 56

4.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ (ก) ด้านหน้า 58

4.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ (ข) ด้านเอียง (ต่อ).....59

4.2 เปรียบเทียบผลของค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง 62

4.3 เปรียบเทียบผลของค่าอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง 63

4.4 เปรียบเทียบผลของค่าอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง (ก) ในแกนความถี่....63

4.4 เปรียบเทียบผลของค่าอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและการจำลองในระนาบ xz (ข) ความถี่ 5.725 GHz (ค) ความถี่ 5.800 GHz และ (ง) ความถี่ 5.875 GHz.....64

4.4 เปรียบเทียบผลของค่าอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและการจำลองในระนาบ yz (จ) ความถี่ 5.725 GHz (ฉ) ความถี่ 5.800 GHz และ (ช) ความถี่ 5.875 GHz (ต่อ).....65

4.6 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและการจำลองในระนาบ xz และระนาบ yz (ก) ความถี่ 5.725 GHz 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.6 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง ในระนาบ *xz* และระนาบ *yz* (ข) ความถี่ 5.8 GHz และ (ค) ความถี่ 5.875 GHz (ต่อ).....67

4.7 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนที่ได้ จากการทดสอบและการจำลองในระนาบ *xz* และระนาบ *yz* (ก) ความถี่ 5.725 GHz และ (ข) ความถี่ 5.8 GHz.....68

4.7 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและ การจำลองในระนาบ *xz* และระนาบ *yz* (ค) ความถี่ 5.875 GHz (ต่อ).....69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ย่านความถี่ต่างๆ ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุและการใช้งาน....2
1.2 ค่ากำหนดกำลังส่งสูงสุดในระบบระบุทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5 GHz....2
2.1 สรุปสมรรถนะของบทความวิจัยที่มีมาก่อน....14
3.1 พารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศเส้นไมโครสตริป....21
3.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริป....26
3.3 พารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศร่องรูปข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป....27
3.4 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ....29
3.5 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ....33
3.6 พารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศเส้นไมโครสตริปหักงอ....38
3.7 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว....42
3.8 ตารางสรุปพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งขนาดทางกายภาพและขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ....46
3.9 สรุปสมรรถนะของสายอากาศที่ได้จากการจำลองสายอากาศ....49
4.1 ตารางสรุปพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งขนาดทางกายภาพและขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ....50
4.2 สรุปสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบ....59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID: Radio frequency identification) เป็นระบบฉลากที่ได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 โดยจุดเด่นของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุคือความสามารถในการอ่านข้อมูลของฉลากได้โดยที่ไม่ต้องมีการสัมผัส สามารถอ่านค่าได้แม่นยำแม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือน การกระแทก และสามารถอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงมีลักษณะเพียงการนำสินค้าผ่านเครื่องอ่านข้อมูลเพื่อให้เครื่องอ่านข้อมูล ได้ตรวจจับข้อมูลรหัสสินค้า และข้อมูลจำเป็นต่างๆ เพียงไม่กี่วินาที สามารถลดขั้นตอนและระยะเวลาในการทำงานโดยรวมลงได้อย่างมาก ปัจจุบันมีการนำระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมาใช้งานกันในงานหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นในบัตรชนิดต่างๆ เช่น บัตรประจำตัวประชาชน บัตรเอทีเอ็ม บัตรสำหรับผ่านเข้าออกห้องพัก บัตรโดยสารของสายการบิน บัตรจอดรถ ในฉลากของสินค้าหรือแม้แต่ใช้ฝังลงในตัวสัตว์เพื่อบันทึกประวัติ เป็นต้น ซึ่งส่วนสำคัญอย่างหนึ่งคือสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID reader antenna) ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณจากแท็ก การใช้ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ในประเทศไทยมีหลายรูปแบบด้วยกัน แต่การใช้งานที่ความถี่สูง ทำให้ความแม่นยำของการรับส่งข้อมูลมีสูงขึ้น เห็นได้ในการเก็บค่าผ่านทางด่วนโดยที่ผู้ใช้บริการทางด่วนไม่ต้องหยุดรถเพื่อจ่ายค่าบริการ ผู้ใช้บริการทางด่วนจะมีแท็ก ติดอยู่กับรถ และแท็กจะทำการสื่อสารกับเครื่องอ่านข้อมูล ผ่านสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ที่ติดตั้งอยู่ตรงบริเวณทางขึ้นทางด่วนในขณะที่รถแล่นผ่านสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล ระบบการคิดเงินก็จะนำข้อมูลจากแท็กไปคิดค่าบริการ ข้อดีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ อีกอย่างก็คือแท็ก และเครื่องอ่านข้อมูล สามารถสื่อสารผ่านตัวกลางได้หลายอย่างเช่น พลาสติก กระจก หรือวัสดุทึบแสงอื่นๆในขณะที่บาร์โค้ดทำไม่ได้ ในการรับส่งข้อมูลหรือสัญญาณวิทยุระหว่างแท็ก กับเครื่องอ่านข้อมูลจะมีประสิทธิภาพต่อเมื่อสายอากาศมีความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับความถี่พาหะที่ใช้งาน โดยมากมักจะใช้วิธีการมอดูเลตทางแอมผลิจูดหรือใช้การมอดูเลตทางแอมผลิจูดบวกกับการเข้ารหัสแมนเชสเตอร์ หรือการมอดูเลตแบบ PSK หรือ FSK หรือการใช้การมอดูเลตทางความถี่ เป็นต้น การสื่อสารข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ คือระหว่างแท็กและเครื่องอ่านข้อมูล จะสื่อสารแบบไร้สายผ่านอากาศ โดยจะนำข้อมูลมาทำการมอดูเลตกับคลื่นพาหะที่เป็นคลื่นความถี่วิทยุโดยมีสายอากาศที่อยู่ในเครื่องอ่านข้อมูลเป็นตัวรับและส่งคลื่น ในปัจจุบันได้มีการรวมกลุ่มระหว่างแต่ละประเทศ เพื่อทำการกำหนดมาตรฐานความถี่คลื่นพาหะของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ โดยมีสามกลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มประเทศในยุโรปและแอฟริกา (พื้นที่ที่ 1) กลุ่มประเทศอเมริกาเหนือและอเมริกาใต้ (พื้นที่ที่ 2) และสุดท้ายคือกลุ่มประเทศตะวันออกไกลและออสเตรเลีย (พื้นที่ที่ 3) ซึ่งแต่ละกลุ่มประเทศจะกำหนดแนวทางในการเลือกใช้ความถี่ต่างๆให้แก่บรรดาประเทศสมาชิก ดังตารางที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ย่านความถี่ต่างๆ ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุและการใช้งาน

ย่านความถี่	คุณลักษณะ	การใช้งาน
100-500 kHz	-ระยะการรับส่งข้อมูลใกล้ -ต้นทุนไม่สูง -ความเร็วในการอ่านข้อมูลต่ำ -ความถี่ในย่านนี้เป็นที่แพร่หลายทั่วโลก	-ระบบควบคุมการเข้าออก -ปศุสัตว์ -ระบบคงคลัง -รถยนต์
10-15 MHz	-ระยะการรับส่งข้อมูลปานกลาง -ราคามีแนวโน้มถูกลงในอนาคต -ความเร็วในการอ่านข้อมูลปานกลาง -ความถี่ในย่านนี้เป็นที่แพร่หลายทั่วโลก	-ระบบควบคุมการเข้าออก -สมาร์ตการ์ด
860-960 MHz 2.40-5.8 GHz	-ระยะการรับส่งข้อมูลไกลประมาณ 10 เมตร -ความเร็วในการอ่านข้อมูลสูง -ราคาแพง	- ระบบระบุสัมภาระ - ระบบคิดราคาสินค้าแบบไม่ต้องหยุดรอ

โดยที่ย่านความถี่วิทยุใช้งาน 5 GHz นั้นใช้มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมประเภท Radio Frequency Identification: RFID ที่ ใช้งานในย่านความถี่วิทยุ 5 GHz มีกำลังส่งสูงสุด (maximum transmit power) จะต้องไม่เกินค่าดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ค่ากำหนดกำลังส่งสูงสุดในระบบระบุทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5 GHz

ช่วงความถี่วิทยุ	กำลังส่งสูงสุด	เงื่อนไข
5.150-5.350 GHz	0.2 W (e.i.r.p.)	ได้รับยกเว้นใบอนุญาตให้ทำมีใช่นำเข้านำออก หรือค่าซึ่งเครื่องวิทยุคมนาคมและตั้งสถานีวิทยุคมนาคม
5.470-5.725 GHz	1.0 W (e.i.r.p.)	
5.725-5.850 GHz	1.0 W (e.i.r.p.)	

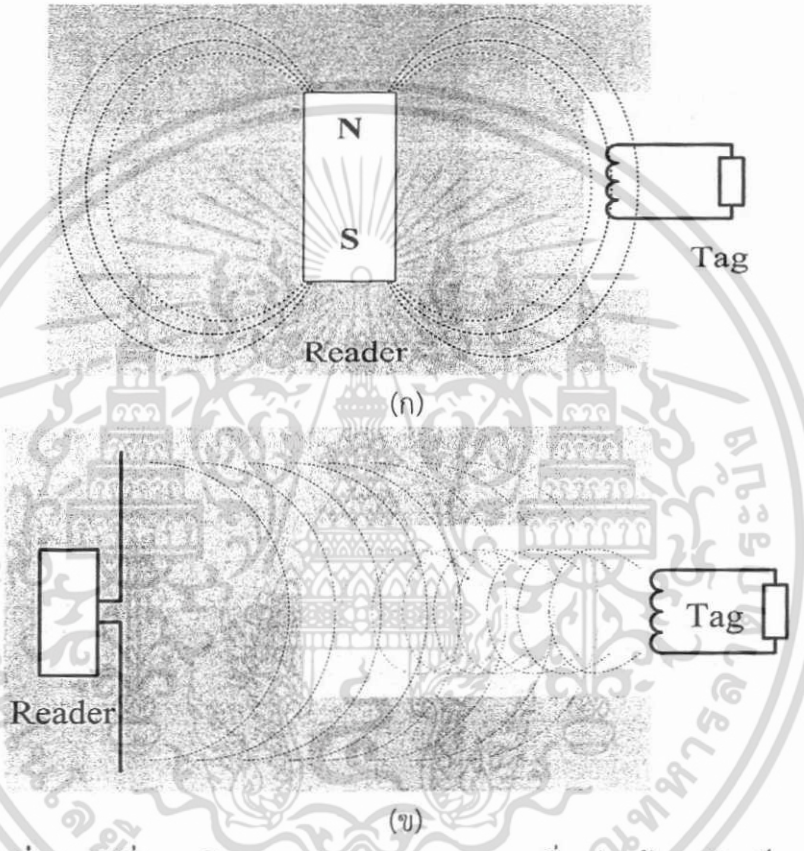
ในด้านราคาและความเร็วในการสื่อสารข้อมูล เมื่อเทียบกันแล้วการใช้ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ซึ่งใช้คลื่นพาหะย่านความถี่สูง เป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงและมีราคาแพงด้วยเช่นกัน ส่วนระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ที่ใช้คลื่นพาหะย่านความถี่ต่ำก็จะมีการส่งข้อมูลต่ำและราคาก็จะต่ำลดหลั่นตามลงไปด้วย ระยะการรับส่งข้อมูลในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญต่างๆ คือ กำลังส่งของเครื่องอ่านข้อมูล กำลังส่งของแท็ก และสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงส่งผลให้ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ที่ใช้คลื่นพาหะความถี่สูงเหมาะสมกับการใช้งานกับธุรกิจที่มีมูลค่าสูงด้วยเช่นกัน เช่นระบบรักษาความปลอดภัยในระดับสูง เป็นต้น

โดยโพลาไรซ์วงกลม มีข้อดี คือ การสูญเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์มีค่าต่ำแต่สายอากาศสร้างยากกว่าสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เชิงเส้น ส่วนสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เชิงเส้นมีข้อดีคือ สายอากาศสร้างง่ายแต่จะเกิดการสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์มีค่าสูงซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลาไรซ์วงกลมเหมาะสมกับการใช้งานที่มีการวางตัวของแท็กที่ไม่แน่นอนเพื่อให้เครื่องอ่านข้อมูลสามารถอ่านข้อมูลจากแท็กนั้นๆ ได้ในทุกแนวการวางตัวของแท็ก

ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ เป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นวิทยุในการระบุลักษณะของสิ่งต่างๆ โดยอัตโนมัติแบบไร้สาย คือการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก โดยแบ่งออกเป็นสองวิธีคือ วิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Inductive coupling หรือ Proximity electromagnetic) และวิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic propagation coupling) ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [1] – [2] ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 วิธีสื่อสารข้อมูลระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก [1]
(ก) วิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในย่านความถี่ LF และ HF
(ข) วิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในย่านความถี่ UHF และ Microwave

1.2 ความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันการสื่อสารไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันอย่างมาก ซึ่งเทคโนโลยีหนึ่งคือระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ กำลังได้รับความสนใจและถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วตั้งแต่ปี คศ.1980 เพื่อนำไปใช้งานในระบบระบุลักษณะแทนที่ระบบบาร์โค้ด โดยมีข้อดีหลายประการ คือ สามารถรองรับการใช้งานในสภาพทัศนวิสัยไม่ดี การอ่านค่าโดยไม่ต้องอยู่ในแนวเส้นสายตากับเครื่องอ่านข้อมูล สามารถอ่านค่าข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายได้หลายตัวในเวลาเดียวกันด้วยความเร็วสูง และอ่านข้อมูลได้ในระยะทางไกล สามารถทนต่อการกระทบกระเทือนจากภายนอก ทั้งสภาพอากาศ อุณหภูมิ โดยระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุประกอบด้วย 2 ส่วนคือเครื่องอ่านข้อมูล และแท็ก มีการทำงาน 2 ขั้นตอนคือเมื่อแท็กเข้ามาในบริเวณการทำงานของเครื่องอ่านข้อมูล เครื่องอ่านข้อมูล

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะส่งสัญญาณวิทยุไปยังแท็กจากนั้นเมื่อแท็กประมวลผลภายในเสร็จสิ้นจึงส่งสัญญาณกลับมาที่เครื่องอ่านข้อมูลเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลซึ่งส่วนประกอบสำคัญในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุนั้นคือสายอากาศมีความจำเป็นที่ต้องให้ความสำคัญกับการออกแบบสายอากาศเพื่อนำมาใช้ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ คุณสมบัติของตัวสายอากาศและคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกี่ยวเนื่องกับรูปร่างของสายอากาศ ดังนั้นหากสายอากาศมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากเป็นเหตุให้การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศทำได้ยาก ปัจจุบันมีกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอยู่สองแบบคือ กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่อาศัยการคำนวณที่มีหลักการเฉพาะในการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมและกระบวนการที่อาศัยค่าความน่าจะเป็นในการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับกลุ่มของตัวแปรค่าอื่นซึ่งแบบที่สองนี้มีข้อดีคือสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีความซับซ้อนมีจุดสูงสุดและต่ำสุดหลายจุดและได้นำกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองกระบวนการมาใช้เพื่อให้ได้คุณสมบัติและสมรรถนะที่เหมาะสมในการใช้งานสูงสุด [3] – [4]

1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ การศึกษาและวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ขนาดของตัวแพร่กระจายคลื่นที่เป็นเส้นไมโครสตริปหักงอ ขนาดความกว้างของร่องรูปเพชร ระยะการตัดมุมของร่องรูปเพชร เป็นต้น ซึ่งจะทำให้สายอากาศมีคุณลักษณะและคุณสมบัติตามต้องการโดยอาศัยโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ปัญหาทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบสามมิติในการจำลองและนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีโพลาไรซ์วงกลมให้มีระยะการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูล และแท็กได้ไกลที่สุดและมีการโพลาไรซ์วงกลมที่ดีซึ่งเป็นไปตามความต้องการสายอากาศที่มีคุณลักษณะดังนี้เช่น มีอัตราขยายสูง มีการโพลาไรซ์วงกลมที่ดี แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานรวมทั้งขนาดของสายอากาศต้องเหมาะสมกับการใช้งานด้วย เป็นต้น

1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 นำเสนอความเป็นมาของงานวิจัยความสำคัญของงานวิจัยวัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 นำเสนอทฤษฎีและหลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ เช่น การทำงานของเครื่องอ่านข้อมูล เป็นต้น งานวิจัยที่มีมาก่อน ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งทั้งหมดเป็นข้อมูลจำเป็นสำหรับการศึกษาและออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

บทที่ 3 นำเสนอการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์สายอากาศ จากขั้นตอนการกำหนดรูปแบบของสายอากาศโดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานและสมการในการคำนวณในบทที่ 2 สู่ขั้นตอนการจำลองและการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะเหมาะสมกับความต้องการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 นำเสนอการศึกษาถึงการปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศ โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาปรับปรุงโครงสร้างและนำมาจำลองเพื่อสังเกตุผลกระทบของคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ ทั้งข้อดีและข้อเสียของการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศเพื่อนำไปสร้างและทดสอบ

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สรุปข้อดีและข้อเสียของสายอากาศและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

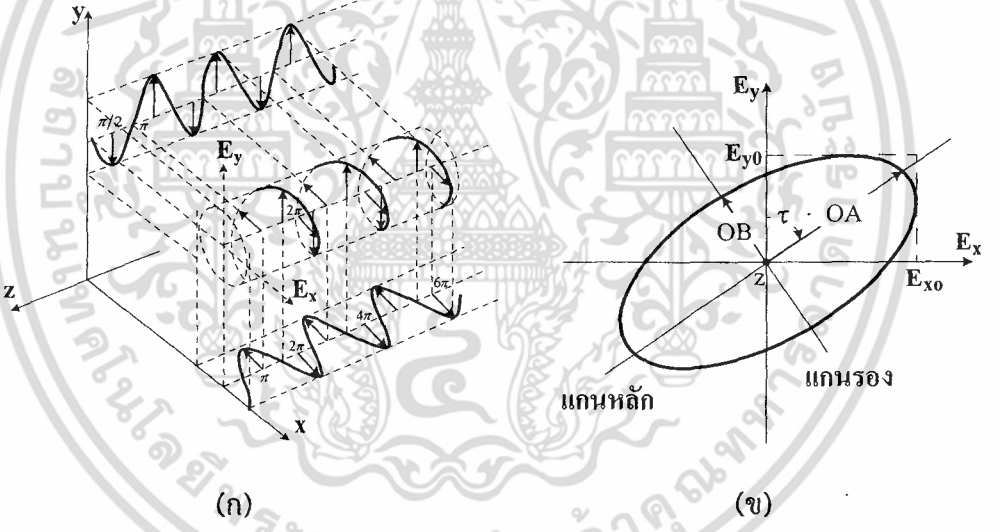
บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน ความเป็นมา และหลักการทั่วไปของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [1] – [2] ซึ่งประกอบด้วย แท็กและเครื่องอ่านข้อมูล หลักการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก และทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ใช้ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [3] – [7]

2.2 การโพลาไรซ์

การโพลาไรซ์ คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อคลื่นเดินทาง โดยการมองตามหลังคลื่น การโพลาไรซ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linear Polarization: LP) การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลม (Circular Polarization: CP) การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรี (Elliptical Polarization: EP)



รูปที่ 2.1 การหมุนของคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าและวงรีของการโพลาไรซ์ที่ z=0
(ก) การหมุนของคลื่น และ **(ข)** วงรีของการโพลาไรซ์

การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) คงที่ตลอดการเดินทางของคลื่น

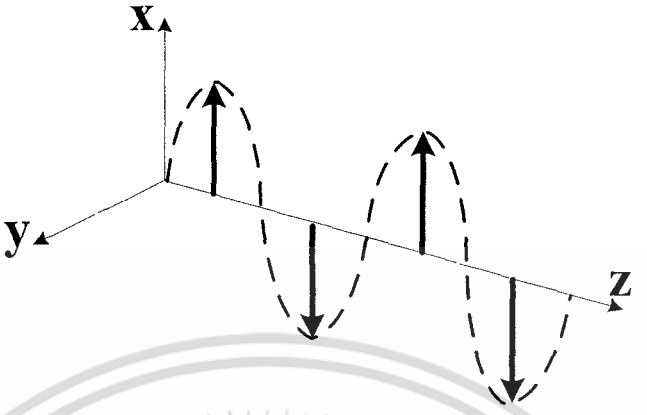
สำหรับคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น ซึ่งจะมีความแตกต่างของเฟสระหว่างองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) ในแนวตั้งและในแนวนอน เป็นดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \qquad n = 0,1,2,3,... \tag{2.1}$$

สามารถแบ่งชนิดของการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นออกได้เป็น 3 ชนิดหลักๆ คือ

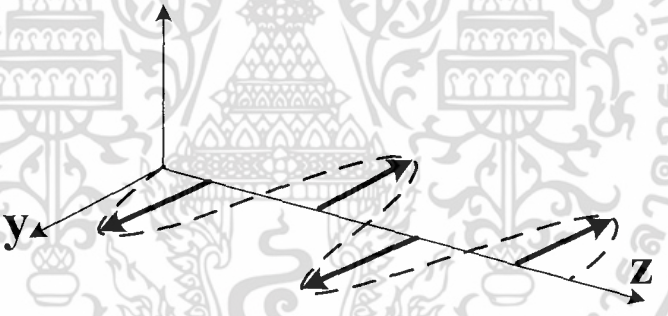
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง (Vertical Polarization: VP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) คงที่ในแนวตั้งตลอดการเดินทางของคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง

- การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน (Horizontal Polarization: HP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) คงที่ในแนวนอนตลอดการเดินทางของคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน

- การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวเฉียง (Slant Polarization: SP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) คงที่ในแนวเฉียงตลอดการเดินทางของคลื่น

การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลม คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งจะมีลักษณะเป็นวงกลมที่เป็นฟังก์ชันของเวลา โดยมีเงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลม ดังนี้ คือ

1. ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ
2. องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) ทั้งสองต้องมีขนาดที่เท่ากัน
3. องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) ทั้งสองต้องมีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\pi}{2}$

ถ้าคลื่นแพร่กระจายไปในทิศทาง –z สามารถหาค่าความต่างของเฟสของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) ในแนวตั้งและในแนวนอน ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

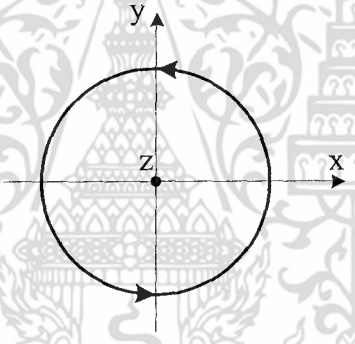
$$|E_x| = |E_y| \Rightarrow E_{x0} = E_{y0} \tag{2.2}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, \quad n = 0,1,2,\ldots \text{ สำหรับ } CW \tag{2.3}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \quad n = 0,1,2,\ldots \text{ สำหรับ } CCW \tag{2.4}$$

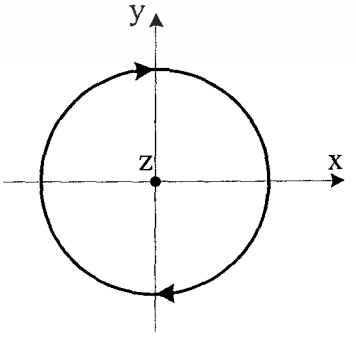
จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 พบว่า สามารถแบ่งการโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนขวา (Right-Handed CP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) จะหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise: CW) เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง z) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนขวา (Right-Handed CP)

- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนซ้าย (Left-Handed CP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counter Clockwise: CCW) เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง z) แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนซ้าย (Left-Handed CP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรี คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดโพลาไรซ์ชนิดนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

กรณี 1: 1.1. ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ

1.2. ถ้าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) ทั้งสองต้องมีขนาดที่เท่ากันแล้ว

1.3. องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) ทั้งสอง ต้องมีเฟสต่างกันไม่เท่ากับจำนวนเท่าของ $\frac{\pi}{2}$

$$|E_x| = |E_y| \Rightarrow E_{x0} = E_{y0} \tag{2.5}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm\frac{n}{2}\pi > 0 \quad ,n = 0,1,2,3,\ldots \text{ สำหรับ } CW \tag{2.6}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm\frac{n}{2}\pi < 0 \quad ,n = 0,1,2,3,\ldots \text{ สำหรับ } CCW \tag{2.7}$$

กรณี 2: 2.1. ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ

2.2. ถ้าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) ทั้งสองต้องมีขนาดที่ไม่เท่ากันแล้ว

2.3. องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) ทั้งสอง ต้องมีเฟสต่างกันไม่เท่ากับจำนวนเท่าของ π

$$|E_x| \neq |E_y| \Rightarrow E_{x0} \neq E_{y0} \tag{2.8}$$

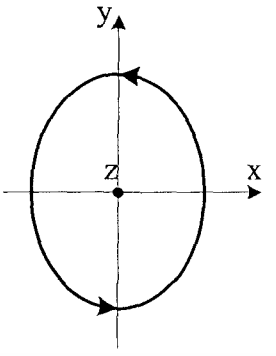
$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \quad n = 0,1,2,\ldots \text{ สำหรับ } CW \tag{2.9}$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \quad n = 0,1,2,\ldots \text{ สำหรับ } CCW \tag{2.10}$$

จากสมการที่ 2.8 ถึง 2.10 สามารถแบ่งการโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

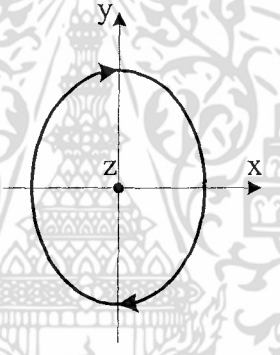
- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนขวา (Right-Handed EP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) จะหมุนตามเข็มนาฬิกา เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง z) แสดงดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนขวา (Right-Handed EP)

- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนซ้าย (Left-Handed EP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง z) แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนซ้าย (Left-Handed EP)

ในกรณีของการโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีจะมีเส้นการกวาดของเวคเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยทั่วไปจะแสดงในรูปของวงรีที่มีมุมเอียง (Tilted Ellipse) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยอัตราส่วนของแกนหลัก (Major Axis) ต่อแกนรอง (Minor Axis) เรียกว่า อัตราส่วนของแกน (Axial Ratio) สามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

$$AR = \frac{\text{Major axis}}{\text{Minor axis}} = \frac{OA}{OB} = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} \tag{2.11}$$

$$OA = \left[\frac{1}{2}\left\{E_{x0}^2 + E_{y0}^2 + \left[E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2E_{y0}^2\cos(2\Delta\phi)\right]^{1/2}\right\}\right]^{1/2} \tag{2.12}$$

$$OB = \left[\frac{1}{2}\left\{E_{x0}^2 + E_{y0}^2 - \left[E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2E_{y0}^2\cos(2\Delta\phi)\right]^{1/2}\right\}\right]^{1/2} \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมเอียงของวงรีเมื่อเทียบกับแกน y จะแทนด้วยมุม τ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\frac{2E_{x0}E_{y0}}{E_{x0}^2 - E_{y0}^2}\cos(\Delta\phi)\right] \tag{2.14}$$

การจำแนกชนิดของการโพลาไรซ์จะพิจารณาได้จากค่าอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio: AR) ที่แสดงดังสมการที่ 2.14

ผลที่ได้จากสมการที่ 2.14 สามารถแบ่งชนิดของการโพลาไรซ์ออกได้เป็น 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 โพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (LP) ซึ่งจะมีเฉพาะค่า $|E|_{\max}$ ($|E|_{\min} = 0$) นั่นคือ

$$AR = \frac{|E|_{\max}}{0} = \infty \tag{2.15}$$

กรณีที่ 2 โพลาไรซ์แบบเชิงวงกลม (CP) ซึ่งจะมีค่า $|E|_{\max} = |E|_{\min}$ นั่นคือ

$$AR = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} = 1 \tag{2.16}$$

กรณีที่ 3 โพลาไรซ์แบบเชิงวงรี (EP) ซึ่งจะมีค่า $|E|_{\max} > |E|_{\min}$ นั่นคือ

$$1 < AR < \infty \tag{2.17}$$

สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น มีข้อดี คือ สายอากาศสร้างง่ายแต่จะเกิดการสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์มีค่าสูง ส่วนสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม มีข้อดี คือ การสูญเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์มีค่าต่ำ แต่สายอากาศสร้างยากกว่าสายอากาศแบบเชิงเส้น โดยเมื่อได้สายอากาศที่มีอัตราขยาย [17]

