

สายอากาศทิศทางเดียวโพลาไรซ์วงกลมแบนด์กว้างบroadbandเดี่ยว
โดยใช้แผ่นพับและแพตช์พาราซิติกสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล
อาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล

SINGLE-FED BROADBAND CIRCULARLY POLARIZED UNIDIRECTIONAL
ANTENNA USING FOLDED PLATE WITH PARASITIC PATCH
FOR UNIVERSAL UHF RFID READERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-102

สายอากาศทิศทางเดี่ยวโพลาไรซ์วงกลมแบนด์กว้างป้อนสัญญาณเดี่ยว
โดยใช้แผ่นพับและแพตช์พาราซิติคสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล
อาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล

SINGLE-FED BROADBAND CIRCULARLY POLARIZED UNIDIRECTIONAL
ANTENNA USING FOLDED PLATE WITH PARASITIC PATCH
FOR UNIVERSAL UHF RFID READERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SINGLE-FED BROADBAND CIRCULARLY POLARIZED UNIDIRECTIONAL
ANTENNA USING FOLDED PLATE WITH PARASITIC PATCH
FOR UNIVERSAL UHF RFID READERS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-D-018-102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

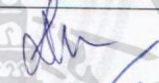

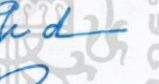

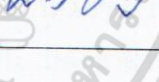
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศทิศทางเดียวโพลารไรซ์วงกลมแบนด์กว้างป้อนสัญญาณเดียวโดยใช้แผ่นพับ
และแพตช์พาราซิติกสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล
Thesis Title Single-Fed Broadband Circularly Polarized Unidirectional Antenna using
Folded Plate with Parasitic Patch for Universal UHF RFID Readers
นักศึกษา ว่าที่ ร.ต. สิทธิชัย เด่นตรี
รหัสประจำตัว 54610127
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) ดร.กมล เขมะรังษี
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-102

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์		
ศ.ดร.ประยุทธ์ อัครเอกตมาลิน		
ผศ.ดร.ทับทิม อ่างแก้ว		
ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์		
รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์		

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-302

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศทิศทางเดี่ยวโพลาริซวงกลมแบนด์กว้างป้อนสัญญาณ เดี่ยวโดยใช้แผ่นพับและแพตช์พาราซิติคสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล อาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล
นักศึกษา	ว่าที่ ร.ต.สิทธิชัย เเด่นตรี
รหัส	54610127
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพานิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศทิศทางเดี่ยวโพลาริซวงกลมแบนด์กว้างป้อนสัญญาณเดี่ยว โดยใช้แผ่นพับและแพตช์พาราซิติคสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล สายอากาศ ประกอบด้วยแผ่นพับ แพตช์พาราซิติค และระนาบกราวนด์ โดยโครงสร้างแผ่นพับสร้างจากแผ่น โลหะขึ้นเดี่ยวประกอบด้วยแพตช์หลักที่ตัดสองมุม แพตช์ผนัง และเส้นป้อนสัญญาณ โดยที่ แพตช์หลักตั้งฉากกับแพตช์ผนัง และแพตช์ผนังตั้งฉากกับเส้นป้อนสัญญาณ ซึ่งโครงสร้างแผ่นพับ ทำให้เกิดกระแสไหลต่างเฟส จากผลการจำลองมีแบนด์วิดท์คิดเป็น 18% เมื่อพิจารณาที่ $|S_{11}|$ มีค่า น้อยกว่า -15 dB ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ 805-966 MHz มีอัตราส่วนแบนด์วิดท์เมื่อ พิจารณาที่ค่าน้อยกว่า 3 dB คิดเป็น 14% ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ 834-962 MHz และ อัตราขยายมากกว่า 8.6 dBic จากผลการทดสอบมีแบนด์วิดท์คิดเป็น 18% เมื่อพิจารณาที่ $|S_{11}|$ มีค่าน้อยกว่า -15 dB ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ 806-970 MHz มีอัตราส่วนแบนด์วิดท์เมื่อ พิจารณาที่ค่าน้อยกว่า 3 dB คิดเป็น 16% ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ 816-963 MHz และ อัตราขยายมากกว่า 7.8 dBic สายอากาศที่นำเสนอสามารถใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี ย่านยูเอชเอฟสากลที่ครอบคลุมความถี่ยูเอชเอฟอาร์เอฟไอดีตั้งแต่ 840-960 MHz การศึกษา พารามิเตอร์และวิวัฒนาการของสายอากาศที่นำเสนอมีรายละเอียดในวิทยานิพนธ์นี้

Thesis Title	Single-Fed Broadband Circularly Polarized Unidirectional Antenna using Folded Plate with Parasitic Patch for Universal UHF RFID Readers
Student	Acting Sub Lt.Sitthichai Dentri
Student ID.	54610127
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This research proposes a simple economical broadband circularly polarized antenna for universal ultra-high frequency (UHF) RF identification (RFID) readers. The antenna utilizes a folded plate, a two-corner truncated parasitic patch, and a ground plane. The folded plate, which is fabricated from one single plate, consists of a two-corner truncated main patch, a wall patch, and a feed line, where the main patch is perpendicular to the wall patch, which is in turn perpendicular to the feed line. The folded plate enables currents to flow with a phase difference. The simulation results achieved an $|S_{11}| < -15$ dB at 805–966 MHz (18% bandwidth), a 3-dB axial ratio (AR) bandwidth of 834–962 MHz (14% AR bandwidth), and a gain higher than 8.6 dBic. The measured results obtained an $|S_{11}| < -15$ dB at 806–970 MHz (18%), a 3-dB AR bandwidth of 816–963 MHz (16%), and a gain greater than 7.8 dBic. The proposed antenna is applicable for universal UHF RFID readers as it covers the entire operating UHF RFID frequency range of 840–960 MHz. The parametric study and evolution of the proposed antenna are detailed in this thesis as well.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญ พานิชย์ และ ดร.กมล เขมะรังษี ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุด ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (Thailand Graduate Institute of Science and Technology) หรือทุน TGIST ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้

ขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการการสื่อสารไร้สายทุกท่าน ที่ให้การแนะนำ ช่วยเหลือและ สนับสนุนงานวิจัยของข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ นางสาวสุรอยุธยา อับดุลสลาม ที่เป็นเสมือนคู่คิดและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

ขอขอบคุณบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สิทธิชัย เด่นตรี



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	5
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 สายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 สายอากาศโครงสร้างเริ่มต้น.....	7
2.2.1 สายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ.....	12
2.2.2 การบ่อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล.....	13
2.3 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ.....	16
2.3.1 โพลารไรซ์ของสายอากาศ.....	16
2.3.2 อัตราส่วนแกนของสายอากาศ.....	19
2.3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	21
2.3.4 สภาพเจาะจงทิศทางและอัตราขยายของสายอากาศ.....	22
2.4 งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี ยูเอชเอฟสากล.....	24
2.5 บทสรุป.....	32
บทที่ 3 แพตช์พาราซิติคและการตัดมุมสองด้าน.....	33
3.1 บทนำ.....	33
3.2 การเพิ่มแพตช์พาราซิติค.....	33
3.3 การตัดมุมสองด้านของแพตช์หลัก (ΔL_1) และแพตช์พาราซิติค (ΔL_2).....	36
3.4 บทสรุป.....	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลและการวิเคราะห์ผล.....	40
4.1 บทนำ.....	40
4.2 งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล.....	40
4.3 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลและการวิเคราะห์ผล....	41
4.3.1 ความสูงแผ่นพับ (h_1) ความสูงแพตช์ผนัง (h_2) และความสูงแพตช์พาราซิติค (h_3).....	41
4.3.2 ขนาดของเส้นป้อนสัญญาณ ($w \times l$) ความยาวของสตรีปวงจรปลายเปิด (l) และความยาวของแพตช์ผนัง (w).....	43
4.3.3 ขนาดของระนาบกราวด์ (L_g).....	45
4.3.4 การกระจายเวกเตอร์กระแสของแพตช์ผนังและแพตช์หลัก.....	46
4.3.5 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศ.....	47
4.4 บทสรุป.....	48
บทที่ 5 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลต้นแบบ.....	49
5.1 บทนำ.....	49
5.2 สายอากาศต้นแบบ.....	49
5.3 การทดสอบสายอากาศต้นแบบ.....	50
5.3.1 การทดสอบ $ S_{11} $ ของสายอากาศต้นแบบ.....	52
5.3.2 การทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศต้นแบบ.....	52
5.3.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ.....	53
5.3.4 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....	55
5.3.5 การทดสอบระยะทางการติดต่อสื่อสารกับแท็กในระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟ.....	57
5.4 บทสรุป.....	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61
6.2 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	61
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ประวัติผู้เขียน.....	67



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์.....	9
2.2	การเปรียบเทียบขนาดโครงสร้าง คุณลักษณะทางไฟฟ้าและระยะการอ่านสูงสุด...	32
5.1	พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	50
5.2	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้นำเสนอ บนระนาบ x-z และ x-y	53
5.3	คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นและบีมิวริธอัตราส่วนแกนของ สายอากาศต้นแบบ.....	56
5.4	ระยะการอ่านสูงสุดของสายอากาศต้นแบบ (กำลัง 4 W EIRP).....	57
5.5	คำนวณระยะอ่านสูงสุด.....	58
5.6	การเปรียบเทียบขนาดโครงสร้าง คุณลักษณะทางไฟฟ้าและระยะการอ่านสูงสุด ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟ.....	59



สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างของระบบอาร์เอฟไอดี.....	1
1.2	ย่านความถี่ที่ใช้งานของระบบอาร์เอฟไอดี.....	2
1.3	ลักษณะการสื่อสารข้อมูลระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก.....	3
2.1	สายอากาศโครงสร้างพื้นฐาน.....	7
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง (I_f) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์.....	9
2.3	$ S_{11} $ ของสายอากาศแพตช์.....	10
2.4	อัตราส่วนแกนของสายอากาศแพตช์ที่มุมต่างๆ.....	10
2.5	แสดงกระแสที่ไหลบนผิวแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่น ระนาบที่เวลา (t) ต่าง ๆ (ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{4}$ (ค) $t = \frac{T}{2}$ (ง) $t = \frac{3T}{4}$	11
2.6	สายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ.....	13
2.7	การป้อนสัญญาณด้วยเทคนิควิธีต่างๆ.....	14
2.8	ลักษณะการโพลาริซ์เชิงเส้น.....	16
2.9	ผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนแพตช์หลักของสายอากาศโครงสร้าง ที่ได้นำเสนอ.....	17
2.10	ลักษณะการโพลาริซ์วงกลม.....	19
2.11	ผลจำลองอัตราส่วนแกนเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดแพตช์หลักและแผ่นผนัง.....	21
2.12	ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ xz และ yz ที่ความถี่ 840 MHz เมื่อปรับเปลี่ยนขนาดแพตช์หลักและแผ่นผนัง.....	22
2.13	ผลจำลองค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแผ่นพับที่ได้นำเสนอ เมื่อปรับเปลี่ยนแพตช์หลักและแพตช์ผนัง.....	23
2.14	สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล [15].....	25
2.15	สายอากาศแพตช์หลายชั้นโพลาริซ์วงกลมแบนด์กว้างป้อนสัญญาณเดี่ยวด้วยเส้น สัญญาณชนิดขดลวด [16].....	26
2.16	สายอากาศแพตช์หลายชั้นโพลาริซ์วงกลมแบนด์กว้างป้อนสัญญาณเดี่ยวด้วยเส้น สัญญาณชนิดขดลวด [18].....	27
2.17	สายอากาศแพตช์หลายชั้นโพลาริซ์วงกลมแบนด์กว้างป้อนสัญญาณเดี่ยวด้วยเส้น สัญญาณชนิดขดลวด [19].....	28
2.18	สายอากาศแพตช์ป้อนสัญญาณรูปตัวเอฟร่วมด้วยส่วนโค้ง [20].....	29
2.19	สายอากาศแพตช์วงกลมเจาะร่องป้อนสัญญาณด้วยโพรบรูปตัวแอล [22].....	31

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.1	การเพิ่มแพตช์พาราซิติคบนสายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ.....	33
3.2	ผลของประสิทธิภาพสายอากาศของขนาดแพตช์พาราซิติคที่ยังไม่มีการตัดมุมสองด้าน (ก) $ S_{11} $ และ (ข) อัตราส่วนแกน.....	34
3.3	ผลของประสิทธิภาพสายอากาศของความสูงแพตช์พาราซิติคที่ยังไม่มีการตัดมุมสองด้าน (ก) $ S_{11} $ และ (ข) อัตราส่วนแกน.....	35
3.4	ผลของประสิทธิภาพสายอากาศของการตัดมุมสองด้านของแพตช์หลัก (ΔL_1) และแพตช์พาราซิติค (ΔL_2) (ก) $ S_{11} $ และ (ข) อัตราส่วนแกน.....	37
3.5	ผลประสิทธิภาพสายอากาศของการตัดมุมสองด้านของแพตช์หลัก (ΔL_1) (ก) $ S_{11} $ และ (ข) อัตราส่วนแกน.....	37
3.6	ผลประสิทธิภาพสายอากาศของการตัดมุมสองด้านของแพตช์พาราซิติค (ΔL_2) (ก) $ S_{11} $ และ (ข) อัตราส่วนแกน.....	38
4.1	สายอากาศที่นำเสนอ ($h_1 = 5 \text{ mm}$ $h_3 = 16 \text{ mm}$ $L_g = 220 \text{ mm}$) (ก) รูปร่างและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอ (ข) ขนาดของสายอากาศที่นำเสนอ.....	41
4.2	ผลของ $ S_{11} $ และอัตราส่วนแกนต่อประสิทธิภาพสายอากาศ (ก) ความสูงแผ่นพับ (h_1) (ข) ความสูงแพตช์ผนัง (h_2) และ (ค) ความสูงแพตช์พาราซิติค (h_3).....	42
4.3	ผลของอินพุตอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนแกนต่อประสิทธิภาพสายอากาศ (ก) ความกว้างเส้นป้อนสัญญาณ (w_f) (ข) ความยาวของเส้นป้อนสัญญาณ (l_f) (ค) ความยาวสตรีปวงจรมัลติเพล็กซ์ และ (ง) ความกว้างแพตช์ผนัง (w_f).....	44
4.4	ผลของระนาบกราวด์ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ.....	45
4.5	ผลจำลองการกระจายกระแสที่ไหลบนตัวแพตช์ผนังและแพตช์หลักของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลที่ได้นำเสนอ.....	46

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.1	สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลต้นแบบ.....	49
5.2	การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบในห้องไร้การสะท้อน....	51
5.3	ผลผลการจำลองและผลทดสอบ $ S_{11} $ ของสายอากาศที่ได้นำเสนอ.....	52
5.4	ผลการจำลองและผลทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศต้นแบบ.....	53
5.5	ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 840 MHz.....	54
5.6	ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 900 MHz.....	54
5.7	ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 960 MHz.....	55
5.8	ผลจำลองและผลทดสอบอัตราขยายสายอากาศ.....	56



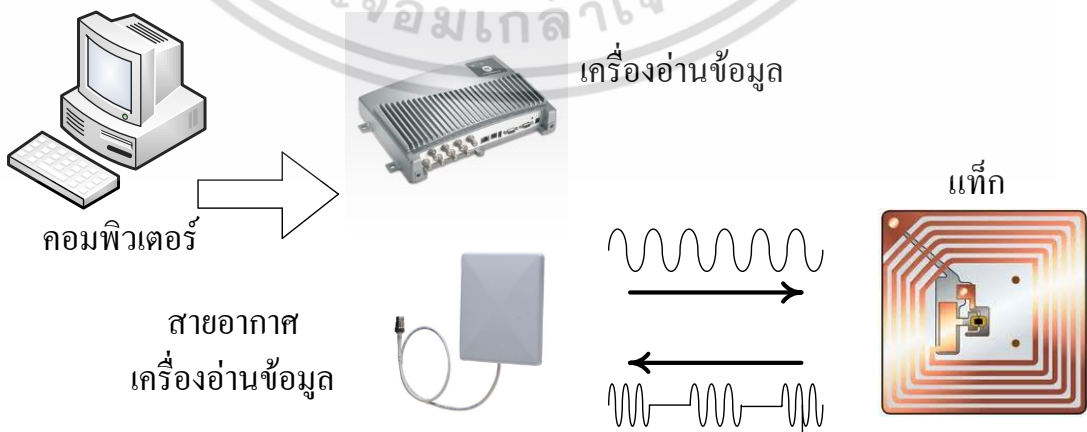
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

อาร์เอฟไอดี (RFID: Radio frequency identification) คือระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ หรือระบบระบุบ่งบอกตัวตนแบบไร้สาย การประยุกต์เทคโนโลยีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ มีรูปแบบหลากหลายด้วยจุดประสงค์ที่แตกต่างกันแต่อยู่บนหลักการพื้นฐานเดียวกัน นั่นคือการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อการระบุเอกลักษณ์ของวัตถุที่ถูกติดป้ายแทนการระบุด้วยวิธีการอื่น ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยอำนวยความสะดวกและเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีกว่า

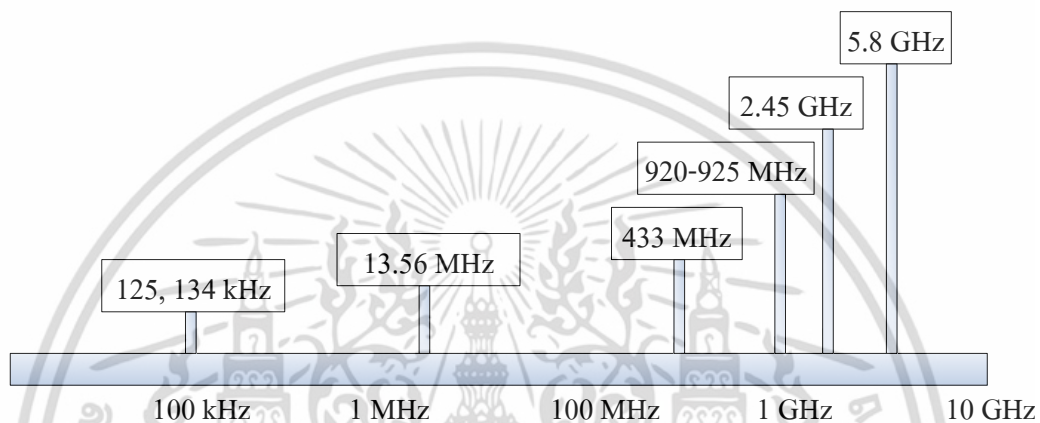
ปัจจุบันมีระบบต่างๆ มากมายที่ใช้เทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีมีความสามารถระบุบ่งบอกตัวตนหรือสิ่งของได้เอง (Automatic identification) อาร์เอฟไอดีซึ่งได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง กำลังได้รับความสนใจและถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการนำไปใช้งานแทนระบบรหัสแท่งหรือบาร์โค้ด (Barcode) โดยจุดเด่นของระบบอาร์เอฟไอดีคือ สามารถอ่านค่าข้อมูลจากป้ายหรือเครื่องลูกข่ายได้หลาย ๆ ตัวในเวลาเดียวกัน แบบไร้การสัมผัส สามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี (มองไม่เห็น) สามารถอ่านค่าได้แม้ไม่ต้องอยู่ในแนวเส้นสายตากับเครื่องอ่าน ทนต่อความเปียกชื้น แร่งสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก สามารถอ่านค่าข้อมูลได้ระยะไกล และด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกเก็บในไมโครชิปที่อยู่ในแท็ก ณ ปัจจุบัน พบว่าเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีได้ถูกนำมาใช้งานร่วมกับชีวิตประจำวันมากขึ้น อาทิเช่น การใช้บัตรผ่านเข้าออกห้องพัก สำนักงาน หรือที่จอดรถตามศูนย์การค้าต่างๆ การใช้งานในภาคอุตสาหกรรม การใช้งานในระบบโลจิสติกส์ การใช้งานด้านการผลิต การใช้งานการจัดการสินค้า หรือแม้กระทั่งการใช้งานกับมนุษย์ สัตว์ และสินค้าต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 ระบบอาร์เอฟไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบอาร์เอฟไอดีมีองค์ประกอบหลักๆ อยู่ 3 ส่วนดังรูปที่ 1.1 คือ ส่วนแรกคือ เครื่องอ่านข้อมูล (Reader) รวมถึงสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล (Reader antenna) มีหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างแท็ก ส่วนที่สองคือแท็ก (Tag antenna) เป็นตัวระบุเอกลักษณ์ที่ใช้ติดกับวัตถุ และส่วนสุดท้ายคือส่วนควบคุม (Host computer) ทำหน้าที่ในการอ่านและเขียนข้อมูลของแท็ก โดยหลักการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดี คือ เมื่อแท็กเข้ามาในช่วงการทำงานของเครื่องอ่านข้อมูล เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุไปยังแท็ก หลังจากนั้นแท็กจะส่งสัญญาณกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล



รูปที่ 1.2 ย่านความถี่ที่ใช้งานของระบบอาร์เอฟไอดี

ในปัจจุบันระบบอาร์เอฟไอดีได้แบ่งย่านความถี่ใช้งาน ออกเป็น 4 ย่านความถี่ คือ

- ย่านความถี่ต่ำ (Low frequency: LF) 135/125/134.2 kHz
- ย่านความถี่สูง (High frequency: HF) 13.56 MHz
- ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (Ultra-high frequency: UHF) 433/860-960 MHz
- ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) 2.4/5.8 GHz

ในรูปที่ 1.2 แต่ละย่านความถี่ที่ได้กล่าวมานั้นมีคุณสมบัติ และการใช้งานจำเพาะเจาะจงที่แตกต่างกันออกไป อาทิเช่น

- อาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำจะเหมาะกับงานที่ต้องการระยะทางใกล้และไม่ต้องการการอ่านข้อมูลที่รวดเร็วมาก เช่น งานประเภทตรวจหาและเก็บประวัติของสัตว์ ป้ายสินค้าที่หรือระบบกันขโมยในรถยนต์ เป็นต้น

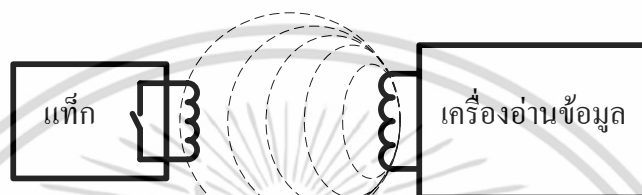
- อาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงจะมีระยะทางการติดต่อสื่อสารค่อนข้างไกลและมีอัตราการรับส่งข้อมูลที่ปานกลางโดยได้นำไปใช้ในงานที่ห้องสมุดสมาร์ทการ์ดและบัตรเข้าออกสถานที่ เป็นต้น

- อาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟมีระยะการติดต่อสื่อสารได้ไกลกว่าย่านความถี่สูงและมีความสามารถในการอ่านข้อมูลรวดเร็วมาก การใช้งานโดยส่วนมากจะถูกนำไปใช้กับระบบการขนส่งสินค้า ระบบการบริหารคลังสินค้า หรือแม้แต่การใช้งานร่วมกับรหัสสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ EPC

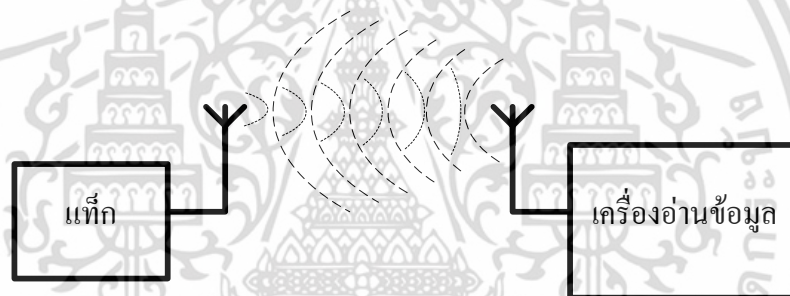
(Electronic product code) ตามมาตรฐาน EPC Global Class 1 Gen 2 และในปัจจุบันยังพบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ดังกล่าวมีการใช้งานทางด้านการค้าขายมีมากขึ้นเป็นทวีคูณ และอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟในแต่ละประเทศมีการอนุญาตให้ใช้ความถี่ของอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่ยูเอชเอฟแตกต่างกัน เช่น ยุโรป คือ 865.6 MHz ถึง 867.6 MHz อเมริกาเหนือและใต้ คือ 902 MHz ถึง 928 MHz ญี่ปุ่น คือ 952 MHz ถึง 957.6 MHz จีน คือ 840.5-844.5/920.5-924.5 MHz ส่วนในประเทศไทย คือ 920 MHz ถึง 925 MHz ซึ่งอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลครอบคลุม ช่วงความถี่ในการปฏิบัติการทั้งหมดของ 840-960 MHz (แบนด์วิดธ์ร้อยละ 13.3%)

- อาร์เอฟไอดีย่านความถี่ไมโครเวฟมีระยะการอ่านไกลกว่า 10 m ซึ่งใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) อุตสาหกรรมรถยนต์และการเข้าออกสถานที่



(ก) วิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในย่านความถี่ต่ำ และย่านความถี่สูง



(ข) วิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในย่านความถี่ยูเอชเอฟและความถี่ไมโครเวฟ
รูปที่ 1.3 ลักษณะการสื่อสารข้อมูลระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก

การติดต่อสื่อสารระบบอาร์เอฟไอดีสามารถแบ่งออกเป็นสองหลักการคือ วิธีแรกเป็นวิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Inductive coupling หรือ Proximity electromagnetic) โดยอาศัยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการโอนถ่ายกำลังงานบนระยะสนามใกล้ (Near field) โดยส่วนมากมักจะพบในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 1.3(ก) วิธีที่สองเป็นวิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic propagation coupling) เป็นการติดต่อสื่อสารแบบการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering) อาศัยสนามไฟฟ้าในการโอนถ่ายกำลังงานบนระยะสนามไกล (Far field) อาศัยหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับระบบเรดาร์ จะเหมาะกับการใช้งานที่ย่านความถี่ยูเอชเอฟและไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 1.3(ข) ซึ่งการติดต่อสื่อสารแบบการกระจัดกระจายย้อนกลับดังที่ได้กล่าวมาต้องคำนึงถึงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ

เครื่องอ่านข้อมูลและแท็กเพื่อให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้เต็มประสิทธิภาพต้องมีโพลาไรซ์ที่ตรงกัน ถ้ามีโพลาไรซ์ที่ไม่ตรงกัน (Polarization mismatch) ประสิทธิภาพการติดต่อสื่อสารลดลง

อย่างชัดเจนหรือไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการนำสายอากาศเครื่องอ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular polarized: CP radiation) นำมาใช้งาน ประสิทธิภาพการติดต่อสื่อสารจะถูกลดกำลังงานลงไปที่ครึ่งหนึ่งซึ่งเกิดจากตัวประกอบการสูญเสียจากการโพลาไรซ์ (Polarization loss factor: PLF) และนอกจากนี้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลมยังสามารถแก้ไขปัญหาเรื่องการจางหายหลายวิถี (Multipath fading) ได้อีกด้วยจึงเป็นที่มาและความสำคัญในการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ในทางทฤษฎีโพลาไรซ์วงกลมของสายอากาศแพตช์สามารถเกิดได้จากสนามไฟฟ้าสององค์ประกอบที่มีขนาดเท่ากันแต่เฟสต่างกัน 90° [1] โดยสายอากาศโพลาไรซ์วงกลมมีการป้อนสัญญาณ 2 แบบคือการป้อนสัญญาณเดี่ยวและการป้อนสัญญาณหลายจุด [2] โดยการศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อนจะเลือกการป้อนสัญญาณเดี่ยวเพื่อลดความซับซ้อนของโครงสร้างการป้อนสัญญาณ มีงานวิจัยสล็อตรูปร่างต่าง ๆ ถูกนำเสนอบนตัวแพร่กระจายคลื่นสำหรับการเกิดโพลาไรซ์วงกลม [3, 5, 14, 17] ซึ่งได้ความกว้างของอัตราส่วนแกน 4-10% และได้มีการออกแบบสายอากาศโดยใช้เทคนิคคัปปลิงแม่เหล็กไฟฟ้าสองชั้นเพื่อให้เกิดโพลาไรซ์วงกลมถูกนำเสนอใน [4] มีความสำเร็จในการใช้โพรบป้อนสัญญาณรูปตัวแอลในการนำเสนอสายอากาศโพลาไรซ์วงกลมที่แพร่กระจายคลื่นโพลาไรซ์วงกลมที่ได้ความกว้างอัตราส่วนแกนประมาณ 9% [6-9, 22] มีงานวิจัยที่สามารถปรับปรุงโพลาไรซ์วงกลมโดยใช้ช่องรูปตัวแอกบนตัวแพตช์ [10] นอกจากนี้มีการเพิ่มแพตช์เป็นสองชั้นเพื่อขยายช่วงกว้างอัตราส่วนแกนได้มากกว่า 13% โดยเรียกเทคนิคนี้ว่าการเพิ่มแพตช์พาราซิติก [11-12, 18] อย่างไรก็ตามการตัดมุมสองด้านก็เป็นที่นิยมในการสร้างโพลาไรซ์วงกลม [13] แต่ก็ได้ช่วงกว้างอัตราส่วนแกนไม่มากนัก จากหลายๆเทคนิคที่กล่าวมาได้มีการพัฒนาการป้อนสัญญาณให้ตัวแพตช์แพร่กระจายคลื่นรวมกับแพตช์พาราซิติกและการตัดมุมสองด้านเพื่อขยายความกว้างอัตราส่วนแกน [15-16] ซึ่งทำให้ได้ความถี่ใช้งานครอบคลุมอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล อีกเทคนิคที่ทำให้เกิดโพลาไรซ์วงกลมที่น่าสนใจคือตัวป้อนสัญญาณแบบเนตเวิร์ค ซึ่งความกว้างอัตราส่วนแกนประมาณ 20% แต่ก็มีผลซับซ้อนในการออกแบบและมีทั้งการป้อนสัญญาณเดี่ยวและป้อนสัญญาณหลายจุดโดยมีการนำไปใช้ร่วมกับวงแหวนอีกด้วย [20-21] จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการเพิ่มความกว้างอัตราส่วนแกน ซึ่งสายอากาศจะแพร่กระจายคลื่นโพลาไรซ์วงกลมก็ต้องมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ครอบคลุมความถี่ที่ต้องการด้วย โดยมีเทคนิคการพับแพตช์เพื่อเพิ่มความกว้างแบนด์วิดธ์ [23] ต่อมาจากการค้นคว้าสายอากาศเชิงพาราซิติก [24-27] พบว่าขนาดประมาณ $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ มีอัตราขยายประมาณ 8 dBic ครอบคลุมความถี่ใช้งาน 860 -960 MHz ในระบบอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล และมี $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -15 dB ตลอดย่านความถี่ใช้งาน

จากการศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อน พบว่าสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากลที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเจาะจงทิศทาง (Unidirectional radiation pattern) สามารถแบ่งโครงสร้างออกได้ 3 ประเภทหลักคือ โครงสร้างชั้นเดียว (Single layer structure) โครงสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นสองชั้น (Suspended structure) และโครงสร้างซ้อนกันหลายชั้น (Stacked structure) โดยทั่วไป สายอากาศโครงสร้างชั้นเดียวจะมีแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ ($|S_{11}|$ bandwidth) เพียง 1-2% และมีค่าอัตราขยายน้อยกว่า 4 dBi แต่โครงสร้างดังกล่าวง่ายต่อการออกแบบและน้ำหนักเบา สำหรับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นสองชั้นมีแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ ประมาณ 2-5% และมีค่าอัตราขยายน้อยกว่า 9 dBi และสำหรับสายอากาศโครงสร้างซ้อนกันหลายชั้นมีแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ มากกว่า 10% และมีค่าอัตราขยายมากกว่า 9 dBi

ด้วยเหตุนี้สายอากาศอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากลที่ครอบคลุม ช่วงความถี่ในการปฏิบัติการทั้งหมดของ 840-960 MHz (แบนด์วิดธ์ร้อยละ 13.3%) จะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมและจะแก้ไขปัญหาคลื่นความถี่ที่แตกต่างกันในพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกัน เพื่อให้ครอบคลุมย่านความถี่ดังกล่าว ได้นำเทคนิคโครงสร้างแผ่นพับร่วมกับแพตช์พาราซิติคและการตัดมุมสองด้าน เพื่อต้องการออกแบบให้สายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากลที่สามารถครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 840 ถึง 960 MHz ตามความต้องการของระบบโดยคำนึงถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้า $|S_{11}|$ ค่าอัตราส่วนแกน อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา พัฒนาและออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล (840 ถึง 960 MHz) โดยใช้สายอากาศโครงสร้างแผ่นพับและออกแบบให้แผ่นแพร่กระจายคลื่นเกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม ป้อนสัญญาณด้วยโพรบและมีแบบรูปการกระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงการเปลี่ยนความถี่ใช้งานของโครงสร้างแผ่นพับ และขยายแบนด์วิดธ์โดยการเพิ่มแพตช์พาราซิติคที่วางเหนือแผ่นแพร่กระจายคลื่น เพื่อต้องการสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟครอบคลุมแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ ตั้งแต่ 840 ถึง 960 MHz และนอกจากนี้ แผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมแพตช์พาราซิติคได้ถูกตัดมุมทั้งสองด้าน (Truncated corner) ส่งผลทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นโพลาริซวงกลมและมีอัตราส่วนแกนแบนด์วิดธ์ 3 dB ครอบคลุมตามความต้องการของระบบอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล อีกทั้งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางและมีอัตราขยายมากกว่า 8 dBi ตลอดย่านความถี่ยูเอชเอฟ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อาศัยโปรแกรม CST microwave studio [28] ในการจำลองและสังเกตคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล และได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบพร้อมทั้งเปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบ สำหรับหัวข้อย่อยลำดับถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์การศึกษา ขอบเขต การวิจัยและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงสายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ

บทที่ 3 กล่าวถึงการขยายแบนด์วิดท์อัตราส่วนแกนด้วยแพตช์พาราซิติกและการตัดมุมสองด้าน

บทที่ 4 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลและการวิเคราะห์ผล

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลต้นแบบ

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

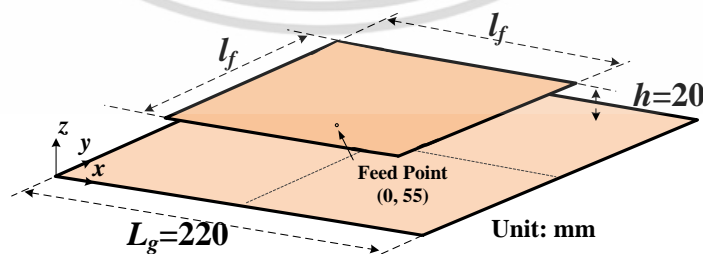
สายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ

2.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและการคำนวณแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมของสายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ พร้อมด้วยป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล (Coaxial probe) โดยสายอากาศที่ได้นำเสนอจะถูกออกแบบให้มีการโพลาไรซ์วงกลม พร้อมด้วยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง สายอากาศโครงสร้างแผ่นพับได้ศึกษาถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าหลักๆ คือ $|S_{11}|$ การโพลาไรซ์ อัตราส่วนแกน (Axial ratio) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) โดยสายอากาศโครงสร้างดังกล่าวถูกออกแบบที่ความถี่ขบกลางคือ 840 MHz เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟ ในลำดับต่อไป

2.2 สายอากาศโครงสร้างเริ่มต้น

ปัจจุบันสายอากาศแพตช์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายแก่นักวิจัยและนักพัฒนาเป็นอย่างมาก เนื่องจากสายอากาศประเภทนี้มีโครงสร้างแบนเรียบ น้ำหนักเบา วัสดุที่ใช้ผลิตมีราคาถูก สำหรับสายอากาศแพตช์โครงสร้างพื้นฐานหรือสายอากาศแพตช์ชั้นเดียว ประกอบด้วยแผ่นตัวนำจำนวนสองแผ่นวางขนานกันโดยมีวัสดุฐานรองอากาศ (Air substrate) คั่นกลางระหว่างแผ่นตัวนำด้านบนกับแผ่นตัวนำด้านล่าง ในส่วนแผ่นตัวนำด้านบนจะมีขนาดที่เล็กกว่าแผ่นตัวนำอีกด้านซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiating plate) สำหรับแผ่นตัวนำที่มีขนาดใหญ่กว่าเรียกว่าระนาบกราวด์ (Ground plane) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สายอากาศโครงสร้างพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่าความถี่ที่ใช้งานในระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลมีความถี่เริ่มต้นที่ 840 MHz ถึง 960 MHz โดยมีค่าความถี่กลางเท่ากับ 900 MHz ตามมาตรฐานของประเทศไทย

λ_0 คือ ค่าความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ

c คือ ความเร็วแสงในช่องว่างอิสระ

ดังนั้น

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \left(\frac{3 \times 10^8}{840 \times 10^6} \right) = 0.357 \text{ m} \quad (2.1)$$

การกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศ ในส่วนการคำนวณหาขนาดของสายอากาศแพทช์ที่มีความสูง h ของวัสดุฐานรองน้อยกว่าความยาว L ของสายอากาศแพทช์หลายๆ และมีความสูง h ของวัสดุฐานรองน้อยกว่าความกว้าง W ของสายอากาศแพทช์มาก ๆ เมื่อทำการกำหนดให้ขนาดแผ่นตัวนำของสายอากาศแพทช์ $l_f = W$ ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดของแผ่นตัวแพร์กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้จากสมการที่ 2.2

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2l_f \sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2l_f \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

โดยที่

h	คือความสูงของตัวแพร์กระจายคลื่นของสายอากาศแพทช์
L	คือความยาวของตัวแพร์กระจายคลื่นของสายอากาศแพทช์
W	คือความกว้างของตัวแพร์กระจายคลื่นของสายอากาศแพทช์
μ	คือค่าความซึมซาบ
ϵ	คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
v_0	คือความเร็วของแสง
ϵ_r	คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

$$W = l_f = \frac{3 \times 10^8}{2(840 \times 10^6) \sqrt{1}} = 178.5 \text{ mm}$$

ดังนั้นความกว้างเริ่มต้น $l_f = W$ มีค่าเท่ากับ 178.5 mm และขนาดความยาวของสายอากาศแพทช์กำหนดให้ $l_f = L$ ซึ่งกำหนดค่าเริ่มต้นได้จากเงื่อนไขดังนี้ คือ ค่าความยาว (l_f) ของสายอากาศแพทช์จะต้องยาวกว่าความกว้าง (l_f) ของสายอากาศแพทช์ แต่ความกว้าง (l_f) จะต้องกว้างกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวของสายอากาศแพทช์ $\left(h < \frac{l_f}{2} \right)$

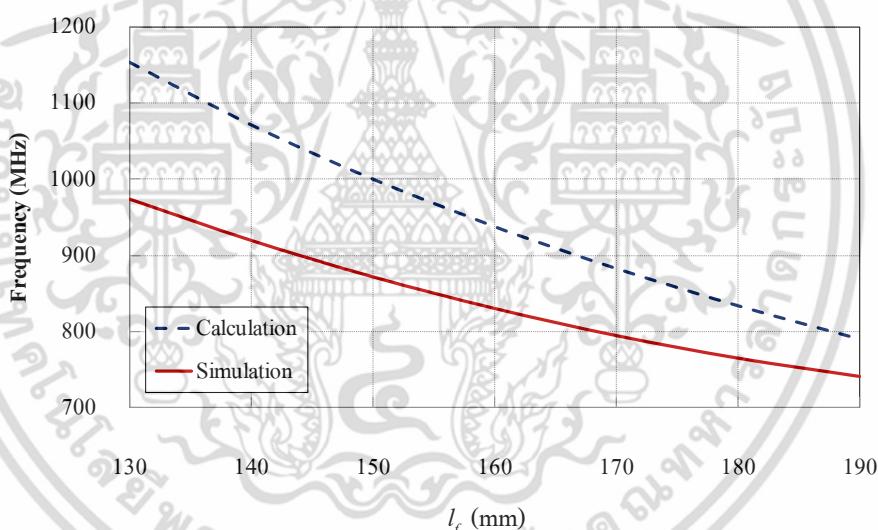
จากการคำนวณจึงได้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศแพทช์ แสดงดังรูปที่ 2.1 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศแบบแผ่นระนาบแสดงดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 840 MHz (mm)
L_g	220
l_f	178.5
h	20
x_i	0
y_i	51

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1 ไปจำลองเป็นสายอากาศเริ่มต้น ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง (l_f) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

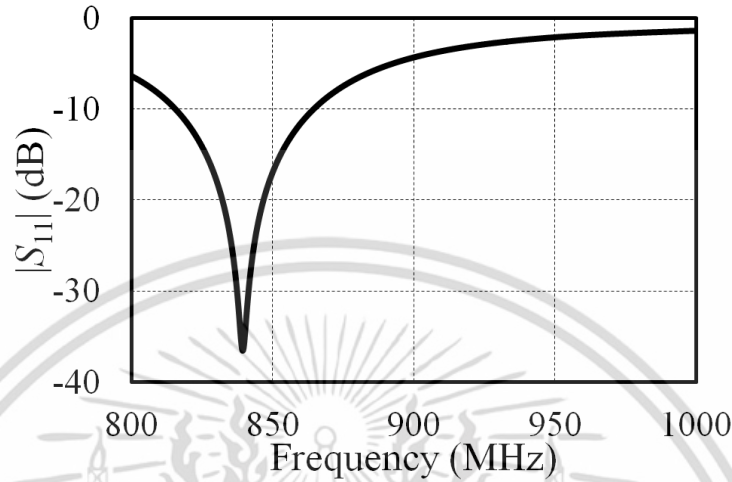


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง (l_f) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์

จากรูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง (l_f) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์ โดยในการจำลองสายอากาศแบบแผ่นระนาบกำหนดให้ระนาบกราวด์มีขนาด ความยาว (L_g) เท่ากับ 220 mm และค่าความกว้าง (L_g) เท่ากับ 220 mm และมีจุดป้อนสัญญาณที่ x_i เท่ากับ 0 mm และ y_i เท่ากับ 51 mm พบว่าความกว้าง (l_f) ของสายอากาศ ส่งผลต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเป็นอย่างมาก และจะสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มเดียวกันกับค่าที่ได้จากการจำลองผล ดังนั้นในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศจึงใช้การจำลองผลเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของสายอากาศ

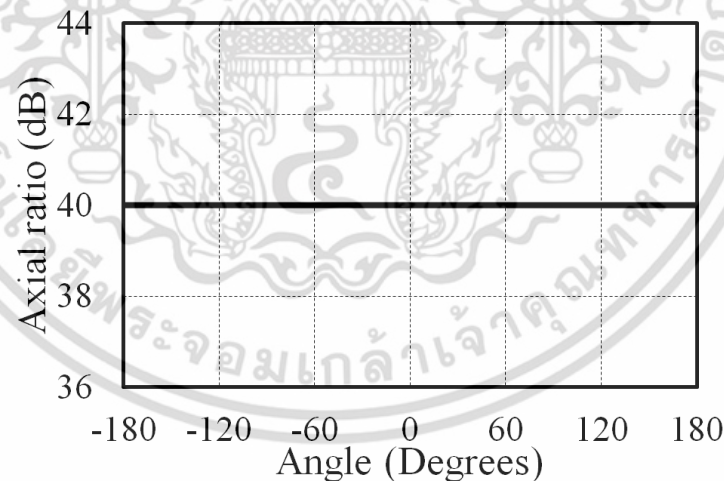
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศแพทช์แสดงดังรูปที่ 2.1 จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.1 และเมื่อนำไปจำลองสายอากาศเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของสายอากาศจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแพทช์ พบว่าผลที่ได้จากการจำลองคือ $|S_{11}|$ และค่าอัตราส่วนแกนแสดงดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพทช์

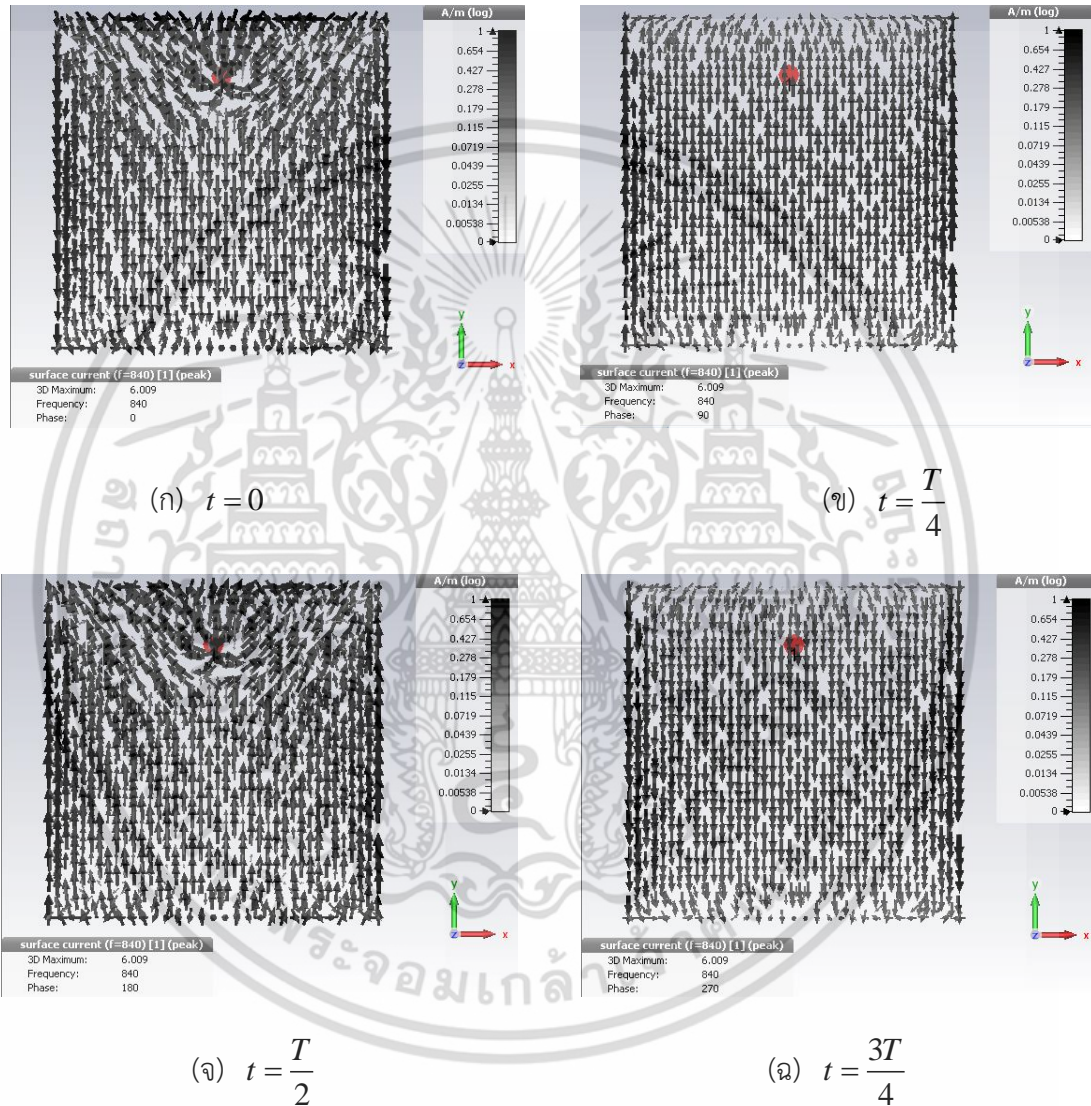
จากรูปที่ 2.3 พบว่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพทช์ในช่วงที่ความถี่ใช้งานมีค่าน้อยกว่า -10 dB ที่ความถี่ 840 MHz



รูปที่ 2.4 ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแพทช์ที่มุมต่างๆ

จากรูปที่ 2.4 เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบแผ่นระนาบที่ความถี่กลางของความถี่ใช้งานที่ 840 MHz ที่มุมต่าง ๆ พบว่าค่าอัตราส่วนแกนมีค่าสูงกว่า 3 dB ทุกมุม ส่งผลให้สายอากาศไม่เกิดการโพลาไรซ์วงกลม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงค่าอัตราส่วนแกนให้มีค่าต่ำกว่า 3 dB โดยเฉพาะที่มุม 0° ซึ่งเป็นมุมที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร โดยทำการดัดแปลงโครงสร้างของสายอากาศโดยอาศัยเทคนิคการพับแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น ซึ่งจะทำให้กระแสที่ไหลบริเวณผิวของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน ซึ่งสายอากาศเริ่มต้นที่จะทำการปรับโครงสร้างเพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนแอมป์ให้มีความต่ำกว่า 3 dB ที่ความถี่ใช้งาน โดยจะดูทิศทางการไหลของกระแสที่คาบเวลา (Period: T) ต่าง ๆ บนผิวแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นระนาบ เพื่อที่จะทำการปรับโครงสร้างต่อไป แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงกระแสที่ไหลบนผิวแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นระนาบที่เวลา (t)

ต่าง ๆ (ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{4}$ (ค) $t = \frac{T}{2}$ (ง) $t = \frac{3T}{4}$

จากรูปที่ 2.5 แสดงกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นระนาบที่เวลา (t) ต่าง ๆ พบว่ากระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นที่เวลา (t) เท่ากับ 0 มีทิศ

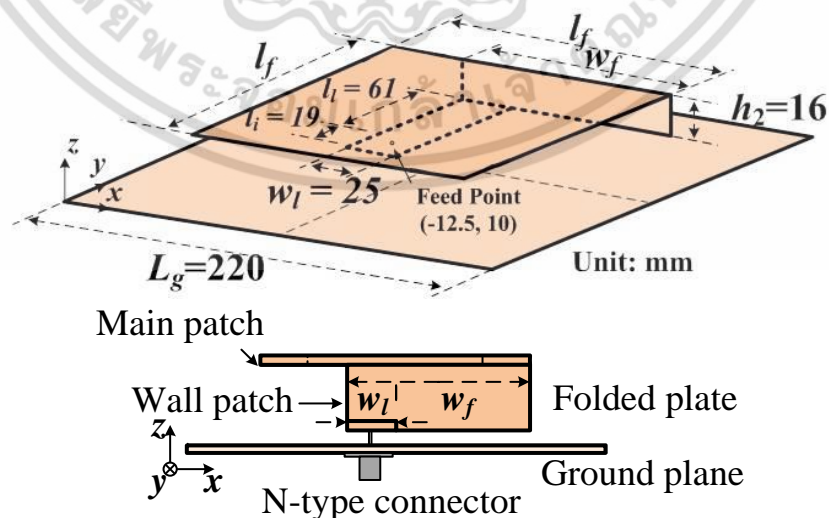
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางการไหลของกระแสที่พุ่งลง ต่อมาที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{4}$ จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสไปในทิศทางที่พุ่งขึ้น ดังนั้นสามารถคาดเดาได้ว่าการไหลของกระแสในทิศทางที่พุ่งขึ้นและพุ่งลงอย่างต่อเนื่อง ไม่สามารถทำให้เกิดการโพลาริซิงกลม

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบ สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมจำลองการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่าอัตราส่วนแแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับ โดยที่สายอากาศจะต้องมีค่าอัตราส่วนแแกนที่น้อยกว่า 3 dB และมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน รวมทั้งขนาดของสายอากาศต้องเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะพับแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนแแกนที่น้อยกว่า 3 dB และเมื่อได้ค่าอัตราส่วนแแกนที่น้อยกว่า 3 dB

2.2.1 สายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ

โครงสร้างและพารามิเตอร์สายอากาศที่นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วยสามชั้นคือ แผ่นพับและระนาบกราวด์ โดยมีช่องว่างระหว่างชั้นเป็นอากาศ ซึ่งแผ่นพับสร้างจากแผ่นเดียวที่ประกอบด้วยแพตช์หลัก แพตช์ผนัง และเส้นป้อนสัญญาณ โดยที่แพตช์หลักเชื่อมต่อกับเส้นป้อนสัญญาณด้วยแพตช์ผนัง แพตช์หลักมีขนาดกว้างและยาว (L_f) 142 mm ซึ่งเชื่อมต่อกับแพตช์ผนังในลักษณะตั้งฉากด้วยขนาดกว้าง (w_f) เท่ากับ 96 mm และสูง (h_2) 16 mm ซึ่งแพตช์ผนังเชื่อมต่อกับเส้นป้อนสัญญาณที่มีขนาดยาว ($l_i + l_f$) เท่ากับ 80 mm และกว้าง (w_l) 25 mm ที่ถูกวางห่าง (h_1) 5 mm เหนือระนาบกราวด์ขนาด (L_g) 220 mm ดังรูปที่ 2.6

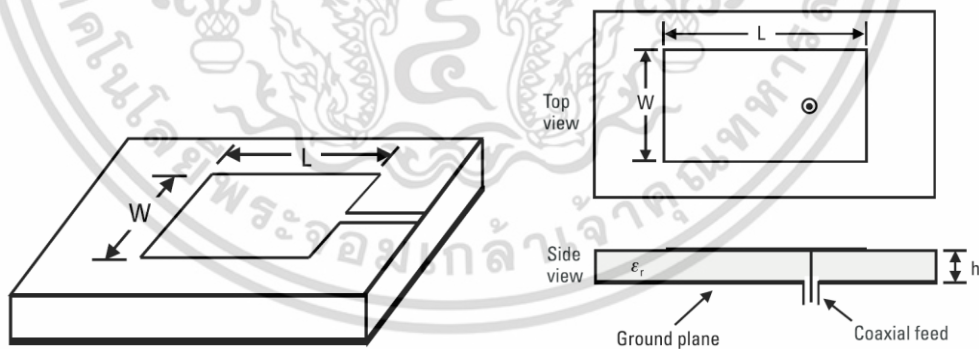


รูปที่ 2.6 สายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล

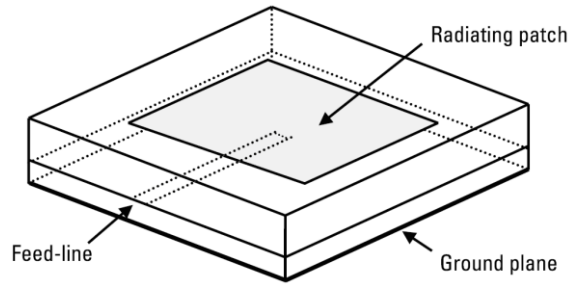
การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศมีหลากหลายเทคนิควิธี สำหรับวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายอาทิเช่น การป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริบ (Microstrip line) การป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล (Coaxial probe) และการป้อนสัญญาณด้วยการเชื่อมร่วมช่องเปิด (Aperture coupling) แสดงดังรูปที่ 2.7 วิธีป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริบมีข้อดีคือสามารถปรับแมตชิงได้ง่าย แต่ก็มีข้อเสียคือสายนำสัญญาณมีการแพร่กระจายกำลังงานออกมารอบกวนแผ่นแพร่กระจายคลื่นและจะมากขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับวิธีป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลมีข้อดีคือสามารถปรับแมตชิงสายอากาศได้ง่ายและมีการแพร่กระจายกำลังงานออกจากตัวโพรบต่ำกว่าการป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริบ แต่มีข้อเสียคือมีแบนด์วิดท์แคบ (Narrowband) จากเทคนิควิธีการป้อนสัญญาณทั้ง 2 ลักษณะที่ได้กล่าวมาจะทำให้เกิดโหมดลำดับสูง (Higher mode) และฮาร์โมนิก (Harmonic) และยังสามารถทำให้สายอากาศมีระดับกำลังของโพลาริเซชันสูงเช่นกัน และสุดท้ายเทคนิควิธีการป้อนสัญญาณด้วยการเชื่อมร่วมช่องเปิดเป็นเทคนิควิธีที่ออกแบบและสร้างยากมากที่สุด แต่มีข้อดีคือมีแบนด์วิดท์กว้าง (Wideband) โดยเทคนิควิธีนี้สามารถใช้งานร่วมกับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างพิมพ์สองชั้นได้อีกด้วย แต่สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อาศัยการป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลซึ่งง่ายต่อการสร้าง ง่ายต่อการแมตชิงและมีการแพร่กระจายกำลังงานออกจากตัวโพรบต่ำ