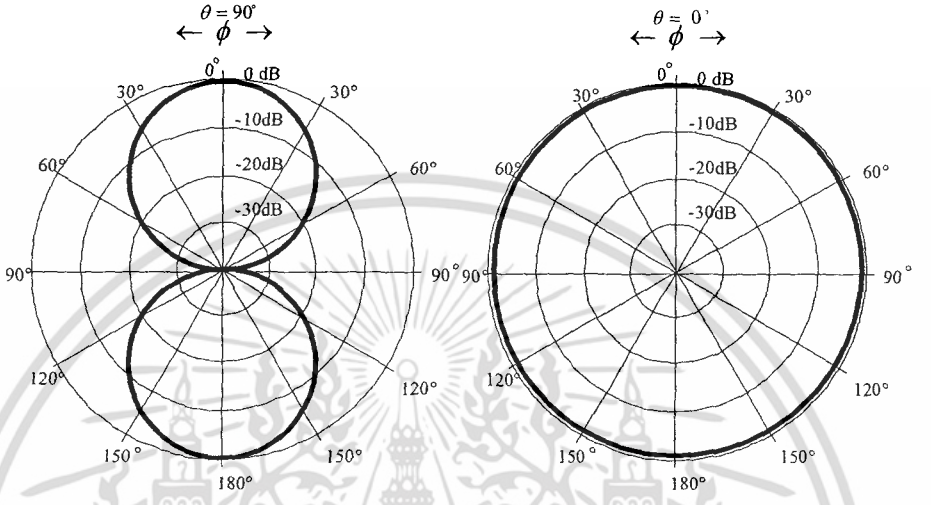
2.3 รูปแบบการแพร่กระจาย [Radiation Pattern]

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยทั่วไปนั้นมีหลากหลายแบบด้วยกัน ซึ่งในที่นี้จะอ้างอิงการแพร่กระจายคลื่นของสายกาศที่เกี่ยวเนื่องกับการวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5.8 GHz ซึ่งในขั้นตอนของการออกแบบจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่แตกต่างกันตามองค์ระกอบของสายอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปในขั้นตอนการวิเคราะห์ โดยประกอบด้วยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 3 แบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 Omni-Directional

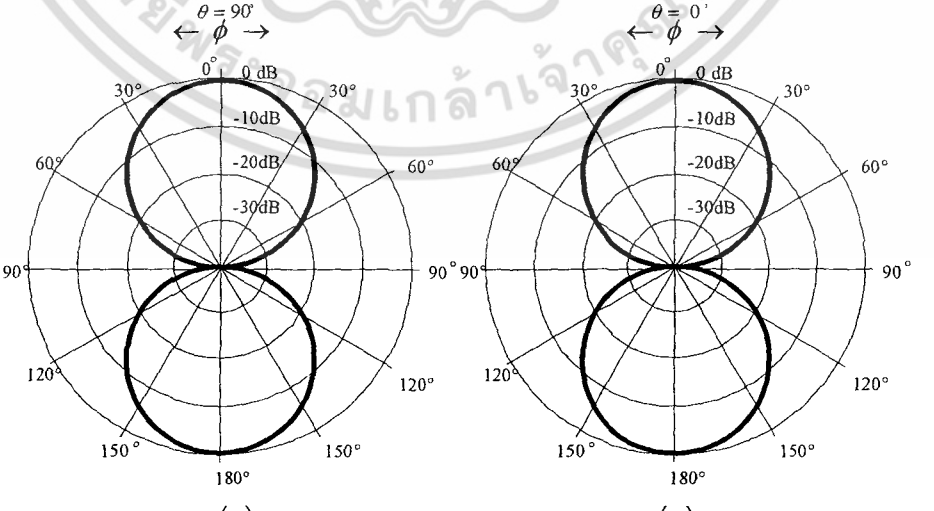
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Omni-Directional หรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางมีการแพร่กระจายคลื่นออกรอบตัวสายอากาศ โดยมีข้อดีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางคือ สามารถตอบสนองการใช้งานได้รอบทิศทางที่ความแรงของสัญญาณสม่ำเสมอ และมีข้อเสียของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางคือ มีอัตราการขยายต่ำ ดังรูปที่ xxx



รูปที่ 2.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (ก) ระนาบ *xz* (ก) ระนาบ *yz*

2.3.2 Bi-Direxttional

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Bi-Directional หรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางมีกรแพร่กระจายคลื่นออกทางด้านหน้าและด้านหลังของตัวสายอากาศ โดยมีข้อดีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางคือ มีอัตราการขยายสูงกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง และมีข้อเสียของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางคือ สามารถตอบสนองการใช้งานได้ดีเฉพาะด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศ ดังรูปที่ xxx

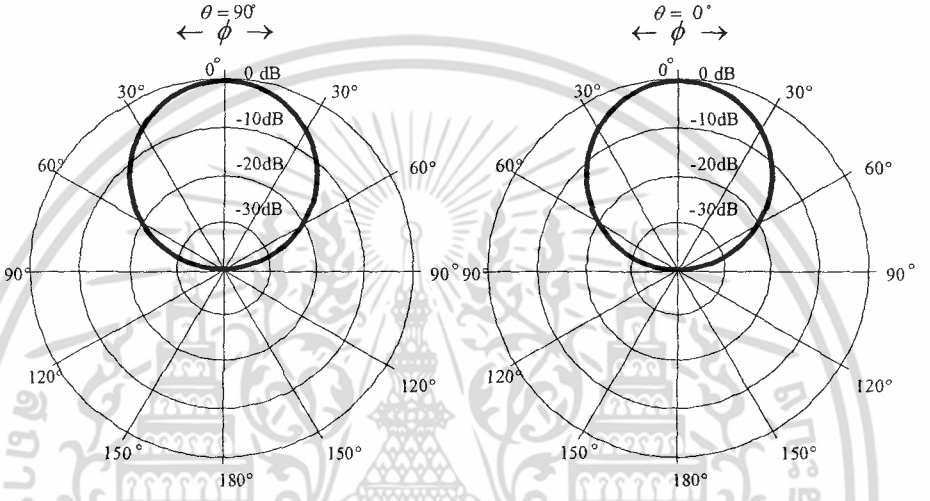


รูปที่ 2.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (ก) ระนาบ *xz* (ก) ระนาบ *yz*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 Uni-Directional

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Uni-Directional หรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวมีกรแพร่กระจายคลื่นออกทางด้านหน้าหรือด้านหลังของตัวสายอากาศ โดยมีข้อดีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวคือ มีอัตราการขยายสูงกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง และมีข้อเสียของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวคือ สามารถตอบสนองการใช้งานได้ดีเฉพาะด้านหน้าหรือด้านหลังของสายอากาศเท่านั้น ดังรูปที่ xxx



รูปที่ 2.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (ก) ระนาบ *xz* (ก) ระนาบ *yz*

จากรายละเอียดดังกล่าวจึงเลือกการปรับปรุงสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5.8 GHz นั้นจึงใช้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว เพื่อความเหมาะสมในการใช้งานในเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

2.4 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

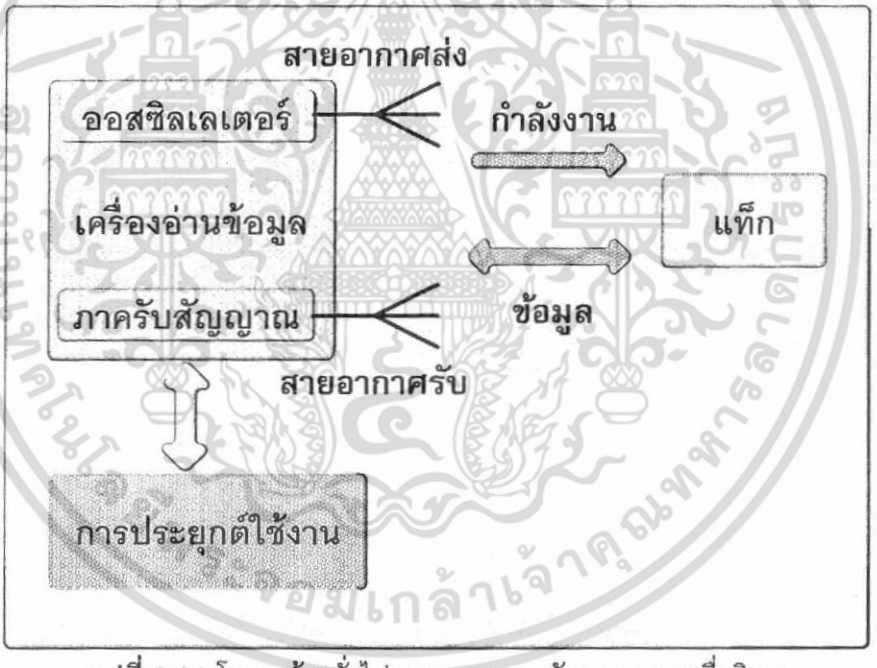
ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมีแนวความคิดในการนำคลื่นวิทยุมาใช้ เพื่อแสดงตำแหน่งหรือแสดงตนเองเกิดขึ้นตั้งแต่ราวประมาณปลายสงครามโลกครั้งที่สองโดยการนำข้อมูลที่ต้องการส่งมาทำการมอดูเลต (Modulation) กับคลื่นวิทยุแล้วส่งออกผ่านทางสายอากาศที่อยู่ในตัวรับข้อมูลที่ได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำไปใช้งานแทนระบบบาร์โค้ด (Barcode) และเนื่องจากอุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในขณะนั้นไม่สะดวกที่จะนำมาใช้งานเพราะมีขนาดใหญ่นอกจากนั้นยังมีราคาแพง จึงไม่ได้รับความนิยมมากเพียงพอที่จะนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ บริหาร และเชิงราชการ ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุอย่างต่อเนื่อง จนสามารถลดขนาดให้เป็นแผ่นเล็กๆ (Chip) ได้ดังในปัจจุบัน โดยจุดเด่นของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ อยู่ที่สามารถ อ่านข้อมูลจากแท็ก ได้หลายๆแท็กแบบไร้สัมผัส และสามารถอ่านค่าได้แม้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก และสามารถอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลถูกเก็บไว้ในไมโครชิปที่อยู่ในแท็ก

ในปัจจุบันได้มีการนำระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ นอกเหนือจากการนำมาใช้ในระบบบาร์โค้ดแบบเดิม ตัวอย่าง ใช้ในบัตรชนิดต่างๆ เช่น บัตรสำหรับใช้ผ่านเข้าออกสถานที่ต่างๆ บัตรที่จอดรถ ตามศูนย์การค้าต่างๆ ที่เราอาจพบเห็นอยู่ในรูปของแท็กที่ติดกับสินค้า โดยแท็กมีขนาดเล็กจนสามารถแทรกลงระหว่างชั้นของเนื้อกระดาษได้ หรือเป็นแคปซูลขนาดเล็กฝังเอาไว้ในตัวสัตว์เพื่อบันทึกประวัติต่างๆ เป็นต้น

ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือทรานสปอนเดอร์หรือแท็ก (Transponder / Tag) ที่ใช้ติดกับวัตถุต่าง ๆ ที่เราต้องการโดยแท็กที่ว่าจะบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้น ๆ เอาไว้ ส่วนที่สองก็คือเครื่องสำหรับอ่านหรือเขียนข้อมูลภายในแท็ก ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Interrogator / Reader) โดยการทำงานนั้นเครื่องอ่านข้อมูล จะทำหน้าที่จ่ายกำลังงานในรูปคลื่นความถี่วิทยุให้กับตัวบัตรยังผลให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ข้อมูลภายในสามารถส่งข้อมูลจำเพาะที่แสดงถึงเอกลักษณ์ (Identity) กลับมาประมวลผลที่ตัวอ่านข้อมูลได้เพื่อความเข้าใจจึงขอเปรียบเทียบกับระบบบาร์โค้ด เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทั่วไปของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

จากรูปที่ 2.11 แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ก็คือ ตัวบาร์โค้ดที่ติดกับฉลากของสินค้า และเครื่องอ่านข้อมูล ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ก็คือเครื่องอ่านข้อมูลบาร์โค้ด โดยข้อแตกต่างของทั้งสองระบบคือ ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านหรือเขียนข้อมูล ส่วนระบบบาร์โค้ดจะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่านข้อมูลโดยข้อเสียของระบบบาร์โค้ดคือหลักการอ่านข้อมูลเป็นการใช้แสงในการอ่านข้อมูลของบาร์โค้ดซึ่งจะต้องอ่านข้อมูลของบาร์โค้ดที่ไม่มีอะไรปกปิดหรือต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องสแกนและอ่านข้อมูลของวัตถุได้ทีละชิ้น ในระยะใกล้ๆ แต่ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะแตกต่าง โดยสามารถอ่านข้อมูลของแท็กได้โดยไม่ต้องเห็นแท็ก หรือแท็กนั้นซ่อนอยู่ภายในวัตถุและไม่จำเป็นต้องอยู่ในเส้นตรงกับคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงแต่อยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลได้ และการอ่านข้อมูลของแท็ก ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ยังสามารถอ่านข้อมูลได้หลาย ๆ แท็ก ในเวลาเดียวกัน โดยระยะการอ่านข้อมูลนั้น สามารถอ่านได้ไกลกว่าระบบบาร์โค้ดอีกด้วย [1]

2.4.1 แท็ก

มาจากคำว่าทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) ผสมกับคำว่าเรสปอนเดอร์ (Responder) โครงสร้างภายในของแท็ก จะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ ขดลวดขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศ (Antenna) สำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานป้อนให้ส่วนของไมโครชิป (Microchip) ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุเช่นรหัสสินค้า โดยทั่วไปแท็ก อาจอยู่ในชนิดทั้งเป็น กระดาษ แผ่นฟิล์ม พลาสติก มีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ กันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำเอาไปติด และมีหลายรูปแบบ เช่น ขนาดเท่าบัตรเครดิต เหรียญ กระดุม ฉลากสินค้า แคปซูล เป็นต้น แต่โดยหลักการอาจแบ่งแท็ก ที่มีใช้งานกันอยู่นั้นจะมีอยู่ 2 ชนิดใหญ่ๆ โดยแต่ละชนิดก็จะมีความแตกต่างกันในเรื่องของการใช้งาน ราคา โครงสร้างและหลักการ

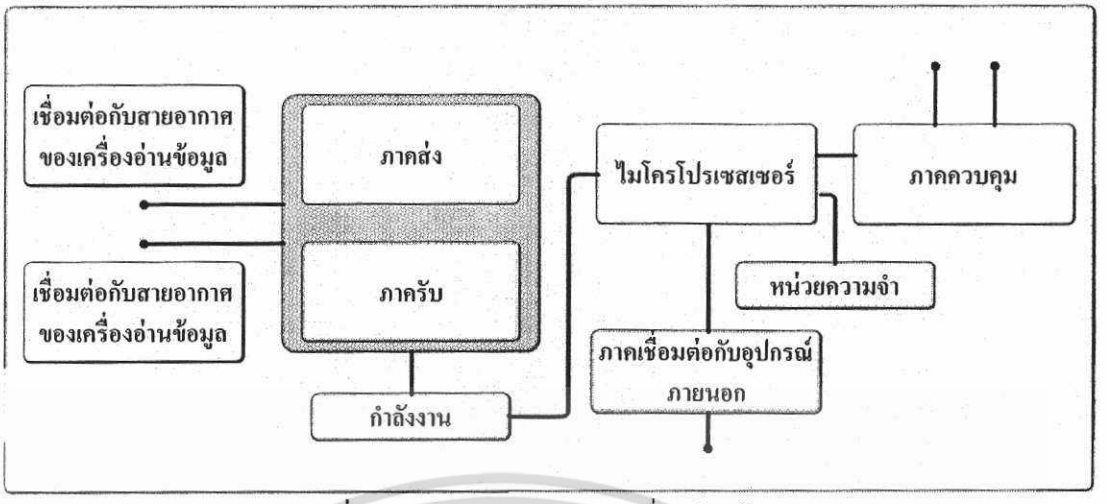
2.4.2 เครื่องอ่านข้อมูล

เครื่องอ่านข้อมูลจะสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็ก ได้โดยผ่านทางสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลแต่ละเครื่องสามารถรองรับแท็ก ได้หลายตัวโดยใช้ตัวมัลติเพล็กซ์ (Multiplexer) สายอากาศทำหน้าที่ในการแพร่กระจายสัญญาณความถี่วิทยุจากภาคส่งของเครื่องอ่านข้อมูล ออกมารอบๆ และรับการตอบสนองของแท็ก ดังนั้นตำแหน่งที่เหมาะสมของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับความแม่นยำและถูกต้องในการอ่านข้อมูล อย่างไรก็ตามสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะอยู่ใกล้กับเครื่องอ่านข้อมูล เพื่อลดผลของการสูญเสียจากสายเคเบิลความถี่วิทยุโดยเฉพาะเครื่องอ่านข้อมูลชนิดพกพา (Portable) จะรวมสายอากาศเข้าไว้ภายในตัวเครื่องอ่านข้อมูล โดยหน้าที่ของเครื่องอ่านข้อมูล ก็คือ การเชื่อมต่อสื่อสารกับแท็ก เพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลภายในแท็ก ด้วยสัญญาณความถี่วิทยุ ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งเครื่องอ่านข้อมูล จะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้ [1] – [2]

- ภาคส่ง (Transmitter) และภาครับ (Receiver) สัญญาณวิทยุ
- ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocesssor)
- หน่วยความจำ (Memory)
- ภาคควบคุม (Controller)
- ภาคเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (In/out interface)
- แหล่งจ่ายกำลังงาน (Power supply)
- สายอากาศ (Antenna)

โดยทั่วไปหน่วยประมวลผลข้อมูลที่อยู่ภายในเครื่องอ่านข้อมูลมักใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรม จะทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล (Decoding) ที่ได้รับและทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะขนาดและรูปร่างของเครื่องอ่านข้อมูลจะแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งาน เช่น แบบมือถือขนาดเล็กหรือติดผนัง จนไปถึงขนาดใหญ่เท่าประตู (Gate size) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

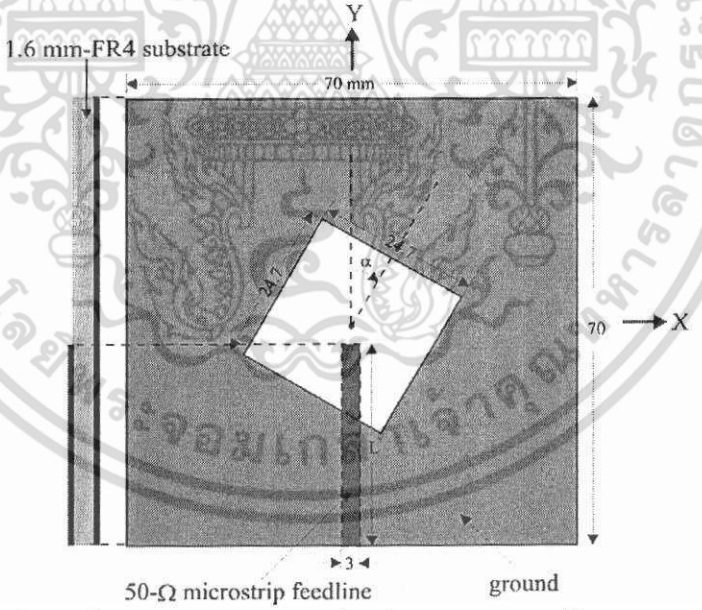


รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล

2.5 งานวิจัยที่มีมาก่อน

เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศที่มีอยู่เดิมโดยทั่วไปมีการโพลาไรซ์เชิงเส้นซึ่งมีข้อจำกัดในการสื่อสารระหว่างแท็ก และเครื่องอ่านข้อมูลเฉพาะในทิศทางของการโพลาไรซ์ ตัวอย่างงานวิจัยที่มีมาก่อนนั้น มีเอกสารทางวิชาการที่อ้างอิงเป็นตัวอย่างในที่นี้คือ

2.5.1 สายอากาศไมโครสตริปของ J.Y. Jan และ J.W. Su [8]



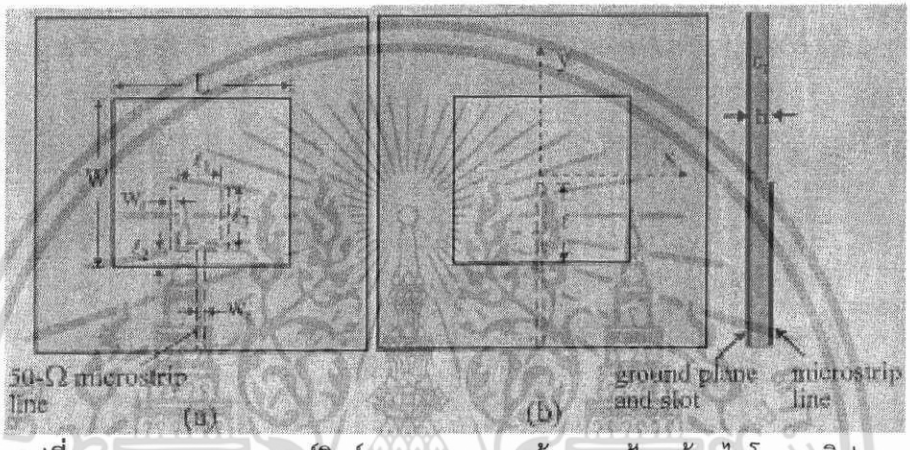
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของการขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศด้วยการหมุนร่องกว้างสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์

จากรูปที่ 2.13 การขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศด้วยการหมุนร่องกว้างสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ที่มีการหมุนร่องสี่เหลี่ยมบนระนาบกราวนด์มีการโพลาไรซ์เชิงเส้น สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2005 โดยมีคุณลักษณะดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความถี่กลางเท่ากับ 4.5 GHz
- แบนด์วิดธ์เท่ากับ 49%
- อัตราขยายเท่ากับ 2 dBi
- มีโพลาไรซ์เชิงเส้น
- ขนาดสายอากาศทางกายภาพ กว้าง/ยาว/สูง เท่ากับ 106.4/106.4/35.6 mm
- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง

2.5.2 สายอากาศไมโครสตริปของ J.Y. Sze และ K.L. Wong [9]



รูปที่ 2.14 การขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศด้วยการป้อนด้วยไมโครสตริปบนร่องกว้างสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์

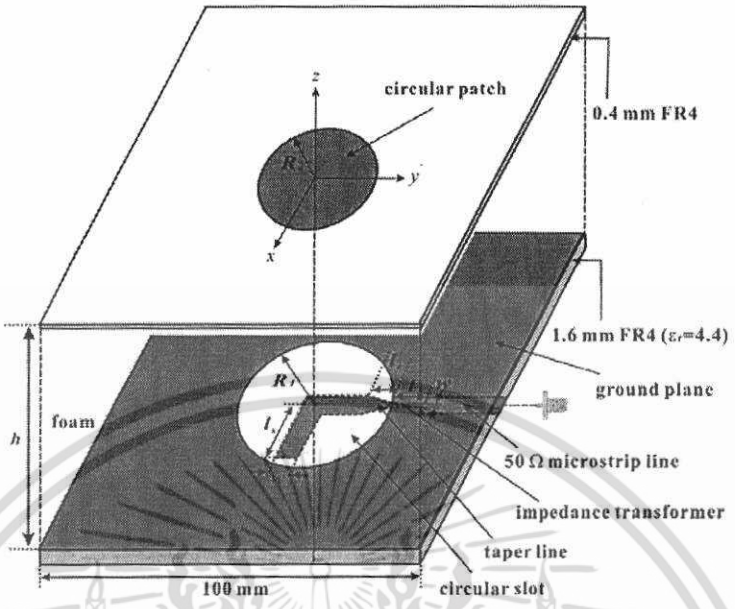
จากรูปที่ 2.14 การขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศด้วยการป้อนด้วยไมโครสตริปบนร่องกว้างสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2001 โดยมีคุณลักษณะดังนี้

- ความถี่กลางเท่ากับ 2 GHz
- แบนด์วิดธ์เท่ากับ 25%
- อัตราขยายเท่ากับ 5 dBi
- มีโพลาไรซ์เชิงเส้น
- ขนาดสายอากาศทางกายภาพ กว้าง/ยาว/สูง เท่ากับ 106.4/106.4/35.6 mm
- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

123054

2.5.3 สายอากาศไมโครสตริปของ J.S. Row และ S.W. Wu [10]



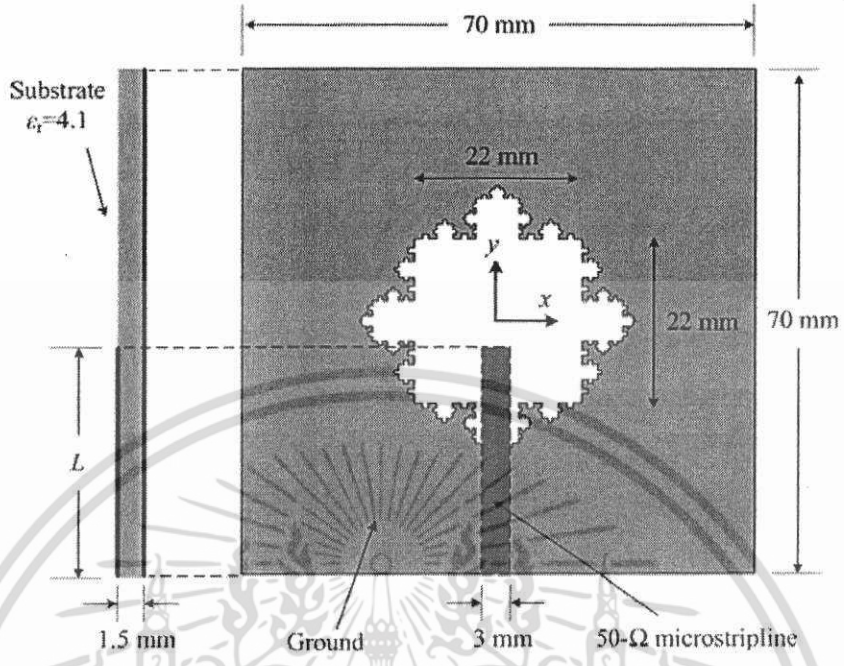
รูปที่ 2.15 โครงสร้างสายอากาศร่องกว้างโหลดด้วยแผ่นระนาบปรสิตวงกลมแบบโพลาไรซ์วงกลม

จากรูปที่ 2.15 สายอากาศร่องกว้างโหลดด้วยแผ่นระนาบปรสิตวงกลมแบบโพลาไรซ์วงกลม สร้างขึ้นใน ปี ค.ศ. 2008 โดยมีคุณลักษณะดังนี้

- ความถี่กลางเท่ากับ 2.9 GHz
- แบนด์วิดธ์เท่ากับ 38%
- อัตราขยายเท่ากับ 4 dBi
- มีโพลาไรซ์วงกลม และแบนวิดธ์ของโพลาไรซ์วงกลมเท่ากับ 5%
- ขนาดสายอากาศทางกายภาพ กว้าง/ยาว/สูง เท่ากับ 106.4/106.4/35.6 mm
- อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังเท่ากับ 6 dB
- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 สายอากาศไมโครสตริปของ W.L. Chen, G.M. Wang และ C.X. Zhang [11]