(ก) สายนำสัญญาณไมโครสตริบ

(ข) โพรบโคแอกเซียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) การเชื่อมต่อร่วมช่องเปิด

รูปที่ 2.7 การป้อนสัญญาณด้วยเทคนิควิธีต่างๆ

การป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลให้กับสายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ โดยตำแหน่งป้อนสัญญาณถูกวางตามแนวแกนตั้งของตัวสายอากาศหรือตามแนวแกน z สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของโพรบโคแอกเซียลได้จากสมการที่ 2.3

$$Z_{in}(TM_{01}) = \frac{R}{1 + Q_t^2 \left(\frac{f}{f_{01}} - \frac{f_{01}}{f} \right)^2} + j \left[X_i - \frac{RQ_t \left(\frac{f}{f_{01}} - \frac{f_{01}}{f} \right)}{1 + Q_t^2 \left(\frac{f}{f_{01}} - \frac{f_{01}}{f} \right)^2} \right] \quad (2.3)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ (R) และค่ารีแอคแตนซ์ (X_i) หาได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$R = \frac{Q_t h_t}{\pi f_{01} \epsilon_{dyn} \epsilon_0 2W} \cos^2 \left(\frac{\pi d_p}{W} \right) \quad (2.4)$$

$$X_i = -\mu_0 f_r h_r \left[\ln \left(\frac{\pi d_0 f_{01} \sqrt{\epsilon_{dyn}}}{2C_0} \right) + 0.577 \right] \quad (2.5)$$

โดยที่ d_0 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดนำไฟฟ้าซึ่งถูกต่อเข้าระหว่างแผ่นแพร่กระจายและโพรบโคแอกเซียล สำหรับ d_p คือ ระยะตำแหน่งจากจุดศูนย์กลางของแผ่นแพร่กระจายคลื่นถึงจุดป้อนสัญญาณ และตัวประกอบเชิงคุณภาพทั้งหมดหาได้จากสมการที่ 2.6 ถึง 2.9 และตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางการแพร่กระจายคลื่น (Q_r) ได้จากสมการที่ 2.6

$$Q_t = Q_{rad} + Q_c + Q_d + Q_{sw} \quad (2.6)$$

ตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียความการนำไฟฟ้า (Q_{rad}) หาได้จากสมการที่ 2.7

$$Q_{rad} = \frac{2\omega\epsilon_r}{h_t \left(\frac{G_t}{W} \right)} (K) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $g_{r/w}$ คือผลรวมค่าการนำไฟฟ้าทั้งหมดต่อความกว้างของแผ่นแพร่กระจายคลื่น และ k เท่ากับ $w/4$ นอกจากนี้ตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางการนำไฟฟ้า (Q_c) หาได้จากสมการที่ 2.8

$$Q_c = h_1 \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.8)$$

μ คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า σ คือ ค่านำไฟฟ้าสัมพัทธ์ระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นและระนาบกราวด์ ตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Q_d) หาได้จากสมการที่ 2.9

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.9)$$

$\tan \delta$ คือ ค่าสูญเสียจากวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก และตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางคลื่นพื้นผิว (Q_{sw}) สำหรับวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่มีความบาง จะมีค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางคลื่นพื้นผิวน้อย โดยมีเงื่อนไข ($h_d \ll \lambda$) และ Q_c มีความสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ (Bandwidth: BW) หาได้จากสมการที่ 2.10

$$BW = \frac{SWR - 1}{Q_c \sqrt{SWR}} \quad (2.10)$$

โดยที่ SWR คือค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing wave ratio) ซึ่งอยู่ในเทอมการสะท้อนกลับของกำลังงานของสายอากาศ ดังนั้นค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพทั้งหมด (Q_c) ต่ำจะส่งผลต่อการแบนด์วิดท์กว้าง (Wideband) และในทางตรงกันข้ามเมื่อค่า Q_c สูง จะทำให้สายอากาศดังกล่าวมีแบนด์วิดท์แคบ (Narrow band)

2.3 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงลักษณะการแพร่กระจายคลื่น (Radiation) ของสายอากาศโครงสร้างแผ่นพับได้แบ่งออกเป็นสี่หัวข้อย่อยๆ คือ การโพลาไรซ์ (Polarization) อัตราส่วนแกน (Axial ratio: AR) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) เพื่อนำมาพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟในลำดับถัดไป

2.3.1 โพลาริซชันของสายอากาศ

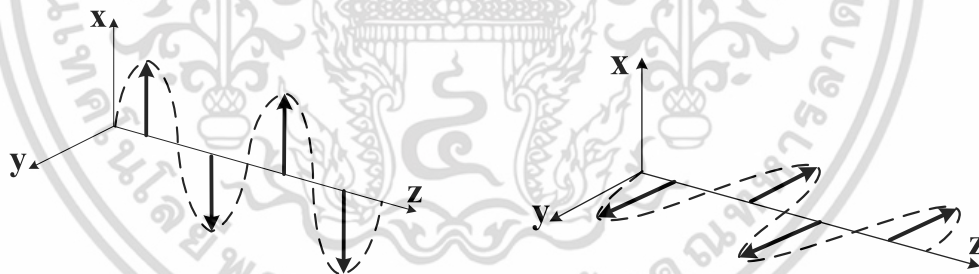
การโพลาริซชันของสายอากาศเป็นตัวบ่งชี้ทิศทางและขนาดสัมพัทธ์ของเวกเตอร์บนสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและสามารถสังเกตลักษณะการกวาดของสนามไฟฟ้าจะมองตามหลังคลื่นที่เดินทางออกไป โดยทั่วไปสายอากาศมีการโพลาริซชันอยู่ 3 ประเภทหลักๆ ด้วยกันคือการโพลาริซชันเชิงเส้น (Linear polarization) การโพลาริซชันวงกลม (Circular polarization) และการโพลาริซชันวงรี (Elliptical polarization) สำหรับการโพลาริซชันเชิงเส้น คลื่นระนาบจะมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาเป็นฮาร์มอนิก โดยมีส่วนสนามไฟฟ้าสององค์ประกอบคือ E_x และ E_y เดินทางในทิศทาง $+z$ สามารถแสดงสนามไฟฟ้าขณะหนึ่งของคลื่นนี้ได้จากสมการที่ 2.11 และ 2.13

$$\vec{E} = \hat{a}_x E_x + \hat{a}_y E_y \quad (2.11)$$

$$\vec{E} = \text{Re} \left[\hat{a}_x E_x e^{j(\omega t - \beta z)} + \hat{a}_y E_y e^{j(\omega t - \beta z)} \right] \quad (2.12)$$

$$\vec{E} = \hat{a}_x E_{x0}^+ \cos(\omega t - \beta x + \phi_x) + \hat{a}_y E_{y0}^+ \cos(\omega t - \beta x + \phi_y) \quad (2.13)$$

โดยที่ E_x^+ และ E_y^+ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าในทิศทาง x และ y ในส่วนของ $E_{x0}^+ e^{j\phi_x}$ และ $E_{y0}^+ e^{j\phi_y}$ คือ เฟสของสนามไฟฟ้าในทิศทาง x และ y



(ก) โพลาริซชันเชิงเส้นแนวตั้ง

(ข) โพลาริซชันเชิงเส้นแนวนอน

รูปที่ 2.8 ลักษณะการโพลาริซชันเชิงเส้น

เมื่อทำการพิจารณาสนามที่ตำแหน่ง $z = 0$ และ $E_{y0}^+ = 0$ ในสมการที่ 2.12 จะได้โพลาริซชันเชิงเส้นแนวตั้งดังสมการที่ 2.14 และ รูปที่ 2.8 (ก)

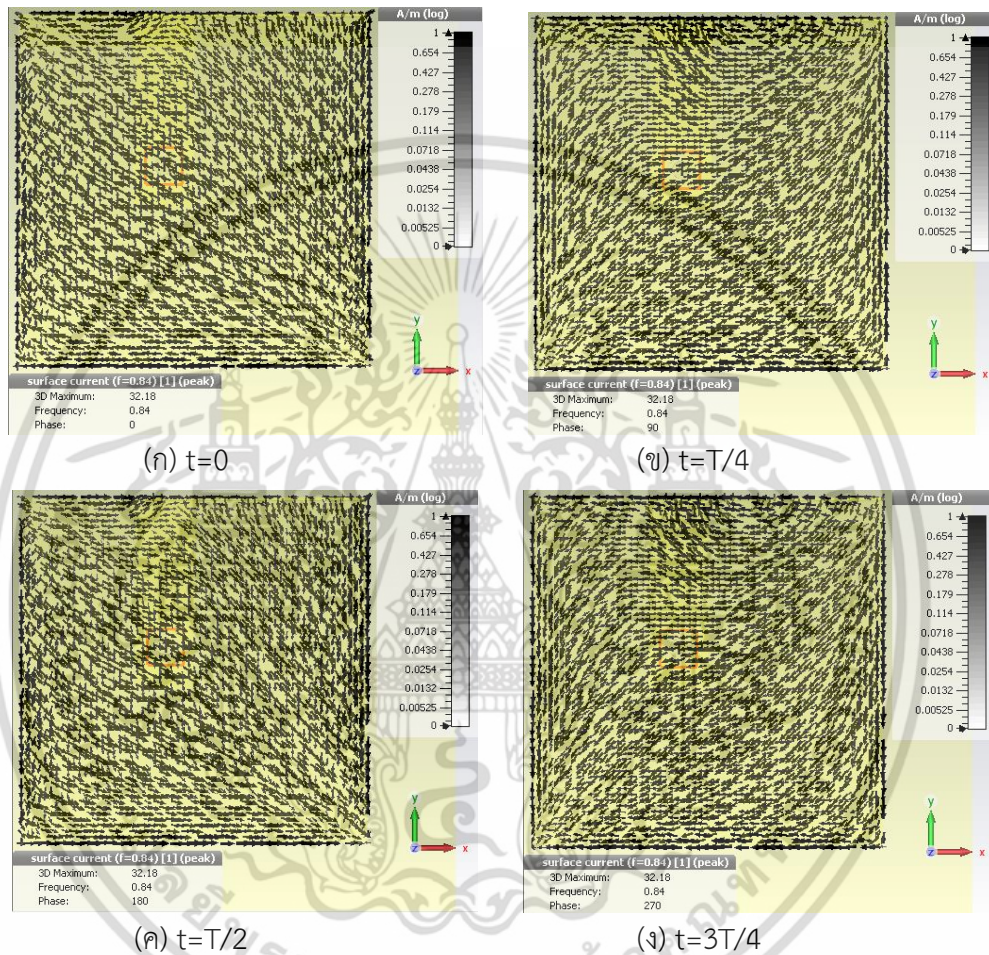
$$\vec{E} = \hat{a}_x E_{x0}^+ \cos(\omega t + \phi_x) \quad (2.14)$$

และในทางกลับกันเมื่อกำหนดให้ที่ตำแหน่ง $z = 0$ และ $E_{x0}^+ = 0$ ในสมการที่ 2.12 จะได้โพลาริซชันเชิงเส้นแนวนอนดังสมการที่ 2.15 และรูปที่ 2.8 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{E} = \hat{a}_y E_{y0}^+ \cos(\omega t + \phi_y) \tag{2.15}$$

จากสมการที่ 2.14 และรูปที่ 2.8 (ก) พบว่า มีเฉพาะส่วนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ชี้ในทิศทางแกน x เท่านั้น นั่นแสดงว่ามีโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง สำหรับสมการที่ 2.15 และรูปที่ 2.8 (ข) เช่นเดียวกันพบเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ชี้ในทิศทางแกน y เท่านั้นจะเกิดการโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอน (Horizontal polarization)



รูปที่ 2.9 ผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนแพตช์หลักของสายอากาศโครงสร้างที่ได้นำเสนอ

รูปที่ 2.9 คือผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้า โดยมีความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic field intensity: A/m) ในสนามระยะใกล้ (Near field) สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (Current) ที่ไหลบนแผ่นแพร์กระจายคลื่น จากการจำลองสายอากาศแผ่นแพร์กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสพร้อมทั้งป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคเชิลซึ่งถูกวางบนตำแหน่งแนวแกนตั้งของตัวสายอากาศ จากผลจำลองที่ความถี่กลาง 840 MHz โดยมีช่วงเวลาที่ต่างกันจำนวน 4 คาบเวลา ดังรูปที่ 2.9 (ก) (ข) (ค) และ (ง) พบว่า ณ บริเวณแผ่นแพร์กระจายคลื่นมีกระแสไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 1 A/m และกระแสน้อยที่สุดเท่ากับ 0 A/m ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าไหลหมุนรอบแกน z จาก

ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 (ก) (ข) (ค) และ (ง) เมื่อเวลา $t=0$ (ข) $t=T/4$ $t=T/2$ และ $t=3T/4$ พบว่า กระแสไฟฟ้ามีการไหลเปลี่ยนทิศตลอดหนึ่งคาบเวลาของแผ่นแพร่กระจายคลื่น ซึ่งหนึ่งคาบเวลาก็จะมีกระแสไฟฟ้ามีการไหลเป็นวงกลม ในแต่ละเวลาก็จะมีทิศทางที่เปลี่ยนไป

ในส่วนของโพลาริซวงกลมจะถูกอธิบายการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนตัวแผ่นแพร่กระจายคลื่นไว้ในบทที่ 4 สำหรับโพลาริซวงกลมเกิดขึ้นมาจากโพลาริซเชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอนตั้งฉากกันซึ่งมีขนาดที่เท่ากันและมีเฟสต่างกัน 90 องศา ดังกรณีการโพลาริซวงกลมหมุนขวา เมื่อกำหนด $E_{x0}^+ = E_{y0}^+$ และ $\phi_x = 90$ องศา แทนลงในสมการที่ 2.24 และ $\phi_y = 0$ องศา แทนเข้าสมการที่ 2.25 จะได้ขนาดสนามไฟฟ้าในทิศทางแกน z แสดงดังสมการที่ 2.16

$$\bar{E}_x = E_{x0}^+ \cos(\omega t + 90) = -E_{x0}^+ \sin(\omega t) \quad (2.16)$$

และจะได้ขนาดสนามไฟฟ้าในทิศทางแกน y

$$\bar{E}_y = E_{y0}^+ \cos(\omega t) \quad (2.17)$$

เมื่อพิจารณาหาขนาดของสนามไฟฟ้าทั้งสอง

$$\bar{E}_{xy} = \sqrt{E_{x0}^{+2} + E_{y0}^{+2}} = \sqrt{E_{xy0}^{+2} (\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t)} = E_{xy0}^+ \quad (2.18)$$

ดังนั้นจะได้สนามไฟฟ้ารวม

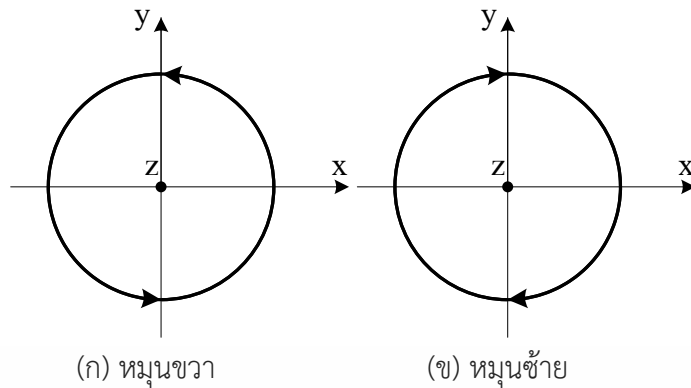
$$\bar{E}_{xy} = \text{Re} \left[\hat{a}_x E_{xy0}^+ e^{j(\omega t - \beta z + 90^\circ)} + \hat{a}_y E_{xy0}^+ e^{j(\omega t - \beta z)} \right] \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.19 พบว่าเฟสในสนามไฟฟ้าทิศทางแกน x นำหน้าสนามไฟฟ้าทิศทางแกน y อยู่ 90 องศาทำให้เกิดเป็นโพลาริซวงกลมหมุนซ้ายเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.10 (ข) และในทางกลับกันการเกิดโพลาริซวงกลมหมุนขวาถูกกำหนดให้ $\phi_x = -90$ องศา แทนลงในสมการที่ 2.14 และ $\phi_y = 0$ องศา แทนเข้าสมการที่ 2.15 จะได้สนามไฟฟ้ารวม

$$\bar{E}_{xy} = \text{Re} \left[\hat{a}_x E_{xy0}^+ e^{j(\omega t - \beta z - 90^\circ)} + \hat{a}_y E_{xy0}^+ e^{j(\omega t - \beta z)} \right] \quad (2.20)$$

จากสมการที่ 2.10 พบว่าเฟสในสนามไฟฟ้าทิศทางแกน x ตามหลังสนามไฟฟ้าทิศทางแกน y อยู่ 90 องศาจะเกิดการโพลาริซวงกลมหมุนขวาดังรูปที่ 2.10 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ลักษณะการโพลาไรซ์วงกลม

2.3.2 อัตราส่วนแกนของสายอากาศ

อัตราส่วนแกน (Axial ratio: AR) คือการบ่งบอกถึงลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศในลักษณะแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น โพลาไรซ์เชิงเส้น หรือโพลาไรซ์วงกลม นอกจากนี้อัตราส่วนแกนยังสามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดและเฟสของสนามไฟฟ้า สำหรับอัตราส่วนตามแกนของโพลาไรซ์สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ 2.21 และสมการที่ 2.22

$$(AR)_{dB} = 10 \log \left[\frac{|E_{co}| + |E_{xp}|}{|E_{co}| - |E_{xp}|} \right]^2 \quad (2.21)$$

หรือ

$$(AR)_{dB} = 20 \log \left[\frac{1 + CPL}{1 - CPL} \right] \quad (2.22)$$

เมื่อ E_{co} คือ โพลาไรซ์ร่วมของสนามไฟฟ้า E_{xp} คือ โพลาไรซ์ไขว้ของสนามไฟฟ้า CPL คือ ระดับกำลังงานโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization level)

$$CPL = \frac{|E_{xp}|}{|E_{co}|} = \left| \frac{1 - Ae^{j\Delta\phi}}{1 + Ae^{j\Delta\phi}} \right| \quad (2.23)$$

เมื่อ

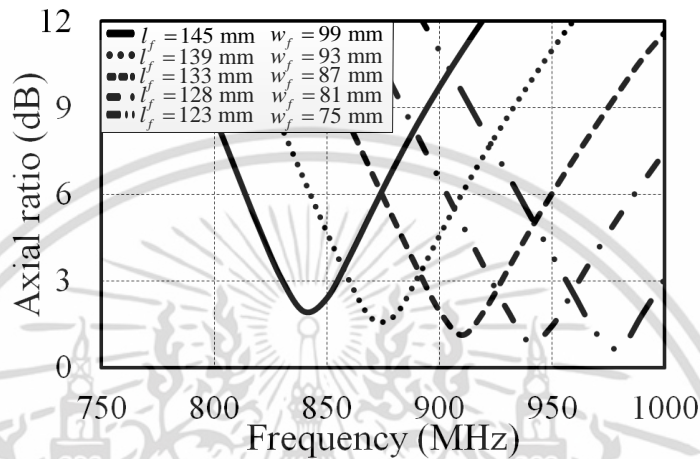
$$E_{co} = (1 + Ae^{j\Delta\phi}) / \sqrt{2} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$E_{xp} = (1 - Ae^{j\Delta\phi}) / \sqrt{2} \quad (2.25)$$

โดยที่ A หรือ E_{xy0}^+ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้า $e^{j\Delta\phi}$ หรือ $e^{j(\omega t - \beta z)}$ คือ เฟสของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 ผลจำลองอัตราส่วนแกนเมื่อเปลี่ยนขนาดแพตช์หลักและแผ่นผนัง

รูปที่ 2.11 คือผลจำลองอัตราส่วนแกนของโครงสร้างสายอากาศแผ่นพับที่ได้นำเสนอในบทนี้ และได้ปรับเปลี่ยนขนาดแพตช์หลักและแผ่นผนังเพื่อปรับการแพร่กระจายคลื่นโพลาไรซ์วงกลมที่มีความถี่ที่สูงกว่า พบว่าที่ด้านหน้าของสายอากาศมีค่าอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB ในความถี่ที่ได้เลือกไว้ บนระนาบ xy (ระนาบสนามไฟฟ้า) โดยการเปลี่ยนแปลงแพตช์หลักและแผ่นผนังของอากาศพบว่าส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ได้ สามารถสร้างโพลาไรซ์วงกลมที่มีความถี่ 840 870 900 930 และ 960 MHz

2.3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างแผ่นพับที่ได้นำเสนอนี้ สำหรับสนามไฟฟ้าระนาบ θ และ ϕ ที่แพร่กระจายคลื่นเหนือระนาบกราวด์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.26 และ 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\theta^o = \left[\frac{\sin\left(\frac{kh_t}{2} \cos \theta\right)}{\frac{kh_t}{2} \cos \theta} \right] \left[\cos\left(\frac{kW}{2} \sin \theta\right) \right] \quad (2.26)$$

$$E_\phi^o = \left[\frac{\sin\left(\frac{kh_t}{2} \sin \phi\right)}{\frac{kh_t}{2} \sin \phi} \right] \left[\frac{\sin\left(\frac{kW}{2} \sin \phi\right)}{\frac{kW}{2} \cos \phi} \right] \quad (2.27)$$

สมการความเข้มกำลังงานการแพร่กระจายคลื่นสามารถหาได้จาก 2.28

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2\eta} \left[|E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \right] \\ &= \frac{1}{2\eta} \left[|E_\theta^o(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi^o(\theta, \phi)|^2 \right] \end{aligned} \quad (2.28)$$

โดยที่ $E_\theta^o(\theta, \phi)$ และ $E_\phi^o(\theta, \phi)$ คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าบนระนาบ θ และระนาบ ϕ และนำสมการที่ 2.26 และสมการที่ 2.27 แทนลงในสมการที่ 2.28 จะได้สมการความเข้มการแพร่กระจายคลื่นดังสมการที่ 2.29

$$U(\theta, \phi) = \frac{1}{2\eta} \left[\left[\frac{\sin\left(\frac{kh_t}{2} \cos \theta\right)}{\frac{kh_t}{2} \cos \theta} \right] \left[\cos\left(\frac{kW}{2} \sin \theta\right) \right] \right]^2 + \left[\left[\frac{\sin\left(\frac{kh_t}{2} \sin \phi\right)}{\frac{kh_t}{2} \sin \phi} \right] \left[\frac{\sin\left(\frac{kW}{2} \sin \phi\right)}{\frac{kW}{2} \cos \phi} \right] \right]^2 \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

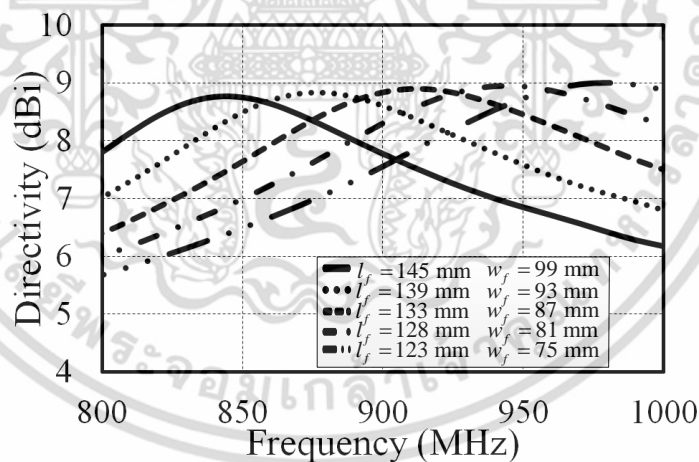
$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) \quad (2.31)$$

η คือ ค่าประสิทธิผลการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

$$\eta = e_r e_c e_d \quad (2.32)$$

กรณี η เท่ากับ 1 สายอากาศไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นอัตราขยายจะเท่ากับค่าสภาพเจาะจงทิศทางสำหรับในกรณี เมื่อ e_r คือ ประสิทธิภาพการแผ่รังสีหรือการทดสอบประสิทธิภาพการสะท้อนกลับ e_c และ e_d คือ การสูญเสียจากการนำไฟฟ้าและการสูญเสียจากวัสดุไดอิเล็กตริก

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมากกว่าค่าอัตราขยายสายอากาศ จากการจำลองสายอากาศ โครงสร้างแผ่นพับที่ถูกป้อนด้วยโพรบโคแอกเซียล การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสามารถที่จะวิเคราะห์อัตราขยายสายอากาศล่วงหน้าได้อย่างแน่ชัด ผลจากการจำลองพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะเปลี่ยนตามขนาดแพตช์หลักและแผ่นผนัง ซึ่งทุกขนาดแพตช์หลักและแผ่นผนังที่เปลี่ยนมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากกว่า 8.5 dBi ตลอดย่านความถี่ 840 ถึง 960 MHz ดังรูปที่ 2.13

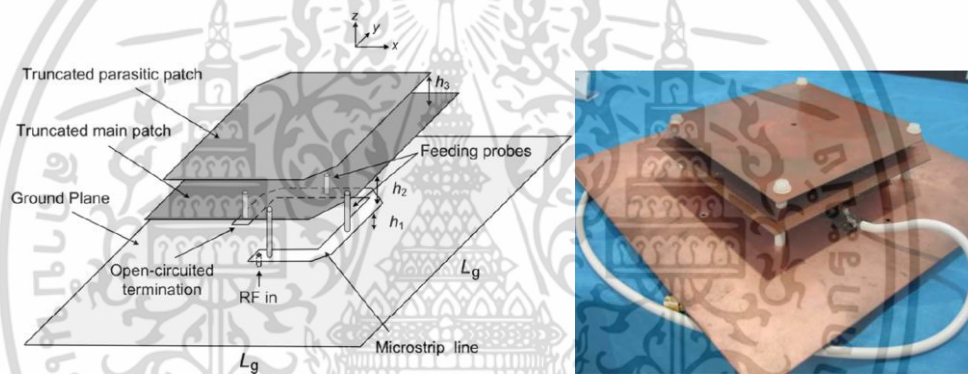


รูปที่ 2.13 ผลจำลองค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแผ่นพับที่ได้นำเสนอ เมื่อปรับเปลี่ยนแพตช์หลักและแผ่นผนัง