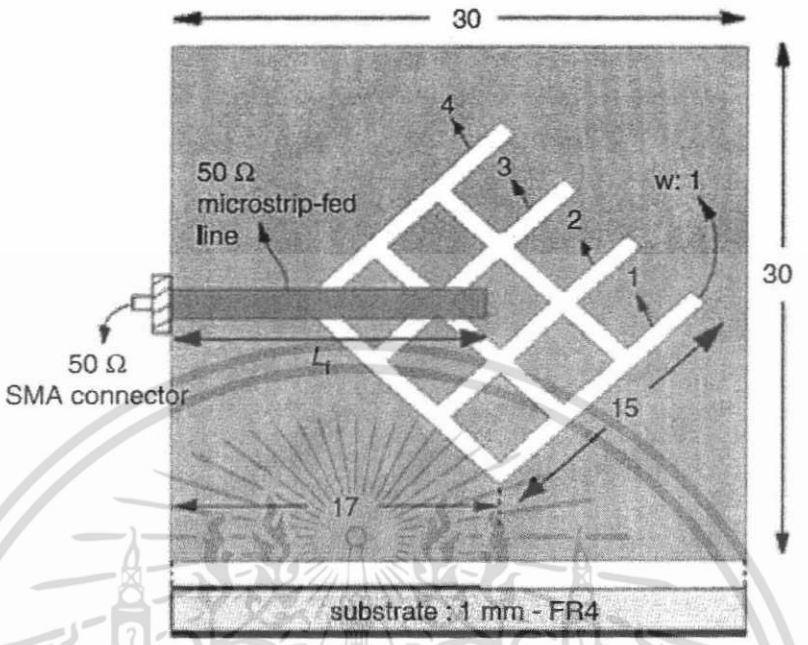
รูปที่ 2.16 การขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศด้วยการป้อนด้วยไมโครสตริป
บนร่องกว้างแฟร็กทัลแผ่นพิมพ์

จากรูปที่ 2.16 คือการขยายแบนด์วิดธ์ของสายอากาศด้วยการป้อนด้วยไมโครสตริป บนร่องกว้างแฟร็กทัลแผ่นพิมพ์ สร้างขึ้นใน ปี ค.ศ. 2009 โดยมีคุณลักษณะดังนี้

- ความถี่กลางเท่ากับ 4 GHz และแบนด์วิดธ์เท่ากับ 60%
- อัตราขยายเท่ากับ 4 dBi
- มีโพลาไรซ์เชิงเส้น
- ขนาดสายอากาศทางกายภาพ กว้าง/ยาว/สูง เท่ากับ 106.4/106.4/35.6 mm
- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 สายอากาศไมโครสตริปของ G. Beigmohammadi, C. Ghobadi, J. Nourinia และ M. Ojaroudi [12]



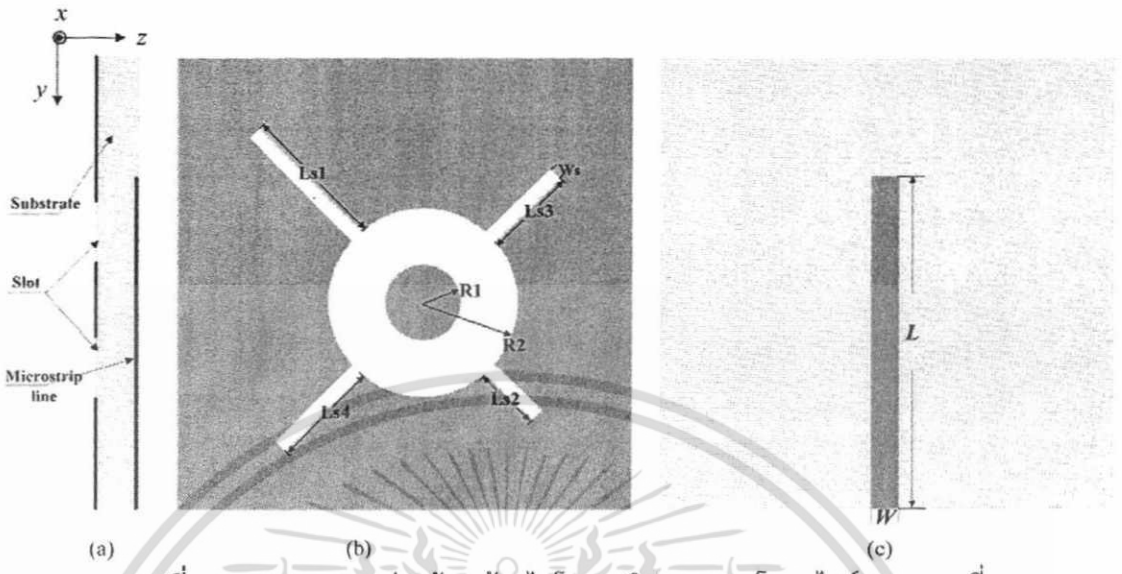
รูปที่ 2.17 สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับ WLAN/WiMAX

จากรูปที่ 2.17 สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับ WLAN/WiMAX สร้างขึ้นใน ปี ค.ศ. 2007 โดยมีคุณลักษณะดังนี้

- ความถี่กลางเท่ากับ 2.3 GHz
- แบนด์วิดธ์เท่ากับ 9%
- อัตราขยายเท่ากับ 0 dBic (dBic คือ อัตราขยายของสายอากาศที่มีโพลาไรซ์วงกลมเมื่อเทียบกับสายอากาศไอโซโพปิคในโพลาไรซ์เดียวกัน [18])
- มีโพลาไรซ์วงกลม
- แบนด์วิดธ์ของโพลาไรซ์วงกลมเท่ากับ 4%
- ขนาดสายอากาศทางกายภาพ กว้าง/ยาว/สูง เท่ากับ 106.4/106.4/35.6 mm
- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.6 สายอากาศไมโครสตริปของ X. Bao และ M.J. Ammarn [13]

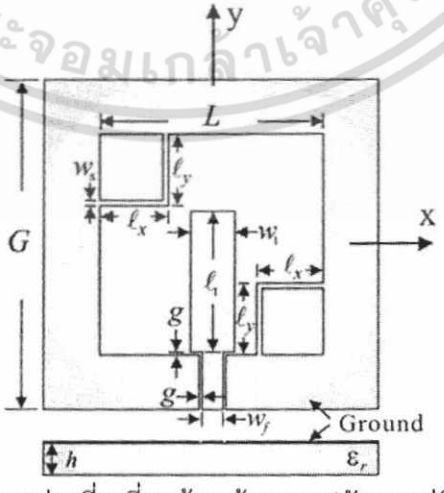


รูปที่ 2.18 สายอากาศร่องป้อนด้วยไมโครสตริปแบบสองโพลาไรซ์สองความถี่

จากรูปที่ 2.18 คือสายอากาศร่องป้อนด้วยไมโครสตริปแบบสองโพลาไรซ์สองความถี่ สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2008 โดยมีคุณลักษณะดังนี้

- ความถี่กลางเท่ากับ 1.5 GHz และ 2.6 GHz
- แบนด์วิดธ์เท่ากับ 26.7% และ 11.3%
- อัตราขยายเท่ากับ 5.2 dBic และ 6.3 dBic
- มีโพลาไรซ์วงกลม และแบนด์วิดธ์ของโพลาไรซ์วงกลมเท่ากับ 6.1% และ 6%
- ขนาดสายอากาศทางกายภาพ กว้าง/ยาว/สูง เท่ากับ 106.4/106.4/35.6 mm
- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว

2.5.7 สายอากาศไมโครสตริปของ J.Y. Sze และ C.C. Chang [14]



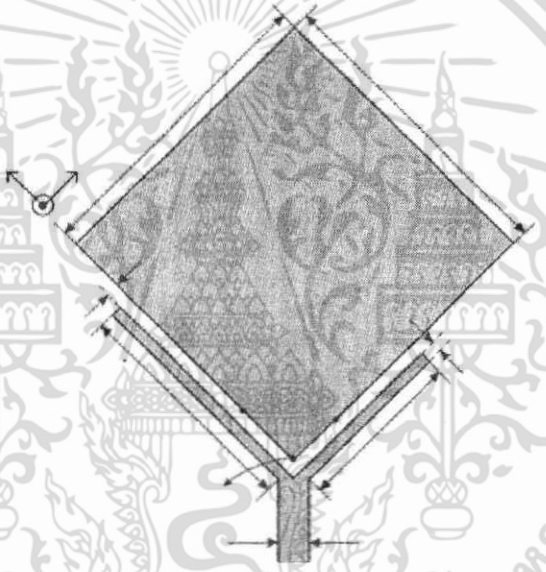
รูปที่ 2.19 สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมด้วยเส้นบางรูปตัวแอลคู่ที่มีโพลาไรซ์วงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.19 คือสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมด้วยเส้นบางรูปตัวแอลคู่ที่มีโพลาไรซ์วงกลม สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2008 โดยมีคุณลักษณะดังนี้

- ความถี่กลางเท่ากับ 2.445 GHz
- แบนด์วิดธ์เท่ากับ 25%
- อัตราขยายเท่ากับ 4 dBic
- มีโพลาไรซ์วงกลม และแบนด์วิดธ์ของโพลาไรซ์วงกลมเท่ากับ 25%
- บีมวิดธ์ของอัตราส่วนแกนเท่ากับ 30 องศา
- ขนาดสายอากาศทางกายภาพ กว้าง/ยาว/สูง เท่ากับ 60/60/1.7 mm
- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง

2.5.8 สายอากาศไมโครสตริปของ Y.J. Sung [15]



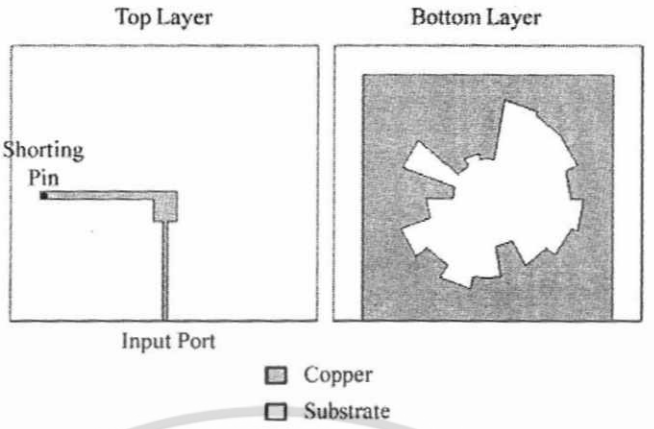
รูปที่ 2.20 สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปรูปตัววาย ไม่สมมาตรที่มีโพลาไรซ์วงกลม

จากรูปที่ 2.20 คือสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปรูปตัววาย ไม่สมมาตรที่มีโพลาไรซ์วงกลม สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2008 โดยมีคุณลักษณะดังนี้

- ความถี่กลางเท่ากับ 1.8 GHz
- แบนด์วิดธ์เท่ากับ 2.8%
- อัตราขยายเท่ากับ 3.6 dBic
- มีโพลาไรซ์วงกลม และแบนด์วิดธ์ของโพลาไรซ์วงกลมเท่ากับ 0.9%
- ขนาดสายอากาศทางกายภาพ กว้าง/ยาว/สูง เท่ากับ 40/60/1.7 mm
- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.9 สายอากาศไมโครสตริปของ S.H. Yeung, K.F.Man และ W.S. Chan [16]



รูปที่ 2.21 การปรับปรุงแบนด์วิดธ์ของสายอากาศแบบร่องหลายส่วนประกอบที่มีรูปร่างกลมที่มีโพลาไรซ์วงกลม

จากรูปที่ 2.21 คือสายอากาศแบบร่องหลายส่วนประกอบที่มีรูปร่างกลมที่มีโพลาไรซ์วงกลม สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2011 โดยมีคุณลักษณะดังนี้

- ความถี่กลางเท่ากับ 1.8 GHz มีแบนด์วิดธ์เท่ากับ 2.8%
- อัตราขยายเท่ากับ 3.6 dBic
- มีโพลาไรซ์วงกลม และแบนด์วิดธ์ของโพลาไรซ์วงกลมเท่ากับ 51.4%
- ขนาดยาวที่สุดทางกายภาพเท่ากับ 122 mm
- ขนาดสายอากาศทางกายภาพ กว้าง/ยาว/สูง เท่ากับ 106.4/106.4/35.6 mm
- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว

ซึ่งงานวิจัยที่ได้กล่าวมาขั้นต้นพบว่าสายอากาศนั้นมีคุณลักษณะต่างๆ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 2.2 สรุปสมรรถนะของบทความวิจัยที่มีมาก่อน

บทความ	ความถี่กลาง (GHz)/ แบนด์วิดธ์ (%)	อัตราขยาย (dBic)	โพลาไรซ์/ แบนด์วิดธ์ของโพลาไรซ์ (%)	ความกว้าง/ความยาว/ความสูง (mm)	แบบรูปการแพร่กระ-จายคลื่น
[8]	4.5/49	2	เชิงเส้น/-	70/70/1.7	สองทิศทาง
[9]	2/25	5	เชิงเส้น/-	110/110/0.8	สองทิศทาง
[10]	2.9/38	4	วงกลม/5	100/100/11	ทิศทางเดียว
[11]	4/60	4	เชิงเส้น/-	70/70/1.6	สองทิศทาง
[12]	2.3/9	0	วงกลม/4	30/30/1.1	รอบทิศทาง
[13]	1.5,2.6/26.7,11.3	5.2,6.3	วงกลม/6.1,6	80/80/1.62	ทิศทางเดียว
[14]	2.445/25	4	วงกลม/25	60/60/0.84	สองทิศทาง
[15]	1.8/2.8	3.6	วงกลม/0.9	40/40/1.7	สองทิศทาง
[16]	1.8/2.8	3.6	วงกลม/51.4	106.4/106.4/35.6	ทิศทางเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.2 พบว่าคุณลักษณะของสายอากาศจาก [8] – [16] ยังคงมีคุณลักษณะที่ไม่เพียงพอที่สามารถรองรับการใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ เนื่องจากมีอัตราขยายต่ำ มีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ซึ่งไม่เหมาะสมกับการใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5.8 GHz ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการค้นคว้าและวิจัย เพื่อสร้างสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5.8 GHz ซึ่งต้องให้อัตราขยายสูง มีโพลาไรซ์วงกลม และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

สรุปข้อดี และข้อเสีย ของสายอากาศจาก [8] – [16] ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดี และข้อเสียของบทความวิจัยที่มีมาก่อน

บทความ	ข้อดี	ข้อเสีย
[8]	ขนาดกะทัดรัด	อัตราขยายต่ำ,โพลาไรซ์เชิงเส้น
[9]	อัตราขยายสูง	ขนาดใหญ่,โพลาไรซ์เชิงเส้น
[10]	โพลาไรซ์วงกลม	ขนาดใหญ่,อัตราขยายต่ำ
[11]	ขนาดกะทัดรัด	อัตราขยายต่ำ,โพลาไรซ์เชิงเส้น
[12]	โพลาไรซ์วงกลม,ขนาดกะทัดรัด	อัตราขยายต่ำ
[13]	โพลาไรซ์วงกลม,อัตราขยายสูง	ขนาดใหญ่
[14]	โพลาไรซ์วงกลม,ขนาดกะทัดรัด	อัตราขยายต่ำ
[15]	โพลาไรซ์วงกลม,ขนาดกะทัดรัด	อัตราขยายต่ำ
[16]	โพลาไรซ์วงกลม	ขนาดใหญ่,อัตราขยายต่ำ

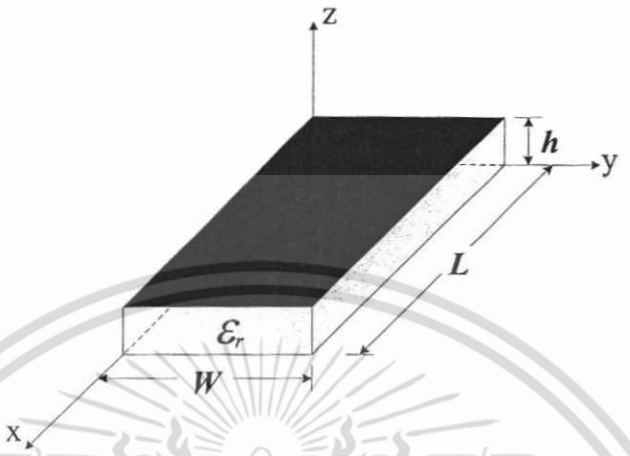
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

2.6.1 การออกแบบเส้นไมโครสตริปและสายอากาศไมโครสตริป

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance, Z_0) ของสายอากาศไมโครสตริปได้เริ่มมีการใช้งานตั้งแต่ในทศวรรษที่ 50 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกันซึ่งแบ่งตามลักษณะของแผ่นไมโครสตริปและลักษณะการป้อนสัญญาณ โครงสร้างของไมโครสตริปจะประกอบด้วยตัวนำอยู่สองด้าน ด้านหนึ่งเรียกว่า แผ่นระนาบกราวนด์และด้านที่สองใช้สำหรับการสร้างตัวป้อนสัญญาณลายวงจรหรือสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นลงไป โดยส่วนใหญ่จะมีสารไดอิเล็กตริกซึ่งเรียกว่า วัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริก (Dielectric substrate) อยู่ตรงกลางมีความหนาของวัสดุฐานรอง (h) ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฐานรองแสดงด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant: ε_r) และค่าความสูญเสียเชิงมุม (Loss tangent: tan δ) โดยทั่วไปสายอากาศแบบไมโครสตริปจะมีโครงสร้างเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เพื่อที่จะสามารถทำงานที่โหมดหลัก (Fundamental mode) คือ TM_{01} หรือ TM_{10} ที่ความถี่เรโซแนนซ์ได้ ซึ่งสายอากาศไมโครสตริปมีคุณสมบัติที่เป็นข้อได้เปรียบกว่าสายอากาศชนิดอื่น ๆ เช่น มีโครงสร้างที่ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับซ้อนและมีลักษณะแบนราบ น้ำหนักเบา ต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปโดยทั่วไปจะมีข้อเสีย คือ มีประสิทธิภาพต่ำ ค่า Q สูงทนกำลังงานได้ต่ำ ความบริสุทธิ์โพลาไรซ์ไม่ดี (Poor polarization purity) และช่วงกว้างแถบความถี่แคบ เป็นต้น



รูปที่ 2.22 โครงสร้างไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโพรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามรูปที่ 2.22 สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2+\left(\frac{n\pi}{W}\right)^2+\left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \qquad (2.18)$$

โดยที่

h คือ ความสูงของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

L คือ ความยาวของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

W คือ ความกว้างของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

ε คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้า

m คือ จำนวนของการเปลี่ยนแปลงครึ่งรอบสนามในทิศทาง x

n คือ จำนวนของการเปลี่ยนแปลงครึ่งรอบสนามในทิศทาง y

p คือ จำนวนของการเปลี่ยนแปลงครึ่งรอบสนามในทิศทาง z

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มี $h << L$ และ $h << W$ สามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ได้ตามสมการต่อไปนี้ คือ

เมื่อ $h < W < L$

จะทำให้เกิดโหมดเป็นใหญ่ (Dominant mode) เป็น TM^x_{100} และความถี่เรโซแนนซ์หาได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(f_r)_{100} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v_o}{2L\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.19}$$

โดยที่

v_0 คือ ความเร็วของแสง

ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

เมื่อ $h < \frac{L}{2} < W < L$

จะทำให้เกิดโหมดที่สอง (Second mode) เป็น TM^x_{010} และความถี่เรโซแนนซ์หาได้ดังนี้

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2W\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v_o}{2W\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.20}$$

แต่ในกรณี $h < W < \frac{L}{2}$

จะทำให้เกิดโหมดที่สองเป็น TM^x_{200} แทนโหมด TM^x_{010} และสามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ ได้ดังนี้

$$(f_r)_{200} = \frac{1}{L\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v_o}{L\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.21}$$

และในกรณี $h < L < W$

จะทำให้เกิดโหมดเป็นใหญ่เป็น TM^x_{010} และสามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ ได้จากสมการที่ 2.21 นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ในกรณี $h < L < \frac{W}{2} < W$ จะทำให้เกิดโหมดที่สองเป็น TM^x_{020}

2.6.2 ลักษณะการป้อนสัญญาณ

กลไกการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของโครงสร้างสายอากาศ โดยทั่วไปเทคนิคการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- เทคนิคการป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อโดยตรงกับตัวแพร่กระจายคลื่น นั่นคือ เทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริป (Microstrip line) และเทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่เป็นสายโคแอกเชียล (Coaxial probe)
- เทคนิคการป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า (Coupling) ซึ่งอาศัยหลักการเชื่อมต่อกันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ นั่นคือ เทคนิคการเชื่อมต่อผ่านทางช่องเชื่อมต่อ (Aperture coupling) และเทคนิคการเชื่อมต่อในระยะใกล้ (Proximity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริป เป็นการเชื่อมต่อโดยตรงกับขอบของตัวแพร่กระจายคลื่น เทคนิคนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้กับวัสดุฐานรองที่บาง
- เทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่เป็นสายโคแอกเชียล เป็นการเชื่อมต่อโดยใช้ตัวนำด้านในของสายโคแอกเชียลเชื่อมต่อกับตัวแพร่กระจายคลื่นผ่านทางช่องในตัวกลางไดอิเล็กตริก ส่วนตัวนำด้านนอกเชื่อมต่อกับกราวนด์ของสายอากาศไมโครสตริป ข้อดีของการป้อนสัญญาณแบบนี้ คือ สามารถป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศได้ทุกตำแหน่ง แต่ข้อเสีย คือ จะทำให้มีความกว้างแถบความถี่ที่แคบ โครงสร้างการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกันซึ่งแบ่งตามลักษณะของแผ่นไมโครสตริปและลักษณะการป้อนสัญญาณ สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Patch) และระนาบกราวนด์แบบร่องเปิดมีหลายลักษณะ เช่น แผ่นวงกลม (Ellipse) แผ่นสี่เหลี่ยม (Rectangular) แผ่นสามเหลี่ยมด้านเท่า (Equilateral triangle) แผ่นวงแหวน (Ring) เป็นต้น ส่วนการป้อนสัญญาณแบบเส้นไมโครสตริปแบ่งได้เป็น 2 แบบคือการป้อนสัญญาณแบบตรงกลาง (Center feed) และการป้อนสัญญาณแบบเยื้องจากตรงกลาง (Off-center feed)

ส่วนโครงสร้างของเส้นไมโครสตริปประกอบด้วยตัวนำอยู่สองด้าน ด้านหนึ่งเรียกว่า แผ่นระนาบกราวนด์ (Ground plane) และด้านที่สองใช้สำหรับสร้างตัวป้อนสัญญาณ ลายวงจรหรือสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นลงไป โดยมีไดอิเล็กตริก (Dielectric) ที่มีการสูญเสียต่ำ ซึ่งเรียกว่าวัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริก (Dielectric substrate) อยู่ตรงกลาง ตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นทองแดงซึ่งความหนาของทองแดง (t) เท่ากับ 0.05 mm ส่วนความหนาของวัสดุฐานรอง (h) มีหลายขนาดแต่ที่นิยมนำมาออกแบบ เช่น 0.8 mm และ 1.6 mm เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าวัสดุฐานรองแสดงด้วยสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative dielectric constant: ε_r) และค่าของความสูญเสียเชิงมุม (δ)

- เทคนิคการเชื่อมต่อผ่านทางช่องเชื่อมต่อ เป็นการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศโดยที่เส้นไมโครสตริปจะแยกออกจากตัวแพร่กระจายด้วยระนาบกราวนด์ ดังนั้นการป้อนสัญญาณจากเส้นไมโครสตริปให้กับตัวแพร่กระจายคลื่นจึงอาศัยการเชื่อมต่อผ่านทางช่องเชื่อมต่อบนระนาบกราวนด์ เนื่องจากการป้อนสัญญาณแบบนี้ทำให้สายอากาศมีหลายชั้นจึงทำให้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเทคนิคการป้อนสัญญาณวิธีอื่นๆ แต่ทำการออกแบบได้ง่าย
- เทคนิคการเชื่อมต่อในระยะใกล้ จะมีเส้นไมโครสริปอยู่ระหว่างวัสดุฐานรองสองชนิดที่ต่างกัน และมีตัวแพร่กระจายคลื่นอยู่บนวัสดุฐานรองชั้นบน ส่วนระนาบกราวนด์จะอยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองชั้นล่าง

2.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำนำเสนอทฤษฎีและหลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ เช่น การทำงานของเครื่องอ่านข้อมูล เป็นต้น งานวิจัยที่มีมาก่อน ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งทั้งหมดเป็นข้อมูลจำเป็นสำหรับการศึกษาและออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การวิเคราะห์สายอากาศ

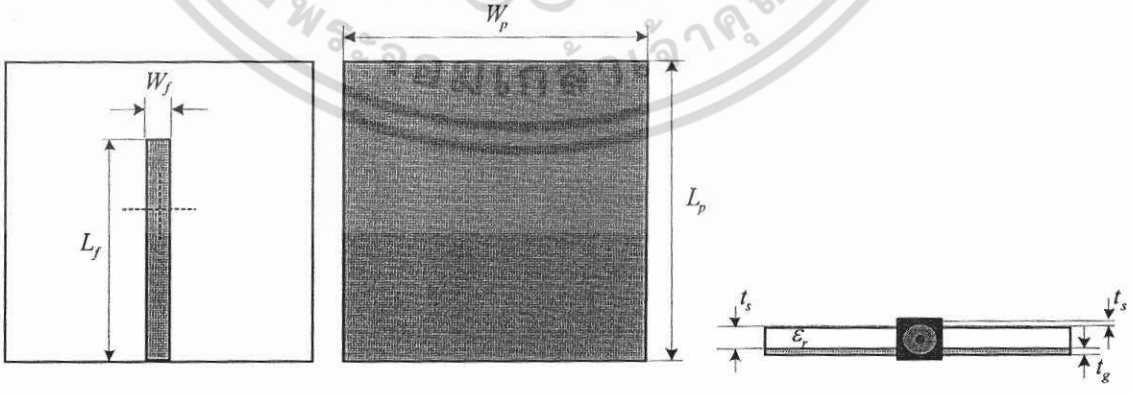
3.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์สายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่มีโพลาไรซ์วงกลมสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ เริ่มด้วยการกำหนดรูปแบบของสายอากาศโดยอาศัยทฤษฎีและสมการในการคำนวณในบทที่ 2 จากนั้นจึงจำลองตัวสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® และปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะเหมาะสมกับความต้องการคือมีอัตราขยายสูง ขนาดกะทัดรัด มีโพลาไรซ์วงกลม และสามารถตอบสนองที่ความถี่ใช้งานได้ดี

3.2 สายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป

3.2.1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป

โครงสร้างสายอากาศที่ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.1 ใช้วัสดุฐานรองที่เป็นไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่สามารถหาได้ง่าย และราคาถูก โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 โดยมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (ε_r) เท่ากับ 4.3 และมีความหนาของวัสดุฐานรอง (t_s) เท่ากับ 1.6 mm มีความหนาของเส้นไมโครสตริป (t_f) เท่ากับ 0.05 mm มีความหนาของระนาบกราวนด์ (t_g) เท่ากับ 0.05 mm มีความกว้างของสายอากาศไมโครสตริป (W_p) เท่ากับ 35 mm และความยาวของสายอากาศไมโครสตริป (L_p) เท่ากับ 45 mm ซึ่งการออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ใช้ส่วนประกอบทั้งสองด้านในการออกแบบ แผ่นวงจรพิมพ์ด้านหนึ่งใช้สำหรับโครงสร้างสายอากาศและสายนำสัญญาณ ส่วนอีกด้านหนึ่งใช้สำหรับการออกแบบเพื่อเพิ่มแบนด์วิดธ์โดยการใช้ร่องเปิดร่องรูปเพชรเพื่อให้ได้สายอากาศที่รองรับช่วงความถี่ 5.725 GHz ถึง 5.875 GHz



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริป (ข) ชั้นระนาบกราวนด์ และ (ค) ภาพด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของโครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยเส้นไมโครสตริปมีความกว้างเท่ากับ (W_f) และความยาวของเส้นไมโครสตริป (L_f) โดยใช้หลักการออกแบบตามทฤษฎีการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริป จากเทคนิคในงานวิจัยที่มีมาก่อนที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 มีข้อดีในการเพิ่มแบนด์วิดธ์ ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.2.2 การปรับอิมพีแดนซ์ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน

ก่อนจะทำการปรับอิมพีแดนซ์และ $|S_{11}|$ ต้องหาค่าเริ่มต้นของสายอากาศเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® ซึ่งจะต้องคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะของเส้นไมโครสตริปจากทฤษฎีในบทที่ 2 เมื่อความหนาของวัสดุฐานรอง (t_s) เท่ากับ 1.6 mm และค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (ε_r) เท่ากับ 4.3 และต้องการความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) เท่ากับ 5.8 GHz ซึ่งเป็นความถี่กลางของช่วงความถี่ 5.725 GHz ถึง 5.875 GHz เนื่องจากสายอากาศนี้ใช้วิธีการป้อนสัญญาณแบบเส้นไมโครสตริปดังนั้นจึงต้องคำนวณหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ เริ่มต้นให้เท่ากับ 50 โอห์ม จากทฤษฎีดังนี้

การคำนวณหาค่าอิมพิแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ ซึ่งมีความยาวเป็นอนันต์จากสมการ (3.1) ถึง (3.6) ซึ่งไม่คิดความหนาของตัวนำ ซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยมากทำให้ได้สมการที่ (3.5) และ (3.6) มีสมการดังนี้

$$W = w + \frac{t_s}{\pi}\left(\ln\left(\left(\frac{2h}{t_s}\right)+1\right)\right) \tag{3.1}$$

$$H = h - 2t \tag{3.2}$$

เมื่อไม่คิดค่าความหนาทำให้ได้

$$W = w \tag{3.3}$$

$$H = h = h_s \tag{3.4}$$

ดังนั้นเมื่อต้องการอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ (Z_o) เท่ากับ 50 โอห์ม โดยมีความสูงของวัสดุฐานรอง (H เท่ากับ t_s) เท่ากับ 1.6 mm และมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (ε_r) เท่ากับ 4.3 แทนค่าลงในสมการที่ (3.1) ถึง (3.4) แล้วทำการเปลี่ยนค่าความกว้างของเส้นไมโครสตริป W_f ซึ่งค่า W_f เท่ากับ W เท่ากับ 3 mm ทำให้ได้ค่า Z_o เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนี้

เมื่อทำการแทนค่า W_f เท่ากับ W เท่ากับ 3 mm จะได้ $\frac{W}{H}$ เท่ากับ $\frac{3}{1.6}$ เท่ากับ $1.875 \geq 1$ ซึ่งต้องเลือกใช้สมการที่ (3.5) และ (3.6) ในการคำนวณดังนี้

เมื่อ $\frac{W}{H} \geq 1$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}\left(\frac{W}{H} + 1.393 + 0.667\ln\left(\frac{W}{H}+1.444\right)\right)^{-1} \tag{3.5}$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\sqrt{1+12\frac{H}{W}}} \tag{3.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่า ε_{eff} โดยการแทนค่า ε_r เท่ากับ 4.3 และ H เท่ากับ t_s เท่ากับ 1.6 mm และ W_f เท่ากับ W เท่ากับ 3 mm ในสมการที่ (3.6)

$$\varepsilon_{eff} = \frac{4.3+1}{2} + \frac{4.3-1}{2\sqrt{1+12\frac{1.6}{3}}} = 3.26$$

นำค่า ε_{eff} เท่ากับ 3.26 และ H เท่ากับ t_s เท่ากับ 1.6 mm และ W_f เท่ากับ W เท่ากับ 3 mm แทนลงในสมการที่ (3.5) ดังนี้

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{3.26}}\left(\frac{3}{1.6}+1.393+0.667\ln\left(\frac{3}{1.6}+1.444\right)\right)^{-1} = 51.32 \text{ โอห์ม}$$

ดังนั้นค่าของการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่มีการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริป โดยมีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นคือ ความกว้างเส้นไมโครสตริป (W_f) เท่ากับ 3 mm ความยาวของเส้นไมโครสตริป (L_f) เท่ากับ 33 mm ความหนาของวัสดุฐานรอง (t_s) เท่ากับ 1.6 mm ความหนาของเส้นไมโครสตริปทองแดง (t_f) เท่ากับ 0.05 mm ความหนาของระนาบกราวนด์ทองแดง (t_g) เท่ากับ 0.05 mm ซึ่งดังจากรูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของเส้นไมโครสตริปในรูปที่ 3.1(ก) และระนาบกราวนด์ในรูปที่ 3.1(ข) ซึ่งมีค่าตัวแปรเริ่มต้นดังตารางที่ 3.1 ซึ่งได้เริ่มต้นพิจารณาที่ความกว้างของสายอากาศเท่ากับ 35 mm และความยาวของสายอากาศเท่ากับ 45 mm และมีความยาวของเส้นไมโครสตริปเริ่มพิจารณาที่ 33 mm เนื่องจากการคำนวณนั้นใช้ค่าความยาวของเส้นไมโครสตริปมีความยาวอนันต์ จากนั้นจึงเริ่มการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อปรับปรุงสายอากาศให้มีคุณลักษณะเหมาะสมกับการใช้งานที่ความถี่กลาง 5.8 GHz

และในส่วนของการสร้างโพลาไรซ์วงกลม คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งจะมีลักษณะเป็นวงกลมที่เป็นฟังก์ชันของเวลา โดยมีเงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลม ดังนี้ คือ

1. ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ
2. องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) ทั้งสองต้องมีขนาดที่เท่ากัน
3. องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\overline{E}$) ทั้งสองต้องมีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\pi}{2}$

ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอนั้นจะนำค่าคุณสมบัติที่ได้องค์ประกอบทางไฟฟ้าในแนวแกน x มีความต่างเฟสกับองค์ประกอบทางไฟฟ้าในแนวแกน y เท่ากับ 90 degree ตลอดทั้ง 360 degree ในระนาบด้านหน้าของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอเพื่อให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

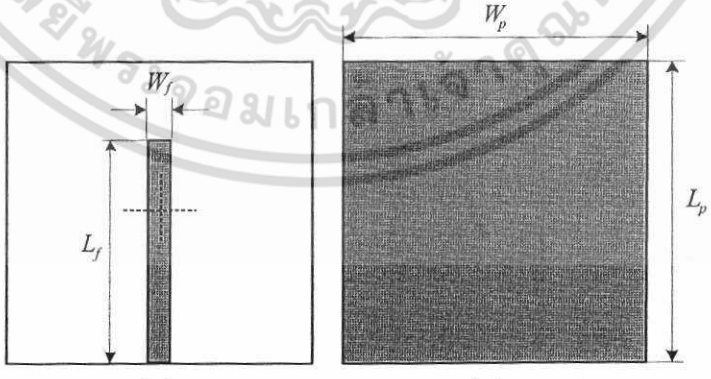
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศเส้นไมโครสตริป

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 5.8 GHz (mm)
W_p	35
L_p	45
W_f	3
L_f	33
t_s	1.6
t_f	0.05
t_g	0.05
ε_r	4.3

จากรูปที่ 3.1 นำค่าจากการคำนวณความกว้างเส้นไมโครสตริปมาจำลองโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® เพื่อหา $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน ซึ่งได้จากการจำลองทำให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 5.8 GHz ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี โดยในขั้นตอนต่อไปใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® ทำการจำลองจากโครงสร้างสายอากาศ ซึ่งมีขั้นตอนในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปเริ่มต้นมีพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ

3.2.2.1 เมื่อปรับความยาวเส้นไมโครสตริป (L_f)

ซึ่งขั้นตอนแรกนั้นจะนำความกว้างของเส้นไมโครสตริปที่ได้จากการคำนวณคือ W_f เท่ากับ 3 mm และ L_p เท่ากับ 45 mm และ W_p เท่ากับ 35 mm จากนั้นจึงได้ทำการจำลองสายอากาศไมโครสตริปจากค่าเริ่มต้นดังกล่าว เพื่อนวิเคราะห์หาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปให้ตอบสนองที่ความถี่ 5.725 GHz ถึง 5.875 GHz ได้ ดังขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

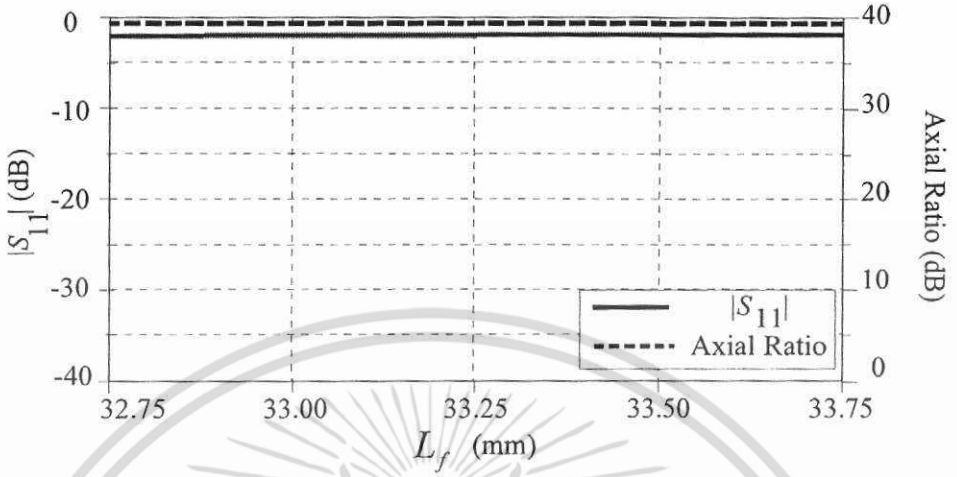


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริป และ (ข) ชั้นระนาบกราวนด์

จากรูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างทางกายภาพและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองสายอากาศไมโครสตริปโดยปรับความยาวของเส้นไมโครสตริป (L_f) จาก 32.75 mm ถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

33.75 mm และนำคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปคือ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนมาพิจารณาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะสามารถให้คุณลักษณะที่เหมาะสมกับความถี่กลางที่ 5.8 GHz ดังรูปที่ 3.3

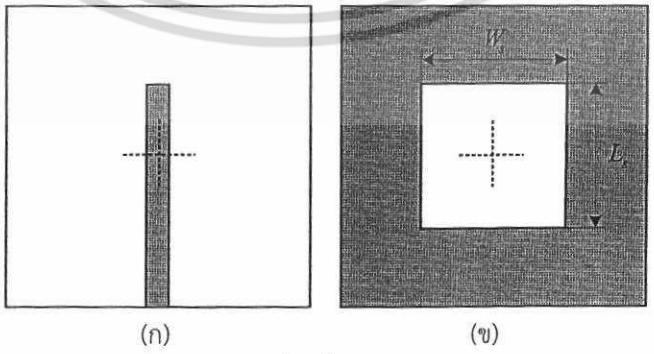


รูปที่ 3.3 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อปรับความยาวเส้นไมโครสตริป (L_f)

จากรูปที่ 3.3 พบว่า $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน ยังไม่มีน้อยกว่า -10 dB และอัตราส่วนแกนต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 dB ซึ่งพบว่าสายอากาศยังให้โพลาไรซ์เชิงเส้นอยู่ และในที่นี้ได้เลือกใช้ความยาวของเส้นไมโครสตริป และเพื่อใช้ความยาวให้พอเหมาะกับร่องสี่เหลี่ยมบนระนาบกราวนด์ในขั้นตอนต่อไป เพื่อให้สายอากาศสามารถตอบสนองกับความถี่กลางใช้งานที่ 5.8 GHz ได้ โดยแสดงในขั้นตอนต่อไป

3.2.2.2 ปรับความกว้างร่องสี่เหลี่ยมจตุรัสแผ่นพิมพ์ (W_s) และความยาวร่องสี่เหลี่ยมจตุรัสแผ่นพิมพ์ (L_s) ของร่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนระนาบกราวนด์

ในขั้นตอนนี้จะทำการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนระนาบกราวนด์ เพื่อปรับปรุง $|S_{11}|$ โดยคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากการเจาะร่องสี่เหลี่ยมบนระนาบกราวนด์นั้นจะส่งผลให้ $|S_{11}|$ ของสายอากาศโดยรวมดีขึ้น คือเข้าใกล้ -10 dB หรือต่ำกว่า -10 dB ได้ดีขึ้น ดังแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมจตุรัสแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริป และ (ข) ชั้นระนาบกราวนด์

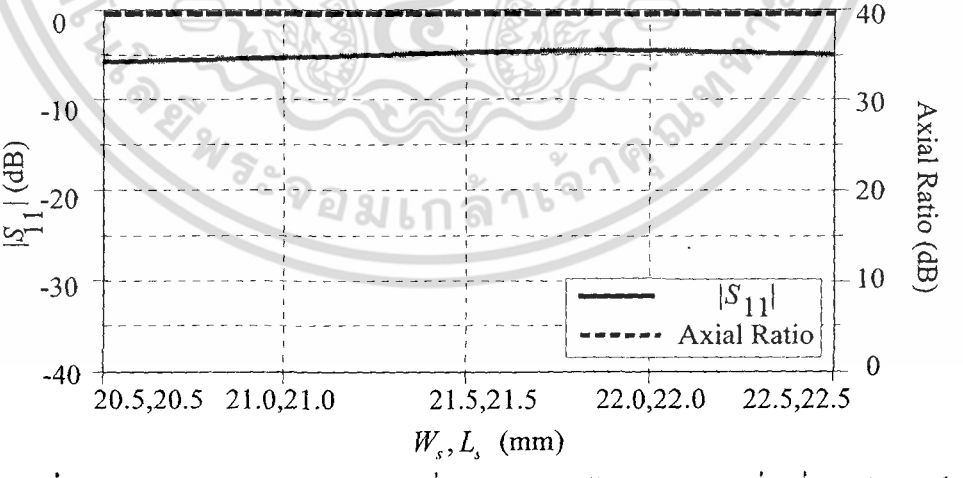
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.4 ได้ทำการจำลองสายอากาศเพิ่มเติมโดยการเจาะร่องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนระนาบกราวนด์ โดยในที่นี้จะเรียกว่า สายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป เพื่อปรับปรุงสายอากาศให้ตอบสนองที่ความถี่กลาง 5.8 GHz

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริป

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 5.8 GHz (mm)
W_p	35
L_p	45
W_f	3
L_f	33.25
t_s	1.6
t_f	0.05
t_g	0.05
ε_r	4.3
W_s	vary
L_s	vary

จากตารางที่ 3.2 ได้คงพารามิเตอร์จากการจำลองสายอากาศดังตารางที่ 3.1 ไว้ และทำการปรับความกว้างของร่องรูปสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ (W_s) และความยาวของร่องรูปสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ (L_s) ซึ่งเท่ากันโดยทำการปรับจาก 20.5 mm ถึง 22.5 mm ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อปรับความกว้างของร่องรูปสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ (W_s) และความยาวของร่องรูปสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ (L_s)

จากรูปที่ 3.5 พบว่าคุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปนั้นยังมากกว่าค่ามาตรฐานอยู่ทุกค่า ซึ่งจากการจำลองสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปพบว่าเมื่อค่า (W_s, L_s) นั้นเมื่อมีขนาดเล็กจะให้ $|S_{11}|$ ที่ดีในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่สูงและเมื่อ (W_s, L_s) มีขนาดใหญ่จะให้ $|S_{11}|$ ที่ดีในช่วงความถี่ต่ำลงตามลำดับ ซึ่งค่าที่มี $|S_{11}|$ เหมาะสมคือ 21.5 mm เนื่องจากมีค่าดังกล่าวมีผลให้ $|S_{11}|$ ลดต่ำลงได้แต่ยังไม่ได้ตามความถี่ 5.8 GHz และยังคงมีอัตราส่วนแกน ที่มากกว่า 3 dB ซึ่งพบว่าสายอากาศยังให้โพลาไรซ์เชิงเส้นอยู่ จึงทำการพิจารณาพารามิเตอร์เพิ่มเติมต่อไป

3.2.2.3 ปรับมุมหมุนร่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนระนาบกราวนด์ (α)

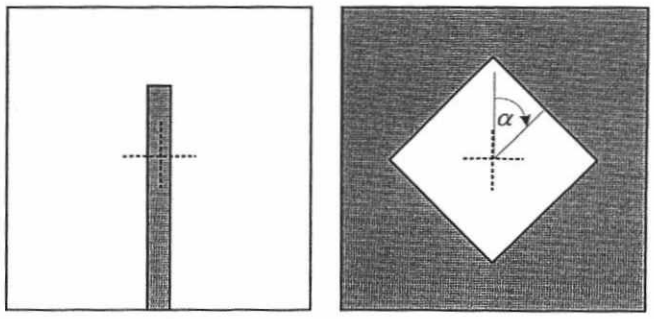
ในขั้นตอนนี้จะทำการปรับมุมหมุนร่องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนระนาบกราวนด์ ในที่นี้เรียกว่าสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป ซึ่งทำการหมุนร่องสี่เหลี่ยมจตุรัสแผ่นพิมพ์จากแนวแกน y จาก 0 องศา ถึง 90 องศา เพื่อพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศร่องรูปข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 5.8 GHz (mm)
W_p	35.00
L_p	45.00
W_f	3.00
L_f	33.00
t_s	1.60
t_f	0.05
t_g	0.05
ε_r	4.30
W_s	21.5
L_s	21.5
α	vary

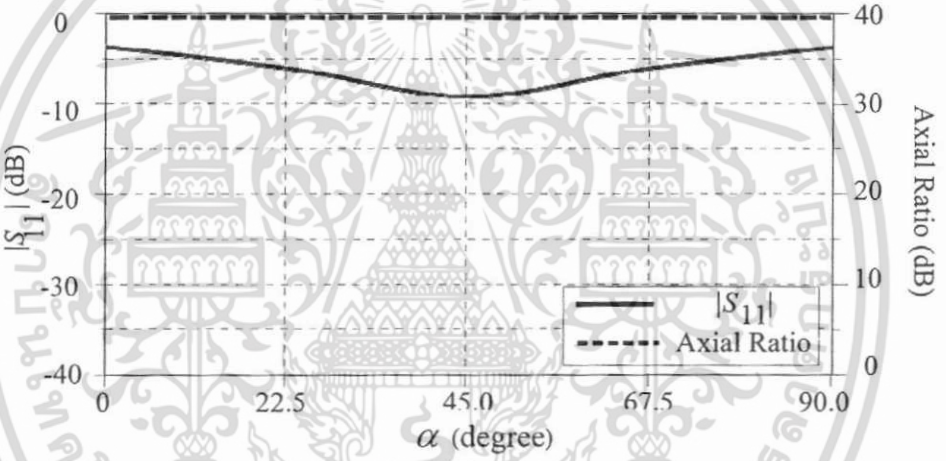
จากตารางที่ 3.3 ได้คงพารามิเตอร์จากการจำลองสายอากาศดังตารางที่ 3.2 ไว้ และทำการปรับมุมหมุนร่องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนระนาบกราวนด์ โดยทำการปรับจากแนวแกน y จาก 0 องศา ถึง 90 องศา ดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริป และ (ข) ชั้นระนาบกราวนด์

จากรูปที่ 3.6 ได้ทำการจำลองสายอากาศเพิ่มเติมโดยการหมุนร่องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนระนาบกราวนด์ เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของสายอากาศให้ตอบสนองที่ความถี่ 5.8 GHz และมีผลการจำลองดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อปรับมุมหมุนร่องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบน

จากรูปที่ 3.7 พบว่าคุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปสี่เหลี่ยมแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปจากการจำลองพบว่า เมื่อ α มีเท่ากับ 45 องศา จะให้ $|S_{11}|$ ที่ต่ำลงมากกว่า $|S_{11}|$ ที่มุมอื่นๆ แต่ยังไม่ได้ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB จึงทำการปรับพารามิเตอร์เพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่ความถี่ใช้งานคือ 5.8 GHz ซึ่งพบว่าสายอากาศยังให้โพลาไรซ์เชิงเส้นอยู่ ดังรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.2.2.4 ปรับระยะตัดมุมของร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์ (L_c)

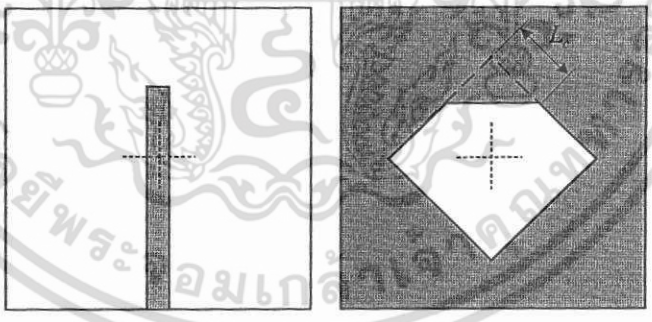
ในขั้นตอนนี้จะทำการปรับระยะตัดมุมของร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์ ในที่นี้เรียกว่าสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป จากด้านมุมบนของระนาบกราวนด์เพื่อพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศอ้างอิงพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 5.8 GHz (mm)
W_p	35
L_p	45
W_f	3
L_f	33
t_s	1.6
t_f	0.05
t_g	0.05
ε_r	4.3
W_s	21.5
L_s	21.5
α	45 องศา
L_c	vary

โดยตารางที่ 3.4 จะแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป โดยทำการปรับระยะตัดมุมของร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์ (L_c) จาก 5 mm ถึง 10 mm จากมุมบนของร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด จึงได้รูปร่างของร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 3.8

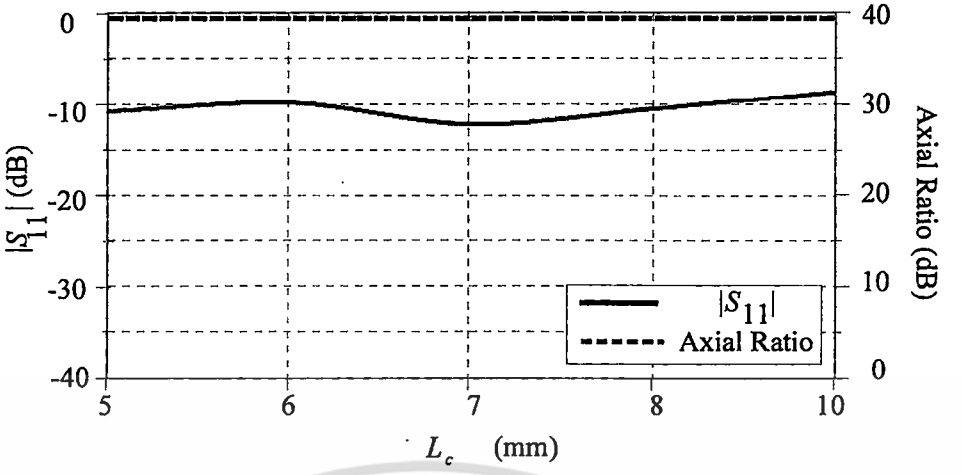


(ก) (ข)

รูปที่ 3.8 โครงสร้างของสายอากาศสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริป และ (ข) ชั้นระนาบกราวนด์

เมื่อได้ทำการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปด้วยโปรแกรมจำลองแล้ว จึงนำคุณลักษณะต่างๆ มาพิจารณาดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.9

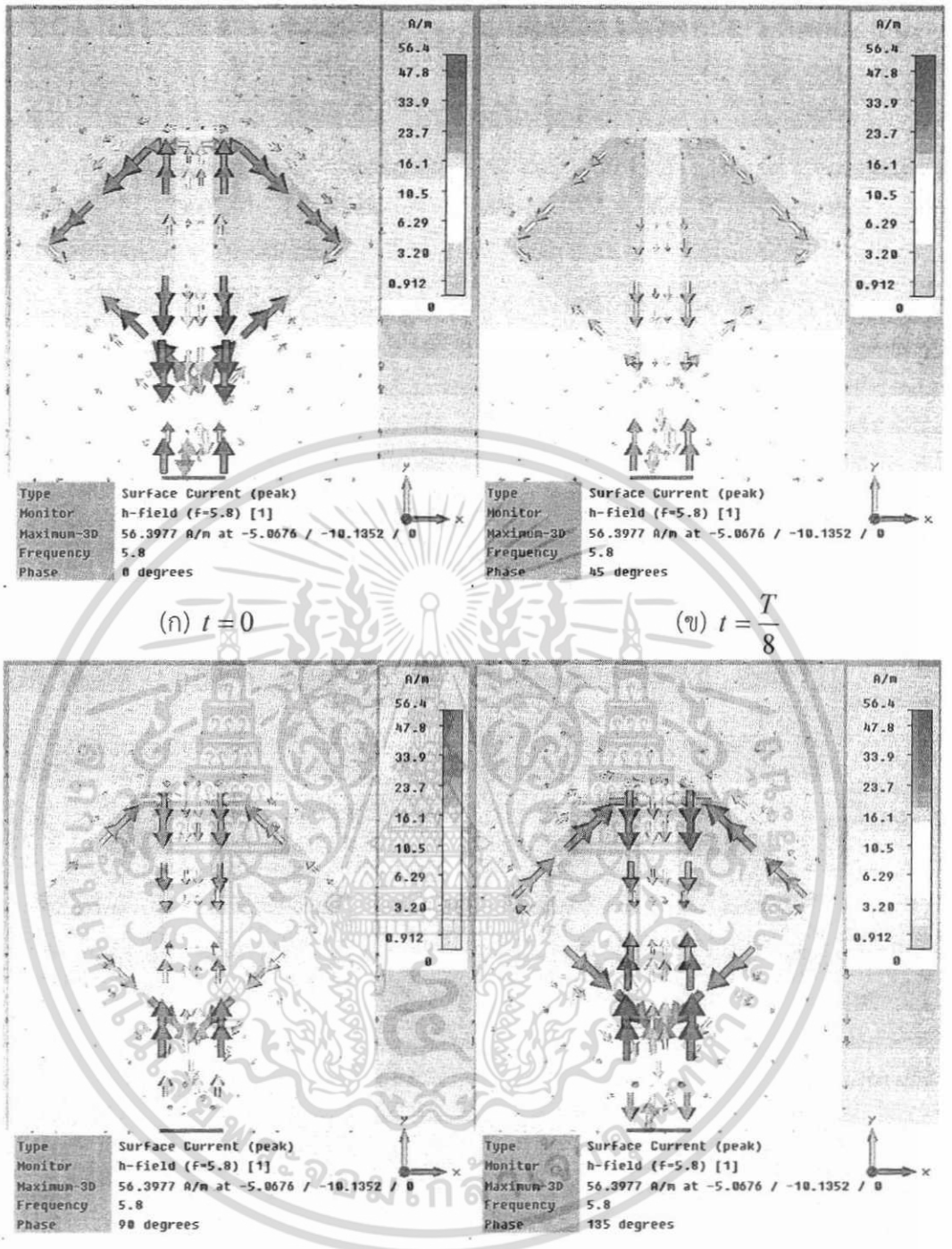
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อปรับระยะตัดมุมของร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์ (L_c)

จากรูปที่ 3.9 พบว่า $|S_{11}|$ มีผลดีขึ้นที่ระยะตัดมุมของร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์ (L_c) เท่ากับ 7 mm แต่อัตราส่วนแกน ยังมีเท่ากับ 40 dB ในทุกการปรับระยะตัดมุมของร่องสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแผ่นพิมพ์อยู่ จึงได้นำการไหลของกระแสไฟฟ้าบนผิวตัวนำในส่วนต่างๆ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปมาพิจารณาร่วมกับการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ในการวิเคราะห์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างสายอากาศที่สามารถรองรับการใช้งานในความถี่กลาง 5.8 GHz ซึ่งพบว่าสายอากาศยังให้โพลาไรซ์เชิงเส้นอยู่ ดังแสดงการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