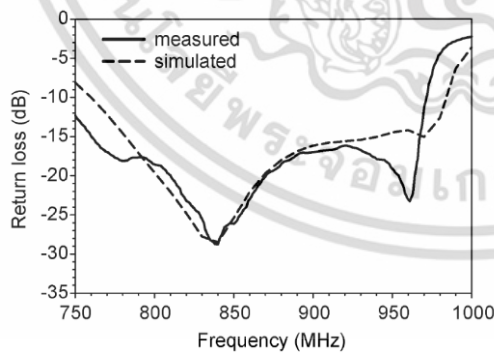
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล

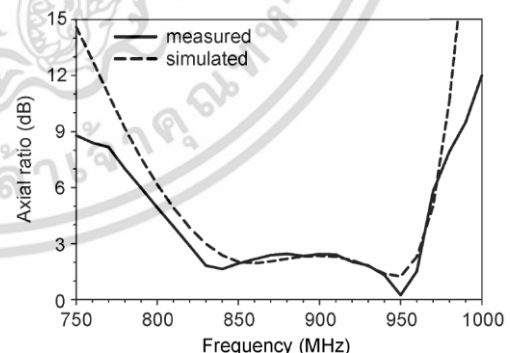
สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากลจะถูกพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าอยู่ 2 ประเภทหลักๆ คือ แบนด์วิดท์ $|S_{11}| \geq 13\%$ และแบนด์วิดท์อัตราส่วนแบน 3 dB (3-dB AR bandwidth) ครอบคลุมแบนด์วิดท์ 840 ถึง 960 MHz สำหรับการแพร่กระจายคลื่นโพลาริซวงกลม โดยในงานวิจัยที่มีมาก่อนได้มีการนำเสนอวิธีการออกแบบโดยใช้เทคนิคที่หลากหลาย เช่น ในปี 2009 Chen Z. N. และคณะ [15] ได้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากลโดยใช้สายอากาศแพตช์โครงสร้างซ้อนกันหลายชั้นดังรูปที่ 2.14 (ก) ประกอบด้วย แพตช์พาราซิติก (Parasitic patch) แพตช์หลักและระนาบกราวด์ โดยแพตช์พาราซิติกและแพตช์หลักถูกตัดมุมสองด้าน และมีการป้อนสัญญาณโดยใช้เส้นสัญญาณวงแหวนสี่เหลี่ยมชนิดเปิดปลายสายและใช้โพรบสี่จุดต่อระหว่างเส้นสัญญาณวงแหวนและแพตช์หลัก โดยมีทั้งหมด 4 โพรบต่อกันแต่ละโพรบวางห่างกัน 90 องศา หรือ $\lambda/4$



(ก) โครงสร้างและตัวต้นแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล

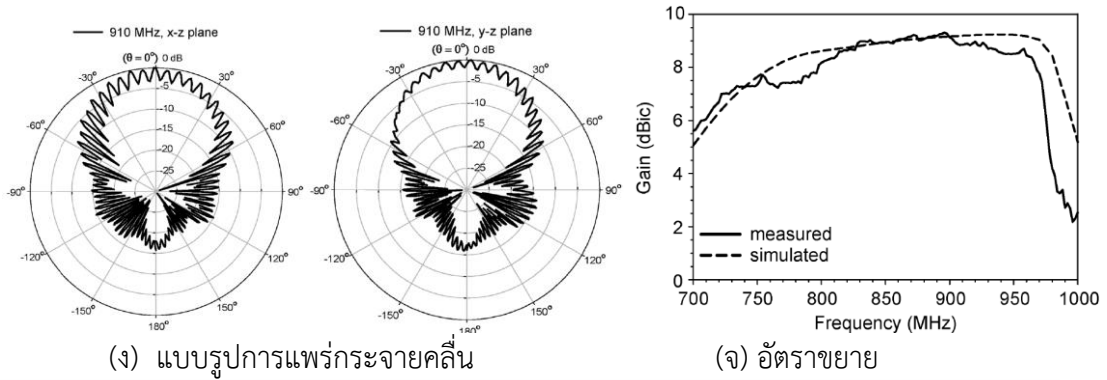


(ข) $|S_{11}|$



(ค) อัตราส่วนแกน

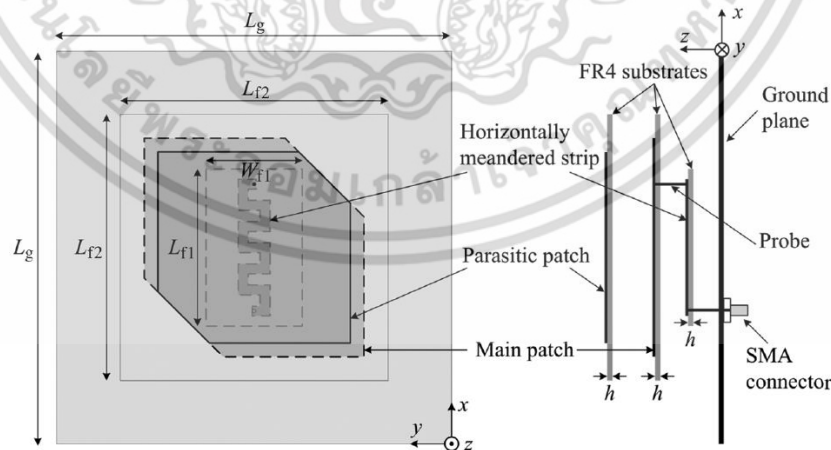
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล [15]

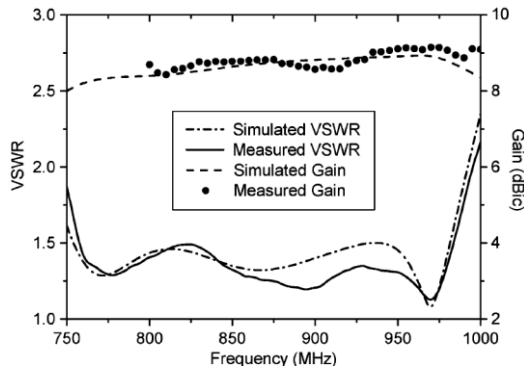
รูปที่ 2.14 แสดงผลการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล จากรูปที่ 2.14 (ข) พบว่ามีแบนด์วิดท์ $|S_{11}| < -15$ dB ตั้งแต่ 760 ถึง 963 MHz (25.6%) รูปที่ 2.14 (ค) พบว่ามีแบนด์วิดท์อัตราส่วนแกน 3 dB ตั้งแต่ 818 ถึง 964 MHz (16.4%) สำหรับในรูปที่ 2.14 (ง) พบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางและรูปที่ 2.14 (จ) คือผลทดสอบอัตราขยายพบว่า มีอัตราขยายมากกว่า 8 dBic ตลอดย่านความถี่ยูเอชเอฟ

ต่อมาในปี 2011 Wang Z. และคณะ [16] ได้นำเสนอสายอากาศแพตช์โครงสร้างซ้อนกันหลายชั้นนำมาประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลดังรูปที่ 2.15(ก) โดยโครงสร้างสายอากาศและเทคนิควิธีการทำโพลาริซิงกลมเหมือนกันกับ [15] แต่จะแตกต่างกันด้วยเทคนิควิธีการบ่อนสัญญาณ โดยใช้เส้นสัญญาณชนิดขดลวด (Meandered strip) ต่อเข้ากับแพตช์หลักโดยมีโพรบไฟฟ้าเส้นลวด (linear electric probe) เป็นตัวเชื่อมต่อ

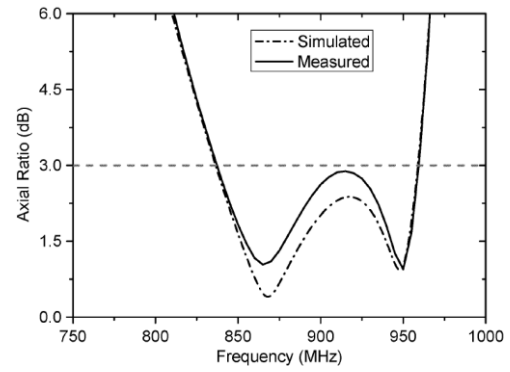


(ก) โครงสร้างและตัวต้นแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล

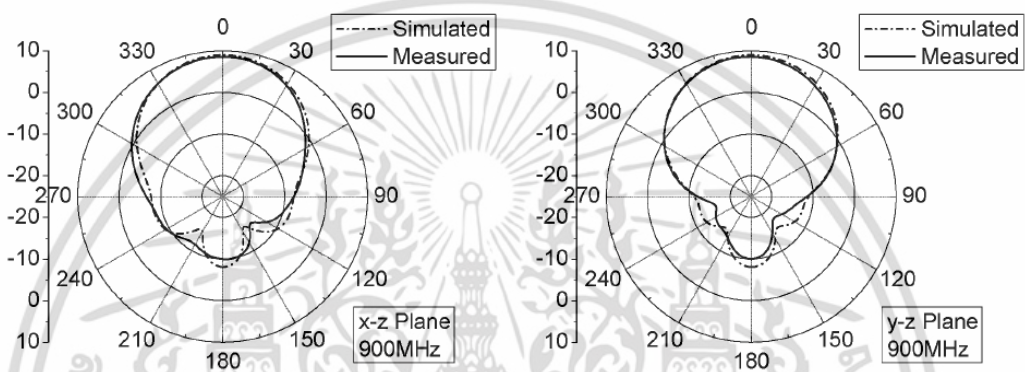
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) VSWR และอัตราขยาย



(ค) อัตราส่วนแกน

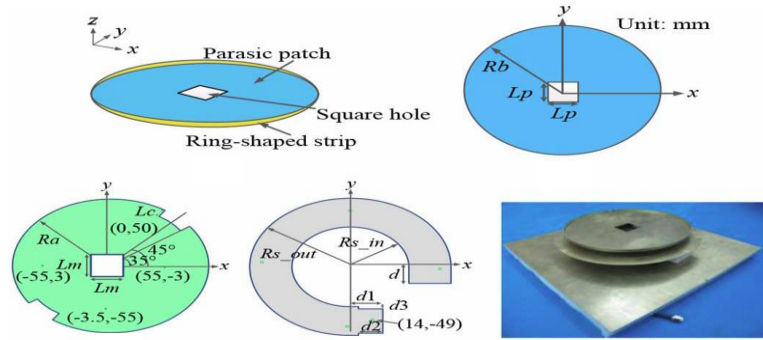


(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

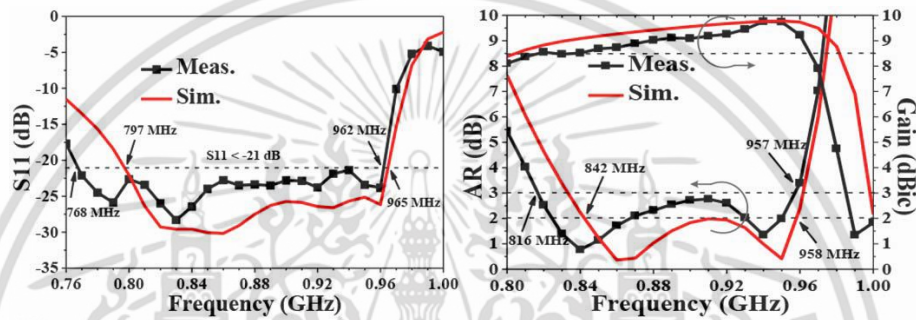
รูปที่ 2.15 สายอากาศแพทช์หลายชั้นโพลาริซวงกลมแบนด์กว้างป้อนสัญญาณเดี่ยวด้วยเส้นสัญญาณชนิดขดลวด [16]

ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.15 สำหรับรูปที่ 2.15(ข) พบว่ามีแบนด์วิดธ์ VSWR < 1.5 ตั้งแต่ 758 ถึง 983 MHz (25.8%) และมีอัตราขยายมากกว่า 8 dBic ตลอดย่านความถี่เอชเอฟ รูปที่ 2.15 (ค) จากการทดสอบสายอากาศพบว่ามีแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกนตั้งแต่ 838 ถึง 959 MHz (13.5%) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางดังรูปที่ 2.15(ง)

ต่อมาในปี 2015 Xiong Y. L. และคณะฯ [18] ได้นำเสนอสายอากาศแพทช์โครงสร้างรูปเหรียญร่วมกับสตริปรูปวงแหวนนำมาประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลดังรูปที่ 2.16(ก) โดยโครงสร้างสายอากาศและเทคนิควิธีการทำโพลาริซวงกลมคล้ายกันกับ [16] แต่จะแตกต่างกันด้วยเทคนิควิธีการป้อนสัญญาณ โดยใช้สตริปรูปวงแหวน ต่อเข้ากับแพทช์โครงสร้างรูปเหรียญโดยมีโพรบไฟฟ้าเส้นลวด (linear electric probe) เป็นตัวเชื่อมต่อ

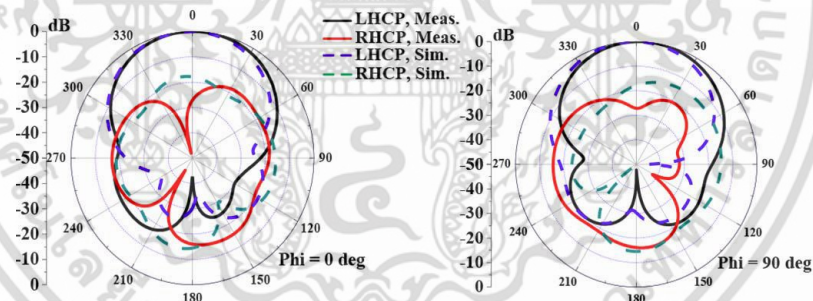


(ก) โครงสร้างและตัวต้นแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล



(ข) $|S_{11}|$

(ค) อัตราส่วนแกนและอัตราขยาย



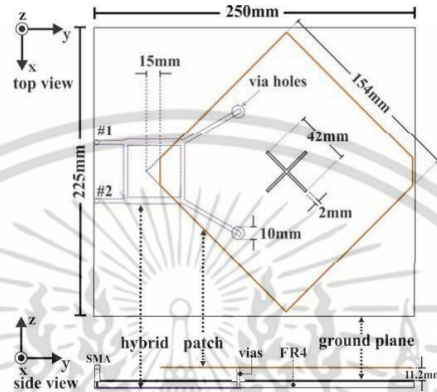
(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.16 สายอากาศแพตช์หลายชั้นโพลาริซิงกลมแบนด์กว้างป้อนสัญญาณเดียวด้วยเส้นสัญญาณชนิดขดลวด [18]

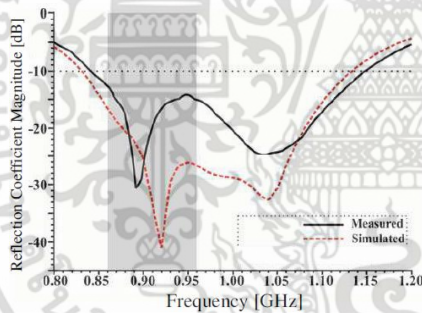
ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.16 สำหรับรูปที่ 2.16(ข) พบว่ามีแบนด์วิดธ์ $|S_{11}| < -21$ dB ตั้งแต่ 768 ถึง 962 MHz (22.4%) และมีอัตราขยายมากกว่า 9.8 dBic ตลอดย่านความถี่เอชเอฟ รูปที่ 2.16(ค) จากการทดสอบสายอากาศพบว่ามีแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกนตั้งแต่ 816 ถึง 957 MHz (15.9%) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางดังรูปที่ 2.16(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

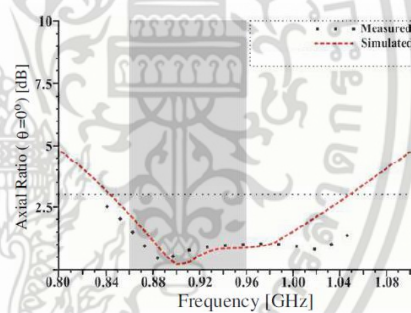
มีงานวิจัยในปี 2012 E. Mireles และคณะ [19] ได้นำเสนอสายอากาศแพตช์ที่มีโพรบ้อน สัญญาณสองทางด้วยการบ้อนสัญญาณแบบเครือข่าย นำมาประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศเครื่องอ่าน ข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลดังรูปที่ 2.17(ก) โดยใช้เทคนิคการบ้อนสัญญาณแบบเครือข่าย ต่อ เข้ากับแพตช์หลักโดยมีโพรบไฟฟ้าเส้นลวด (linear electric probe) โดยที่แพตช์หลักมีการเจาะ สลือตรงรูปวง



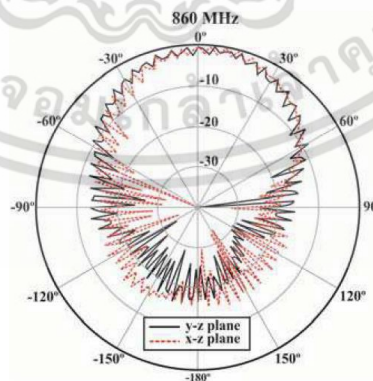
(ก) โครงสร้างและตัวต้นแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล



(ข) $|S_{11}|$



(ค) อัตราส่วนแกน

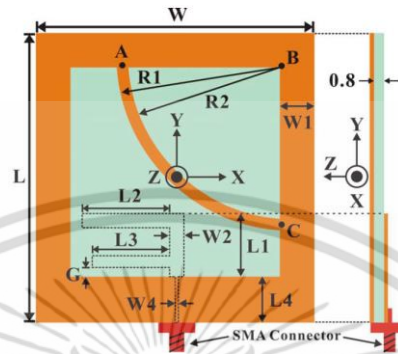


(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

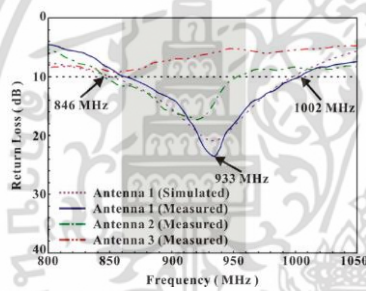
รูปที่ 2.17 สายอากาศแพตช์หลายชั้นโพลาริซิงกลมแบนด์กว้างบ้อนสัญญาณเดี่ยวด้วยเส้น สัญญาณชนิดขดลวด [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

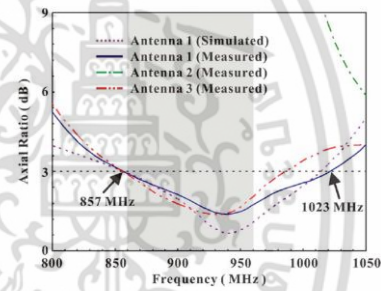
ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.17 สำหรับรูปที่ 2.17(ข) พบว่ามีแบนด์วิดธ์ $|S_{11}| < -10$ dB ตั้งแต่ 840 ถึง 1150 MHz (31.2%) รูปที่ 2.17(ค) จากการทดสอบสายอากาศพบว่ามีแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแบนด์ตั้งแต่ 840 ถึง 1050 MHz (23%) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางดังรูปที่ 2.17(ง)



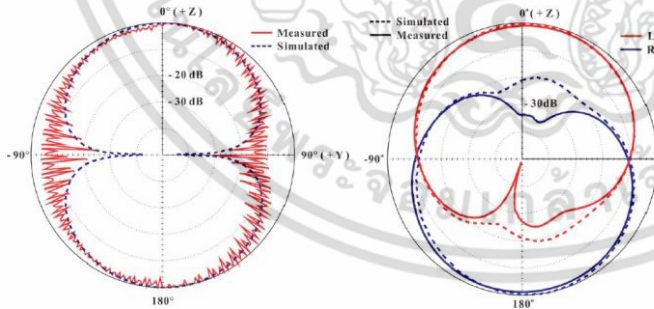
(ก) โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีของ Lu J. -H. และ Wang S. -F.



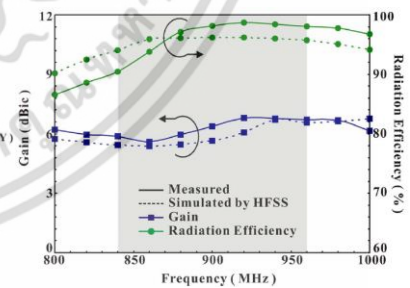
(ข) $|S_{11}|$



(ค) อัตราส่วนแกน



(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



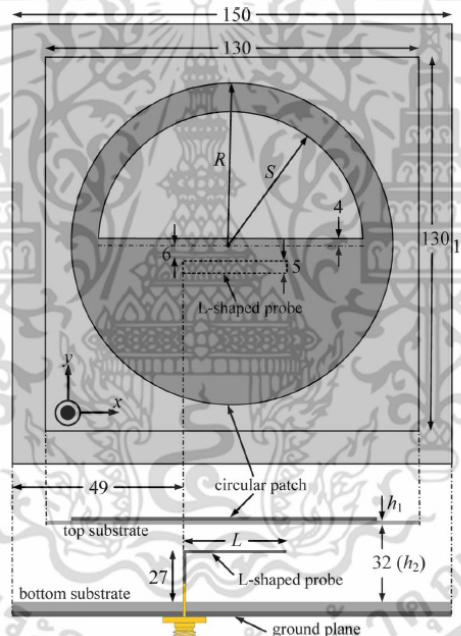
(จ) อัตราขยายและประสิทธิภาพสายอากาศ

รูปที่ 2.18 สายอากาศแพตช์ป้อนสัญญาณรูปตัวเอฟพร้อมด้วยส่วนโค้ง [20]

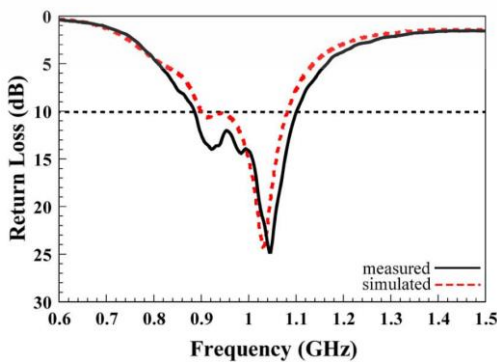
ในปี 2013 นักวิจัย Lu J. -H. และคณะฯ [20] ได้นำสายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างขึ้นเดียนามาประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ ดังรูปที่ 2.18(ก) โดยออกแบบให้แผ่นแพร่กระจายคลื่นเป็นวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตำแหน่งตรงกลางของแผ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร์กระจายคลื่นวงแหวนถูกแทรกด้วยเส้นนำโลหะโค้งต่อเข้ากับแผ่นแพร์กระจายคลื่นในทิศทางแกน x และ y ทำให้เกิดโพลาไรซ์วงกลม ในส่วนการป้อนสัญญาณรูปตัวเอฟ (F-shape) โดยจะอยู่ตำแหน่งแนวแกน y ของโครงสร้างสายอากาศ รูปตัวเอฟดังกล่าวจะถูกวางในตำแหน่งด้านหลังของแผ่นแพร์กระจายคลื่น

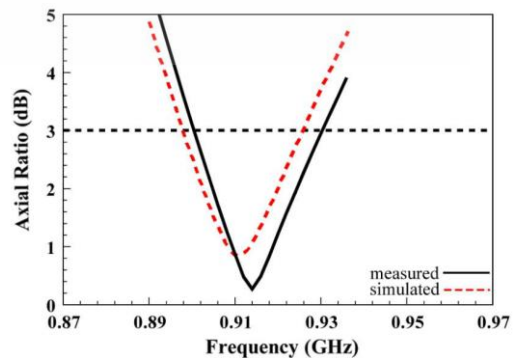
รูปที่ 2.18(ข) (ค) (ง) และ (จ) ผลการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ สำหรับรูปที่ 2.18(ข) พบว่ามีแบนด์วิดท์ $|S_{11}|$ มีแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 846 ถึง 1002 MHz (15.3% ที่ความถี่กลาง 931 MHz) รูปที่ 2.18(ค) พบว่ามีแบนด์วิดท์อัตราส่วนแกน 3 dB มีแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 857 ถึง 1023 MHz (17.7% ที่ความถี่กลาง 940 MHz) ส่วนรูปที่ 2.18(ง) มีแบบรูปการแพร์กระจายคลื่นสองทิศทางทั้งสองระนาบ และรูปที่ 2.18(จ) มีค่าอัตราขยายมากกว่า 5 dBic และมีประสิทธิภาพสายอากาศมากกว่า 70% ตลอดย่านความถี่



(ก) โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีของ Sim C. และคณะ

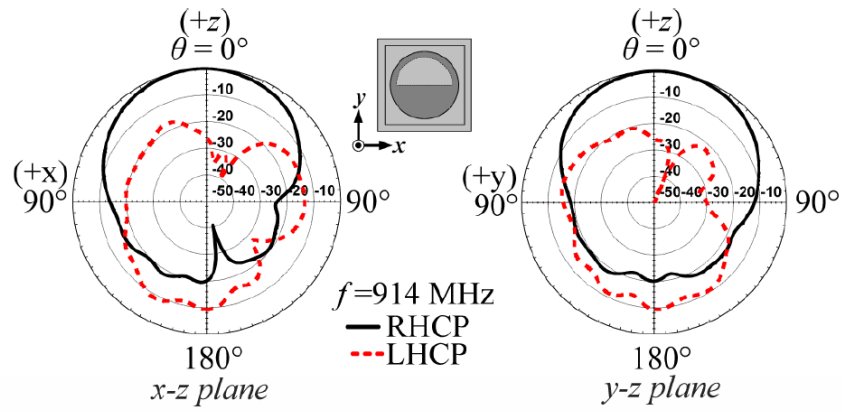


(ข) $|S_{11}|$

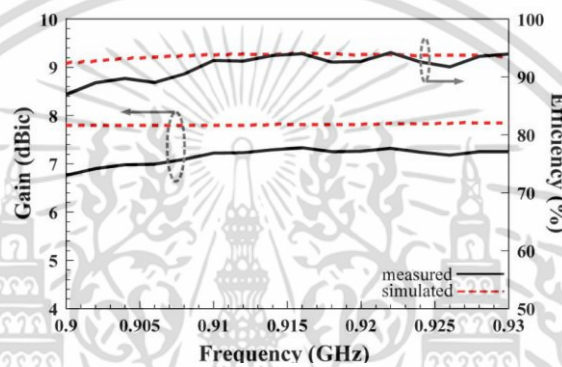


(ค) อัตราส่วนแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



(จ) อัตราขยายและประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

รูปที่ 2.19 สายอากาศแพทช์วงกลมเจาะร่องป้อนสัญญาณด้วยโพรบรูปตัวแอล [22]

และมีงานวิจัยในปี 2012 นักวิจัย Sim C. และคณะฯ [22] ได้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟโดยใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นสองชั้นเช่นเดียวกับโครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และมีความแตกต่างกันคือ แผ่นแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปวงกลมที่ถูกแทรกด้วยร่องวงครีวงกลมเพื่อทำให้เกิดโพลาไรซ์แบบวงกลมและถูกป้อนสัญญาณด้วยรูปตัวแอล ดังรูปที่ 2.19(ก)

รูปที่ 2.19(ข) (ค) (ง) และ (จ) ผลการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ สำหรับรูปที่ 2.19 (ข) พบว่ามีแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ ตั้งแต่ 880 ถึง 1100 MHz (22.0%) รูปที่ 2.19(ค) พบว่ามีแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกน 3 dB ตั้งแต่ 900 ถึง 930 MHz (3.2%) ส่วนรูปที่ 2.19(ง) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางทั้งสองระนาบ และรูปที่ 2.19(จ) มีค่าอัตราขยายมากกว่า 6.5 dBic และมีประสิทธิภาพสายอากาศมากกว่า 80% ตลอดย่านความถี่ยูเอชเอฟ

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบขนาดโครงสร้าง คุณลักษณะทางไฟฟ้าและระยะการอ่านสูงสุด

#	Ref.	Electrical specifications				Mechanical specifications		Maximum reading range (m)
		Absolute bandwidth (MHz)	Gain (dBic)	3-dB Beamwidth (Degree)	F/B Ratio (dB)	Dimension size ($L \times W \times H$) in mm ³		
1	[9]	902-929	6.0	68	30	150 × 150 × 34	N/A	
2	[11]	865-946	7.2	81	N/A	200 × 200 × 38	N/A	
3	[15]	818-963	8.3	75	15	250 × 250 × 39	7.1-7.5	
4	[16]	838-959	8.6	63	15	250 × 250 × 37.5	6.8-7.0	
5	[18]	833-962	9.1	66	15	250 × 250 × 39	N/A	
6	[19]	840-1050	5.0	60	15	225 × 250 × 12.8	N/A	
7	[20]	857-1002	5.4	83	N/A	126 × 121 × 0.8	5.5	
8	[21]	893-948	8.5	65	16.5	220 × 220 × 14	N/A	
9	[22]	901-930	6.8	75	20	150 × 150 × 33	3.1-3.3	

2.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและการคำนวณแผ่นพับ โดยออกแบบให้สายอากาศโครงสร้างแผ่นพับมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย โดยป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล เข้าเส้นป้อนสัญญาณของสายอากาศ โครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีคุณสมบัติเด่นๆ คือ สะดวกต่อการผลิตและติดตั้งใช้งาน สามารถออกแบบให้ปรับความถี่ใช้งานได้ นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาและเคลื่อนย้ายได้สะดวก แต่ในทางกลับกัน จากการจำลองผล พบว่า มีแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแบนแคบ ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลได้ ($\geq 13\%$) แต่มีความเป็นไปได้ในการขยายแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแบนให้ครอบคลุมความถี่ของระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง มีโพลาไรซ์วงกลมโดยมีค่าอัตราส่วนแบนน้อยกว่า 3 dB ตลอดมุมด้านหน้าของการปรับขนาดแพตช์หลักและแพตช์ผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

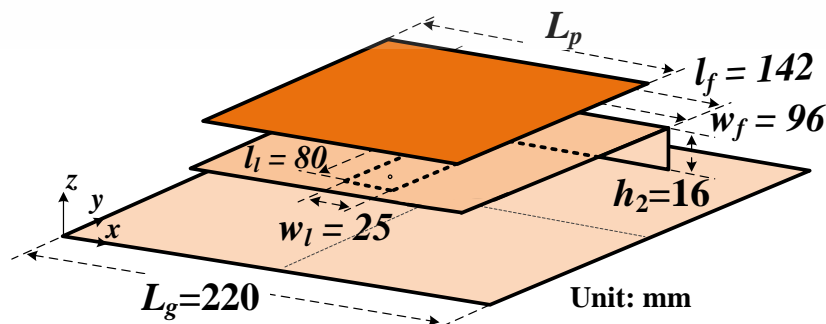
แพตช์พาราซิติคและการตัดมุมสองด้าน

3.1 บทนำ

จากบทที่สองพบถึงปัญหาของสายอากาศของโครงสร้างแผ่นพับที่ถูกบ่อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล จะมีแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแคบเพียง 3% สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิควิธีการเพิ่มแพตช์พาราซิติคร่วมกับการตัดมุมสองด้านเพื่อทำให้สามารถขยายแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ และแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแคบได้ตามความต้องการของระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล (840 ถึง 960 MHz) ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับเนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วย วิธีการเพิ่มแพตช์พาราซิติค การตัดมุมสองด้าน และบทสรุป

3.2 การเพิ่มแพตช์พาราซิติค

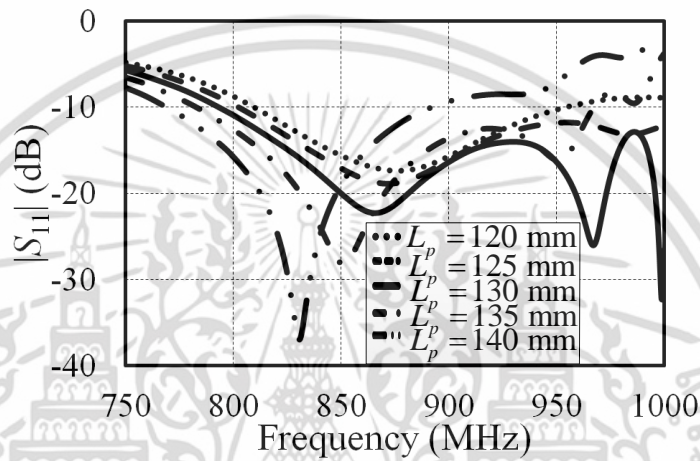
โดยทั่วไปสายอากาศโครงสร้างแพตช์ที่ถูกบ่อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล จะมีแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ เพียง 1-2% และ 2-5% ตามลำดับ แต่ระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟมีความต้องการแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ มากกว่า 13% (840 ถึง 960 MHz) ปัญหาจากบทที่ผ่านมาสามารถแก้ไขได้ด้วยเทคนิควิธีปรับแต่งที่โครงสร้างสายอากาศ หรือเทคนิควิธีปรับแต่งที่แผ่นแพร่กระจายคลื่น หรือการเพิ่มพาราซิติคเข้าไปในตัวโครงสร้างสายอากาศ ซึ่งง่ายต่อการออกแบบและสร้างสายอากาศตัวต้นแบบและยังเป็นเทคนิควิธีที่ถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับการเพิ่มแพตช์พาราซิติคแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยการเพิ่มแพตช์พาราซิติคเพื่อให้แพตช์พาราซิติคทำงานที่ขอบความถี่ด้านสูงและแพตช์หลักทำงานที่ขอบความถี่ด้านต่ำ ซึ่งแผ่นพับจะนำกระแสมายังแพตช์ผนัง แล้วแพตช์ผนังนำกระแสไปยังแพตช์หลักด้วยเวลาที่ต่างกัน ในแอมพลิจูดเท่ากัน และแพตช์หลักทำงานที่ขอบความถี่ด้านต่ำ



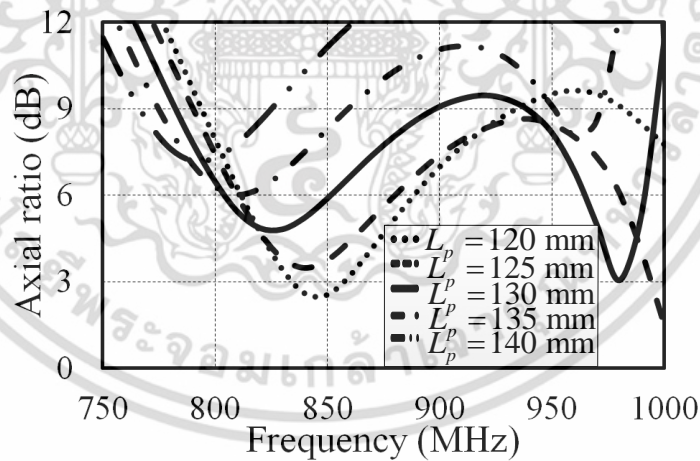
รูปที่ 3.1 การเพิ่มแพตช์พาราซิติคบนสายอากาศโครงสร้างแผ่นพับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างและพารามิเตอร์สายอากาศที่นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วยสามชั้นคือ แผ่นพีช แพตช์พาราซีติก และระนาบกราวนด์ โดยมีช่องว่างระหว่างชั้นเป็นอากาศ ซึ่งแผ่นพีชสร้างจากแผ่นเดียวที่ประกอบด้วยแพตช์หลัก แพตช์ผนัง และเส้นป้อนสัญญาณ โดยที่แพตช์หลักเชื่อมต่อกับเส้นป้อนสัญญาณด้วยแพตช์ผนัง แพตช์หลักมีขนาดกว้างและยาว (L_p) 142 mm ซึ่งเชื่อมต่อกับแพตช์ผนังในลักษณะตั้งฉากด้วยขนาดกว้าง (w_f) เท่ากับ 96 mm และสูง (h_2) 16 mm ซึ่งแพตช์ผนังเชื่อมต่อกับเส้นป้อนสัญญาณที่มีขนาดยาว ($l_i + l_o$) เท่ากับ 80 mm และกว้าง (w_l) 25 mm ที่ถูกวางห่าง (h_1) 5 mm เหนือระนาบกราวนด์ขนาด (L_g) 220 mm ในส่วนของแพตช์พาราซีติกที่มีขนาดความกว้างและความยาว (L_p) เท่ากับ 130 mm ถูกวางอยู่เหนือแพตช์หลักห่าง (h_3) 16 mm



(ก)

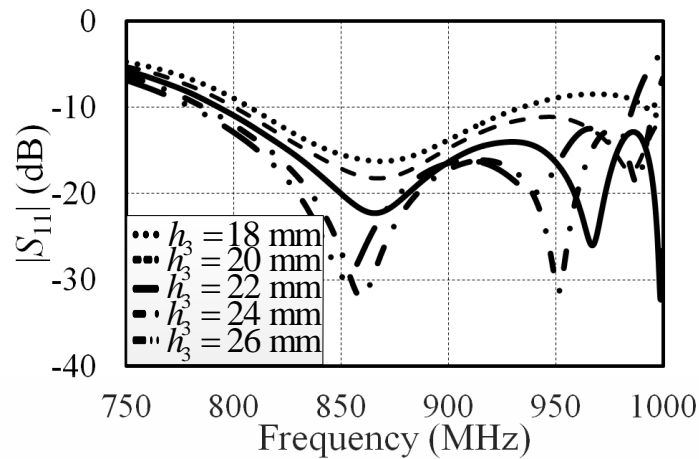


(ข)

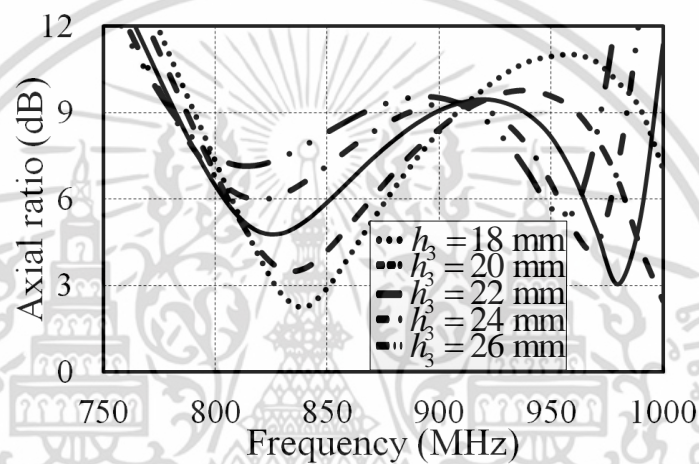
รูปที่ 3.2 ผลของประสิทธิภาพสายอากาศของขนาดแพตช์พาราซีติกที่ยังไม่มีการตัดมุมสองด้าน

(ก) $|S_{11}|$ และ (ข) อัตราส่วนแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 ผลของประสิทธิภาพสายอากาศของความสูงแพตช์พาราซิติคที่ยังไม่มีการตัดมุมสองด้าน

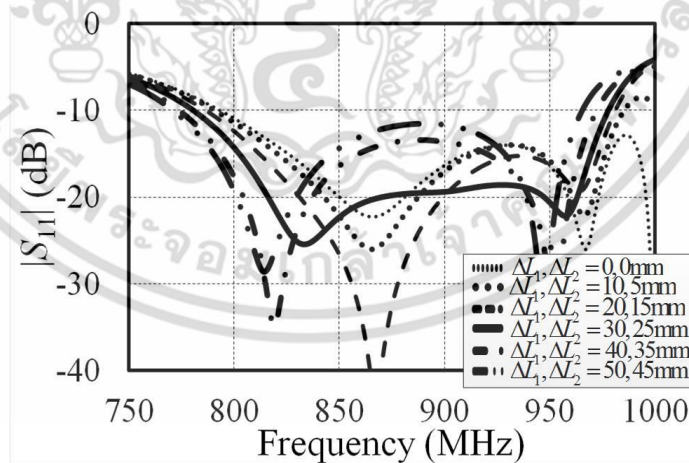
(ก) $|S_{11}|$ และ (ข) อัตราส่วนแกน

จากการจำลองการเพิ่มแพตช์พาราซิติคเหนือแพตช์หลักเพื่อจุดประสงค์หลักคือขยายแบนด์วิดท์ $|S_{11}|$ จากรูปที่ 3.2(ก) พบว่าขนาดแพตช์พาราซิติคมีผลต่อแบนด์วิดท์ $|S_{11}|$ ขนาดแนวเส้นทแยงมุมของแพตช์พาราซิติคที่เหมาะสมจะมีขนาดประมาณ $\lambda/2$ ที่ความถี่ด้านต่ำเพื่อรองรับความยาวทางไฟฟ้าที่ยาวที่สุดของความถี่ที่ต้องการใช้งาน จากผลการจำลองพบว่าที่ขนาดความกว้างแพตช์พาราซิติคที่ 130 mm ให้แบนด์วิดท์ $|S_{11}|$ ที่กว้างที่สุด และมีแนวโน้มที่จะทำให้สามารถปรับอัตราส่วนแกนให้น้อยกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานดังรูปที่ 3.2(ข) อย่างไรก็ตามขนาดของแพตช์พาราซิติคที่มีระยะห่างกับแพตช์หลักไม่เหมาะสมก็จะทำให้แบนด์วิดท์แคบลง ตามรูปที่ 3.3(ก) ความสูงแพตช์พาราซิติคที่ห่างจากแพตช์หลัก 22 mm จะมีแบนด์วิดท์ $|S_{11}|$ กว้างที่สุด และมีแนวโน้มจะปรับอัตราส่วนแกนให้น้อยกว่า 3 dB ได้ ซึ่งการขยายแบนด์วิดท์อัตราส่วนแกนมีหลายวิธีตามงานวิจัยที่มีมาก่อนทั้งการเจาะสล็อต ใช้การป้อนสัญญาณสองทางต่างเฟสกัน 90 องศา การตัดมุมสองด้าน การใช้โครงสร้างตัวป้อนสัญญาณรูปตัวแอล อย่างไรก็ตามดิวิชันยานิพนธ์นี้จะใช้การตัดมุมสองด้านเพื่อปรับค่าอัตราส่วนแกนให้น้อยกว่า 3 dB มาเป็นตัวเลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

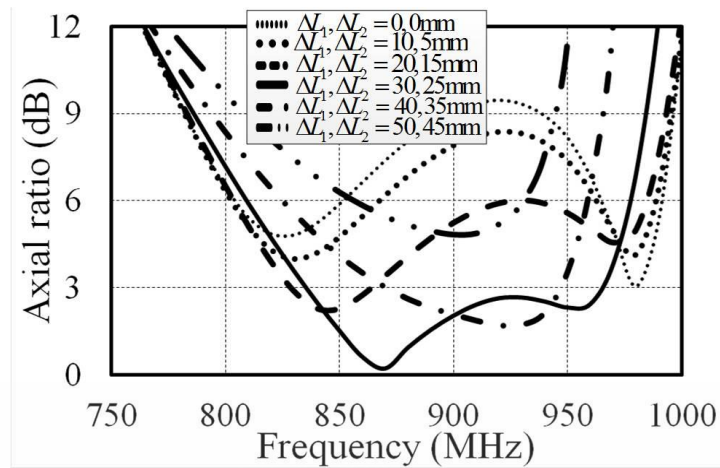
3.3 การตัดมุมสองด้านของแพตช์หลัก (ΔL_1) และแพตช์พาราซีติก (ΔL_2)

แพตช์พาราซีติกถูกวางเหนือแพตช์หลักเพื่อช่วยปรับปรุงแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกนให้ครอบคลุมความถี่ใช้งานอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟ โดยแพตช์พาราซีติกมีความยาว (l_p) เท่ากับ 130 mm จากนั้นตัดมุมสองด้านของแพตช์ทั้งสองตัว (ΔL) เพื่อให้แพร่กระจายคลื่นโพลาริซวงกลมครอบคลุมความถี่ใช้งานอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟ ซึ่งจะแสดงผลกระทบของตัดมุมสองด้านในส่วนประสิทธิภาพสายอากาศของ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน โดยรูปที่ 3.4(ก)-(ข) แสดงผลกระทบของการตัดมุมสองด้านของแพตช์หลัก (ΔL_1) และแพตช์พาราซีติก (ΔL_2) การตัดมุมสองด้านของสองแพตช์พบว่าสามารถลดอัตราส่วนแกนของสายอากาศ โดยการการตัดมุมแพตช์หลัก (ΔL_1) และแพตช์พาราซีติก (ΔL_2) จะทำไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งจะทำให้ความยาวทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเดินทางของกระแสบริเวณขอบมีกระแสต่างเฟสกัน 90 องศา จากผลการจำลองพบว่าขนาดการตัดมุมของ ΔL_1 และ ΔL_2 จาก 40 ถึง 50 mm และ 35 ถึง 45 mm ตามลำดับ จะทำให้ $|S_{11}|$ ที่ความถี่กลาง 900 MHz มีค่าที่ต่ำกว่าขนาดอื่นคือมีค่าที่มากกว่า -15 dB และส่งผลให้ความกว้างอัตราส่วนแกนแคบ ส่วน ΔL_1 และ ΔL_2 มีขนาดลดลงจาก 20 ถึง 0 mm และ 15 ถึง 0 mm ตามลำดับพบว่าอิมพีแดนซ์แมตซ์ไม่เปลี่ยนแปลงน้อยครอบคลุมความถี่ใช้งานแต่ส่งผลกระทบอย่างมากต่อความกว้างอัตราส่วนแกนคือมากกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ โดยจากผลการจำลองค่าที่เหมาะสมของ ΔL_1 และ ΔL_2 เท่ากับ 30 และ 25 mm จะได้ความกว้าง $|S_{11}|$ และความกว้างอัตราส่วนแกนครอบคลุมความถี่ใช้งานอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล อย่างไรก็ตามการตัดมุมสองด้านส่งผลน้อยต่ออัตราขยายของสายอากาศ



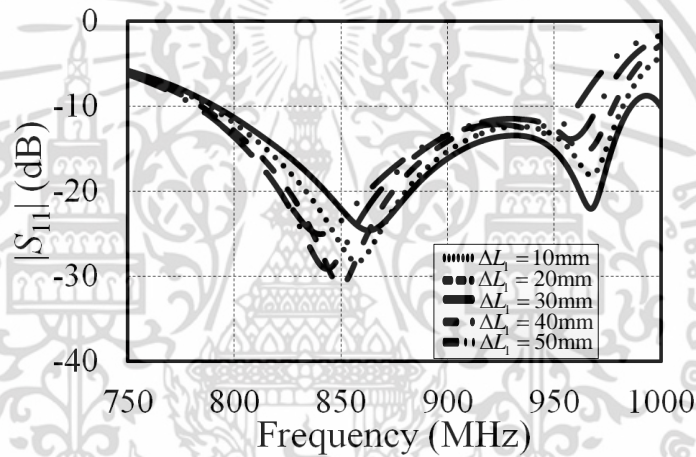
(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

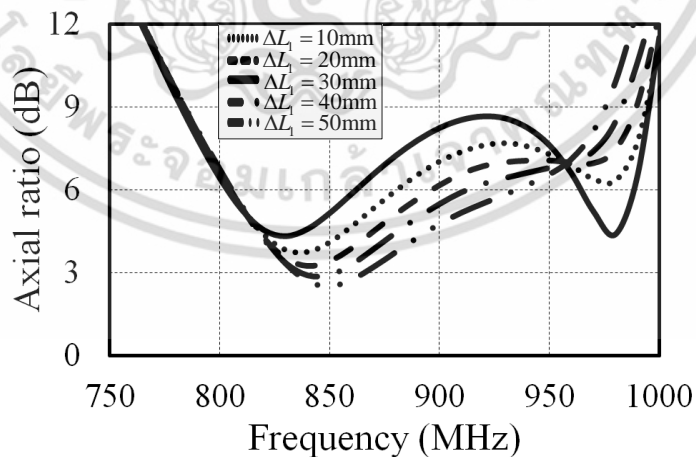


(ข)

รูปที่ 3.4 ผลของประสิทธิภาพสายอากาศของการตัดมุมสองด้านของแพตช์หลัก (ΔL_1) และแพตช์พาราซีติก (ΔL_2) (ก) $|S_{11}|$ และ (ข) อัตราส่วนแกน



(ก)

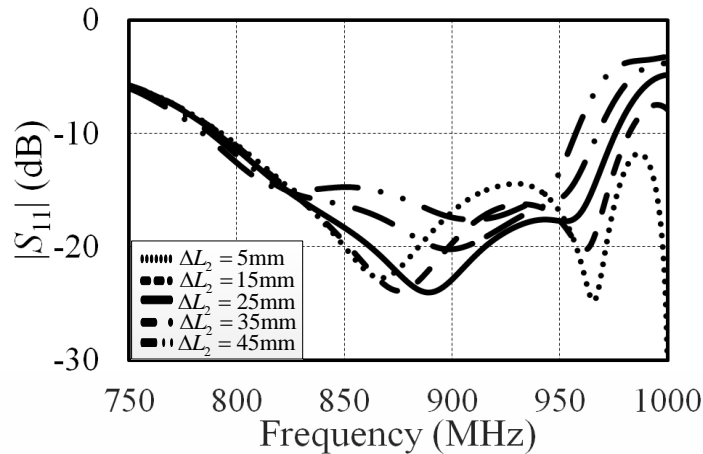


(ข)

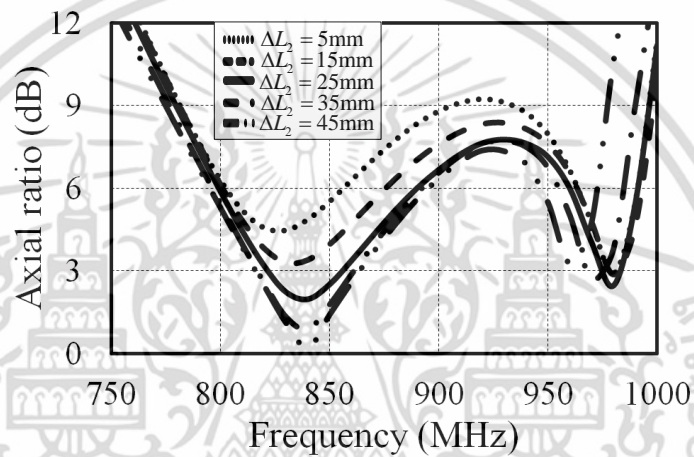
รูปที่ 3.5 ผลประสิทธิภาพสายอากาศของการตัดมุมสองด้านของแพตช์หลัก (ΔL_1)

(ก) $|S_{11}|$ และ (ข) อัตราส่วนแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 ผลประสิทธิผลสายอากาศของการตัดมุมสองด้านของแพตช์พาราซิติค (ΔL_2)(ก) $|S_{11}|$ และ (ข) อัตราส่วนแกน

จากการจำลองการตัดมุมสองด้านของแพตช์หลักและพาราซิติคที่ได้กล่าวไปแล้ว จากนั้นจะศึกษาถึงผลกระทบของการตัดมุมสองด้านแต่ละแพตช์ เพื่อดูผลกระทบของการตัดมุมสองด้านของแต่ละแพตช์ในส่วนประสิทธิผลสายอากาศของ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน พบว่าการตัดมุมสองด้านของแพตช์หลัก (ΔL_1) มีผลต่อค่าอัตราส่วนแกนอย่างชัดเจน ส่วนมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์มีผลกระทบต่อขอบความถี่ด้านสูง ที่ ΔL_1 เท่ากับ 30 mm มีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ครอบคลุมความถี่ใช้งานยูเอชเอฟอาร์เอฟเอทีเอสากลดีที่สุดดังรูปที่ 3.5(ก)-(ข) ส่วนต่อมาเป็นการตัดมุมแพตช์พาราซิติค (ΔL_2) พบว่ามีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์มีผลกระทบต่อขอบความถี่ด้านสูง แต่อัตราส่วนแกนยังไม่ครอบคลุมความถี่ตามความต้องการดังรูปที่ 3.6(ก)-(ข) เมื่อ ΔL_2 เพิ่มขึ้นอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์จะแคบลง เมื่อ ΔL_2 มีขนาดอยู่ระหว่าง 5 ถึง 25 mm อิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ครอบคลุมความถี่ใช้งานในระบบอาร์เอฟเอทีเอสากล อย่างไรก็ตามอัตราส่วนแกนไม่ใกล้เคียง $AR < 3\text{dB}$ โดยอัตราส่วนแกนจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ΔL_2 มีขนาดอยู่ระหว่าง 25 ถึง 45 mm จากการตัดมุมสองด้านที่ละแพตช์พบว่าไม่สามารถสร้างโพลาไรซ์วงกลมเนื่องจากอัตราส่วนแกนมากกว่า 3 dB สำหรับสายอากาศโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นพับร่วมกับแพตช์พาราซิติคแล้ว ต้องตัดมุมสองด้านของแพตช์หลักและแพตช์พาราซิติค เพื่อสร้าง โพลาริซวงกลมครอบคลุมความถี่ใช้งานในระบบอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล

3.4 บทสรุป

สำหรับในส่วนบทที่สามได้กล่าวถึงการขยายแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ และแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกน ซึ่งได้เลือกเทคนิคการเพิ่มแพตช์พาราซิติคเหนือตัวแพร่กระจายคลื่นร่วมกับการตัดมุมสองด้าน เพื่อให้แพตช์พาราซิติคทำงานที่ขอบความถี่ด้านสูงและแพตช์หลักทำงานที่ขอบความถี่ด้านต่ำ โดยขนาดที่เหมาะสมของแพตช์พาราซิติคมีขนาดตามเส้นทแยงมุมประมาณ $\lambda/2$ และการตัดมุมสองด้านต้องตัดมุมทั้งแพตช์หลักและแพตช์พาราซิติคคู่กัน เพื่อขยายแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ และแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกน ซึ่งได้ผลดีทำให้ แบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ มีความถี่ตั้งแต่ 805–966 MHz (18%) และแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกนมีความถี่ตั้งแต่ 834–962 MHz (14%) ซึ่งต่อไปจะศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆต่อประสิทธิภาพสายอากาศ และเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใกล้เคียงในบทถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

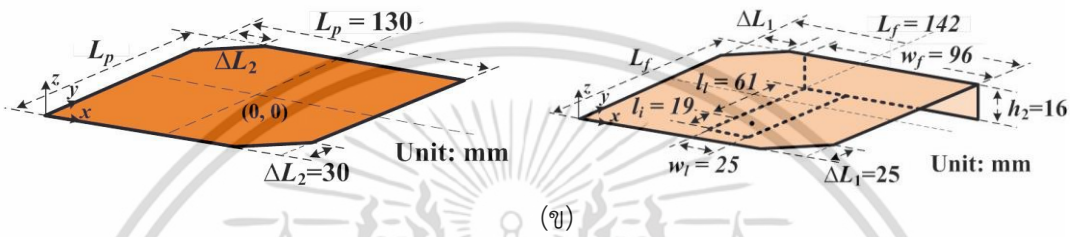
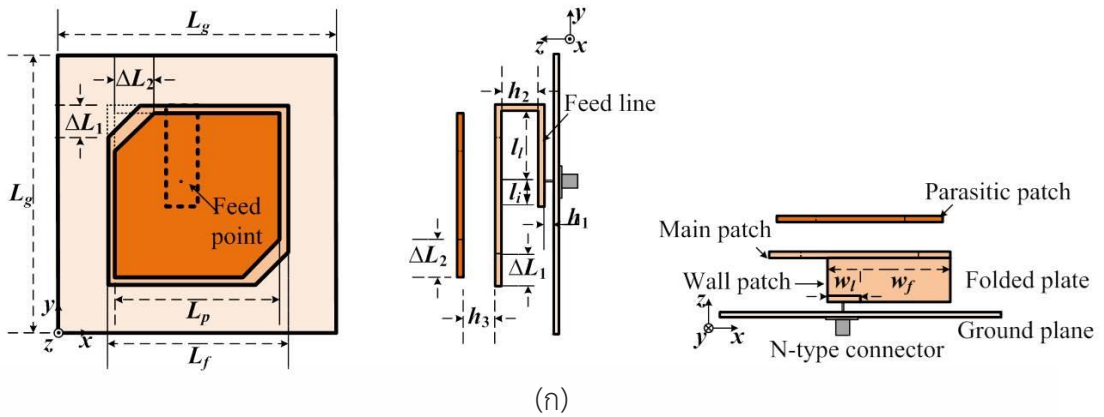
สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล และการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