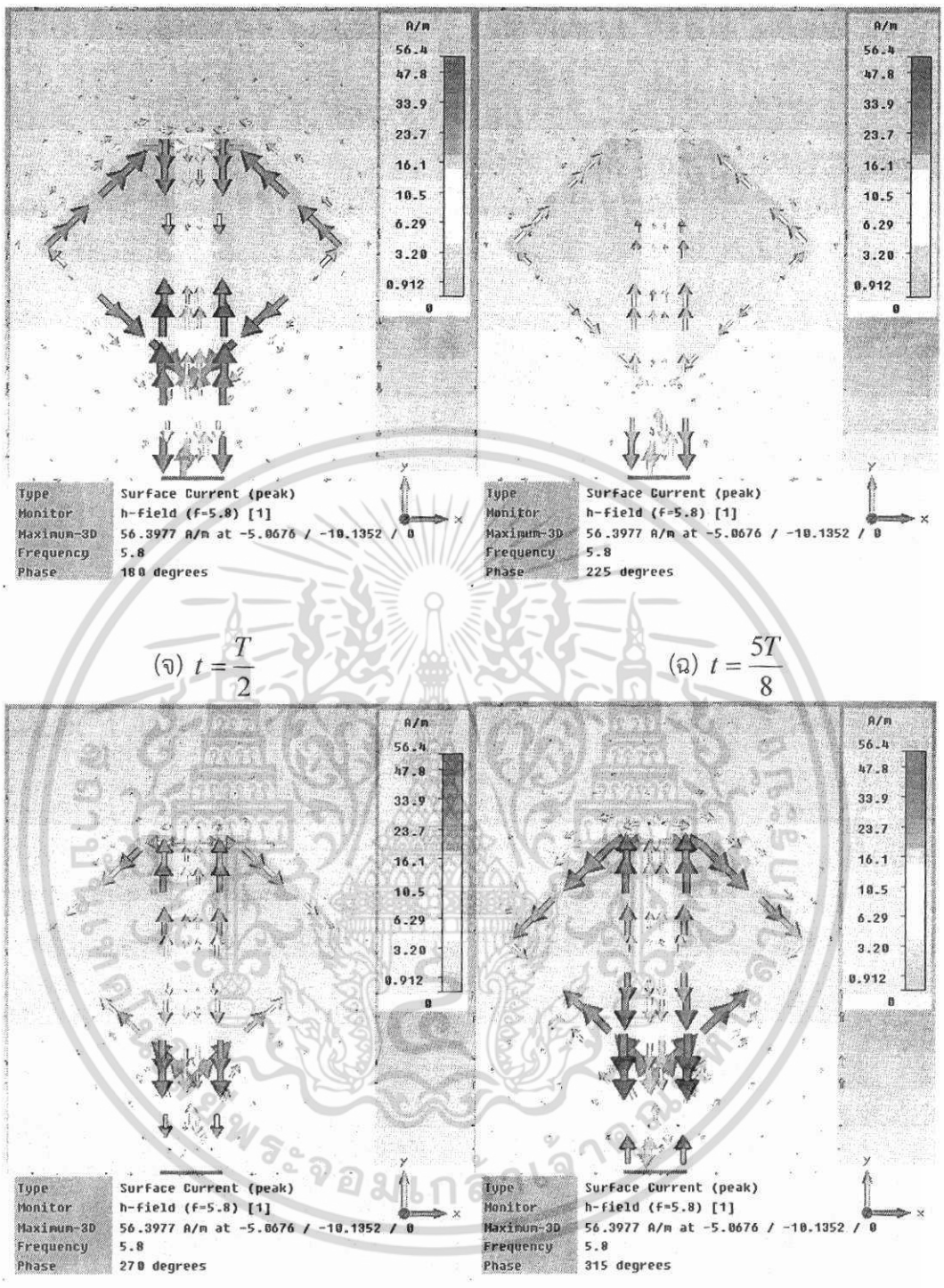


(ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$

(ค) $t = \frac{T}{4}$ (ง) $t = \frac{3T}{8}$

รูปที่ 3.10 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่เวลา (t) ต่างๆ (ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$ (ค) $t = \frac{T}{4}$ และ (ง) $t = \frac{3T}{8}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) $t = \frac{T}{2}$ (ฉ) $t = \frac{5T}{8}$

(ช) $t = \frac{3T}{4}$ (ซ) $t = \frac{7T}{8}$

รูปที่ 3.10 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่เวลา (t) ต่าง ๆ (จ) $t = \frac{T}{2}$ (ฉ) $t = \frac{5T}{8}$ (ช) $t = \frac{3T}{4}$ และ (ซ) $t = \frac{7T}{8}$ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 แสดงกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปในขั้นตอนการปรับระยะตัดขอบร่องสี่เหลี่ยม (L_c) ที่เวลา (t) ต่าง ๆ พบว่ากระแสที่ไหลบนเส้นไมโครสตริปตัวแพร่กระจายคลื่นที่เวลา (t) ต่าง ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสตลอดเวลา กล่าวคือเวลา (t) ต่าง ๆ จะมีทิศทางการไหลของกระแสบนเส้นไมโครสตริปตัวแพร่กระจายคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปมีทิศทางโดยประมาณได้ดังนี้ ที่เวลา (t) เท่ากับ 0 มีทิศของกระแส ⬇ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{8}$ มีทิศของกระแส ⬇ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{4}$ มีทิศของกระแส ⬆ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{3T}{8}$ มีทิศของกระแส ⬆ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{2}$ มีทิศของกระแส ⬆ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{5T}{8}$ มีทิศของกระแส ⬆ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{3T}{4}$ มีทิศของกระแส ⬇ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{7T}{8}$ มีทิศของกระแส ⬇ และที่เวลา (t) เท่ากับ T มีทิศของกระแส ⬇ ดังนั้นสามารถคาดเดาได้ว่าการไหลของกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงไปทุกเวลา (t) นั้นยังไม่สามารถทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลมได้ ประกอบกับอัตราส่วนแกนยังมีมากกว่า 3 dB ต่อไปโดยใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.5

3.2.2.5 ปรับมุมหมุนเส้นไมโครสตริป (β)

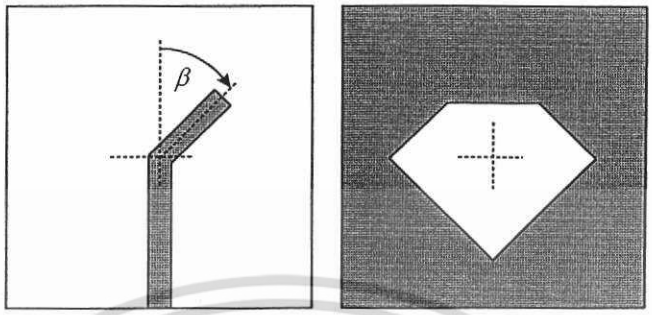
ในขั้นตอนนี้จะทำการปรับมุมหมุนเส้นไมโครสตริปหักงอ ในที่นี้เรียกว่าสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ โดยให้จุดหมุนของเส้นไมโครสตริปหักงออยู่ที่จุด (0,0) เนื่องจากเป็นจุดกึ่งกลางของสายอากาศ เพื่อพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศอ้างอิงพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 5.8 GHz (mm)
W_p	35
L_p	45
W_f	3
L_f	33
t_s	1.6
t_f	0.05
t_g	0.05
ε_r	4.3
W_s	21.5
L_s	21.5
α	0°
L_c	7
β	vary

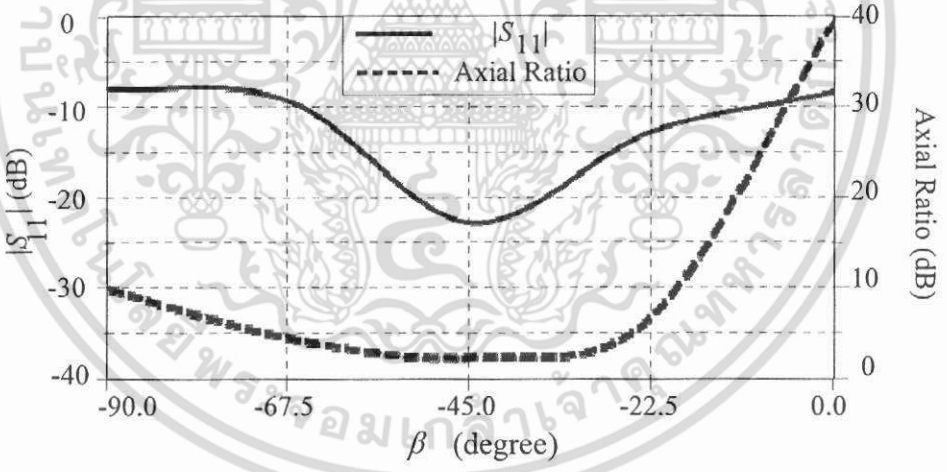
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยตารางที่ 3.5 จะแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ โดยทำการปรับมุมหมุนเส้นไมโครสตริปหักงอ β จาก 0 องศา ถึง 90 องศา จึงได้รูปร่างของเส้นไมโครสตริปหักงอ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ (ก) ชั้นเส้นไมโครสตริปหักงอ และ (ข) ชั้นระนาบกราวนด์

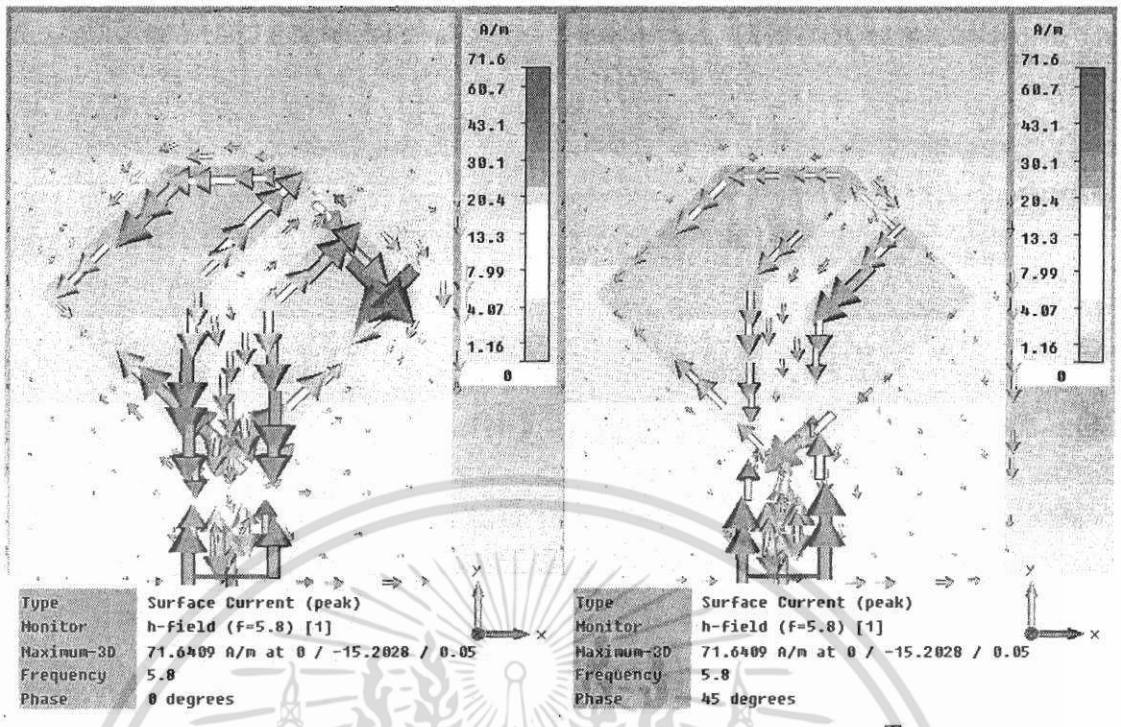
จากรูปที่ 3.11 เมื่อได้ทำการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปด้วยโปรแกรมจำลองแล้ว จึงนำคุณลักษณะต่างๆ มาพิจารณาดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.12



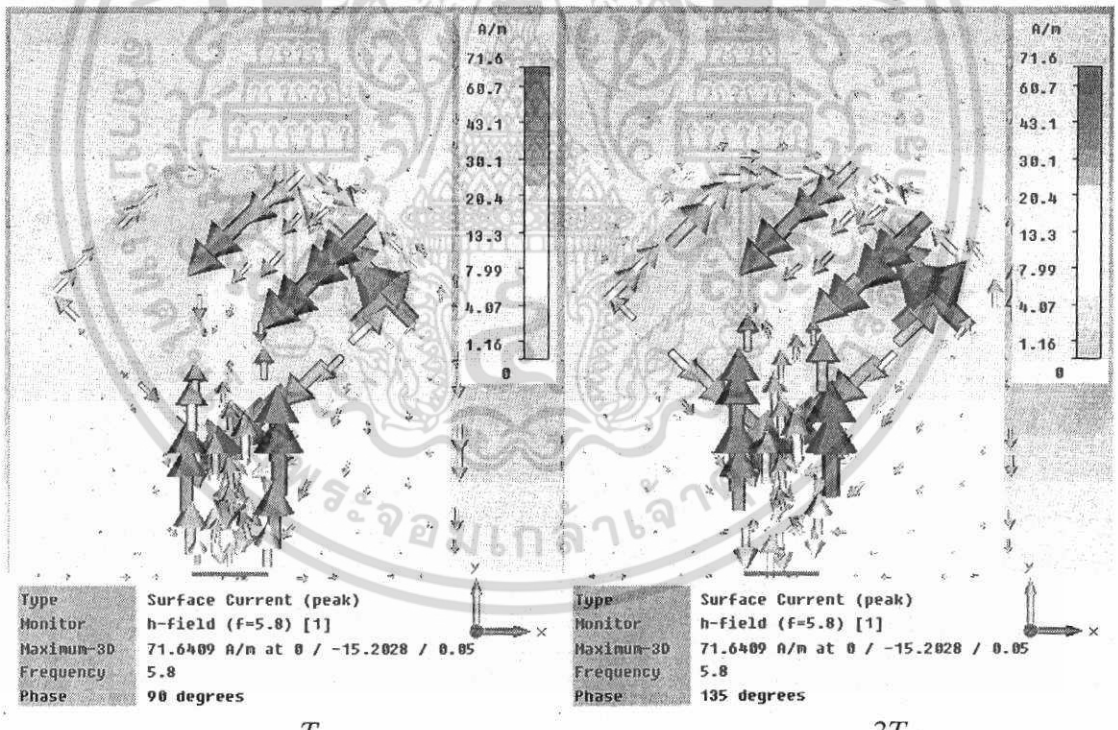
รูปที่ 3.12 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อปรับมุมหมุนเส้นไมโครสตริปหักงอ (β)

จากรูปที่ 3.12 พบว่าเมื่อปรับมุมหมุนเส้นไมโครสตริปหักงอ (β) แล้วมีผลทำให้คุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ ประกอบด้วย $|S_{11}|$ ที่มีเท่ากับ -23 dB ที่มุมหมุนเส้นไมโครสตริปหักงอ (β) เท่ากับ -45° ซึ่งให้คุณสมบัติของสายอากาศที่ดีที่สุด และสามารถให้อัตราส่วนแกน ที่ต่ำกว่า 3 dB ได้เช่นกัน ซึ่งพบว่าสายอากาศยังให้โพลาไรซ์วงกลมแล้ว โดยที่คุณลักษณะที่ได้จากการปรับมุมหมุนเส้นไมโครสตริปหักงอ (β) อื่นๆ ยังมีมากกว่าคุณลักษณะมาตรฐานอยู่ และสอดคล้องกับการไหลของกระแสบนผิวตัวนำของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ ดังแสดงในรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



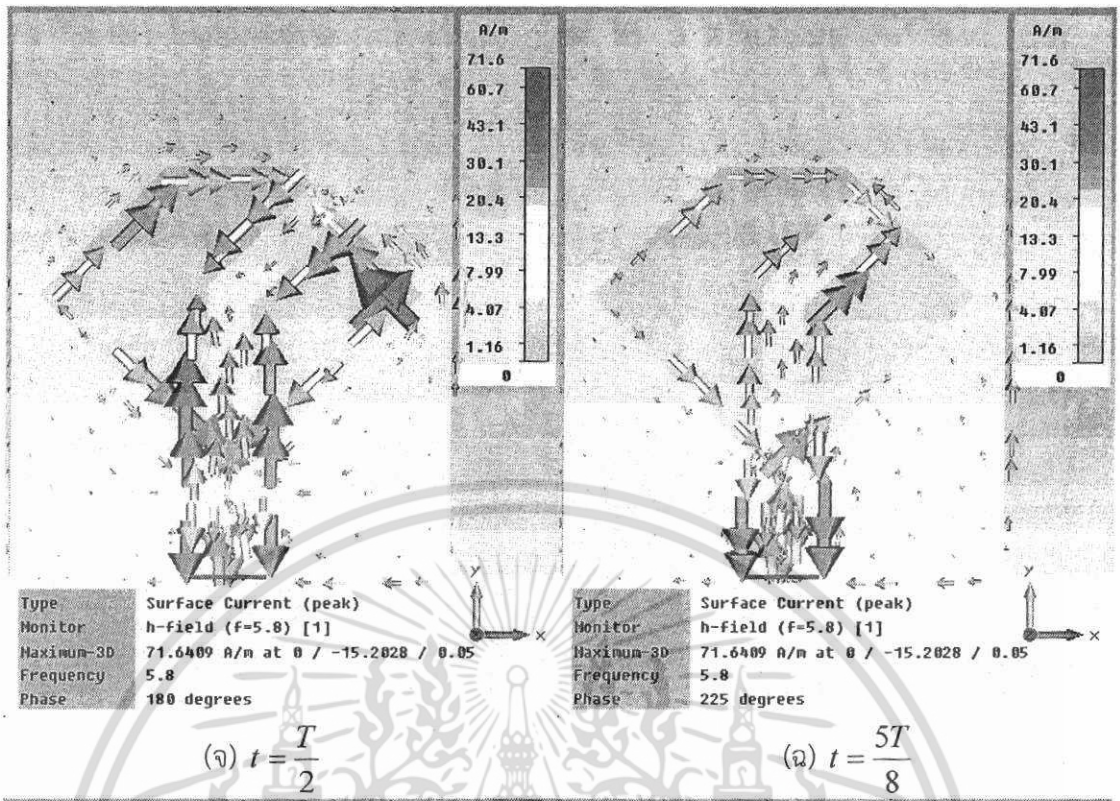
(ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$



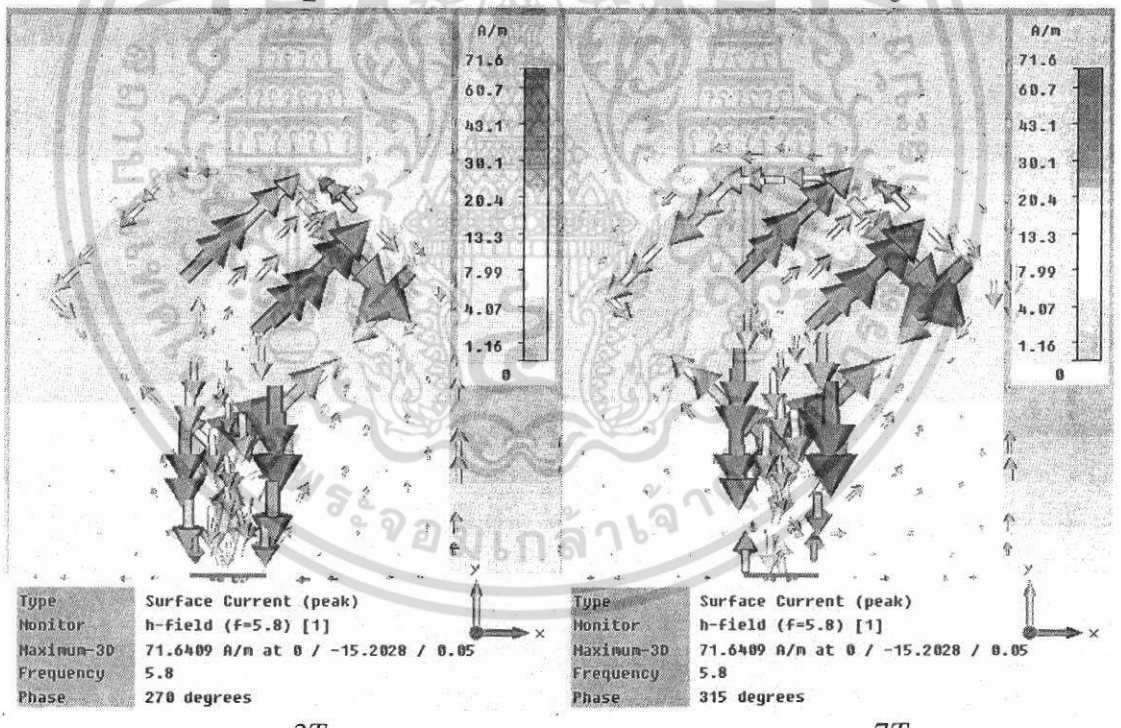
(ค) $t = \frac{T}{4}$ (ง) $t = \frac{3T}{8}$

รูปที่ 3.13 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่เวลา (t) ต่าง ๆ (ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$ (ค) $t = \frac{T}{4}$ และ (ง) $t = \frac{3T}{8}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) $t = \frac{T}{2}$ (ฉ) $t = \frac{5T}{8}$



(ช) $t = \frac{3T}{4}$ (ซ) $t = \frac{7T}{8}$

รูปที่ 3.13 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่เวลา (t) ต่างๆ (จ) $t = \frac{T}{2}$ (ฉ) $t = \frac{5T}{8}$ (ช) $t = \frac{3T}{4}$ และ (ซ) $t = \frac{7T}{8}$ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.13 แสดงกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอในขั้นตอนการปรับมุมหมุนเส้นไมโครสตริปหักงอ (β) ที่เวลา (t) ต่าง ๆ พบว่ากระแสที่ไหลบนเส้นไมโครสตริปหักงอตัวแพร่กระจายคลื่นที่เวลา (t) ต่าง ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสตลอดเวลา กล่าวคือเวลา (t) ต่าง ๆ จะมีทิศทางการไหลของกระแสบนเส้นไมโครสตริปหักงอตัวแพร่กระจายคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปมีทิศทางโดยประมาณได้ดังนี้ ที่เวลา (t) เท่ากับ 0 มีทิศของกระแส ↘ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{8}$ มีทิศของกระแส ↓ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{4}$ มีทิศของกระแส ↙ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{3T}{8}$ มีทิศของกระแส ← ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{2}$ มีทิศของกระแส ↖ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{5T}{8}$ มีทิศของกระแส ↑ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{3T}{4}$ มีทิศของกระแส ↗ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{7T}{8}$ มีทิศของกระแส → และที่เวลา (t) เท่ากับ T มีทิศของกระแส ↘ ดังนั้นการไหลของกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงไปทุกเวลา (t) นั้นยังสามารถทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลมได้ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนแกนที่มีน้อยกว่า 3 dB เช่นกัน

จากนั้นจึงพิจารณาถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่ได้เนื่องจากตัวสายอากาศเป็นแบบเจาะร่องบนระนาบกราวนด์จึงส่งผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง (Bi-directional) ซึ่งไม่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ซึ่งนิยมใช้งานในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (Uni-directional) จึงพิจารณาเพิ่มตัวสะท้อน (Reflector) ที่ด้านหลังของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ เพื่อปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอจากเดิมที่เป็นแบบสองทิศทางให้เป็นแบบทิศทางเดียว ดังรายละเอียดในขั้นตอนต่อไป

3.2.2.6 ปรับความกว้างและความยาวของตัวสะท้อน (W_r, L_r)

ในขั้นตอนนี้จะทำการความกว้างและความยาวของตัวสะท้อน (W_r, L_r) โดยให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอกับตัวสะท้อน (h_d) ห่างกันเท่ากับ 11 mm เพื่อพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศอ้างอิงพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงตารางที่ 3.6

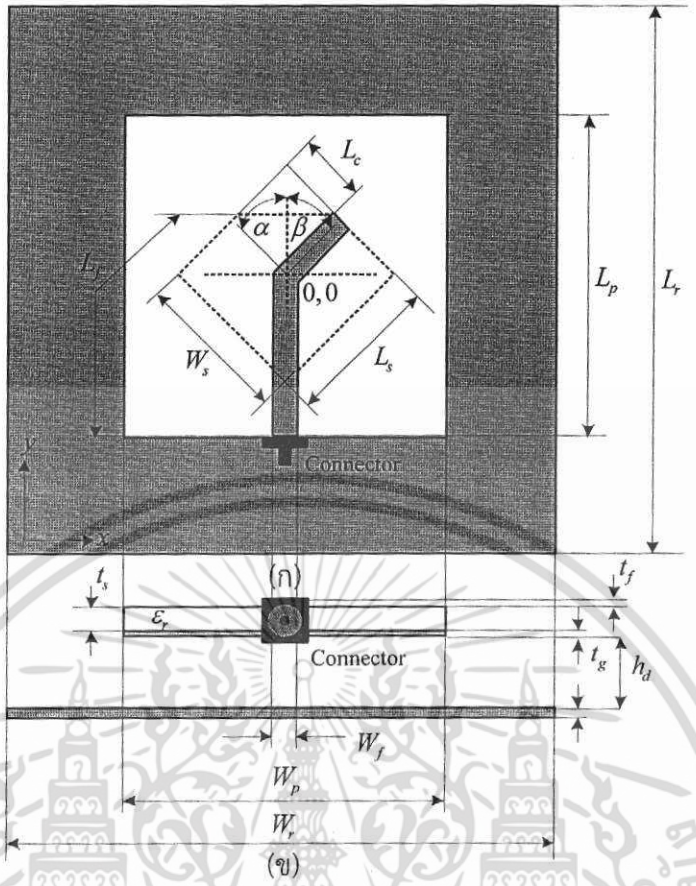
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศเส้นไมโครสตริปหักงอ

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 5.8 GHz (mm)
W_p	35
L_p	45
W_f	3
L_f	33
t_s	1.6
t_f	0.05
t_g	0.05
ε_r	4.3
W_s	21.5
L_s	21.5
α	45 องศา
L_c	7
β	-45 องศา
W_r	vary
L_r	vary
h_d	11

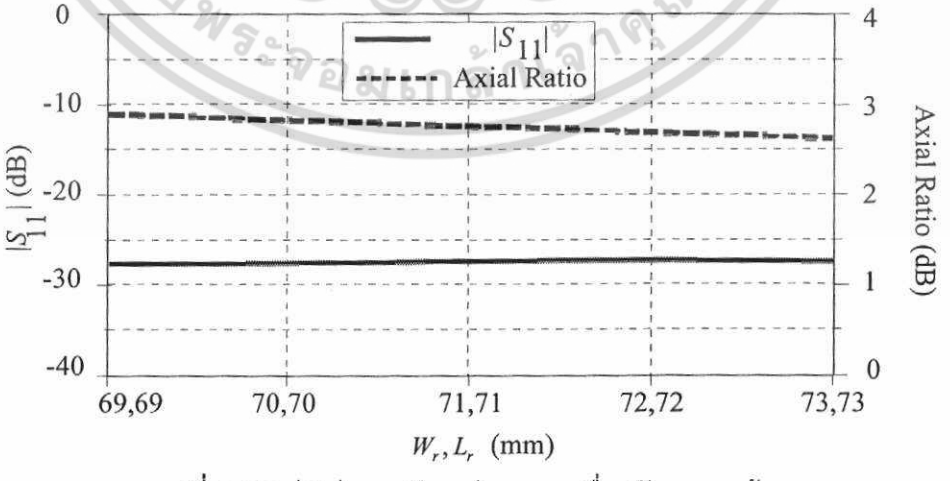
โดยตารางที่ 3.6 จะแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ โดยทำการปรับความกว้างและความยาวของตัวสะท้อน (W_r, L_r) โดยกำหนด (h_d) เท่ากับ 11 mm ดังแสดงโครงสร้างสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอในรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 โครงสร้างสายอากาศสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (ก) ด้านหน้า และ (ข) ด้านล่าง