จากบทที่ 2 และบทที่ 3 สายอากาศโครงสร้างแผ่นพับร่วมกับแพตช์พาราซีติกและตัดมุมสองด้าน ถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล พบว่าสายอากาศมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นโพลาริซวงกลม มีแบนด์วิดท์และแบนด์วิดท์อัตราส่วนกว้าง สำหรับบทนี้ได้ทำการปรับพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อศึกษาผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยพิจารณา $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแชนในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งจะเริ่มปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม CST® (Microwave studio) [24] เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อสมรรถนะของสายอากาศ เพื่อต้องการให้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่ได้นำเสนอให้มีความสามารถติดต่อสื่อสารกับสายอากาศแท็กได้ทุกระนาบแนวแกน ในกรณีไม่ทราบการโพลาริซของสายอากาศแท็ก นอกจากนี้ยังสามารถลดปัญหาเรื่องการจางหายหลายวิถีในระบบอาร์เอฟไอดีได้อีกด้วย เพื่อให้สายอากาศนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลอาณเอฟไอดียูเอชเอฟสากล ซึ่งระบบนี้มีความต้องการสายอากาศที่ให้การโพลาริซวงกลม มีอัตราขยายสูง และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเจาะจงทิศทาง รายละเอียดต่างๆ จะนำเสนอตั้งหัวข้อต่อไป งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟ การปรับพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ และบทสรุป

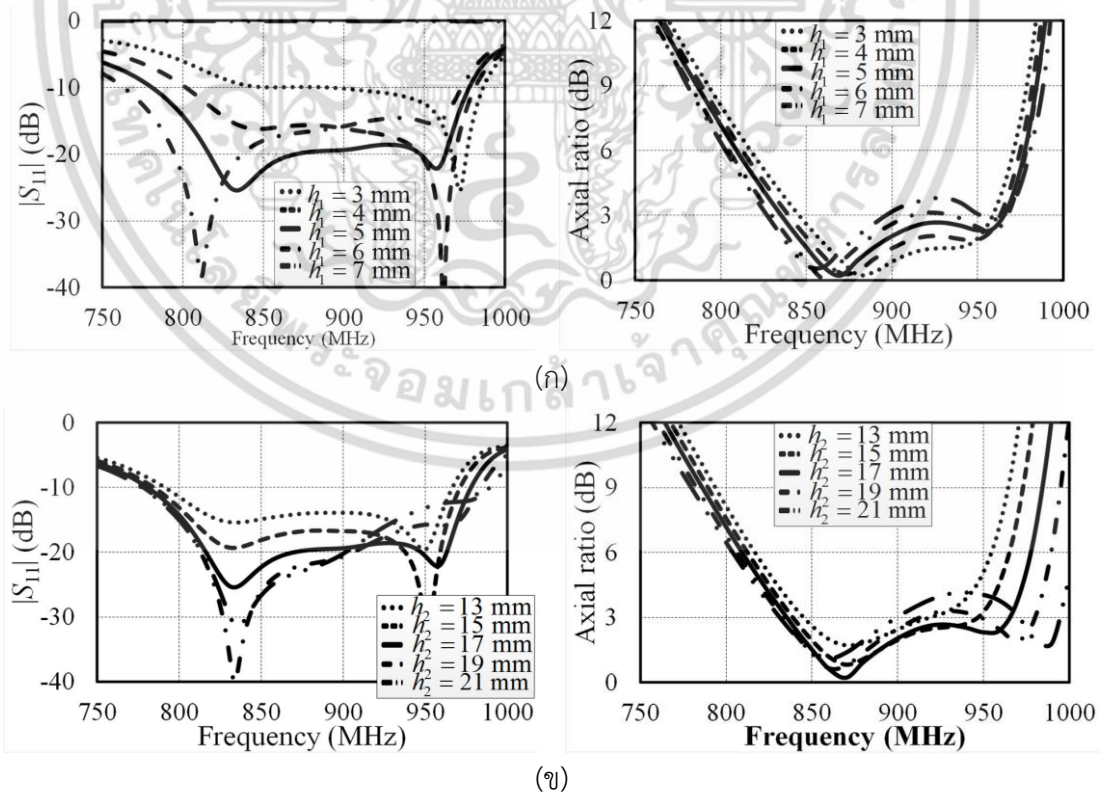
4.2 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลและการวิเคราะห์ผล

จากการศึกษาเทคนิควิธีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมด้วยสายอากาศแผ่นพับร่วมกับแพตช์พาราซีติกและการตัดมุมสองด้านที่ได้นำเสนอในบทนี้ พบว่าสามารถขยายแบนด์วิดท์ $|S_{11}|$ และ แบนด์วิดท์อัตราส่วนแชน 3 dB ดังรูปที่ 4.1 และแสดงผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสายอากาศสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลที่นำเสนอในหัวข้อต่อไป

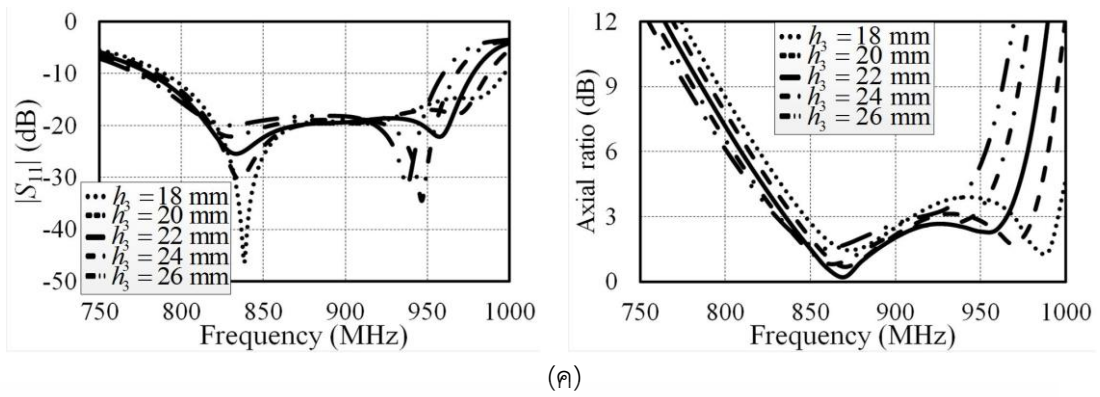


รูปที่ 4.1 สายอากาศที่นำเสนอสื่อ ($h_1 = 5 \text{ mm}$ $h_3 = 16 \text{ mm}$ $L_g = 220 \text{ mm}$)
 (ก) รูปร่างและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอสื่อ (ข) ขนาดของสายอากาศที่นำเสนอสื่อ

4.1.1 ความสูงแผ่นพับ (h_1) ความสูงแพตช์ผนัง (h_2) และความสูงแพตช์พาราซิติก (h_3)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



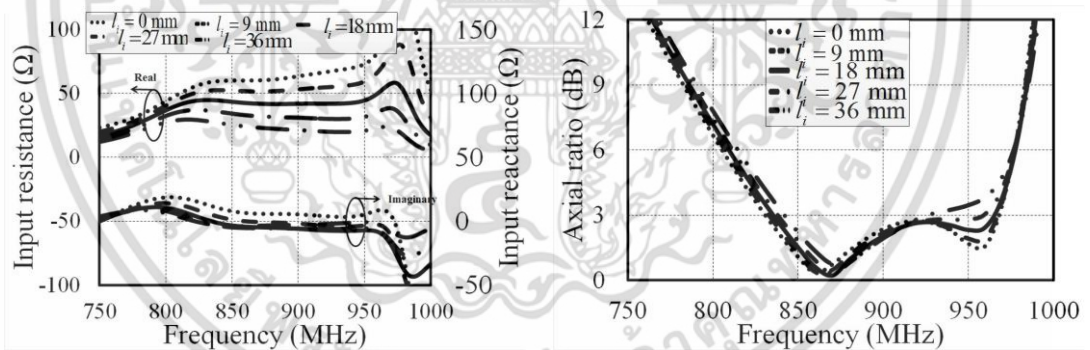
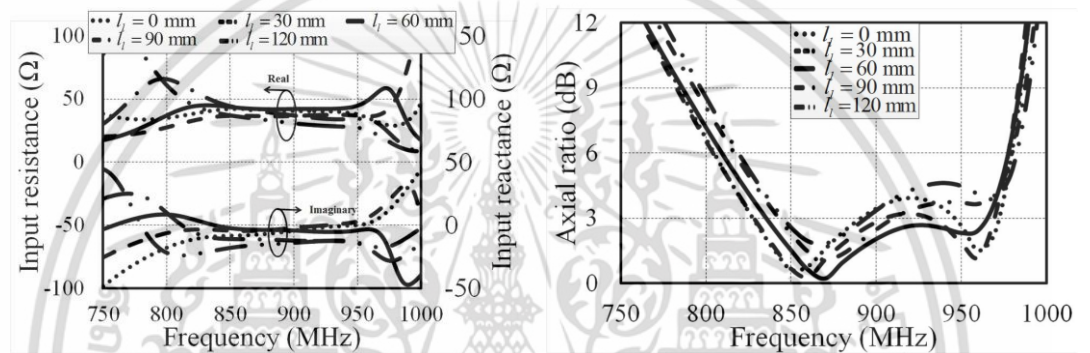
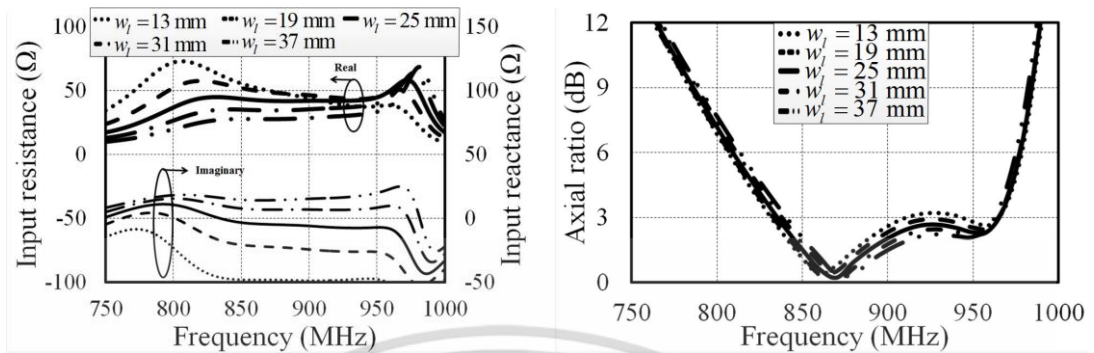
รูปที่ 4.2 ผลของ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนต่อประสิทธิภาพสายอากาศ
(ก) ความสูงแผ่นพับ (h_1) (ข) ความสูงแพตช์ผนัง (h_2) และ (ค) ความสูงแพตช์พาราซีติก (h_3)

รูปที่ 4.2(ก) แสดงผลกระทบความสูงแผ่นพับ (h_1) ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศ เมื่อความสูง h_1 มีขนาดจาก 5 ถึง 7 mm แบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกนมีแนวโน้มจะเพิ่มมากกว่า 3 dB แต่ที่ความสูง h_1 น้อยกว่า 5 mm (3 ถึง 5 mm) แบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการ ในอีกผลกระทบที่ต้องพิจารณาคือ $|S_{11}|$ เมื่อ h_1 มากกว่า 5 mm ($5 \text{ mm} < h_1 \leq 7 \text{ mm}$) พบว่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ครอบคลุมความถี่ที่ต้องการใช้งาน มีอัตราขยายสูงในช่วงความถี่ด้านสูง แต่ถ้า h_1 มีความสูงที่ 7 mm จะทำให้อิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ไม่เกิดการเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ที่สนใจ และที่ h_1 น้อยกว่า 5 mm ($3 \text{ mm} \leq h_1 < 5 \text{ mm}$) พบว่าจะได้อิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ที่แคบซึ่งก็กระทบต่ออัตราขยายของสายอากาศด้วย

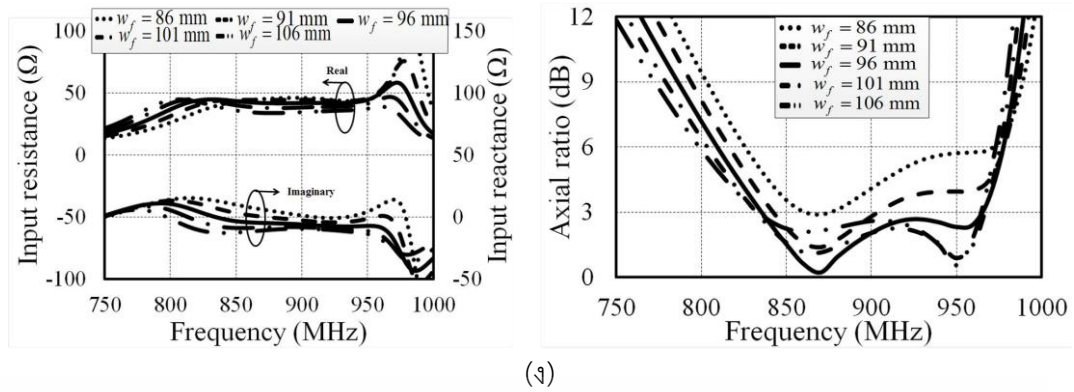
รูปที่ 4.2(ข) แสดงผลกระทบความสูงแพตช์ผนัง (h_2) ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสูง h_2 น้อยกว่า 17 mm จะมีแบนด์วิดธ์ของ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนแคบลงไม่ครอบคลุมความถี่ใช้งาน ในทางกลับกันถ้าความสูง h_2 มากกว่า 17 mm จะมีแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ ที่กว้างแต่อัตราส่วนแกนที่ได้จะมากกว่า 3 dB ไม่ครอบคลุมความถี่ใช้งาน จากการเปลี่ยนแปลงความสูง h_2 ยังพบว่ามียผลอย่างรุนแรงต่ออัตราขยายที่ความถี่ด้านสูงของความถี่ใช้งาน

รูปที่ 4.2(ค) แสดงผลกระทบความสูงแพตช์ผนัง (h_3) ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนของสายอากาศ ผลกระทบที่เห็นได้ชัดอยู่ที่ความถี่ด้านสูงของความถี่ใช้งาน เมื่อเพิ่มความสูง h_3 จะมีแบนด์วิดธ์ของ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนแคบลงไม่ครอบคลุมความถี่ใช้งาน เมื่อลดความสูง h_3 พบว่าแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ กว้างขึ้นแต่แบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกนมากกว่า 3 dB ไม่ครอบคลุมความถี่ใช้งาน ซึ่งก็พบว่าความสูง h_3 เท่ากับ 22 mm ให้ผลแบนด์วิดธ์ของ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ดีที่สุด จากการเปลี่ยนแปลงความสูง h_3 ยังพบว่ามียผลต่ออัตราขยายที่ความถี่ด้านสูงของความถี่ใช้งาน

4.2.1 ขนาดของเส้นป้อนสัญญาณ ($w_f \times l_f$) ความยาวของสตริปวงจรรบายเปิด (l_f) และความยาวของแพตช์ผนัง (w_f)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลของอินพุตอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนแกนต่อประสิทธิภาพสายอากาศ

- (ก) ความกว้างเส้นป้อนสัญญาณ (w_l) (ข) ความยาวของเส้นป้อนสัญญาณ (l_l)
 (ค) ความยาวสตริปวงจรมัลติเพล็กซ์ (l_s) และ (ง) ความกว้างแพตช์ผนัง (w_f)

รูปที่ 4.3(ก) แสดงผลกระทบความกว้างเส้นป้อนสัญญาณ (w_l) ที่มีผลต่ออินพุตอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนแกนของสายอากาศ ซึ่งขอบด้านซ้ายของแพตช์ผนัง (w_f) ตามเปลี่ยนตามการเปลี่ยนความกว้าง w_l ซึ่งก็พบว่าความกว้าง w_l มีผลกระทบน้อยต่อแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกน แต่มีผลกระทบอย่างมากต่ออินพุตอิมพีแดนซ์ จากอินพุตอิมพีแดนซ์แสดงให้เห็นว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ลดลงที่ w_l น้อยกว่า 25 mm และอินพุตอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นที่ w_l มากกว่า 25 mm โดยผลกระทบความกว้างเส้นป้อนสัญญาณ (w_l) เป็นสิ่งที่น่าสนใจ ที่รีแอคแตนซ์จะเป็นการเหนี่ยวนำเมื่อ w_l มากกว่า 25 mm และเป็นการเก็บประจุเมื่อ w_l น้อยกว่า 25 mm โดยผลกระทบความกว้างเส้นป้อนสัญญาณ (w_l) จะมีต่ออินพุตอิมพีแดนซ์มากกว่า โดยที่อินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50 Ω ตลอดความถี่ใช้งานเมื่อ w_l เท่ากับ 25 mm

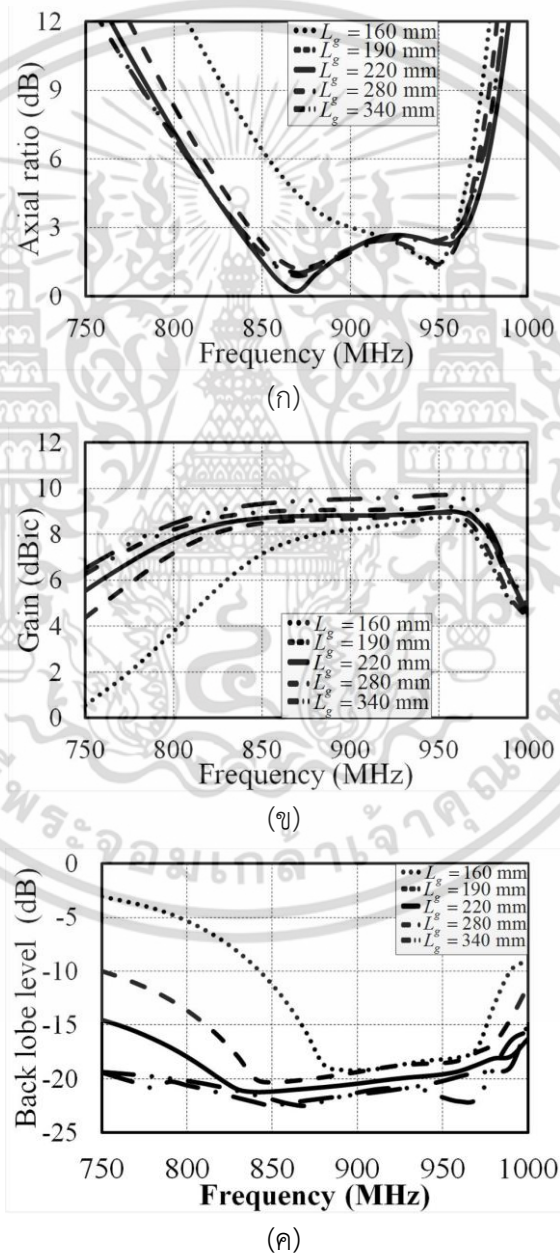
รูปที่ 4.3(ข) แสดงผลกระทบความยาวของเส้นป้อนสัญญาณ (l_l) ที่มีผลต่ออินพุตอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนแกนของสายอากาศ โดยที่ความยาวสตริปวงจรมัลติเพล็กซ์ (l_s) คงที่ตลอดการเปลี่ยนความยาวของเส้นป้อนสัญญาณ (l_l) ซึ่งจุดป้อนสัญญาณจะเปลี่ยนตามในทิศทางแกน y จากการเปลี่ยนความยาว l_l พบว่าผลของอินพุตอิมพีแดนซ์และอินพุตอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยที่ความถี่ใช้งาน ซึ่งพบว่าความยาว l_l ที่ 60 mm ทำให้แบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกนครอบคลุมความถี่ที่ต้องการใช้งาน และความยาว l_l ที่ 60 mm เป็นค่าที่ดีที่สุด

รูปที่ 4.3(ค) แสดงผลกระทบความยาวสตริปวงจรมัลติเพล็กซ์ (l_s) ที่มีผลต่ออินพุตอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนแกนของสายอากาศ พบว่าความยาว l_s มีผลต่อแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกนที่ความถี่ด้านสูง (ใกล้ความถี่ 960 MHz) ของความถี่ที่ต้องการใช้งาน โดยความยาว l_s มีผลที่น่าสนใจที่อินพุตอิมพีแดนซ์ลดลงเมื่อ l_s เพิ่มขึ้น โดยที่อินพุตอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่ความถี่ที่ต้องการใช้งาน และความยาวสตริปวงจรมัลติเพล็กซ์ (l_s) สามารถช่วยปรับอินพุตอิมพีแดนซ์ในส่วนของอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีค่าใกล้ 50 Ω ตลอดความถี่ใช้งาน โดยค่าที่เหมาะสมของความยาว l_s เท่ากับ 18 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3(ง) แสดงผลกระทบความกว้างแพตช์ผนัง (w_f) ที่มีผลต่ออินพุตอิมพีแดนซ์ และ อัตราส่วนแกนของสายอากาศ ซึ่งตำแหน่งของเส้นป้อนสัญญาณจะตามการเปลี่ยนความกว้าง w_f จากด้านซ้ายโดยที่ด้านขวาคงที่ และจุดป้อนสัญญาณจะเปลี่ยนตามในทิศทาง x พบว่าอินพุตริซิสแตนซ์และอินพุตรีแอคแตนซ์มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยที่ความถี่ใช้งานจากขนาดที่แตกต่างของความกว้าง w_f เมื่อความกว้าง w_f เท่ากับ 96 mm อินพุตริซิสแตนซ์และอินพุตรีแอคแตนซ์เข้าใกล้ 50 Ω และ 0 Ω ตามลำดับ ซึ่งครอบคลุมความถี่ที่ต้องการใช้งาน

4.2.2 ขนาดของระนาบกราวด์ (L_g)

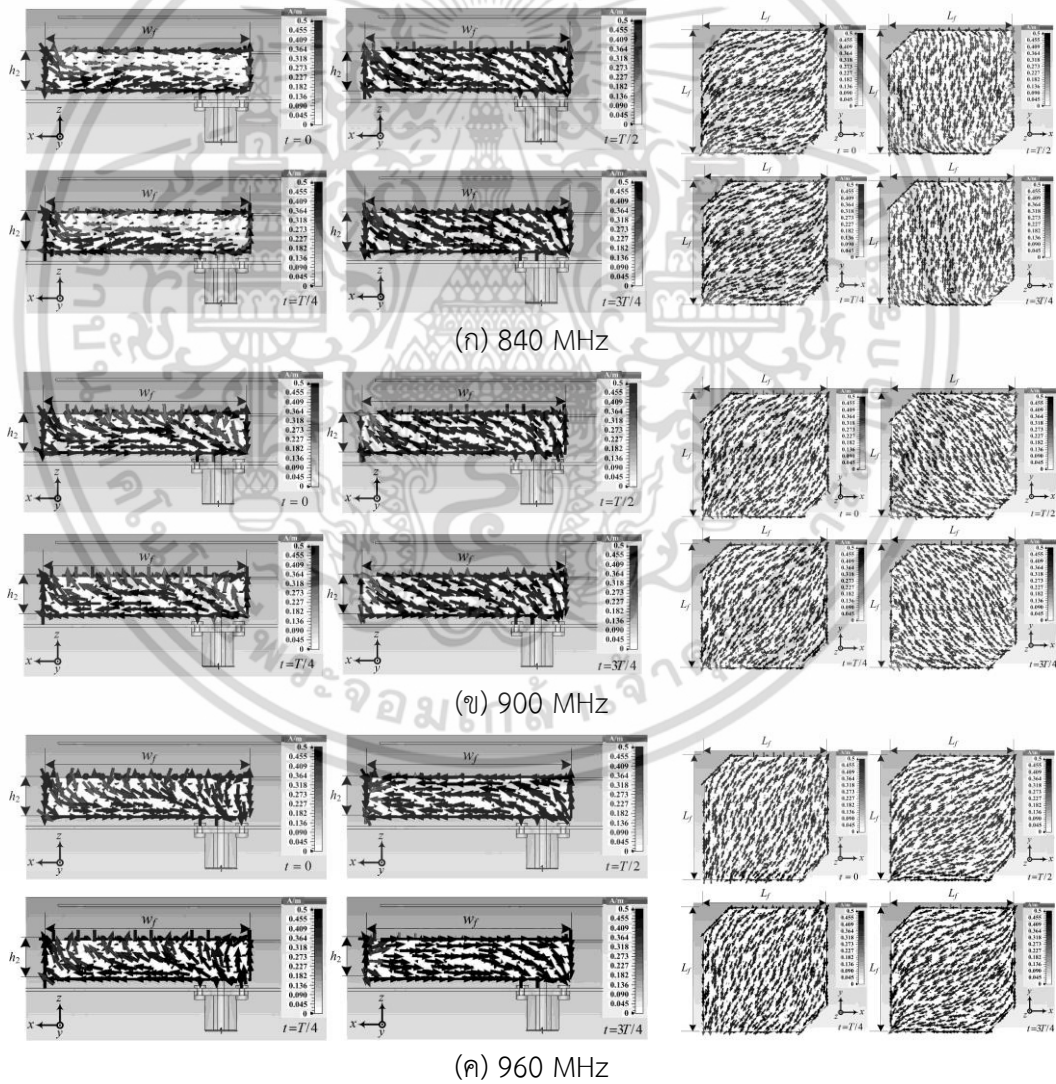


รูปที่ 4.4 ผลของระนาบกราวด์ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ

(ก) อัตราส่วนแกน (ข) อัตราขยาย และ (ค) ระดับลำคลื่นด้านหลังของโพลาริซิงวงกลมรวม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4(ก)-(ค) แสดงผลกระทบขนาดกราวด์ (L_g) ต่ออัตราส่วนแกน อัตราขยาย และระดับค่าคลื่นด้านหลังของโพลาริซิงกลมร่วมสายอากาศ ขนาดระนาบกราวด์ที่ 190 mm × 190 mm หรือเล็กกว่าจะลดประสิทธิภาพของสายอากาศอย่างเห็นได้ชัดต่ออัตราส่วนแกน อัตราขยาย และระดับค่าคลื่นด้านหลังของโพลาริซิงกลมร่วมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความถี่ด้านต่ำของความถี่ที่ต้องการใช้งาน ที่ระนาบกราวด์ 160 mm × 160 mm ทำให้แบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกนลดลง ประมาณครึ่งหนึ่งที่ได้รับจากระนาบกราวด์ 220 mm × 220 mm หรือขนาดใหญ่ขนาดที่ใหญ่กว่า จากการจำลองพบว่าขนาดระนาบกราวด์ (L_g) ที่เหมาะสมคือ 220 mm × 220 mm ผลที่ได้ของอัตราขยายของขนาดกราวด์ที่ใหญ่กว่าไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าต้องการอัตราขยายตัวเล็กหนึ่งก็คือขยายระนาบกราวด์ก็ได้สายอากาศขนาดใหญ่ด้วย ยิ่งกว่านั้นขนาดกราวด์ก็ยังมีผลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอีกด้วย

4.2.3 การกระจายเวกเตอร์กระแสของแพตช์ผนังและแพตช์หลัก



รูปที่ 4.5 ผลจำลองการกระจายกระแสที่ไหลบนตัวแพตช์ผนังและแพตช์หลักของสายอากาศ

เครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากลที่ได้นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 คือผลจำลองการกระจายกระแสที่ไหลบนตัวแพตช์ผนังและแพตช์หลัก ณ เวลาที่แตกต่างกันของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากลที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ความหนาแน่นกระแสเข้มข้นจากแพตช์ผนังไหลไปยังแพตช์หลักมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งมีขนาดกระแสเท่ากันและมีเฟสต่างกัน 90 องศา พบว่า ณ เวลา $t = 0$ ที่ความถี่ 840 MHz เมื่อเวลาเปลี่ยนจาก $t = 0$ ถึง $T/2$ $T/4$ และ $3T/4$ ทิศทางการกระจายกระแสที่ไหลในทิศทาง \rightarrow ถึง \uparrow \leftarrow และ \downarrow ตามลำดับ การกระจายกระแสที่ไหลของความถี่ 900 MHz และ 960 MHz มีการไหลคล้ายกับความถี่ 840 MHz ดังรูปที่ 4.12 (ก)-(ค) พบว่าลักษณะการไหลของกระแสบนแผ่นแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยโพลาริซิงเชิงเส้นแนวตั้ง (TM_{01}) และโพลาริซิงเชิงเส้นแนวนอน (TM_{10}) โดยการไหลของกระแสไฟฟ้ามีช่วงเวลาที่ต่างกัน $t=T/4$ หรือมีเฟสต่างกัน 90 องศาและเวลา $t=0$ ถึง $t=3T/4$ จะมีทิศทางของการไหลตามเข็มนาฬิกาที่แสดงถึงสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากลที่ได้นำเสนอให้มีการแพร่กระจายคลื่นโพลาริซิงวงกลมหมุนซ้าย ในส่วนลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล เช่น $|S_{11}|$ อัตราส่วนแอมพลิจูด การแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศจะถูกนำเสนอในบทต่อไปโดยการเปรียบเทียบระหว่างผลจำลองและผลการทดสอบ

4.2.4 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศ

บนพื้นฐานของการศึกษาพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้นนั้นสามารถสรุปขั้นตอนที่นำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศ

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณขนาดแพตช์หลัก L_f และความสูงแพตช์ผนัง h_2 ที่ทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ด้านต่ำ f_{\min} จากสมการ $2L_f + 4h_2 \approx \lambda$ ซึ่งสามารถแมตช์ $|S_{11}|$ ครอบคลุมความถี่ด้านต่ำ

ขั้นตอนที่ 2 เลือกระยะที่เหมาะสมระหว่างแผ่นพับและระนาบกราวด์

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่า $l_f + l_r$ และ w_f ที่จะรับสัญญาณให้มีอินพุตริซีสแตนซ์ 20Ω ที่ความถี่ด้านต่ำ f_{\min} จากนั้นปรับ w_f เพื่อลดอินพุตริซีสแตนซ์ให้เข้าใกล้ศูนย์

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดค่าความยาวทแยงมุมของแพตช์พาราซิติคประมาณ $\lambda/2$ ที่ความถี่ด้านต่ำ f_{\min}

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดขนาดที่ตัดมุมสองด้านของแพตช์หลักและแพตช์พาราซิติคและระยะห่างระหว่างแพตช์ทั้งสองเพื่อต้องการ $|S_{11}|$ และแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแอมพลิจูดที่ครอบคลุมความถี่ที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 6 เลือกระยะที่เหมาะสมระหว่างแพตช์หลักและแพตช์พาราซิติค และระหว่างแผ่นพับและระนาบกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 7 เลือกขนาดระนาบกราวด์ที่เหมาะสมเพื่อแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแบนและอัตราขยายที่เหมาะสมที่สุด

4.3 บทสรุป

เทคนิคโครงสร้างแผ่นพับร่วมกับแพตช์พาราซิติกและการตัดมุมทั้งสองด้านของแผ่นแพร่กระจายคลื่นสามารถขยายแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแบน 3 dB ได้ และได้นำเทคนิคนี้มาศึกษาผลของพารามิเตอร์สายอากาศต่อประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นโพลาริซวงกลมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยได้ศึกษาการตัดมุมสองด้านของแพตช์หลัก (ΔL_1) และแพตช์พาราซิติก (ΔL_2) พบว่า การตัดมุมแพตช์ใดแพตช์หนึ่งสามารถลดค่าอัตราส่วนแบนได้ แต่ยังไม่สามารถทำให้ค่าอัตราส่วนแบนน้อยกว่า 3 dB ต้องตัดมุมสองด้านของสองแพตช์ด้วยขนาดที่เหมาะสม จะทำให้ได้แบนด์วิดธ์อัตราส่วนแบนน้อยกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน จากนั้นศึกษาพารามิเตอร์ของความสูงแผ่นพับ (h_1) ความสูงแพตช์ผนัง (h_2) และความสูงแพตช์พาราซิติก (h_3) พบว่าความสูงแผ่นพับ (h_1) มีผลต่อการแมตช์อิมพีแดนซ์มาก ส่วนความสูงแพตช์ผนัง (h_2) และความสูงแพตช์พาราซิติก (h_3) มีผลต่อแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแบน จากนั้นศึกษาพารามิเตอร์ของขนาดของเส้นป้อนสัญญาณ ($w \times l$) ความยาวของสตริปวงจรมีผลต่อประสิทธิภาพการแผ่รังสี (l) และความยาวของแพตช์ผนัง (w_p) พบว่าความยาวของสตริปวงจรมีผลต่อ (l) ใช้ปรับค่าอินพุตริซีสแตนซ์ให้เข้าใกล้ 50Ω ความกว้างเส้นป้อนสัญญาณ (w) เป็นการปรับค่าอินพุตริซีสแตนซ์ให้เข้าใกล้ศูนย์ และความยาวเส้นป้อนสัญญาณ (l) กับความยาวของแพตช์ผนัง (w_p) เป็นการปรับค่าอัตราส่วนแบนให้น้อยกว่า 3 dB ในส่วนของพารามิเตอร์ขนาดระนาบกราวด์ (L_g) พบว่าขนาดที่เล็กไปมีผลต่อประสิทธิภาพอย่างมาก แต่ถ้าใหญ่ก็ไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพได้มากนักและได้สรุปขั้นตอนการออกแบบจากการศึกษาผลกระทบของประสิทธิภาพที่มีต่อสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

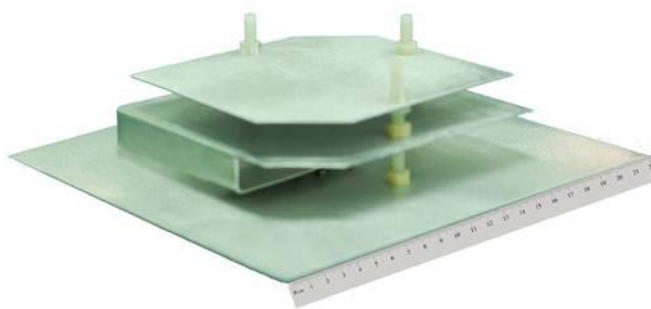
การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลต้นแบบ

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลต้นแบบ ซึ่งจะพิจารณาถึง S_{11} อัตราส่วนแอมพลิจูด การกระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศ โดยจะนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลองโดยทดสอบในห้องปฏิบัติการ ส่วนการทดสอบหาระยะการอ่านที่เกี่ยวกับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟ และได้คำนวณหาระยะการอ่านแท้ๆ ในส่วนรายละเอียดต่างๆ จะได้กล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

5.2 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอต้นแบบของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลมีลักษณะแพร่กระจายคลื่นโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง สำหรับใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยสายอากาศที่นำเสนอมีความถี่ใช้งานที่ 840 MHz ถึง 960 MHz ซึ่งเป็นความถี่สากลของอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟทั่วโลก วัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศต้นแบบเป็นวัสดุที่เป็นอลูมิเนียม เนื่องจากไม่เป็นสนิม มีความแข็งแรง ทนทาน น้ำหนักเบา และมีราคาถูก ลักษณะของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 5.1 และสรุปพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศดังตารางที่ 5.1 โดยสายอากาศต้นแบบนี้มีขนาดเท่ากับ 22 cm x 22 cm x 4.1 cm



รูปที่ 5.1 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลต้นแบบ

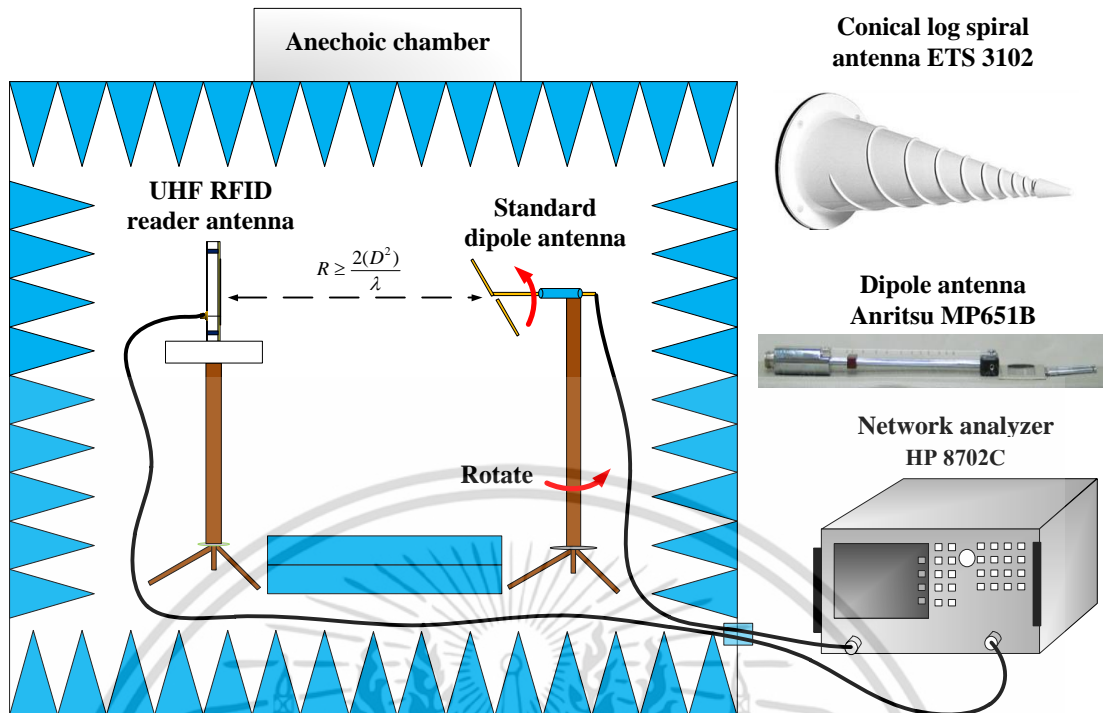
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ขนาดทางกายภาพ (mm)
L_g	ความกว้างและความยาวของระนาบกราวนด์	220
L_f	ความกว้างและความยาวของแพตช์หลัก	142
L_p	ความกว้างและความยาวของแพตช์พาราซิติก	130
l_1	ความยาวเส้นป้อนสัญญาณ	61
l_i	เส้นสตรีปปลายเปิด	19
w_f	ความกว้างของแพตช์ผนัง	96
w_1	ความกว้างของเส้นป้อนสัญญาณ	25
ΔL_1	ขนาดการตัดมุมสองด้านของแพตช์หลัก	25
ΔL_2	ขนาดการตัดมุมสองด้านของแพตช์พาราซิติก	30
h_1	ความสูงระหว่างระนาบกราวนด์และแผ่นพับ	5
h_2	ความสูงของแพตช์ผนัง	16
h_3	ความสูงระหว่างแผ่นพับและแพตช์พาราซิติก	16

5.3 การทดสอบสายอากาศต้นแบบ

การทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศต้นแบบ เช่น $|S_{11}|$ ค่าอัตราขยาย ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดและเฟสการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และอัตราขยาย ได้ทำการทดสอบในห้องไร้การสะท้อน (Anechoic chamber) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดสอบมีดังต่อไปนี้ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายยี่ห้อ HP รุ่น 8720C สายอากาศไดโพลมาตรฐาน (Standard dipole antenna) ยี่ห้อ Anritsu รุ่น MP651B และสายอากาศกรวยขดลวด (Conical log spiral antenna) ยี่ห้อ EST รุ่น 3102 ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบในห้องไร้การสะท้อน

การทดสอบ [5.1] ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลต้นแบบได้อาศัยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายยี่ห้อ Agilent รุ่น 8720C

การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลต้นแบบ ซึ่งในการทดสอบเพื่อหาอัตราขยายนั้นจะใช้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลต้นแบบ ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านรับและใช้สายอากาศแบบไดโพลมาตรฐานทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง โดยที่การทดสอบสายอากาศจะต้องทำภายในสนามระยะไกล เพราะฉะนั้นระยะห่าง (R) ระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับต้องเป็นไปตามเงื่อนไข $R \geq \frac{2D^2}{\lambda_0}$ โดยที่ D คือ ขนาดของสายอากาศที่มีความยาวที่สุดและ λ_0 คือความยาวคลื่นในอากาศโดยพิจารณาที่ความถี่ใช้งาน ดังนั้นจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับมีค่าเท่ากับ 2.2 เมตร

การทดสอบอัตราส่วนแอมพลิจูดและการทดสอบค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลต้นแบบ ซึ่งในการทดสอบนั้นจะใช้สายอากาศแบบเกลียวที่มีจำนวนรอบเท่ากับ 7 รอบ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 cm มาใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง และใช้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลต้นแบบทำหน้าที่เป็นสายอากาศด้านรับ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับมีค่าเท่ากับ 2.2 เมตร ซึ่งผลจากการทดสอบที่ได้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนแอมพลิจูดได้จากสมการที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Axial Ratio} = 20 \log \left[\frac{|E_{co}| + |E_{xp}|}{|E_{co}| - |E_{xp}|} \right] \quad (5.1)$$

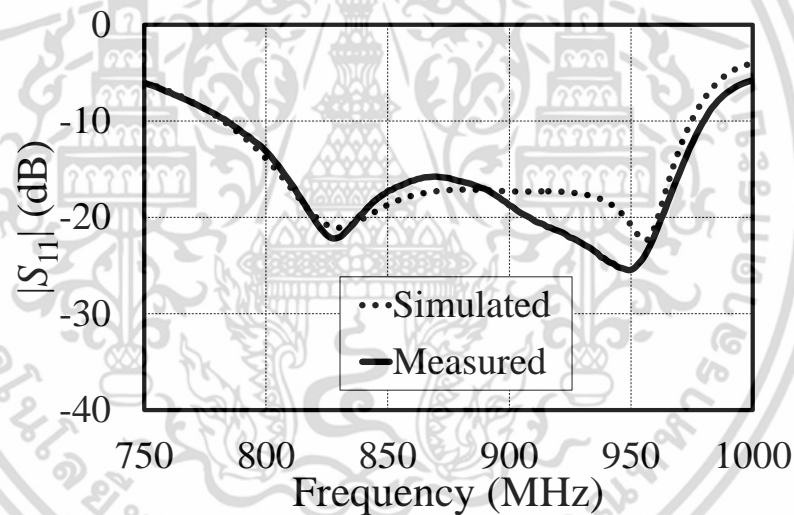
โดยที่

$|E_{co}|$ คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์แบบเดียวกับโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

$|E_{xp}|$ คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์ตรงกันข้ามกับโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

5.3.1 การทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ

ผลการจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ได้นำเสนอมีความถี่กลางที่ 888 MHz และมีความถี่ใช้งาน $|S_{11}| < -15$ dB ตั้งแต่ 806 ถึง 970 MHz หรือเท่ากับ 18% แบนด์วิดท์ สำหรับในส่วนของผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบมีความถี่กลางที่ 888 MHz และมีความถี่ใช้งาน $|S_{11}| < -15$ dB ตั้งแต่ 806 ถึง 970 MHz หรือเท่ากับ 18% แบนด์วิดท์ ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งครอบคลุมตามความต้องการของระบบอาร์เอฟไอเดียความถี่เอชเอฟสากล



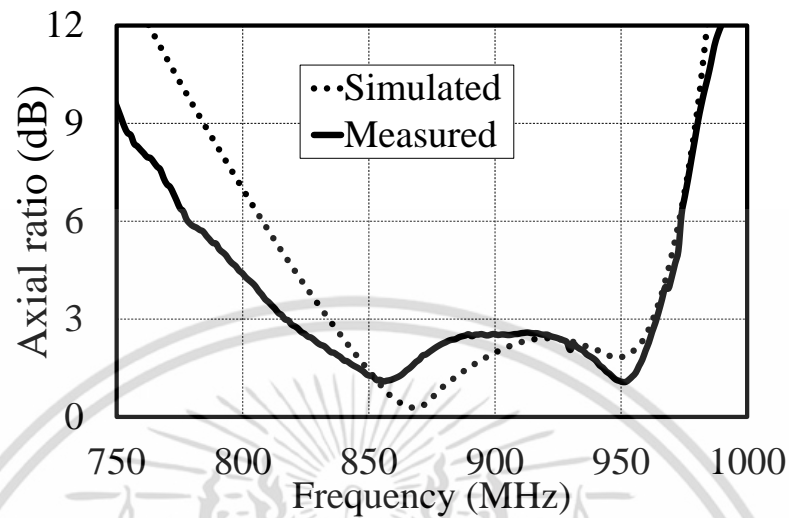
รูปที่ 5.3 ผลการจำลองและผลทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ได้นำเสนอ

5.3.2 การทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศต้นแบบ

ผลการจำลองอัตราส่วนแกนพบว่า มีอัตราส่วนแกนต่ำที่สุดเท่ากับ 0.3 dB ที่ความถี่ 870 MHz และมีแบนด์วิดท์อัตราส่วนแกน 3 dB ตั้งแต่ 839 ถึง 963 MHz หรือเท่ากับ 13% แบนด์วิดท์ ผลการทดสอบอัตราส่วนแกนได้ทำการทดสอบที่ลำคลื่นหลักหรือทิศด้านหน้า 0 องศาของสายอากาศต้นแบบที่ได้นำเสนอและคำนวณหาอัตราส่วนแกนในแต่ละความถี่และพบว่า ที่ความถี่ 840 900

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 960 MHz มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 1.73 2.53 และ 2.02 dB โดยมีแบนด์วิดธ์อัตราส่วน 3 dB เท่ากับ 16.52% (816 ถึง 963 MHz) ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ผลการจำลองและผลทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศต้นแบบ

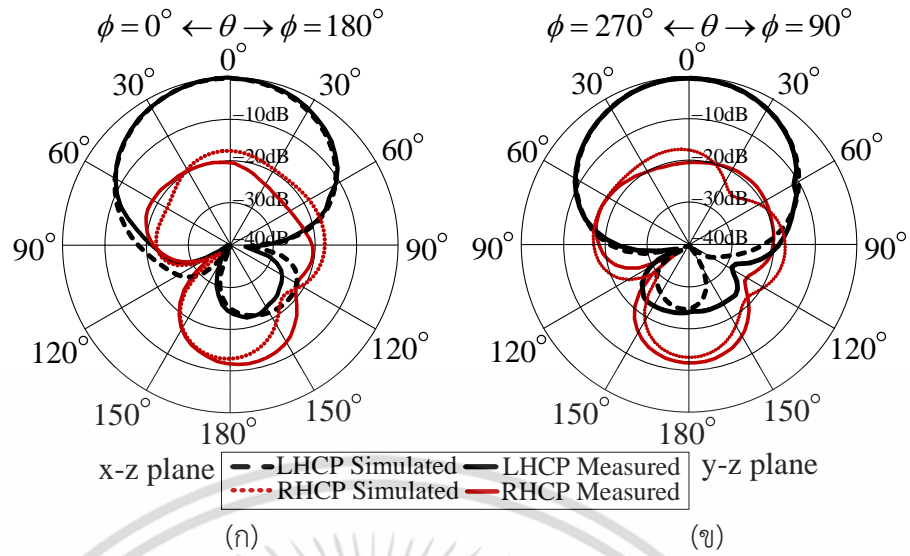
5.3.3 การทดสอบแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ xz และ xy ประกอบไปด้วยโพลาริซชันร่วม (Co-polarization) มีบีมวิดธ์ครึ่งกำลัง (Half-power beamwidth: HPBW) และระดับโพลาริซชันไขว้ (Cross-polarization level) โดยแสดงดังตารางที่ 5.2 และรูป 5.5 ถึง 5.7 บนระนาบ xz และ xy ที่ความถี่ 840 900 และ 960 MHz ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ายังมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางตลอดย่านความถี่ใช้งาน 840 ถึง 960 MHz

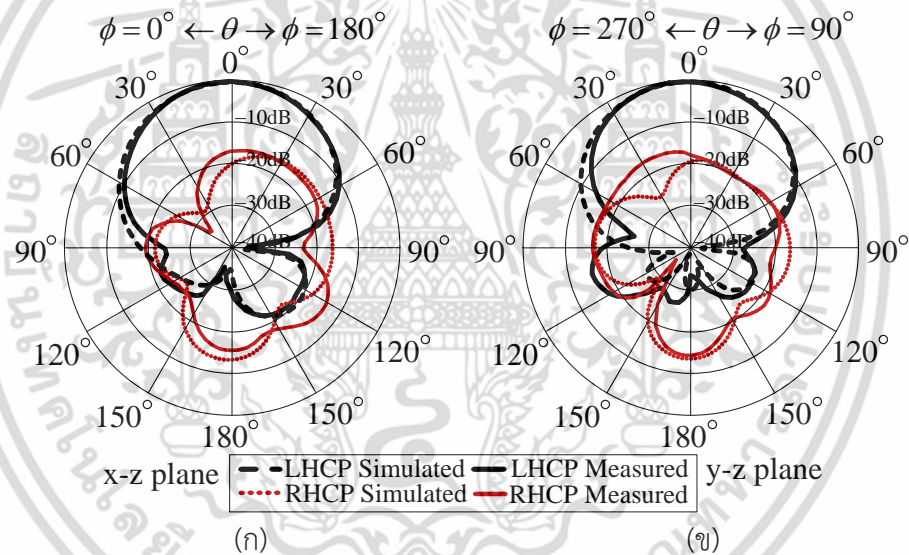
ตารางที่ 5.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้นำเสนอ บนระนาบ $x-z$ และ $x-y$

โพลาริซชัน	ความถี่ 840 MHz		ความถี่ 900 MHz		ความถี่ 960 MHz	
	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ
HPBW (deg.) $x-z$	67.5°	65°	66.2°	60°	63.8°	60°
HPBW (deg.) $y-z$	67.8°	65°	64.2°	60°	63.4°	60°
CPL (dB)	-17.6 dB	-20.0 dB	-18.4 dB	-19.9 dB	-16.6 dB	-19.7 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

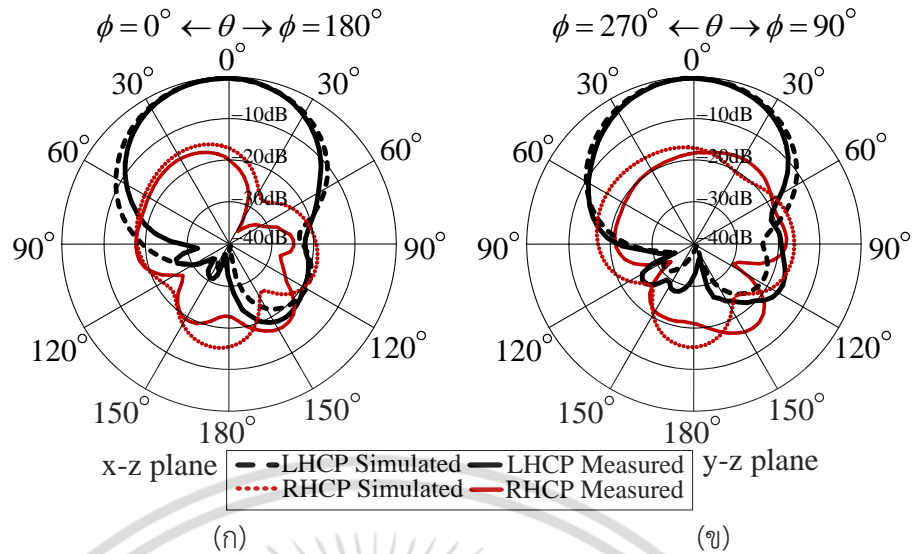


รูปที่ 5.5 ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 840 MHz



รูปที่ 5.6 ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 900 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 960 MHz

5.3.4 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

ในส่วนของการทดสอบอัตราขยายสายอากาศ ได้อาศัยสายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นสายอากาศส่ง (G_s) และใช้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีเป็นสายอากาศรับ (G_r) อัตราขยายสายอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.2 และ 5.3

$$G_r \text{ (dB)} = G_r \text{ (dB)} = \frac{1}{2} [P_r - P_t + L_s + L_r + L_t] \quad (5.2)$$

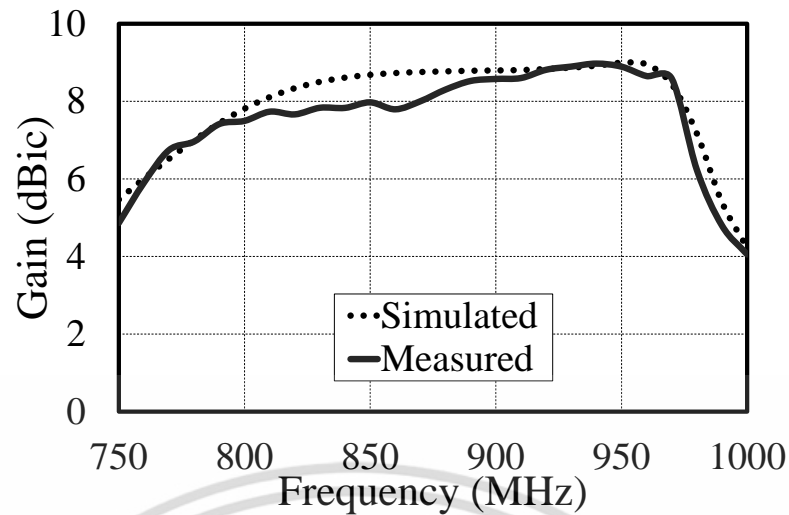
เมื่อ

$$L_s = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (5.3)$$

โดย P_r คือกำลังงานด้านรับ (dBm) P_t คือกำลังงานด้านส่ง (dBm) L_t คือการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านส่ง (dB) L_r คือการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านรับ (dB) และ L_s คือการสูญเสียจากระยะทาง (dB) และ R คือระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่ง

ผลจำลองอัตราขยายสายอากาศที่ได้นำเสนอที่ความถี่ 840 900 และ 960 MHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 8.6 8.7 และ 8.9 dBic ในส่วนของผลทดสอบอัตราขยายที่ความถี่ 840 900 และ 960 MHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 7.8 8.5 และ 8.6 dBic และมีอัตราขยายเฉลี่ยที่ใช้งานในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟมากกว่า 7.8 dBic ดังแสดงในรูปที่ 5.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 ผลจำลองและผลทดสอบอัตราขยายสายอากาศ