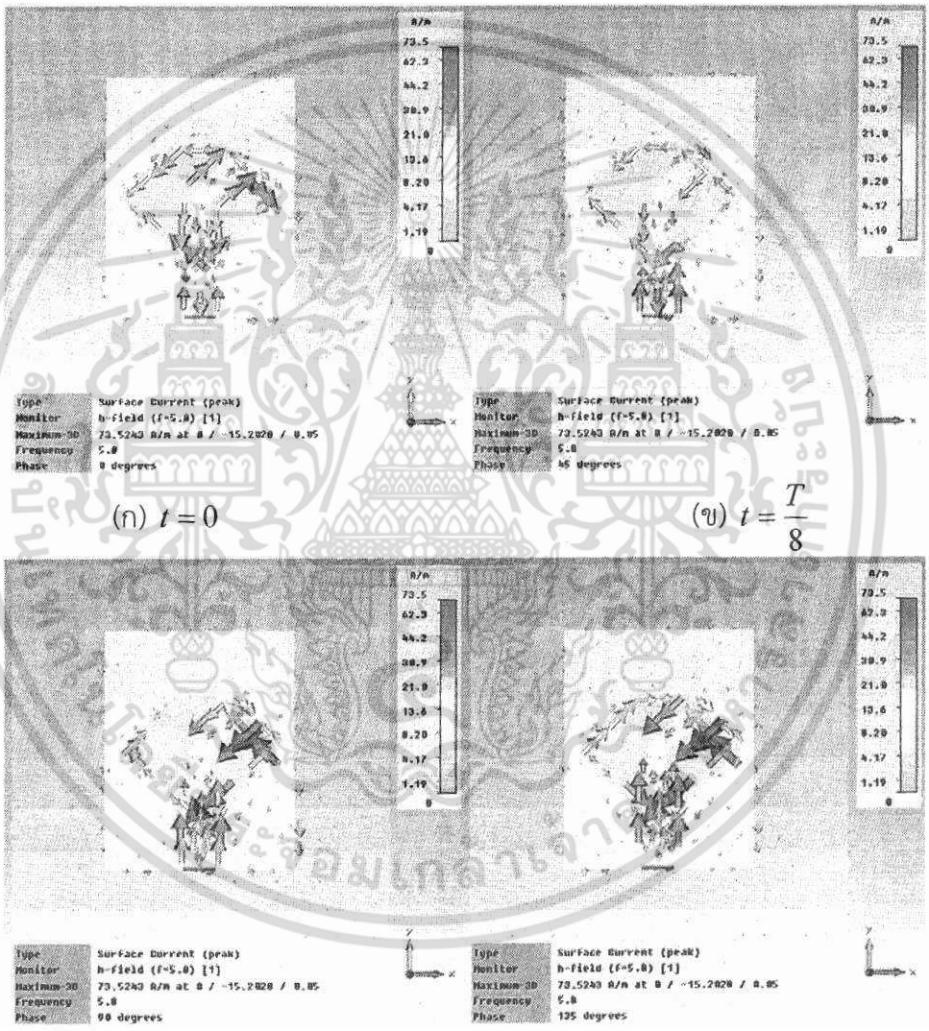
เมื่อได้ทำการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวด้วยโปรแกรมจำลองแล้ว จึงนำคุณลักษณะต่างๆ มาพิจารณาดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน เมื่อปรับความกว้างและความยาวของตัวสะท้อน (W_r, L_r)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.15 พบว่าเมื่อปรับความกว้างและความยาวของตัวสะท้อน (W_r, L_r) แล้วมีผลทำให้คุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ ประกอบด้วย $|S_{11}|$ ที่มีเท่ากับ -28 dB ที่ความกว้างและความยาวของตัวสะท้อน (W_r, L_r) เท่ากับ 71 mm และสามารถให้อัตราส่วนแกน ที่ต่ำกว่า 3 dB ได้เช่นกัน โดยที่คุณลักษณะที่ได้จากการปรับความกว้างและความยาวของตัวสะท้อน (W_r, L_r) อื่นๆ ที่มี $|S_{11}|$ และ อัตราส่วนแกน น้อยกว่า 3 dBเช่นกัน แต่ยังมีอัตราส่วนแกน ที่ความถี่ขอบล่างคือ 5.725 GHz และความถี่ขอบบนคือ 5.875 GHz อยู่ จึงสอดคล้องกับการไหลของกระแสบนผิวตัวนำของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่ความถี่ 5.8 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.16



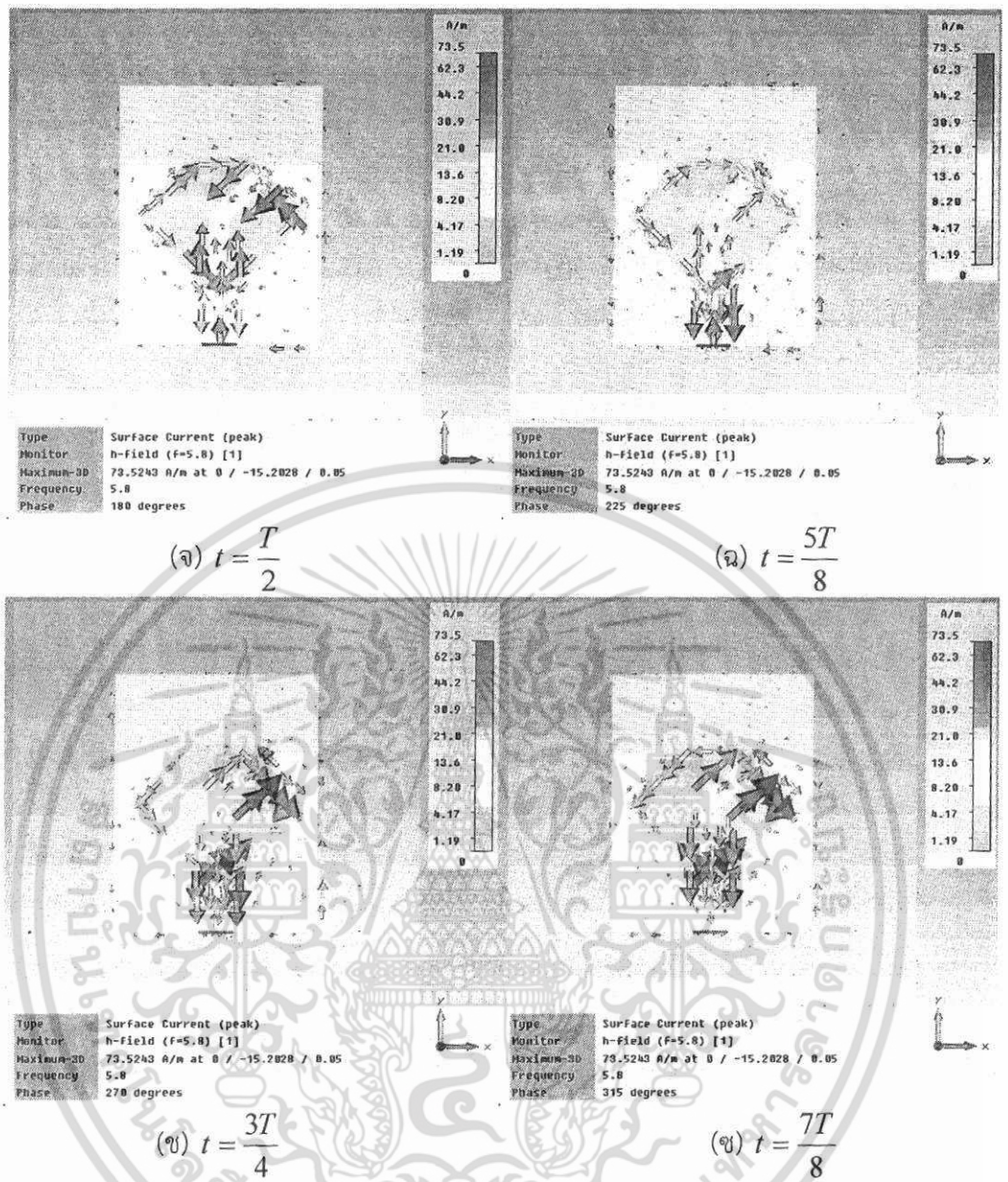
(ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$

(ค) $t = \frac{T}{4}$ (ง) $t = \frac{3T}{8}$

รูปที่ 3.16 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นวงกลมที่เวลา (t) ต่าง ๆ

(ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$ (ค) $t = \frac{T}{4}$ และ (ง) $t = \frac{3T}{8}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) $t = \frac{T}{2}$ (ฉ) $t = \frac{5T}{8}$

(ช) $t = \frac{3T}{4}$ (ซ) $t = \frac{7T}{8}$

รูปที่ 3.16 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นวงกลมที่เวลา (t) ต่าง ๆ (จ) $t = \frac{T}{2}$ (ฉ) $t = \frac{5T}{8}$ (ช) $t = \frac{3T}{4}$ และ (ซ) $t = \frac{7T}{8}$ (ต่อ)

จากรูปที่ 3.16 แสดงกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวในขั้นตอนการปรับความกว้างและความยาวของตัวสะท้อน (W_r, L_r) ที่เวลา (t) ต่าง ๆ พบว่ากระแสที่ไหลบนเส้นไมโครสตริปหักงอตัวแพร่กระจายคลื่นที่เวลา (t) ต่าง ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสตลอดเวลา กล่าวคือเวลา (t) ต่าง ๆ จะมีทิศทางการไหลของกระแสบนเส้นไมโครสตริปหักงอตัวแพร่กระจายคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปมีทิศทางโดยประมาณได้ดังนี้ ที่เวลา (t) เท่ากับ 0 มีทิศของกระแส ↘ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{8}$ มีทิศของกระแส ↓ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{4}$ มีทิศของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

↙ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{3T}{8}$ มีทิศของกระแส ← ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{2}$ มีทิศของกระแส ↖ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{5T}{8}$ มีทิศของกระแส ↑ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{3T}{4}$ มีทิศของกระแส ↗ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{7T}{8}$ มีทิศของกระแส → และที่เวลา (t) เท่ากับ T มีทิศของกระแส ↘ ดังนั้นการไหลของกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงไปทุกเวลา (t) นั้นยังสามารถทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลมได้ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนแกนที่มีน้อยกว่า 3 dB เช่นกัน จึงสามารถใส่ตัวสะท้อนคลื่นที่ด้านหลังของสายอากาศได้โดยส่งผลกระทบกับคุณลักษณะของสายสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอในปริมาณน้อย ระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ในขั้นตอนต่อไปจะแสดงขั้นตอนการปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ โดยใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.7

3.2.2.7 ปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (h_d)

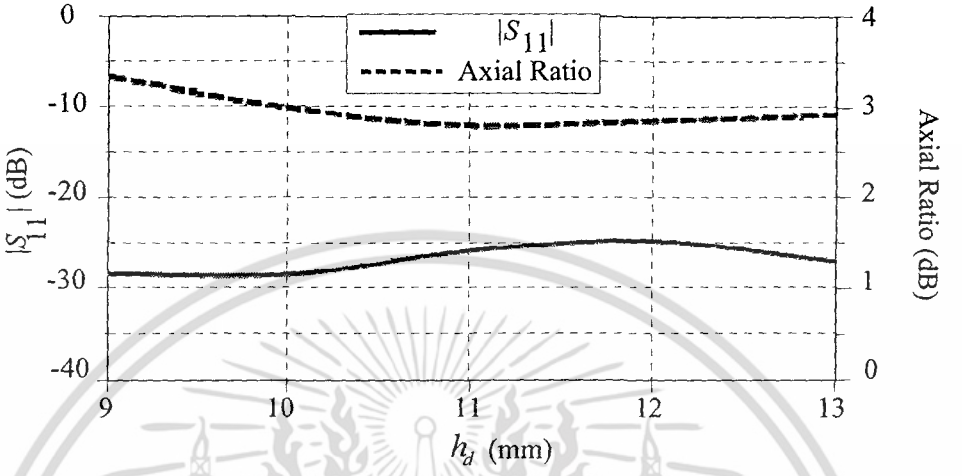
จากการปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (h_d) ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 5.8 GHz (mm)
W_p	35
L_p	45
W_f	3
L_f	33
t_s	1.6
t_f	0.05
t_g	0.05
ε_r	4.3
W_s	21.5
L_s	21.5
α	0 องศา
L_c	7
β	-45 องศา
W_r	71
L_r	71
h_d	vary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

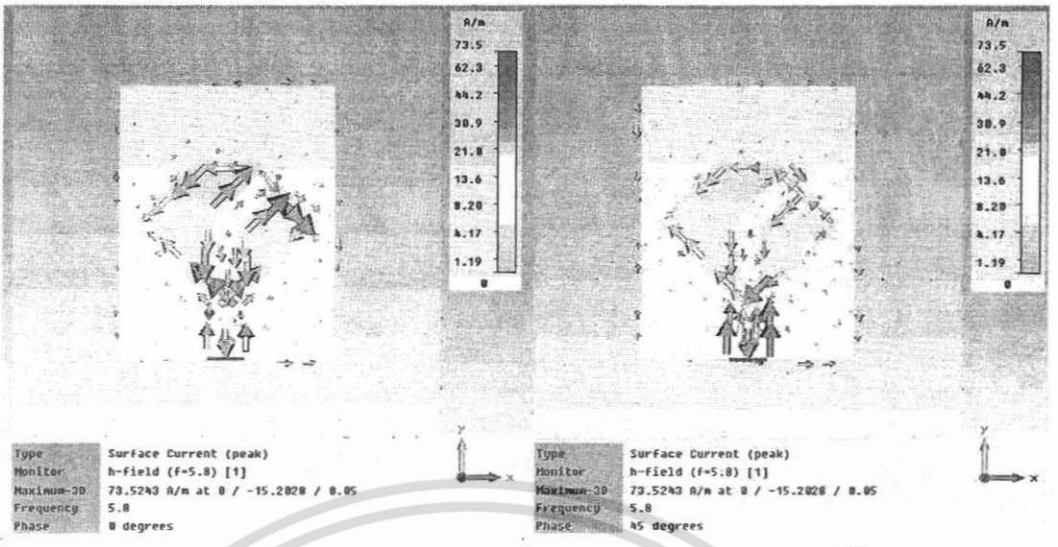
โดยตารางที่ 3.7 จะแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยทำการปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.17



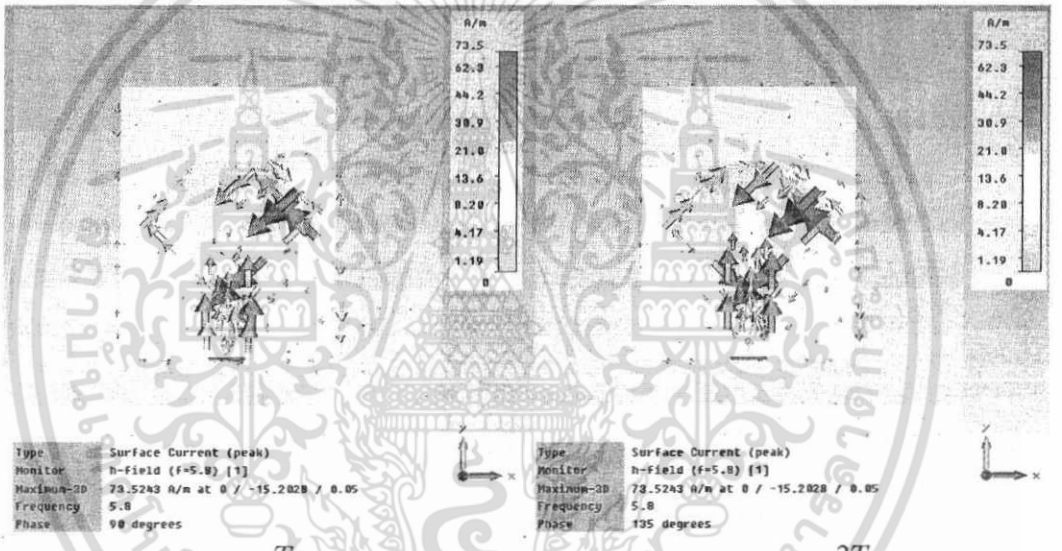
รูปที่ 3.17 $|S_{11}|$ และ อัตราส่วนแกน ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (h_d)

จากรูปที่ 3.17 พบว่าเมื่อปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (h_d) แล้วมีผลทำให้คุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ ประกอบด้วย $|S_{11}|$ ที่มีเท่ากับ -26 dB ที่ และสามารถให้อัตราส่วนแกน ที่ต่ำกว่า 3 dB ได้เช่นกัน โดยที่คุณลักษณะที่ได้จากการปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (h_d) อื่นๆ ที่มีคุณลักษณะมาตรฐานแล้วแต่เพียงเฉพาะที่ความถี่กลาง 5.8 GHz เท่านั้น แต่ยังมีคุณลักษณะมาตรฐานมากกว่ามาตรฐานที่ความถี่ขอบล่างที่ 5.725 GHz และความถี่ขอบบน 5.875 GHz อยู่ ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวสอดคล้องกับการไหลของกระแสบนผิวตัวนำของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอดังแสดงในรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



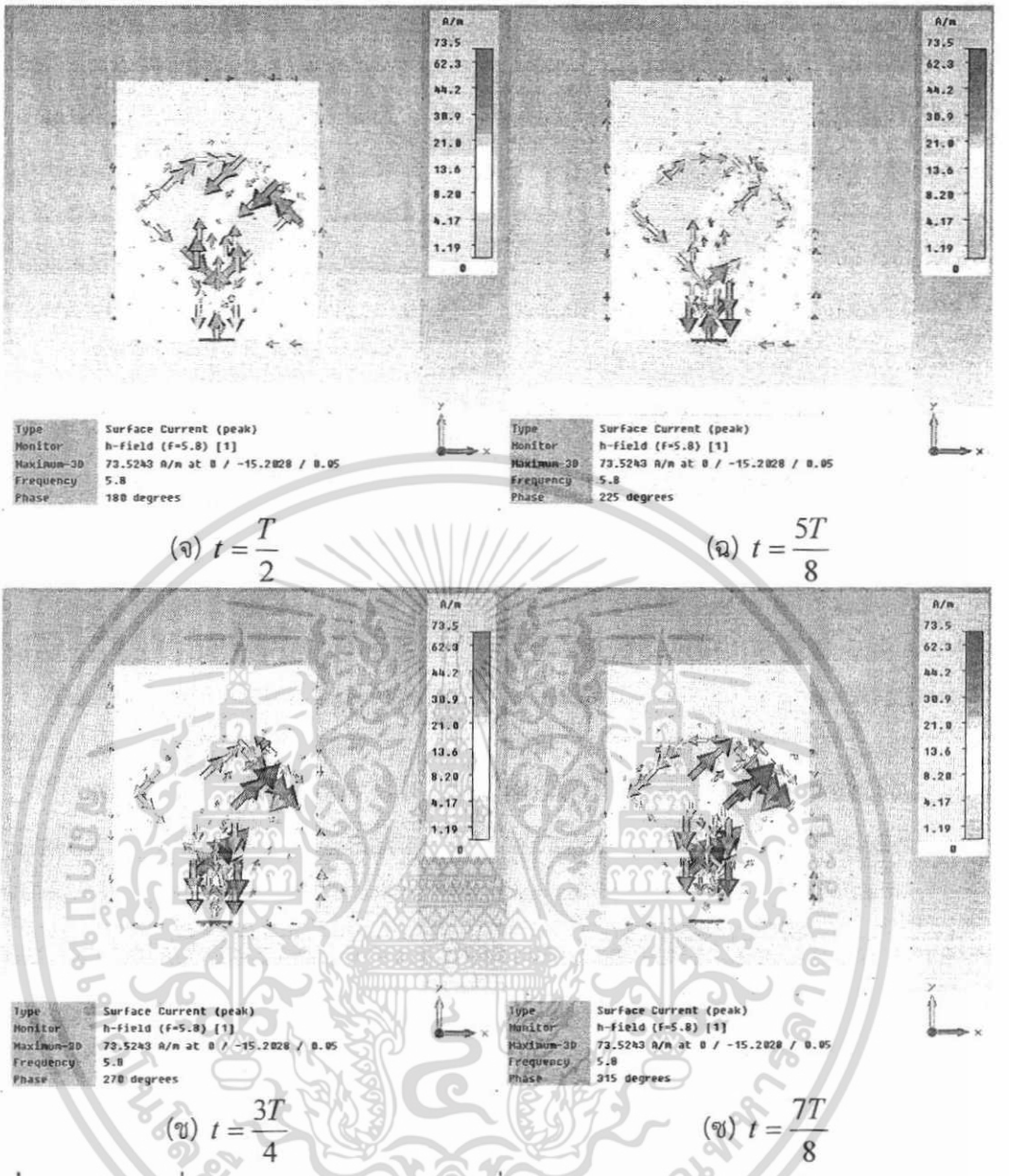
(ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$



(ค) $t = \frac{T}{4}$ (ง) $t = \frac{3T}{8}$

รูปที่ 3.18 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเวลา (t) ต่าง ๆ (ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$ (ค) $t = \frac{T}{4}$ และ (ง) $t = \frac{3T}{8}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) $t = \frac{T}{2}$ (ฉ) $t = \frac{5T}{8}$

(ช) $t = \frac{3T}{4}$ (ซ) $t = \frac{7T}{8}$

รูปที่ 3.18 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของการจำลองสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเวลา (t) ต่าง ๆ (จ) $t = \frac{T}{2}$ (ฉ) $t = \frac{5T}{8}$ (ช) $t = \frac{3T}{4}$ และ (ซ) $t = \frac{7T}{8}$ (ต่อ)

จากรูปที่ 3.18 แสดงกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอในขั้นตอนการปรับระยะตัดขอบร่องสี่เหลี่ยม (L_c) ที่เวลา (t) ต่าง ๆ พบว่ากระแสที่ไหลบนเส้นไมโครสตริปหักงอตัวแพร่กระจายคลื่นที่เวลา (t) ต่าง ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสตลอดเวลา กล่าวคือเวลา (t) ต่าง ๆ จะมีทิศทางการไหลของกระแสบนเส้นไมโครสตริปหักงอตัวแพร่กระจายคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปมีทิศทางโดยประมาณได้ดังนี้ ที่เวลา (t) เท่ากับ 0 มีทิศของกระแส ↘ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{8}$ มีทิศของกระแส ↓ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{4}$ มีทิศของกระแส ↙ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{3T}{8}$ มีทิศของกระแส ← ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{2}$ มีทิศของกระแส ↖ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{5T}{8}$ มีทิศของกระแส ↑ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{3T}{4}$ มีทิศของกระแส ↗ ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{7T}{8}$ มีทิศของกระแส → และที่เวลา (t) เท่ากับ T มีทิศของกระแส ↘ ดังนั้นการไหลของกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงไปทุกเวลา (t) นั้นยังสามารถทำให้เกิดการโพลาไรซ์วงกลมได้ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนแกนที่มีน้อยกว่า 3 dB เช่นกัน

จากขั้นตอนการจำลองสามารถให้คุณลักษณะที่เหมาะจึงสรุปพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งขนาดทางกายภาพและขนาดทางไฟฟ้า ดังตารางที่ 3.8

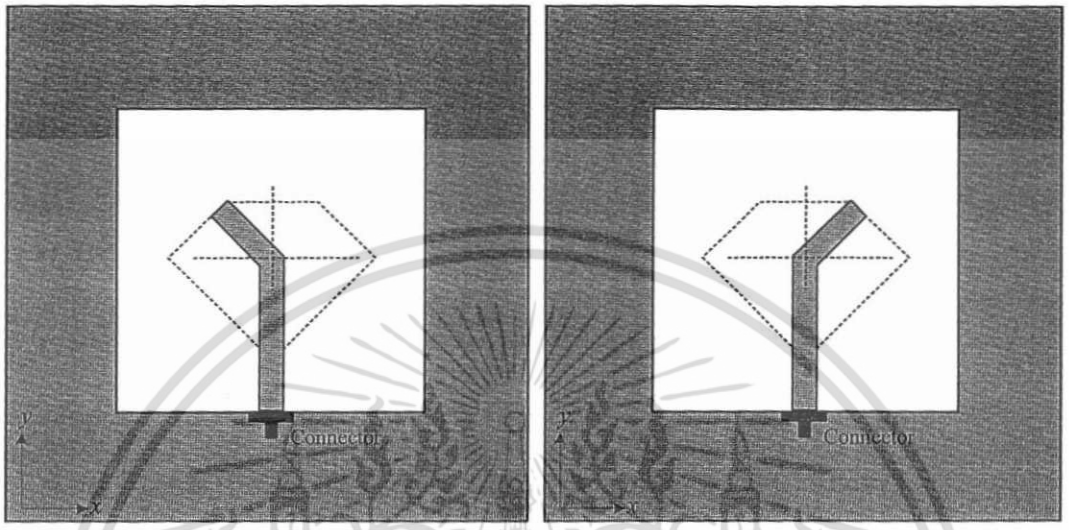
ตารางที่ 3.8 ตารางสรุปพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งขนาดทางกายภาพและขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 5.8 GHz (mm)
W_p	0.69λ	35
L_p	0.88λ	45
W_f	0.06λ	3
L_f	0.65λ	33
t_s	0.03λ	1.6
t_f	0.001λ	0.05
t_g	0.001λ	0.05
ε_r	0.08λ	4.3
W_s	0.42λ	21.5
L_s	0.42λ	21.5
α	-	45 องศา
L_c	0.14λ	7
β	-	-45 องศา
W_r	1.39λ	71
L_r	1.39λ	71
h_d	0.22λ	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.7 การปรับโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายให้เป็นแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา

โดยการเปลี่ยนแบบโพลาไรซ์จากหมุนขวาเป็นหมุนซ้ายทำได้โดยการปรับมุมหักงอของเส้นไมโครสตริปเท่ากับ -45 degree จะได้โพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา และเมื่อปรับมุมหักงอของเส้นไมโครสตริปเท่ากับ 45 degree จะได้โพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย



(ก) (ข)

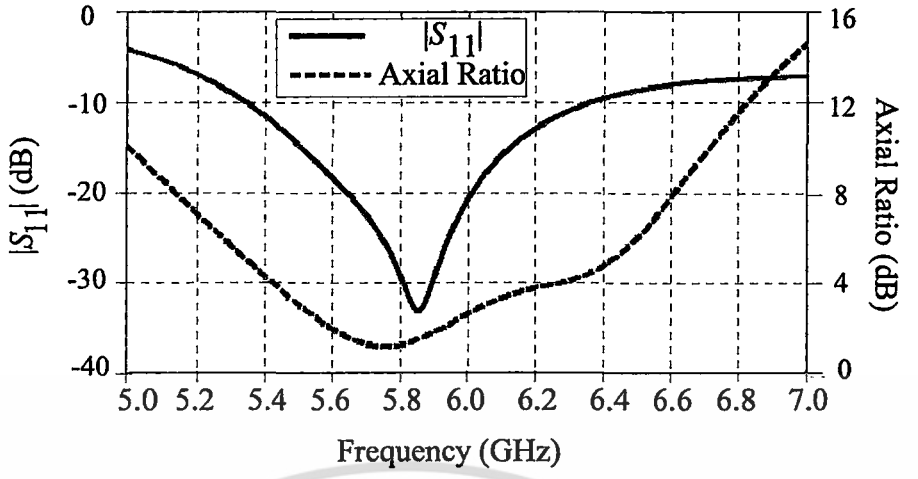
รูปที่ 3.19 รูปโครงสร้างสายอากาศแบบโพลาไรซ์ (ก) หมุนซ้าย และ (ข) หมุนขวา

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของสายอากาศของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอนั้นมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้างสายอากาศและมีโครงสร้างที่กะทัดรัด

3.3.2 อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ

ในส่วนอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปคือ เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลางที่ 5.8 GHz ของย่านความถี่ที่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

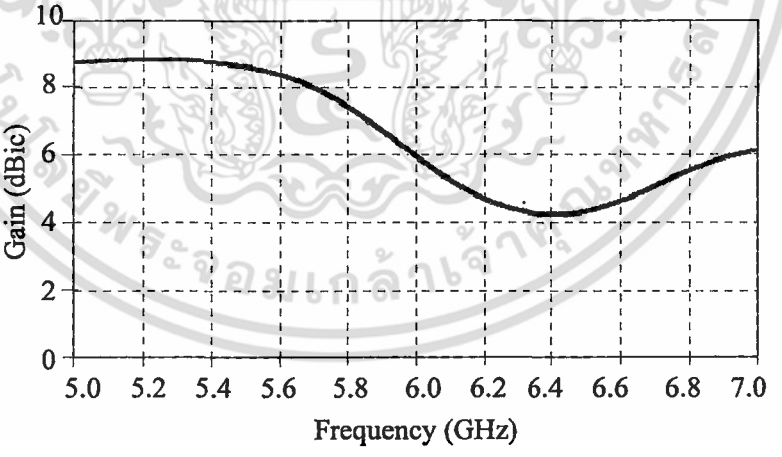


รูปที่ 3.20 อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ของการจำลองสายอากาศสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ

จากรูปที่ 3.20 แสดง$|S_{11}|$ มีต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 5.37 GHz ถึง 6.3 GHz ซึ่งครอบคลุมความถี่ใช้งานช่วง 5.725 GHz ถึง 5.875 GHz ได้ และมี $|S_{11}|$ ต่ำที่สุดคือ -31 dB ที่ความถี่ 5.83 GHz และมีอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB ตั้งแต่ 5.4 GHz ถึง 5.95 GHz ซึ่งครอบคลุมความถี่ใช้งานช่วง 5.725 GHz ถึง 5.875 GHz และมีอัตราส่วนแกนต่ำที่สุดคือ 1.54 dB ที่ความถี่กลาง 5.83 GHz

3.3.3 อัตราขยายของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ

ในส่วน อัตราขยายของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอเมื่อพิจารณาที่ความถี่กลางที่ 5.8 GHz ของย่านความถี่ที่ใช้งาน

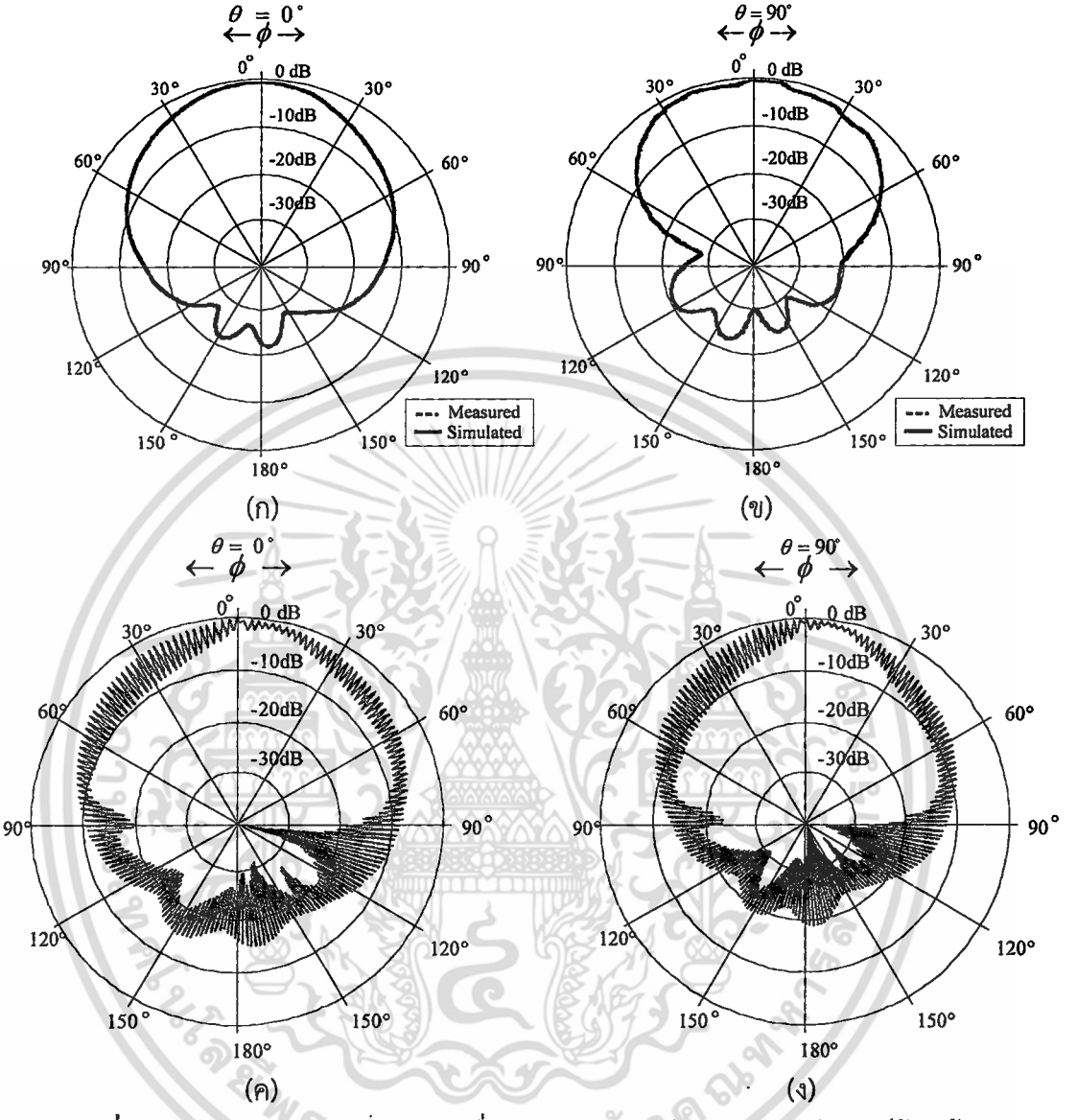


รูปที่ 3.21 อัตราขยายของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ

จากรูปที่ 3.21 แสดงอัตราขยายมีประมาณ 8 dBic ซึ่งครอบคลุมความถี่ใช้งานตั้งแต่ 5.725 GHz ถึง 5.875 GHz มีอัตราขยายมากที่สุดคือ 8.3 dBic ที่ความถี่ 5.725 GHz และมีอัตราขยายน้อยที่สุดคือ 7.8 dBic ที่ความถี่ 5.875 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป



รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่ความถี่กลาง 5.8 GHz (ก) ระนาบ *xz* และ (ข) ระนาบ *yz*
(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนระนาบ *xz*
(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนระนาบ *yz*

จากรูปที่ 3.22(ก) และ รูปที่ 3.22(ข) เป็นส่วนของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอของย่านความถี่ที่ใช้งานมีทิศทางหลักที่ 0 องศา คือด้านหน้าของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ ดังรูปที่ 3.21 และสรุปสมรรถนะของสายอากาศที่ได้จากการจำลองของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลางที่ 5.8 GHz ดังตารางที่ 3.9

จากรูปที่ 3.22(ค) และ รูปที่ 3.22(ง) เป็นส่วนของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอของย่านความถี่ที่ใช้งานมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางหลักที่ 0 องศา คือด้านหน้าของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลางที่ 5.8 GHz และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบโดยรวมของ

ตารางที่ 3.9 สรุปสมรรถนะของสายอากาศที่ได้จากการจำลองสายอากาศ

สมรรถนะของสายอากาศ	ผลจำลองที่ความถี่ 5.8 GHz
$\|S_{11}\|$	-29 dB
แบนด์วิดธ์	17%
อัตราส่วนแกน	1.53 dB
แบนด์วิดธ์ของอัตราส่วนแกน	9%
อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง	40 dB
ทิศทางที่สัญญาณมีความแรงที่สุด	0 องศา
ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ xz	89.7 องศา
ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ yz	53.5 องศา
อัตราขยายของสายอากาศ	7 dBic

3.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอขั้นตอนในการออกแบบและการจำลองของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยเริ่มจากการกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นให้กับสายอากาศ และทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศเพื่อให้ได้อัตราส่วนแกนตามต้องการ โดยนำมาจำลองสายอากาศเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศซึ่งได้ทำการพิจารณาอัตราส่วนแกน โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตคือพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศจะต้องทำให้อัตราส่วนแกนมีต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน แล้วจึงปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศเป็นสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ เพื่อให้ได้ $|S_{11}|$ ของสายอากาศมีต่ำกว่า -10 dB และยังคงอัตราส่วนแกนมีต่ำกว่า 3 dB โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตคือพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศจะต้องทำให้ $|S_{11}|$ ดีกว่า -10 dB โดยที่อัตราส่วนแกนยังคงมีต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน เมื่อได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว หลังจากนั้นทำการพิจารณาสมรรถนะของสายอากาศ โดยพิจารณาค่าต่างๆ คือ อัตราส่วนแกน $|S_{11}|$ อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ พบว่าสายอากาศมีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานที่ 5.725 GHz ถึง 5.875 GHz ซึ่งส่งผลให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์วงกลม และที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน 5.8 GHz มีอัตราส่วนแกนเท่ากับ 1.41 dB เมื่อพิจารณา $|S_{11}|$ พบว่ามีต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานมีอัตราขยายประมาณ 7 dBic ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

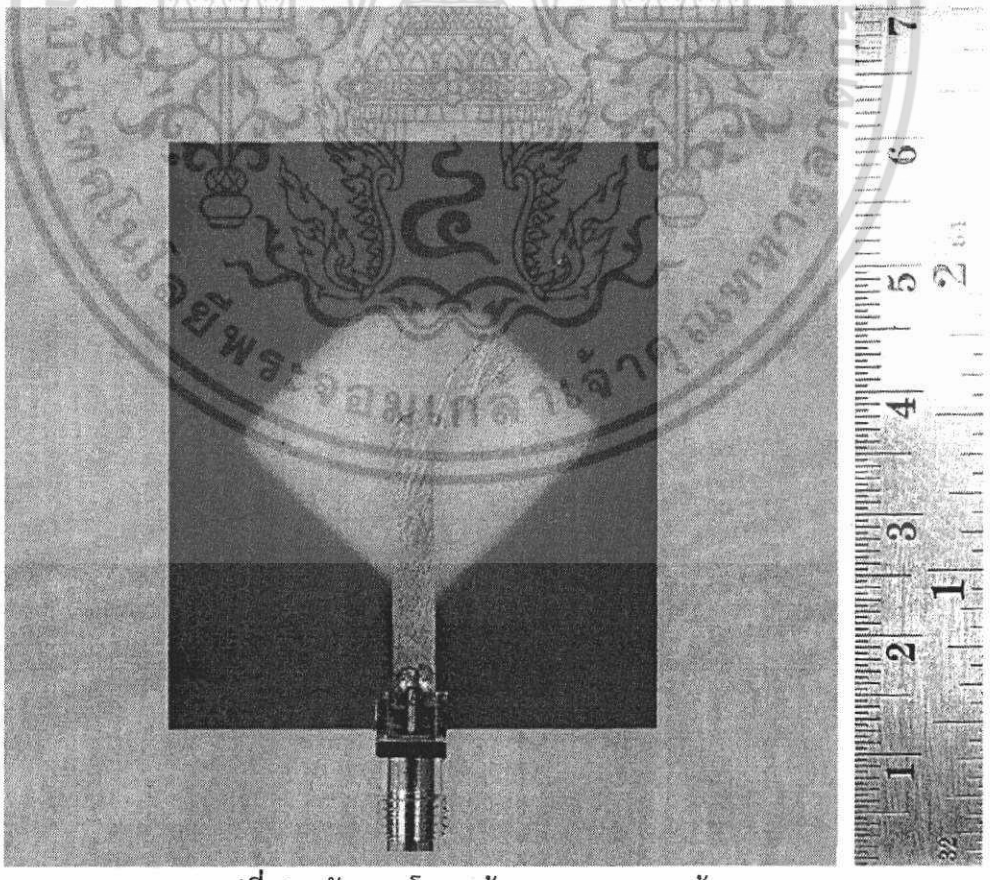
บทที่ 4
การทดสอบสายอากาศ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ย่านความถี่ 5.8 GHz ซึ่งจะพิจารณาถึง $|S_{11}|$ อัตราขยาย อัตราส่วนแกน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยจะนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง ในส่วนรายละเอียดต่างๆ จะได้กล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

4.2 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอต้นแบบของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5.8 GHz สำหรับใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้ใช้งานที่ความถี่ 5.725 GHz ถึง 5.875 GHz ซึ่งเป็นมาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ย่านความถี่ 5.8 GHz มีลักษณะของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านเอียง โดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้สร้างสายอากาศต้นแบบ แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งได้มาจากการจำลองในบทที่ 3 จากนั้นจึงทำการทดสอบสายอากาศโดยนำสายอากาศต้นแบบนี้มาทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆ เช่น $|S_{11}|$ อัตราขยาย อัตราส่วนแกน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งขนาดทางกายภาพและขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 5.8 GHz (mm)
W_p	0.69λ	35
L_p	0.88λ	45
W_f	0.06λ	3
L_f	0.65λ	33
t_s	0.03λ	1.6
t_f	0.001λ	0.05
t_g	0.001λ	0.05
ε_r	0.08λ	4.3
W_s	0.42λ	21.5
L_s	0.42λ	21.5
α	-	45 องศา
L_c	0.14λ	7
β	-	-45 องศา
W_r	1.39λ	71
L_r	1.39λ	71
h_d	0.22λ	11

เมื่อเปรียบเทียบขนาดทางไฟฟ้ากับคุณสมบัติของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอเมื่อเปรียบเทียบกับวารสารที่ศึกษามาก่อนหน้า พบว่าสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอนั้นมีขนาดทางไฟฟ้าที่เล็กกว่าสายอากาศอื่นๆ ในวารสารที่ศึกษามาก่อนหน้า และสามารถให้ค่าอัตราส่วนแกนที่เหมาะสม และอัตราขยายสูง ตลอดย่านความถี่ใช้งาน

4.3 การทดสอบสายอากาศ

การทดสอบสายอากาศได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา ที่จะนำสายอากาศต้นแบบนี้มาทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆ เช่น $|S_{11}|$ อัตราขยาย อัตราส่วนแกน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดสอบสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอมีดังต่อไปนี้

- เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C
- สายนำสัญญาณ
- มัลติมิเตอร์
- สายอากาศแบบเกลียว

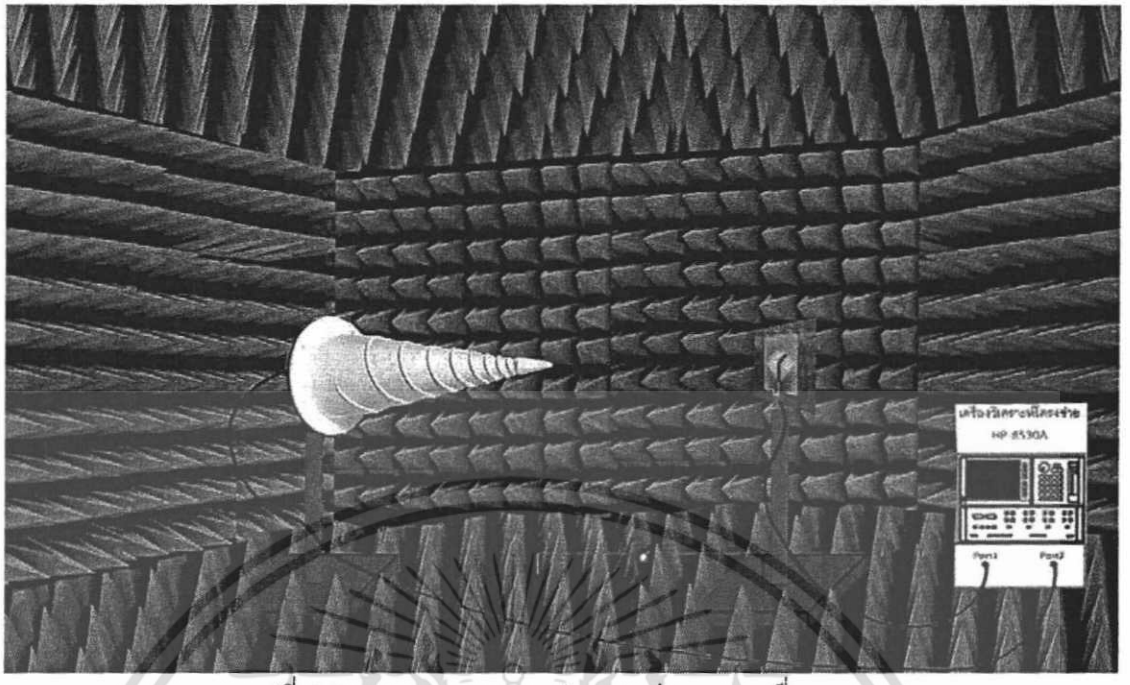
ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดสอบสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (mm)
ความสูงของสายอากาศส่ง	1000
ความสูงของสายอากาศรับ	1000
ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ	500
มุมที่ทำการหมุนครั้งละ	5 degree

การทดสอบสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอเพื่อหา $|S_{11}|$ โดยได้นำสายอากาศที่จะทำการทดสอบผลมาทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C ในการหา $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

การทดสอบเพื่อหาอัตราขยายของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปซึ่งในการทดสอบเพื่อหาอัตราขยายนั้นจะใช้สายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านรับและใช้สายอากาศแบบเกลียวมาตรฐานทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง โดยที่การทดสอบสายอากาศจะต้องทำภายในสนามระยะไกล เพราะฉะนั้นระยะห่าง (d) ระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับต้องเป็นไปตามเงื่อนไข $d \geq \frac{2D^2}{\lambda_0}$ โดยที่ D คือ ขนาดของสายอากาศที่มีความยาวที่สุดและ λ_0 คือความยาวคลื่นในอากาศโดยพิจารณาที่ความถี่ใช้งาน ดังนั้นจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับมีเท่ากับ 50 cm ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การทดสอบอัตราส่วนแกนและการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ ซึ่งในการทดสอบนั้นจะใช้สายอากาศแบบเกลียวที่มีจำนวนรอบเท่ากับ 7 รอบ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 cm มาใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง และใช้สายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอทำหน้าที่เป็นสายอากาศด้านรับ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับมีเท่ากับ 1 m ซึ่งผลจากการทดสอบที่ได้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนแกนได้จากสมการที่ 4.1

$$\text{Axial Ratio} = 20\log\left[\frac{|E_{co}|+|E_{xp}|}{|E_{co}|-|E_{xp}|}\right] \tag{4.1}$$

โดยที่

$|E_{co}|$ คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์แบบเดียวกับโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

$|E_{xp}|$ คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์ตรงกันข้ามกับโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

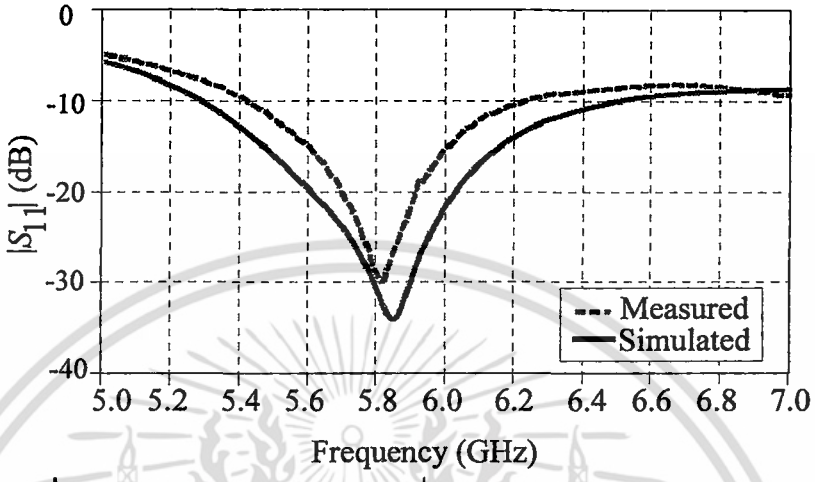
4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ

เมื่อทำการสร้างสายอากาศตัวต้นแบบซึ่งเป็นสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5.8 GHz เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นเป็นการนำสายอากาศต้นแบบที่ได้มาทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆ ของสายอากาศแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3 โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้ของ $|S_{11}|$ อัตราขยาย อัตราส่วนแกน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของ $|S_{11}|$ ระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 ผลของ $|S_{11}|$ ทั้งสองจะทำการเปรียบเทียบกับความถี่



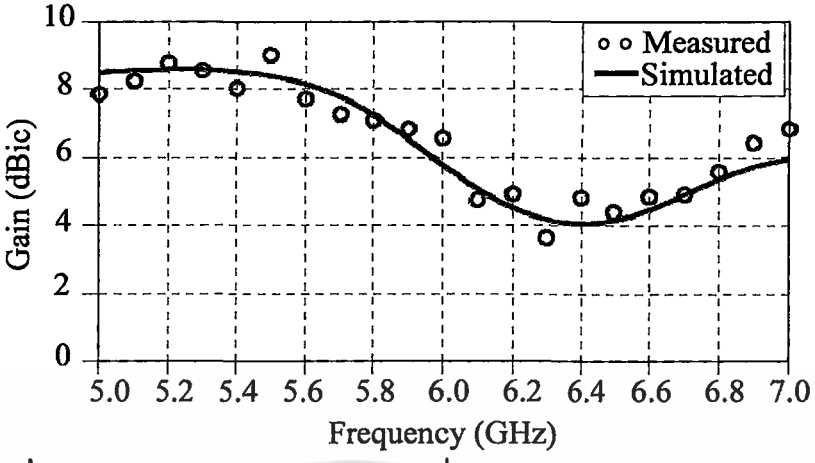
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

จากรูปที่ 4.3 พบว่าผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกันแต่ก็มีความคลาดเคลื่อน โดยที่ $|S_{11}|$ ได้จากการทดสอบจะมีแบนด์วิดธ์ 730 MHz ที่ 5.45 GHz ถึง 6.18 GHz คิดเป็นแบนด์วิดธ์เท่ากับ 12.5% ในขณะที่ $|S_{11}|$ ได้จากการจำลองจะมีแบนด์วิดธ์ 950 MHz ที่ 5.35 GHz ถึง 6.3 GHz คิดเป็นแบนด์วิดธ์เท่ากับ 16.4% ซึ่งจากการทดสอบ $|S_{11}|$ ที่ได้จะมีช่วงความถี่ที่แคบกว่าผลที่ได้จากการจำลอง และผลระดับของ $|S_{11}|$ ที่ความถี่กลาง 5.8 GHz ที่ได้จากการทดสอบมีที่ได้น้อยกว่าการจำลอง สาเหตุน่าจะเกิดจากพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบที่มีการสร้างขึ้นมามีความคลาดเคลื่อนไปจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง รวมทั้งผลของวัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศ อย่างไรก็ตาม $|S_{11}|$ ของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงออยู่ในช่วงย่านความถี่ใช้งานมีดีกว่า -10 dB ตลอดทั้งย่าน และที่ความถี่กลางผลของ $|S_{11}|$ เท่ากับ -23 dB ดังนั้นสายอากาศจึงสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ใช้งานที่ต้องการ

4.4.2 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของอัตราขยายตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการใช้งานย่านความถี่ 5.8 GHz ระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

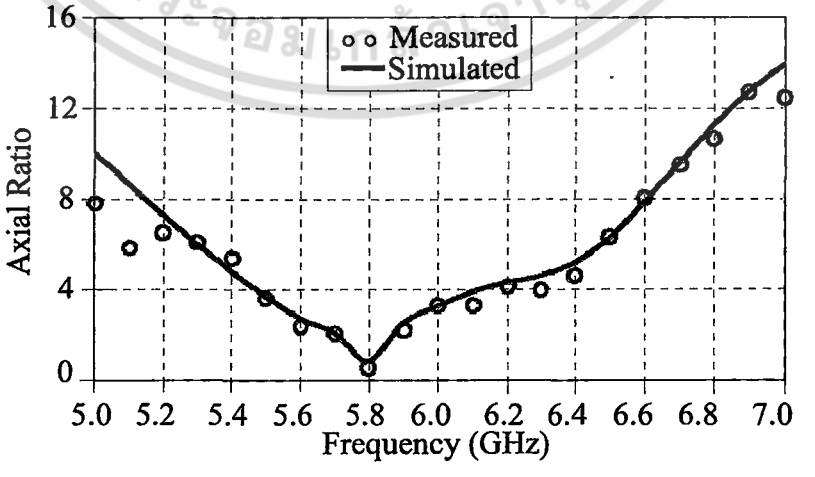


รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

จากรูปที่ 4.4 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของอัตราขยายระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยที่ความถี่ใช้งานที่ความถี่กลาง 5.8 GHz มีเท่ากับ 7 dBic แต่จะสังเกตว่าตลอดช่วงความถี่มีความคลาดเคลื่อนที่สูงพอสมควร คือผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีต่ำกว่าผลที่ได้จากการจำลองตลอดช่วงความถี่ สาเหตุน่าจะเกิดมาจากในการทดสอบสายอากาศต้นแบบนั้น อาจมีผลของสภาพแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้อง ในขณะที่การจำลองอัตราขยายของสายอากาศจะไม่รวมผลของสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงทำให้ผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไปจากอัตราขยายที่ได้จากการจำลอง

4.4.3 การทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริป

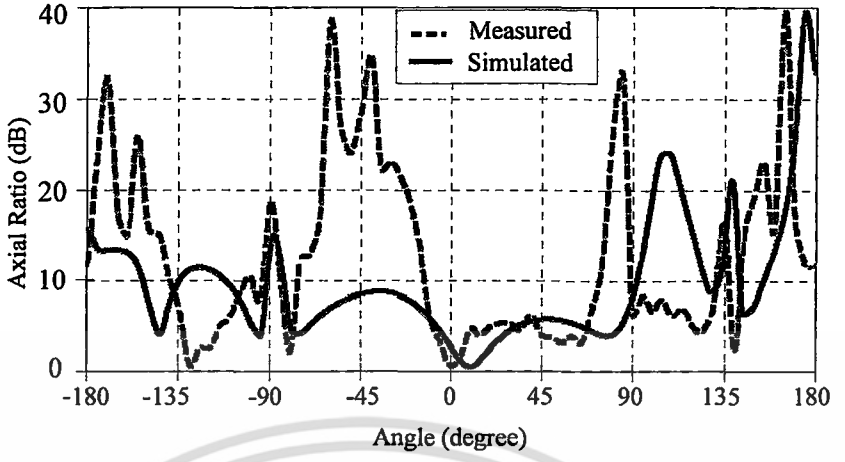
ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของอัตราขยายส่วนแกนสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยพิจารณาในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานย่านความถี่ 5.8 GHz ที่ความถี่กลาง ผลของการเปรียบเทียบอัตราส่วนแกนของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



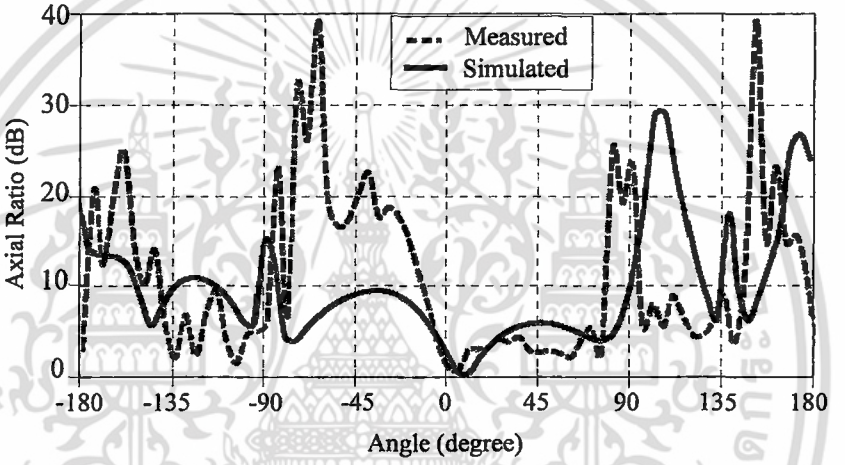
(ก)

รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง (ก) ในแกนความถี่

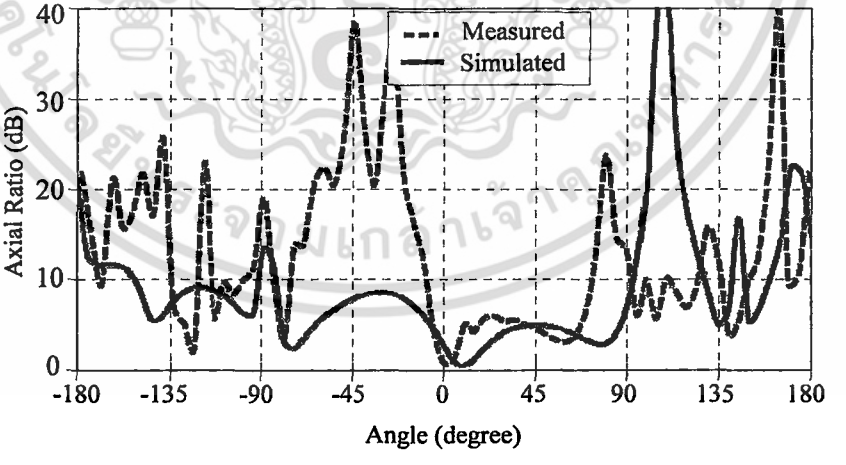
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