ตารางที่ 5.3 แสดงปมวิดิษฐ์ครึ่งกำลัง แบบดิวิตซ์อัตราส่วนแกน อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง และอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ใช้งาน 840 870 900 930 และ 960 MHz ซึ่งผลการทดสอบ $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกน อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสอดคล้องกับผลการจำลองดังที่แสดงไปก่อนหน้านี้ โดยผลการทดสอบลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังมากกว่า 24 dB ตลอดย่านความถี่ใช้งาน ปมวิดิษฐ์ครึ่งกำลังของสายอากาศต้นแบบที่ความถี่กลาง 900 MHz เท่ากับ 60° ทั้งระนาบ $x-z$ และ $y-z$ ส่วนปมวิดิษฐ์อัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง 900 MHz เท่ากับ 80° และ 70° ในระนาบ $x-z$ และ $y-z$ ตามลำดับ และมีอัตราขยายสูงสุดที่ความถี่ 930 MHz เท่ากับ 8.9 dBic

ตารางที่ 5.3 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นและปมวิดิษฐ์อัตราส่วนแกนของสายอากาศต้นแบบ

ความถี่ (MHz)	840	870	900	930	960	
HPBW	$x-z$	65°	65°	60°	60°	60°
	$y-z$	65°	65°	60°	60°	60°
3-dB AR-BW	$x-z$	90°	100°	80°	60°	65°
	$y-z$	70°	80°	70°	90°	55°
F/B (dB)	24	31	30	27	35	
อัตราขยาย (dBic)	7.8	8.0	8.5	8.9	8.7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.5 การทดสอบระยะทางการติดต่อสื่อสารกับแท็กในระบบอาร์เอฟไอดี ยูเอชเอฟ

เพื่อยืนยันผลการทดสอบ จึงนำสายอากาศต้นแบบต่อเข้ากับเครื่องอ่านยูเอชเอฟอาร์เอฟไอดี เซิงพาณิชย์ (902-928 MHz) เพื่อทดสอบเพื่อทดสอบระยะการอ่านสูงสุดระหว่างแท็กกับเครื่องอ่าน ข้อมูล ระยะที่อ่านได้ถูกกำหนดให้เป็นระยะการอ่านไกลสุดในแนวเส้นสายตา ในการทดสอบใช้แท็กมาตรฐาน EPC Gen2 (Alien ALL-9540-02) มีความถี่ใช้งานในช่วง 860 – 960 MHz และเครื่องอ่านข้อมูลโมโตโลล่า XR450 Gen2 ซึ่งใช้งานในช่วงความถี่ 902 - 928 MHz ในการทดลองได้ตั้งค่าเครื่องอ่านข้อมูลให้มีความถี่ใช้งานแตกต่างกัน 4 ช่วงความถี่คือ 902–907.5 MHz 917–920.8 MHz 920–925 MHz และ 922–928 MHz ที่เป็นความถี่ที่ถูกครอบครองของบางประเทศในเอเชียและอเมริกาใต้ ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ที่เครื่องอ่านข้อมูลรองรับ มีกำลังส่ง 4 W EIRP ตารางที่ 5.4 แสดงระยะการอ่านสูงสุดในหน่วยเมตรของสี่ช่วงความถี่ พบว่ามีระยะการอ่านมากกว่า 7 m

ตารางที่ 5.4 ระยะการอ่านสูงสุดของสายอากาศต้นแบบ (กำลัง 4 W EIRP)

Frequency (MHz)	Maximum reading range (m) at boresight
902.0–907.5	7.12
917.0–920.8	7.36
920.0–925.0	7.24
920.0–925.0	7.35

โดยที่ระยะการอ่านสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสูตร Friss ในสมการที่ 5.4 ซึ่งระยะอ่านสูงสุดของระบบยูเอชเอฟอาร์เอฟไอดีขึ้นกับกำลังการแพร่กระจายไอโซทรอปิกประสิทธิภาพ (EIRP_R) ซึ่งเป็นกำลังงานรวมของอัตราขยายสายอากาศส่งและกำลังส่ง สำหรับแท็กมีความไวของชิปไอซีอัตราขยายสายอากาศแท็ก และสัมประสิทธิ์การสะท้อน มีผลต่อระยะการอ่านได้ และองค์ประกอบ การสูญเสียโพลาริไรซ์ที่มีสมมาตรระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อระยะการอ่านได้ ตารางที่ 5.5 แสดงการคำนวณระยะอ่านสูงสุดสำหรับสายอากาศที่กำลังสูงสุด 4 W EIRP_R ซึ่งเป็นอัตราขยายสายอากาศรวมกับกำลังส่งเท่ากับ 4 W มีความไวชิปไอซีแท็กเท่ากับ -14 dBm ที่อัตราขยายแท็ก 2.15 dBi การคำนวณจะใช้การประยุกต์เชิงพาณิชย์ที่ $|S_{11}| < -15$ dB ใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดธ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็ก อย่างไรก็ตามแบนด์วิดธ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กจะเปลี่ยนแปลงที่ $|S_{11}| < -3$ dB -6 dB -10 dB และ -15 dB ใช้ในการคำนวณระยะอ่านสูงสุด ตารางที่ 5.5 แสดงระยะอ่านสูงสุดสำหรับเปลี่ยนแปลงของความถี่ และ $|S_{11}|$ (dB) ได้ระยะอ่านมากกว่า 5.0-8.1 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_{\max}(\theta, \phi) = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{EIRP_R}{P_{\text{chip}}} (1 - |\Gamma|^2) G_{\text{tag}}(\theta, \phi) \chi} \quad (5.4)$$

เมื่อ Γ คือสัมประสิทธิ์การสะท้อน

χ คือ องค์กรประกอบการสูญเสียโพลาริซ

โดยการคำนวณระยะอ่านสูงสุดคำนวณจากการแพร่กระจายคลื่นโพลาริซวงกลมสมบูรณ์แบบ (AR = 0 dB) และสายอากาศแท่งมีโพลาริซเชิงเส้นสมบูรณ์แบบ จะทำให้มีองค์กรประกอบการสูญเสียโพลาริซเท่ากับ 0.5 อย่างไรก็ตามความกว้างอัตราส่วนแกนจะมีผลต่อระยะอ่านสูงสุดเล็กน้อย

ตารางที่ 5.5 ระยะอ่านสูงสุดจากการคำนวณ

Frequency (MHz)	Maximum reading range (m)			
	S ₁₁ (dB) of tag antenna			
	-3	-6	-10	-∞
840	5.7	7.0	7.7	8.1
870	5.5	6.8	7.4	7.8
900	5.3	6.5	7.2	7.6
930	5.2	6.3	6.9	7.3
960	5.0	6.1	6.7	7.1

จากตารางที่ 5.6 ประสิทธิภาพสายอากาศถูกเปรียบเทียบกับวิจัยที่มีมาก่อนของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟและสายอากาศที่นำเสนอ สายอากาศที่นำเสนอมีแบนด์วิดท์กว้างครอบคลุมระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล ถูกเปรียบเทียบกับสายอากาศของงานวิจัยที่มีมาก่อนใน [15, 16, 18, 21] ที่มีอัตราขยายและขนาดใกล้เคียงกับสายอากาศที่นำเสนอในอ้างอิงที่ [9, 20, 22] จะมีขนาดสายอากาศที่เล็กกว่าแต่ก็มีอัตราขยายน้อยกว่าสายอากาศที่นำเสนอ โดยการเปรียบเทียบทั้งหมดใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ก็จะทำให้เห็นว่าสายอากาศที่นำเสนอมีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่ดีกว่า ในส่วนของระยะอ่านสูงสุดที่ 4 W EIRP_R มาตรฐาน พบว่าสายอากาศมีขนาดที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ [15-16] และมีระยะอ่านที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบขนาดโครงสร้าง คุณลักษณะทางไฟฟ้าและระยะการอ่านสูงสุดของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟ

#	Ref.	Electrical specifications				Mechanical specifications	
		Absolute bandwidth (MHz)	Gain (dBic)	3-dB Beamwidth (Degree)	F/B Ratio (dB)	Dimension size ($L \times W \times H$) in mm^3	Maximum reading range (m)
1	[9]	902-929	6.0	68	30	150×150×34	N/A
2	[11]	865-946	7.2	81	N/A	200×200×38	N/A
3	[15]	818-963	8.3	75	15	250×250×39	7.1-7.5
4	[16]	838-959	8.6	63	15	250×250×37.5	6.8-7.0
5	[18]	833-962	9.1	66	15	250×250×39	N/A
6	[19]	840-1050	5.0	60	15	225×250×12.8	N/A
7	[20]	857-1002	5.4	83	N/A	126×121×0.8	5.5
8	[21]	893-948	8.5	65	16.5	220×220×14	N/A
9	[22]	901-930	6.8	75	20	150×150×33	3.1-3.3
10	Proposed antenna	816-963	8.6	60	24	220×220×41	7.1-7.3

5.4 บทสรุป

การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล ต้นแบบที่ใช้โครงสร้างแผ่นพับร่วมกับแพตช์พาราซิติคและการตัดมุมสองด้าน ป้อนสัญญาณเดี่ยวมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางโพลาริซวงกลม ประยุกต์ใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล ผลจากการทดสอบ $|S_{11}|$ พบว่ามีแบนด์วิดธ์ $|S_{11}| < -15$ dB ตั้งแต่ 806 ถึง 970 MHz (18%) ผลจากการทดสอบอัตราส่วนแอมพลิจูดพบว่ามีแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแอม 3 dB ตั้งแต่ 816 ถึง 963 MHz (16%) และที่ความถี่ 840 900 และ 960 MHz มีค่าอัตราส่วนแอมต่ำที่สุดเท่ากับ 1.73 2.53 และ 2.02 dB ผลจากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ xz และ xy มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางและโพลาริซวงกลมมีบีมิวิตซ์มากกว่า 60 องศาและมีบีมิวิตซ์อัตราส่วนแอม 55 องศา ในส่วนระดับกำลังงานของโพลาริซวงกลม -13 dB ทั้งสองระนาบตลอดช่วงความถี่ 860 ถึง 960 MHz นอกจากนี้ผลการทดสอบอัตราขยายมากกว่า 7.8 dBic ตลอดย่านความถี่ใช้งาน สายอากาศที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายช่วงเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิวเอชเอฟและความต่างของช่วงความถี่ในแต่ละประเทศ ผลจากการทดสอบหาระยะทางไกลที่สุดที่สามารถติดต่อสื่อสารบนระบบอาร์เอฟไอดิวเอชเอฟพบว่า สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ในช่วงระยะทาง 0 ถึง 7.3 m



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลโดยใช้โครงสร้างแผ่นพับร่วมกับแพตช์พาราซิติคและตัดขอบสองด้านโดยป้อนสัญญาณด้วยโพรบ โดยมีแบนด์วิดธ์ [5,11] และแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแบน 3 dB ที่สามารถรองรับการทำงานในย่านความถี่ยูเอชเอฟสากลตั้งแต่ 840 ถึง 960 MHz สายอากาศที่ได้นำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโพลาริซวงกลมหมุนซ้ายและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางด้วยความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมากกว่า 60 องศาทั้งสองระนาบ (xz และ yz) นอกจากนี้มีอัตราขยายเฉลี่ยที่ใช้ในระบบอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากลมากกว่า 7.8 dBic โครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอมีขนาดเล็กกว่าสายอากาศในเชิงพาณิชย์ที่มีอัตราขยายใกล้เคียงกัน มีขนาดมิติ 220 mm×220 mm×41 mm สำหรับในส่วนของการทำงานและการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าพบว่ามีความถี่เรโซแนนซ์ที่สอดคล้องกันและใกล้เคียงกัน

ในหัวข้อ 6.1 จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งประกอบไปด้วยผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล ผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศ ผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศ และผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้งานสายอากาศกับเครื่องอ่านข้อมูลของอาร์เอฟไอดีกับแท็ก ในหัวข้อ 6.2 จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

6.2 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับส่วนแรก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เริ่มจากการศึกษาประวัติความเป็นมา โครงสร้างระบบอาร์เอฟไอดีและการนำระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ เช่นย่านความถี่ต่ำ ย่านความถี่สูง ย่านความถี่ยูเอชเอฟและย่านความถี่ไมโครเวฟ จากการเปรียบเทียบในแต่ละย่านความถี่ใช้งานพบว่ามีความโดดเด่นที่แตกต่างกันออกไป แต่สำหรับย่านความถี่ยูเอชเอฟมีความน่าสนใจและมีประโยชน์ต่อการใช้งานในระบบห่วงโซ่อุปทาน ระบบโลจิสติกส์ และระบบการจัดการสินค้า เป็นต้น ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟมีลักษณะติดต่อสื่อสารแบบการกระจายย้อนกลับ โดยอาศัยสนามไฟฟ้าในการโอนถ่ายกำลังงานบนระยะสนามไกลหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับระบบเรดาร์ การติดต่อสื่อสารดังกล่าวควรมีโพลาริซที่ตรงต่อกันหรือเหมือนกันซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการติดต่อสื่อสารที่ดีด้วย เช่น สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีโพลาริซเชิงเส้นแนวตั้งเช่นเดียวกับสายอากาศแท็ก และในทางตรงกันข้ามสายอากาศอ่านข้อมูลมีโพลาริซเชิงเส้นแนวตั้ง แต่สายอากาศแท็กมีโพลาริซเชิงเส้นแนวนอนเป็นที่แน่นอนประสิทธิภาพการสื่อสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดต่อสื่อสารลดลงอย่างชัดเจนหรือไม่สามารถติดต่อสื่อสารกัน (โพลาริไซม์ไม่ตรงกัน) แต่อย่างไรก็ตามสามารถแก้ไขได้โดยการนำสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาริไซม์วงกลมนำมาใช้งาน แต่ทว่าประสิทธิภาพการติดต่อสื่อสารจะถูกลดลงไปครึ่งหนึ่ง นอกจากนี้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลโพลาริไซม์วงกลมยังสามารถแก้ไขปัญหาเรื่องการจางหายหลายวิธี ได้อีกด้วยจึงเป็นที่มาและความสำคัญในการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลโพลาริไซม์วงกลม

ส่วนที่สองกล่าวถึงสายอากาศโครงสร้างแผ่นพับที่ถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล โดยโครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีคุณสมบัติเด่นๆ คือ ง่ายต่อการออกแบบ สะดวกต่อการผลิต และติดตั้งใช้งาน นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาและเคลื่อนย้ายได้สะดวก จากการจำลองผล พบว่าที่ขนาดแพตช์หลักและแพตช์ผนังของอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาด สามารถสร้างการแพร่กระจายคลื่นโพลาริไซม์วงกลมที่มีความถี่ต่างๆในระบบอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากล แต่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของระบบอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากลแบนด์กว้างได้ ($> 13\%$) และขนาดแพตช์หลักและแพตช์ผนังของอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาด พบว่าสายอากาศโครงสร้างที่ได้นำเสนอนี้ให้อัตราขยายสูงมากกว่า 8 dBic และยังคงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง มีโพลาริไซม์วงกลมหมุนซ้ายโดยมีค่าอัตราส่วนแชนน้อยกว่า 3 dB ตลอดมุมด้านหน้าของตัวสายอากาศไว้เช่นเดิม สำหรับแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ และแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแชนแคบนั้นสามารถแก้ไขปัญหาได้ในส่วนต่อจากนี้

สำหรับในส่วนที่สามจะกล่าวถึงการขยายแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ และแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแชนจากสายอากาศโครงสร้างแผ่นพับที่ได้นำเสนอนี้สามารถสร้างการแพร่กระจายคลื่นโพลาริไซม์วงกลม แต่ให้แบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ และแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแชนที่แคบประมาณ 3% ซึ่งไม่เพียงพอต่อระบบอาร์เอฟไอเดียเอชเอฟสากลที่ต้องการแบนด์วิดธ์อย่างน้อย 13% การขยายแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ และแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแชนของสายอากาศแผ่นพับ จึงได้นำเทคนิคแพตช์พาราซิติกพร้อมกับตัดมุมสองด้านเพื่อขยายแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ และแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแชนได้มากกว่า 13%

ส่วนที่สี่กล่าวถึงเทคนิคโครงสร้างแผ่นพับร่วมกับแพตช์พาราซิติกและการตัดมุมทั้งสองด้านของแผ่นแพร่กระจายคลื่นสามารถขยายแบนด์วิดธ์ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแชน 3 dB ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ โดยได้ศึกษาการตัดมุมสองด้านของแพตช์หลักและแพตช์พาราซิติกพบว่าการตัดมุมแพตช์ใดแพตช์หนึ่งสามารถลดค่าอัตราส่วนแชนได้ จากนั้นศึกษาพารามิเตอร์ของความสูงแผ่นพับมีผลต่อการแมตซ์อินพุตอิมพีแดนซ์ และความสูงแพตช์ผนังและความสูงแพตช์พาราซิติกมีผลต่อแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแชน จากนั้นศึกษาพารามิเตอร์ของความยาวของสตริปวงจรมายเปิดใช้ปรับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ให้เข้าใกล้ 50 Ω ความกว้างเส้นป้อนสัญญาณเป็นการปรับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ให้เข้าใกล้ศูนย์ และความยาวเส้นป้อนสัญญาณกับความยาวของแพตช์ผนังเป็นการปรับค่าอัตราส่วนแชนให้น้อยกว่า 3 dB และได้สรุปขั้นตอนการออกแบบจากการศึกษาผลกระทบของประสิทธิภาพที่มีต่อสายอากาศ

และส่วนสุดท้ายกล่าวถึง การทดสอบลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์

เอฟไอเดียเอชเอฟสากลต้นแบบ ผลการทดสอบ $|S_{11}| < -15$ dB พบว่ามีความถี่ตั้งแต่ 806 ถึง 970 MHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาเบ้ขอปรึกษาขอเรียนด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(18%) ผลการทดสอบอัตราส่วนแกน พบว่ามีแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกน 3 dB ตั้งแต่ 816 ถึง 963 MHz (13%) และมีค่าอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 840 MHz เท่ากับ 1.7 dB มีค่าอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 900 MHz เท่ากับ 2.5 dB และมีค่าอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 960 MHz เท่ากับ 1.7 dB ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ xz และ yz พบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางทางและความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของโพลาริซร่วมมากกว่า 60 องศา นอกจากนี้ผลการทดสอบอัตราขยายเฉลี่ยพบว่ามีมากกว่า 7.8 dBic ตลอดย่านความถี่ใช้งานบนระบบอาร์เอฟ ไอเดียเอชเอฟสากล ผลจากการทดสอบหาระยะทางไกลที่สุดที่สามารถติดต่อสื่อสารบนระบบอาร์เอฟ ไอเดียเอชเอฟพบว่า สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ในช่วงระยะทาง 0 ถึง 7.1 m

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการวิเคราะห์และทดสอบจะพบว่าสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟ ไอเดียเอชเอฟสากล จะเห็นว่าโครงสร้างแผ่นพับของสายอากาศสามารถทำให้ให้กระแสที่ไหลบริเวณผิวมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\pi}{2}$ ซึ่งส่งผลให้สายอากาศมีการโพลาริซวงกลมหมุนซ้าย และการเพิ่มแพตช์พาราซิติกส์ร่วมกับการตัดมุมสองด้านสามารถเพิ่มแบนด์วิดธ์อัตราส่วนแกนได้ ในทางกลับกันหากปรับแผ่นพับให้เส้นป้อนสัญญาณและแพตช์ผนังวางตัวทางด้านซ้าย จะส่งผลในทางตรงกันข้ามต่อการโพลาริซ ให้สายอากาศมีการโพลาริซวงกลมหมุนขวา แต่เมื่อทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะสังเกตเห็นว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยังคงมีค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่ต่ำอยู่ ดังนั้นในการปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถทำได้โดยการตัดแปลงในส่วนของระนาบกราวนด์ให้มีลักษณะที่มีมิติความสูงเพื่อปรับปรุงค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง ต่อมาการปรับปรุงอัตราขยายให้กับสายอากาศ สามารถออกแบบสายอากาศที่ได้นำเสนอให้เป็นสายอากาศต่อแถบลำดับ (Array antenna) ด้วยเทคนิควิธีนี้ส่งผลทำให้สายอากาศมีโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นเป็นเท่าตัวและยุ่งยากต่อการสร้างและออกแบบ โดยมีวงจรแบ่งกำลังงานนำมาใช้งานร่วมกับสายอากาศ นอกจากนี้และยังทำให้ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของโพลาริซร่วมแคบลง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศและได้ทำการทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้สนใจสามารถนำไปพัฒนาสายอากาศและปรับปรุงโครงสร้างให้มีรูปแบบที่ง่ายขึ้นและหลากหลายเพื่อนำไป

ประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd ed. New Jersey: Wiley, 2005.
- [2] S. Gao, Q. Luo, and F. Zhu, *Circularly Polarized Antenna*, West Sussex: Wiley, 2014.
- [3] P. Nayeri, K.-F. Lee, A. Z. Elsherbeni, and F. Yang, "Dual-band circularly polarized antennas using stacked patches with asymmetric U-slots," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, Vol. 10, pp. 492–495, 2011.
- [4] R.Q. Lee, T. Talty, and K.F. Lee, "Circular polarization characteristics of stacked microstrip antennas," *Electronics Letters 6th*, Vol. 26, pp. 2109–2110, Dec. 1990.
- [5] J.-S. Row, "The design of a squarer-ring slot antenna for circular polarization," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 53, No. 6, pp. 1967–1972, June 2005.
- [6] R. Joseph, S. Nakao, and T. Fukusako, "Broadband square slot antenna for circular polarization with separated L-probes and stubs in the slot," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E94-b, No. 4, pp. 951–959, Apl. 2011.
- [7] Y.-X. Guo, C.-L. Mak, K.-M. Luk, and K.-F. Lee, "Analysis and design of L-probe proximity fed-patch antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 49, No. 2, pp. 145–149, Feb. 2001.
- [8] K. L. Lau and K. M. Luk, "A novel wide-band circularly polarized patch antenna based on L-probe and aperture-coupling techniques," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 53, No. 1, pp. 577–580, Jan. 2005.
- [9] F.-S. Chang, K.-L. Wong, and T.-W. Chiou, "Low-cost broadband circularly polarized patch antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 51, No. 10, pp. 3006–3009, Oct. 2003.
- [10] K. L. Chung, "A wideband circularly polarized H-shaped patch antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 58, No. 10, pp. 3379–3383, Oct. 2010.
- [11] H. Oraizi and R. Pazoki, "Wideband circularly polarized aperture fed rotated stacked patch antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 61, No. 3, pp. 1048–1054, Mar. 2013.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] Nasimuddin, X. Qing, and Z. N. Chen, "A wideband circularly polarized stacked slotted microstrip patch antenna," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, Vol. 55, No. 6, pp. 84–99, Dec. 2013.
- [13] N. Zakaria, S. K. A. Rahim, T. S. Ooi, K. G. Tan, A. W. Reza, and M. S. A. Rani, "Design of stacked microstrip dual-band circular polarized antenna," *Radio Engineering*, Vol. 21, No. 3, pp. 875–880, Sep. 2012.
- [14] X. Chen, G. Fu, S.-X. Gong, Y.-L. Yan, and W. Zhao, "Circularly polarized stacked annular-ring microstrip antenna with integrated feeding network for UHF RFID readers," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, Vol. 9, pp. 542–545, 2010.
- [15] Z. N. Chen, X. Qing, and H. L. Chung, "A universal UHF RFID reader antenna," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 57, No. 5, pp. 1275–1282, May 2009.
- [16] Z. Wang, S. Fang, S. Fu, and S. Jia, "Single-fed broadband circularly polarized stacked patch antenna with horizontally meandered strip for universal UHF RFID applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 59, No. 4, pp. 1066–1073, Apr. 2011.
- [17] C.-C. Chen, C.-Y.-D. Sim, and H.-L. Lin, "Annular Ring Slot Antenna Design with Reconfigurable Polarization," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering (2015)*, vol. 26, no. pp. 110-120, Feb. 2016.
- [18] X. Y. Liu, Y. Liu, and M. M. Tentzeris, "A novel circularly polarized antenna with coin-shaped patches and a ring-shaped strip for worldwide UHF RFID applications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 707–710, 2015.
- [19] E. Mireles and S. K. Sharma, "A novel wideband circularly polarized antenna for worldwide UHF band RFID reader applications," *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 42, pp. 23–44, Jun. 2012.
- [20] J. H. Lu and S. F. Wang, "Planar broadband circularly polarized antenna with square slot for UHF RFID reader," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 1, pp. 45–53, Jan. 2013.
- [21] X. Chen, G. Fu, S. X. Gong, Y. L. Yan, and W. Zhao, "Circularly polarized stacked annular-ring microstrip antenna with integrated feeding network for UHF RFID readers," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 542–545, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22]C.-Y.-D. Sim and C.-J. Chi, “A slot loaded circularly polarized patch antenna for UHF RFID reader,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 10, pp. 4516–4521, Oct. 2012.
- [23]C.-H. K. Chin, Q. Xue, and H. Wong, “Broadband patch antenna with a folded plate pair as a differential feeding scheme,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 55, No. 9, pp. 2461–2467, Sep. 2007.
- [24]Motorola Solutions “Motorola RFID Antenna Family,” [Online]. Available : <http://www.barcodesinc.com/pdf/Motorola/an-series.pdf>, accessed 12 January 2016.
- [25]MTI Wireless Edge Ltd “MTI MT-242043/TRH/A/K,” [Online]. Available : <http://www.mtiwe.com/?CategoryID=276&ArticleID=279>, accessed 12 January 2016.
- [26]GAORFID Ltd “Gao RFID Inc/216023,” [Online]. Available : <http://gaorfid.com/860-to-960-mhz-mid-range-rfid-reader-model-216023/>, accessed 12 January 2016.
- [27]Alien Technology “Alien ALR-8696-C,” [Online]. Available : <http://www.alientechnology.com/wp-content/uploads/Alien-Technology-ALR-8696-C-Antenna.pdf>, accessed 12 January 2016.
- [28]CST Microwave Studio User’s Manual (CST, 2013)

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล ว่าที่ ร.ต.สิทธิชัย เด่นตรี
- วัน เดือน ปีเกิด 5 กุมภาพันธ์ 2526
- ที่อยู่ เลขที่ 10 ซอยราษฎร์อุทิศ 2/2 ถนนราษฎร์อุทิศ แขวงแสนแสบ เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510 โทร.0-2919-5661
- ประวัติการศึกษา 2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2554 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ทุนการศึกษา ทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ภายใต้เลขที่สัญญา TGIST 01-54-017
- ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) สายอากาศโพลารไรซ์วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี
2.) สายอากาศแบนด์กว้างสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี
- ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย
พ.ศ.2549-2554 วิศวกรฝ่ายบริการ บริษัท จีเอเบิล จำกัด
- วารสารที่ได้รับการตีพิมพ์
- [1] S. Dentre, C. Phongcharoenpanich, and K. Kaemarungsi, "Single-Fed Broadband Circularly Polarized Unidirectional Antenna using Folded Plate with Parasitic Patch for Universal UHF RFID Readers," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2016.
- บทความที่ได้รับการตีพิมพ์
- [1] S. Dentre, C. Phongcharoenpanich, and K. Kaemarungsi, "A UWB-GPR Unidirectional Antenna using CPW-Fed Printed Bush Tree Structure," *Proceedings of the 2012 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2012)*, Bangkok, pp. 475-478, Nov. 2012.

- [2] S. Dentri, C. Phongcharoenpanich, and K. Kaemarungsi, "A Windmill Antenna above Shrouded Reflector," *Proceedings of the 2013 Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP2013)*, Chiangmai, pp. 35-36, Aug. 2013.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้