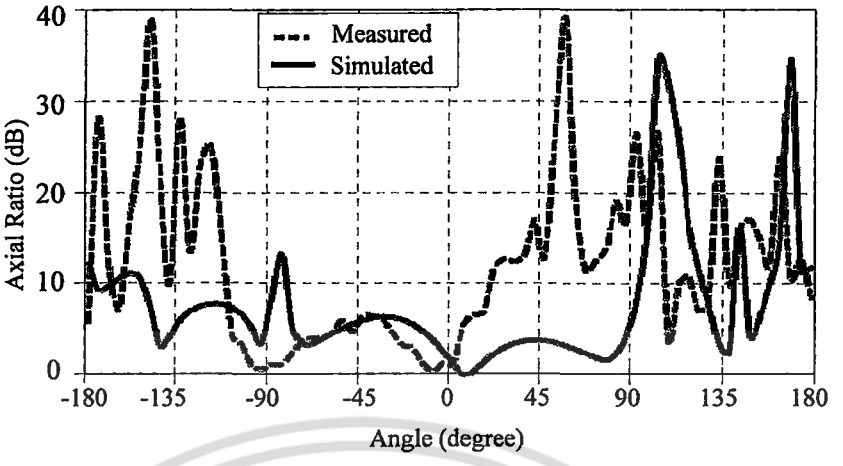
(ค)



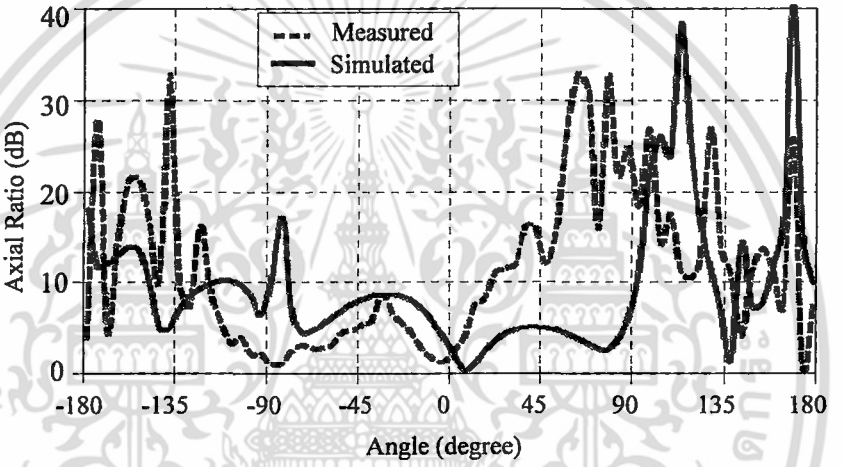
(ง)

รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและการจำลองในระนาบ *xz* (ข) ความถี่ 5.725 GHz (ค) ความถี่ 5.8 GHz และ (ง) ความถี่ 5.875 GHz

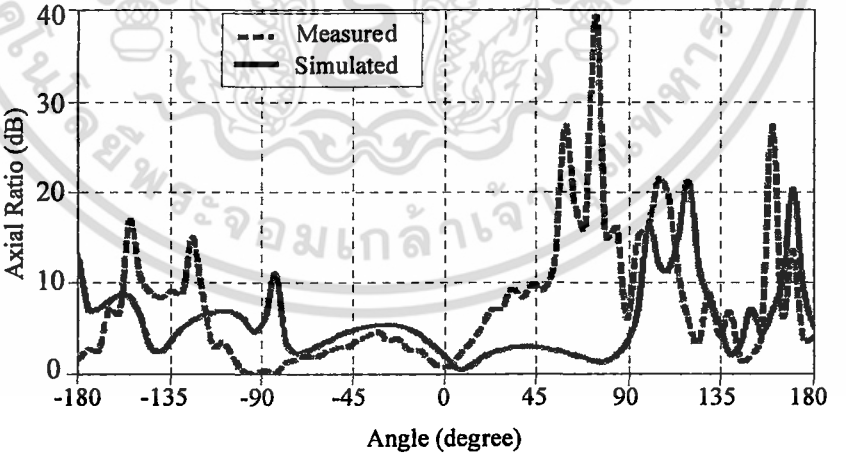
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)



(ฉ)



(ช)

รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและการจำลองในระนาบ *yz* (จ) ความถี่ 5.725 GHz (ฉ) ความถี่ 5.8 GHz และ (ช) ความถี่ 5.875 GHz (ต่อ)

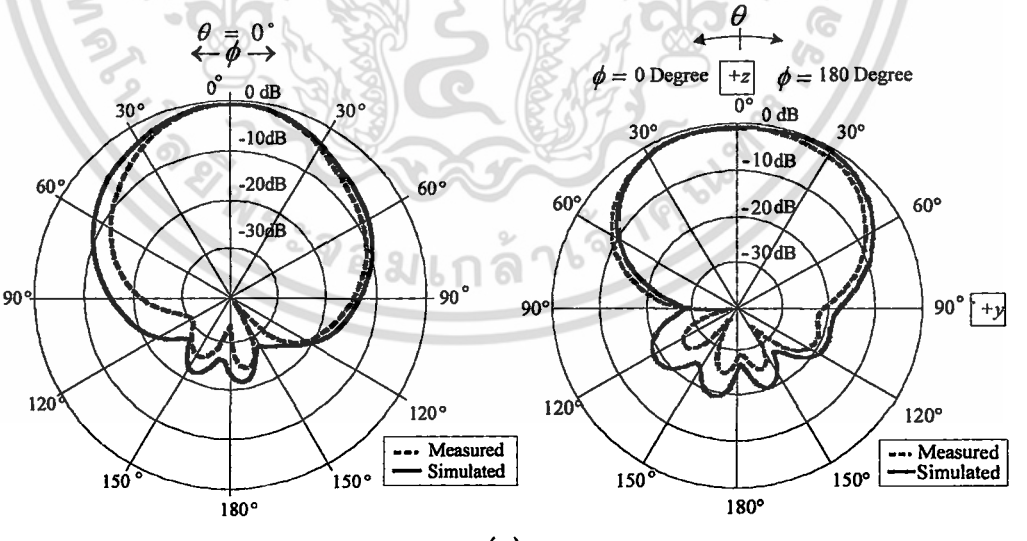
จากรูปที่ 4.5 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง มีแนวโน้มเดียวกันระหว่างผลการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง พบว่าอัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนที่มุมต่าง ๆ ของผลที่ได้จากการทดสอบมีใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง เมื่อพิจารณาที่มุม 0 degree พบว่าสามารถอ้างอิงค่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำหว่า 3 dB ทั้งในส่วนของค่าจากการจำลองและค่าจากการทดสอบ ส่วนในมุมอื่นๆ พบว่าผลจากการจำลองและผลจากการทดสอบอันเนื่องมาจากคามคลาดคลื่นระหว่างการทดสอบและการจำลองนั้นมีพารามิเตอร์แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนกันระหว่างค่าอัตราส่วนแกนที่ได้จากการจำลองและการทำสอบ แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากหลายๆสาเหตุ เช่น สายอากาศแบบเกลียวที่มีโพลาไรซ์วงกลมที่ใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศตัวส่งอาจจะมีโพลาไรซ์วงกลมที่ไม่ดีพอ การสูญเสียจากวัสดุที่นำมาทำสายอากาศต้นแบบที่ใช้ไมโครสตริปทองแดงเป็นตัวนำ และพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศต้นแบบมีความคลาดเคลื่อนจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มุม 0 องศา หรือบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ พบว่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB จากการทดสอบ และที่มุม 0 องศา มีอัตราส่วนแกนจากการทดสอบเท่ากับ 0.1 dB ส่วนผลที่ได้จากการจำลองที่มุม 0 องศา มีอัตราส่วนแกนเท่ากับ 1.41 dB ทั้ง 3 ความถี่ คือ ขอบความถี่ด้านต่ำเท่ากับ 5.725 GHz ความถี่กลางเท่ากับ 5.8 GHz และขอบความถี่ด้านสูงเท่ากับ 5.875 GHz ดังนั้นจึงส่งผลให้สายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอการโพลาไรซ์วงกลมตลอดย่านความถี่ใช้งาน

4.4.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ

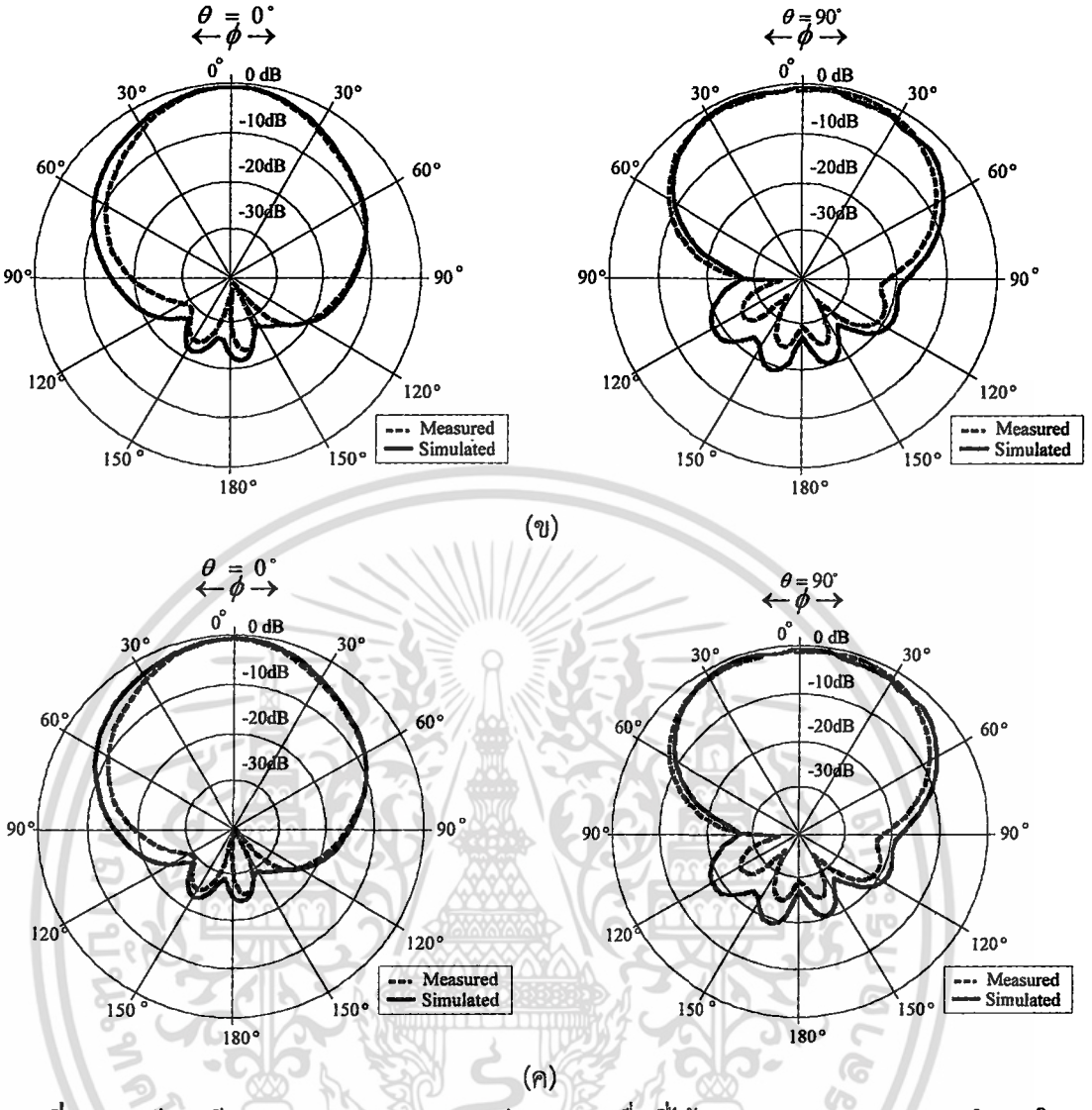
ในหัวข้อนี้เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ใช้งาน ซึ่งผลที่นำมาเปรียบเทียบจะมีผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ความถี่กลาง 5.725 GHz 5.8 GHz และ 5.875 GHz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6



(ก)

รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและการจำลองในระนาบ xz และระนาบ yz (ก) ความถี่ 5.725 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



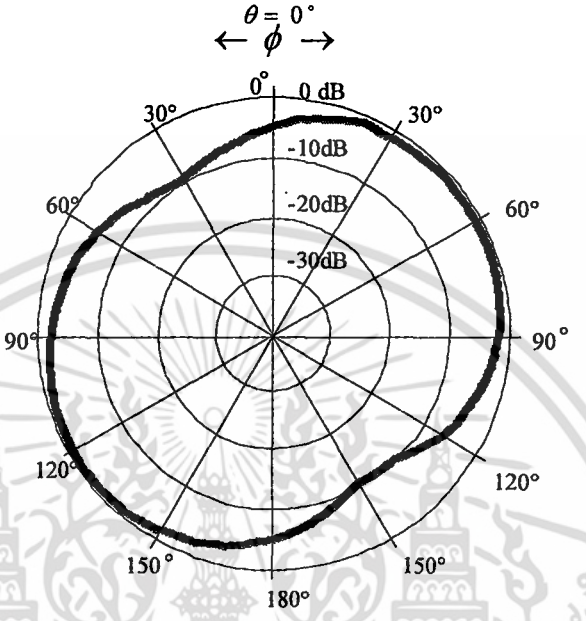
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและการจำลองในระนาบ *xz* และระนาบ *yz* (ข) ความถี่ 5.8 GHz และ (ค) ความถี่ 5.875 GHz (ต่อ)

จากรูปที่ 4.6(ก) 4.6(ข) และ 4.6(ค) เป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองในระนาบ *xz* และระนาบ *yz* ตามลำดับ ที่ขอบความถี่ด้านต่ำ ความถี่กลาง และความถี่ขอบด้านสูงของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน จะพบว่าจากการทดสอบได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ *xz* มีเท่ากับ 42.3 องศา และระนาบ *yz* มีเท่ากับ 37.1 องศา ทั้งสองระนาบ โดยที่มุม 0 องศา ทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกัน แต่ก็ยังมีความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมและการติดตั้งสายอากาศในการทดสอบดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอด้วยการใช้การหมุนสายอากาศไดโพล

ในหัวข้อนี้แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนที่ความถี่ใช้งานเมื่อทดสอบด้วยการหมุนสายอากาศไดโพล โดยทำการทดสอบที่ความถี่กลาง 5.8 GHz ดังรูปที่ 4.7



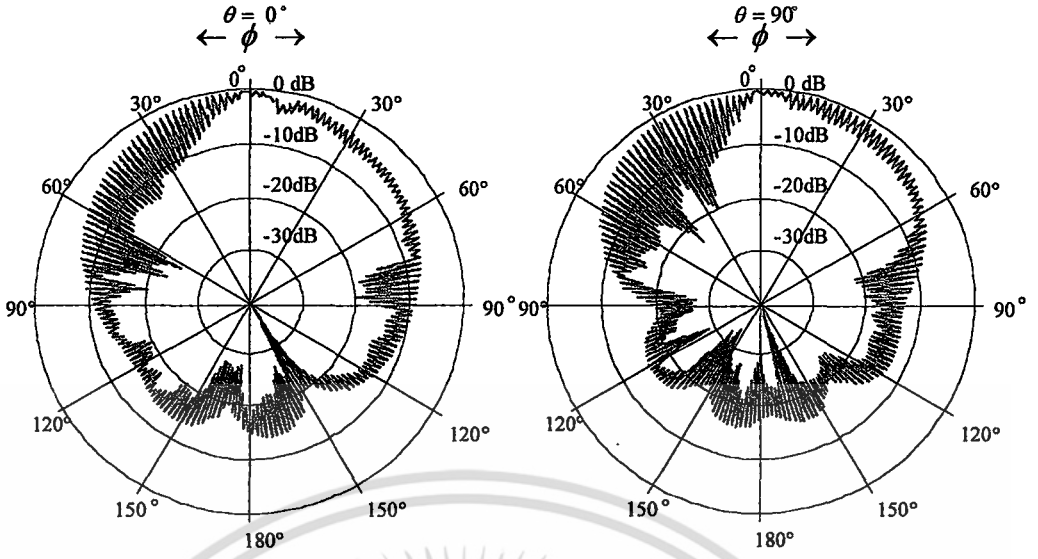
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบแบบหมุนสายอากาศไดโพลที่ความถี่กลาง 5.8 GHz ในระนาบ *xy*

จากรูปที่ 4.7 พบว่าสัญญาณที่สานอากาศไดโพลรับได้มีลกษณะไกล้เคียงกับรูปวงกลมจึงสามารถอ้างอิงจากผลการวิเคราะห์ได้ว่าสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอสามารถรองรับการใช้งานแบบโพลาไรซ์วงกลมได้

4.4.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ

ในหัวข้อนี้เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนที่ความถี่ใช้งาน ซึ่งผลที่นำมาเปรียบเทียบจะมีผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ *xz* และระนาบ *yz* ที่ความถี่กลาง 5.725 GHz 5.8 GHz และ 5.875 GHz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่กลาง 5.8 GHz (ก) ระนาบ *xz* และ (ข) ระนาบ *yz*

จากรูปที่ 4.7(ก) 4.7(ข) เป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองในระนาบ *xz* และระนาบ *yz* ตามลำดับ ที่ขอบความถี่ด้านต่ำ ความถี่กลาง และความถี่ขอบด้านสูงของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน จะพบว่าจากการทดสอบได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ *xz* มีเท่ากับ 5 องศา และระนาบ *yz* มีเท่ากับ 5 องศา ทั้งสองระนาบ โดยที่มุม 0 องศา ทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกัน แต่ก็ยังมีความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมและการติดตั้งสายอากาศในการทดสอบดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบ

สมรรถนะของสายอากาศ	ผลการทดสอบที่ความถี่ 5.8 GHz
$\|S_{11}\|$	-30 dB
แบนด์วิดธ์	12%
อัตราส่วนแกน	1.53 dB
แบนด์วิดธ์ของอัตราส่วนแกน	8.7%
ความกว้างลำคลื่นของอัตราส่วนแกน	5 องศา
อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง	41 dB
ทิศทางที่สัญญาณมีความแรงที่สุด	0 องศา
ความกว้างลำคลื่นในระนาบ *xz*	88 องศา
ความกว้างลำคลื่นในระนาบ *yz*	54 องศา
อัตราขยายของสายอากาศ	7 dBic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 บทสรุป

ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอที่มีโพลาไรซ์วงกลมพบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว มีความกว้างลำคลื่นในระนาบมุมยกเท่ากับ 42.3 องศา และระนาบมุมกวาดเท่ากับ 37.1 องศา มี $|S_{11}|$ ที่สามารถรับการใช้งานในย่านความถี่ 5.8 GHz ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ มี อัตราขยายที่ 7 dBic มีโพลาไรซ์วงกลมเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองนั้นมีแนวโน้มของการเรโซแนนซ์ที่ช่วงความถี่ใช้งานที่ย่านความถี่ 5.8 GHz แต่ผลที่ได้จากการทดสอบมีแบนด์วิดธ์มากกว่าผลที่ได้จากการจำลองอาจจะมาจากขนาดของสายอากาศตามที่ได้จำลองเมื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบมีความคลาดเคลื่อน เมื่อทำการพิจารณาผลของอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเดียวกับผลการจำลอง แต่ก็มีที่ได้จากผลการทดลองต่ำกว่าตลอดย่าน อาจมาจากการสร้างและผลของสภาพแวดล้อมในการทดสอบ ในส่วนของอัตราส่วนแกนที่ได้พบว่ามีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ที่มุมใช้งาน มีแบนด์วิดธ์ของอัตราส่วนแกนเท่ากับ 8.7% มีบีมวิดธ์ของอัตราส่วนแกนเท่ากับ 5 องศา แต่ก็มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลองเนื่องมาจากหลายสาเหตุคือ สายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่งมีการโพลาไรซ์วงกลมที่ไม่ดีพอ ขนาดของสายอากาศที่คลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลอง วัสดุที่เป็นวัสดุฐานรองมีสภาพความยอมไฟฟ้าไม่แน่นอนเป็นต้น และเมื่อทำการพิจารณาผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานพบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง จากผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถภาพของสายอากาศ แสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่นำเสนอขึ้นมานั้นสามารถประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ โดยจุดประสงค์เพื่อสร้างสายอากาศที่มีพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้มีการโพลาไรซ์วงกลม มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว และมีอัตราขยายที่สูง พร้อมทั้งสามารถนำสายอากาศมาประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ร่วมกับแท็ก ได้ทุกลักษณะการจัดวางตัวของแท็ก

ในหัวข้อ 5.1 จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งประกอบไปด้วยผลการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ ผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศ และผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศ และในหัวข้อ 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

5.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ในการออกแบบสายอากาศ ทฤษฎีและหลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป และทำการศึกษาถึงผลที่ได้จากการคำนวณมาจำลอง เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ รวมทั้งผลการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบ

จากผลการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปหักงอ เพื่อให้ได้คุณสมบัติของสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวมีอัตราขยายสูง และมีการโพลาไรซ์วงกลม โดยกระบวนการหาพารามิเตอร์นี้จะใช้โปรแกรม CST Microwave studio® เพื่อจำลองของสายอากาศ แล้ววิเคราะห์คุณลักษณะในด้านต่างๆ พบว่าสายอากาศมีคุณลักษณะครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานและความถี่กลางที่ 5.8 GHz มีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านใช้งานและมีอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลางมีเท่ากับ 1.41 dB มี $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 5.725 GHz ถึง 5.875 GHz มีแบนด์วิดธ์เท่ากับ 150 MHz ที่มีต่ำกว่า -10 dB และที่ความถี่ใช้งานครอบคลุมอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB มี $|S_{11}|$ ที่ความถี่กลางเท่ากับ -28 dB ดังนั้นผลจากการจำลองสายอากาศจึงสามารถทำงานภายในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานได้โดยมีการโพลาไรซ์วงกลมตลอดทั้งย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานโดยมีอัตราขยายในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานมีในช่วง 7.11 dBic ถึง 8.21 dBic และที่ความถี่กลางมีเท่ากับ 8.2 dBic ซึ่งถือว่าเป็น อัตราขยายที่สูง ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน

จากนั้นได้นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปที่ได้จากการจำลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ จึงได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมแและนำพารามิเตอร์ที่ได้สร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำพารามิเตอร์ที่ได้สร้างสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลการจำลอง พบว่าสายอากาศมีคุณลักษณะครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานและความถี่กลางที่ 5.8 GHz มีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านใช้งานและมีอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลางมีเท่ากับ 1.41 dB มี $|S_{11}|$ มีแบนด์วิดธ์ 730 MHz ที่ 5.45 GHz ถึง 6.18 GHz ในขณะที่ $|S_{11}|$ ได้จากการจำลองจะมีแบนด์วิดธ์ 950 MHz ที่ 5.35 GHz ถึง 6.3 GHz ที่มีต่ำกว่า -10 dB ซึ่ง $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกันแต่ก็มีความคลาดเคลื่อน การทดสอบ $|S_{11}|$ ที่ได้จะเลื่อนลงมาที่ความถี่ต่ำกว่าผลที่ได้จากการจำลอง และผลระดับของ $|S_{11}|$ ที่ความถี่กลางที่ได้จากการทดสอบมีระดับของ $|S_{11}|$ น้อยกว่าการจำลอง สาเหตุน่าจะเกิดจากพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศต้นแบบที่มีการสร้างขึ้นมามีความคลาดเคลื่อนไปจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองรวมทั้งผลของวัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศ โดยมี อัตราขยายในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการวิเคราะห์และทดสอบจะพบว่าสายอากาศร่องรูปเพชรแผ่นพิมพ์ป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปสำหรับประยุกต์ใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลร่วมกับแท็ก จะเห็นว่าการเพิ่มสลิทและมุมการหมุนสลิทนั้นเพื่อให้กระแสที่ไหลบริเวณผิวมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\pi}{2}$ ซึ่งส่งผลให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย และเมื่อกลับด้านสลิทเป็นทางตรงกันข้ามก็จะทำให้เกิดการโพลาไรซ์แบบหมุนขวา แต่เมื่อทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะสังเกตเห็นว่า แบบรูปกระแพร่กระจ่ายคลื่นยังคงมีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่สูงอยู่ ดังนั้นในการปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถทำได้โดยการดัดแปลงในส่วนของระนาบกราวนด์ให้มีลักษณะที่มีมิติความสูงเพื่อปรับปรุงอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศและได้ทำการทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปพัฒนาสายอากาศและปรับปรุงโครงสร้างให้มีรูปแบบที่ง่ายขึ้นและหลากหลายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Klaus Finkenzeller, *RFID Handbook*, John Wiley& Sons, 2003.

[2] RFID system, [Online]. Available: www.controlelectric.com/RFID/What_isRFID.html

[3] D. M. Dobkin, *The RF in RFID passive UHF in practice*, United States of America, Newnes, 2008

[4] สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์ เครื่องวิทยุคมนาคมประเภท RFID Frequency Identification: RFID 17 มกราคม 2551

[5] Z. N. Chen, *Antenna for Portable Devices*, John Wiley& Sons, 2007.

[6] C. A. Balanis, *Antenna Theory*, John Wiley& Sons, 2005.

[7] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetic*, John Wiley& Sons, 1989.

[8] J.Y. Jan and J.W. Su, "Bandwidth Enhancement of a Printed Wide-Slot Antenna with a Rotated Slot," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* No.53, pp. 2111-2114, June, 2005.

[9] J.Y. Sze and K.L. Wong, "Bandwidth Enhancement of a Microstrip-Line-Fed Printed Wide-Slot Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* No. 49, pp. 1020-1024, July, 2001.

[10] J.S. Row and S.W. Wu, "Circularly-Polarized Wide Slot Antenna Loaded With a Parasitic Patch," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* No.9, pp.2826–2832, September, 2008.

[11] W.L. Chen, G.M. Wang, and C.X. Zhang, "Bandwidth Enhancement of a Microstrip-Line-Fed Printed Wide-Slot Antenna with a Fractal-Shaped Slot,"*IEEE Trans. Antennas Propagat.* No.7, pp. 2176- 2179, July, 2009.

[12] Gh. Beigmohammadi, Ch. Ghobadi, J. Nourinia and M. Ojaroudi, "Small Square Slot Antenna with Circular Polarisation Characteristics for WLAN/WiMAX Applications," *Electron Lett*, No. 10, pp. 672 – 673, May 2010.

[13] X. Bao and M.J. Ammann, "Dual-Frequency Dual-Sense Circularly-Polarized Slot Antenna Fed by Microstrip Line," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* No.3, pp.645–649, March, 2008.

[14] J.Y. Sze and C.C. Chang, "Circularly Polarized Square Slot Antenna with a Pair of Inverted-L Grounded Strips," *IEEE Antennas and Wireless Propagat Lett,* Vol.7, pp. 149-151, 2008.

[15] Y.J. Sung, "Circularly Polarised Square Patch Antenna with Asymmetrical Y-shaped Feed Structure," *Electron Lett.*, No. 19, pp. 1309 - 1310, September 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[16] S.H. Yeung, K.F. Man and W.S. Chan, "A Bandwidth Improved Circular Polarized Slot Antenna Using a Slot Composed of Multiple Circular Sectors,"*IEEE Trans. Antennas Propagat.* No.8, pp. 3065- 3070, August, 2011.

[17] ที่มา Modle antenna อาจารย์โมไนย

[18] ที่มา http://www.answers.com/topic/dbic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นายเรวัฒน์ เสนาทอง
วัน เดือน ปีเกิด 13 พฤศจิกายน 2525
ประวัติการศึกษา 2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] R. Senathong, C. Phongcharoenpanich, "Printed Diamond Slot Antenna Fed by a Cross Microstrip Line for 5.5 GHz RFID Reader" *Proceeding of the 2010 Joint International Conference on Information & Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE2010)*, Luangprabang, pp. 535 - 538 Dec 21 - Dec 24, 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้